



**Humberto Cardoso de Carvalho**

**Análise por elementos finitos da estrutura de  
uma embarcação em içamento por ponto único**

**Projeto de graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de  
Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Prof. Anderson Pereira

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2025



**Humberto Cardoso de Carvalho**

**Análise por elementos finitos da estrutura de  
uma embarcação em içamento por ponto único**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao programa de graduação em engenharia mecânica, da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de engenheiro mecânico.

**Prof. Anderson Pereira**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de Fevereiro de 2025

Dedico este trabalho aos meus pais, Fernanda e Ricardo,  
por todo o incentivo e suporte incondicional que  
me deram ao longo dos anos. Obrigado por tudo.

## **Agradecimentos**

Agradeço aos meus pais, que me proporcionaram cursar engenharia mecânica em uma faculdade de excelência, que sempre me incentivaram em todos os aspectos da minha vida. Agradeço por todos os ensinamentos e por toda a dedicação e empenho que tiveram na minha formação.

À minha namorada, Michelle, por todo o carinho, compreensão, incentivo e parceria que sempre demonstrou ao meu lado, você foi essencial, muito obrigado.

Ao meu orientador, Prof. Anderson Pereira, pela orientação que possibilitou que este trabalho fosse realizado. Obrigado pela atenção, paciência e as pelas inúmeras contribuições.

Aos professores do curso, com quem tive a oportunidade de adquirir os conhecimentos que contribuíram para a minha formação.

À Tidewise, empresa onde iniciei minha jornada como engenheiro mecânico, por permitir a realização deste trabalho sobre o projeto estrutural de uma das embarcações da empresa, e por disponibilizar as ferramentas de software e recursos computacionais para a realização deste trabalho.

Aos meus companheiros de trabalho da equipe de Hardware, por toda a compreensão, ajuda e incentivo para concluir este trabalho.

## Resumo

Carvalho, Humberto Cardoso de; Pereira, Anderson. **Análise por elementos finitos da estrutura de uma embarcação em içamento por ponto único**. Rio de Janeiro, 2025. 54p. Projeto de Graduação – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho apresenta uma análise estrutural feita com a embarcação Tupan, um USV multipropósito desenvolvido no Brasil, durante uma operação de içamento por ponto único. O içamento por ponto único gera esforços específicos, distintos dos comumente considerados em projetos estruturais de embarcações, sendo esses ligados às forças dinâmicas e estáticas decorrentes da navegação. Os esforços concentrados geram um desafio incomum no projeto estrutural de embarcações que tem necessidade deste tipo de içamento. Com o uso dos *softwares* de modelagem 3D SolidWorks e o de análise numérica ANSYS, o içamento da embarcação foi modelado com o método dos elementos finitos para avaliar a resposta da estrutura. As análises de tensão e deformação feitas para o USV demonstraram que a estrutura atende aos requisitos desta operação.

## Palavras-chave

Método dos elementos finitos; Análise estrutural; Veículo de superfície não tripulado; Ansys.

## Abstract

Carvalho, Humberto Cardoso de; Pereira, Anderson (Advisor). **Finite element analysis of a vessel in single point lifting conditions**. Rio de Janeiro, 2025. 54p. Projeto de graduação – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents a structural analysis conducted on the Tupan vessel, a multipurpose USV developed in Brazil, during a single-point lifting operation. Single-point lifting generates specific loads that differ from those commonly considered in ship structural designs, as they are associated with the dynamic and static forces resulting from navigation. The concentrated loads pose an uncommon challenge in the structural design of vessels that require this type of lifting. Using the 3D modeling software SolidWorks and the numerical analysis software ANSYS, the vessel's lifting operation was modeled using the finite element method to assess the structure's response to the applied loads. The stress and deformation analyses performed on the USV demonstrated that the structure meets the requirements for this operation.

## Keywords

Finite element analysis; Structural analysis; Unmanned Surface Vessel; Ansys.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>13</b>
1.1	Objetivos	16
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>17</b>
2.1	Método dos elementos finitos	17
2.1.1	Análise preliminar	18
2.1.2	Pré-processamento	19
2.1.3	Resolução do problema	20
2.1.4	Pós-processamento	20
<b>3</b>	<b>Normas de projeto</b>	<b>22</b>
3.1	Carga estática equivalente de projeto	22
3.2	Tensão admissível	23
<b>4</b>	<b>Modelo Simplificado</b>	<b>24</b>
4.1	Geometria do modelo	24
4.2	Malha de elementos finitos	24
4.3	Carregamentos	26
4.4	Condições de contorno	26
4.5	Alinhamento do CG e do ponto de içamento	28
4.6	Replicação das configurações para simulação	28
4.7	Análise de resultados	29
<b>5</b>	<b>Análise Estrutural</b>	<b>31</b>
5.1	Modelagem da estrutura	31
5.2	Configuração para análise de elementos finitos	32
5.3	Importação da geometria	33
5.4	Definição do material	35
5.5	Malha de elementos finitos	36
5.6	Aplicação dos carregamentos	39
5.7	Definição do ponto de içamento	41
5.8	Aplicação das condições de contorno	43
5.9	Resultados preliminares	43
5.10	Alinhamento do CG e do ponto de içamento	44
5.11	Replicação das condições do içamento	45
5.12	Resultados	46
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>52</b>

## Lista de figuras

Figura 1.1	Içamento de embarcação de pequeno porte (Fonte: [6])	13
Figura 1.2	Içamento por <i>travel lift</i> de uma embarcação (Fonte: [11])	14
Figura 1.3	Içamento por ponto único de uma embarcação de resgate (Fonte: [9])	14
Figura 1.4	USV Tupan sendo içado por ponto único (Fonte: Própria)	16
Figura 2.1	Viga I discretizada com elementos finitos (Fonte: [1])	17
Figura 2.2	Exemplos de tipos de elementos (Fonte: [10])	18
Figura 2.3	Procedimentos da análise de elementos finitos (Fonte: [5])	18
Figura 2.4	Convergência dos resultados de uma análise de elementos finitos (Fonte: [5])	20
Figura 4.1	Geometria do modelo simplificado (Fonte: SolidWorks 2022 SP05 (captura do autor, 2025))	24
Figura 4.2	Malha de elementos finitos do modelo simplificado (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	25
Figura 4.3	Configuração da malha de elementos finitos (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	25
Figura 4.4	Carregamentos aplicados no modelo simplificado (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	26
Figura 4.5	Condições de contorno aplicadas no modelo simplificado (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	26
Figura 4.6	Posição do CG do modelo simplificado (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	27
Figura 4.7	Modelo simplificado reposicionado (Fonte: SolidWorks 2022 SP05 (captura do autor, 2025))	28
Figura 4.8	Configurações do modelo simplificado reposicionado (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	29
Figura 4.9	Tensão equivalente de von-Mises no modelo simplificado (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	29
Figura 4.10	Deformação total no modelo simplificado (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	30
Figura 5.1	Vista isométrica da estrutura da embarcação (Fonte: SolidWorks 2022 SP05 (captura do autor, 2025))	31
Figura 5.2	Modelo de superfícies (Fonte: SolidWorks 2022 SP05 (captura do autor, 2025))	32
Figura 5.3	Fluxo de trabalho para a simulação estrutural estática (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	32
Figura 5.4	Geometria inserida no Ansys (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	33
Figura 5.5	Corpos com espessura de 4mm (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	33
Figura 5.6	Corpos com espessura de 2,5mm (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	34



Figura 5.7	Corpos com espessura de 3,175mm (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	34
Figura 5.8	Corpos com espessura de 4,76mm (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	34
Figura 5.9	Corpos com espessura de 10mm (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	35
Figura 5.10	Definição do material (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	36
Figura 5.11	Malha de elementos finitos (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	37
Figura 5.12	Conexão da malha (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	37
Figura 5.13	Configuração da malha de elementos finitos (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	38
Figura 5.14	Gráfico de qualidade dos elementos da malha (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	38
Figura 5.15	Sistema de coordenadas adotado (Fonte: [13])	40
Figura 5.16	Fixação do olhal de içamento (Fonte: SolidWorks 2022 SP05 (captura do autor, 2025))	40
Figura 5.17	Aplicação dos carregamentos na estrutura (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	41
Figura 5.18	Olhal de içamento (Fonte: SolidWorks 2022 SP05 (captura do autor, 2025))	42
Figura 5.19	Ponto de içamento ( <i>Remote Point</i> ) (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	42
Figura 5.20	Aplicação das condições de contorno no modelo (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	43
Figura 5.21	Posição do CG do modelo (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	43
Figura 5.22	Geometria reposicionada (Fonte: SolidWorks 2022 SP05 (captura do autor, 2025))	45
Figura 5.23	Carregamentos e condições de contorno aplicados no modelo reposicionado (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	46
Figura 5.24	Deformação total da estrutura, vista lateral (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	46
Figura 5.25	Deformação total da estrutura, vista superior (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	47
Figura 5.26	Distribuição das tensões na estrutura, vista superior (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	47
Figura 5.27	Distribuição das tensões na estrutura, vista inferior (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	48
Figura 5.28	Distribuição das tensões na estrutura interna (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	49
Figura 5.29	Concentrador de tensões encontrado na estrutura (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))	50
Figura 5.30	Estrutura interna da embarcação Tupan (Fonte: SolidWorks 2022 SP05 (captura do autor, 2025))	50

Figura 5.31 Estrutura interna do projeto Tupan MK2 (Fonte: SolidWorks 2022 SP05 (captura do autor, 2025))

## Lista de tabelas

Tabela 4.1	Carregamentos arbitrários aplicados no modelo simplificado.	26
Tabela 4.2	Verificação da posição do CG.	27
Tabela 5.1	Propriedades mecânicas da liga 5083-O.[12]	36
Tabela 5.2	Informações de massa da embarcação.	39
Tabela 5.3	Verificação da posição do CG.	44
Tabela 5.4	Posição dos carregamentos no sistema de coordenadas alternativo.	45

## **Lista de Abreviaturas**

USV - *Unmanned Surface Vessel*

CAD - *Computer Aided Design*

LCG - *Longitudinal Center of Gravity*

TCG - *Tranversal Center of Gravity*

VCG - *Vertical Center of Gravity*

CG - Centro de Gravidade

MEF - Método dos Elementos Finitos

# 1

## Introdução

As operações de içamento de embarcações de pequeno porte são feitas através de cintas que suportam a embarcação, passadas por baixo do casco em pontos reforçados para suportar esses carregamentos. A natureza dessas operações exige uma infraestrutura de equipamentos específica. São necessárias grandes vigas, conhecidas como *spreader bars*, para posicionar as cintas em posição favorável para o içamento, com a utilização de guindastes, como mostrado na Figura 1.1 [7].



Figura 1.1: Içamento de embarcação de pequeno porte (Fonte: [6])

Para situações onde há uma necessidade constante para o içamento de embarcações, como em estaleiros ou marinas, é utilizado maquinário específico para lidar com as particularidades do içamento de embarcações, com o uso de cintas ajustáveis de forma simplificada. Os denominados *travel lifts* são guindastes específicos para o içamento de embarcações, necessitando de uma instalação física característica no cais, como mostrado na Figura 1.2 [7].



Figura 1.2: Içamento por *travel lift* de uma embarcação (Fonte: [11])

Para mobilização de embarcações de forma mais rápida e prática, necessitando de menos infraestrutura para o içamento, é utilizado o içamento por ponto único, onde é preciso apenas um guindaste com carga de trabalho adequada à embarcação. A Figura 1.3 mostra uma embarcação sendo lançada com o içamento por ponto único do convés de uma embarcação maior para uma operação de resgate.



Figura 1.3: Içamento por ponto único de uma embarcação de resgate (Fonte: [9])

O içamento de embarcações gera esforços localizados que devem ser suportados pela estrutura. Entretanto, é importante ressaltar que o içamento por ponto único provoca esforços por flexão longitudinal da embarcação ao

redor do ponto de içamento. Esta condição não é comum no projeto estrutural de embarcações, sendo um conceito aplicado a embarcações de pequeno porte com uma necessidade específica de içamento facilitado que justifique os ganhos de massa na estrutura, perda de volume útil e o maior investimento de fabricação.

A classe de embarcações não tripuladas denominadas USVs, introduzida nas últimas décadas, revolucionou o mercado naval, possibilitando a prestação de serviços sem risco à vida humana e com custos operacionais muito reduzidos [8][2]. Essas embarcações têm como característica a necessidade de içamento facilitado para operar em locais com infraestrutura mínima, incluindo a mobilização a bordo de navios maiores. Ao somar essa necessidade ao tamanho reduzido dessas embarcações, o içamento por ponto único torna-se a solução mais eficiente [17].

O estudo proposto por esse trabalho é feito sobre a embarcação Tupan, um USV multipropósito construído em 2020 em alumínio, o primeiro do tipo a operar no Brasil. Na época, o contexto experimental da produção deste tipo de embarcação no cenário nacional possibilitou algumas liberdades de projeto. O cenário atual é diferente. Com discussões sobre a regulamentação da operação dessas embarcações, há um esforço para a certificação desses sistemas perante entidades classificadoras presentes no meio *offshore*. Este trabalho pretende analisar a estrutura da embarcação nas condições de içamento de projeto estipuladas pelas normas relevantes. A Figura 1.4 mostra o USV Tupan sendo içado.



Figura 1.4: USV Tupan sendo içado por ponto único (Fonte: Própria)

## 1.1 Objetivos

Esse trabalho tem como objetivo analisar a resposta da estrutura da embarcação Tupan aos esforços relacionados ao içamento por um único ponto. Para tal, serão utilizadas as ferramentas de modelagem 3D SolidWorks e a de análise numérica Ansys, que possibilita a realização de análises de tensão e deformação da estrutura em reação aos esforços do içamento. O trabalho será regido pelas condições de contorno vistas no problema, utilizando-se dos carregamentos reais referentes à massa dos componentes da embarcação, aplicados nas condições de içamento descritas pelas normas relevantes para o projeto da embarcação.



## 2

## Fundamentação Teórica

### 2.1

#### Método dos elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é aplicado em diversas áreas da engenharia mecânica para resolver numericamente problemas complexos, que não possuem soluções analíticas exatas. Entre estes problemas, podemos citar como principais as análises estruturais estáticas, térmicas, dinâmicas e de fluidos. Tratando das análises estruturais estáticas, foco deste trabalho, o MEF possibilita de forma simplificada a análise da estrutura de interesse sob diversas condições operacionais [1].

O MEF funciona com base na discretização do domínio de um problema contínuo em uma malha de elementos com geometria conhecida. Os elementos são definidos por pontos nodais, ou nós, aos quais são associadas equações diferenciais do problema a ser resolvido [1].

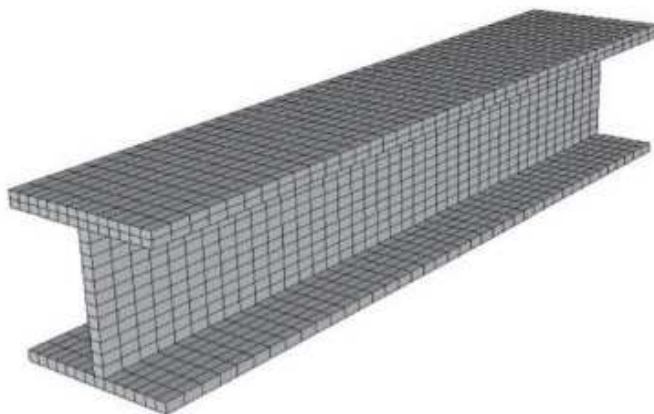


Figura 2.1: Viga I discretizada com elementos finitos (Fonte: [1])

Existem diversos tipos de elementos finitos, que foram desenvolvidos para melhor representar os diferentes componentes presentes em um modelo estrutural, dependendo da simplificação utilizada no modelo. A Figura 2.2 mostra alguns exemplos de tipos de elementos finitos existentes [10].

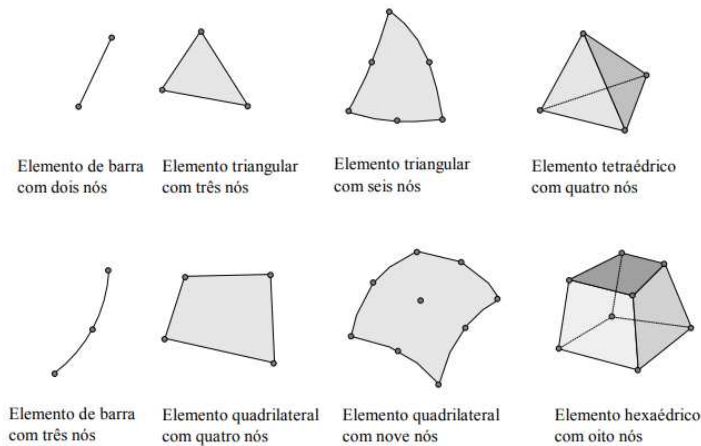


Figura 2.2: Exemplos de tipos de elementos (Fonte: [10])

O diagrama mostrado na Figura 2.3 representa os procedimentos necessários para uma análise estrutural em elementos finitos. As etapas do processo serão detalhadas nos subcapítulos seguintes.



Figura 2.3: Procedimentos da análise de elementos finitos (Fonte: [5])

### 2.1.1

#### Análise preliminar

A análise preliminar consiste na idealização do problema real em um modelo estrutural simplificado, identificando a mecânica do problema e o comportamento esperado da estrutura. Por meio de procedimentos analíticos, é possível obter uma solução aproximada para o problema, apesar de, na maioria das vezes, não ser possível obter uma solução analítica completa para

o problema. Diagramas de corpo livre e equilíbrio de forças, por exemplo, são ferramentas úteis para se obter uma primeira noção dos esforços presentes no modelo e, por consequência, as deformações esperadas e os pontos de máximo. Os resultados obtidos na análise preliminar devem ser comparados com os resultados finais do modelo. Diferenças muito grandes entre os dois devem ser consideradas como alertas graves, sendo necessária uma revisão do modelo [5].

### 2.1.2

#### **Pré-processamento**

O pré-processamento é a etapa onde o problema a ser resolvido é preparado em um modelo de elementos finitos, definindo como o domínio é discretizado, e aplicando as condições de contorno e carregamentos [5].

O modelo de elementos finitos não precisa ser, necessariamente, uma réplica do modelo físico, e sim uma representação matemática do problema real. Dependendo do interesse da análise, podem ser feitas diversas simplificações para a modelagem do problema. Desta forma, o entendimento do comportamento físico do problema é essencial para a sua representação num modelo de elementos finitos [5].

A partir do modelo estrutural desenvolvido, é necessário escolher os tipos de elementos que serão utilizados para fazer a discretização do domínio em elementos finitos. Foram citados anteriormente alguns exemplos de elementos finitos existentes. Para esse trabalho, serão utilizados elementos de casca. Este tipo de elemento foi desenvolvido para representar de forma eficiente chapas finas, precisando de menos elementos para uma boa representação do que quando comparado a elementos sólidos [5].

A ordem de interpolação dos elementos é outro ponto importante a ser escolhido. Elementos de maior ordem possuem mais nós para a interpolação dos deslocamentos encontrados, e por isso, de forma geral, representam com maior precisão a resposta de uma estrutura [5].

A escolha de um tamanho adequado para os elementos da malha é importante para obter resultados confiáveis. Uma malha com elementos muito grandes pode causar grandes erros, enquanto uma malha com elementos muito pequenos, ou refinada, tem grande custo computacional para a sua resolução, devido ao grande número de nós. O estudo de convergência é uma boa ferramenta para a avaliação do tamanho ideal para o elemento em casos onde não há uma solução exata do problema para comparar ao resultado do modelo de elementos finitos. O estudo de convergência consiste na solução do modelo sucessivas vezes, utilizando malhas cada vez mais refinadas. De forma geral, o tamanho dos elementos cai pela metade a cada solução. Posteriormente, são

comparados os resultados de uma informação de interesse nas soluções. Caso os resultados entre as duas iterações sejam muito diferentes, há necessidade de refinar a malha, até ser observada a convergência. A figura 2.4 ilustra o procedimento de convergência de malha [5].

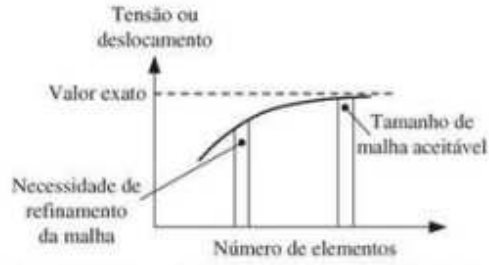


Figura 2.4: Convergência dos resultados de uma análise de elementos finitos (Fonte: [5])

As condições de contorno de um modelo de elementos finitos devem restringir o modelo de forma adequada a não permitir movimentos de corpo rígido, caso contrário, não existiria uma única solução para o problema. É necessário cuidado para implementar condições de contorno que representem de forma realista o modelo físico, já que condições de contorno que restringem excessivamente o modelo geram tensões e deformações irreais quando comparadas ao modelo físico [5].

### 2.1.3

#### Resolução do problema

A solução do problema é feita de forma matricial pelo programa de elementos finitos escolhido. São determinados os valores das informações de interesse para cada nó do modelo. As informações obtidas na resolução serão utilizadas na etapa de pós-processamento para mostrar e interpretar os resultados do modelo. Durante a resolução, são observadas as possíveis falhas da etapa anterior. Os erros observados durante a resolução devem ser investigados para que possam ser corrigidos os erros de pré-processamento do modelo [5].

### 2.1.4

#### Pós-processamento

Após obtidas as soluções para o modelo de elementos finitos, é possível fazer uma avaliação da resposta da estrutura aos carregamentos aplicados. Os programas de elementos finitos atuais permitem a visualização gráfica dos resultados encontrados para a interpretação do usuário. A tarefa de maior

importância no pós-processamento é a interpretação dos resultados utilizando conhecimentos e experiência em mecânica para avaliar as análises de tensão e deformação da estrutura [5].

### 3

## Normas de projeto

Para a modelagem da operação de içamento serão utilizadas as normas de projeto da embarcação Tupan. A norma NR 681, da entidade *Bureau Veritas*, é feita especificamente para a classe de serviço dos USVs, e passa por todos os subsistemas presentes em um USV. Sobre a estrutura da embarcação, foco deste trabalho, é feita uma referência a norma *NR600 HULL STRUCTURE AND ARRANGEMENT FOR THE CLASSIFICATION OF CARGO SHIPS LESS THAN 65 M AND NON CARGO SHIPS LESS THAN 90 M*, que será utilizada em conjunto com a *NR561 HULL IN ALUMINIUM ALLOYS* [15, 14, 12].

As normas citadas abrangem o projeto da embarcação como um todo, passando pelo dimensionamento da seção necessária para a embarcação, reforçadores de painel, critérios de solda, tipos de junção para diferentes perfis estruturais, etc. As normas tratam do projeto estrutural sob diversas condições de carregamento para simular situações ligadas à navegação. Para tal, o projeto naval da embarcação Tupan foi feito de forma conservadora, enquadrado nas normas citadas.

Tais normas não definem nenhum procedimento específico para o projeto do ponto de içamento de uma embarcação. Os pontos de içamento devem ser considerados parte da estrutura principal da embarcação e estão sujeitos aos mesmos critérios de tensão admissível [15, 14, 12].

Além das normas para o projeto estrutural da embarcação, para a modelagem da operação de içamento por ponto único, é necessária também uma norma específica. A norma *STANDARD FOR CERTIFICATION DNV 2.7.1 OFFSHORE CONTAINERS* é utilizada para certificação de içamento para equipamentos em ambiente marítimo e será utilizada para a determinação das condições de contorno do problema e dos critérios de tensão admissível para a interpretação dos resultados do modelo de elementos finitos [16].

### 3.1

#### Carga estática equivalente de projeto

Para operações de içamento em contexto *offshore*, com ondas de altura efetiva de até 6 m, [16] define uma carga estática de projeto para a estrutura

primária içada. Esta carga estática equivalente de projeto absorve diversos fatores de segurança, entre eles, o fator de amplificação dinâmica e os fatores de consequência ligados à natureza da operação. O método para obtenção da carga estática equivalente está descrito abaixo:

$$F_L = 2.5 * R * g$$

Sendo:

$F_L$  - Carga de projeto [N]

$R$  - Massa içada [kg]

$g$  - Aceleração da gravidade

### 3.2

#### Tensão admissível

Para a verificação dos resultados obtidos pelo modelo de elementos finitos, [14] define que a resistência do material utilizado é minorada com o fator mostrado abaixo. O critério de tensão admissível tem como objetivo a consideração de falhas no material e efeitos de corrosão esperados devido ao ambiente de operação [14, 12].

$$\sigma_c = 0.85 * R_y$$

Sendo:

$\sigma_c$  - Tensão admissível [ $N/mm^2$ ]

$R_y$  - Limite de escoamento mínimo (de projeto)

## 4

### Modelo Simplificado

Para melhor entendimento do problema, a operação de içamento foi modelada de forma simplificada. Ela ocorre sem que exista, necessariamente, o alinhamento preciso do ponto de içamento e o CG da estrutura. Dessa forma, existe um período transiente na resposta da estrutura antes que aconteça o alinhamento e a estrutura chegue a uma posição de equilíbrio estático. Este trabalho tem interesse somente na resposta permanente. Com o objetivo de realizar uma simulação estrutural estática, foram adotados os procedimentos descritos neste capítulo.

Foram feitas análises estáticas da operação de içamento utilizando a carga equivalente definida anteriormente, com a intenção de obter um resultado equivalente a uma análise dinâmica nos cenários previstos pela norma. Esse procedimento simplifica a consideração de efeitos dinâmicos complexos presentes no ambiente para a operação de içamento.

#### 4.1

##### Geometria do modelo

Foi modelada no *software Solidworks* uma placa plana com diversos pontos para aplicação de carregamentos arbitrários e um ponto central para simular o içamento. A modelagem foi feita utilizando um corpo de superfície que terá uma espessura atribuída posteriormente.



Figura 4.1: Geometria do modelo simplificado (Fonte: SolidWorks 2022 SP05 (captura do autor, 2025))

#### 4.2

##### Malha de elementos finitos

Neste modelo simplificado, foi atribuída uma espessura de 20 mm para a placa plana. Foi definida uma malha de elementos finitos com elementos



quadriláteros de interpolação quadrática. Foi definido um tamanho fixo de 15 mm para os elementos da malha, esse tamanho é referente às arestas do elemento, seja ele quadrilátero ou trilátero.

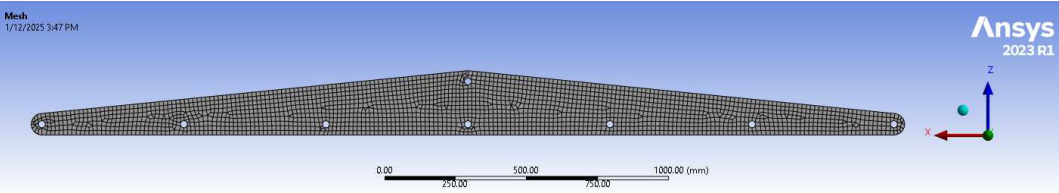


Figura 4.2: Malha de elementos finitos do modelo simplificado (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

Details of "Mesh"	
Display	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Quadratic
Element Size	15.0 mm
Sizing	
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Aggressive Mechanical
Target Element Quality	Default (5.e-002)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Element Quality
Min	0.49381
Max	0.99999
Average	0.9836
Standard Deviation	4.1759e-002
Inflation	
Batch Connections	
Advanced	
Statistics	

Figura 4.3: Configuração da malha de elementos finitos (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

A Figura 4.3 retrata as configurações da malha gerada. Podemos destacar a qualidade dos elementos gerados, com uma média de qualidade dos elementos equivalente a 0,9836. A qualidade dos elementos pode ser calculada utilizando alguns critérios disponibilizados pelo ANSYS, foi escolhido o critério *element quality*, que avalia os elementos por distorção da geometria comparada à forma esperada do elemento. É feita uma distribuição entre 0 e 1, sendo 1 equivalente a um elemento perfeito.

4.3  
Carregamentos

Foram aplicadas massas concentradas na placa para provocar um desalinhamento entre o CG e o ponto de içamento. Os valores referentes aos carregamentos podem ser vistos na Tabela 4.1.

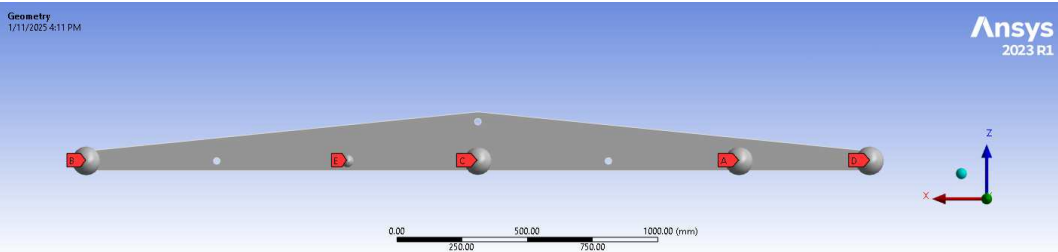


Figura 4.4: Carregamentos aplicados no modelo simplificado (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

Carregamento	Massa [kg]
A	100
B	150
C	350
D	50
E	100

Tabela 4.1: Carregamentos arbitrários aplicados no modelo simplificado.

4.4  
Condições de contorno

Foram aplicadas as condições de contorno ao modelo, mostradas na Figura 4.5. O ponto de içamento foi fixo, com todos os graus de liberdade translacionais e rotacionais restringidos e foi aplicada a aceleração da gravidade no modelo.

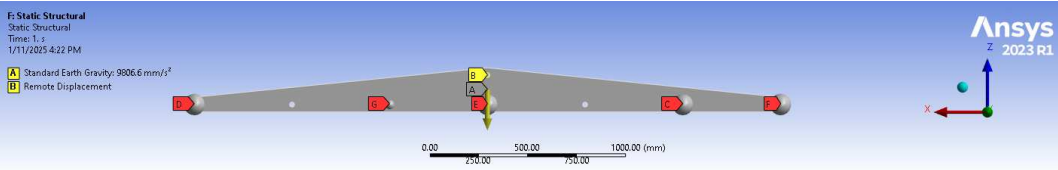


Figura 4.5: Condições de contorno aplicadas no modelo simplificado (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

As condições de contorno aplicadas no modelo neste ponto não representam de forma realista a operação de içamento. Devido ao desalinhamento entre o CG e o ponto de içamento, a estrutura sofre um momento necessário para se manter em equilíbrio, com rotação restrita no eixo  $y$ . Esse momento não é condizente com a operação real, com rotação livre. Esse procedimento foi realizado para a determinação da posição do CG do conjunto com os carregamentos aplicados no modelo. O uso de uma simulação de elementos finitos para determinar a posição do CG pode parecer trivial neste caso plano, entretanto, será útil quando aplicada no modelo tridimensional completo. A Figura 4.6 mostra as coordenadas no CG obtidas pelo software ANSYS, com o valor da massa total do modelo dado em toneladas e os valores das coordenadas dados em milímetros.

```
TOTAL MASS = 0.82082
The mass principal axes coincide with the global Cartesian axes

CENTER OF MASS (X,Y,Z)=    121.83      0.0000    -146.24
```

Figura 4.6: Posição do CG do modelo simplificado (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

Os resultados obtidos podem ser verificados calculando manualmente a posição do centro de gravidade do modelo, notando que foi levada em consideração a massa da placa. A posição e massa de todos os carregamentos e o resultado calculado manualmente estão mostrados na Tabela 4.2. O resultado encontrado pelo cálculo manual é muito próximo ao encontrado pelo Ansys.

Carregamento	Massa [kg]	x [mm]	y [mm]	z [mm]
A	100	-1000	0	-150
B	150	1500	0	-150
C	350	0	0	-150
D	50	-1500	0	-150
E	100	500	0	-150
Placa	70,815	0	0	-106
Total	820,815	121,83	0,00	-146,20

Tabela 4.2: Verificação da posição do CG.

## 4.5

### Alinhamento do CG e do ponto de içamento

Para ter um modelo que represente de forma realista a operação de içamento em regime permanente, a placa plana foi reposicionada no espaço utilizando as coordenadas encontradas anteriormente para o CG do modelo. A Figura 4.7 mostra o modelo em sua posição de equilíbrio para a operação de içamento.

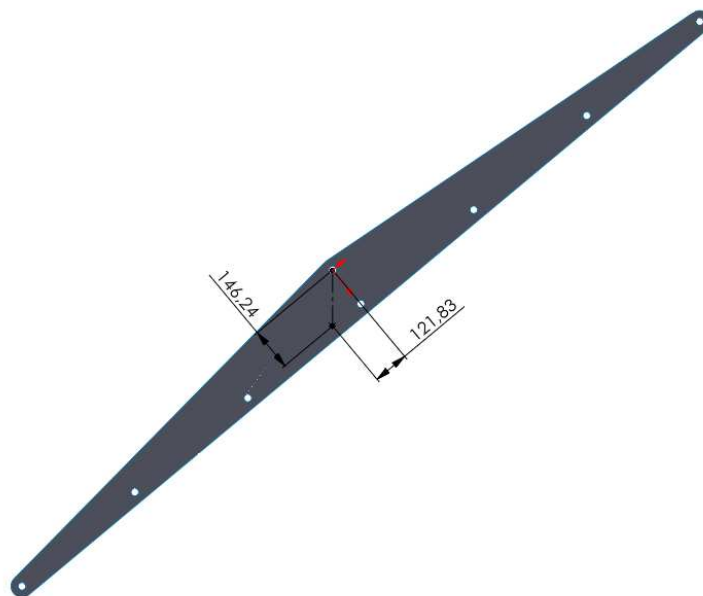


Figura 4.7: Modelo simplificado reposicionado (Fonte: SolidWorks 2022 SP05 (captura do autor, 2025))

## 4.6

### Replicação das configurações para simulação

As mesmas condições de contorno e carregamentos foram replicadas no modelo reposicionado para a realização das simulações da operação de içamento.

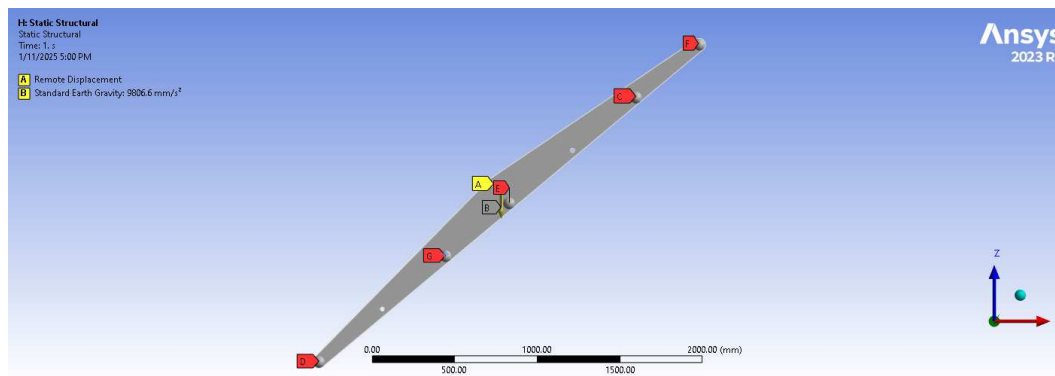


Figura 4.8: Configurações do modelo simplificado reposicionado (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

## 4.7

### Análise de resultados

Foram realizadas análises de tensão e deformação do modelo, onde foi possível observar a distribuição esperada ao longo da estrutura. As Figuras 4.9 e 4.10 mostram o modelo em sua configuração deformada.

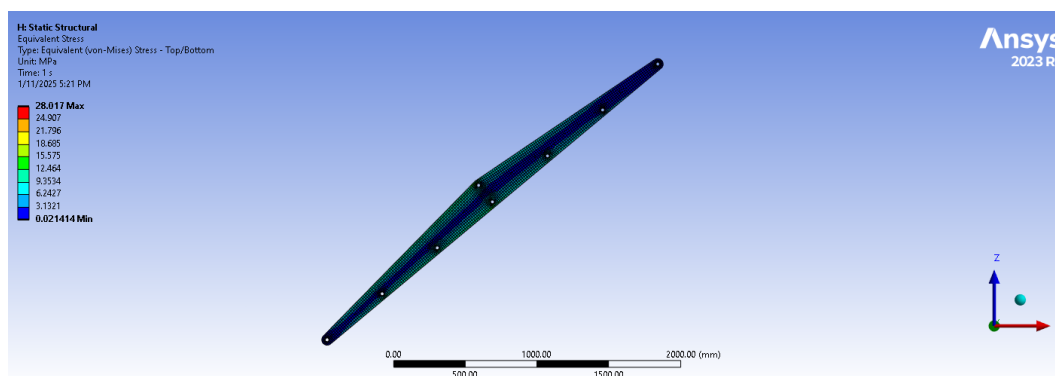


Figura 4.9: Tensão equivalente de von-Mises no modelo simplificado (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

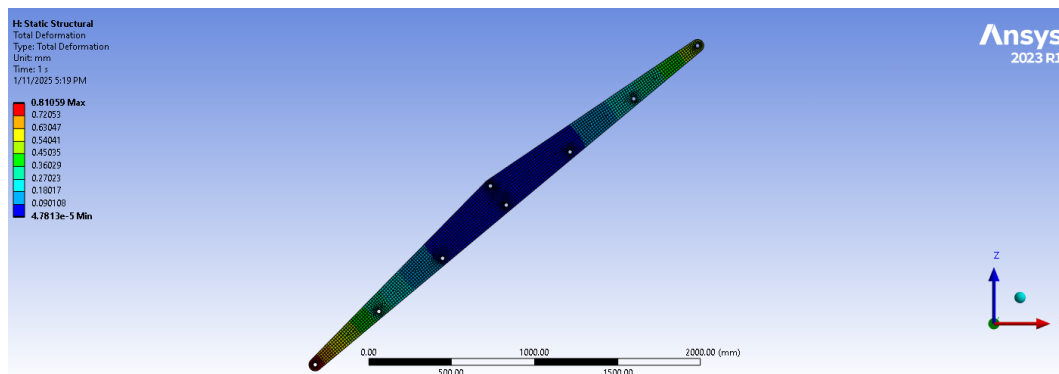


Figura 4.10: Deformação total no modelo simplificado (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

A partir dos resultados encontrados, o procedimento para a representação da operação de içamento em regime permanente foi considerado válido.

## 5

### Análise Estrutural

A análise estrutural da embarcação será feita seguindo o mesmo procedimento para representação da operação de içamento em regime permanente, demonstrado anteriormente no modelo simplificado.

#### 5.1

##### Modelagem da estrutura

A embarcação já foi fabricada e teve o seu desenvolvimento feito em softwares de CAD 3D. Atualmente, a empresa possui o modelo completo da embarcação na plataforma SolidWorks, que foi disponibilizado para esse trabalho. A partir do projeto estrutural existente, foi feito um trabalho de CAD para gerar um modelo de superfícies para exportação. Esta etapa do trabalho de pré-processamento do modelo é importante para assegurar o contato entre todas as superfícies, garantindo a conexão da malha na análise de elementos finitos.



Figura 5.1: Vista isométrica da estrutura da embarcação (Fonte: SolidWorks 2022 SP05 (captura do autor, 2025))

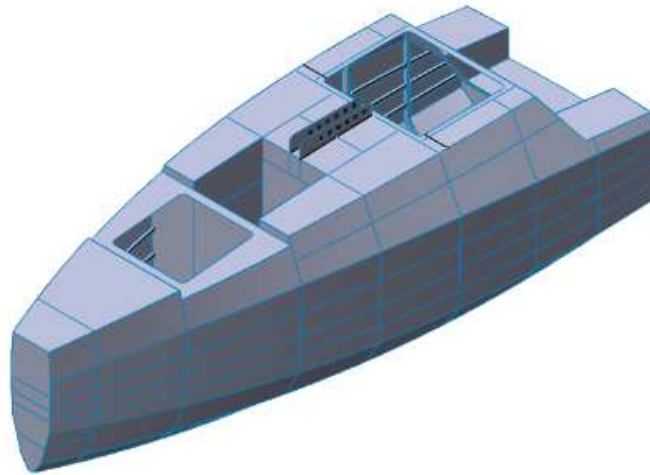


Figura 5.2: Modelo de superfícies (Fonte: SolidWorks 2022 SP05 (captura do autor, 2025))

## 5.2

### Configuração para análise de elementos finitos

A Figura 5.3 apresenta o diagrama de blocos para a simulação estrutural no Ansys Workbench. Nos próximos tópicos, os passos para a realização da simulação e os resultados obtidos serão detalhados. O fluxo mostra a criação de um modelo mecânico, que define a geometria e malha de elementos finitos, alimentando o bloco de simulação estrutural, onde são definidos as condições para a simulação e os resultados desejados [4].

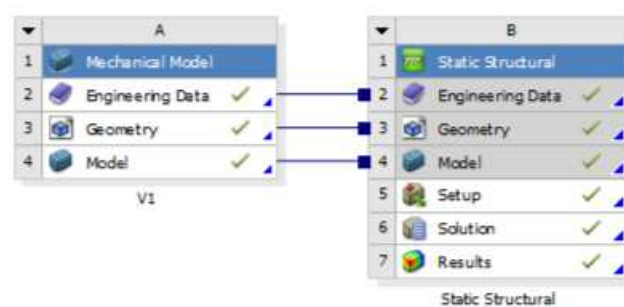


Figura 5.3: Fluxo de trabalho para a simulação estrutural estática (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))



### 5.3

#### Importação da geometria

O modelo de superfícies foi salvo em formato .step e importado na plataforma Ansys, no módulo *Mechanical*, interface gráfica onde serão feitas as análises estruturais. O modelo de superfícies utilizado, por definição, não tem informações de espessura para os corpos, devendo ser atribuídas dentro do software.

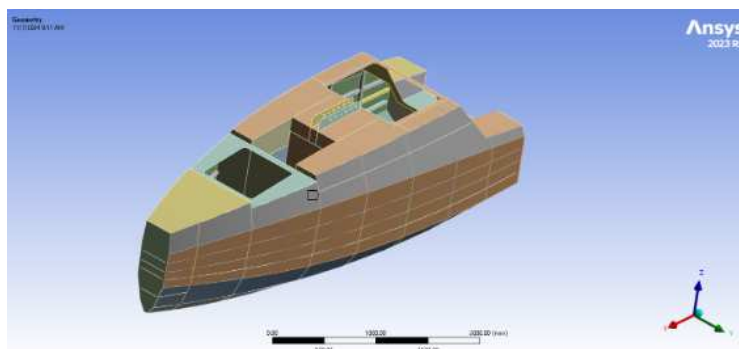


Figura 5.4: Geometria inserida no Ansys (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

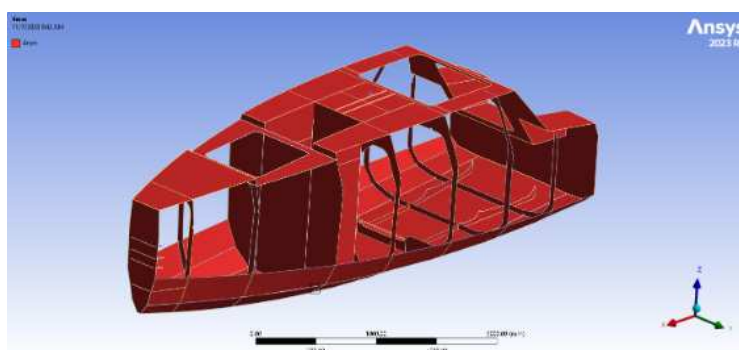


Figura 5.5: Corpos com espessura de 4mm (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

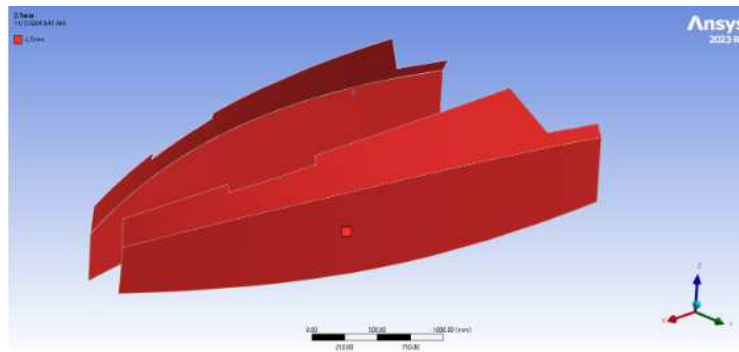


Figura 5.6: Corpos com espessura de 2,5mm (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

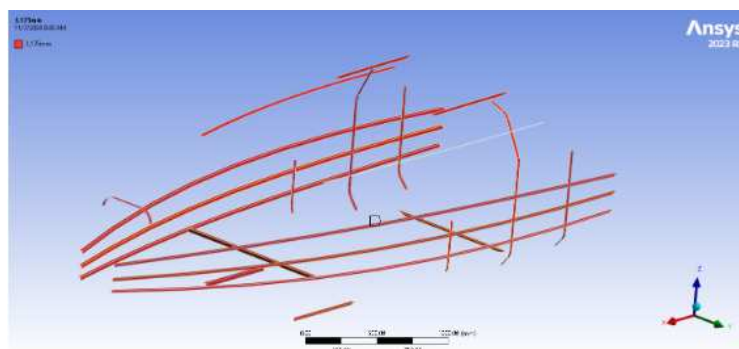


Figura 5.7: Corpos com espessura de 3,175mm (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

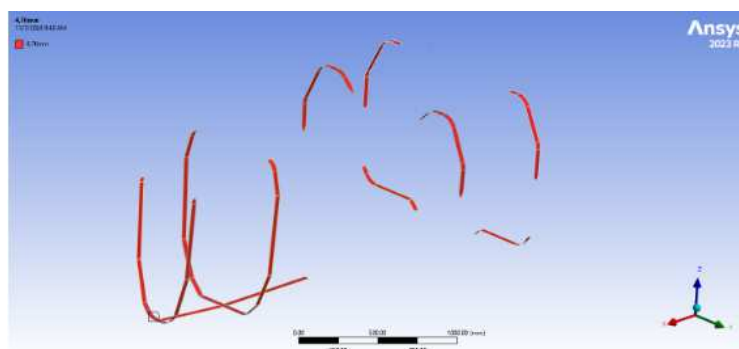


Figura 5.8: Corpos com espessura de 4,76mm (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

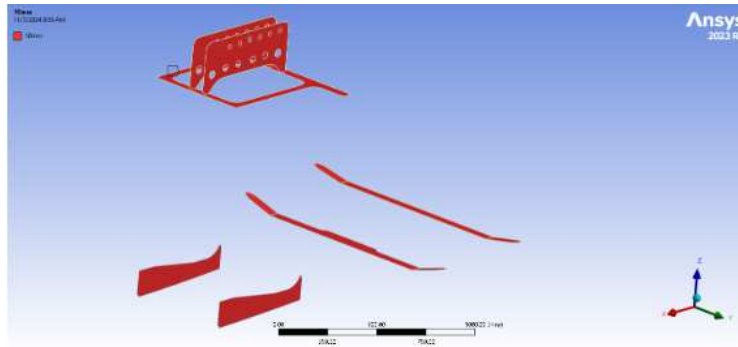


Figura 5.9: Corpos com espessura de 10mm (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

## 5.4

### Definição do material

A norma NR 561 define as propriedades de material a serem utilizadas no projeto. Abaixo estão os símbolos utilizados e suas definições:

$E$  - Módulo de elasticidade [ $N/mm^2$ ]

$\nu$  - Coeficiente de Poisson

$R_m$  - Limite de resistência à tração [ $N/mm^2$ ]

$R_{p0,2}$  - Limite de escoamento [ $N/mm^2$ ]

$R'_m$  - Limite de resistência à tração, após solda [ $N/mm^2$ ]

$R'_{p0,2}$  - Limite de escoamento, após solda [ $N/mm^2$ ]

$R_y$  - Limite de escoamento mínimo (de projeto), valor mínimo entre  $R'_m$  e  $0.85 \cdot R'_{p0,2}$  [ $N/mm^2$ ]

Fica definido para a fabricação de embarcações em alumínio, o uso de chapas em liga das famílias 5000 e 6000, devido às propriedades relacionadas à corrosão e soldabilidade. [12]

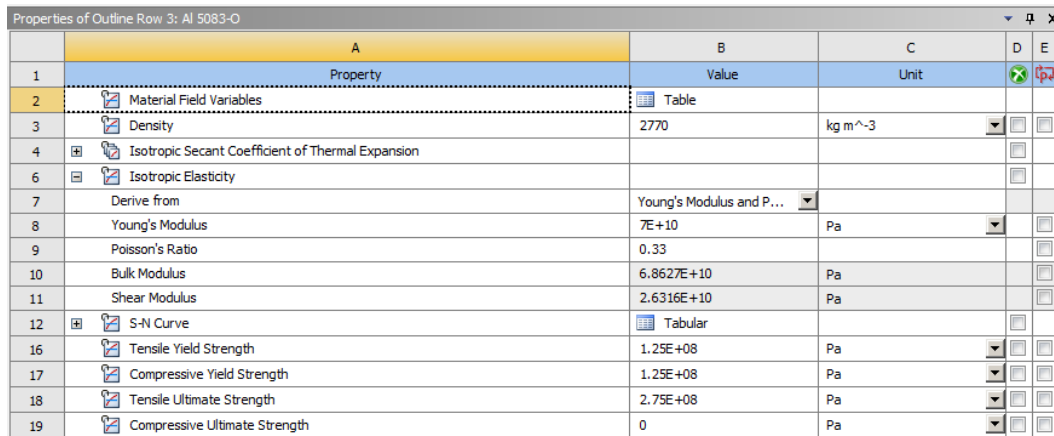
De acordo com a norma NR 561, é considerado que a zona termicamente afetada das soldas tem suas propriedades mecânicas alteradas quando se trata de um material com aumento de resistência mecânica devido ao trabalho a frio (para a família 5000) e devido a tratamentos térmicos (para a família 6000). A zona termicamente afetada é definida como os 25mm próximos a um cordão de solda. Nesses locais, a resistência mecânica do material deve ser considerada como após solda, aplicando coeficientes de segurança às propriedades do material. As considerações anteriores não são aplicáveis às chapas da família 5000 em condição O, isto é, recozido, sem trabalho a frio [12].

A embarcação Tupan foi construída utilizando chapas de alumínio de liga 5083-O. As propriedades mecânicas desta liga estão registradas na Tabela 5.1. O uso de uma liga com condição O exclui as considerações sobre a zona termicamente afetada, podendo usar as propriedades mecânicas diretamente [12].

$R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\nu$
125	275	70000	0,33

Tabela 5.1: Propriedades mecânicas da liga 5083-O.[12]

O software Ansys disponibiliza uma base de materiais para análise, entretanto, a liga de alumínio 5083-O não está disponível para seleção. Foi necessário, então, inserir manualmente as propriedades mecânicas da liga no programa e, em seguida, atribuir o material aos corpos do modelo.



Properties of Outline Row 3: Al 5083-O				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2770	kg m <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and P...		
8	Young's Modulus	7E+10	Pa	
9	Poisson's Ratio	0.33		
10	Bulk Modulus	6.8627E+10	Pa	
11	Shear Modulus	2.6316E+10	Pa	
12	S-N Curve	Tabular		
16	Tensile Yield Strength	1.25E+08	Pa	
17	Compressive Yield Strength	1.25E+08	Pa	
18	Tensile Ultimate Strength	2.75E+08	Pa	
19	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	

Figura 5.10: Definição do material (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

## 5.5

### Malha de elementos finitos

Após a definição das espessuras, é possível fazer a divisão do modelo na malha de elementos finitos. Foram utilizados elementos com interpolação quadrática, quadriláteros com tamanho fixo de 10 mm. Por se tratar de uma estrutura soldada com chapas de diferentes espessuras, o modelo é composto por corpos desconectados. A conexão entre os corpos é feita por meio da malha, com o comando *connect*, que detecta as interseções dentro de uma tolerância definida e conecta os elementos na malha.

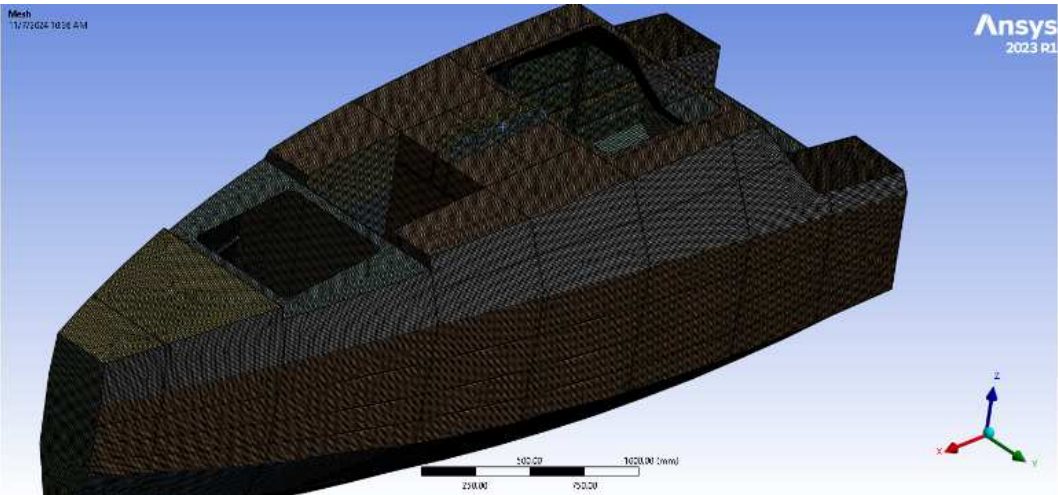


Figura 5.11: Malha de elementos finitos (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

Details of "Connect" - Connect	
Scope	
Scoping Method	Named Selection
Named Selection	All bodies
Use Worksheet	No
Definition	
Suppressed	No
Multiple Connection Steps	No
Connection Tolerance	5.0 mm
Connection Size	Default (10.0 mm)
Connection Option	All To All
Coplanar Angle Tolerance	Default (25.0°)
Perform Intersections	Yes

Figura 5.12: Conexão da malha (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

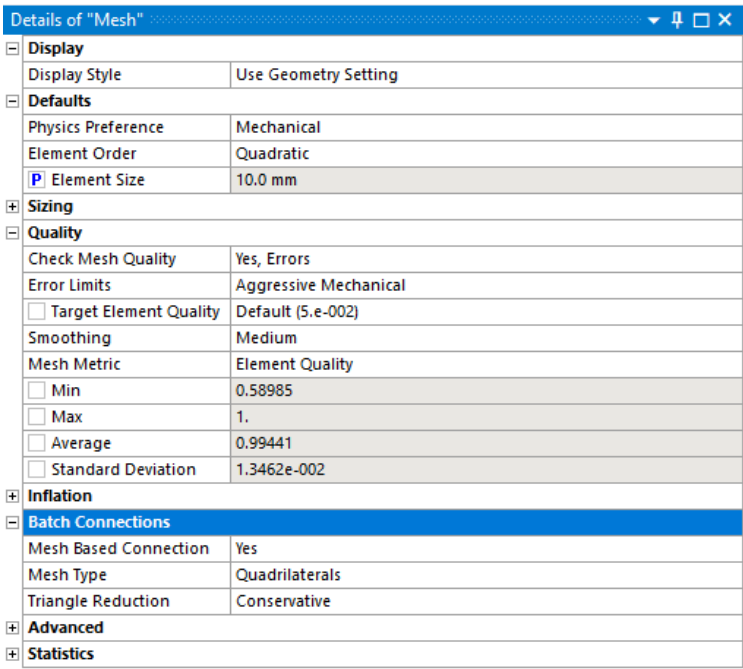


Figura 5.13: Configuração da malha de elementos finitos (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

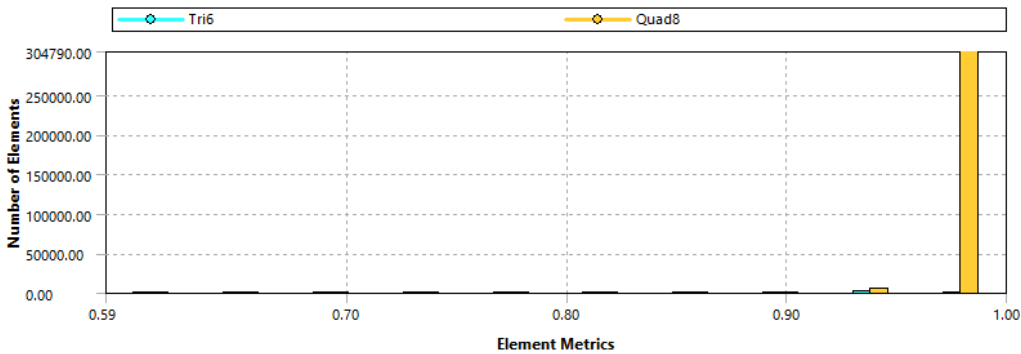


Figura 5.14: Gráfico de qualidade dos elementos da malha (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

A Figura 5.13 mostra as configurações feitas para a geração da malha no modelo de elementos finitos. Podemos destacar a boa qualidade da malha, com média 0,99441 e desvio padrão  $1,34 \cdot 10^{-2}$ , sendo o valor mínimo considerado aceitável pela literatura igual a 0,8 [3]. A Figura 5.14 mostra a distribuição da qualidade dos elementos e a proporção de elementos quadriláteros e triláteros.

## 5.6

### Aplicação dos carregamentos

Para o projeto de uma embarcação, é importante o cálculo da sua massa e da posição do centro de gravidade. As características de navegação e estabilidade estão diretamente relacionadas ao centro de gravidade, assim como o projeto do ponto de içamento.

Ao longo do projeto da embarcação, todos os componentes são contabilizados em uma planilha chamada planilha de peso. A planilha é alimentada com as informações de cada componente, como massa, posição do centro de gravidade e momento de inércia, avaliados em relação à origem da embarcação. Dessa forma podemos calcular o centro de gravidade total, que será aplicado para a análise estrutural, feita por elementos finitos.

A planilha de peso é um documento que trata de todos carregamentos na embarcação, possibilitando a avaliação de propostas para operação com diferentes configurações. Desta forma, a planilha de peso é um documento sensível da empresa que, em suas diversas iterações, passou pelo projeto da embarcação e continua sendo utilizado para sua operação atual. Devido a essa sensibilidade, esse documento não será mostrado neste trabalho. A partir de uma versão simplificada, foram extraídas as informações dos carregamentos que serão aplicados na estrutura para a análise do içamento da embarcação. Os carregamentos mostrados na Tabela 5.2 são representativos dos subsistemas reais da embarcação.

	Massa [kg]	LCG [m]	TCG [m]	VCG [m]
Subsistema 1	124,9	1,718	0,000	0,965
Subsistema 2	106,9	1,442	0,007	0,182
Subsistema 3	543,5	2,056	0,049	0,412
Subsistema 4	46,5	1,989	-0,155	0,862
Subsistema 5	69,6	1,967	-0,065	0,516
Subsistema 6	83,8	2,113	0,001	0,748
Subsistema 7	131,5	2,546	0,000	0,730
Subsistema 8	202,5	2,583	-0,003	0,476

Tabela 5.2: Informações de massa da embarcação.

A origem do sistema de coordenadas adotado é definida como a interseção do plano de simetria longitudinal da embarcação, o plano tangente ao último ponto à ré da embarcação e o plano tangente ao fundo da embarcação. O eixo x, conforme Figura 5.15, é definido na direção longitudinal da embarcação, com sentido positivo de ré para vante, o eixo y é definido na direção transversal

da embarcação, com sentido positivo para bombordo e o eixo  $z$  é definido na direção vertical, com sentido positivo para cima.

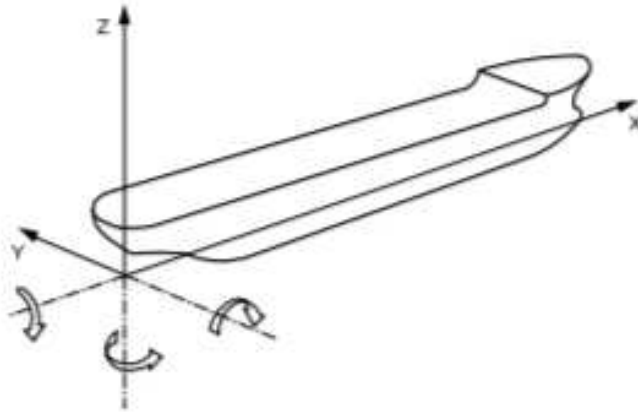


Figura 5.15: Sistema de coordenadas adotado (Fonte: [13])

Devido ao grande número de configurações operacionais possíveis da embarcação Tupan existe uma variação significativa na coordenada longitudinal do CG (LCG) da embarcação. Isso torna necessária a mudança do ponto de içamento para que haja um alinhamento vertical entre o ponto de içamento e o CG. A embarcação conta com esse ajuste na forma de um trilho, com 5 posições disponíveis para montagem do olhal de içamento (visto em vermelho na Figura 5.16).

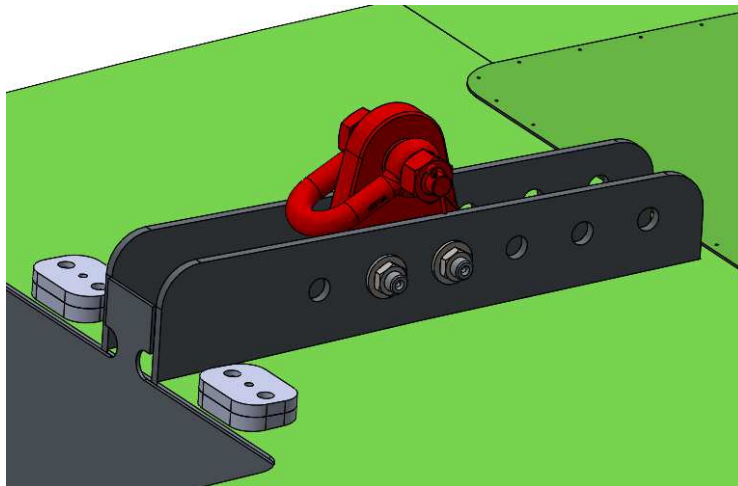


Figura 5.16: Fixação do olhal de içamento (Fonte: SolidWorks 2022 SP05 (captura do autor, 2025))

Como explicado anteriormente, os carregamentos referentes aos subsistemas da embarcação serão aplicados no modelo na forma de massas pontuais



localizadas nas coordenadas no CG do respectivo subsistema. Os carregamentos foram aplicados nos locais de fixação dos componentes principais de cada subsistema com o objetivo de representar de forma realista a distribuição de carregamentos ao longo da embarcação. A Figura 5.17 mostra os carregamentos aplicados no modelo, notando que o subsistema 1, referente à estrutura, contempla apenas os componentes não representados no modelo de superfícies.

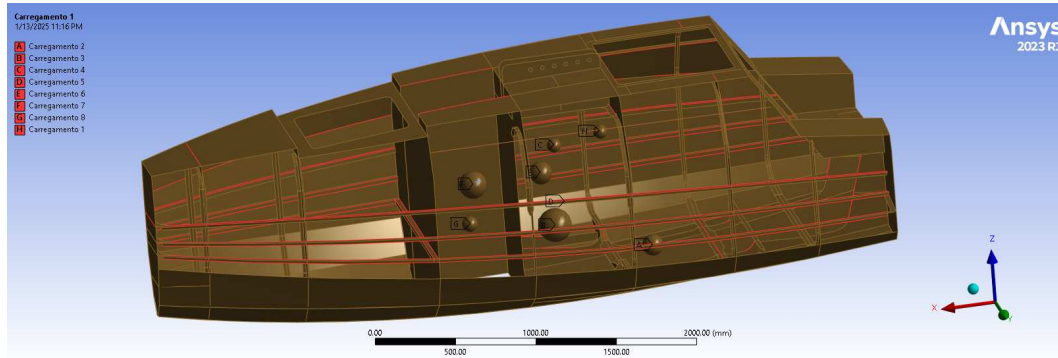


Figura 5.17: Aplicação dos carregamentos na estrutura (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

## 5.7

### Definição do ponto de içamento

Como mostrado anteriormente na Figura 5.16, a embarcação é içada através de um olhal de içamento fixado em um trilho no convés. Para a simulação da operação de içamento, é importante definir a posição do ponto de içamento no espaço. Este ponto será utilizado para o procedimento de alinhamento do CG descrito anteriormente, sendo o ponto fixo no espaço para o alinhamento vertical com o CG. A Figura 5.18 mostra as dimensões básicas do olhal.

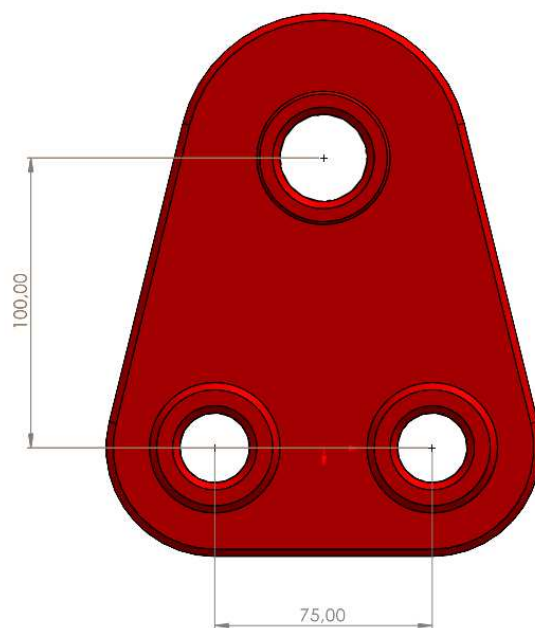


Figura 5.18: Olhal de içamento (Fonte: SolidWorks 2022 SP05 (captura do autor, 2025))

O ponto de içamento foi definido no espaço por meio de um *remote point* no Ansys, como mostrado na Figura 5.19. Esse recurso define conexões entre os elementos da geometria selecionada e o ponto no espaço de forma rígida. Foram selecionados os furos aos quais o olhal de içamento seria fixado, com menor desalinhamento vertical com o CG desta configuração da embarcação.

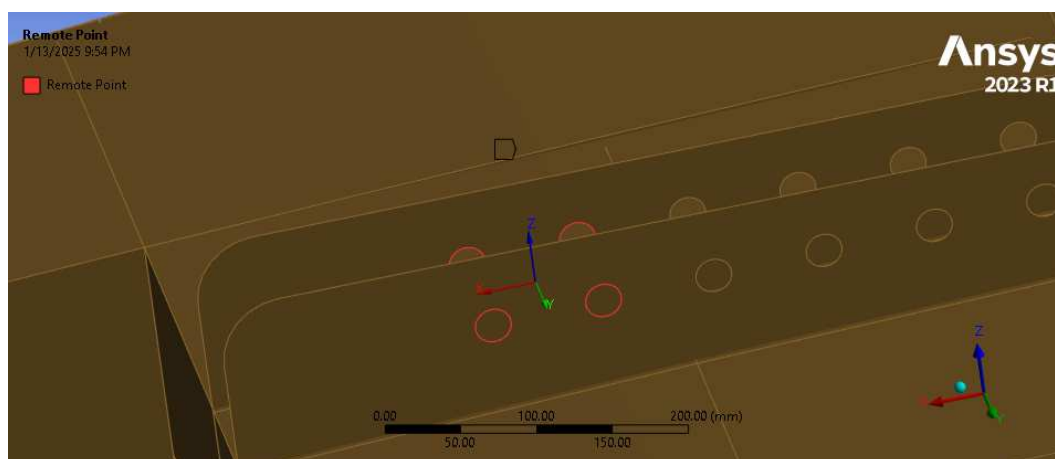


Figura 5.19: Ponto de içamento (*Remote Point*) (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

## 5.8

### Aplicação das condições de contorno

Para simular os esforços do içamento, foi aplicada a aceleração da gravidade no sentido negativo do eixo z, levando em consideração o fator para obtenção da carga estática de projeto de 2.5 mencionado anteriormente. O ponto de içamento foi fixado no espaço, com todos os graus de liberdade restringidos. Essa condição gera momentos irreais quando comparada à operação de içamento com o alinhamento entre o CG e o ponto de içamento. Como feito no modelo simplificado, essa análise preliminar é importante para determinação do CG do modelo que dará origem a um modelo mais realista.

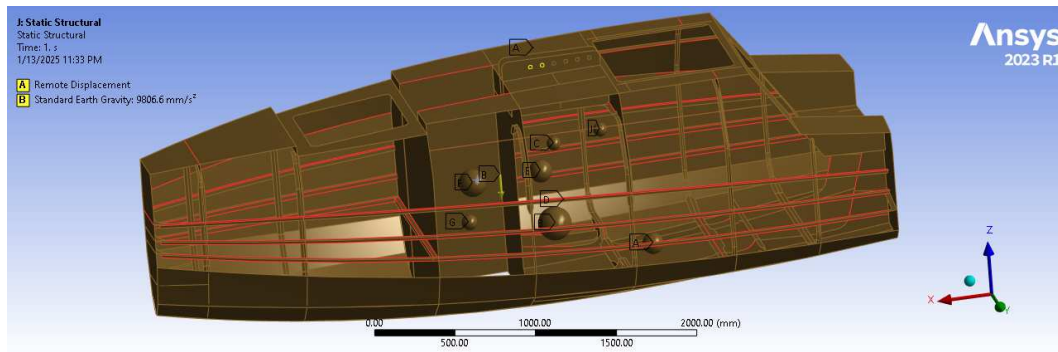


Figura 5.20: Aplicação das condições de contorno no modelo (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

## 5.9

### Resultados preliminares

Como principal resultado dessa simulação preliminar podemos citar a posição do CG calculada pelo *software*, que irá permitir o alinhamento do ponto de içamento para a simulação final. A Figura 5.21 mostra as coordenadas do CG obtidas pelo ANSYS, com o valor da massa total do modelo dado em toneladas e os valores das coordenadas dados em milímetros.

```
TOTAL MASS = 1.6150
The mass principal axes coincide with the global Cartesian axes

CENTER OF MASS (X,Y,Z)= 2098.3      9.4501      554.67
```

Figura 5.21: Posição do CG do modelo (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

O cálculo da posição do CG foi feito manualmente como verificação dos resultados encontrados. A massa do modelo já é levada em consideração pelo Ansys para a simulação de elementos finitos, logo o subsistema 1, referente à estrutura, considera apenas os componentes não modelados. A Tabela 5.3 mostra a proximidade entre o resultado esperado e o que foi retirado do modelo de elementos finitos.

	Massa [kg]	LGC [m]	TCG [m]	VCH [m]
Subsistema 1	124,9	1,718	0,000	0,965
Subsistema 2	106,9	1,442	0,007	0,182
Subsistema 3	543,5	2,056	0,049	0,412
Subsistema 4	46,5	1,989	-0,155	0,862
Subsistema 5	69,6	1,967	-0,065	0,516
Subsistema 6	83,8	2,113	0,001	0,748
Subsistema 7	131,5	2,546	0,000	0,730
Subsistema 8	202,5	2,583	-0,003	0,476
<b>Total</b>	<b>1600,0</b>	<b>2,094</b>	<b>0,009</b>	<b>0,551</b>

Tabela 5.3: Verificação da posição do CG.

## 5.10

### Alinhamento do CG e do ponto de içamento

Assim como no modelo simplificado, a geometria foi reposicionada no espaço com o objetivo de alinhar o CG e o ponto de içamento. A Figura 5.22 mostra o CG modelado no *SolidWorks* em relação à origem da embarcação.

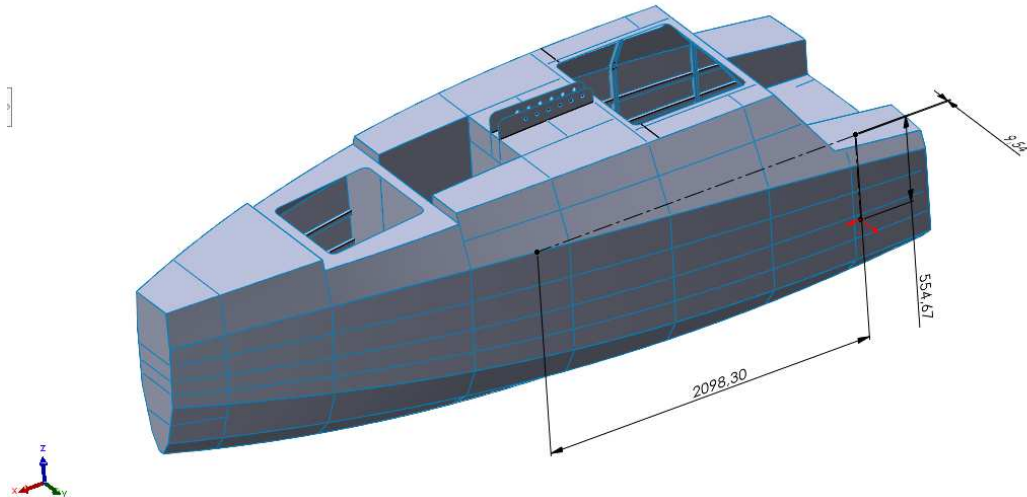


Figura 5.22: Geometria reposicionada (Fonte: SolidWorks 2022 SP05 (captura do autor, 2025))

Para reposicionar o modelo no espaço, a origem do sistema de coordenadas tem de ser alterada para o ponto de içamento. A posição dos carregamentos deve ser reavaliada no sistema de coordenadas alternativo. Os carregamentos foram modelados no *SolidWorks* e foram extraídas as posições mostradas na Tabela 5.4.

	Massa [kg]	x [mm]	y [mm]	z [mm]
Subsistema 1	124.9	-381.02	-5.60	-583.27
Subsistema 2	106.9	-655.64	-6.12	-1366.79
Subsistema 3	543.5	-42.05	38.09	-1136.12
Subsistema 4	46.5	-109.84	-161.58	-684.30
Subsistema 5	69.6	-131.23	-74.91	-1031.19
Subsistema 6	83.8	14.36	-6.68	-799.57
Subsistema 7	131.5	447.39	-7.86	-816.80
Subsistema 8	202.5	484.84	-13.30	-1070.70

Tabela 5.4: Posição dos carregamentos no sistema de coordenadas alternativo.

### 5.11

#### Replicação das condições do içamento

As mesmas condições foram aplicadas no modelo para simular a operação de içamento. A Figura 5.23 mostra os carregamentos e as condições de contorno aplicadas no modelo reposicionado. Esta configuração é representativa da operação de içamento real, com o alinhamento do CG e o ponto de

içamento, considerando uma distribuição realista dos carregamentos ao longo da embarcação.

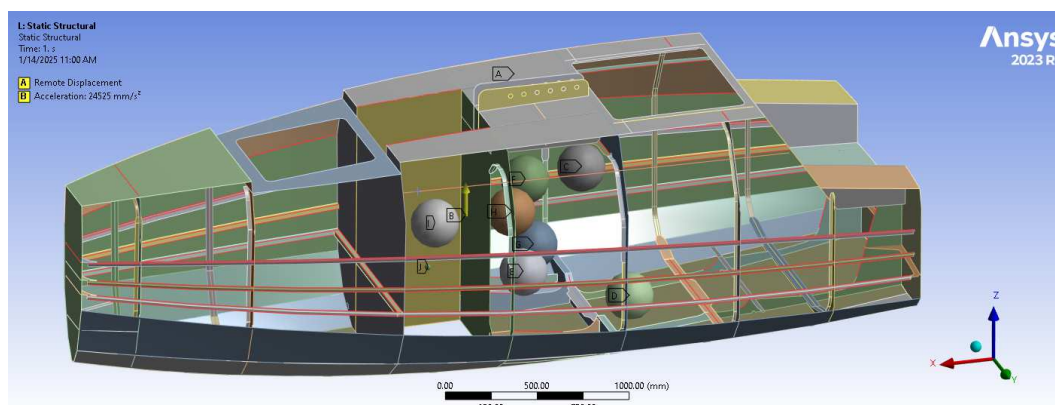


Figura 5.23: Carregamentos e condições de contorno aplicados no modelo reposicionado (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

## 5.12 Resultados

A simulação final foi feita, e a partir dela foram extraídos resultados de tensão e deformação da estrutura. A distribuição das tensões e deformações no modelo segue o que seria esperado para a reação ao momento fletor gerado na estrutura pelo içamento por ponto único.

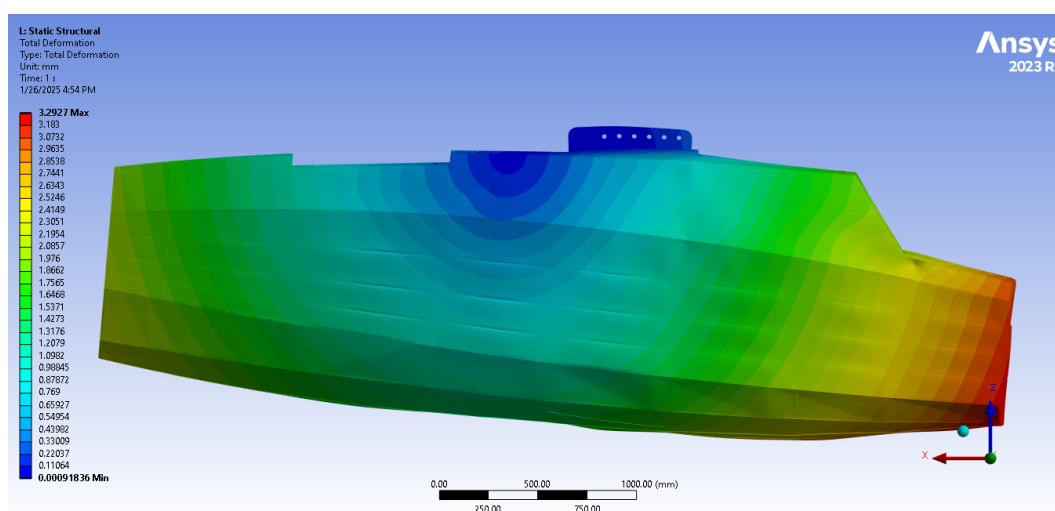


Figura 5.24: Deformação total da estrutura, vista lateral (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

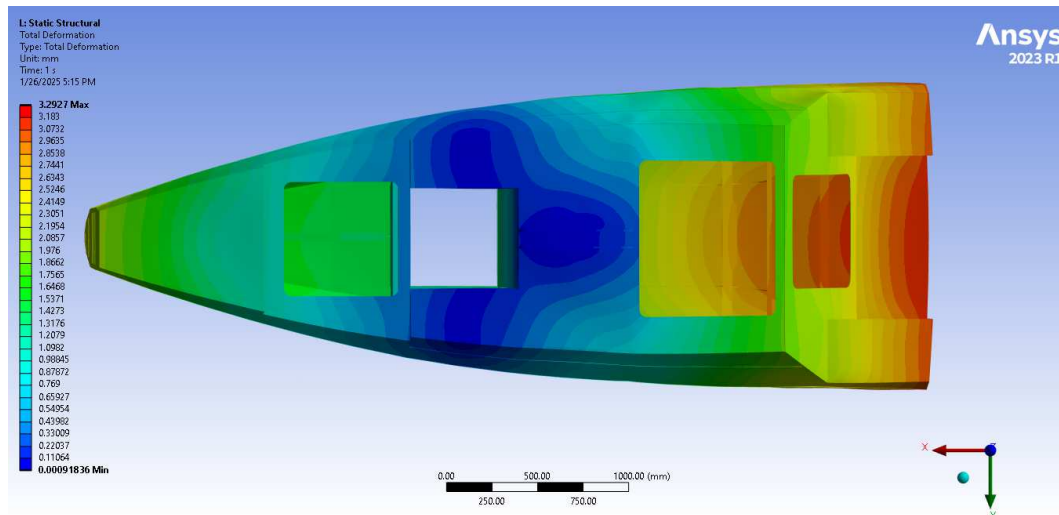


Figura 5.25: Deformação total da estrutura, vista superior (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

As deformações da estrutura, mostradas nas Figuras 5.24 e 5.25, seguem um padrão esperado pela flexão longitudinal da embarcação. Devido ao alinhamento do ponto de içamento e o CG, podemos observar uma distribuição simétrica das deformações no plano longitudinal.

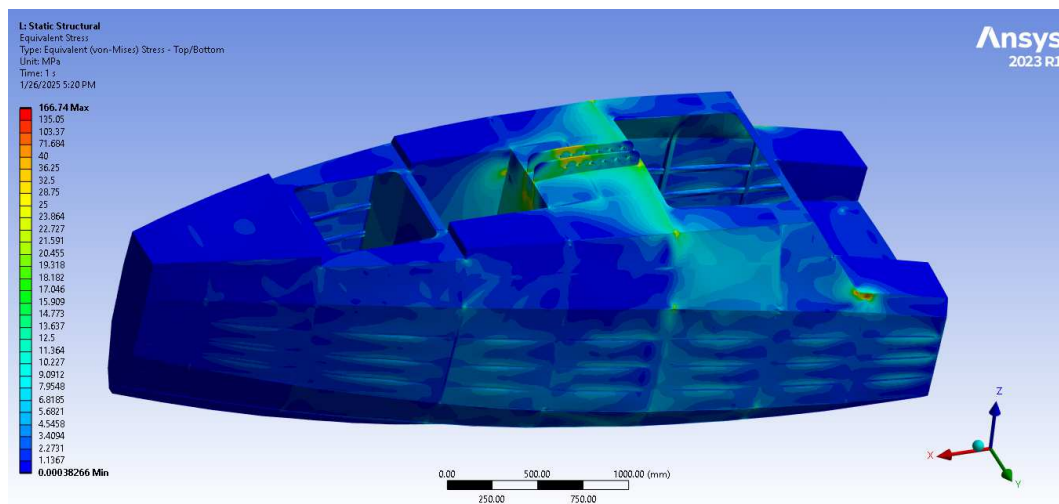


Figura 5.26: Distribuição das tensões na estrutura, vista superior (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))



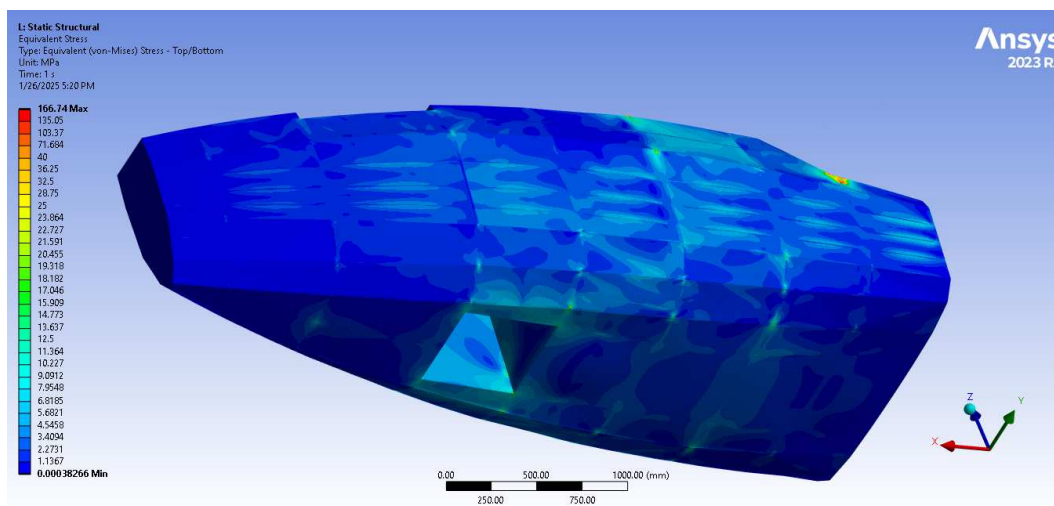


Figura 5.27: Distribuição das tensões na estrutura, vista inferior (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

A partir de uma vista externa da embarcação podemos visualizar um padrão de distribuição das tensões devido a flexão longitudinal da embarcação. Os reforçadores de painel do costado demonstram tensões por serem utilizados para a fixação de inúmeros componentes da embarcação, apesar da localização próxima à linha neutra para flexão longitudinal. A Figura 5.28 mostra a distribuição de tensões na estrutura interna da embarcação, e reforça o padrão de distribuição de tensões referente a flexão longitudinal mencionado anteriormente. É possível observar também o acúmulo de tensões nos componentes responsáveis por transferir os esforços do içamento ao restante da estrutura.



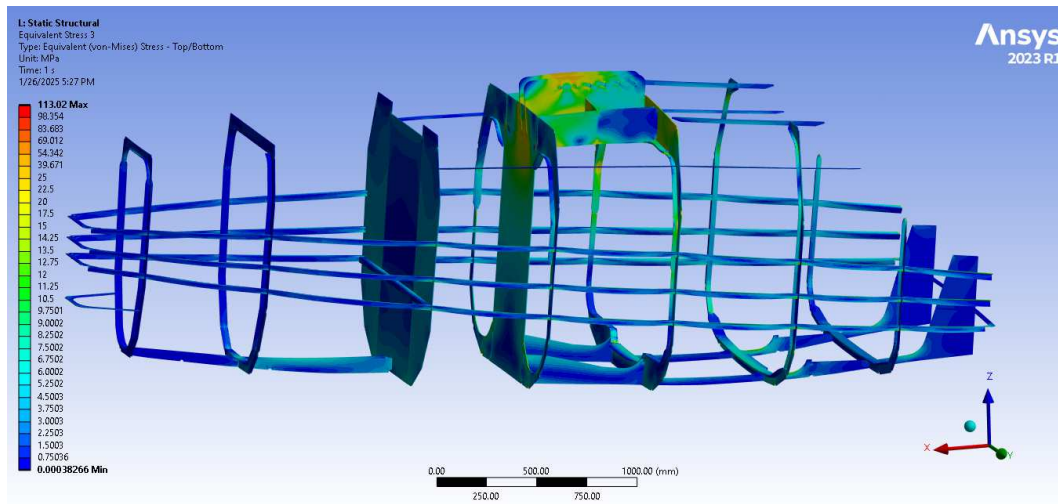


Figura 5.28: Distribuição das tensões na estrutura interna (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

Pode ser observado na Figura 5.28 que a distribuição de tensões relacionada à flexão longitudinal na estrutura interna fica concentrada às quatro seções transversais centrais da embarcação, demonstrando a grande rigidez longitudinal da embarcação. A condição de içamento é extrema quando comparada às condições de navegação da embarcação, levando em consideração também a carga estática equivalente de 2,5 do peso próprio da embarcação. A estrutura se mantém em regime elástico, dentro das tensões admissíveis estabelecidas anteriormente.

Foi identificado um concentrador de tensões na seção transversal central da embarcação, como mostrado na Figura 5.29. Essa concentração de tensões pode ser explicada devido à união de três chapas com cantos vivos. Entretanto, no modelo físico, esse ponto é coberto por cordões de solda, que ajudam a suavizar essa transição, não sendo considerado um problema para a estrutura.

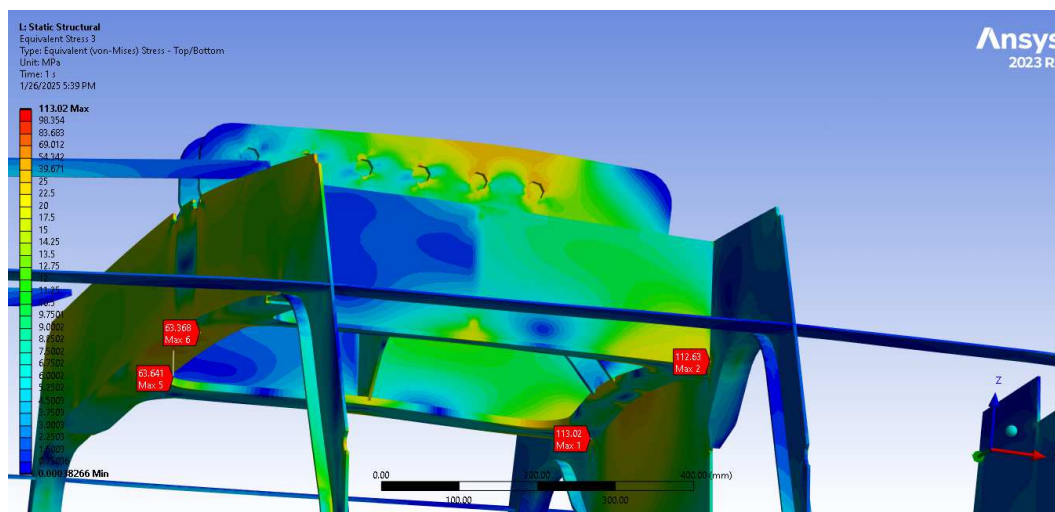


Figura 5.29: Concentrador de tensões encontrado na estrutura (Fonte: ANSYS Workbench 2023 R1 (captura do autor, 2025))

No projeto da embarcação seguinte, o Tupan MK2, o concentrador de tensões foi removido do projeto. O projeto das seções da embarcação foi modificado utilizando perfis estruturais para lidar com os esforços longitudinais da embarcação, ao invés da solução em chapas utilizados pelo primeiro projeto. A Figura 5.30 mostra o ponto de concentração de tensões na estrutura da embarcação Tupan, enquanto a Figura 5.31 mostra a solução adotada para o projeto Tupan MK2.

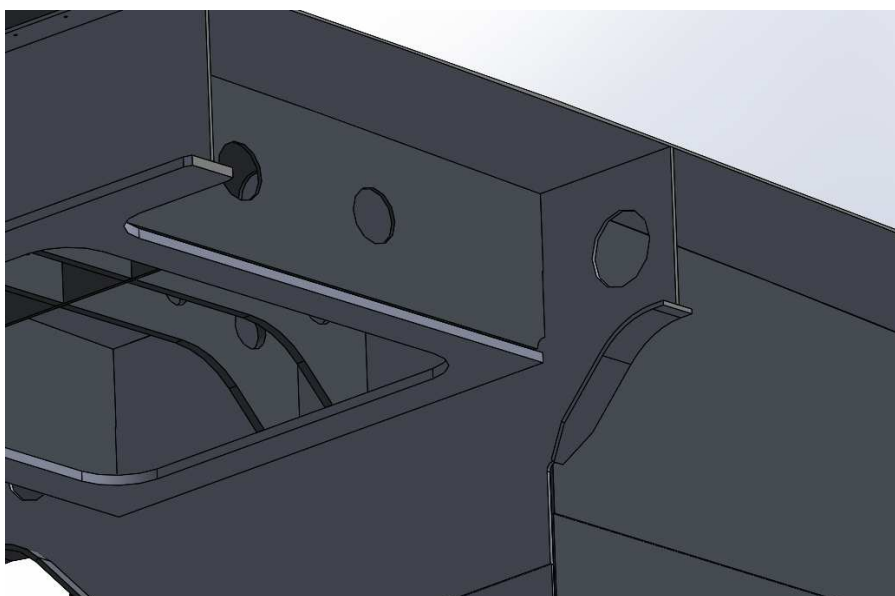


Figura 5.30: Estrutura interna da embarcação Tupan (Fonte: SolidWorks 2022 SP05 (captura do autor, 2025))

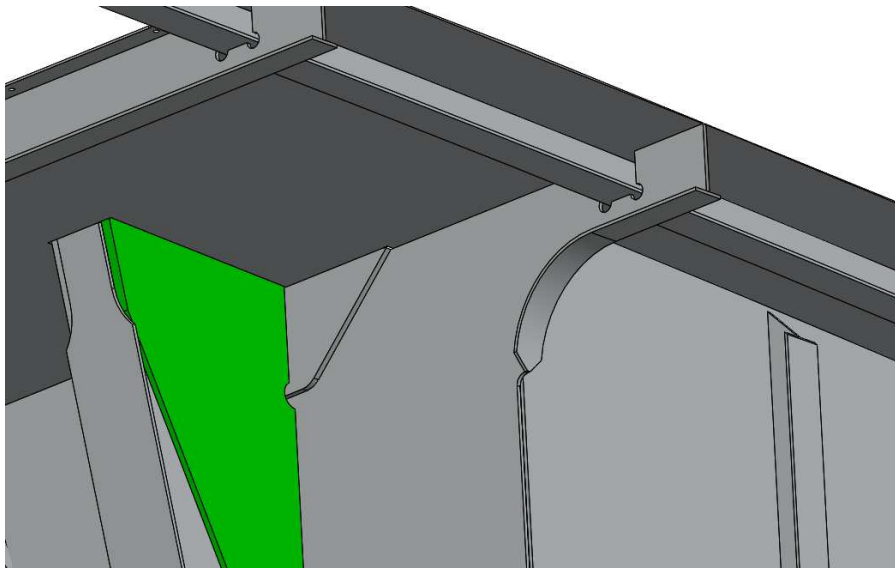


Figura 5.31: Estrutura interna do projeto Tupan MK2 (Fonte: SolidWorks 2022 SP05 (captura do autor, 2025))

Anteriormente, foi definido o valor de tensão admissível para o material utilizado, sendo:

$$\sigma_c = 0.85 * R_y = 106,25[N/mm^2]$$

Com exceção do concentrador de tensão mostrado na Figura 5.29, a estrutura se mantém dentro do valor de tensão admissível estabelecido. Com os fatores atenuantes para o concentrador mencionados anteriormente, podemos desconsiderá-lo como um problema para a estrutura.

## 6

### Conclusão

Neste trabalho foram realizadas análises estruturais com a estrutura da embarcação Tupan para avaliar a sua resposta aos esforços relacionados à operação de içamento. A literatura disponível sobre o assunto foi estudada e, a partir dela, foram extraídas as condições para avaliação do içamento, propriedades de material e tensões admissíveis para a estrutura da embarcação. Os resultados das análises realizadas destacaram a robustez da estrutura para os esforços relacionados ao içamento, estando enquadrada nas normas apresentadas por este trabalho para o projeto da embarcação.

A partir dos resultados obtidos, foi possível observar um ponto de concentração de tensões na estrutura. Esse resultado não apresenta risco para a operação da embarcação Tupan, mas é importante para a avaliação de projetos futuros.

Para trabalhos futuros, pode-se pensar na implementação de outras soluções para o projeto estrutural da embarcação para lidar com os esforços do içamento com menor concentração de tensões. Novas propostas de arranjo estrutural poderiam ser avaliadas em busca de um projeto otimizado, com redução de massa e ganhos no volume interno da embarcação. Ferramentas de otimização poderiam ser implementadas com esse objetivo, que fica além do escopo desse trabalho.

## Referências bibliográficas

- [1] A. ALVES FILHO. *Elementos Finitos – A base da tecnologia CAE*. Editora Érica | Saraivaa, 2018. ISBN: 9788536525495. URL: <https://books.google.com.br/books?id=JrdiDwAAQBAJ>.
- [2] Carlos Barrera, I Padron, FS Luis e Octavio Llinas. “Trends and challenges in unmanned surface vehicles (Usv): From survey to shipping”. Em: *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 15 (2021).
- [3] ENSUS. *ANSYS - TEMPO DE ANÁLISE E QUALIDADE DE MALHA*. Rel. técn. ENSUS, 2017.
- [4] ANSYS Inc. Ansys Mechanical Pro 2023 R1.
- [5] N. Kim e B. Sankar. *Introdução à Análise e ao Projeto em Elementos Finitos*. LTC, 2011. ISBN: 9788521617884. URL: <https://books.google.com.br/books?id=2eiWuAAACAAJ>.
- [6] Lehaka. *Flat yoke for boat lifting*. URL: <https://lehaka.dk/en/flat-yoke-boat-lifting/>. (acesado em: 03/09/2024).
- [7] Michael Crowley - WorkBoat Magazine. *Transporting vessels around shipyards and in and out of water*. URL: <https://www.workboat.com/shipbuilding/transporting-vessels-around-shipyards-and-in-and-out-of-water>. (acesado em: 06/01/2025).
- [8] Justin E Manley. “Unmanned surface vehicles, 15 years of development”. Em: *OCEANS 2008*. Ieee. 2008, pp. 1–4.
- [9] Delta Power. *Delta 700HX Single Point Lift*. URL: <https://deltapower.co.uk/all-boats-2/>. (acesado em: 03/09/2024).
- [10] Prof. Remo Magalhães de Souza. *O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor*. URL: <http://www.inf.ufes.br/~luciac/fem/livros-fem/ApostilaElementosFinitosNiCAE.pdf>. (acesado em: 02/01/2025).
- [11] Cimolai Technology. *Mobile Boat Hoists*. URL: [https://www.straddlecarrier.de/engl/marinas\\_-\\_shipyards/marine-cranes/](https://www.straddlecarrier.de/engl/marinas_-_shipyards/marine-cranes/). (acesado em: 03/09/2024).

- [12] BUREAU VERITAS. *HULL IN ALUMINIUM ALLOYS NR561 - NOVEMBER 2022*. URL: [https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/561-NR\\_2022-11.pdf](https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/561-NR_2022-11.pdf). (acesado em: 12/09/2024).
- [13] BUREAU VERITAS. “HULL STRUCTURE AND ARRANGEMENT FOR THE CLASSIFICATION OF CARGO SHIPS LESS THAN 65 M AND NON CARGO SHIPS LESS THAN 90 M NR600-OCTOBER 2024”. Em: BUREAU VERITAS, 2024. Cap. Ch 1, Sec 1. URL: [https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/600-NR\\_2024-10c.pdf](https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/600-NR_2024-10c.pdf). (acesado em: 12/09/2024).
- [14] BUREAU VERITAS. *HULL STRUCTURE AND ARRANGEMENT FOR THE CLASSIFICATION OF CARGO SHIPS LESS THAN 65 M AND NON CARGO SHIPS LESS THAN 90 M NR600-OCTOBER 2024*. URL: [https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/600-NR\\_2024-10c.pdf](https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/600-NR_2024-10c.pdf). (acesado em: 12/09/2024).
- [15] BUREAU VERITAS. *UNMANNED SURFACE VESSELS (USV) NR681 - JULY 2022*. URL: [https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/681-NR\\_2022-07.pdf](https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/681-NR_2022-07.pdf). (acesado em: 12/09/2024).
- [16] DET NORSKE VERITAS. *STANDARD FOR CERTIFICATION No. 2.7-1 OFFSHORE CONTAINERS*. DNV, 2006.
- [17] Yang Yang, Ping Pan, Xingang Jiang, Shuanghua Zheng, Yongjian Zhao, Yi Yang, Songyi Zhong e Yan Peng. “An Attitude Prediction Method for Autonomous Recovery Operation of Unmanned Surface Vehicle”. Em: *Sensors (Basel, Switzerland)* 20 (out. de 2020). DOI: 10.3390/s20195662.