



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

PEDRO HENRIQUE FARIA BALLASTREIRE

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE UMA BARCAÇA
GRANELEIRA FLUVIAL QUANDO SUBMETIDA A DIFERENTES TIPOS E
DISPOSIÇÕES DE CARREGAMENTO

Joinville

2025

PEDRO HENRIQUE FARIA BALLASTREIRE

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE UMA BARCAÇA
GRANELEIRA FLUVIAL QUANDO SUBMETIDA A DIFERENTES TIPOS E
DISPOSIÇÕES DE CARREGAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Naval do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval.

Orientador: Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville

2025

Ballastreire, Pedro Henrique Faria

Avaliação do Comportamento Estrutural de uma Barcaça Graneleira Fluvial Quando Submetida a Diferentes Tipos e Disposições de Carregamento / Pedro Henrique Faria Ballastreire ; orientador, Thiago Pontin Tancredi, 2025.

102 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Graduação em Engenharia Naval, Joinville, 2025.

Inclui referências.

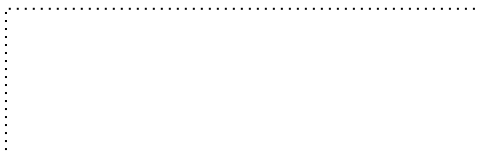
1. Engenharia Naval. 2. simulação numérica. 3. barcaça graneleira. 4. análise de viga navio. I. Tancredi, Thiago Pontin. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Naval. III. Título.

PEDRO HENRIQUE FARIA BALLASTREIRE

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE UMA BARCAÇA
GRANELEIRA FLUVIAL QUANDO SUBMETIDA A DIFERENTES TIPOS E
DISPOSIÇÕES DE CARREGAMENTO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia Naval.

Joinville, 25 de novembro de 2025.



Coordenação do Curso

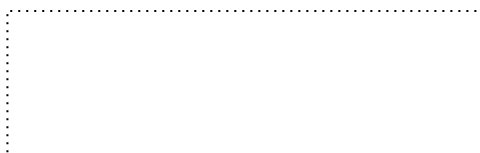
Banca examinadora



Prof. Thiago Pontin Tancredi, Dr.
Orientador



Prof. Luiz Eduardo Bueno Minioli, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Marcos Alves Rabelo, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Joinville, 2025.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, que tornaram esta jornada de graduação possível e sempre me apoiaram incondicionalmente. Sou igualmente grato aos meus amigos, que estiveram ao meu lado ao longo dessa trajetória e que espero levar comigo por muitos anos.

Expresso também minha gratidão ao professor Thiago Pontin Tancredi pela oportunidade de ser seu orientando e pela orientação dedicada. Agradeço ainda a Julián Nunes e Víctor Dias pelo auxílio indispensável para a realização deste trabalho.

RESUMO

A avaliação do comportamento estrutural de barcaças graneleiras é fundamental para garantir a segurança e eficiência do transporte fluvial de grãos sólidos, modal amplamente utilizado na logística agrícola brasileira devido ao baixo custo operacional, elevada capacidade de carga e menor impacto ambiental. Este estudo analisa a estrutura de uma barcaça construída pelo Estaleiro Juruá, cuja representação numérica reproduziu integralmente a embarcação real, incluindo todos os chapeamentos, cavernas, reforçadores e anteparas. Para a análise global, utilizou-se o método de viga-navio por meio de um programa desenvolvido pelo NSO-UFSC, que permitiu obter os momentos fletores longitudinais em oito diferentes condições de carregamento, variando tanto a massa específica quanto a geometria do granel. Já na análise local, aplicou-se o método dos elementos finitos (MEF) no software ANSYS, conduzido em etapas estruturadas: construção da geometria completa, discretização da malha, definição das propriedades do material, aplicação das pressões hidrostática e da carga granular e, por fim, execução das simulações. O processo de validação incluiu modelos de controle que demonstraram que, mesmo com a aplicação exclusiva de cargas verticais no fundo, há tendência natural de fechamento dos costados, evidenciando a importância da pressão lateral do granel para o equilíbrio estrutural. Os resultados indicaram que a distribuição das cargas exerce influência mais significativa do que a massa total transportada, impactando tanto os momentos fletores longitudinais quanto o comportamento transversal dos costados. Quanto aos efeitos locais, observou-se que apenas uma parcela mínima da estrutura atingiu tensões de von Mises superiores a 250 MPa, demonstrando o dimensionamento robusto da barcaça. Carregamentos cônicos, embora operacionalmente vantajosos, favoreceram deslocamentos transversais superiores a 7 cm, compatíveis com relatos de escorregamento das tampas da braçola. Em contrapartida, carregamentos trapezoidais promoveram abertura dos costados por proporcionarem pressões internas mais equilibradas. A análise de flambagem revelou que apenas duas condições permaneceram abaixo do limite crítico, reforçando a relevância da instabilidade local na avaliação estrutural. Como alternativa de mitigação, foi proposto um reforço na braçola composto por borboletas e um reforçador longitudinal, capaz de elevar significativamente o multiplicador de carga crítico. Conclui-se que, embora a barcaça apresente um dimensionamento robusto, a segurança estrutural depende de práticas adequadas de carregamento e, quando necessário, de reforços estruturais que ampliem sua margem de segurança e confiabilidade operacional.

Palavras-chave: barcaça; viga-navio; MEF.

ABSTRACT

The present work evaluates the structural behavior of a riverine grain barge when subjected to different cargo loading conditions, emphasizing the importance of barges in the logistics of bulk grain transportation—an essential, economical, and energy-efficient modal widely used in major hydrographic regions. The study focuses on a barge built by Estaleiro Juruá, characterized by its large cargo capacity and representative structural configuration, making it suitable for numerical investigation. Two complementary approaches were employed: the finite element method (FEM) and the ship-beam method. The ship-beam analysis was performed using the program developed by NSO-UFSC, which enabled the estimation of longitudinal bending moments for each loading condition. The FEM stages consisted of geometry construction, mesh discretization, material definition, load application, and simulation execution, carried out to evaluate local structural phenomena with higher fidelity. The numerical model incorporated hydrostatic pressure, cargo pressure on the sides and bottom of the hold, and the weight of the cargo itself, enabling a comprehensive investigation of both longitudinal bending and the transverse behavior of the hold walls. The simulations revealed that the distribution of cargo along the hold exerts a much greater influence on structural response than the total cargo mass, with certain concentrated loading geometries producing bending moments several times higher than uniform loading cases. Regarding local effects, it was observed that only a minimal portion of the structure reached von Mises stresses above 250 MPa, demonstrating the robust design of the barge. The transverse analysis reproduced the closing of the hold walls reported by the shipyard, especially under conical loading conditions, in which insufficient internal pressure allowed external hydrostatic forces to dominate. Control models also demonstrated that, even with only vertical loads applied, the structure tended to move inward, reinforcing the importance of lateral pressure from the cargo in counteracting this effect. Based on the results, structural reinforcement consisting of additional brackets between the coaming flange and side shell, along with a longitudinal stiffener on the coaming, proved capable of significantly increasing the buckling resistance of the region. The study concludes that both loading strategy and structural design play crucial roles in ensuring safe barge operation, highlighting the need for appropriate loading procedures and, when necessary, targeted reinforcement to prevent local buckling and excessive deformation.

Keywords: barge; hull girder; FEM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Barcaça estudada.....	17
Figura 2 – Condição de alquebramento.....	20
Figura 3 – Condição de tosamento.....	20
Figura 4 – Curva de Pesos, $p(x)$	22
Figura 5 – Curva de carga, $q(x)$	23
Figura 6 – Curva da força cortante, $Q(x)$	24
Figura 7 – Curva de momento fletor, $M(x)$	24
Figura 8 - Flambagem Local de Chapas.....	27
Figura 9 - Flambagem de Reforços Longitudinais e Transversais 1.....	27
Figura 10 - Flambagem de Reforços Longitudinais e Transversais 1.....	28
Figura 11 - Flambagem Interativa.....	28
Figura 12 - Flambagem Global.....	29
Figura 13 - Representação do método dos elementos finitos.....	30
Figura 14 – Discretização da malha.....	31
Figura 15 – Fluxograma da metodologia.....	33
Figura 16 – Programa desenvolvido pelo NSO-UFSC.....	36
Figura 17 – Condição de carregamento 1.....	39
Figura 18 – Condição de carregamento 2.....	39
Figura 19 – Condição de carregamento 3.....	39
Figura 20 – Condição de carregamento 4.....	39
Figura 21 – Condição de carregamento 5.....	40
Figura 22 – Condição de carregamento 6.....	40
Figura 23 – Condição de carregamento 7.....	40
Figura 24 – Condição de carregamento 8.....	40
Figura 25 – Curva de peso $p(x)$ da barcaça.....	41
Figura 26 – Curva de flutuação da barcaça.....	42
Figura 27 – Passos da simulação estrutural.....	43
Figura 28 – Ilustração da geometria da análise estática.....	44
Figura 29 – Discretização da malha da análise estática.....	45
Figura 30 – Material utilizado na análise estática.....	46
Figura 31 – Restrição nas extremidades.....	47
Figura 32 – Restrição na base.....	47

Figura 33 – Aplicação das pressões da condição de carregamento 1.....	49
Figura 34 – Aplicação das pressões da condição de carregamento 2.....	49
Figura 35 – Aplicação das pressões da condição de carregamento 3.....	50
Figura 36 – Aplicação das pressões da condição de carregamento 4.....	50
Figura 37 – Aplicação das pressões da condição de carregamento 5.....	51
Figura 38 – Aplicação das pressões da condição de carregamento 6.....	51
Figura 39 – Aplicação das pressões da condição de carregamento 7.....	52
Figura 40 – Aplicação das pressões da condição de carregamento 8.....	52
Figura 41 – Geometria da análise de flambagem.....	54
Figura 42 – Discretização da malha da análise de flambagem.....	54
Figura 43 – Parametrização do modelo da análise de flambagem.....	56
Figura 44 – Tensão equivalente de von Mises do carregamento 1.....	57
Figura 45 – Tensão equivalente de von Mises do carregamento 2.....	57
Figura 46 – Tensão equivalente de von Mises do carregamento 3.....	58
Figura 47 – Tensão equivalente de von Mises do carregamento 4.....	58
Figura 48 – Tensão equivalente de von Mises do carregamento 5.....	59
Figura 49 – Tensão equivalente de von Mises do carregamento 6.....	59
Figura 50 – Tensão equivalente de von Mises do carregamento 7.....	60
Figura 51 – Tensão equivalente de von Mises do carregamento 8.....	60
Figura 52 – Deslocamento da condição de carregamento 1.....	62
Figura 53 – Deslocamento da condição de carregamento 2.....	62
Figura 54 – Deslocamento da condição de carregamento 3.....	62
Figura 55 – Deslocamento da condição de carregamento 4.....	63
Figura 56 – Deslocamento da condição de carregamento 5.....	63
Figura 57 – Deslocamento da condição de carregamento 6.....	63
Figura 58 – Deslocamento da condição de carregamento 7.....	64
Figura 59 – Deslocamento da condição de carregamento 8.....	64
Figura 60 – Modos de flambagem.....	65
Figura 61 – Curva de momento fletor da condição de carregamento 1.....	66
Figura 62 – Curva de momento fletor da condição de carregamento 2.....	67
Figura 63 – Curva de momento fletor da condição de carregamento 3.....	67
Figura 64 – Curva de momento fletor da condição de carregamento 4.....	68
Figura 65 – Curva de momento fletor da condição de carregamento 5.....	68

Figura 66 – Curva de momento fletor da condição de carregamento 6.....	69
Figura 67 – Curva de momento fletor da condição de carregamento 7.....	69
Figura 68 – Curva de momento fletor da condição de carregamento 8.....	70
Figura 69 – Distribuição das tensões da condição de carregamento 6.....	72
Figura 70 – Comparação dos momentos fletores.....	73
Figura 71 – Deslocamento dos costados.....	74
Figura 72 – Representação do equilíbrio de forças.....	75
Figura 73 – Comportamento do momento fletor no processo de estiva.....	77
Figura 74 – Modelo com reforço.....	78
Figura 75 – Primeiro modo de flambagem do modelo com reforço.....	79
Figura 76 – Estratégia de carregamento.....	80
Figura 77 – Dados de cada passo do carregamento.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Densidades aparentes.....	37
Tabela 2 – Ângulo de talude médio.....	38
Tabela 3 – Parâmetros dos carregamentos.....	38
Tabela 4 – Pressões máximas aplicadas em cada parte da barça.....	53
Tabela 5 – Distribuição da tensão para cada condição.....	61
Tabela 6 – Valores máximo de deformação.....	64
Tabela 7 – Multiplicadores de carga.....	65
Tabela 8 – Momentos fletores máximos.....	70
Tabela 9 – Deformações das simulações de controle.....	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS – American Bureau of Shipping

LCB – Centro Longitudinal de Flutuação

LCG – Centro Longitudinal de Gravidade

MEF – Método dos Elementos Finitos

NSO – Núcleo de Simulação e Otimização

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

g – Aceleração da Gravidade

W – Peso

P – Densidade

∇ - Volume Deslocado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	OBJETIVOS.....	18
1.1.1	Objetivo Geral.....	18
1.1.2	Objetivos Específicos.....	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	TEORIA DE VIGA NAVIO	19
2.1.1	Curva de pesos	21
2.1.2	Curva de flutuação.....	22
2.1.3	Curva de carga	22
2.1.4	Curvas de força cortante o momento fletor.....	23
2.2	FLAMBAGEM EM NAVIOS.....	25
2.2.1	Principais tipos de flambagem em estruturas navais.....	26
2.3	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	29
3	METODOLOGIA	32
4	DESENVOLVIMENTO	34
4.1	ANÁLISE DE VIGA NAVIO	34
4.1.1	Modelagem dos carregamentos	36
4.1.2	Computo dos esforços primários.....	41
4.2	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	42
4.2.1	Análise estrutural estática	43
4.2.2	Análise de flambagem	53
5	RESULTADOS	56
5.1	TENSÃO EQUIVALENTE DE VON MISES	56
5.2	DEFORMAÇÃO	61
5.3	FLAMBAGEM.....	65
5.4	MOMENTOS FLETORES	66
5.5	VALIDAÇÃO DO MODELO MEF	70
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	71
6.1	RECOMENDAÇÕES.....	77
6.1.1	Reforço estrutural	78
6.1.2	Estratégia de carregamento.....	79

7	CONCLUSÃO	81
	REFERÊNCIAS	83
	APÊNDICE A – PRESSÃO NO FUNDO GERADO PELOS CARREGAMENTOS CÔNICOS	85
	APÊNDICE B – PRESSÃO NO COSTADO INTERNO GERADO PELOS CARREGAMENTOS NÃO UNIFORMES	87
	APÊNDICE C – PRESSÃO DA CARGA NO FUNDO DA CONDIÇÃO 1...	89
	APÊNDICE D – PRESSÃO DA CARGA E HIDROSTÁTICA ATUANTES NO COSTADO DA CONDIÇÃO 1	91
	APÊNDICE E – PRESSÃO DA CARGA NO FUNDO DA CONDIÇÃO 2...	92
	APÊNDICE F – PRESSÃO DA CARGA E HIDROSTÁTICA ATUANTES NO COSTADO DA CONDIÇÃO 2	94
	APÊNDICE G – PRESSÃO DA CARGA NO FUNDO DA CONDIÇÃO 3 ..	95
	APÊNDICE H – PRESSÃO HIDRATÁTICA NO COSTADO DA CONDIÇÃO 3.....	97
	APÊNDICE I – PRESSÃO DA CARGA NO FUNDO DA CONDIÇÃO 4	98
	APÊNDICE J – PRESSÃO HIDRATÁTICA NO COSTADO DA CONDIÇÃO 4.....	100
	APÊNDICE K – PRESSÃO DA CARGA NO FUNDO DA CONDIÇÃO 5.	101
	APÊNDICE L – PRESSÃO HIDRATÁTICA NO COSTADO DA CONDIÇÃO 5.....	103

1 INTRODUÇÃO

O transporte de grãos por meio de barcas desempenha um papel essencial na logística global de commodities agrícolas, especialmente em regiões com extensas redes hidroviárias. Esse modal apresenta-se como uma alternativa altamente eficiente, econômica e ambientalmente sustentável, possibilitando o escoamento de grandes volumes de carga com baixo consumo energético e reduzidas emissões de poluentes por tonelada transportada, quando comparado aos modais rodoviário e ferroviário. Em países como Estados Unidos e China, o transporte hidroviário consolidou-se como pilar estratégico da matriz logística, sendo responsável por parcela significativa do escoamento de grãos destinados à exportação (UNCTAD, 2022).

No setor brasileiro, as barcas desempenham um papel cada vez mais relevante no agronegócio, especialmente no escoamento de grãos como soja e milho por meio das hidrovias. Trata-se de um modal altamente eficiente do ponto de vista econômico, uma vez que permite o transporte de grandes volumes com menor custo por tonelada, reduzindo a dependência do transporte rodoviário e contribuindo para a diminuição do tráfego terrestre. Estudos recentes evidenciam o crescimento consistente do transporte hidroviário de grãos no Brasil e apontam que, apesar do grande potencial hidrográfico nacional, diversos rios ainda são subutilizados como vias navegáveis (TOIGO et al., 2024).

Pesquisas regionais também demonstram que hidrovias como a Tietê-Paraná têm potencial para ampliar significativamente o escoamento agrícola em estados produtores, como Goiás, aliviando a pressão sobre os modais terrestres e aumentando a eficiência logística (DANTAS; SANTOS; FRAGA, 2020). Nesse contexto, o fortalecimento da infraestrutura hidroviária consolidasse como estratégia essencial para a redução dos custos logísticos, o aumento da competitividade do agronegócio nacional e a mitigação dos impactos ambientais associados ao transporte de cargas.

Diante desse cenário, torna-se fundamental assegurar a confiabilidade estrutural das barcas graneleiras, uma vez que essas embarcações são responsáveis pelo transporte de grandes volumes de carga sob variadas condições de carregamento e estiva. As diferenças na disposição da carga resultam das distintas estratégias operacionais adotadas em cada porto, que podem priorizar

segurança estrutural e estabilidade ou, alternativamente, agilidade e economia de tempo nas operações de carga e descarga.

O estudo do comportamento estrutural dessas embarcações é, portanto, essencial para prevenir falhas locais e globais, como flambagem, colapso estrutural ou deformações excessivas, que comprometem a integridade da embarcação e a segurança operacional (HUGHES; PAIK, 2010; GUEDES SOARES; TEIXEIRA, 2017).

Nesse contexto, o Método dos Elementos Finitos (MEF) surge como uma ferramenta indispensável para a análise estrutural de embarcações, permitindo avaliar com precisão distribuições de tensões, deformações e modos de flambagem sob diferentes cenários de carregamento. A aplicação do MEF em estruturas navais possibilita a identificação de regiões críticas de esforço, a otimização de espessuras e reforços estruturais e o aumento da segurança e eficiência no projeto (DOW, 2018).

A embarcação analisada neste estudo consiste em uma barcaça graneleira fluvial construída pelo Estaleiro Juruá (Figura 1), localizado em Manaus, cuja estrutura é subdividida em três seções principais: corpo de popa, porão de carga e corpo de proa. A barcaça apresenta comprimento total de 64,8 metros, boca de 14 metros e pontal de 7,4 metros, com capacidade máxima de carga de 3.000 toneladas, conforme especificações fornecidas pelo estaleiro construtor. Toda a estrutura é fabricada em aço naval (tensão de escoamento igual a 250 Mpa), amplamente empregado em construções navais devido à sua resistência mecânica, tenacidade e boa soldabilidade

Figura 1 – Barcaça estudada



Fonte: Autor (2025)

A motivação para o desenvolvimento deste estudo decorreu de instabilidades estruturais observadas pelo próprio estaleiro, que relatou a ocorrência de flambagem na mesa da braçola e deslocamentos transversais nos costados da embarcação, mesmo sob carregamentos que respeitavam o limite máximo de 3.000 toneladas. Tais deslocamentos resultavam no desalinhamento e levantamento da tampa do porão de carga, configurando um risco à integridade estrutural da barça, à segurança da carga transportada e à operação em si.

Dessa forma, o Método dos Elementos Finitos é utilizado para realizar a análise do comportamento estrutural da barça quando submetida a diferentes condições de carregamento, permitindo compreender e quantificar os efeitos dessas variações sobre a resposta estrutural da embarcação. Essa abordagem fornece uma base técnica consistente para o aprimoramento do projeto e para o aumento da segurança operacional.

Além disso, os resultados obtidos oferecem subsídios concretos para a definição de estratégias otimizadas tanto no processo de carregamento quanto na disposição final da carga, garantindo a integridade estrutural e a confiabilidade das operações.

1.1 OBJETIVOS

Para realizar a avaliação estrutural da barça quando submetida a diferentes condições de carregamento, estabelecem-se os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar análises estruturais da barça utilizando MEF.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir ferramentas que permitam a modelagem das cargas e utilização do MEF;
- Modelar as cargas e garantir o equilíbrio de Viga Navio;

- Identificar as forças atuantes devido à pressão de carga e à pressão hidrostática;
- Desenvolver e parametrizar os modelos para análise do MEF;
- Realizar as simulações numéricas;
- Estudar o comportamento estrutural da barcaça;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

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

2.1 TEORIA DE VIGA NAVIO

Segundo Barabanov (1966), em razão da geometria característica das embarcações, a análise estrutural naval pode ser dividida em efeitos globais e efeitos locais. Os efeitos globais são aqueles que se propagam para regiões distantes do ponto de aplicação das cargas, influenciando o comportamento estrutural de todo o casco. Já os efeitos locais permanecem restritos às proximidades do ponto de aplicação das cargas, afetando apenas partes específicas da estrutura.

Dessa forma, uma falha ocorrida distante do ponto de aplicação das cargas atuantes é denominada falha global, a qual, em geral, leva ao colapso total da estrutura. Embora uma falha local também possa levar a danos severos, sua influência tende a se limitar a uma região específica da embarcação. De acordo com Tancredi (2004), a análise global de uma estrutura naval é conhecida como análise da Estrutura Primária, sendo a etapa responsável por avaliar os efeitos estruturais que atuam sobre o casco da embarcação em sua totalidade.

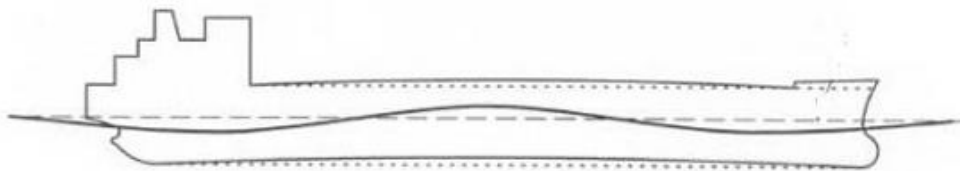
Considerando que o comprimento de uma embarcação é, em geral, muito superior à sua boca e ao seu pontal, a estrutura primária costuma ser modelada com base na Teoria Simples de Vigas. Assim, para embarcações com razões L/B (comprimento / boca) e L/D (comprimento / calado) superiores a cinco (ABS, 2025), a análise global é realizada considerando o casco como uma viga equivalente, denominada viga navio.

Nesse modelo, as tensões globais podem ser determinadas de maneira simplificada, a partir da distribuição de pesos a bordo e da distribuição de flutuação ao longo do comprimento da embarcação. Assim, a precisão dos resultados obtidos depende diretamente do nível de detalhamento empregado na modelagem da curva de carregamento que atua sobre a viga navio.

É importante observar que, embora a curva de pesos seja única para cada condição de carregamento analisada, a curva de flutuação, em navegação oceânica, varia constantemente durante a navegação, em função da passagem das ondas, sendo necessário avaliar diferentes cenários operacionais para identificar a condição estrutural mais crítica.

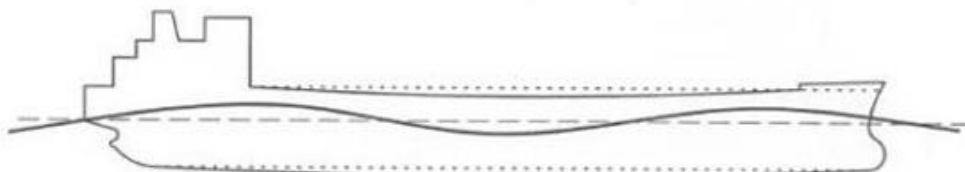
Conforme Hughes (2010), embora o mar apresente ondas com diversos comprimentos, as solicitações estruturais mais severas ocorrem quando o comprimento da onda é próximo ao comprimento do casco. O instante em que as extremidades do navio se encontram nos vales de uma onda crítica é denominado condição de alquebramento (Figura 2), enquanto a situação em que as extremidades são sustentadas pelas cristas da onda crítica recebe o nome de condição de tosamento (Figura 3).

Figura 2 – Condição de alquebramento



Fonte: Augusto (2007, p.23)

Figura 3 – Condição de tosamento



Fonte: Augusto (2007, p.23)

Assim, para se identificar a condição de carregamento crítica, é necessário considerar não apenas a onda crítica, mas também as condições de equilíbrio em águas tranquilas, tosamento e alquebramento (AUGUSTO, 2007).

De acordo com Tancredi (2004), a viga navio não possui vínculos externos, assim, qualquer desequilíbrio entre peso e empuxo resulta em movimentos da embarcação até que o sistema atinja um estado de equilíbrio estático.

Portanto, qualquer análise estrutural de um navio deve se iniciar pela verificação da condição de equilíbrio, a qual, para ser atendida, requer que o peso seja numericamente igual ao empuxo (Equação 1), além de exigir que a posição longitudinal do centro de massa LCG seja igual a posição longitudinal do centro de flutuação LCB (Equação 2).

$$W = \rho g \nabla \quad (1)$$

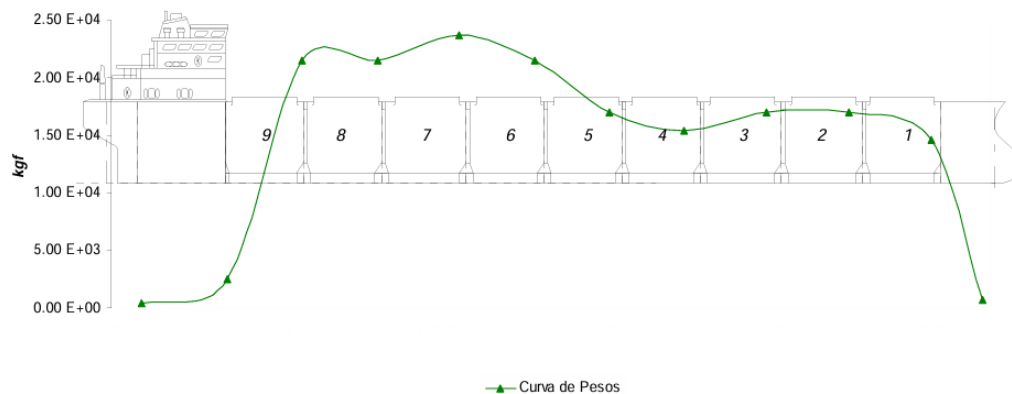
$$LCG = LCB \quad (2)$$

Em que W representa o peso total do navio, ρ é a densidade do fluido, g é a aceleração da gravidade e ∇ o volume deslocado pelo casco.

Caso uma dessas condições não seja atendida, a análise passa a ser dinâmica, associada aos movimentos da embarcação, os quais, em um primeiro momento, não geram solicitações estruturais significativas. No entanto, conforme observa Barabanov (1996), devido à natureza tridimensional do casco, o equilíbrio é alcançado de forma iterativa, uma vez que qualquer alteração no trim provoca modificações no volume deslocado, afetando o equilíbrio hidrostático definido pela Equação (2).

2.1.1 Curva de pesos

A curva de pesos representa a distribuição longitudinal de todos os pesos a bordo da embarcação ao longo de seu comprimento (Figura 4). Entre os principais grupos de pesos que compõem essa distribuição destacam-se o peso estrutural (aço), o peso de outfitting, o peso de maquinário, o peso da carga, o lastro, os consumíveis, além de outros elementos de massa significativa, como guindastes, piscinas ou baterias de grande porte, quando aplicável

Figura 4 – Curva de Pesos, $p(x)$ 

Fonte: Tancredi (2004, p.7)

Como a curva de pesos descreve a variação do peso ao longo do comprimento do navio, a área sob essa curva corresponde ao peso total da embarcação, enquanto o centro geométrico dessa área indica a posição longitudinal do centro de gravidade (LCG) do navio.

2.1.2 Curva de flutuação

A curva de flutuação representa a variação da flutuação ao longo do comprimento do casco, sendo obtida por meio da integração da área submersa das balizas da embarcação. De forma análoga à curva de pesos, a área sob a curva de flutuação corresponde ao volume total deslocado pelo navio, enquanto o centro dessa área indica a posição longitudinal do centro de flutuação (LCB) do casco.

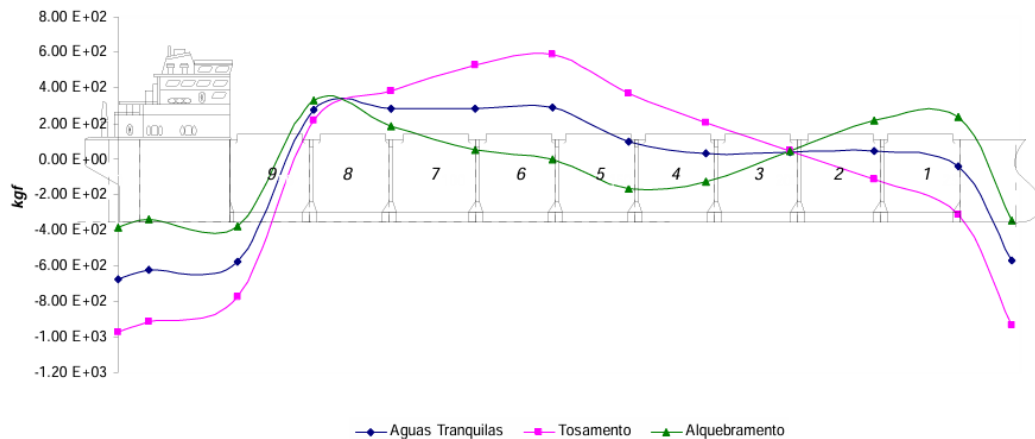
No cálculo da curva de flutuação, é essencial considerar a passagem das ondas, pois a interação do navio com a superfície ondulada altera a área submersa de cada baliza, impactando diretamente nas condições de equilíbrio e nas solicitações estruturais.

2.1.3 Curva de carga

A curva de carga é obtida pela subtração da curva de flutuação da curva de pesos da embarcação. Em casos de geometrias tridimensionais complexas do casco

ou distribuições irregulares de peso, essa operação deve ser realizada ponto a ponto, considerando múltiplas posições longitudinais da linha d'água, de modo a gerar uma curva de carga representativa do carregamento efetivamente atuante na estrutura (Figura 5).

Figura 5 – Curva de carga $q(x)$



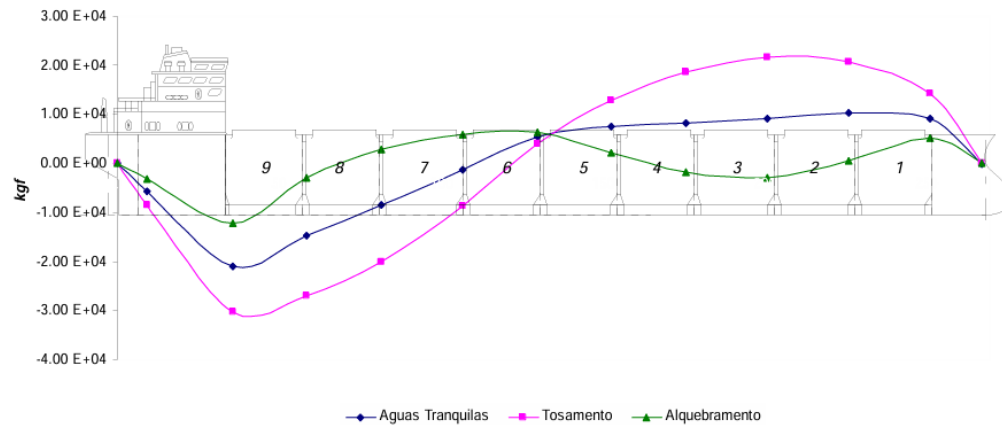
Fonte: Tancredi (2004, p.13)

Como a curva de carga reflete o carregamento total aplicado ao navio, quando a distribuição de cargas está em equilíbrio, a área sob a curva de carga deve ser nula, indicando que não há excesso de peso ou de flutuação atuando sobre a viga navio. Ademais, o centro das áreas positivas da curva de carga deve coincidir longitudinalmente com o centro das áreas negativas, garantindo a segunda condição de equilíbrio estrutural, conforme estabelecido pela Equação (2).

2.1.4 Curvas de força cortante o momento fletor

No modelo adotado neste trabalho, em que a estrutura primária é analisada segundo a teoria simples de vigas, a curva de força cortante (Figura 6) atuante na viga navio pode ser obtida pela integração da curva de carga $q(x)$:

$$V(x) = \int q(x)dx \quad (3)$$

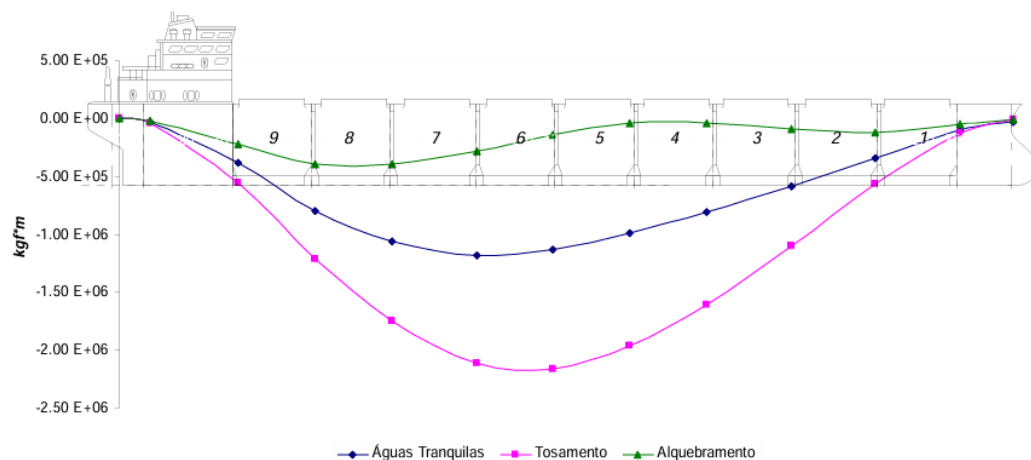
Figura 6 – Curva da força cortante, $Q(x)$ 

Fonte: Tancredi (2004, p.14)

Segundo Tancredi (2004), para geometrias usuais e distribuições de carga convencionais, a curva de força cortante tende a ser assimétrica, apresentando valor nulo próximo à meia nau e valores máximos próximos a um quarto de vante e um quarto de ré da embarcação.

De forma análoga, a curva de momento fletor (Figura 7), também baseada na teoria simples de vigas, é obtida pela integração da curva de força cortante $V(x)$:

$$M(x) = \int V(x)dx \quad (4)$$

Figura 7 – Curva de momento fletor, $M(x)$ 

Fonte: Tancredi (2004, p.15)

Tancredi (2004) observa que, para geometrias usuais e carregamentos convencionais, o momento fletor máximo ocorre próximo à meia nau, seção denominada seção mestra, local crítico em que o projeto estrutural da embarcação é normalmente iniciado, devido à concentração dos maiores esforços solicitantes.

Considerando que a disposição do carregamento em mar calmo tende a gerar alquebramento ou tosamento da viga navio, a passagem de ondas pode amplificar ou reduzir essa tendência, tornando a condição de mar calmo uma situação intermediária entre os dois extremos associados à onda crítica.

Por fim, como ressalta Barabanov (1996), é difícil antecipar a condição crítica de carga, razão pela qual qualquer análise estrutural naval deve contemplar diferentes cenários de carregamento a bordo, bem como os diversos instantes associados à passagem da onda crítica, garantindo a identificação das situações mais severas para o projeto estrutural.

2.2 FLAMBAGEM EM NAVIOS

A flambagem é um fenômeno de instabilidade estrutural que ocorre quando um elemento submetido predominantemente a esforços de compressão perde sua capacidade de manter o equilíbrio estável, resultando em uma deformação lateral súbita que pode levar à falha estrutural, mesmo que as tensões estejam abaixo do limite de escoamento do material (SHAMA, 2018). No contexto naval, esse fenômeno assume especial relevância, pois os cascos e compartimentos internos das embarcações são compostos por chapas e reforços esbeltos, frequentemente submetidos a carregamentos combinados de compressão, cisalhamento e pressão lateral.

Segundo Shama (2018), a flambagem deve ser entendida como um problema de estabilidade: enquanto a carga aplicada estiver abaixo de um valor crítico, o equilíbrio é estável e as deformações crescem de forma proporcional ao carregamento. Entretanto, quando a carga crítica de flambagem é atingida, o equilíbrio torna-se instável, e pequenas imperfeições geométricas ou tensões residuais podem gerar grandes deslocamentos laterais, culminando na perda súbita da capacidade resistente.

Nas estruturas navais, a esbeltez dos componentes estruturais — característica comum a chapas, conveses, anteparas e longarinas — torna a

flambagem um modo de falha recorrente, especialmente sob a ação de pressões hidrostáticas, impactos de ondas e esforços longitudinais decorrentes da flexão global do casco (HUGHES; PAIK, 2010).

O fenômeno inicia-se quando uma chapa comprimida ou uma coluna estrutural apresenta pequena deflexão lateral, geralmente causada por imperfeições iniciais ou variações de tensão. Se a carga aplicada ultrapassar o valor crítico, essa deflexão se amplifica rapidamente, alterando o estado interno de tensões e deformações. A flambagem, portanto, não é apenas um problema de resistência, mas um problema de estabilidade geométrica, em que o equilíbrio inicial é substituído por uma nova configuração deformada.

Conforme ressalta Shama (2018), o comportamento pós-flambagem também é determinante para o dimensionamento estrutural. Em alguns casos, a estrutura mantém uma resistência residual após o início da flambagem (modo elasto-plástico), enquanto em outros o colapso ocorre de forma imediata após atingir a carga crítica. Dessa forma, a análise da flambagem em estruturas navais requer uma abordagem integrada, considerando fatores geométricos, propriedades dos materiais, condições de contorno e efeitos não lineares. Portanto, é indispensável utilizar métodos numéricos avançados, como o Método dos Elementos Finitos, em conjunto com critérios normativos de classificação, para garantir previsões confiáveis das cargas e modos de instabilidade.

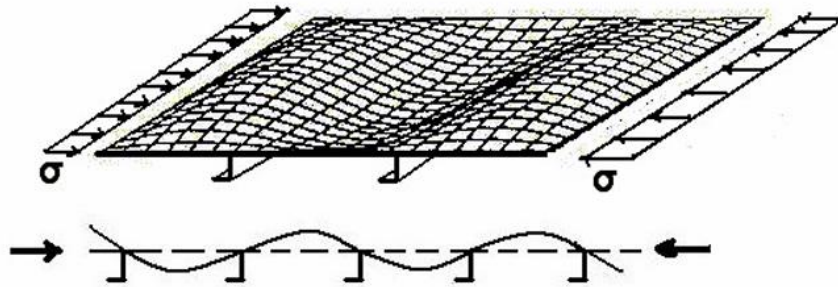
Compreender o fenômeno da flambagem é, portanto, essencial para assegurar a integridade estrutural e a segurança operacional das embarcações, especialmente diante das condições severas de operação marítima e dos altos níveis de carregamento aos quais os navios estão continuamente expostos.

2.2.1 Principais tipos de flambagem em estruturas navais

Com base na classificação proposta por Shama (2018), os principais tipos de flambagem observados em estruturas navais são:

- Flambagem Local de Chapas (Plate Buckling) (Figura 8): ocorre em painéis planos e delgados submetidos à compressão ou cisalhamento, sendo comum em conveses, costados e anteparas. A resistência depende das dimensões da chapa, das condições de contorno e da rigidez dos reforços adjacentes.

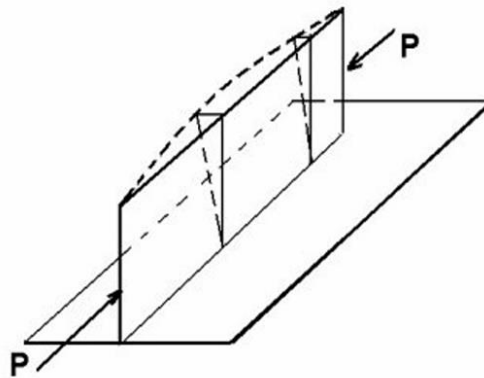
Figura 8 - Flambagem Local de Chapas



Fonte: Shama (2018)

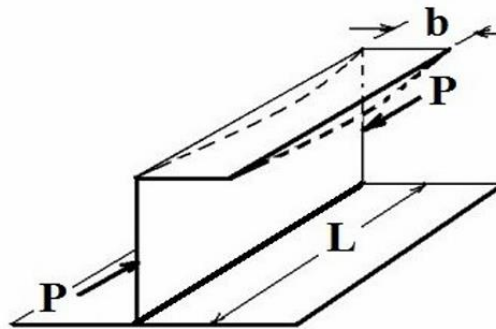
- Flambagem de Reforços Longitudinais e Transversais (Stiffener Buckling) (Figuras 9 e 10): manifesta-se quando reforços estruturais, como longarinas, cavernas e vaus, perdem estabilidade sob compressão axial ou flexo-compressão. Pode ocorrer de forma isolada ou em interação com a chapa suportada.

Figura 9 - Flambagem de Reforços Longitudinais e Transversais 1



Fonte: Shama (2018)

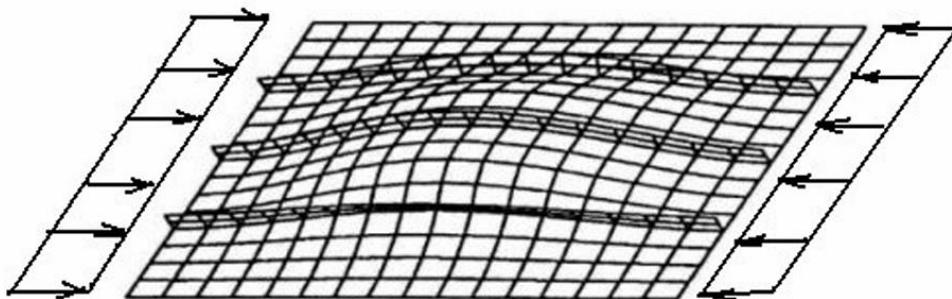
Figura 10 - Flambagem de Reforços Longitudinais e Transversais 2



Fonte: Shama (2018)

- Flambagem Interativa (Stiffened Panel Buckling) (Figura 11): resulta da instabilidade conjunta entre chapa e reforço, levando a uma redução significativa da carga crítica. É um dos modos críticos, pois envolve a interação entre múltiplos elementos estruturais.

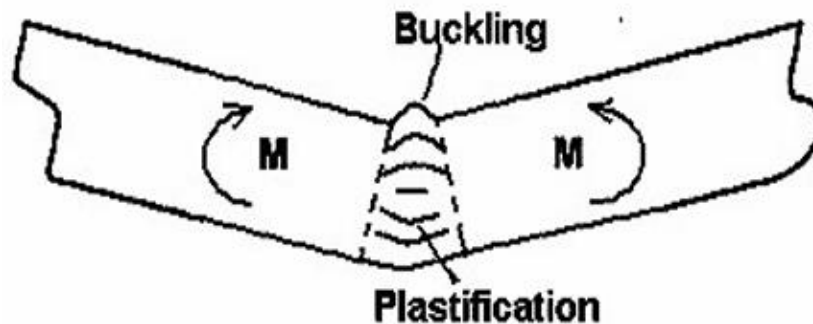
Figura 11 - Flambagem Interativa



Fonte: Shama (2018)

- Flambagem Global (Hull Girder Buckling) (Figura 12): refere-se à instabilidade longitudinal do casco como um todo, modelado como uma viga submetida à compressão e flexão. Pode ocasionar o colapso global da embarcação e é avaliada no âmbito da estrutura primária do navio.

Figura 12 - Flambagem Global



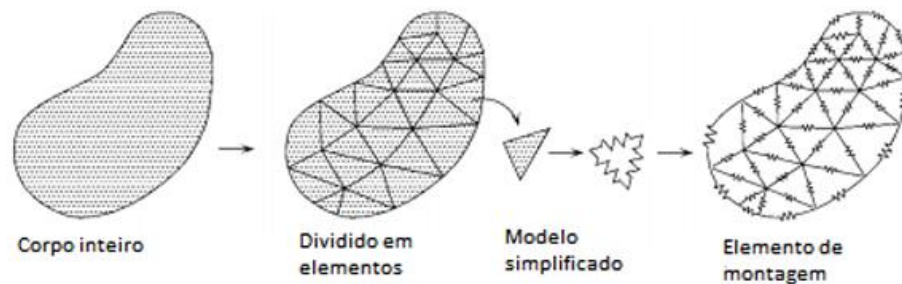
Fonte: Shama (2018)

2.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

De acordo com Zienkiewicz e Taylor (2000), a análise estrutural pode ser conduzida a partir de diferentes abordagens, classificadas em modelos discretos e modelos contínuos. Os modelos numéricos baseados na discretização da estrutura em um número finito de elementos são denominados modelos discretos, oferecendo uma aproximação prática e eficiente do comportamento real da estrutura. Em contrapartida, os modelos contínuos consideram um número infinito de elementos infinitesimais, representando a solução exata das equações diferenciais que descrevem o fenômeno analisado. Há ainda os modelos híbridos, que combinam características de ambos os tipos, integrando elementos finitos com formulações diferenciais para aprimorar a precisão das análises.

Entre os modelos discretos, destaca-se o Método dos Elementos Finitos (MEF) (Figura 13), amplamente empregado na análise de estruturas complexas. Esse método consiste na subdivisão da estrutura em elementos de geometria e comportamento conhecidos, permitindo que, a partir da análise individual de cada elemento, se reconstitua o comportamento global da estrutura original (OKUMOTO et al., 2009). No contexto naval, o objetivo principal da modelagem estrutural é avaliar e garantir a resistência estrutural, segurança e eficiência operacional das embarcações. Entre os principais aspectos analisados destacam-se a resistência global e local, o comportamento à fadiga, a estabilidade e a resposta estrutural sob diferentes condições de carregamento (HUGHES; PAIK, 2010).

Figura 13 - Representação do método dos elementos finitos

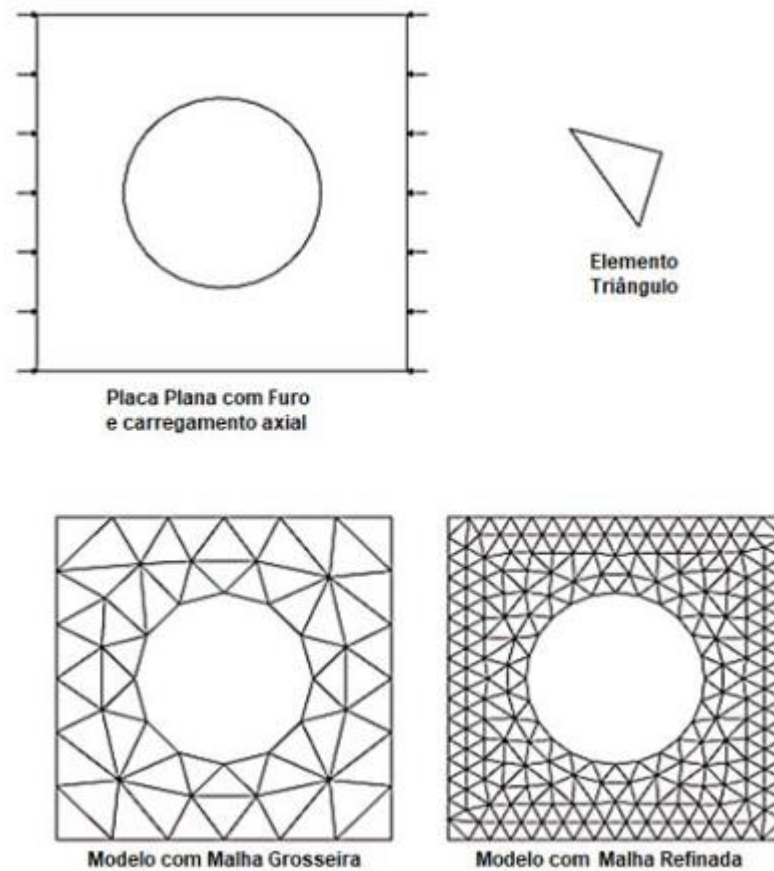


Fonte: Traduzido de Okumoto et al. (2009, p. 126).

A análise estrutural por meio do MEF envolve uma sequência metodológica composta por cinco etapas fundamentais, que asseguram a representação adequada e a precisão dos resultados. A primeira etapa consiste na modelagem geométrica da estrutura, na qual se desenvolve um modelo tridimensional, bidimensional ou unidimensional, conforme o nível de detalhe e o tipo de fenômeno físico a ser analisado. Modelos tridimensionais (sólidos) fornecem maior fidelidade à realidade física, porém demandam elevado custo computacional em comparação com modelos de casca ou de viga (ZIENKIEWICZ; TAYLOR, 2000).

Após a modelagem geométrica, procede-se à geração da malha computacional, que discretiza a geometria em elementos finitos (Figura 14). Segundo Barbeiro (2013), a qualidade da malha é determinante para a precisão dos resultados, uma vez que malhas grosseiras podem comprometer detalhes estruturais relevantes, enquanto malhas excessivamente refinadas elevam o custo computacional. Hughes (2000) destaca que o refinamento adequado da malha é essencial para capturar adequadamente o comportamento estrutural, devendo ser ajustado conforme a complexidade geométrica e as regiões de maior concentração de esforços. De forma complementar, Bathe (1995) recomenda a otimização local da malha, com maior detalhamento nas áreas críticas e discretização mais simples nas regiões uniformes, assegurando equilíbrio entre precisão e eficiência.

Figura 14 – Discretização da malha



Fonte: Fish e Belytschko (2007)

Em seguida, é indispensável definir com rigor as propriedades dos materiais empregados — como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e coeficiente de dilatação térmica —, uma vez que esses parâmetros influenciam diretamente os campos de tensão e deformação obtidos na análise (FAGAN, 1996). A precisão desses valores é essencial para garantir que o modelo represente fielmente o comportamento mecânico real da estrutura (FISH; BELYTCHKO, 2007).

A quarta etapa consiste na definição das condições de contorno e carregamentos aplicados, que devem reproduzir de forma fidedigna as situações operacionais reais. Essas condições incluem restrições de deslocamento e rotação, além da aplicação de cargas distribuídas, concentradas ou momentos. Segundo Reddy (2005), uma adequada definição das condições de contorno é essencial para que o modelo reproduza corretamente o comportamento físico da estrutura. Oden e Reddy (2012) ressaltam que tanto as condições de contorno quanto as propriedades dos materiais devem ser cuidadosamente ajustadas, pois inconsistências nesses

parâmetros podem gerar resultados artificiais e comprometer a validade da simulação.

Com todas as etapas anteriores definidas, realiza-se a análise estrutural propriamente dita por meio do MEF. Nessa fase, são determinados os campos de tensões, deformações e deslocamentos, permitindo avaliar a integridade estrutural e verificar critérios de falha (MOAVENI, 1999). O processo inicia-se com a formulação das matrizes de rigidez, equilíbrio e constitutiva, as quais relacionam esforços, deslocamentos e propriedades dos materiais. Tais sistemas são resolvidos por métodos numéricos iterativos ou diretos, possibilitando a obtenção dos resultados que descrevem o comportamento da estrutura sob as condições impostas (ODEN; REDDY, 2012).

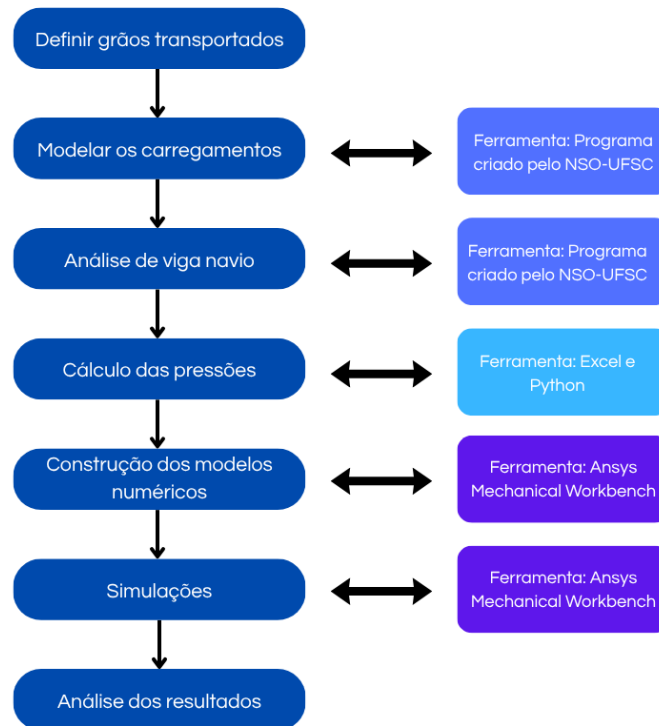
Entretanto, como todo método numérico, o MEF depende de hipóteses simplificadoras e está sujeito a limitações associadas à discretização e à formulação matemática. Dessa forma, é imprescindível realizar as etapas de verificação e validação dos resultados. A verificação assegura que o modelo computacional foi corretamente implementado e que os algoritmos utilizados produzem soluções numericamente consistentes. Já a validação consiste na comparação dos resultados obtidos com dados experimentais ou medições reais, de modo a confirmar que o modelo representa fielmente o comportamento físico do sistema (ODEN; REDDY, 2012).

Essas etapas conferem credibilidade e robustez à análise estrutural, assegurando que o modelo numérico seja confiável para aplicações de engenharia, como no caso de estruturas navais, em que o desempenho e a segurança dependem diretamente da precisão das simulações realizadas por meio do Método dos Elementos Finitos.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo apresenta-se a metodologia empregada para a análise do comportamento estrutural da barcaça estudada, considerando sua resposta quando submetida a diferentes tipos e disposições de carregamento. O procedimento metodológico foi organizado conforme as etapas descritas no fluxograma da Figura 15, que sintetiza as principais fases do estudo.

Figura 15 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Autor (2025)

Inicialmente, realizou-se a definição dos tipos de grãos utilizados nos cenários de carregamento e, em seguida, a determinação das respectivas disposições ao longo do porão de carga. Essa etapa foi essencial para a caracterização dos casos analisados, servindo como base para as etapas posteriores.

Na sequência, empregou-se um programa computacional desenvolvido pelo Núcleo de Simulação e Otimização (NSO) da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Joinville. A ferramenta, composta por macros em Python integradas ao software FreeCAD, possibilitou a geração automatizada de modelos tridimensionais das diferentes configurações de carregamento, bem como o cálculo dos parâmetros associados à teoria de viga-navio e dos campos de pressão utilizados posteriormente na modelagem pelo Método dos Elementos Finitos (MEF).

Com os carregamentos caracterizados, foram construídos dois modelos numéricos no software Ansys Mechanical Workbench: um voltado à análise estrutural estática e outro destinado à análise de flambagem. O desenvolvimento desses modelos envolveu a elaboração da geometria detalhada da embarcação, a

definição do material da estrutura e a seleção do tipo de elemento finito mais adequado para representar o comportamento mecânico global da barçaça.

Posteriormente, procedeu-se à parametrização da malha e ao refinamento necessário para garantir a consistência e a precisão numérica dos resultados. Os campos de pressão correspondentes a cada cenário de carregamento foram calculados por meio de planilhas em Microsoft Excel e macros em Python, sendo então aplicados aos modelos de elementos finitos para a execução das simulações estruturais.

Por fim, os resultados obtidos nas diferentes simulações foram comparados com o intuito de avaliar a influência das configurações de carregamento sobre o comportamento estrutural da barçaça. Essa etapa permitiu identificar tendências relevantes de resposta estrutural e fornecer subsídios técnicos que podem auxiliar na otimização de futuras operações de carregamento e transporte, contribuindo para práticas operacionais mais seguras e eficientes.

4 DESENVOLVIMENTO

Nesta seção são apresentados os desenvolvimentos correspondentes a cada etapa descrita na metodologia, abrangendo a modelagem dos carregamentos, a análise da viga navio e a realização das simulações numéricas, que em conjunto permitiram avaliar o comportamento estrutural da barçaça sob diferentes condições de carregamento.

4.1 ANÁLISE DE VIGA NAVIO

Em complemento à análise estrutural por meio do Método dos Elementos Finitos, empregou-se uma ferramenta computacional desenvolvida pelo NSO-UFSC, conforme mencionado anteriormente, destinada ao cálculo automatizado da distribuição de peso, empuxo e momento fletor primário ao longo da embarcação. Essa ferramenta, além de fornecer dados consistentes para a avaliação dos esforços estruturais e de sua influência sobre a integridade global da barçaça, possui caráter eminentemente prático para aplicação em estaleiros, terminais portuários e armadores. Sua utilização permite avaliar rapidamente o equilíbrio da viga-navio e estimar, com elevada precisão, os momentos fletores resultantes de

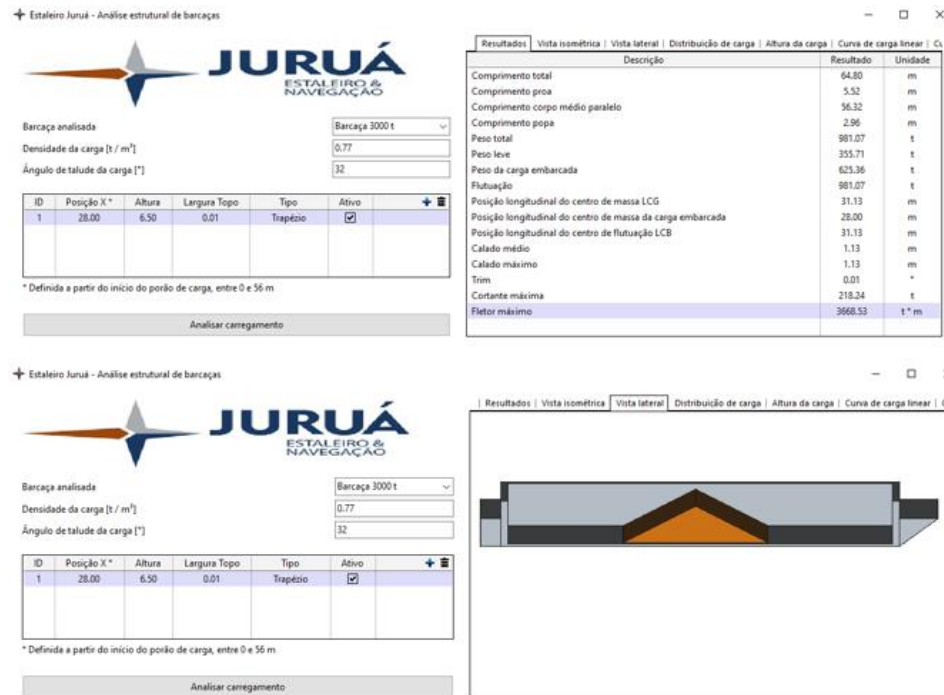
diferentes arranjos de carregamento, apoiando diretamente a tomada de decisão durante as operações de estiva.

A ferramenta utiliza como parâmetros de entrada a densidade aparente do grão, a altura e a posição central de cada pilha de carga, o formato geométrico do carregamento e o ângulo de talude natural, possibilitando a modelagem automatizada de uma ampla gama de configurações compatíveis com as condições operacionais reais observadas no transporte fluvial de granéis.

Com base nesses dados, o programa realiza automaticamente a geração do modelo tridimensional da distribuição de carga no software FreeCAD, representando de forma precisa as condições impostas para cada cenário de carregamento. Em paralelo, são efetuados os cálculos referentes à distribuição de peso, ao empuxo hidrostático e ao momento fletor primário atuante na embarcação, garantindo o atendimento das condições de equilíbrio da viga-navio — isto é, a coincidência entre o centro de gravidade longitudinal (LCG) e o centro de carena longitudinal (LCB), bem como a equivalência entre o peso total da embarcação e a força de flutuação total.

Como resultado, a ferramenta determina automaticamente o calado e o trim correspondentes a cada configuração de carga, viabilizando análises estruturais com elevada fidelidade às condições operacionais reais, aliando precisão e eficiência computacional. A Figura 16 ilustra o funcionamento geral do programa e o processo de modelagem dos carregamentos.

Figura 16 – Programa desenvolvido pelo NSO-UFSC



Fonte: Autor (2025)

4.1.1 Modelagem dos carregamentos

Para a modelagem dos carregamentos, foram definidas oito configurações distintas, variando-se o tipo de grão, o formato geométrico da pilha, a altura máxima do carregamento, a posição longitudinal da pilha no porão e o ângulo de talude. Todas as combinações foram elaboradas de forma a respeitar o limite máximo de carga suportado pela barcaça, garantindo representatividade física e segurança estrutural nos cenários analisados.

Inicialmente, foram selecionados os tipos de grãos a serem utilizados nas simulações. Cada tipo de grão apresenta uma densidade aparente distinta, o que faz com que, para um mesmo volume de carregamento, as massas totais transportadas e, consequentemente, os efeitos estruturais induzidos sobre a barcaça sejam diferentes. Neste estudo, optou-se pela utilização de soja e fertilizante, materiais amplamente empregados no transporte fluvial de granéis sólidos. As propriedades físicas desses grãos encontram-se apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Densidades aparentes

Tipo de grão	Densidade aparente [t/m³]
Soja	0,778
Fertilizante	1,28

Fonte: Autor (2025).

Em seguida, foram definidos os formatos geométricos das pilhas de carga, adotando-se formas trapezoidais e cônicas. Esses formatos foram escolhidos por representarem, de forma simplificada, porém fiel, as condições reais de carregamento observadas em barcas graneleiras. Essa simplificação permite equilibrar realismo físico e eficiência computacional, assegurando que o modelo capture os efeitos estruturais mais relevantes sem demandar modelagens excessivamente complexas.

Os carregamentos trapezoidais representam situações de enchimento mais uniformes, nas quais o operador realiza o preenchimento do porão tanto no sentido transversal quanto no longitudinal. Esse método resulta em uma distribuição de massa mais homogênea ao longo da embarcação, reduzindo os gradientes de esforço e deformação. No entanto, por demandar maior controle operacional e tempo de execução, trata-se de um processo mais demorado e menos usual em operações de alta rotatividade.

Por outro lado, os carregamentos cônicos simulam uma condição operacional mais prática e comumente empregada no transporte fluvial. Nesse caso, o operador realiza o preenchimento apenas no sentido longitudinal, o que gera uma pilha natural com ângulo de talude característico do grão transportado. Essa abordagem é mais rápida e operacionalmente simples, embora resulte em distribuições de carga menos uniformes, podendo gerar maiores concentrações de tensão em determinadas regiões da estrutura da barcaça.

A altura das pilhas de carga foi determinada de forma a assegurar a integridade e a segurança operacional durante o transporte. Assim, definiu-se que a altura máxima de carregamento seria um metro inferior ao pontal da barcaça, atuando como uma margem de segurança preventiva contra o deslocamento ou derramamento de grãos para fora do porão durante o trajeto, especialmente em situações de agitação ou inclinação da embarcação. Essa escolha também reflete as boas práticas operacionais observadas em frotas fluviais, nas quais o espaço livre superior (freeboard interno) é mantido como zona de contenção.

Quanto ao ângulo de talude, foi adotado um valor padrão de 32 graus para todos os carregamentos, definido a partir de uma média dos valores encontrados na literatura técnica e em dados experimentais, conforme apresentado na Tabela 2. Essa padronização permitiu isolar o efeito da geometria e da disposição do carregamento nas análises, garantindo consistência comparativa entre os diferentes cenários simulados.

Tabela 2 – Ângulo de talude médio

Grãos	Ângulo de talude [°]	Fonte
Grão 1	29,0	GalForte, 2025
Grão 2	32,5	Cardoso, 2020
Grão 3	28,6	Bhadra, 2016
Grão 4	33,0	Chigbo, 2016
Grão 5	34,0	
Grão 6	35,9	
Grão 7	30,0	Menezes. 2024
Grão 8	28,8	Serrano. 2019
Média	31,5	

Fonte: Autor (2025).

Dessa forma, o conjunto de configurações estabelecido abrange uma ampla faixa de condições operacionais (Tabela 3), possibilitando avaliar de maneira abrangente a influência da forma, posição e densidade dos carregamentos sobre o comportamento estrutural e a estabilidade global da barçaça.

Tabela 3 – Parâmetros dos carregamentos

Carregamento	Massa [t]	Altura [m]	Tipo de grão	Calado [m]	Geometria
Carregamento 1	2990,0	5,7	Soja	4,23	Trapézio
Carregamento 2	2992,0	3,5	Fertilizante	4,23	Trapézio
Carregamento 3	691,92	6,5	Soja	1,32	Trapézio
Carregamento 4	1138,4	6,5	Fertilizante	1,88	Trapézio
Carregamento 5	2330,4	6,5	Soja	3,40	Trapézio
Carregamento 6	2995,5	6,5	Fertilizante	4,23	Trapézio
Carregamento 7	942,76	6,5	Fertilizante	1,63	Cone
Carregamento 8	2995,0	6,5	Fertilizante	4,23	Cone

Fonte: Autor (2025).

Com os parâmetros previamente definidos, foi então realizada a modelagem tridimensional dos carregamentos, conforme ilustrado nas Figuras 17 a 24.

Figura 17 – Condição de carregamento 1



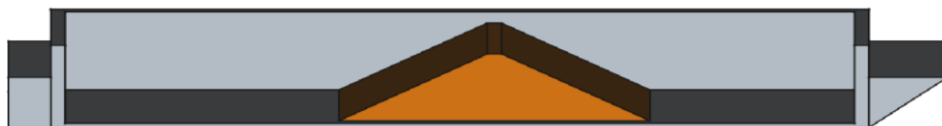
Fonte: Autor (2025)

Figura 18 – Condição de carregamento 2



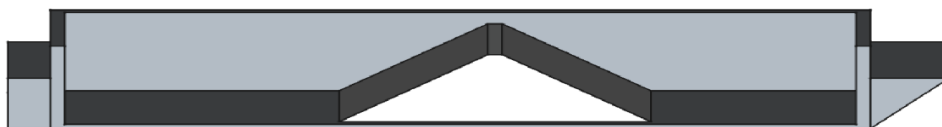
Fonte: Autor (2025)

Figura 19 – Condição de carregamento 3



Fonte: Autor (2025)

Figura 20 – Condição de carregamento 4



Fonte: Autor (2025)

Figura 21 – Condição de carregamento 5



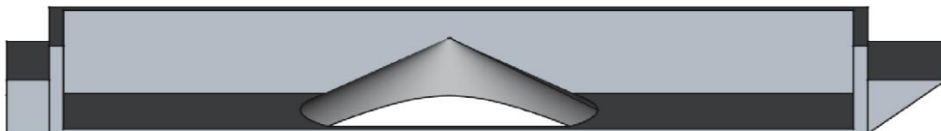
Fonte: Autor (2025)

Figura 22 – Condição de carregamento 6



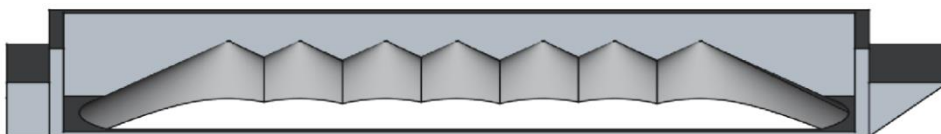
Fonte: Autor (2025)

Figura 23 – Condição de carregamento 7



Fonte: Autor (2025)

Figura 24 – Condição de carregamento 8



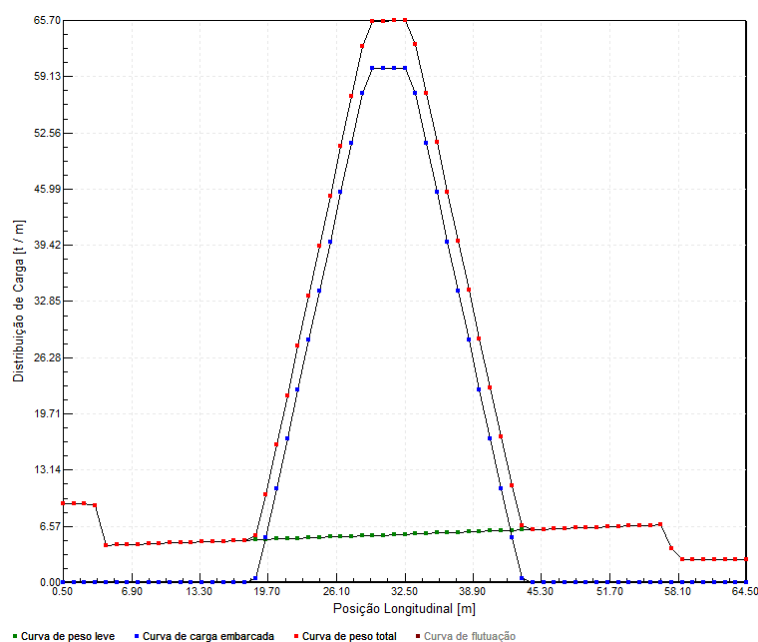
Fonte: Autor (2025)

4.1.2 Computo dos esforços primários

Nesta etapa, com os carregamentos previamente modelados, o programa utilizado realiza automaticamente o cálculo das curvas de peso, flutuação, carga, força cortante e momento fletor correspondentes a cada condição analisada, assegurando o atendimento às condições de equilíbrio da viga-navio apresentadas anteriormente.

No caso específico deste estudo, a embarcação analisada trata-se de uma barça fluvial de reboque, não tripulada e desprovida de sistema de propulsão próprio. Assim, a curva de peso é composta unicamente pela soma do peso estrutural (aço) e do peso do carregamento (Figura 25).

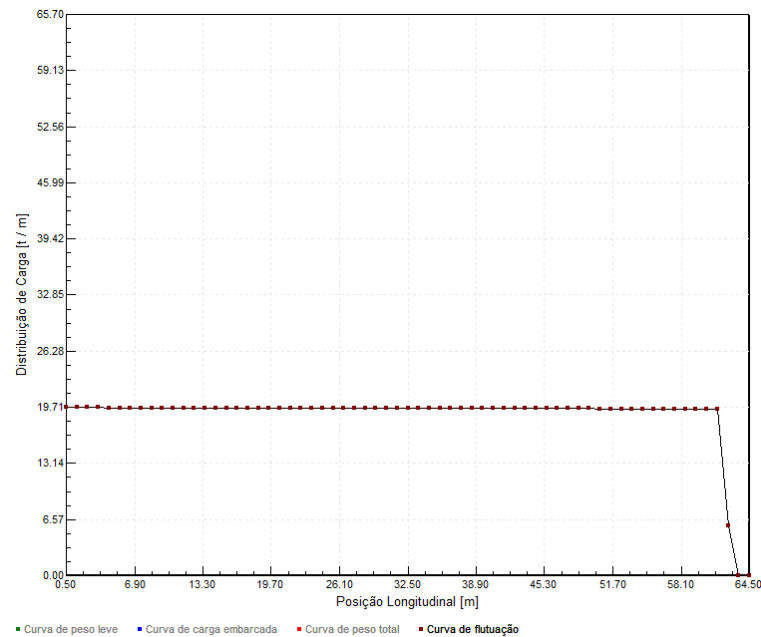
Figura 25 – Curva de peso $p(x)$ da barça



Fonte: Autor (2025)

Além disso, por se tratar de uma embarcação destinada à navegação em águas interiores, os efeitos de ondas sobre a curva de flutuação foram desconsiderados, adotando-se a hipótese de mar calmo como condição de contorno para as análises, como ilustrado na Figura 26.

Figura 26 – Curva de flutuação da barçaça



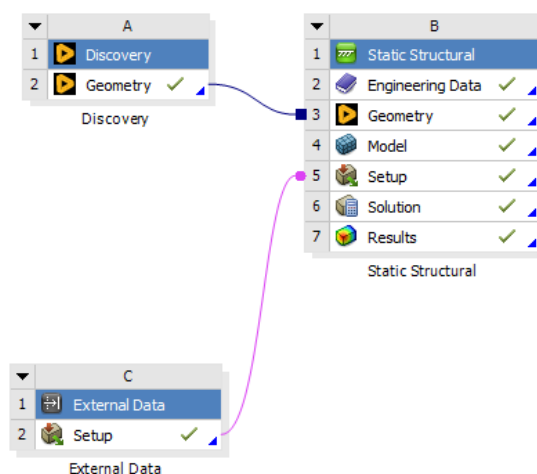
Fonte: Autor (2025)

Por fim, o cálculo das curvas de força cortante e momento fletor foi realizado conforme o procedimento descrito anteriormente, seguindo as formulações e princípios da teoria simples de vigas, de modo a garantir a coerência e a continuidade metodológica da análise estrutural.

4.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Para a realização das simulações numéricas baseadas no Método dos Elementos Finitos (MEF), empregou-se o software ANSYS Mechanical Workbench, amplamente reconhecido no meio acadêmico e industrial pela sua robustez e precisão na análise de problemas estruturais complexos, seguindo os passos apresentados na Figura 27.

Figura 27 – Passos da simulação estrutural estática e de flambagem



Fonte: Autor (2025)

Os campos de pressão aplicados aos modelos numéricos foram determinados a partir de cálculos realizados em planilhas eletrônicas desenvolvidas no Microsoft Excel, em conjunto com rotinas computacionais elaboradas em linguagem Python, as quais são apresentadas nos Apêndices A até L. Essa combinação de ferramentas permitiu a geração automatizada e consistente dos carregamentos, assegurando a coerência entre os parâmetros físicos considerados e as condições reais de operação da embarcação.

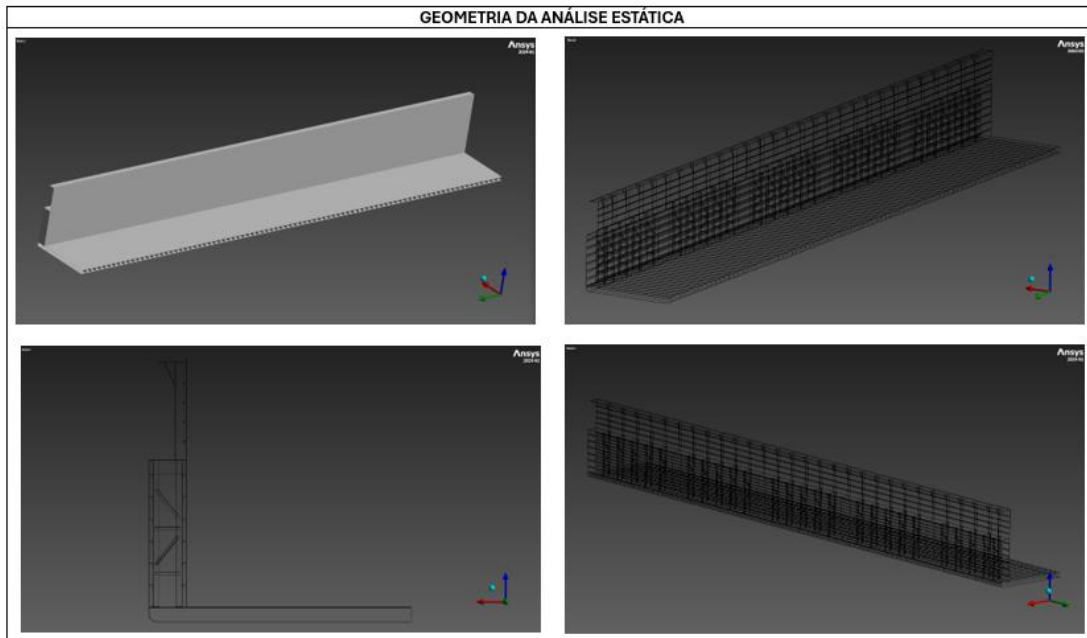
4.2.1 Análise estrutural estática

Para a construção do modelo utilizado na análise pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), iniciou-se com o desenvolvimento da geometria da estrutura. Nesse caso, modelou-se apenas um dos bordos do porão de carga, correspondente à metade da estrutura total, com o objetivo de reduzir a demanda computacional da simulação sem comprometer a representatividade dos resultados.

A geometria foi elaborada de forma fiel às dimensões e características estruturais da barça real, tomando como base o projeto original fornecido pelo estaleiro construtor (Figura 8). O modelo foi construído contemplando todos os chapeamentos, reforçadores longitudinais e transversais, cavernas e anteparas, de modo a reproduzir com exatidão a configuração estrutural da embarcação real. Essa abordagem assegura que o modelo numérico represente de maneira precisa o

comportamento estrutural da barcaça, permitindo que a análise reflita de forma realista as respostas da estrutura sob diferentes condições de carregamento.

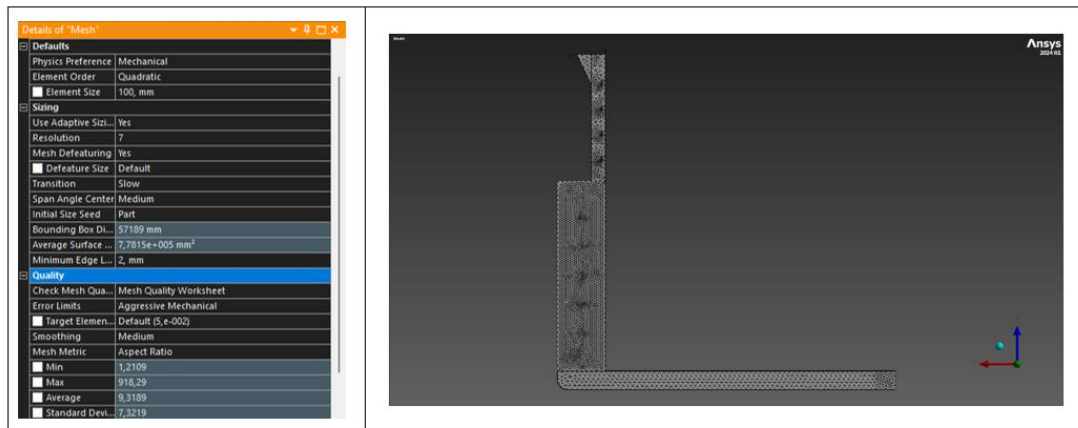
Figura 28 – Ilustração da geometria da análise estática



Fonte: Autor (2025)

Em seguida, realizou-se a caracterização da malha. Para isso, empregou-se uma malha tridimensional refinada, com o propósito de aumentar a precisão dos resultados obtidos nas simulações, mantendo, entretanto, um equilíbrio adequado entre acurácia e eficiência computacional. O refinamento foi especialmente concentrado nas regiões de maior complexidade geométrica e de provável concentração de tensões, como interseções entre reforçadores, anteparas e costados. Essa estratégia permitiu uma representação numérica mais fiel do comportamento estrutural da barcaça, sem comprometer de forma significativa o tempo de processamento (Figura 29).

Figura 29 – Discretização da malha da análise estática



Fonte: Autor (2025)

Na sequência, foi realizada a definição do tipo de elemento e do material empregados no modelo numérico (Figura 30). Optou-se pela utilização de elementos sólidos tetraédricos de 10 nós, que apresentam elevada capacidade de representação de geometrias complexas e alta precisão na interpolação de tensões e deformações, sendo amplamente recomendados para análises estruturais em componentes navais. De acordo com o *ANSYS Mechanical APDL Theory Reference* (2024), esse tipo de elemento é particularmente indicado para modelos tridimensionais sujeitos a carregamentos complexos, oferecendo excelente equilíbrio entre acurácia dos resultados e eficiência computacional, sobretudo em estruturas com geometrias irregulares, como cascos e porões de barcas.

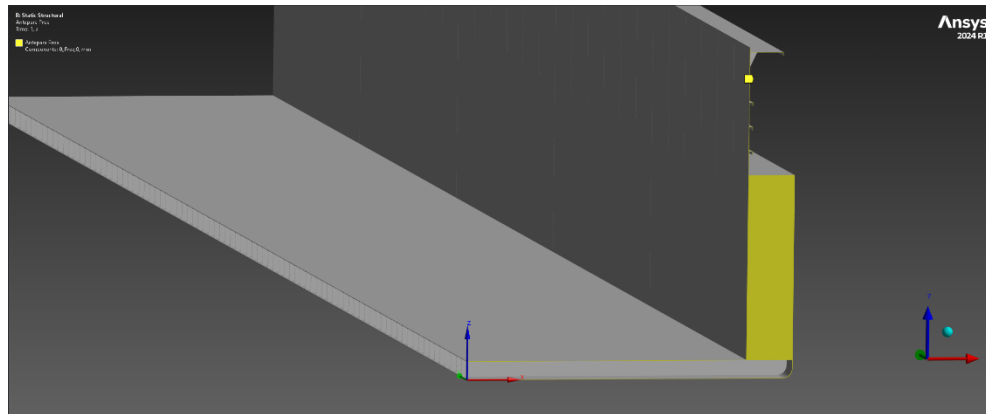
Figura 30 – Material utilizado na análise estática



Fonte: Autor (2025)

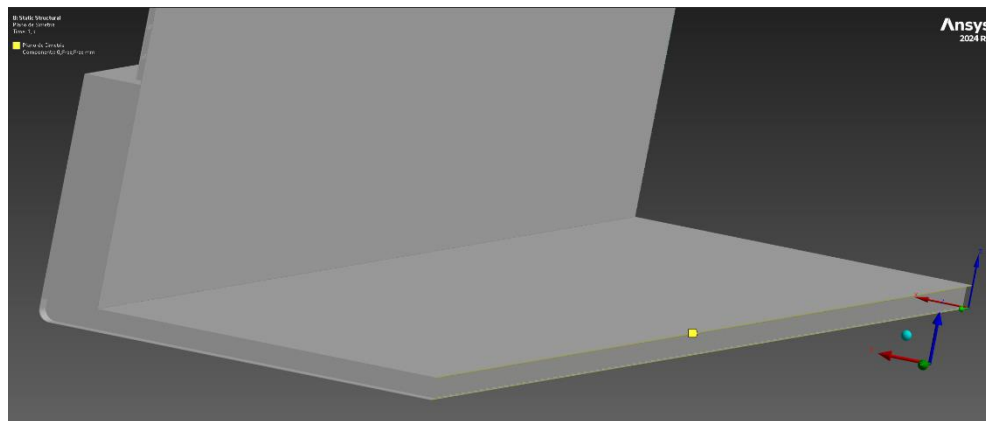
Na etapa seguinte, aplicaram-se as condições de contorno ao modelo numérico, de modo a reproduzir com fidelidade o comportamento estrutural real da embarcação. Considerando que foi modelado apenas o porão de carga, sem incluir as regiões correspondentes aos corpos de proa e popa, as extremidades longitudinais do modelo foram restritas nos eixos X e Z, representando assim a continuidade estrutural da barça (Figura 31). Além disso, por ter sido modelada apenas metade do porão de carga, o plano de simetria correspondente ao eixo longitudinal da embarcação foi restrito no eixo X, evitando deslocamentos transversais indesejados e assegurando a coerência com as condições de simetria estrutural reais (Figura 32).

Figura 31 – Restrição nas extremidades



Fonte: Autor (2025)

Figura 32 – Restrição na base



Fonte: Autor (2025)

Por fim, realizou-se a aplicação das cargas atuantes sobre o modelo numérico (Figura 33 a 40). Inicialmente, foram determinadas as pressões externas correspondentes à pressão hidrostática, que atua de forma constante sobre o fundo da barcaça e varia linearmente ao longo dos costados, desde o fundo até a linha d'água. O valor da pressão hidrostática foi calculado pela expressão 4:

$$P = \rho * g * h \quad (4)$$

Em que P representa a pressão em um ponto específico do costado externo, ρ é a densidade da água, g é a aceleração da gravidade, e h é a profundidade medida a partir da superfície livre até o ponto considerado.

Dessa forma, obteve-se a distribuição de pressão hidrostática equivalente ao volume deslocado pela barcaça em condição de flutuação estável.

Em seguida, foram calculadas as pressões internas geradas pelos carregamentos aplicados no interior do porão de carga. A partir da distribuição de peso e da variação da altura das pilhas de carga obtidas na análise pelo método da viga-navio, foi possível determinar a pressão exercida sobre o teto do duplo fundo e sobre os costados internos da barcaça.

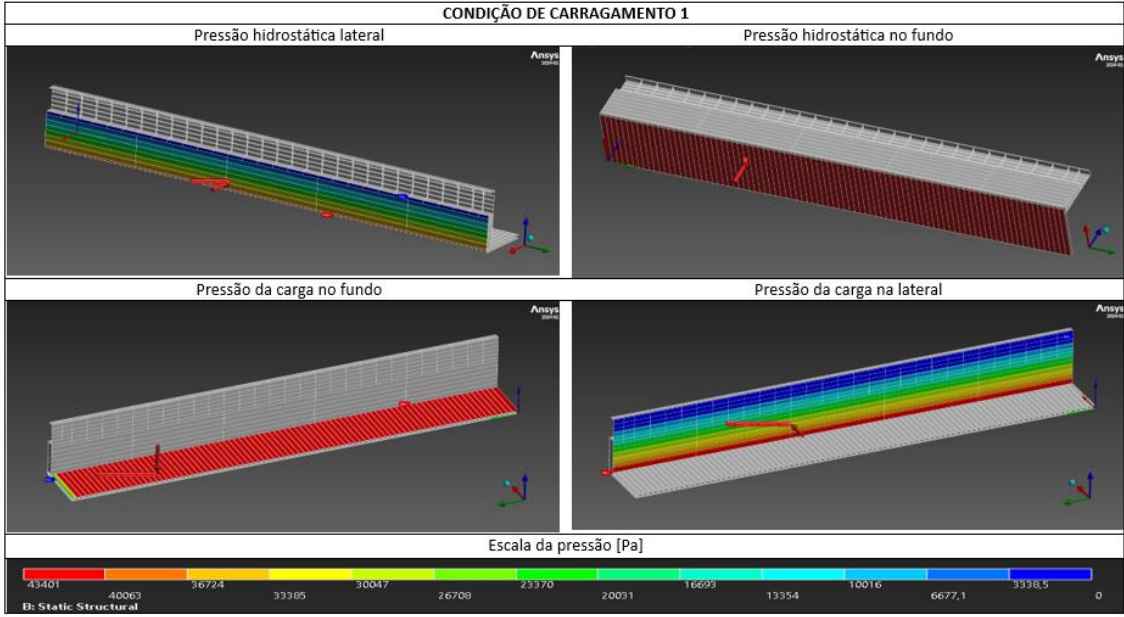
A pressão no teto do duplo fundo foi obtida pela relação entre o peso total do carregamento e a área de contato correspondente, resultando em uma carga distribuída uniforme sobre essa região. Já a pressão nos costados internos foi calculada de forma análoga à pressão hidrostática, considerando a densidade aparente do grão e a altura da pilha de carga, conforme a expressão 5:

$$P_1 = \rho_1 * g * h_1 \quad (5)$$

Em que P_1 representa a pressão interna nos costados, ρ_1 é a densidade aparente do grão, g é a aceleração da gravidade, e h_1 é a altura da pilha de carga.

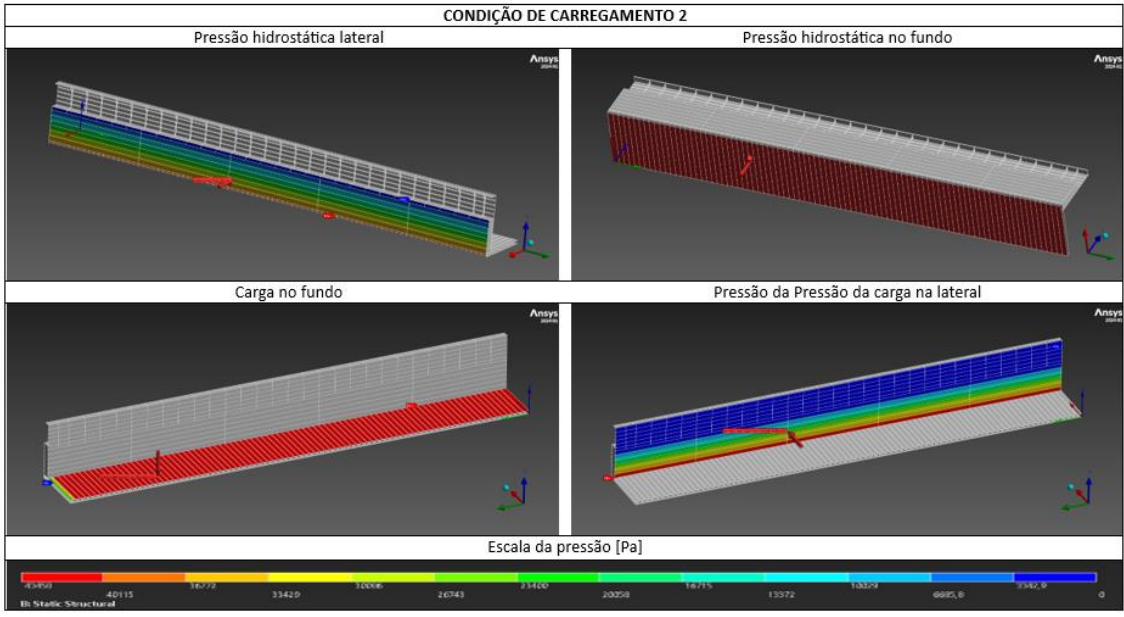
Assim, obteve-se uma distribuição de pressões internas coerente com as condições reais de carregamento, assegurando a representatividade física e a precisão da simulação estrutural realizada.

Figura 33 – Aplicação das pressões da condição de carregamento 1



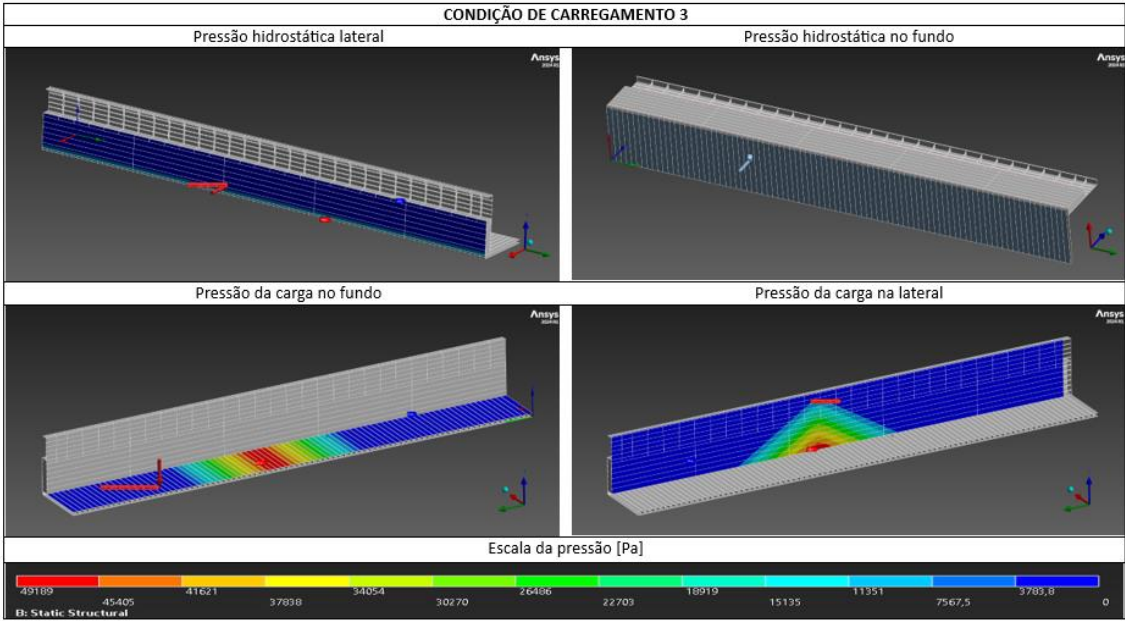
Fonte: Autor (2025)

Figura 34 – Aplicação das pressões da condição de carregamento 2



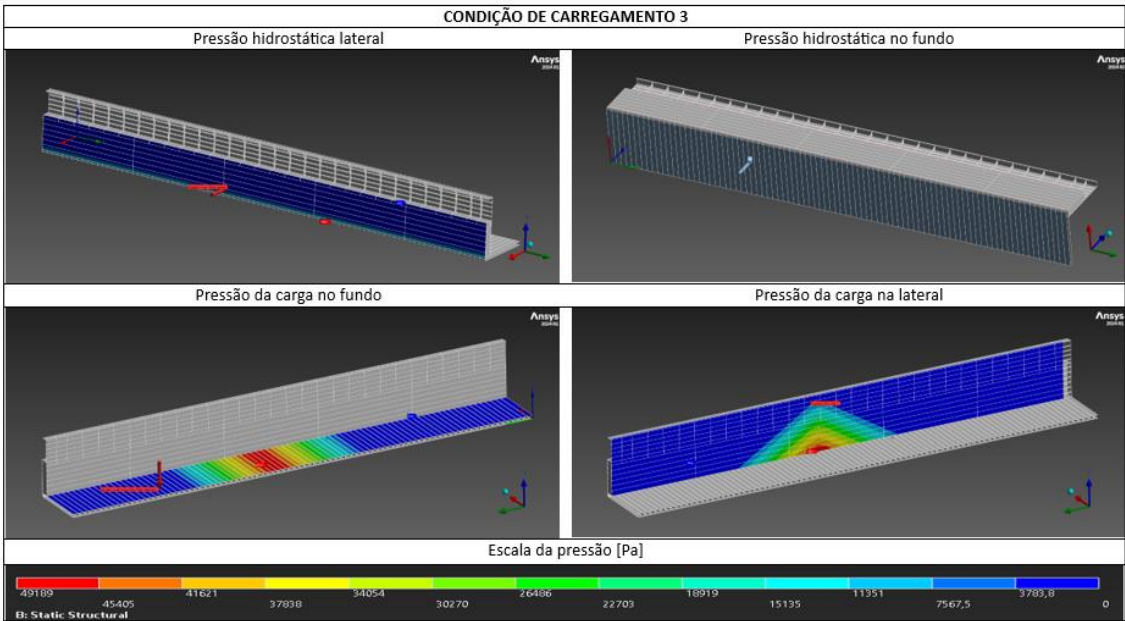
Fonte: Autor (2025)

Figura 35 – Aplicação das pressões da condição de carregamento 3



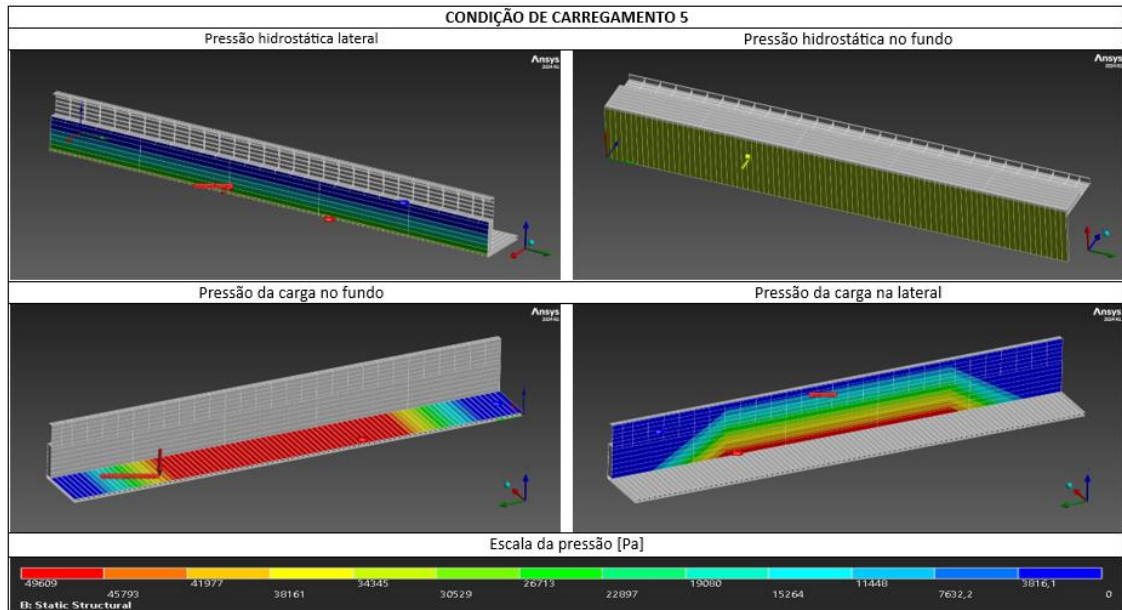
Fonte: Autor (2025)

Figura 36 – Aplicação das pressões da condição de carregamento 4



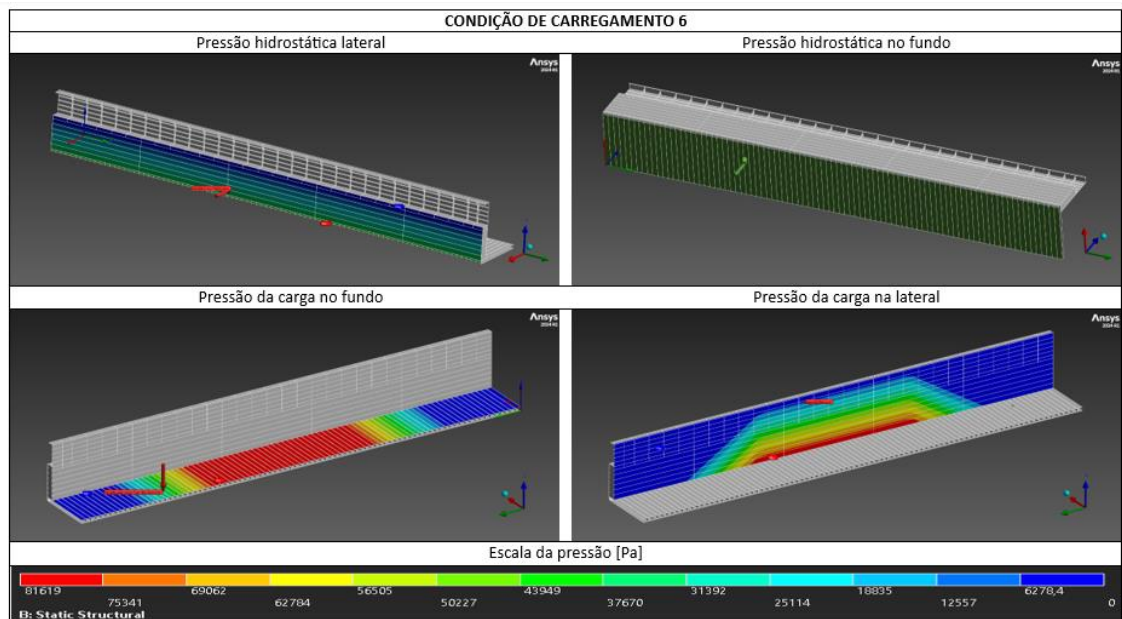
Fonte: Autor (2025)

Figura 37 – Aplicação das pressões da condição de carregamento 5



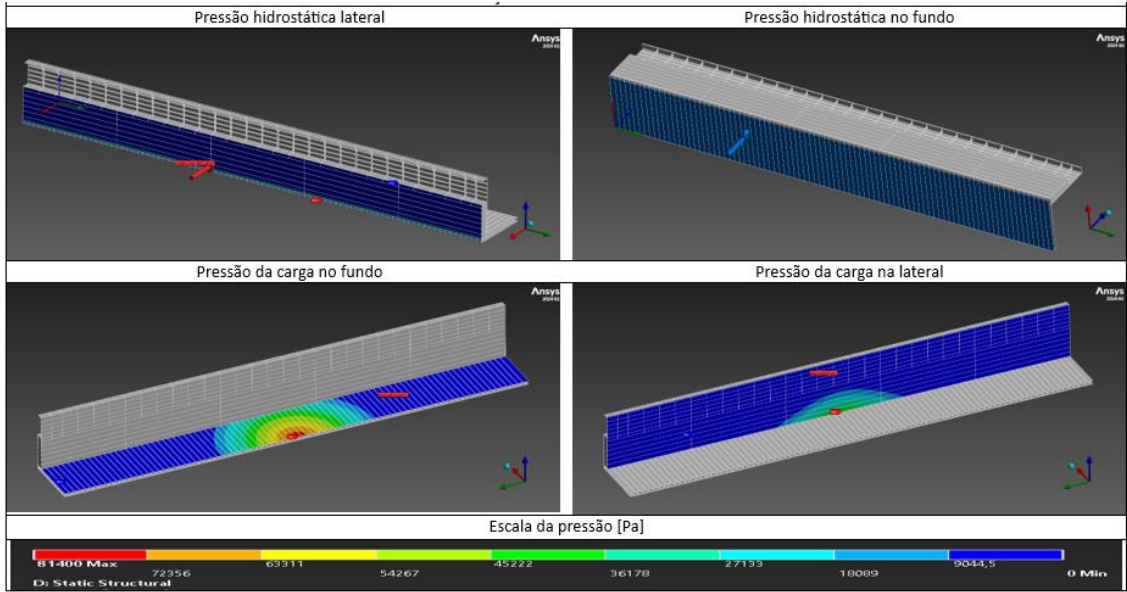
Fonte: Autor (2025)

Figura 38 – Aplicação das pressões da condição de carregamento 6



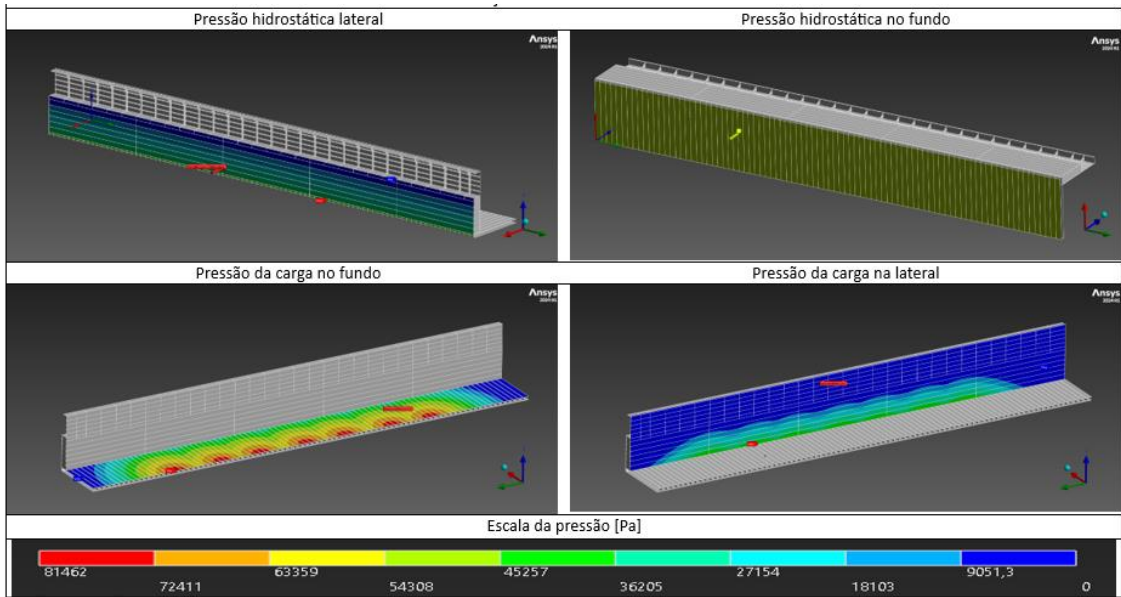
Fonte: Autor (2025)

Figura 39 – Aplicação das pressões da condição de carregamento 7



Fonte: Autor (2025)

Figura 40 – Aplicação das pressões da condição de carregamento 8



Fonte: Autor (2025)

Com o objetivo de apresentar de forma mais clara os valores de pressão considerados na análise, a Tabela 4 a seguir reúne os valores máximos de pressão aplicados nas quatro regiões mencionadas.

Tabela 4 – Pressões máximas aplicadas em cada parte da barçaça

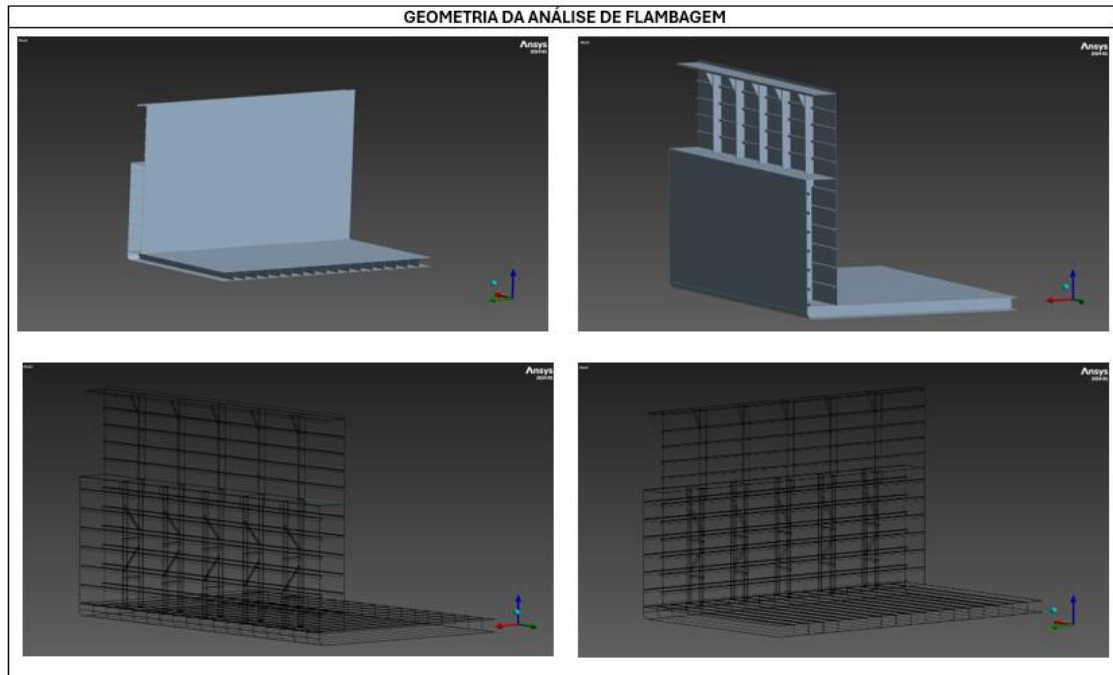
Carregamento	Pressão hidrostática lateral [Pa]	Pressão hidrostática no fundo [Pa]	Pressão da carga no fundo [Pa]	Pressão da carga na lateral [Pa]
Carregamento 1	41545,35	41584,95	43401,00	43398,00
Carregamento 2	41545,35	41584,95	43401,00	43398,00
Carregamento 3	12926,34	12926,31	49188,98	49411,00
Carregamento 4	18488,90	18489,09	80924,33	81292,00
Carregamento 5	33341,25	33340,86	49609,17	49609,00
Carregamento 6	41496,30	41502,25	81619,2	81618,00
Carregamento 7	16028,00	16029,00	81400,00	42212,00
Carregamento 8	41562,00	41562,00	81462,00	42263,00

Fonte: Autor (2025).

4.2.2 Análise de flambagem

De forma análoga, para a construção do modelo destinado à análise de flambagem estrutural, iniciou-se pela definição da geometria. Nesse caso, foi modelado apenas um dos bordos da embarcação, considerando um segmento de 11 metros de comprimento, correspondente à seção compreendida entre duas anteparas transversais, em vez de todo o porão de carga (Figura 41). Essa estratégia permitiu reduzir significativamente o custo computacional da simulação, concentrando a análise no comportamento local da estrutura. Além disso, possibilitou uma avaliação mais detalhada dos modos de flambagem dos painéis e reforçadores sob diferentes condições de carregamento, sem comprometer a representatividade física do modelo.

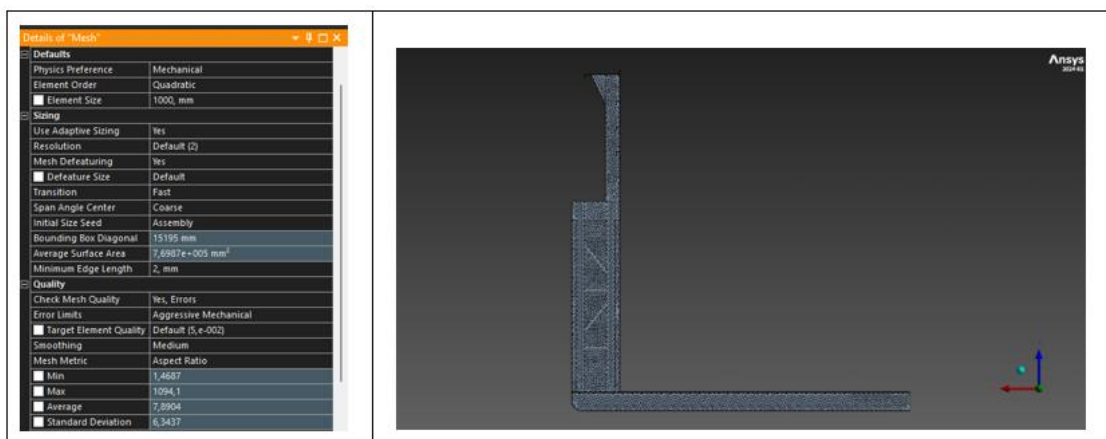
Figura 41 – Geometria da análise de flambagem



Fonte: Autor (2025)

A malha computacional adotada neste modelo seguiu os mesmos critérios aplicados na análise estrutural global. Utilizou-se, portanto, uma malha tridimensional refinada, buscando o equilíbrio entre precisão numérica e eficiência computacional, como ilustrado na Figura 42. O refinamento foi concentrado nas regiões de maior complexidade geométrica e nas áreas com potencial concentração de tensões e instabilidade local, como interseções entre reforçadores e chapeamentos, garantindo uma descrição precisa dos fenômenos de flambagem.

Figura 42 – Discretização da malha da análise de flambagem



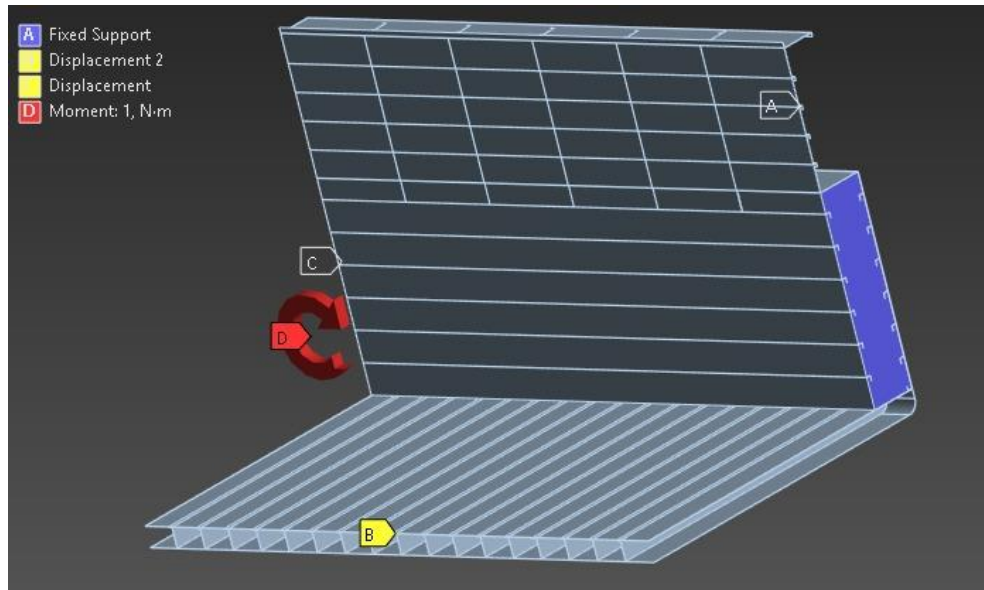
Fonte: Autor (2025)

O tipo de elemento finito e o material empregados permaneceram os mesmos utilizados no modelo global, adotando-se elementos sólidos tetraédricos de 10 nós, em razão de sua capacidade de representar geometrias complexas e interpolar adequadamente tensões e deformações em análises não lineares. O material considerado foi o aço naval, cujas propriedades elásticas e limites de escoamento correspondem aos valores utilizados no projeto estrutural original da barcaça, assegurando a consistência dos resultados.

Na sequência, foram definidas as condições de contorno de forma a reproduzir adequadamente o comportamento físico da estrutura sob análise. Diferentemente do modelo de resistência global, em que ambas as extremidades longitudinais foram restringidas nos eixos X e Z, neste caso apenas uma das extremidades foi restrita nos eixos X e Z, representando o apoio da estrutura, enquanto a outra extremidade foi engastada, impedindo deslocamentos e rotações em todos os graus de liberdade. Essa configuração busca simular o comportamento de um painel ou módulo estrutural sujeito a restrições assimétricas, permitindo a observação dos modos de flambagem local e global que podem se desenvolver ao longo do segmento analisado (Figura 43).

Por fim, foi aplicada a condição de carregamento correspondente a um momento fletor unitário na extremidade livre (não engastada) do modelo, como apresentado ainda na Figura 43. Essa abordagem permite avaliar o comportamento crítico da estrutura sob ação de esforços de flexão pura, identificando os modos de instabilidade e os valores críticos de carga associados ao início do fenômeno de flambagem. Tal procedimento fornece subsídios para compreender a resposta estrutural local dos painéis e reforçadores da barcaça, contribuindo para a validação e calibração do modelo numérico de análise estrutural.

Figura 43 – Parametrização do modelo da análise de flambagem



Fonte: Autor (2025)

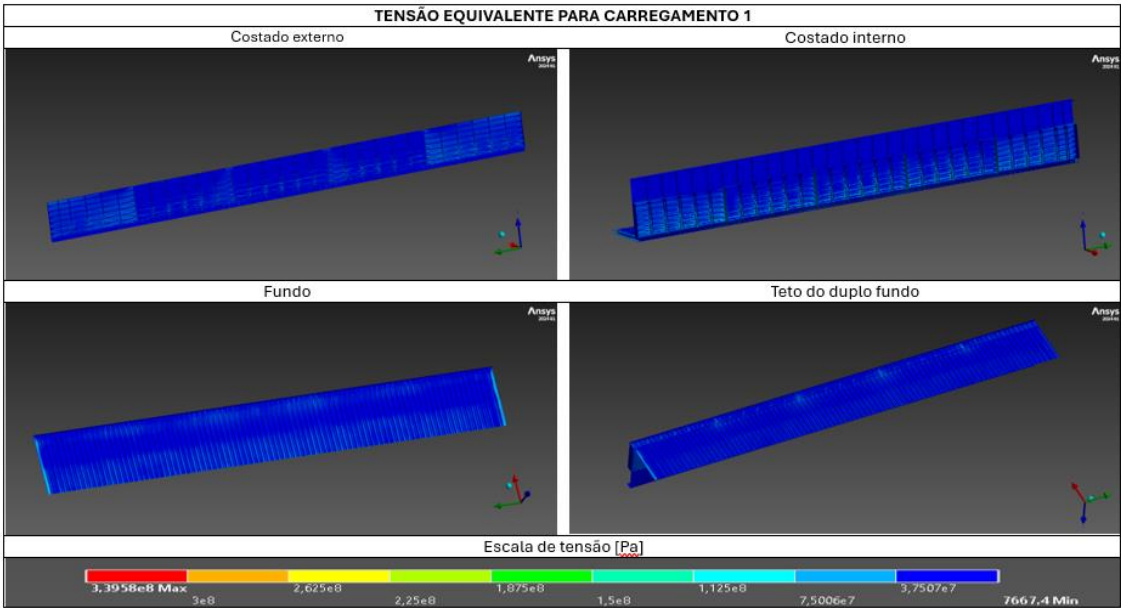
5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados de tensão equivalente de von Mises, deformações e modos de flambagem obtidos por meio das simulações realizadas com o Método dos Elementos Finitos (MEF), bem como os momentos fletores calculados a partir do programa desenvolvido pelo Núcleo de Simulação e Otimização (NSO). Todos os resultados são analisados considerando as diferentes condições de carregamento previamente definidas.

5.1 TENSÃO EQUIVALENTE DE VON MISES

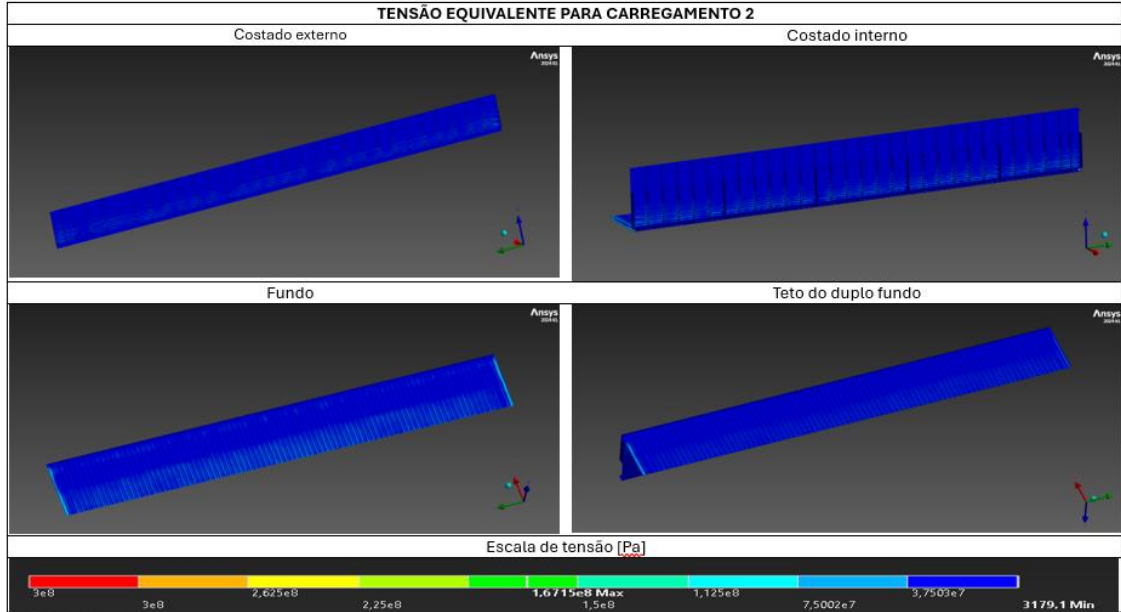
Inicialmente, são apresentados os resultados das tensões equivalentes de von Mises obtidos para todas as condições de carregamento analisadas, com foco nas regiões dos costados internos e externos, bem como no teto do duplo fundo e no fundo da barcaça, conforme ilustrado nas Figuras 44 a 51.

Figura 44 – Tensão equivalente de von Mises do carregamento 1



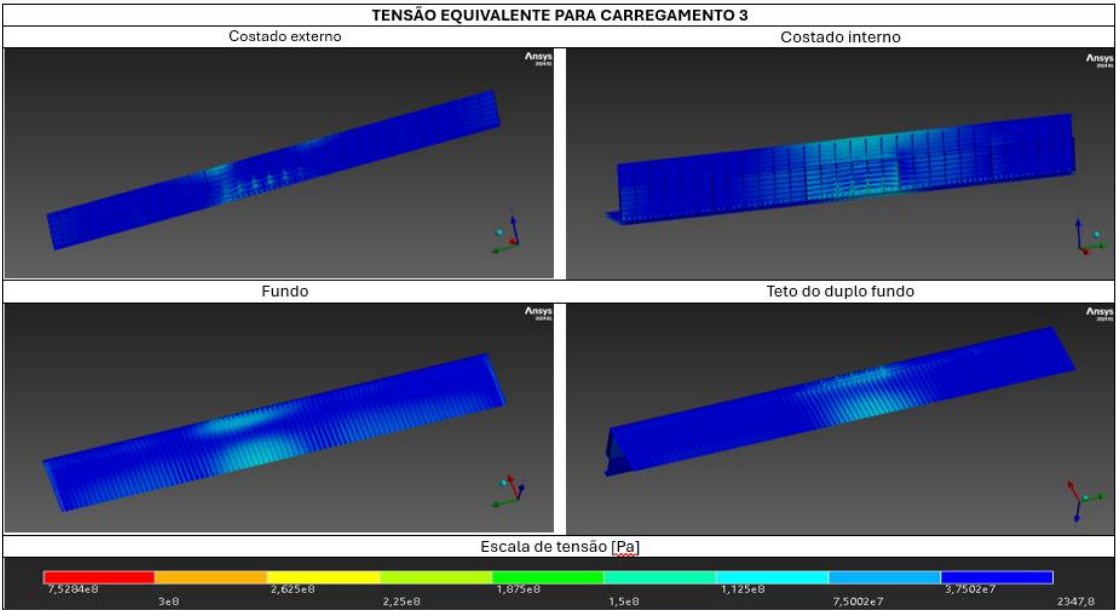
Fonte: Autor (2025)

Figura 45 – Tensão equivalente de von Mises do carregamento 2



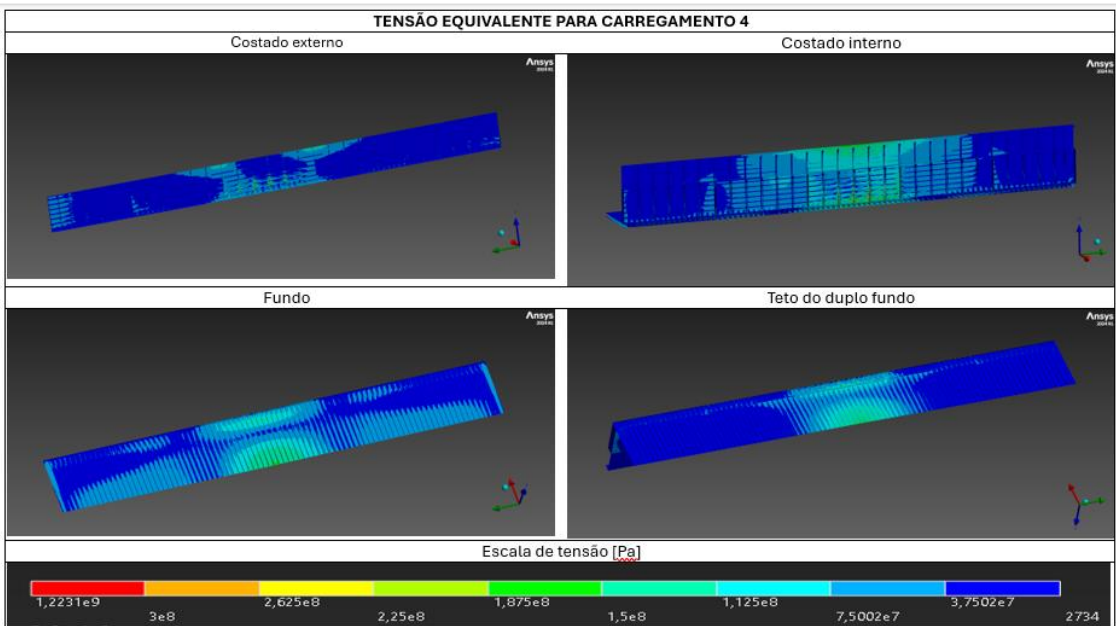
Fonte: Autor (2025)

Figura 46 – Tensão equivalente de von Mises do carregamento 3



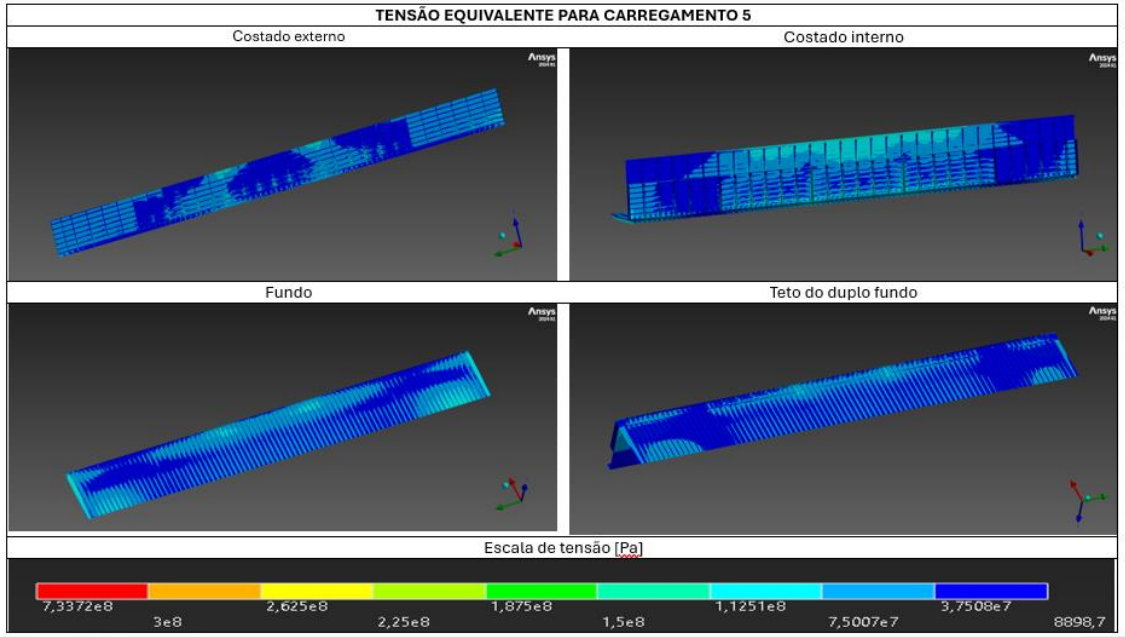
Fonte: Autor (2025)

Figura 47 – Tensão equivalente de von Mises do carregamento 4



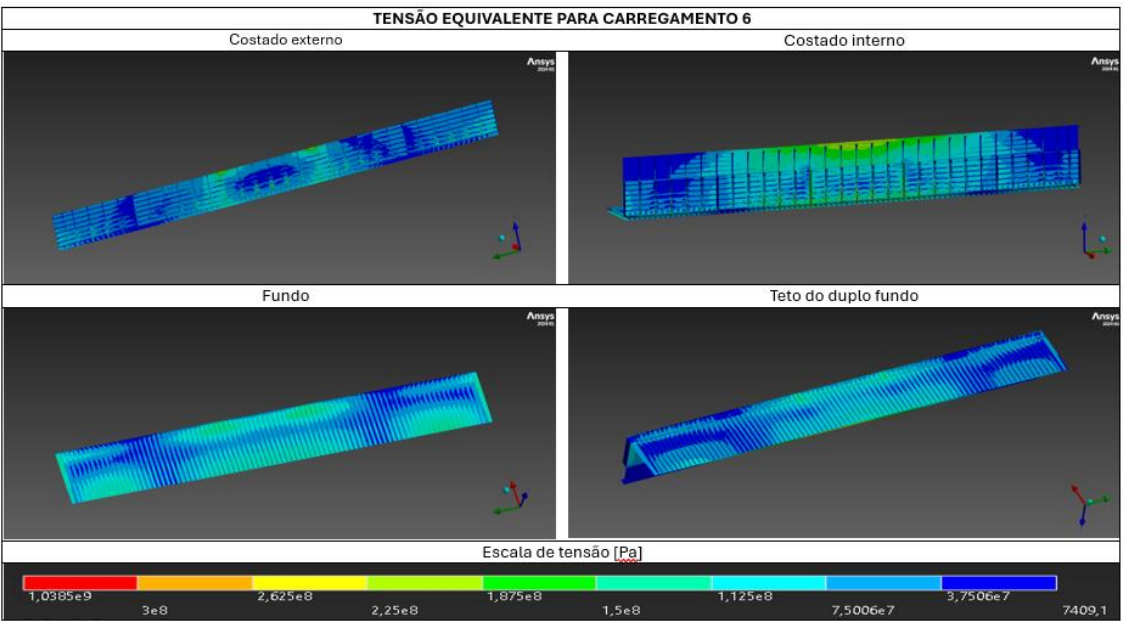
Fonte: Autor (2025)

Figura 48 – Tensão equivalente de von Mises do carregamento 5



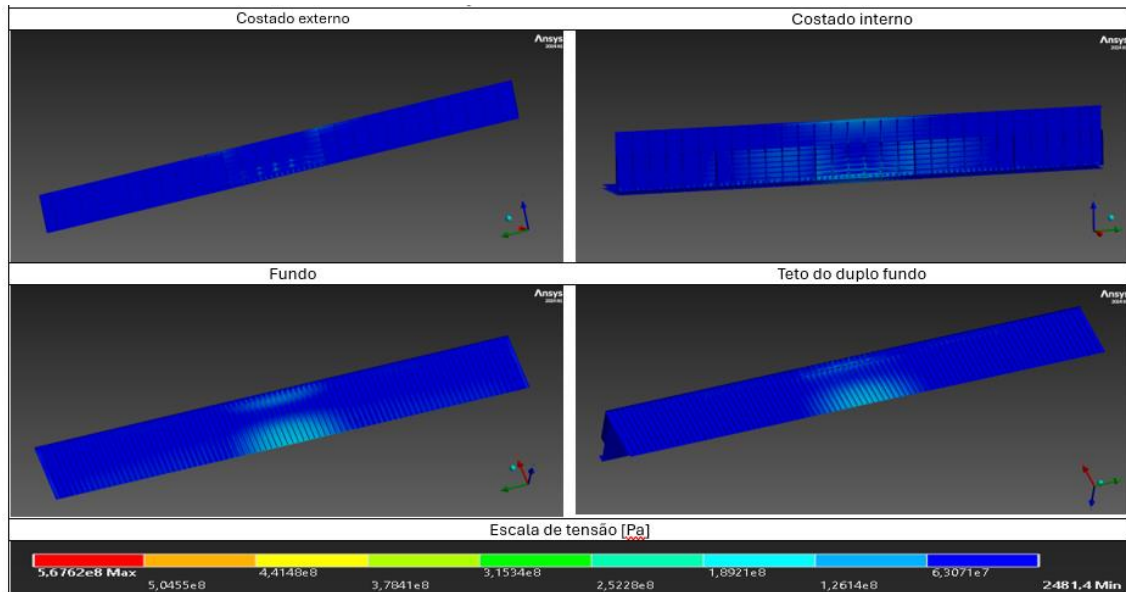
Fonte: Autor (2025)

Figura 49 – Tensão equivalente de von Mises do carregamento 6



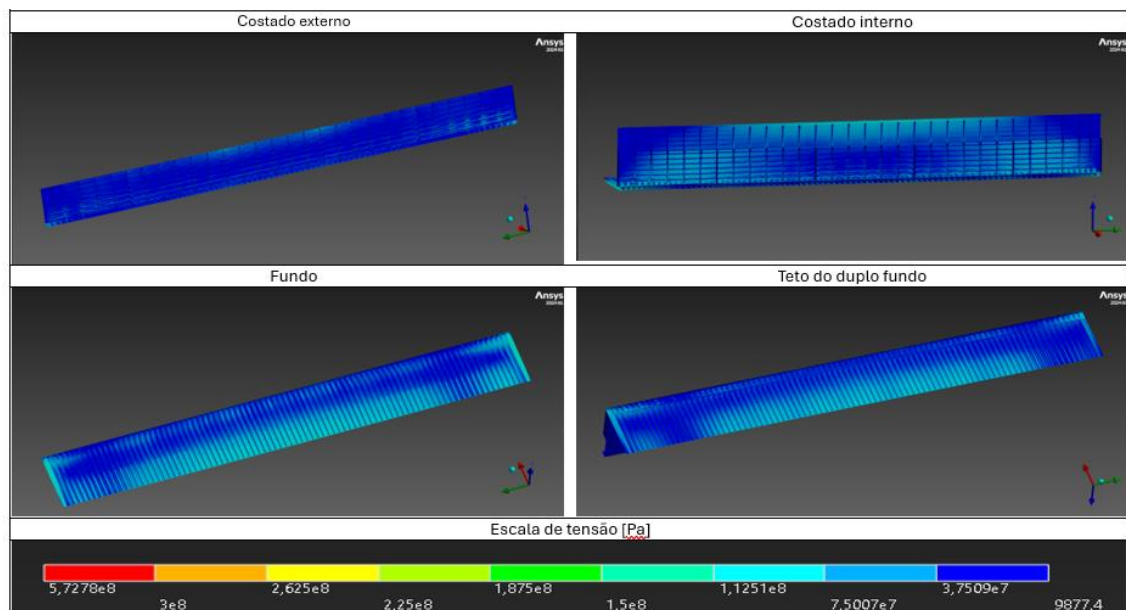
Fonte: Autor (2025)

Figura 50 – Tensão equivalente de von Mises do carregamento 7



Fonte: Autor (2025)

Figura 51 – Tensão equivalente de von Mises do carregamento 8



Fonte: Autor (2025)

A tensão equivalente de von Mises é um parâmetro amplamente empregado em análises estruturais para materiais dúcteis, como o aço utilizado em embarcações, pois permite avaliar de forma integrada as diferentes componentes de tensão atuantes em um ponto de estrutura. Por meio dessa grandeza, é possível identificar as regiões mais solicitadas e verificar se as tensões permanecem abaixo

do limite de escoamento do material, assegurando que a estrutura opere em condições seguras e dentro do regime elástico (ANSYS Help, 2024).

Com o intuito de proporcionar uma melhor compreensão dos resultados de tensão obtidos, apresenta-se na Tabela 5 uma síntese dos valores obtidos para cada condição de carregamento, indicando a porcentagem de nós do modelo numérico que apresentaram tensões equivalentes de von Mises entre 100 MPa e 350 MPa, agrupadas em intervalos de 50 MPa. Essa abordagem permite visualizar de forma comparativa a distribuição e a intensidade das tensões na estrutura sob diferentes cenários de carregamento.

Tabela 5 – Distribuição da tensão para cada condição

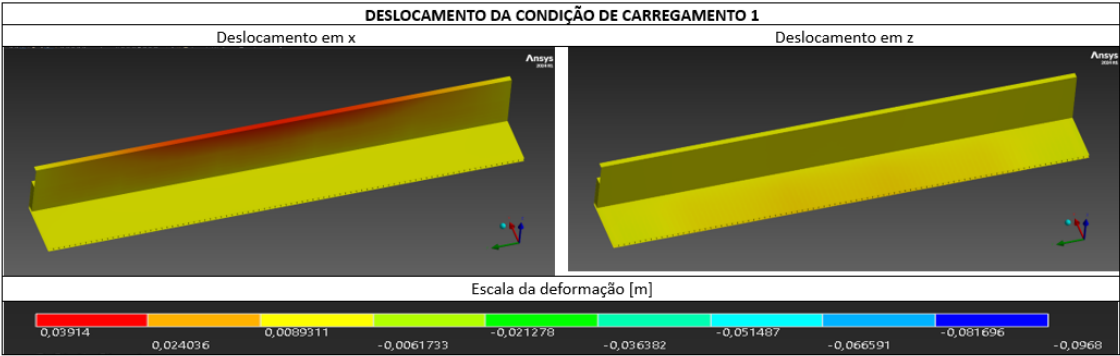
Condições	Tensão acima de 100 MPa [%]	Tensão acima de 150 MPa [%]	Tensão acima de 200 MPa [%]	Tensão acima de 250 MPa [%]	Tensão acima de 300 MPa [%]	Tensão acima de 350 MPa [%]
Condi. 1	0,215	0,029	0,006	0,001	0,000	0,000
Condi. 2	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Condi. 3	0,355	0,107	0,046	0,020	0,009	0,004
Condi. 4	5,503	0,761	0,201	0,110	0,066	0,041
Condi. 5	2,232	0,349	0,138	0,059	0,024	0,010
Condi. 6	16,718	4,322	0,962	0,223	0,116	0,063
Condi. 7	1,834	0,092	0,028	0,010	0,004	0,002
Condi. 8	1,269	0,032	0,008	0,003	0,001	0,000

Fonte: Autor (2025).

5.2 DESLOCAMENTO

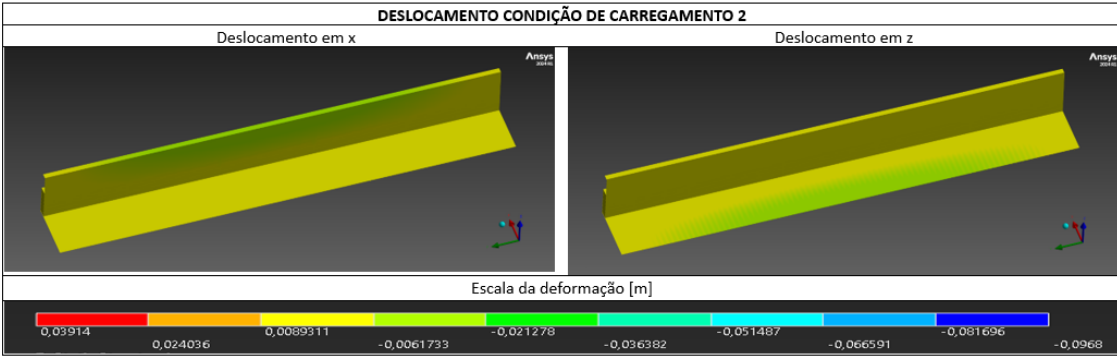
Nesta subseção são apresentados os resultados de deslocamento obtidos por meio das simulações numéricas para todas as condições de carregamento analisadas (Figuras 52 a 59), considerando separadamente as componentes de deslocamento nos eixos X e Z. Esses resultados são de fundamental importância, pois permitem compreender de que maneira a estrutura responde às tensões equivalentes de von Mises apresentadas na seção anterior, evidenciando as regiões de maior flexibilidade estrutural e os padrões de deformação associados aos diferentes tipos e disposições de carga.

Figura 52 – Deslocamento da condição de carregamento 1



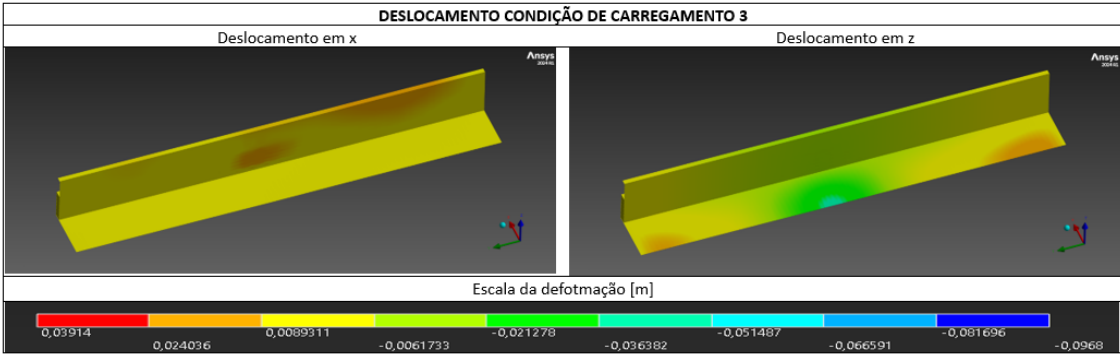
Fonte: Autor (2025)

Figura 53 – Deslocamento da condição de carregamento 2



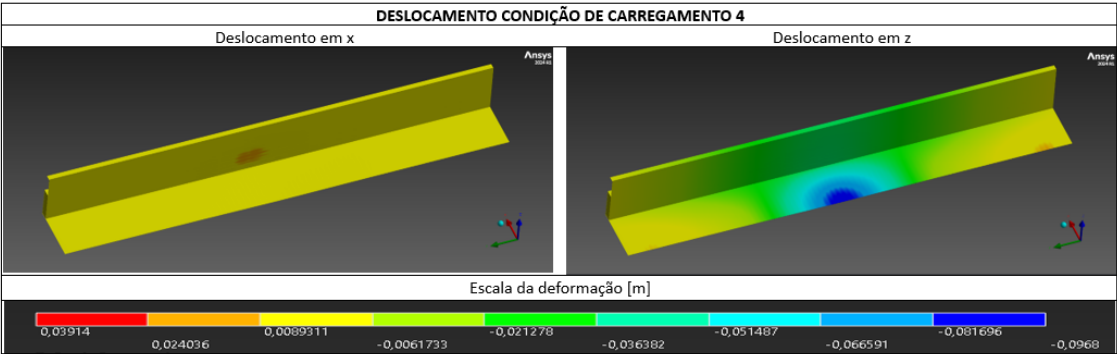
Fonte: Autor (2025)

Figura 54 – Deslocamento da condição de carregamento 3



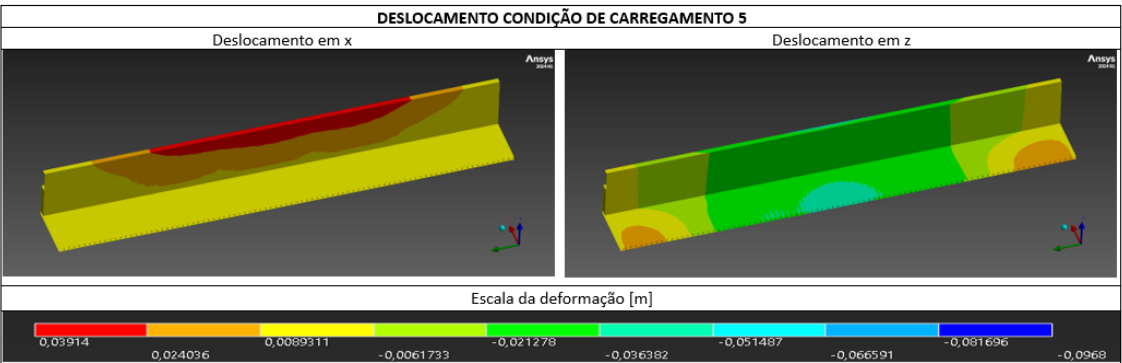
Fonte: Autor (2025)

Figura 55 – Deslocamento da condição de carregamento 4



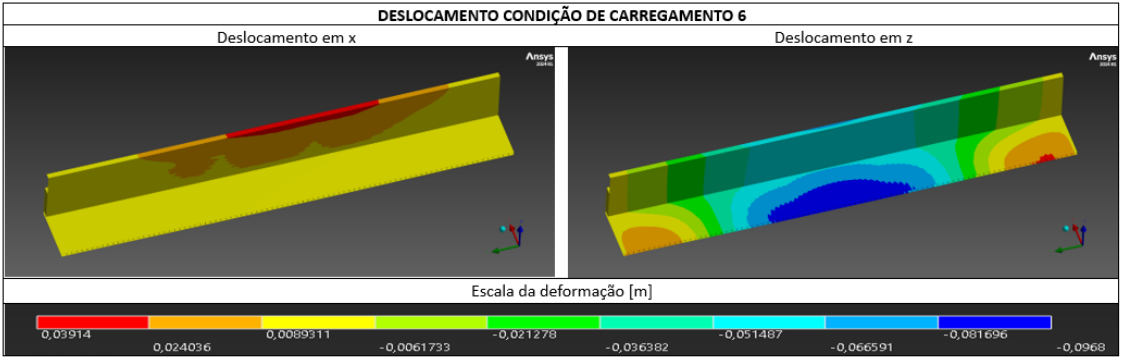
Fonte: Autor (2025)

Figura 56 – Deslocamento da condição de carregamento 5



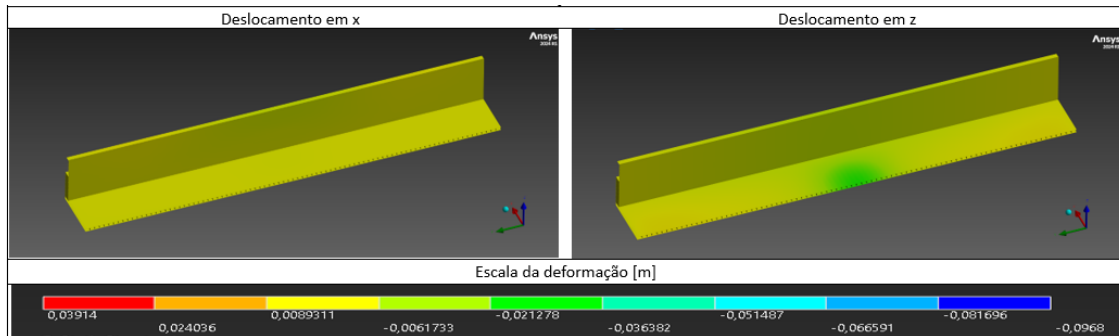
Fonte: Autor (2025)

Figura 57 – Deslocamento da condição de carregamento 6



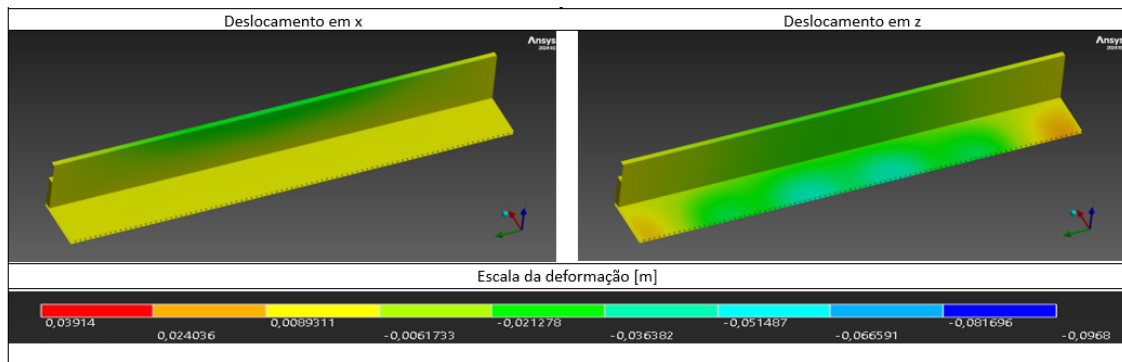
Fonte: Autor (2025)

Figura 58 – Deslocamento da condição de carregamento 7



Fonte: Autor (2025)

Figura 59 – Deslocamento da condição de carregamento 8



Fonte: Autor (2025)

Para evidenciar de forma mais clara os resultados obtidos, apresenta-se na Tabela 6 os valores de deslocamento máximos observados nos costados e no fundo da barcaça sob as diferentes condições de carregamento analisadas.

Tabela 6 – Valores máximo de deslocamento

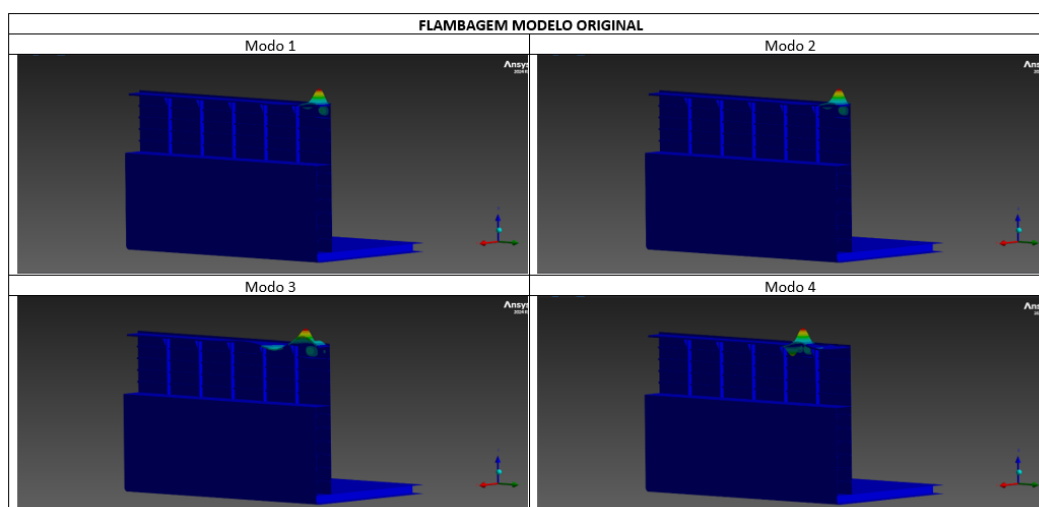
Condições	Deslocamento em X [m]	Deslocamento em Z [m]
Condição 1	0,029	-0,003
Condição 2	-0,012	-0,009
Condição 3	0,009	-0,058
Condição 4	0,011	-0,088
Condição 5	0,039	-0,040
Condição 6	0,030	-0,097
Condição 7	-0,017	-0,065
Condição 8	-0,035	-0,023

Fonte: Autor (2025).

5.3 FLAMBAGEM

Dando continuidade à análise, são apresentados a seguir (Figura 60) os quatro primeiros modos de flambagem da estrutura da barça, obtidos a partir da aplicação de um momento fletor unitário, de forma a identificar os padrões iniciais de instabilidade e as regiões mais suscetíveis à perda de rigidez estrutural.

Figura 60 – Modos de flambagem



Fonte: Autor (2025)

Na Tabela 7 são apresentados os valores máximos de momento fletor que a estrutura é capaz de suportar antes da ocorrência dos respectivos modos de flambagem, representando, portanto, os limites críticos de estabilidade para cada caso analisado.

Tabela 7 – Multiplicadores de carga

Modo de flambagem	Multiplicador de carga
1	3,64E+07
2	4,24E+07
3	4,69E+07
4	5,08E+07

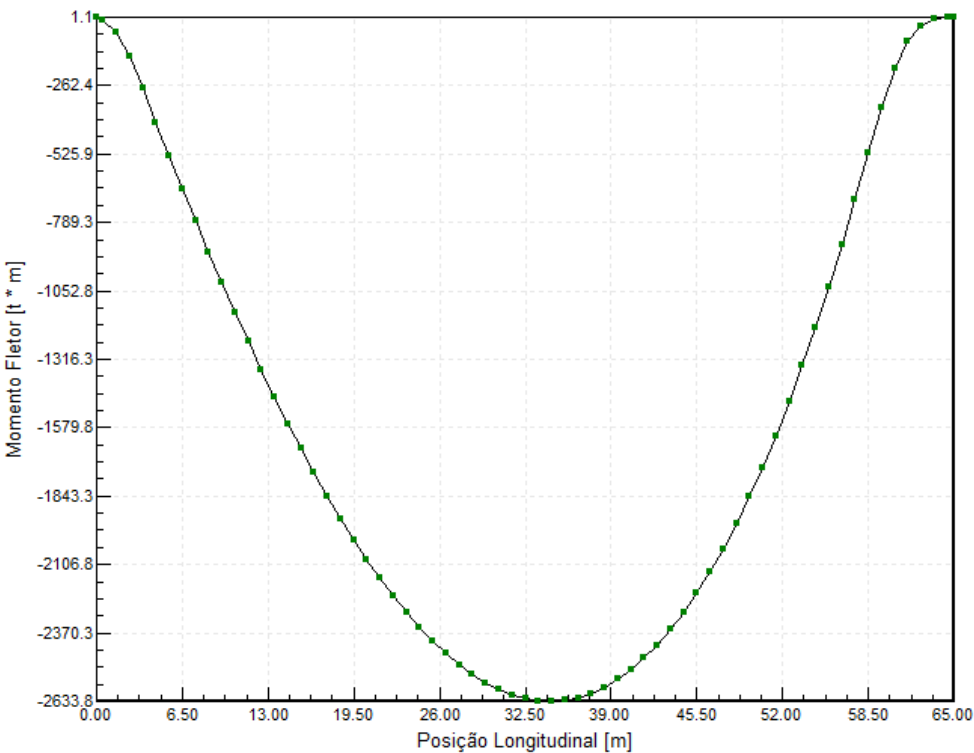
Fonte: Autor (2025)

Dessa forma, observa-se que, para a ocorrência da flambagem na mesa da braçola da barça analisada, é necessário que o momento fletor atinja, em módulo, o valor de 3,64E+07 N*m ou 3710,49 t*m.

5.4 MOMENTOS FLETORES

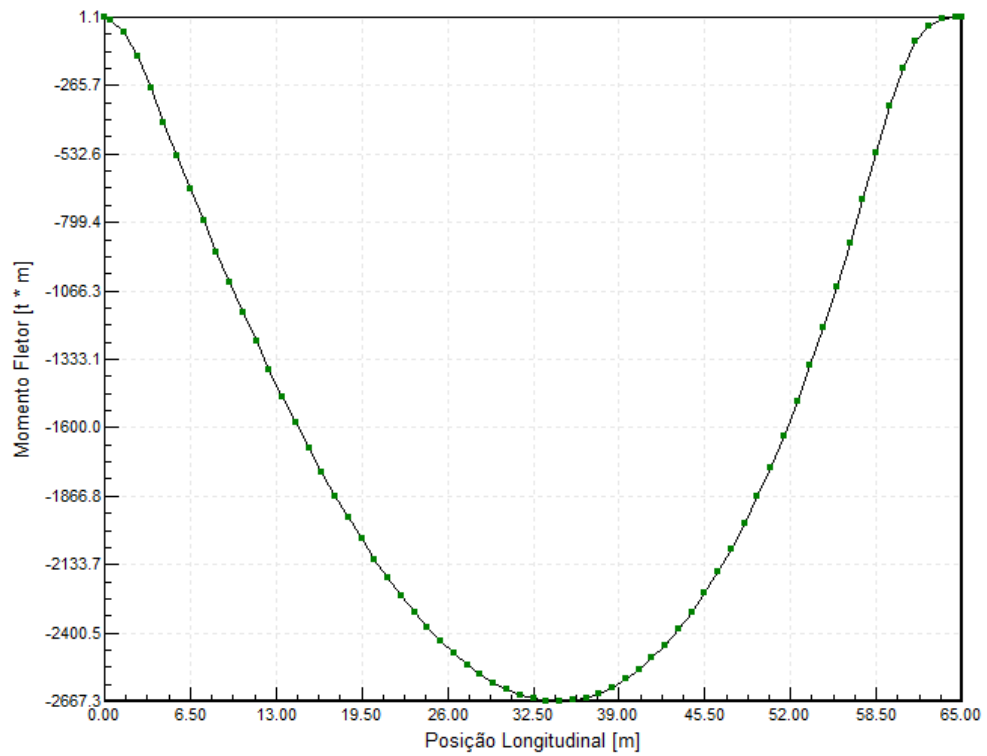
Por fim, apresentam-se os momentos fletores resultantes para cada uma das condições de carregamento analisadas, obtidos por meio do método da viga-navio, conforme descrito na metodologia (Figuras 61 a 68). Além disso, a Tabela 8 reúne os valores dos momentos fletores máximos correspondentes a cada condição de carregamento avaliada, possibilitando uma análise comparativa do comportamento estrutural da barçaça sob diferentes distribuições de carga.

Figura 61 – Curva de momento fletor da condição de carregamento 1



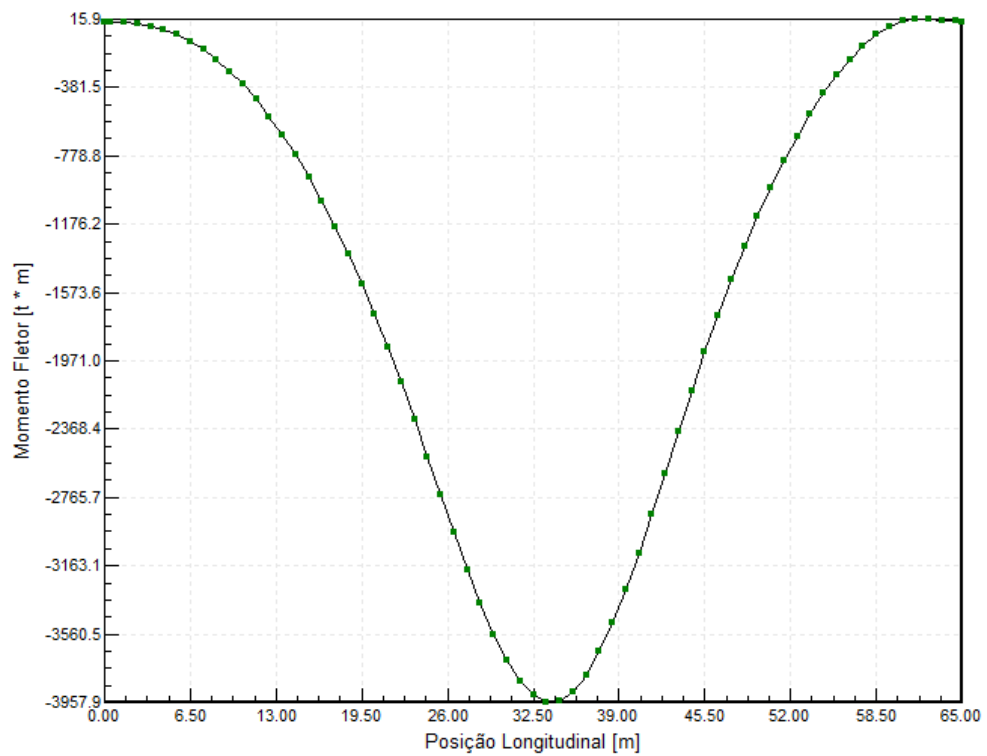
Fonte Autor (2025)

Figura 62 – Curva de momento fletor da condição de carregamento 2



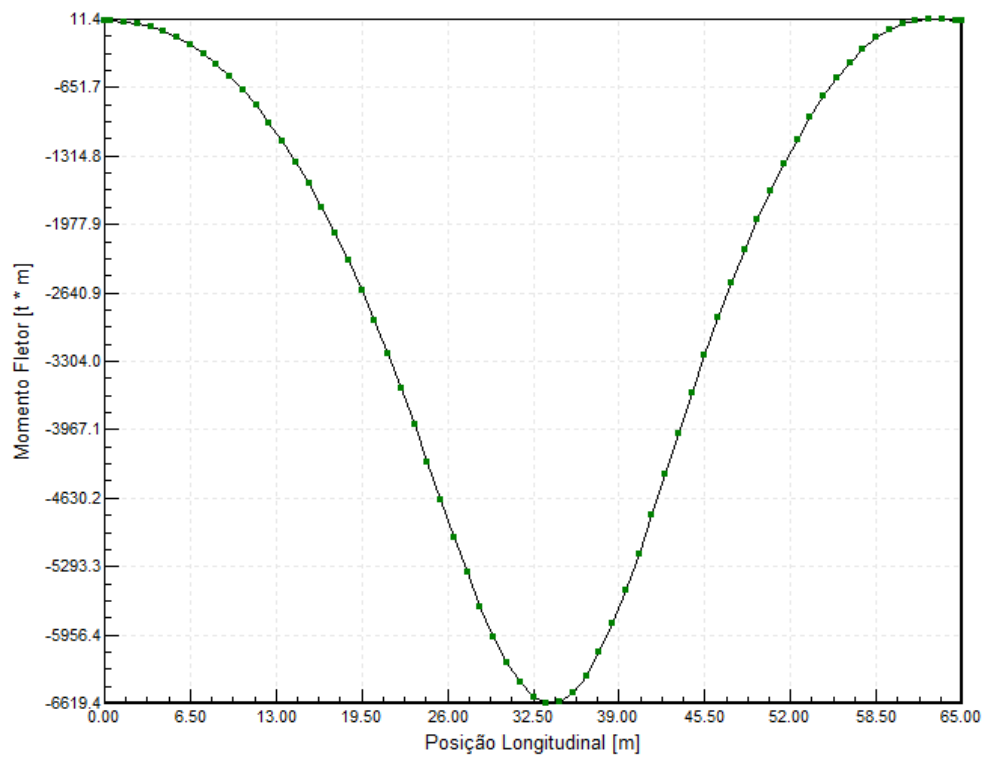
Fonte Autor (2025)

Figura 63 – Curva de momento fletor da condição de carregamento 3



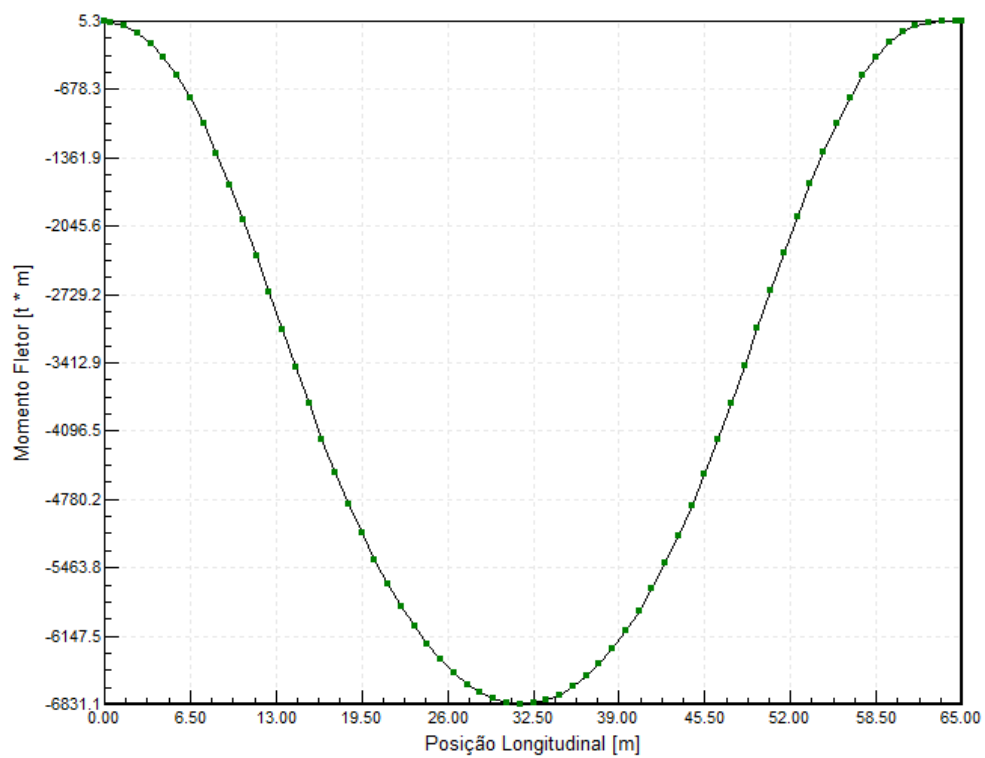
Fonte Autor (2025)

Figura 64 – Curva de momento fletor da condição de carregamento 4



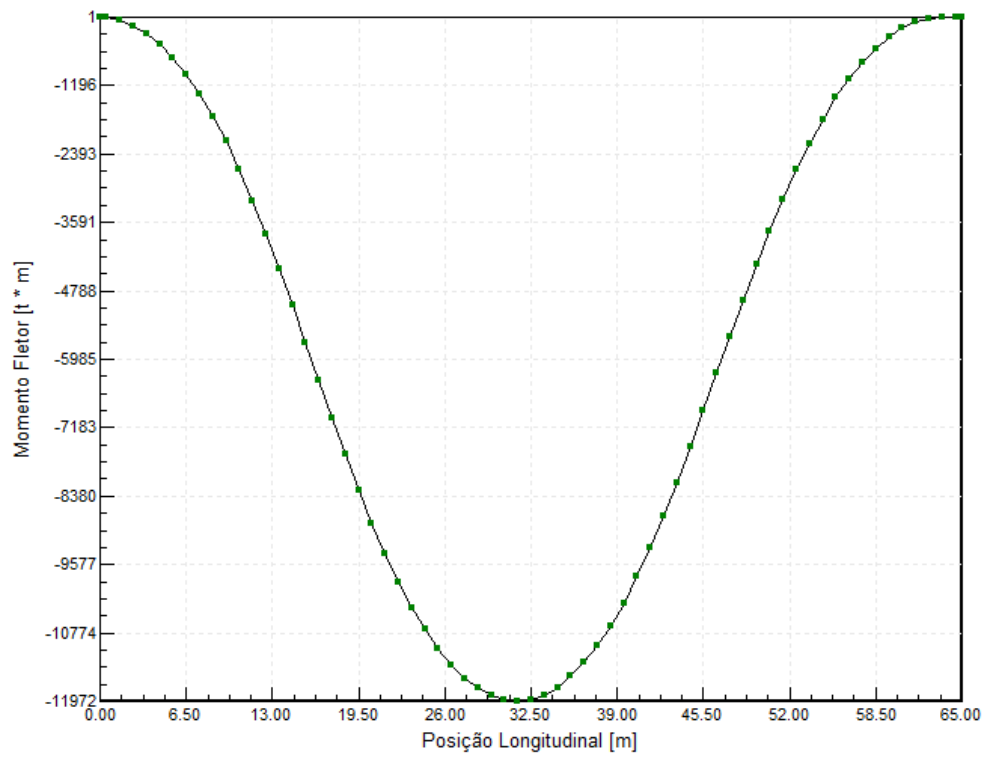
Fonte Autor (2025)

Figura 65 – Curva de momento fletor da condição de carregamento 5



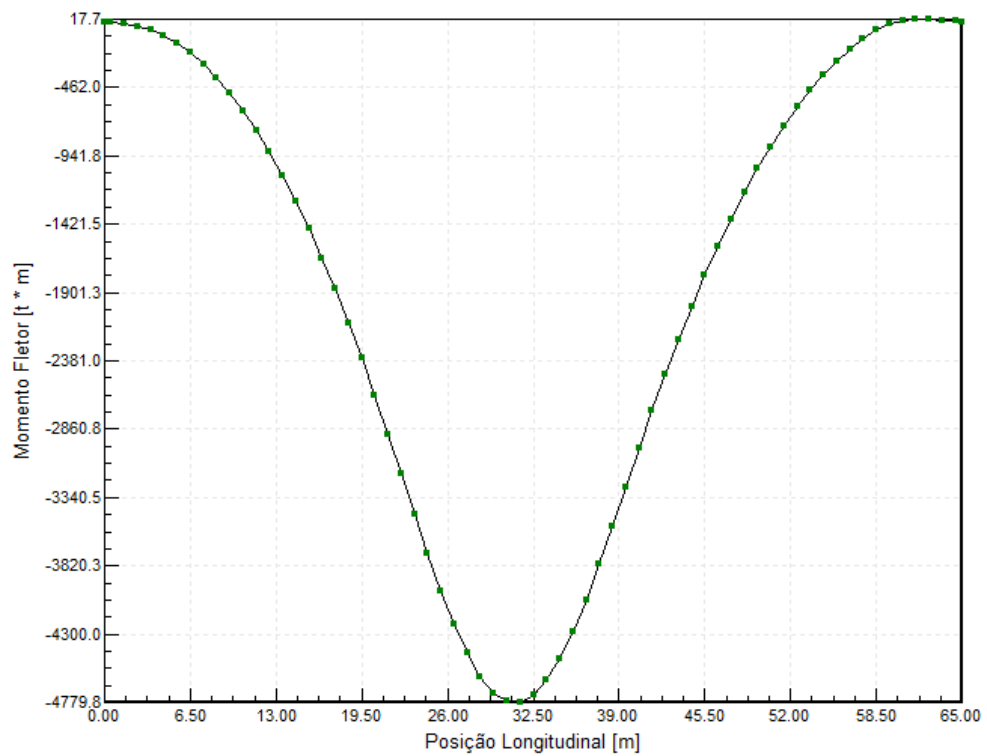
Fonte Autor (2025)

Figura 66 – Curva de momento fletor da condição de carregamento 6



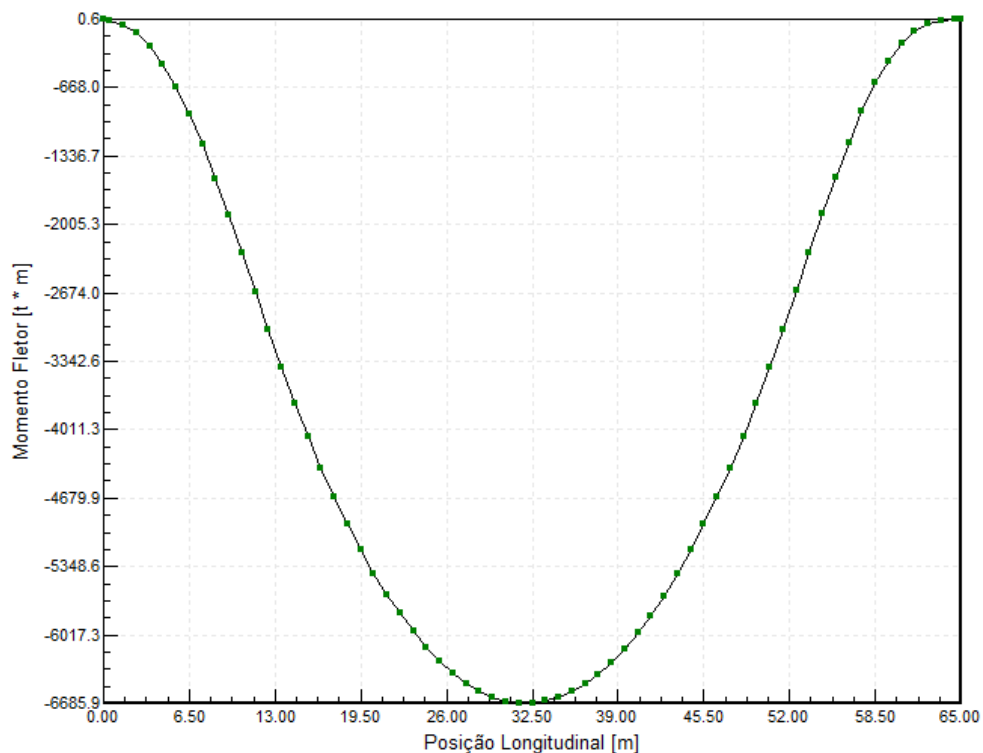
Fonte Autor (2025)

Figura 67 – Curva de momento fletor da condição de carregamento 7



Fonte Autor (2025)

Figura 68 – Curva de momento fletor da condição de carregamento 8



Fonte Autor (2025)

Tabela 8 – Momentos fletores máximos

Condições	Momento Fletor máximo [t*m]
Condição 1	2633,78
Condição 2	2667,30
Condição 3	3957,90
Condição 4	6619,45
Condição 5	6831,10
Condição 6	11971,77
Condição 7	4817,38
Condição 8	6748,45

Fonte: Autor (2025)

5.5 VALIDAÇÃO DO MODELO MEF

Para validar o modelo empregado na análise pelo MEF, foram realizadas três simulações de controle para as 4 primeiras condições de carregamento (tabela 9). A primeira considerou apenas a pressão hidrostática atuando no costado; a segunda, apenas a pressão interna gerada pela carga; e a terceira combinou a pressão da carga aplicada ao costado com a pressão hidrostática atuando no fundo.

Tabela 9 – Deslocamento das simulações de controle

Carregamento	Pressão hidrostática lateral	Pressão de carga lateral	Completo	Pressão hidrostática e de carga no fundo
	Deslocamento [m]			
Carregamento 1	-0,028	0,068	0,029	-0,012
Carregamento 2	-0,028	0,026	-0,012	-0,012
Carregamento 3	-0,0008	0,017	0,009	-0,018
Carregamento 4	-0,002	0,029	0,011	-0,034

Fonte: Autor (2025)

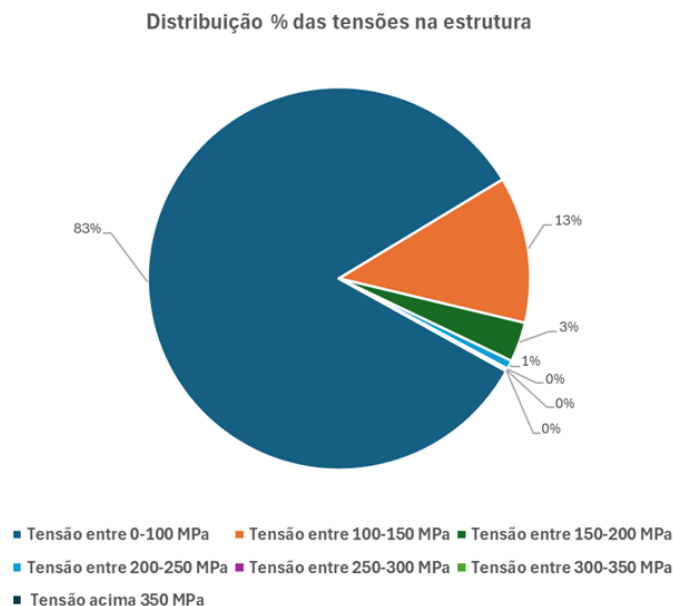
O critério de validação adotado estabeleceu que os deslocamentos transversais obtidos no modelo completo deveriam situar-se entre os valores máximos de deslocamento produzidos individualmente pela pressão hidrostática e pela pressão da carga aplicada ao costado. Esse comportamento intermediário confirmaria a coerência física das respostas estruturais e a consistência do modelo numérico.

Adicionalmente, os deslocamentos gerados apenas pelas cargas verticais foram utilizados como referência para avaliar a influência específica da pressão que a carga exerce sobre os costados. Dessa forma, tornou-se possível isolar e compreender o efeito lateral provocado pelo carregamento granular, distinguindo-o do comportamento estrutural associado exclusivamente às ações verticais.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com base nos resultados obtidos, constatou-se que, mesmo sob a condição de carregamento mais severa — correspondente ao carregamento 4 — apenas uma parcela extremamente reduzida da estrutura apresentou tensão equivalente de von Mises superior ao limite de escoamento de 250 MPa (Figura 69). Esse resultado é particularmente relevante, pois confirma que o projeto estrutural da barça atende de forma satisfatória aos critérios de resistência estabelecidos para operações típicas de transporte fluvial.

Figura 69 – Distribuição das tensões da condição de carregamento 6



Fonte: Autor (2025)

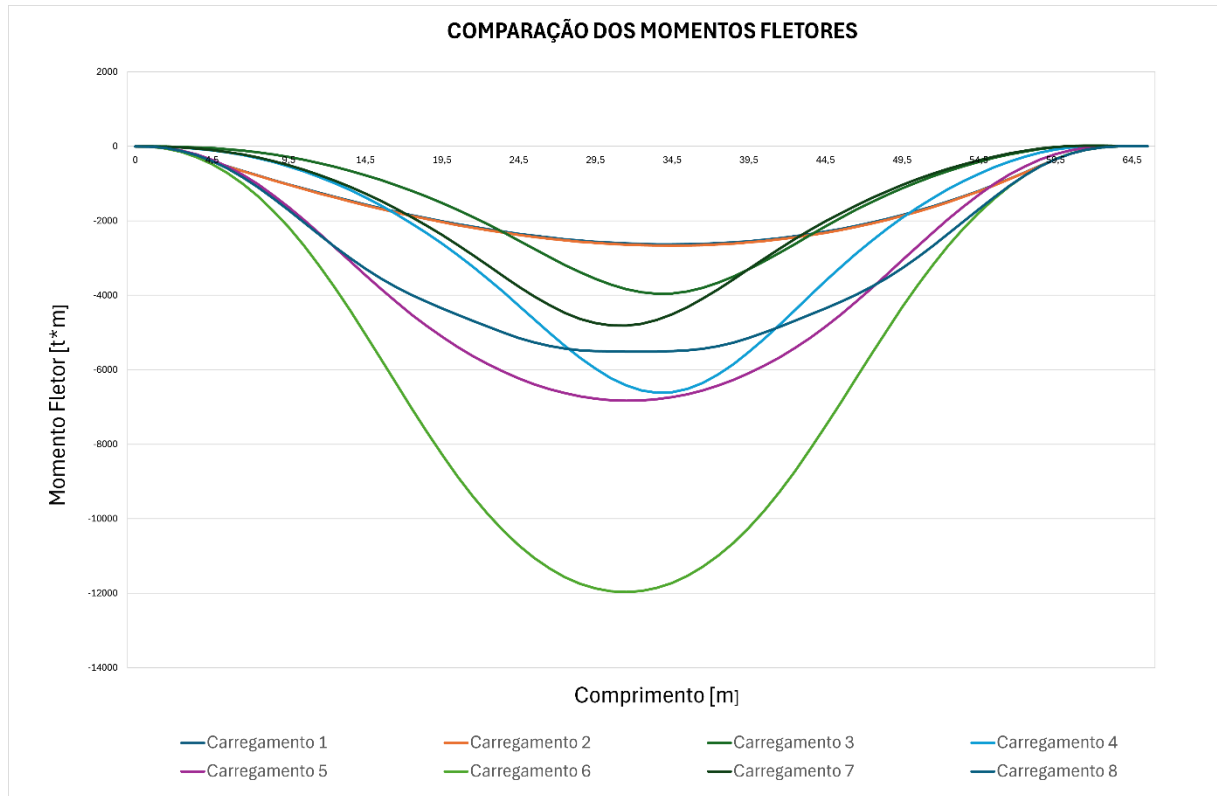
Além disso, indica que grande parte dos componentes estruturais atua com margens de segurança elevadas, o que caracteriza um dimensionamento robusto e, em alguns trechos, até mesmo conservador. Os poucos pontos em que ocorreram tensões superiores ao limite de escoamento concentram-se em regiões isoladas, envolvendo um número praticamente insignificante de nós. Tais ocorrências podem ser atribuídas a concentrações de tensões resultantes de simplificações geométricas, idealizações próprias do modelo numérico, insuficiência local de refinamento de malha ou às limitações inerentes ao método dos elementos finitos, que tende a superestimar esforços em regiões de descontinuidades geométricas.

No âmbito da análise longitudinal, verificou-se que o momento fletor primário constitui um dos parâmetros mais sensíveis às variações na distribuição de carga ao longo do porão. Observou-se que configurações inadequadas ou desfavoráveis podem intensificar os esforços fletores de maneira significativa, ultrapassando com relativa facilidade as margens de segurança previstas em projeto.

Esta característica evidencia que o comportamento estrutural da barcaça não depende apenas da massa total transportada, como muitas vezes presumido na prática operacional, mas é decisivamente influenciado pela forma como essa massa é alocada. Tal sensibilidade é amplamente reconhecida na literatura de engenharia naval, com autores como Hughes (2010) e Guedes Soares (1998) enfatizando que concentrações longitudinais de carga podem gerar esforços estruturais

substancialmente superiores àqueles previstos em cenários uniformemente distribuídos.

Figura 70 – Comparação dos momentos fletores



Fonte: Autor (2025)

As curvas de momento fletor apresentadas na Figura 70 oferecem uma visualização clara desse fenômeno. Carregamentos uniformemente distribuídos, mesmo quando associados a massas elevadas (condições 1 e 2), produziram momentos fletores consideravelmente inferiores aos verificados em arranjos concentrados a meia-nau (condições 3, 4, 5, 6 e 7). Esse comportamento persiste mesmo quando as condições concentradas possuem massa igual ou inferior àquelas uniformes. A condição 6, por exemplo, embora apresente massa equivalente à da condição 2, resultou em um momento fletor aproximadamente 4,5 vezes maior, evidenciando a predominância da geometria de carregamento sobre a magnitude dos esforços longitudinais.

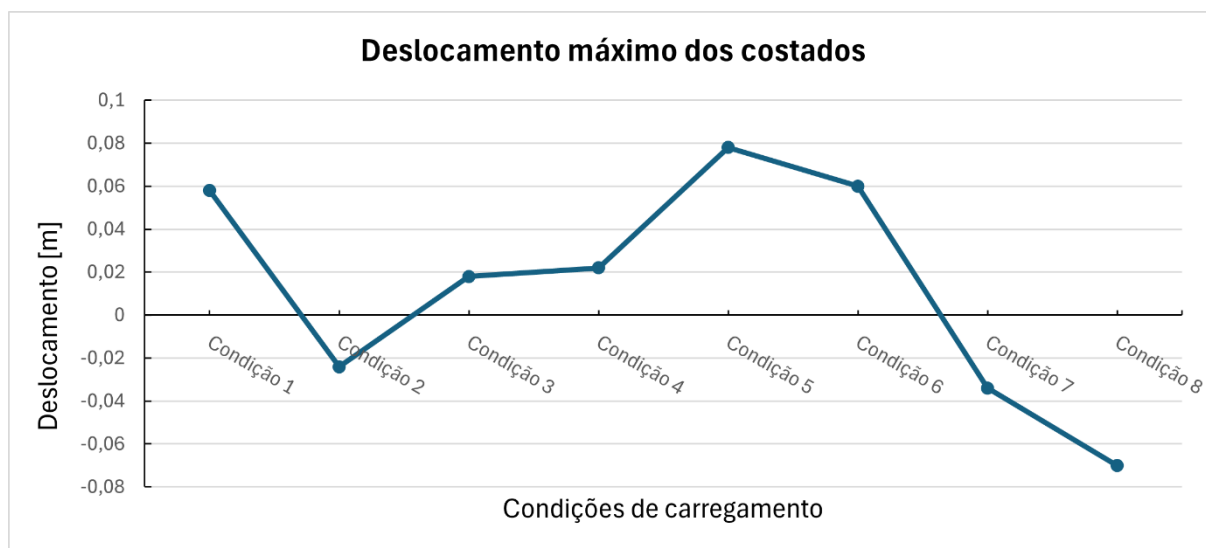
Tendo em vista tais resultados, a correta alocação da carga mostra-se um parâmetro crítico para a integridade estrutural da embarcação. Essa constatação está alinhada às exigências de Sociedades Classificadoras, como a American

Bureau of Shipping (ABS, 2025), que determinam a apresentação das curvas de momento fletor e de seus respectivos memoriais de cálculo para cada condição de carregamento prevista. Embora direcionadas principalmente a navios de porte oceânico, tais diretrizes são plenamente aplicáveis às embarcações fluviais.

Nas barcas graneleiras, onde a variabilidade de práticas operacionais e a carência de sistemas rigorosos de controle de estiva são comuns, a adoção de distribuições inadequadas pode resultar em esforços localizados excessivos, comprometendo tanto a integridade estrutural quanto a segurança das operações.

No que se refere ao comportamento transversal da estrutura (Figura 71), os resultados numéricos reproduziram com precisão o fenômeno relatado pelo estaleiro: o fechamento dos costados do porão, responsável pelo deslocamento das tampas de cobertura. Esse efeito, observado de maneira mais evidente nas condições 2, 7 e 8, resultou em deslocamentos máximos da ordem de 7,06 cm na extremidade superior das paredes laterais — magnitude suficiente para causar o escorregamento da tampa da braçola.

Figura 71 – Deslocamento dos costados



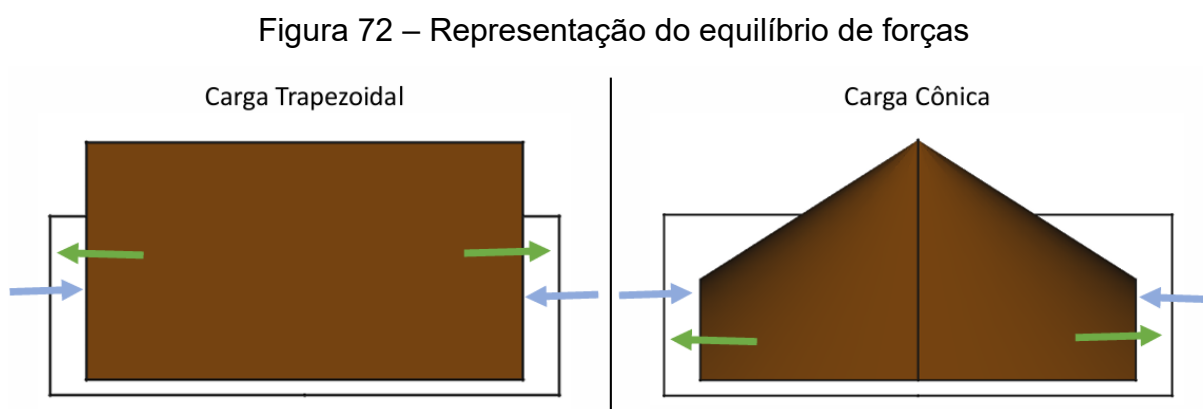
Fonte: Autor (2025)

O fechamento transversal decorre do desequilíbrio entre a pressão hidrostática externa e a pressão interna exercida pelo granel. Quando essa pressão interna não é suficientemente elevada para contrabalançar a ação externa, os costados tendem naturalmente a se aproximar. A relevância desse mecanismo ficou ainda mais evidente nas simulações de controle, nas quais foram aplicadas apenas

cargas verticais (pressão hidrostática e pressão da carga atuando exclusivamente no fundo). Mesmo nessas condições, sem qualquer carga lateral atuante, a estrutura exibiu tendência clara de fechamento, demonstrando que a própria configuração geométrica do porão e o estado de carregamento vertical induzem esse movimento. Assim, fica evidente que a pressão lateral gerada pelo granel desempenha papel fundamental ao equilibrar a estrutura e evitar o deslocamento transversal excessivo.

As análises também indicaram que carregamentos com geometria cônica, comumente utilizados por razões operacionais — como redução do tempo de estiva e eliminação da necessidade de movimentação transversal do shiploader —, tendem a agravar esse comportamento. Isso ocorre porque, nesse tipo de estiva, a carga pressuriza de forma insuficiente os costados, permitindo que a pressão hidrostática externa prevaleça e intensifique o fechamento.

Em contraste, carregamentos com geometria trapezoidal (condições 1, 3, 4, 5 e 6) mostraram-se mais favoráveis à integridade transversal do porão. Nessas situações, a distribuição da carga promove pressões internas laterais capazes de equilibrar ou até superar a pressão externa, resultando na abertura da parte superior dos costados. Esse equilíbrio de forças está ilustrado de maneira clara na Figura 72, onde se distinguem as pressões internas exercidas pelo granel (setas verdes) e as pressões externas atuantes (setas azuis).



Fonte: Autor (2025)

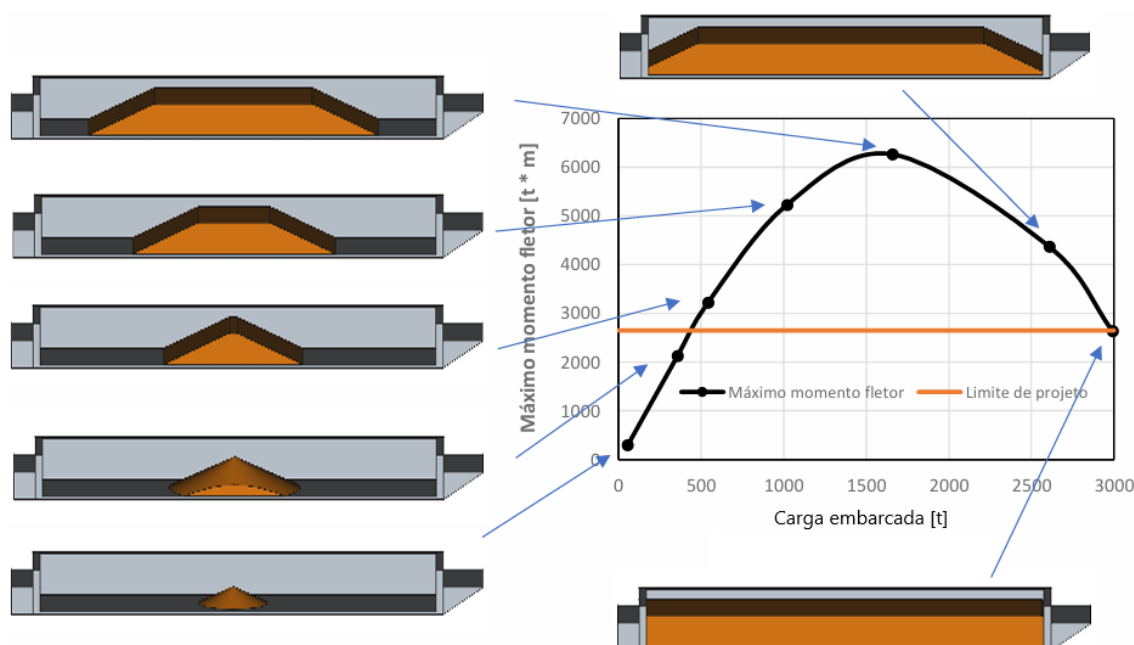
A análise de flambagem indicou que apenas as condições de carregamento 1 e 2 apresentaram momentos fletores inferiores ao valor crítico associado à instabilidade local. Nas demais condições avaliadas, os esforços ultrapassaram esse limite, evidenciando potencial risco de flambagem mesmo quando a massa total

transportada se encontra dentro da capacidade nominal da embarcação. Esses resultados demonstram que a avaliação estrutural não deve restringir-se à resistência longitudinal global, sendo igualmente necessário considerar a estabilidade local dos componentes submetidos a esforços transversais e a combinações complexas de carregamento. Dessa forma, observa-se que a falha crítica da estrutura está associada ao fenômeno de flambagem, que se torna o mecanismo predominante de instabilidade nas condições de carregamento analisadas.

Adicionalmente, verificou-se que o primeiro modo de flambagem obtido na simulação ocorreu na mesa da braçola, de forma análoga ao caso prático reportado pelo estaleiro. Essa correspondência entre o comportamento simulado e o observado em operação real confere robustez ao modelo numérico adotado e valida a metodologia empregada no presente trabalho.

Outro aspecto relevante identificado no estudo refere-se aos momentos fletores transitórios durante o processo de carregamento. Constatou-se que, mesmo nos cenários de distribuição uniforme, o momento fletor máximo pode ocorrer antes do término da estiva, superando as solicitações associadas à condição final de equilíbrio. Esse comportamento transitório, frequentemente negligenciado na prática operacional e até mesmo em algumas abordagens de projeto, é amplamente discutido por Hughes e Paik (2010), que destacam a importância de se considerar o envelope completo de carregamentos ao longo de todas as fases operacionais. A Figura 73 ilustra esse fenômeno, evidenciando que o dimensionamento estrutural deve contemplar não apenas o estado final, mas todo o ciclo operacional de carregamento e descarregamento.

Figura 73 – Comportamento do momento fletor no processo de estiva



Fonte: Autor (2025)

Em síntese, os resultados demonstram que a integridade estrutural de barcas graneleiras é fortemente condicionada pela geometria do carregamento, pela densidade do material transportado, pela interação entre pressões internas e externas e pela sequência operacional de estiva. A compreensão aprofundada desses fatores é essencial para o desenvolvimento de procedimentos seguros de operação, para a otimização do desempenho estrutural e para a mitigação de riscos associados a falhas locais e globais da embarcação.

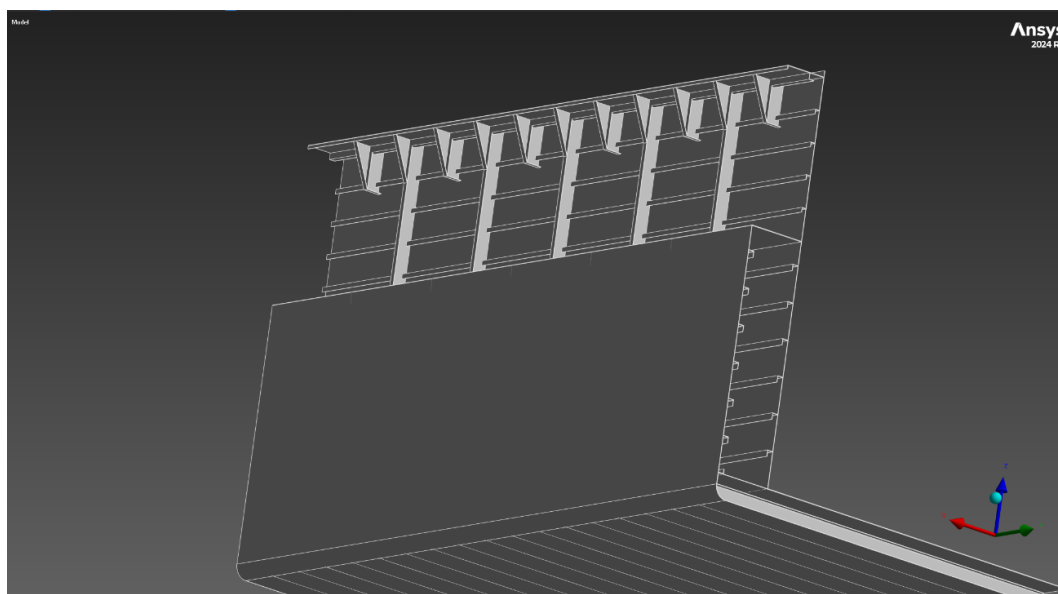
6.1 RECOMENDAÇÕES

Nesta seção, são apresentadas recomendações voltadas à melhoria da segurança operacional da barcaça. Duas medidas principais são propostas: a primeira consiste em um reforço estrutural, enquanto a segunda refere-se a estratégias de carregamento. Ambas foram elaboradas com o objetivo de mitigar a ocorrência de flambagem — identificada neste estudo como o modo de falha crítico — e, conseqüentemente, aumentar a confiabilidade estrutural da embarcação durante as operações.

6.1.1 Reforço estrutural

A solução proposta como reforço estrutural consiste na inclusão de borboletas entre o costado e a mesa da braçola, bem como na instalação de um reforçador longitudinal ao longo da própria braçola, conforme ilustrado na Figura 74. Essas adições têm como objetivo aumentar a rigidez local da região e reduzir a suscetibilidade à flambagem identificada nas análises.

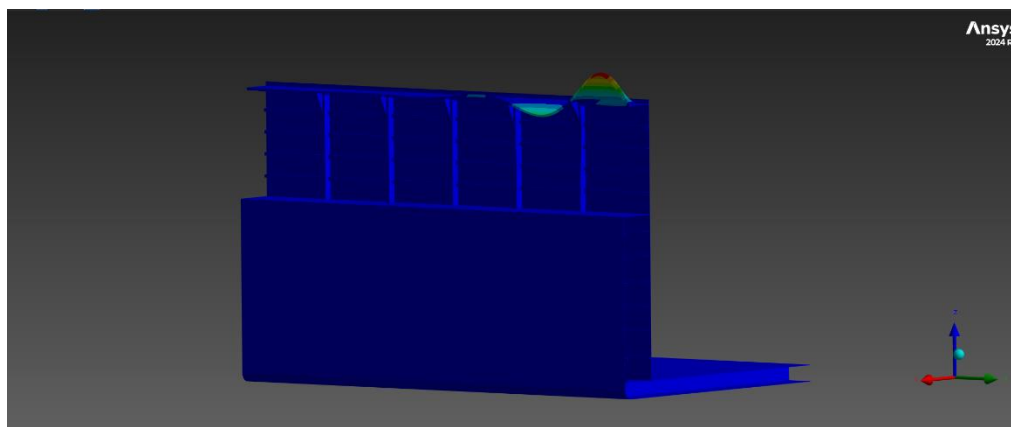
Figura 74 – Modelo com reforço



Fonte: Autor (2025)

Como ilustrado na Figura 75, mesmo após a inclusão dos reforços, o primeiro modo de flambagem ainda se manifesta na mesa da braçola. Entretanto, o limite crítico para que esse modo ocorra aumentou de forma expressiva. O multiplicador de carga obtido foi da ordem de $1,00 \times 10^8$, o que corresponde a um momento fletor crítico de aproximadamente $1,00 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{m}$, ou 10.193,7 t·m.

Figura 75 – Primeiro modo de flambagem do modelo com reforço



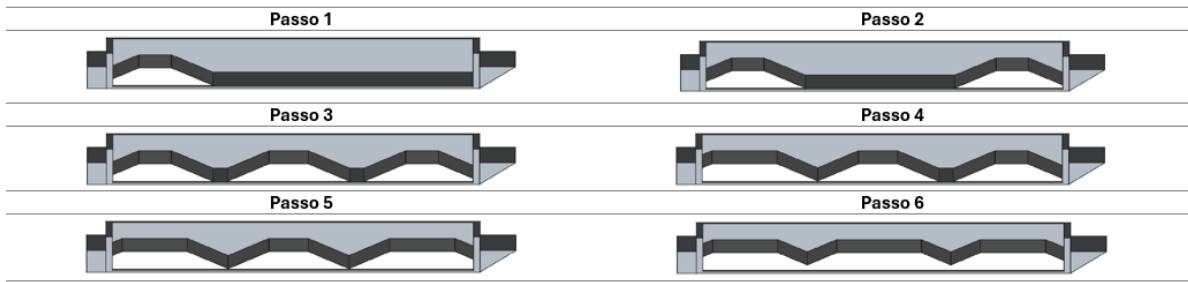
Fonte: Autor (2025)

Esse resultado evidencia que a adoção dos reforços propostos eleva substancialmente a capacidade estrutural da região, reduzindo de forma significativa o risco de flambagem sob as condições de carregamento analisadas. Com esse aumento de resistência, apenas a condição 6 ainda ultrapassa o limite crítico, enquanto todas as demais passam a apresentar margens de segurança amplas. O segundo pior cenário, por exemplo, resulta em um momento fletor aproximadamente 1,5 vez menor que o limite de flambagem, demonstrando a eficácia do reforço sugerido na mitigação dos riscos estruturais.

6.1.2 Estratégia de carregamento

A estratégia de carregamento é definida de modo a garantir que, em nenhuma etapa do processo, o momento fletor ultrapasse o valor crítico estabelecido para a estrutura original da embarcação. Assim, na Figura 76 e Tabela 10 são apresentados os passos recomendados para a execução segura do carregamento, assegurando que os esforços solicitantes permaneçam dentro dos limites admissíveis ao longo de toda a operação.

Figura 76 – Estratégia de carregamento



Fonte: Autor (2025)

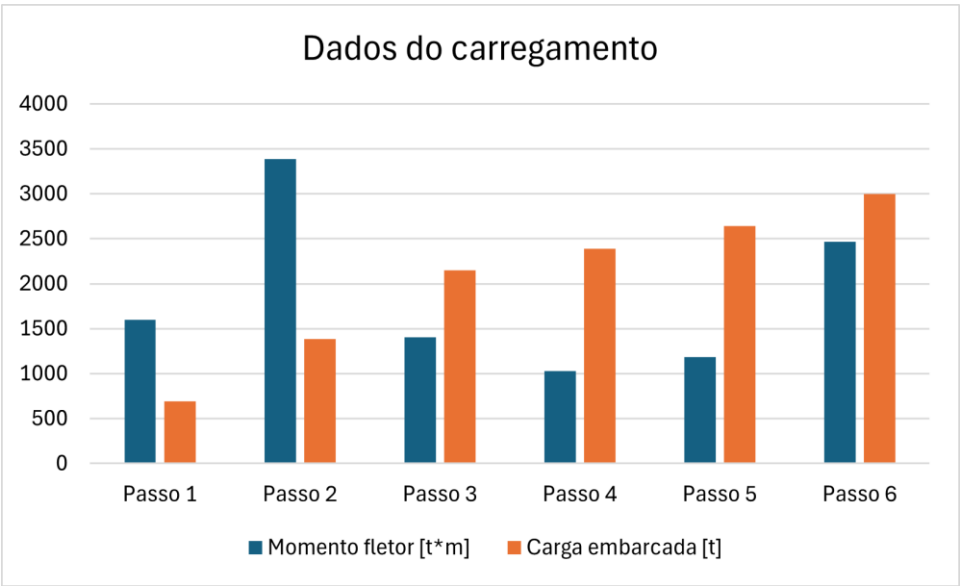
Tabela 10 – Parâmetros dos passos adicionados

Passo	Posição X	Altura	Largura topo	Geometria	Ângulo	Densidade
-	[m]	[m]	[m]	-	[°]	[t*m³]
Passo 1	7,50	4,0	5,0	Trapézio	32	1,28
Passo 2	48,50	4,0	5,0	Trapézio	32	1,28
Passo 3	28,00	4,0	6,0	Trapézio	32	1,28
Passo 4	7,50	4,0	10,0	Trapézio	32	1,28
Passo 5	48,50	4,0	10,0	Trapézio	32	1,28
Passo 6	28,00	4,0	13,0	Trapézio	32	1,28

Fonte: Autor (2025)

Observa-se na Figura 77 a relação entre o momento fletor e a carga embarcada em cada etapa do processo de carregamento. Verifica-se que, em todas as fases, os valores de momento permanecem abaixo do limite crítico de 3710 t·m, assegurando que a operação ocorre dentro das condições estruturais admissíveis para a embarcação.

Figura 77 – Dados de cada passo do carregamento



Fonte: Autor (2025)

7 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos ao longo deste estudo demonstram que o comportamento estrutural de barcaças graneleiras é fortemente condicionado não apenas à massa total transportada, mas, sobretudo, à forma como essa carga é distribuída ao longo do porão. Verificou-se que configurações inadequadas de carregamento podem provocar elevação significativa dos momentos fletores longitudinais, gerar deformações transversais expressivas nos costados e ultrapassar limites críticos de instabilidade local, como os associados à flambagem da mesa da braçola. Esses efeitos, quando combinados, podem comprometer a integridade estrutural da embarcação e a segurança das operações de transporte fluvial.

As análises realizadas evidenciaram que carregamentos uniformemente distribuídos tendem a reduzir as solicitações estruturais, enquanto configurações concentradas — especialmente na região de meia-nau — amplificam esforços para além dos níveis admissíveis. Esse comportamento confirma que a geometria de carregamento possui influência mais decisiva sobre a resposta estrutural do que a própria massa total embarcada, tornando o posicionamento adequado da carga um elemento fundamental na operação de barcaças graneleiras.

No âmbito do comportamento transversal, observou-se que carregamentos de geometria cônica, embora frequentemente empregados para reduzir o tempo de estiva, não proporcionam pressão interna suficiente para contrabalançar a pressão hidrostática externa. Como consequência, há o fechamento transversal dos costados, fenômeno capaz de ocasionar o escorregamento da tampa do porão e comprometer a segurança operacional. Essa constatação reforça que a adoção de práticas operacionais voltadas exclusivamente à eficiência não deve ocorrer em detrimento da segurança estrutural.

Diante desses resultados, conclui-se que a implementação de estratégias adequadas de carregamento e o correto posicionamento da carga constituem requisitos essenciais para garantir a segurança estrutural e o desempenho operacional das embarcações. Ressalta-se, ainda, a importância do cumprimento das recomendações das Sociedades Classificadoras, bem como da utilização de análises numéricas e de procedimentos padronizados para a definição das condições de carregamento.

Em síntese, a adequada distribuição da carga contribui para a redução de esforços estruturais, para o aumento da confiabilidade da embarcação e para a mitigação de riscos operacionais, devendo ser incorporada como prática fundamental no planejamento e na execução das operações de transporte hidroviário de granéis sólidos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING (ABS). **Rules for Building and Classing Steel Vessels**. Houston, 2025.

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING (ABS). **Loading Manual Guidelines for Bulk Carriers**. Houston, 2025.

ANSYS Inc. **ANSYS Mechanical APDL Theory Reference**. Release 2024 R1. Canonsburg, PA: ANSYS, 2024.

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

BATHE, K. J. **Finite element procedures**. Victoria: Pearson College Div, 1995.

DANTAS, A. A. N.; SANTOS, M. C.; FRAGA, Y. S. B. **A importância do transporte hidroviário para o escoamento de grãos na região sul do estado de Goiás a partir do porto de São Simão**. Colóquio – Revista do Desenvolvimento Regional, v. 20, n. 1, 2020.

FAGAN, M. J. **Finite element analysis: Theory and practice**. Harlow: Longman Pub Group, 1996.

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **A first course in finite elements**. Chichester: Willey, 2007.

GUEDES SOARES, C.; GARZON, C. M. **Analysis and Design of Ship Structures**. London: Taylor & Francis, 1998.

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

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

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

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

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

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

SCHALCH, E. J. **Os gargalos logísticos das principais rotas de escoamento de grãos de soja do estado do Mato Grosso**: estudo de caso Miritituba–Barcarena. Dissertação (Mestrado) — USP, 2016.

SHAMA, M. **Buckling of Ship Structures**. Oxford: Elsevier, 2018.

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

TOIGO, F.; SILVA, R. R. (et al.) **Challenges and opportunities for the development of inland waterway transport in Brazil**. Sustainability, v. 16, n. 5, 2024.

UNCTAD. **Review of Maritime Transport 2022**. United Nations Conference on Trade and Development, 2022.

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

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

APÊNDICE A – PRESSÃO NO FUNDO GERADO PELOS CARREGAMENTOS CÔNICOS

```

import numpy as np # type: ignore
import pandas as pd

# --- Parâmetros do cone ---
height = 6.5          # altura do cone (m)
radius = 10.4         # raio da base do cone (m)
density = 778         # densidade do material (kg/m³)
g = 9.81              # aceleração da gravidade (m/s²)
cone_center = 28.0    # posição x central do cone (m)

# --- Grade de cálculo ---
x_vals = np.arange(0, 56.25, 0.25)          # eixo x: de 0 a 56 m
y_vals = np.arange(0, radius + 0.25, 0.25)  # eixo y radial: de 0 até o
raio da base

X, Y = np.meshgrid(x_vals, y_vals)

# --- Inicializar matriz de pressão ---
pressure_field = np.zeros_like(X)

# --- Calcular pressão em cada ponto da malha ---
for i in range(X.shape[0]): # sobre y (linhas)
    for j in range(X.shape[1]): # sobre x (colunas)
        x = X[i, j]
        y = Y[i, j]

        # Calcular distância radial ao centro do cone
        x_rel = x - cone_center
        r = np.sqrt(x_rel**2 + y**2)

        # Se estiver dentro da base do cone, calcula a pressão
        if r <= radius:
            h_surface = height * (1 - r / radius) # altura vertical da
"coluna" nesse ponto
            pressure = density * g * h_surface
        else:
            pressure = 0

        pressure_field[i, j] = pressure

# --- Exportar como arquivo CSV ---
df = pd.DataFrame({
    'X [m]': X.flatten(),

```

```
    'Y_radial [m]': Y.flatten(),  
    'Pressure [Pa]': pressure_field.flatten()})  
  
df.to_csv('pressure_field_single_cone.csv', index=False)  
print("Arquivo salvo como 'pressure_field_single_cone.csv'")
```

APÊNDICE B – PRESSÃO NO COSTADO INTERNO GERADO PELOS CARREGAMENTOS NÃO UNIFORMES

```
import pandas as pd
import numpy as np

def calcular_pressao_hidrostatica(
    arquivo_txt="arquivo_das_alturas.txt",
    densidade,
    passo_z=0.5,
    arquivo_saida="pressao_hidrostatica_saida.csv",
    separador="\t",
    decimal=",",
    encoding="latin1"
):
    """
    Calcula a pressão hidrostática decrescente (máxima no z=0)
    a partir de um arquivo .txt contendo a altura da carga ao longo
    do comprimento, gerando um arquivo .csv com os resultados.

    Parâmetros:
        arquivo_txt      → caminho do arquivo .txt de entrada
        densidade        → densidade do material (kg/m³)
        passo_z          → incremento vertical (m)
        arquivo_saida    → nome do arquivo .csv de saída
        separador        → separador do arquivo .txt
        decimal          → caractere decimal usado no arquivo
        encoding         → codificação do arquivo de entrada
    """

    g = 9.81 # gravidade (m/s²)

    # Ler arquivo .txt
    df_altura = pd.read_csv(
        arquivo_txt,
        sep=separador,
        decimal=decimal,
        encoding=encoding
    )

    # Nome das colunas
    col_x = df_altura.columns[0]
    col_h = df_altura.columns[1]

    # Lista para armazenar resultados
    resultados = []
```

```

# Processar cada posição
for _, row in df_altura.iterrows():
    x = float(row[col_x])
    h = float(row[col_h])

    # Gera os níveis z (0, 0.5, 1.0, ... até a altura local)
    z_levels = np.arange(0, h + passo_z, passo_z)

    for z in z_levels:
        # Pressão hidrostática decrescente
        pressao = densidade * g * (h - z)

        resultados.append({
            "X [m]": x,
            "Z [m]": z,
            "Pressure [Pa]": pressao
        })

# Criar DataFrame
df_pressao = pd.DataFrame(resultados)

# Salvar CSV
df_pressao.to_csv(arquivo_saida, index=False)

print(f"Arquivo gerado com sucesso: {arquivo_saida}")
return df_pressao

```

APÊNDICE C – PRESSÃO DA CARGA NO FUNDO DA CONDIÇÃO 1

x [m]	Massa [t]	Peso [kN]	Pressão [Pa]
0,5	51,82	508,35	42362,85
1,5	53,09	520,81	43401,08
2,5	53,09	520,81	43401,08
3,5	53,09	520,81	43401,08
4,5	53,09	520,81	43401,08
5,5	53,09	520,81	43401,08
6,5	53,09	520,81	43401,08
7,5	53,09	520,81	43401,08
8,5	53,09	520,81	43401,08
9,5	53,09	520,81	43401,08
10,5	53,09	520,81	43401,08
11,5	53,09	520,81	43401,08
12,5	53,09	520,81	43401,08
13,5	53,09	520,81	43401,08
14,5	53,09	520,81	43401,08
15,5	53,09	520,81	43401,08
16,5	53,09	520,81	43401,08
17,5	53,09	520,81	43401,08
18,5	53,09	520,81	43401,08
19,5	53,09	520,81	43401,08
20,5	53,09	520,81	43401,08
21,5	53,09	520,81	43401,08
22,5	53,09	520,81	43401,08
23,5	53,09	520,81	43401,08
24,5	53,09	520,81	43401,08
25,5	53,09	520,81	43401,08
26,5	53,09	520,81	43401,08
27,5	53,09	520,81	43401,08
28,5	53,09	520,81	43401,08
29,5	53,09	520,81	43401,08
30,5	53,09	520,81	43401,08
31,5	53,09	520,81	43401,08
32,5	53,09	520,81	43401,08
33,5	53,09	520,81	43401,08
34,5	53,09	520,81	43401,08
35,5	53,09	520,81	43401,08
36,5	53,09	520,81	43401,08
37,5	53,09	520,81	43401,08
38,5	53,09	520,81	43401,08
39,5	53,09	520,81	43401,08
40,5	53,09	520,81	43401,08

x [m]	Massa [t]	Peso [kN]	Pressão [Pa]
41,5	53,09	520,81	43401,08
42,5	53,09	520,81	43401,08
43,5	53,09	520,81	43401,08
44,5	53,09	520,81	43401,08
45,5	53,09	520,81	43401,08
46,5	53,09	520,81	43401,08
47,5	53,09	520,81	43401,08
48,5	53,09	520,81	43401,08
49,5	53,09	520,81	43401,08
50,5	53,09	520,81	43401,08
51,5	53,09	520,81	43401,08
52,5	53,09	520,81	43401,08
53,5	53,09	520,81	43401,08
54,5	53,09	520,81	43401,08
55,5	53,09	520,81	43401,08
56,5	17,09	167,65	13971,08

**APÊNDICE D – PRESSÃO DA CARGA E HIDROSTÁTICA ATUANTES NO
COSTADO DA CONDIÇÃO 1**

Pressão hidrostática		Pressão carga	
Altura [y]	Pressão [Pa]	Altura [y]	Pressão [Pa]
0	41545,35	0,42	43503,426
0,25	39092,85	0,67	41595,381
0,5	36640,35	0,92	39687,336
0,75	34187,85	1,17	37779,291
1	31735,35	1,42	35871,246
1,25	29282,85	1,67	33963,201
1,5	26830,35	1,92	32055,156
1,75	24377,85	2,17	30147,111
2	21925,35	2,42	28239,066
2,25	19472,85	2,67	26331,021
2,5	17020,35	2,92	24422,976
2,75	14567,85	3,17	22514,931
3	12115,35	3,42	20606,886
3,25	9662,85	3,67	18698,841
3,5	7210,35	3,92	16790,796
3,75	4757,85	4,17	14882,751
4	2305,35	4,42	12974,706
4,235	0	4,67	11066,661
		4,92	9158,616
		5,17	7250,571
		5,42	5342,526
		5,67	3434,481
		5,92	1526,436
		6,12	0

APÊNDICE E – PRESSÃO DA CARGA NO FUNDO DA CONDIÇÃO 2

x [m]	Massa [t]	Peso [kN]	Pressão [Pa]
0,5	51,06	500,90	41741,55
1,5	53,16	521,50	43458,3
2,5	53,16	521,50	43458,3
3,5	53,16	521,50	43458,3
4,5	53,16	521,50	43458,3
5,5	53,16	521,50	43458,3
6,5	53,16	521,50	43458,3
7,5	53,16	521,50	43458,3
8,5	53,16	521,50	43458,3
9,5	53,16	521,50	43458,3
10,5	53,16	521,50	43458,3
11,5	53,16	521,50	43458,3
12,5	53,16	521,50	43458,3
13,5	53,16	521,50	43458,3
14,5	53,16	521,50	43458,3
15,5	53,16	521,50	43458,3
16,5	53,16	521,50	43458,3
17,5	53,16	521,50	43458,3
18,5	53,16	521,50	43458,3
19,5	53,16	521,50	43458,3
20,5	53,16	521,50	43458,3
21,5	53,16	521,50	43458,3
22,5	53,16	521,50	43458,3
23,5	53,16	521,50	43458,3
24,5	53,16	521,50	43458,3
25,5	53,16	521,50	43458,3
26,5	53,16	521,50	43458,3
27,5	53,16	521,50	43458,3
28,5	53,16	521,50	43458,3
29,5	53,16	521,50	43458,3
30,5	53,16	521,50	43458,3
31,5	53,16	521,50	43458,3
32,5	53,16	521,50	43458,3
33,5	53,16	521,50	43458,3
34,5	53,16	521,50	43458,3
35,5	53,16	521,50	43458,3
36,5	53,16	521,50	43458,3
37,5	53,16	521,50	43458,3
38,5	53,16	521,50	43458,3
39,5	53,16	521,50	43458,3
40,5	53,16	521,50	43458,3

41,5	53,16	521,50	43458,3
42,5	53,16	521,50	43458,3
43,5	53,16	521,50	43458,3
44,5	53,16	521,50	43458,3
45,5	53,16	521,50	43458,3
46,5	53,16	521,50	43458,3
47,5	53,16	521,50	43458,3
48,5	53,16	521,50	43458,3
49,5	53,16	521,50	43458,3
50,5	53,16	521,50	43458,3
51,5	53,16	521,50	43458,3
52,5	53,16	521,50	43458,3
53,5	53,16	521,50	43458,3
54,5	53,16	521,50	43458,3
55,5	53,16	521,50	43458,3
56,5	17,18	168,54	14044,65

**APÊNDICE F – PRESSÃO DA CARGA E HIDROSTÁTICA ATUANTES NO
COSTADO DA CONDIÇÃO 2**

Pressão hidrostática		Pressão carga	
Altura [y]	Pressão [Pa]	Altura [y]	Pressão [Pa]
0	41584,59	0,42	43948,8
0,25	39132,09	0,67	40809,6
0,5	36679,59	0,92	37670,4
0,75	34227,09	1,17	34531,2
1	31774,59	1,42	31392
1,25	29322,09	1,67	28252,8
1,5	26869,59	1,92	25113,6
1,75	24417,09	2,17	21974,4
2	21964,59	2,42	18835,2
2,25	19512,09	2,67	15696
2,5	17059,59	2,92	12556,8
2,75	14607,09	3,17	9417,6
3	12154,59	3,42	6278,4
3,25	9702,09	3,67	3139,2
3,5	7249,59	3,92	0
3,75	4797,09		
4	2344,59		
4,239	0		

APÊNDICE G – PRESSÃO DA CARGA NO FUNDO DA CONDIÇÃO 3

x [m]	Massa [t]	Peso [kN]	Pressão [Pa]
0,5	0	0	0
1,5	0	0	0
2,5	0	0	0
3,5	0	0	0
4,5	0	0	0
5,5	0	0	0
6,5	0	0	0
7,5	0	0	0
8,5	0	0	0
9,5	0	0	0
10,5	0	0	0
11,5	0	0	0
12,5	0	0	0
13,5	0	0	0
14,5	0	0	0
15,5	0	0	0
16,5	0	0	0
17,5	0	0	0
18,5	0	0	0
19,5	0	0	0
20,5	1,97	19,3257	1610,475
21,5	7,71	75,6351	6302,925
22,5	13,55	132,9255	11077,125
23,5	19,38	190,1178	15843,15
24,5	25,21	247,3101	20609,175
25,5	31,05	304,6005	25383,375
26,5	36,88	361,7928	30149,4
27,5	42,72	419,0832	34923,6
28,5	48,55	476,2755	39689,625
29,5	54,38	533,4678	44455,65
30,5	59,7	585,657	48804,75
31,5	60,17	590,2677	49188,975
32,5	55,32	542,6892	45224,1
33,5	49,48	485,3988	40449,9
34,5	43,65	428,2065	35683,875
35,5	37,82	371,0142	30917,85
36,5	31,98	313,7238	26143,65
37,5	26,15	256,5315	21377,625
38,5	20,31	199,2411	16603,425
39,5	14,48	142,0488	11837,4

40,5	8,65	84,8565	7071,375
41,5	2,81	27,5661	2297,175
42,5	0	0	0
43,5	0	0	0
44,5	0	0	0
45,5	0	0	0
46,5	0	0	0
47,5	0	0	0
48,5	0	0	0
49,5	0	0	0
50,5	0	0	0
51,5	0	0	0
52,5	0	0	0
53,5	0	0	0
54,5	0	0	0
55,5	0	0	0
56,5	0	0	0

APÊNDICE H – PRESSÃO HIDRATÁTICA NO COSTADO DA CONDIÇÃO 3

Pressão hidrostática	
Altura [y]	Pressão [Pa]
0,00	12926,637
0,25	10474,137
0,50	8021,637
0,75	5569,137
1,00	3116,637
1,25	664,137
1,32	0

APÊNDICE I – PRESSÃO DA CARGA NO FUNDO DA CONDIÇÃO 4

x [m]	Massa [t]	Meso [kN]	Pressão [Pa]
0,5	0	0	0
1,5	0	0	0
2,5	0	0	0
3,5	0	0	0
4,5	0	0	0
5,5	0	0	0
6,5	0	0	0
7,5	0	0	0
8,5	0	0	0
9,5	0	0	0
10,5	0	0	0
11,5	0	0	0
12,5	0	0	0
13,5	0	0	0
14,5	0	0	0
15,5	0	0	0
16,5	0	0	0
17,5	0	0	0
18,5	3,24	31,7844	2648,7
19,5	12,69	124,4889	10374,075
20,5	22,29	218,6649	18222,075
21,5	31,89	312,8409	26070,075
22,5	41,48	406,9188	33909,9
23,5	51,08	501,0948	41757,9
24,5	60,68	595,2708	49605,9
25,5	70,28	689,4468	57453,9
26,5	79,88	783,6228	65301,9
27,5	89,47	877,7007	73141,725
28,5	98,23	963,6363	80303,025
29,5	98,99	971,0919	80924,325
30,5	91,01	892,8081	74400,675
31,5	81,41	798,6321	66552,675
32,5	71,81	704,4561	58704,675
33,5	62,22	610,3782	50864,85
34,5	52,62	516,2022	43016,85
35,5	43,02	422,0262	35168,85
36,5	33,42	327,8502	27320,85
37,5	23,82	233,6742	19472,85
38,5	14,23	139,5963	11633,025
39,5	4,63	45,4203	3785,025

40,5	0	0	0
41,5	0	0	0
42,5	0	0	0
43,5	0	0	0
44,5	0	0	0
45,5	0	0	0
46,5	0	0	0
47,5	0	0	0
48,5	0	0	0
49,5	0	0	0
50,5	0	0	0
51,5	0	0	0
52,5	0	0	0
53,5	0	0	0
54,5	0	0	0
55,5	0	0	0
56,5	0	0	0

APÊNDICE J – PRESSÃO HIDRATÁTICA NO COSTADO DA CONDIÇÃO 4

Pressão hidrostática	
Altura [y]	Pressão [Pa]
0,00	18488,907
0,25	16036,407
0,50	13583,907
0,75	11131,407
1,00	8678,907
1,25	6226,407
1,50	3773,907
1,75	1321,407
1,88	0

APÊNDICE K – PRESSÃO DA CARGA NO FUNDO DA CONDIÇÃO 5

x [m]	Massa [t]	Peso [N]	Pressão [Pa]
0,5	0	0,000	0,000
1,5	0	0,000	0,000
2,5	0	0,000	0,000
3,5	0	0,000	0,000
4,5	0,47176986	4628,062	385,672
5,5	5,26303696	51630,393	4302,533
6,5	11,0968171	108859,775	9071,648
7,5	16,9305972	166089,158	13840,763
8,5	22,764378	223318,548	18609,879
9,5	28,5981581	280547,931	23378,994
10,5	34,4319382	337777,314	28148,109
11,5	40,2657183	395006,697	32917,225
12,5	46,0994992	452236,087	37686,341
13,5	51,9332793	509465,470	42455,456
14,5	57,7670594	566694,853	47224,571
15,5	60,684	595310,040	49609,170
16,5	60,684	595310,040	49609,170
17,5	60,684	595310,040	49609,170
18,5	60,684	595310,040	49609,170
19,5	60,684	595310,040	49609,170
20,5	60,684	595310,040	49609,170
21,5	60,684	595310,040	49609,170
22,5	60,684	595310,040	49609,170
23,5	60,684	595310,040	49609,170
24,5	60,684	595310,040	49609,170
25,5	60,684	595310,040	49609,170
26,5	60,684	595310,040	49609,170
27,5	60,684	595310,040	49609,170
28,5	60,684	595310,040	49609,170
29,5	60,684	595310,040	49609,170
30,5	60,684	595310,040	49609,170
31,5	60,684	595310,040	49609,170
32,5	60,684	595310,040	49609,170
33,5	60,684	595310,040	49609,170
34,5	60,684	595310,040	49609,170
35,5	60,684	595310,040	49609,170
36,5	60,684	595310,040	49609,170
37,5	60,684	595310,040	49609,170
38,5	60,684	595310,040	49609,170
39,5	60,684	595310,040	49609,170

40,5	60,684	595310,040	49609,170
41,5	60,684	595310,040	49609,170
42,5	60,684	595310,040	49609,170
43,5	57,7671605	566695,845	47224,654
44,5	51,9333804	509466,462	42455,539
45,5	46,0995996	452237,072	37686,423
46,5	40,2658195	395007,689	32917,307
47,5	34,4320394	337778,306	28148,192
48,5	28,5982593	280548,923	23379,077
49,5	22,7644784	223319,533	18609,961
50,5	16,9306983	166090,150	13840,846
51,5	11,0969182	108860,768	9071,731
52,5	5,2631381	51631,385	4302,615
53,5	0,47181032	4628,459	385,705
54,5	0	0,000	0,000
55,5	0	0,000	0,000
56,5	0	0,000	0,000

APÊNDICE L – PRESSÃO HIDRATÁTICA NO COSTADO DA CONDIÇÃO 5

Pressão hidrostática	
Altura [y]	Pressão [Pa]
0,00	33341,247
0,25	30888,747
0,50	28436,247
0,75	25983,747
1,00	23531,247
1,25	21078,747
1,50	18626,247
1,75	16173,747
2,00	13721,247
2,25	11268,747
2,50	8816,247
2,75	6363,747
3,00	3911,247
3,25	1458,747
3,40	0