

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

JENIFFER FERNANDA KOPETSKI

AVALIAÇÃO DA DEFLEXÃO DA ESTRUTURA TERCIÁRIA NO  
COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE UMA EMBARCAÇÃO DE ALTA  
VELOCIDADE

Joinville

2017

JENIFFER FERNANDA KOPETSKI

AVALIAÇÃO DA DEFLEXÃO DA ESTRUTURA TERCIÁRIA NO  
COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE UMA EMBARCAÇÃO DE ALTA  
VELOCIDADE

Trabalho apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Naval, da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Naval.

Orientador: Dr. Eng. Thiago Pontin Tancredi

Joinville

2017

AVALIAÇÃO DA DEFLEXÃO DA ESTRUTURA TERCIÁRIA NO  
COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE UMA EMBARCAÇÃO DE ALTA  
VELOCIDADE

JENIFFER FERNANDA KOPETSKI

Esta Monografia foi julgada e aprovada como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Joinville.

Joinville (SC), 21 de Novembro de 2017.

Banca Examinadora:

---

Dr. Eng. Thiago Pontin Tancredi  
Presidente/Orientador

---

Mestre Eng. Vitor Takashi Endo  
Coorientador

---

Dr. Eng. Marcos Alves Rabelo  
Membro

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que permitiu que tudo isso acontecesse, que em todos os momentos esteve ao meu lado, me amparando e dando força para superar todos os obstáculos.

À minha mãe Sheila, pelo carinho e incentivo, heroína que é para mim um exemplo de garra e determinação.

À minha irmã Bianca, que nos momentos que estive ausente dedicando-me ao estudo superior, sempre fez entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente.

Ao meu padrasto, por ser o pai que não tive ao longo desses anos e por sempre torcer por mim.

À minha família, por todo o apoio e carinho e por sempre torcerem por mim.

Ao meu namorado Filipe, companheiro de todas as horas, pelo carinho, compreensão e amor. E por sempre me apoiar em minhas decisões.

Ao meu orientador Thiago Pontin Tancredi, por sua confiança e paciência, por toda ajuda e orientação que me foram dadas ao longo deste trabalho, pela inspiração no amadurecimento dos meus conhecimentos e conceitos que me levaram a execução e conclusão deste trabalho.

Ao meu coorientador Vitor Takashi Endo, que além de ser o responsável pelos meus conhecimentos sobre elementos finitos se dedicou muito a este trabalho. Obrigado por compartilhar seus conhecimentos e experiências.

Ao professor Ricardo Aurélio Quinhões Pinto, por todos os ensinamentos.

A todos os meus professores que são os maiores responsáveis pela conclusão desta etapa da minha vida. Obrigado por me proporcionarem o conhecimento intelectual e moral durante o processo de formação profissional.

Aos meus amigos e colegas de trabalho pelos momentos inesquecíveis, lições e amizade.

Ao Leonardo Martins, que atenciosamente se prontificou em ajudar na elaboração das análises CFD deste trabalho.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

## RESUMO

O cenário de competitividade de um mundo globalizado reflete a crescente exigência de embarcações de maior qualidade e eficiência o que vem desafiando engenheiros no sentido de obter uma estrutura robusta, que maximize a resistência e minimize os custos de fabricação. Neste sentido, o presente trabalho propõe o desenvolvimento e análise do comportamento e da eficiência de um novo conceito de arranjo estrutural em uma embarcação de alta velocidade, de forma que a estrutura tenha a deflexão necessária para atender a rigidez da embarcação, sem peso ou espessura adicional. Como exemplo de aplicação da proposta, realizou-se um estudo de caso com uma embarcação de 42 pés para o qual fez-se a aplicação da simulação numérica em *Computational Fluid Dynamics* (CFD) para obter uma comparação do campo de pressões na parte inferior do casco com os valores obtidos pela norma da Sociedade Classificadora DNV, seguido de uma análise estrutural utilizando Método dos Elementos Finitos, visando determinar a distribuição das tensões ao longo do casco da embarcação. O projeto estrutural e a modelagem em elementos finitos foram desenvolvidos de acordo com a norma da Sociedade Classificadora DNV. Como resultados observou-se que a proposta apresentada possibilitou uma diminuição das cargas e impactos mais elevados sobre o fundo da embarcação, potencialmente reduzindo o desconforto em situações severas de mar, sem comprometer a integridade estrutural.

**Palavras-chave:** Embarcações de alta velocidade. Arranjo estrutural. MEF. CFD

## ABSTRACT

The competitive context of a globalized world reflects the growing demand for high quality and efficient vessels, which is challenging engineers to develop robust structures that maximizes strength and minimizes manufacturing costs. The present work proposes the development and analysis of the behavior and efficiency of a new concept of structural arrangement in a high speed boat, so that the deflection of the structure meet the rigidity of the boat, without additional weight or thickness. As an application example, a case study was developed with a 42-foot vessel for which the numerical simulation in Computational Fluid Dynamics (CFD) was used to compare the pressure area in the lower part of the hull with the values obtained by the DNV Classification Society standard, followed by a structural analysis using the Finite Element Method, in order to determine the stress distribution along the hull. The structural design and finite element modelling were developed according to the DNV Classification Society standard. As a result, it was noticed that the proposed structural arrangement allowed a decrease of the higher loads and impacts on the bottom of the vessel, potentially reducing the discomfort in severe situations, without undermining the structural integrity.

**Keywords:** High speed boats. Structural arrangement. FEM. CFD.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Arranjo estrutural típico de uma embarcação de alta velocidade.....	14
Figura 2 - Slamming em uma embarcação. ....	14
Figura 3 - Corte transversal da nova proposta de arranjo estrutural. ....	16
Figura 4 - Limite de Velocidade para uma embarcação de alta velocidade. ....	19
Figura 5 - Representação do comprimento entre perpendiculares, boca e calado. ..	21
Figura 6 - Representação do ângulo de deadrise. ....	22
Figura 7 - Representação do movimento de pitch e heave. ....	22
Figura 8 - Representação do raio de curvatura em cada região da embarcação.....	25
Figura 9 – Fluxograma do desacoplamento da análise estrutural. ....	26
Figura 10 - Representação de uma colisão elástica entre duas esferas. ....	30
Figura 11 - (a) Colisão parcialmente inelástica entre duas esferas; (b) Colisão perfeitamente inelástica entre duas esferas. ....	31
Figura 12 – Representação da colisão elástica entre dois carrinhos em um trilho de ar. .....	32
Figura 13 – Representação da colisão inelástica entre dois carrinhos em um trilho de ar. ....	33
Figura 14 – Curva de Tensão por Deformação para um painel reforçado longitudinalmente. ....	34
Figura 15 - Casco modelado no Rhinoceros. ....	37
Figura 16 – Arranjo estrutural.....	40
Figura 17 – Pressão de slamming ao longo do comprimento do casco. ....	42
Figura 18 - Simulação bifásica de embarcação de planeio. ....	43
Figura 19 – Vista isométrica do volume de controle. ....	44
Figura 20 – Vista lateral do volume de controle. ....	45
Figura 21 – Distribuição de pressão no fundo do casco em regime de planeio em MPa. .....	46
Figura 22 – Distribuição de pressão no fundo do casco na batida de proa em MPa.	47
Figura 23 – Distribuição da pressão de slamming ao longo do comprimento da embarcação.....	48
Figura 24 - Pontos Críticos da Unidade de Chapeamento. ....	52
Figura 25 - Teoria das Pequenas Deflexões. ....	53

Figura 26 – Distância entre o fundo e as cavernas. ....	55
Figura 27 – Etapas de processamento do programa Hyperworks®. ....	56
Figura 28 – Malha do casco. ....	57
Figura 29 – Condição de contorno aplicada ao casco. ....	58
Figura 30 – Geometria de Acoplamento. ....	59
Figura 31 – Campos de tensões (MPa) para o caso 5. ....	62
Figura 32 – Campos de deslocamentos (mm) para o caso 5. ....	62
Figura 33 – Campos de deslocamentos (mm) do fundo para o caso 5. ....	63
Figura 34 – Gráfico da tensão máxima principal no fundo 4 para os casos avaliados. ....	65
Figura 35 – Gráfico da tensão máxima principal nas cavernas da embarcação para os casos avaliados. ....	65
Figura 36 – Gráfico do deslocamento máximo nas cavernas da embarcação para os casos avaliados. ....	66
Figura 37 – Acúmulo de tensão (MPa) nos reforçadores. ....	67
Figura 38 – (a) Tensão em MPa na análise com 5mm de gap; (b) Tensão em MPa na análise com 30mm de gap . ....	68
Figura 39 – Campos de tensões (MPa) para a análise de um gap de 5mm. ....	69
Figura 40 – Campos de tensões (MPa) para a análise de um gap de 30mm. ....	69
Figura 41 – Campos de deslocamentos (mm) para a análise de um gap de 5mm. ..	70
Figura 42 – Campos de deslocamentos (mm) para a análise de um gap de 30mm. ....	70
Figura 43 – Campos de deslocamentos (mm) do fundo 4 com um gap de 5mm. ....	71
Figura 44 – Campos de deslocamentos (mm) do fundo 4 com um gap de 30mm. ...	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões e características da embarcação.....	36
Tabela 2 - Variação geométrica ao longo do comprimento. ....	36
Tabela 3 – Características dos painéis. ....	38
Tabela 4 – Dimensões das longarinas. ....	39
Tabela 5 – Dimensões das cavernas. ....	39
Tabela 6 – Pressão de slamming em cada chapa do fundo.....	42
Tabela 7 – Dimensões do tanque de reboque virtual. ....	44
Tabela 8 – Inércia de massa. ....	46
Tabela 9 – Variação da pressão de slamming. ....	47
Tabela 10 - Propriedades do alumínio. ....	49
Tabela 11 - Características da placa avaliada.....	51
Tabela 12 – Deslocamento máximo e tensão principal máxima para cada caso avaliado.....	61
Tabela 13 – Tensão máxima principal [MPa] nos diversos painéis para cada parâmetro avaliado.....	64
Tabela 14 – Resultados das análises nas cavernas para cada parâmetro avaliado.	64

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

CAD – Computer Aided Design

CFD – Computational Fluid Dynamics

DFBI – Dynamic Fluid Body Interaction

DNV – Det Norske Veritas

IMO – International Maritime Organization

HSC – High Speed Craft

IACS – International Association of Classification Societies

VC – Volume de Controle

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área de projeto	[m <sup>2</sup> ]
$a$	Maior lado do painel	[m]
$a_{cg}$	Aceleração vertical	[m/s <sup>2</sup> ]
$B$	Boca	[m]
$b$	Menor lado do painel	[m]
$\beta_x$	Ângulo de <i>deadrise na seção transversal de estudo</i>	graus
$\beta_{cg}$	Ângulo de <i>deadrise no centro de gravidade</i>	
$C_B$	Coeficiente de bloco	
$D$	Pontal	[m]
$\Delta$	Deslocamento	[t]
$E$	Módulo de elasticidade do material	[MPa]
$f_g$	Fator de aceleração	
$g_0$	Aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$k_l$	Fator de distribuição longitudinal – pressão de slamming	
$L_{PP}$	Comprimento entre perpendiculares	[m]
$L_{LWL}$	Comprimento na linha d'água	[m]
$n$	Número de cascos	
$P_{sl}$	Pressão de slamming	kN
$\sigma_e$	Tensão equivalente	[MPa]
$\sigma_f$	Tensão de escoamento do material	[MPa]
$\sigma_n$	Tensão máxima de projeto	
$T$	Calado de projeto	[m]
$T_0$	Calado em $L_{PP}/2$ em condições normais de operação e na velocidade de serviço	[m]
$\nu$	Coeficiente de Poisson	
$V$	Velocidade máxima da embarcação	nós

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1. <b>Objetivos</b> .....	<b>16</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>18</b>
2.1. <b>Embarcações de alta velocidade</b> .....	<b>18</b>
2.1.1. <i>Introdução a dimensões e coeficientes de embarcações</i> .....	<i>20</i>
2.1.2. <i>Introdução a nomenclatura dos elementos estruturais em uma lancha</i> .....	<i>23</i>
2.2. <b>Projeto estrutural de embarcações</b> .....	<b>23</b>
2.3. <b>Slamming</b> .....	<b>27</b>
2.4. <b>Método dos elementos finitos</b> .....	<b>28</b>
2.5. <b>Análise CFD</b> .....	<b>28</b>
2.6. <b>Colisões elásticas e inelásticas</b> .....	<b>29</b>
2.6.1. <i>Colisão inelástica em uma embarcação</i> .....	<i>33</i>
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>35</b>
3.1. <b>Modelo de projeto</b> .....	<b>35</b>
3.1.1. <i>Modelagem CAD</i> .....	<i>36</i>
3.1.2. <i>Arranjo estrutural utilizado</i> .....	<i>37</i>
3.2. <b>Pressão de Slamming</b> .....	<b>40</b>
3.2.1. <i>Cálculo segundo a norma</i> .....	<i>41</i>
3.2.2. <i>Análise CFD</i> .....	<i>43</i>
3.3. <b>Caracterização do material</b> .....	<b>49</b>
3.4. <b>Cálculo da deflexão máxima do painel</b> .....	<b>50</b>
3.4.1. <i>Método Analítico</i> .....	<i>51</i>
3.5. <b>Análise paramétrica</b> .....	<b>53</b>
3.6. <b>Simulação computacional do projeto estrutural</b> .....	<b>55</b>
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>60</b>

<b>4.1. Análise da função de acoplamento .....</b>	<b>60</b>
<b>4.2. Simulação computacional do projeto estrutural .....</b>	<b>63</b>
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>73</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE A – Resultados das análises sem gap .....</b>	<b>79</b>
<b>APÊNDICE B – Resultados das análises com gap .....</b>	<b>83</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>85</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O oceano é uma das fontes mais promissoras de alimento, energia e diversão, e é por onde circula mais de 95% das exportações brasileiras. (GIUGLIANO, 2014).

A competitividade de um mundo globalizado reflete a crescente exigência de embarcações de maior qualidade e eficiência, cujos usos variam do transporte de carga ao lazer. Para a maioria dessas aplicações, a velocidade é um aspecto imprescindível, pois representa a eficiência da embarcação.

A busca por maiores velocidades promove o desenvolvimento de uma nova categoria, denominada embarcações de alta velocidade, comumente conhecidas como iates ou lanchas. Conforme descreve a International Maritime Organization (IMO, 2000), esta classe de embarcações é constituída por aquelas capazes de atingir velocidades maiores, do que 3,7 vezes o seu volume deslocado elevado a 0,1667.

Uma embarcação está sujeita, especialmente, à ação de dois campos de esforços, que agem em sentidos opostos. Um é constituído da distribuição do peso total (estrutura, sistemas e carga) a bordo, enquanto o segundo é resultado do empuxo exercido pela água onde flutua. Tais forças tendem a deformar a estrutura do casco. (FONSECA, 2002).

Estas tendências de deformação podem ser agravadas quando o navio arfa em mar forte devido ao choque excessivo a vante e a ré, sendo os esforços na popa acentuados ainda pela rotação do hélice. (LEWIS, 1988).

Como consequência, a estrutura de uma embarcação possui cavernas e longarinas para promover maior rigidez estrutural, dado que seu chapeamento é composto de chapas relativamente finas e flexíveis. (FONSECA, 2002).

Na Figura 1 é apresentado o arranjo estrutural típico de uma embarcação de alta velocidade, sendo esse composto por uma fina chapa reforçada por uma grelha ortogonal, cujos reforçadores longitudinais e cavernas são fixados e solidários as chapas do casco.

Figura 1 - Arranjo estrutural típico de uma embarcação de alta velocidade.



Fonte: Garcia (2010) apud Rayes (2013, p. 3).

A constante procura por produzir embarcações mais leves e resistentes tem frequentemente desafiado engenheiros no sentido de obter uma estrutura robusta, que maximize a resistência e minimize os custos de fabricação. (FONSECA, 2002).

Esta busca por novos paradigmas estruturais está aliada a velocidades superiores às usualmente praticadas por embarcações similares, o que provoca o surgimento de novos valores de esforços hidrodinâmicos contra o casco da embarcação. (AMARAL, 2016).

De acordo com Lewis (1988), slamming é um esforço dinâmico causado pela constante emersão e imersão da proa, causando o impacto do fundo do casco sobre a superfície do mar, conforme pode ser observado na figura abaixo.

Figura 2 - Slamming em uma embarcação.



Fonte: Adaptado de Bertram (2000, p.139).

Segundo Mansour (2008), os esforços produzidos pelo efeito de slamming podem causar vibrações transitórias na embarcação, que por sua vez podem gerar danos estruturais na parte inferior do casco, mesmo em áreas afastadas da região que concentra o impacto, o que pode incluir deflexões nas chapas e estruturas internas da embarcação, podendo ocasionar a falha do material.

Conforme Bertran (2000), normalmente as cargas induzidas por slamming são mais elevadas do que cargas estáticas geradas pelas mudanças no campo de pressão, ocasionadas pela passagem de onda.

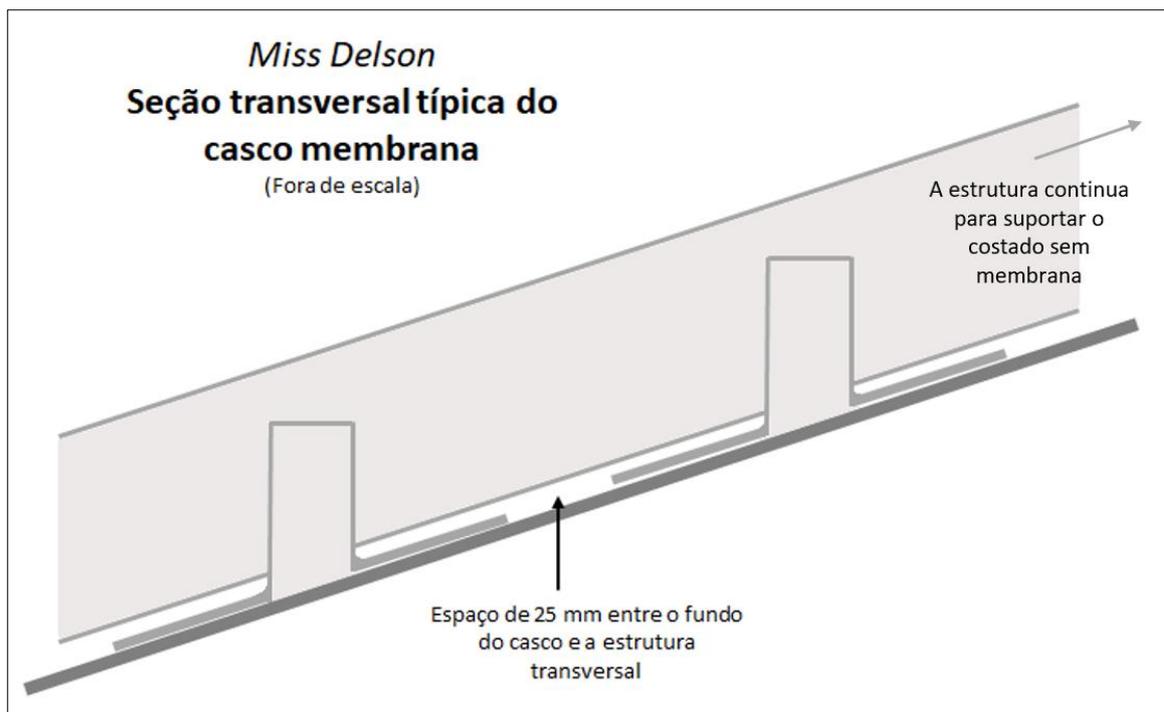
Tendo em vista que a capacidade do fundo do casco em absorver certo grau de impacto contribui para a sensação de conforto em condições severas, este trabalho propõe um novo arranjo estrutural para uma embarcação de alta velocidade que visa absorver as cargas e impactos mais elevados sobre o fundo da embarcação, de forma a evitar tal desconforto para quem está a bordo.

A proposta é o projeto de um arranjo estrutural de forma que as chapas tenham a quantidade de deflexão necessária para atender a rigidez da embarcação, sem peso ou espessura adicional (RAYBOULD, 2014), cabendo as unidades de chapeamento se deformarem entre reforçadores.

Sendo assim, os parâmetros que caracterizam o arranjo estrutural da embarcação de planeio a ser estudada serão determinados de acordo com a norma Rules for Classification of High Speed, Light Craft and Naval Surface Craft da Det Norske Veritas (DNV, 2012). E com o auxílio de uma planilha Excel, será analisado o comportamento da estrutura terciária da embarcação, de modo a obter uma estimativa de deflexão das chapas para estabelecer um patamar de distâncias entre o fundo e as cavernas a serem avaliadas.

Tal proposta de arranjo estrutural foi concebida pelo arquiteto naval Alec McCracken a partir de notas e idealizadas por Ken Raybould em 1970 (RAYBOULD, 2014). Na Figura 3 é representado o corte transversal do painel estrutural em questão.

Figura 3 - Corte transversal da nova proposta de arranjo estrutural.



Fonte: Adaptado de Raybould (2014, p. 23).

Como forma de avaliar a proposta e validar os resultados, será realizada uma análise computacional da estrutura proposta, permitindo investigar a resposta da estrutura utilizando o Método dos Elementos Finitos, que auxiliará na observação do estado de tensões a fim de entender o comportamento deste novo arranjo estrutural. Seguindo o mesmo preceito, serão avaliados os campos de pressão no fundo da embarcação por meio da aplicação da simulação numérica em Computational Fluid Dynamics (CFD), para fins de verificação do campo de pressões proposto originalmente pela Norma analisada.

### 1.1. Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento e a eficiência de um novo conceito de arranjo estrutural em uma embarcação de alta velocidade.

Para a realização deste objetivo geral, propõe-se os seguintes objetivos específicos:

- Entender o funcionamento da estrutura de uma embarcação de alta velocidade, com a avaliação das cargas e a topologia estrutural;

- Caracterizar a nova proposta de arranjo estrutural para uma embarcação de planeio, estabelecendo os principais parâmetros que descrevem este arranjo;
- Determinar os esforços solicitantes da embarcação utilizando a norma Rules for Classification of High Speed, Light Craft and Naval Surface Craft. (DNV, 2012);
- Determinar a deflexão das chapas do fundo da embarcação utilizando uma planilha Excel, de modo a obter estimativas iniciais para as distâncias a serem avaliadas entre o fundo e as cavernas;
- Realizar um estudo de caso empregando o novo conceito de arranjo estrutural em uma embarcação modelo;
- Estudar a orientação das tensões e avaliar o comportamento do fundo do casco utilizando o Método dos Elementos Finitos;
- Estudar os campos de pressão provenientes do efeito de slamming no fundo da embarcação utilizando o método CFD.

Este trabalho está estruturado em 5 capítulos. No primeiro é apresentada a introdução ao tema desta pesquisa. No segundo são mostrados os principais autores e os fundamentos teóricos que darão subsídios ao tema proposto. O capítulo 3 explora a proposta da metodologia, o capítulo 4 expõe os resultados obtidos na avaliação da metodologia e, por fim, apresenta-se a conclusão no capítulo 5.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Atualmente, Santa Catarina ocupa a liderança da indústria náutica no país e, apesar da recente crise neste mercado, algumas empresas do estado apresentaram um considerável crescimento no volume de vendas (MACIEL, 2016).

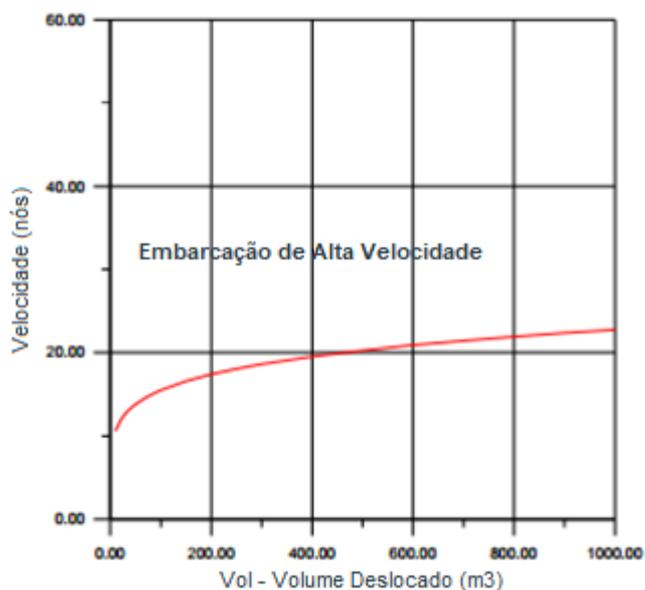
Estes fatos motivam pesquisas na área, tendo em vista que a maior vantagem competitiva representa o diferencial que a empresa possui frente a seus concorrentes para atender as necessidades do mercado (MACIEL, 2016). Sendo assim, o desenvolvimento deste trabalho apresenta grande potencial de aplicação na indústria náutica.

Como base teórica, serão apresentados os conceitos fundamentais sobre embarcações de alta velocidade, projeto estrutural, slamming, método dos elementos finitos, análise CFD, colisões. Além de uma breve introdução a dimensões e coeficientes de embarcações.

### **2.1. Embarcações de alta velocidade**

Conforme descreve a IMO (2000), embarcações de alta velocidade são aquelas capazes de atingir velocidades maiores, do que 3,7 vezes o seu volume deslocado elevado a 0,1667. Na Figura 4 apresenta-se o limite de velocidade para que uma embarcação seja considerada de alta velocidade.

Figura 4 - Limite de Velocidade para uma embarcação de alta velocidade.



Fonte: Traduzido de Moraes; Vasconcellos (2016, p.3).

Esta classe de embarcações possui uma série de aplicações que vão desde o transporte de passageiros até fins militares. Sendo que os materiais tipicamente empregados para a construção do casco são variados, destacando-se: aço naval, alumínio, madeira ou material compósito. (AMARAL, 2016).

As embarcações de alta velocidade, ou High Speed Craft (HSC), utilizam da sustentação hidrodinâmica para entrar em regime de planeio, o qual apresenta um equilíbrio dinâmico que varia a cada instante como consequência da variação do centro de gravidade, volume submerso e do ângulo de trim. A força de sustentação hidrodinâmica depende da velocidade da embarcação, sendo normal à quilha. (RIBEIRO, 2002).

Além disso, como mencionado anteriormente, uma embarcação sofre a ação de dois campos de esforços (peso total e empuxo), que atuam em sentidos opostos. Como consequência, isso tende a provocar deformações em sua estrutura, que podem ser agravadas devido ao choque excessivo a vante e a ré quando a embarcação navega em mar forte. (FONSECA, 2002).

Outra característica do casco planante é o constante afundamento e elevação da proa, ocasionando a colisão entre o fundo do casco e a superfície do mar. Este fenômeno dá origem a um esforço estrutural periódico sobre o casco denominado slamming. (LEWIS, 1988).

Em geral, as cargas produzidas pelo efeito de slamming tendem a ser superiores aos esforços causados pela constante variação no campo de pressão, promovidas pela passagem de onda. (BERTRAM, 2000)

Dessa forma, é importante que embarcação de alta velocidade atenda dois requisitos básicos: leveza e resistência. Desafiando o engenheiro na busca por novos arranjos estruturais que promovam maior rigidez e que reduzam o peso estrutural.

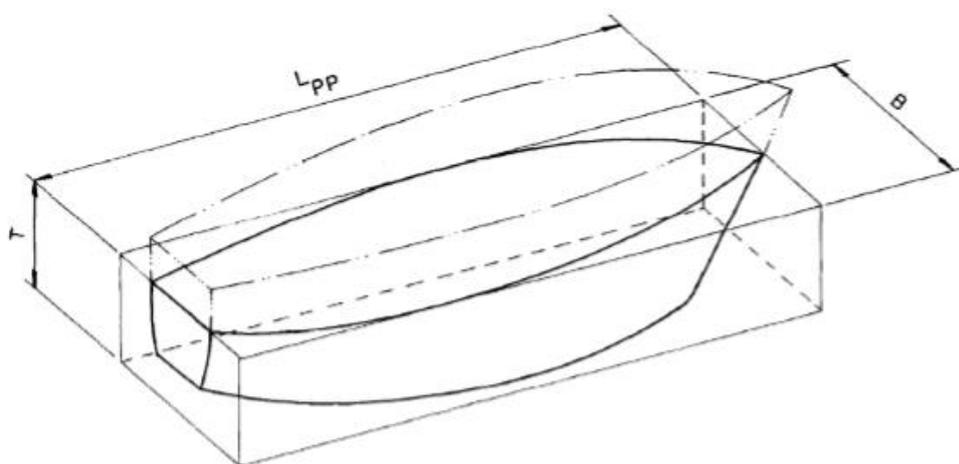
### *2.1.1. Introdução a dimensões e coeficientes de embarcações*

Nesta seção, serão apresentadas as dimensões, coeficientes e parâmetros de embarcações, de acordo com ABNT (1990), que serão utilizadas no desenvolvimento desse trabalho.

- Comprimento: principal dimensão longitudinal de uma embarcação.
- Boca (B): largura ou dimensão transversal de uma linha d'água, medida em uma seção qualquer do casco.
- Boca moldada: maior largura ou dimensão transversal de uma linha d'água descontando a espessura do casco.
- Calado (T): Distância vertical entre a linha de base, ou o ponto inferior de qualquer seção transversal do casco e o plano de flutuação considerado.
- Deslocamento ( $\Delta$ ): massa do volume de água deslocado pela embarcação em determinada condição de calado e trim.
- Perpendicular de ré: linha ortogonal ao plano de base, pertencente ao plano diametral, passando pela interseção do plano que contém a linha d'água de projeto com a linha de centro da madre do leme ou a linha de perfil de popa.
- Perpendicular de vante: linha ortogonal ao plano de base, pertencente ao plano diametral, passando pela interseção do plano que contém a linha d'água de projeto com a linha de perfil de proa.
- Comprimento entre perpendiculares (Lpp): comprimento entre a perpendicular de ré e a perpendicular de vante, medido no plano diametral, paralelamente ao plano de base.
- Pontal (D): Distância vertical entre o ponto inferior do casco da embarcação e o convés principal, na junção com o costado, na seção de meio-navio.

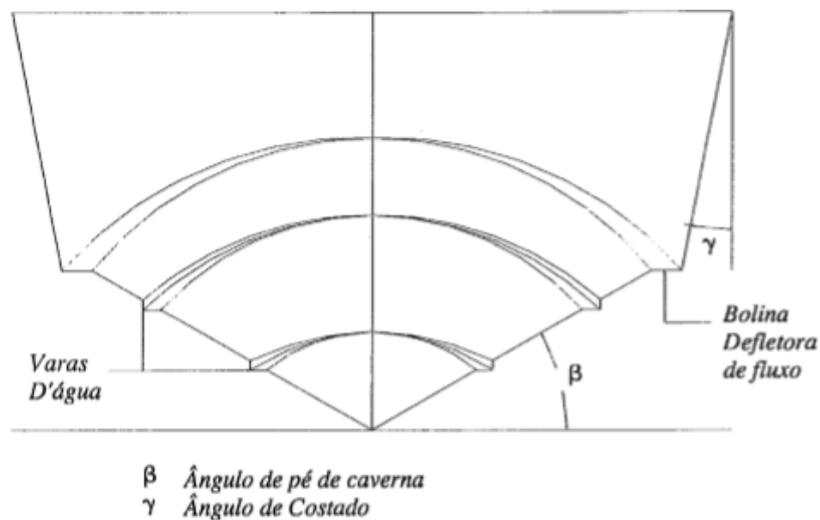
- Coeficiente de bloco ( $C_B$ ): Relação entre o volume de deslocamento moldado e o volume de um paralelepípedo formado pelo comprimento entre perpendiculares, pela boca moldada imersa e pelo calado moldado, na seção de meio-navio (Figura 5).
- Trim: Diferença entre os calados na perpendicular de vante e na perpendicular de ré de qualquer plano de flutuação, medidos em relação à linha de referência dos calados adotada.
- Plano diametral: Plano que intercepta longitudinalmente a embarcação e contém as perpendiculares de vante e de ré.
- Plano de base: plano perpendicular ao plano diametral que passa pelo ponto mais baixo da superfície moldada do casco entre as perpendiculares de vante e ré.
- Ângulo de deadrise ( $\beta$ ): ângulo entre o fundo do casco e o plano de base, medido na seção transversal (Figura 6).
- Heave (Afundamento): Movimento de translação da embarcação na direção vertical, ou seja, ao longo do eixo z (Figura 7).
- Pitch (Arfagem): Movimento de rotação na direção transversal da embarcação, ou seja, em torno do eixo y (Figura 7).

Figura 5 - Representação do comprimento entre perpendiculares, boca e calado.



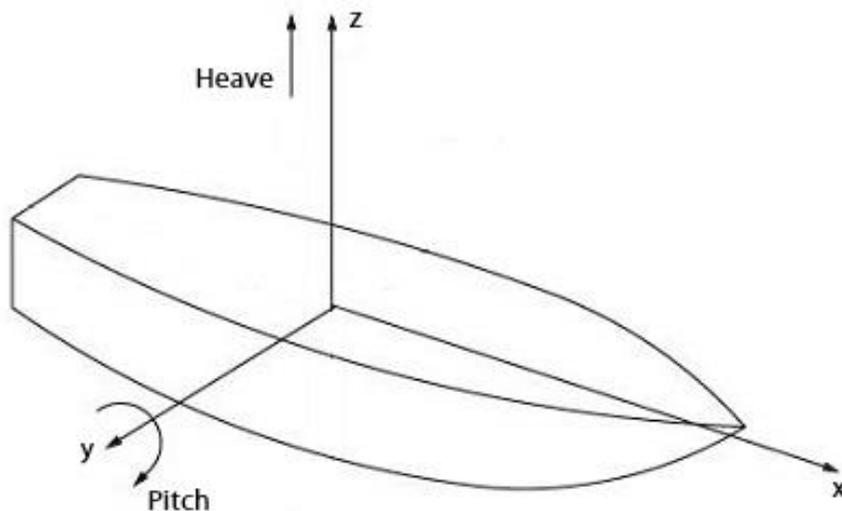
Fonte: ANBT (1989, p.7).

Figura 6 - Representação do ângulo de deadrise.



Fonte: Ribeiro (2002, p. 12).

Figura 7 - Representação do movimento de pitch e heave.



Fonte: O Autor (2017).

Vale ressaltar, que para embarcações de alta velocidade existem dois tipos de coeficientes e dimensões: aqueles tomados com a embarcação em repouso (estático) e os que dependem da velocidade da lanca. Visto que, com o aumento da velocidade haverá variação do plano de flutuação e como consequência irão variar os parâmetros dependentes do mesmo.

### 2.1.2. *Introdução a nomenclatura dos elementos estruturais em uma lancha*

O arranjo estrutural de uma embarcação é composto basicamente de chapas reforçadas por perfis distribuídos longitudinal e transversalmente de modo a promover a rigidez estrutural adequada. (FONSECA, 2002).

A seguir serão definidos os elementos do arranjo estrutural de uma lancha abordados neste trabalho, de acordo com a DNV (2012).

- Cavernas: peças curvas fixadas na quilha e em direção perpendicular à mesma, cuja função é dar forma ao casco e sustentar o chapeamento externo, absorvendo as cargas por ele transmitida.
- Anteparas: chapas verticais que subdividem os compartimentos internos do casco. Além disso, tem como função dar forma ao casco e aumentar a resistência do mesmo.
- Perfil leve: reforçadores que limitam as dimensões das unidades de chapeamento e as enrijecem. São eles: cavernas, vaus, longitudinais, dentre outros.
- Perfil pesado: servem de apoio aos perfis leves recebendo a carga que lhes foi transmitida pelas unidades de chapeamento. Ex.: sicordas, hastilhas, quilhas, longarinas, escoas, etc.
- Unidades de chapeamento: porção de chapa limitada por dois perfis adjacentes na direção longitudinal e outros dois na direção transversal.
- Painel: em geral, consiste de uma estrutura formada por chapeamento, perfis leves e perfis pesados. Contém pelo menos duas unidades de chapeamento.
- Grelha: conjunto de reforçadores que se interceptam.

## 2.2. **Projeto estrutural de embarcações**

O dimensionamento de uma estrutura é o responsável pela segurança da construção, evitando não somente o colapso como também patologias que podem ocorrer em uma estrutura. (ERGUEL, 2016). Para tanto, uma construção deve apresentar um conjunto de partes resistentes que atendam as especificações de projeto e os requisitos impostos pela norma.

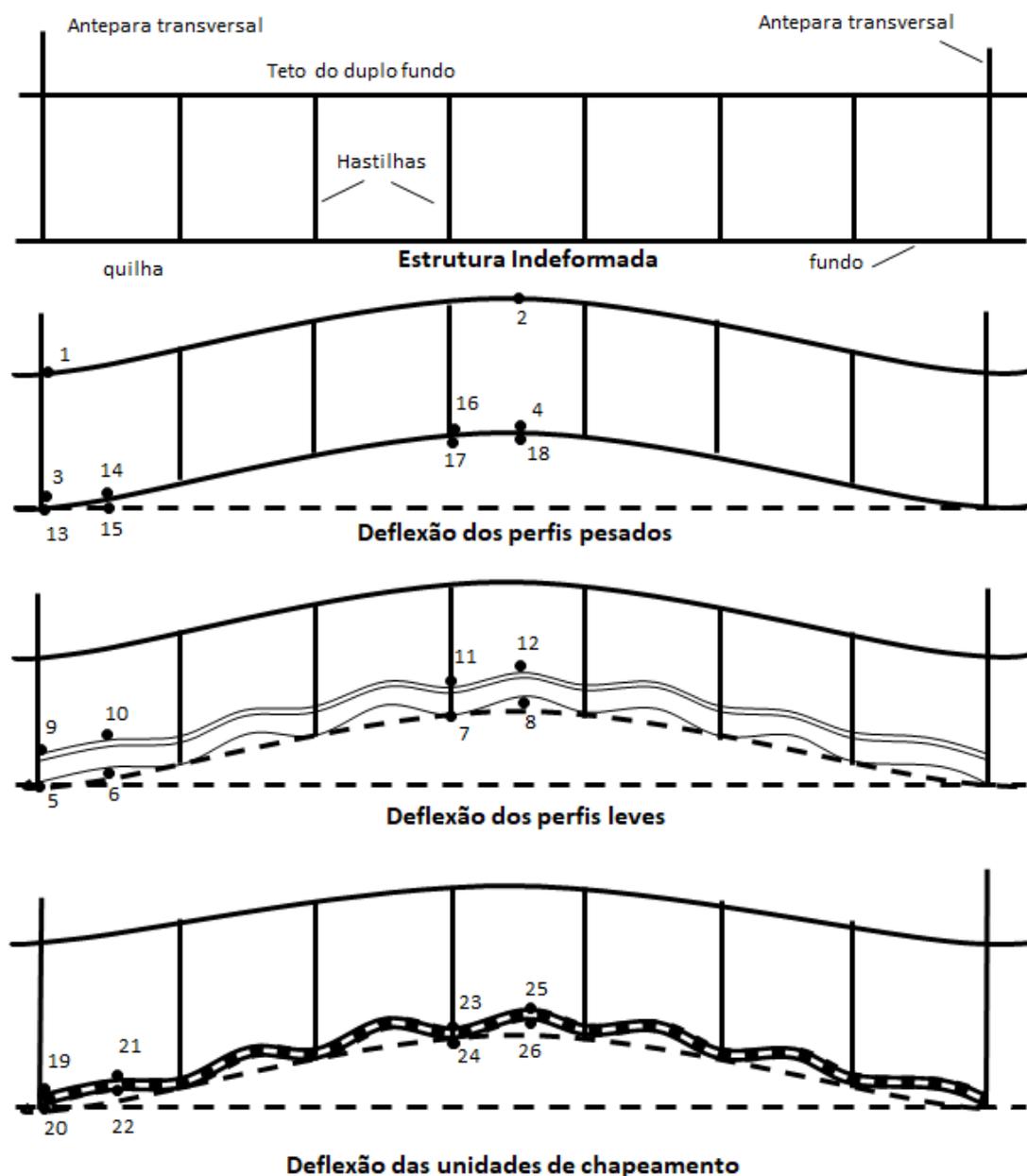
A estrutura de uma embarcação é composta de chapas relativamente finas e flexíveis, sustentada por meio de perfis distribuídos longitudinal e transversalmente ao longo da embarcação de forma a promover maior rigidez estrutural. (FONSECA, 2002) e (CARDOSO, 1994).

Sendo assim, o projeto estrutural de uma embarcação consiste na determinação da espessura das chapas bem como no dimensionamento e posicionamento dos reforçadores longitudinais e transversais, que compõem o arranjo estrutural da embarcação. Cabe ao projetista definir adequadamente a orientação de cada tipo de reforço nas diversas regiões da estrutura, almejando constantemente a eficiência estrutural, ou seja, o mínimo peso para melhor resistência. (SOUZA, 2011).

A análise estrutural de uma embarcação pode ser desacoplada em três grandes regiões: estrutura primária, secundária e terciária. Esta distinção pode ser realizada devido a diferença no raio de curvatura da deformação dos diferentes elementos que compõem o arranjo estrutural, conforme pode ser observado na Figura 8. Os perfis pesados deformam-se entre duas anteparas, enquanto que os perfis leves defletem entre duas cavernas e, por fim, as chapas do fundo deformam-se entre perfis leves adjacentes. Sendo assim, a análise estrutural pode ser desacoplada nas seguintes regiões:

- Estrutura primária: a estrutura da embarcação é comparada com uma viga, a qual se deforma na presença dos esforços devido às cargas e flutuação. (SOUZA, 2011);
- Estrutura secundária: grelha formada por perfis leves e pesados, dispostos longitudinalmente e transversalmente. Destacando-se: quilha, cavernas, anteparas e longitudinais leves;
- Estrutura terciária: formada pelas unidades de chapeamento, isto é, chapas normalmente retangulares limitadas por 4 reforçadores adjacentes quaisquer. (CARDOSO, 1994).

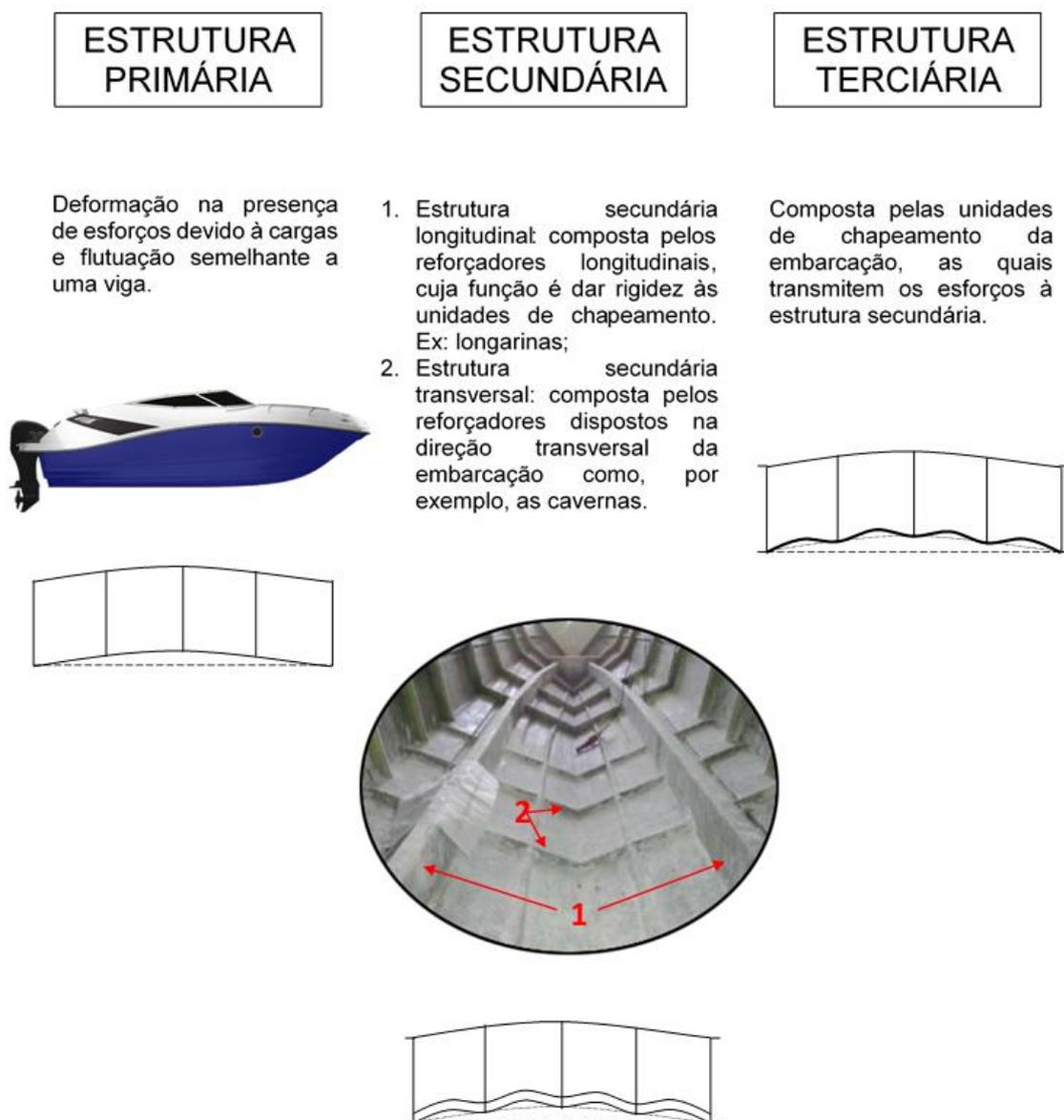
Figura 8 - Representação do raio de curvatura em cada região da embarcação.



Fonte: Adaptado de Tancredi (2004).

É importante destacar que, no caso de pequenas embarcações, como as lanchas, a tensão global (primária) apresenta resultados consideravelmente menores que as tensões locais (secundária e terciária), caracterizando menos de 1% desses valores. (AMARAL, 2016). Na figura a seguir, pode-se observar um fluxograma da divisão na análise estrutural, com suas respectivas definições e exemplos.

Figura 9 – Fluxograma do desacoplamento da análise estrutural.



Fonte: O Autor (2017).

Tais elementos estruturais são dimensionados de modo a suportar os esforços atuantes na embarcação, sejam estes, cargas estáticas ou dinâmicas. Além disso, o projeto deve ser realizado de acordo com a norma de uma Sociedade Classificadora, que conforme a International Association of Classification Societies (IACS, 2011), são entidades que oferecem serviços de classificação, normalização e

assistência para a indústria marítima e órgãos reguladores no que diz respeito à segurança marítima e à prevenção da poluição.

No presente trabalho, utilizou-se a norma Rules for Classification of High Speed, Light Craft and Naval Surface Craft (DNV, 2012), na qual apresenta um capítulo para o dimensionamento estrutural e a determinação dos esforços conforme o material a ser empregado na construção do casco.

Dentre os parâmetros de entrada para o projeto, destacam-se a distância entre os reforçadores longitudinais e transversais que devem ser determinados pelo projetista. Sendo que a seleção inadequada desses valores pode prejudicar ou até mesmo invalidar o projeto da embarcação.

O projeto estrutural de uma embarcação abrange ainda a análise de falha do arranjo estrutural proposto bem como a avaliação dos esforços mecânicos e eventuais vibrações induzidas pelos motores e/ou propulsores instalados na embarcação. (APE, 2016). Nesse trabalho, utilizou-se o critério de falha de tensão segundo a DNV (2012). A análise foi realizada por meio do Método dos Elementos Finitos utilizando como ferramenta o programa de simulação computacional Hyperworks.

### **2.3. Slamming**

Uma embarcação está sujeita, essencialmente, a esforços estáticos, que compreendem o peso e a flutuação do navio em águas calmas e esforços dinâmicos causados pelo movimento induzido pelas ondas ou pela própria embarcação. (LEWIS, 1988). Dentre os esforços dinâmicos atuando na embarcação, destacam-se as cargas induzidas pelo efeito de slamming.

De acordo com Santos (2011), slamming consiste nas forças de impacto causadas pela reentrada da embarcação no mar, podendo causar vibrações transitórias na embarcação, que por sua vez podem gerar danos na parte inferior do casco. (MANSOUR, 2008). Tais podem levar à fadiga das estruturas do navio, resultando na falha prematura das regiões mais susceptíveis à fadiga. (HERMUNDSTAD, 2007).

## 2.4. Método dos elementos finitos

A busca constante pela eficiência, aliado ao desenvolvimento da tecnologia, tem favorecido a utilização de ferramentas computacionais, o que possibilita a aplicação de novas concepções de embarcações através da confiabilidade que estes instrumentos conferem ao projeto.

Atualmente, a técnica mais aplicada para análise de estruturas complexas é a que utiliza elementos finitos, a qual possibilita a obtenção de várias informações sobre o comportamento de uma estrutura, tais como o campo de tensões, deformações, frequências naturais de vibração, entre outros.

Neste método, o modelo discretizado é obtido por meio da subdivisão do domínio da estrutura em um número finito de elementos conectados entre si por nós que representam de maneira aproximada o domínio contínuo. Esta subdivisão, é intitulada Malha de Elementos Finitos e as informações que representam a solução são valores de deslocamentos nos nós da malha. (MARTHA, 2016).

Após a geração da malha utilizando formas que melhor representam o fenômeno e a geometria a serem estudadas, se faz necessário informar as características do material, as condições de contorno e o carregamento ao qual o modelo está submetido.

A progressiva utilização deste método numérico na indústria apresenta-se como importante ferramenta na análise de estruturas complexas, podendo ser aplicado além dos problemas clássicos de mecânica estrutural elástico-linear, mas também em problemas não lineares, mecânica dos fluídos, transmissão de calor, dentre outros. (WESTIN; RIBEIRO, 2009).

Uma das vantagens consiste na minimização de custos com modelos reais e perdas na produção, uma vez que é possível obter grande conhecimento sobre o produto apenas com a análise computacional. Além disso, esta ferramenta apresenta grande precisão na solução de problemas com geometrias complexas, pois se compatibiliza melhor ao contorno da geometria sob análise. (MARZO, 2010).

## 2.5. Análise CFD

A dinâmica dos fluídos computacional (Computational Fluid Dynamics – CFD) consiste em utilizar métodos computacionais para simular a passagem do fluído

(líquido ou gás) através ou em torno de um objeto. Esta análise quantitativa pode ser muito complexa, incluindo o cálculo de transferência de calor, transferência de massa, aspectos mecânicos, tensões e deslocamento de sólidos imersos ou circundantes, dentre outros. (IST SISTEMAS, 2016).

O valor de qualquer produto pode ser descrito em função dos aspectos de tempo, custo e qualidade. Isso posto, uma análise CFD pode economizar longas iterações em testes com modelos, reduzindo o tempo total de desenvolvimento. Assim, essa técnica vem se mostrando de extrema importância ao explorar segmentos de mercados para embarcações não convencionais, nos quais o projeto não pode ser baseado na experiência. (BERTRAM, 2000).

A premissa do método CFD consiste em abordar um problema real e contínuo e discretizar seu domínio em elementos discretos. A simulação é baseada nos princípios de conservação de energia, massa e quantidade de movimento. (IERVOLINO, 2015).

As fases típicas da análise CFD são divididas em:

- Pré-processamento: geração e tratamento da geometria, discretização do domínio contínuo e determinação das condições de contorno. (IERVOLINO, 2015);
- Processamento: simulação computacional;
- Pós-processamento: análise, interpolação e interpretação dos resultados, e documentação. (IERVOLINO, 2015).

A simulação numérica envolvendo CFD apresenta como principais vantagens: baixo custo quando comparada a séries sistemáticas ou testes com modelos físicos, redução do tempo total de projeto e confiabilidade dos resultados.

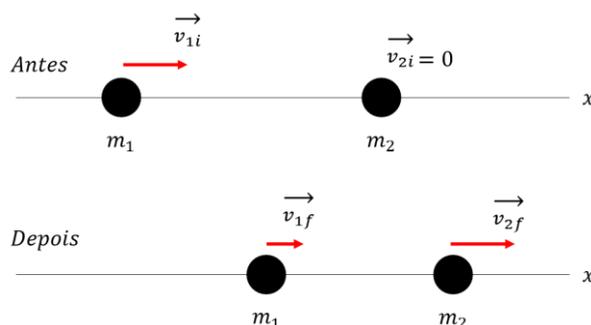
## **2.6. Colisões elásticas e inelásticas**

Na física básica, colisão pode ser definida como sendo a ação de uma força de curta duração e alto módulo em um corpo, alterando bruscamente seu momento. Neste sentido, pode-se obter as velocidades finais dos corpos através das leis de conservação da energia e do momento linear para descrever de forma simples uma colisão entre dois corpos. (HALLIDAY, 2009).

O estudo das colisões pode ser dividido em dois grupos: as colisões elásticas e as inelásticas. O primeiro, corresponde a um fenômeno em que não há nenhuma perda, tanto de energia cinética quanto de momento linear do sistema como resultado

da colisão. (SANTOPIETRO, 2017). Na figura abaixo pode-se observar a representação de movimento após a colisão elástica entre duas esferas.

Figura 10 - Representação de uma colisão elástica entre duas esferas.



Fonte: Adaptado de Halliday (2009).

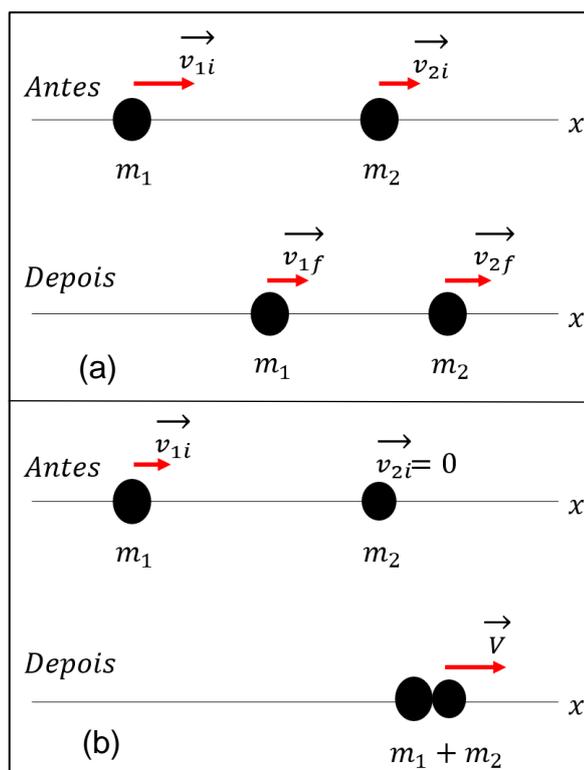
Já as colisões inelásticas tem como principal característica o fato do momento linear do sistema se conservar, mas a energia cinética não, ou seja, após a colisão os corpos seguem com a mesma velocidade. (HALLIDAY, 2009). Segundo Teixeira (2017), isso ocorre pois parte da energia cinética foi transformada, por exemplo, em deformação do material.

As colisões inelásticas podem ser classificadas ainda em:

- Perfeitamente inelásticas: após a colisão, há perda máxima de energia cinética e os objetos seguem unidos como se fossem um único corpo. (REIS; NETO, 2002);
- Parcialmente inelásticas: após o fenomeno colisional, ocorre conservação de apenas uma parte da energia cinética, as partículas separam-se, e a velocidade relativa final é menor do que a inicial. Esta classe de colisão constituem a maioria das colisões existentes na natureza. (TEIXEIRA, 2017).

Na Figura 11 pode ser observada a representação das duas formas de colisão descritas acima.

Figura 11 - (a) Colisão parcialmente inelástica entre duas esferas; (b) Colisão perfeitamente inelástica entre duas esferas.



Fonte: Adaptado de Halliday (2009).

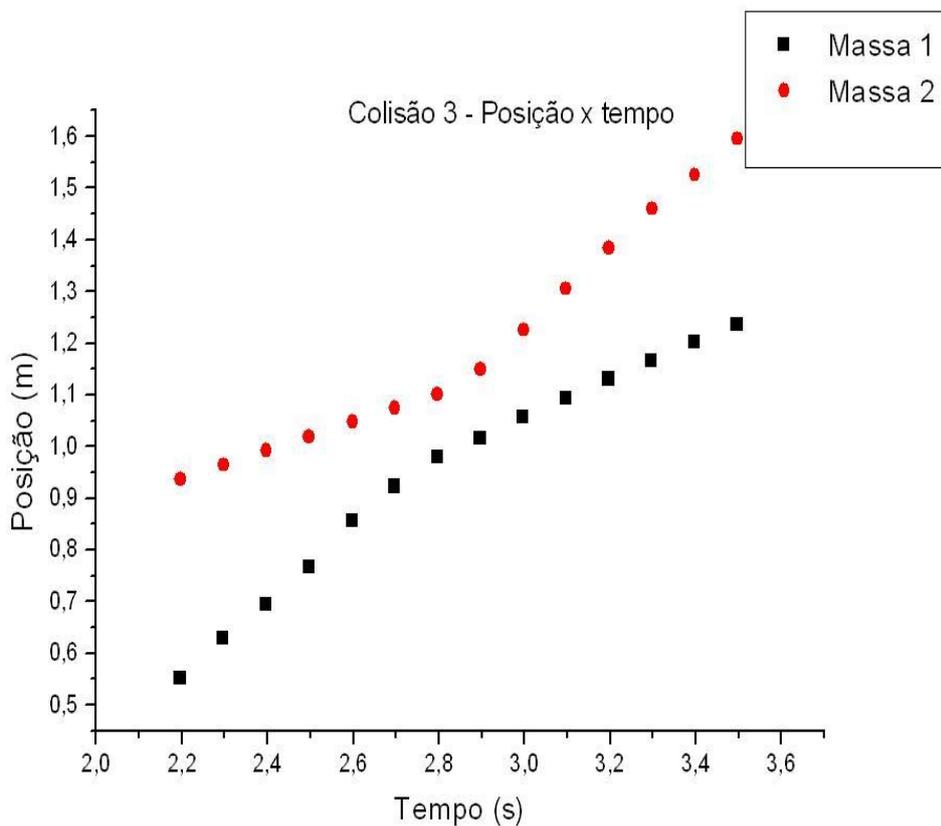
A teoria da elasticidade permite entender o fenômeno de colisões através do estudo da deformação dos corpos que colidem. A análise da colisão entre duas esferas gera resultados analíticos fáceis de entender, através dos quais é possível estender o conceito às colisões em placas ou outras formas. (VIANA; FERNANDES, 2003).

Quando duas esferas sofrem uma colisão elástica, estas irão necessariamente recuar em uma certa distância. Nesse caso, a mudança na quantidade de movimento conforme as esferas se afastam é maior do que em uma colisão inelástica equivalente, e como consequência, nenhuma energia é dissipada na deformação do objeto. Caso a colisão seja inelástica, as esferas sofrem uma determinada deformação após a colisão, que dependerá do coeficiente de elasticidade do material; e ricochetearão a uma distância menor que no caso anterior, ou seja, elas comprimem-se mutuamente e se deformam. (SANTOPIETRO, 2017).

Gonçalves (2010) realizou um estudo das diferentes formas de colisões para descrever este fenômeno entre dois corpos em movimento unidimensional, no qual

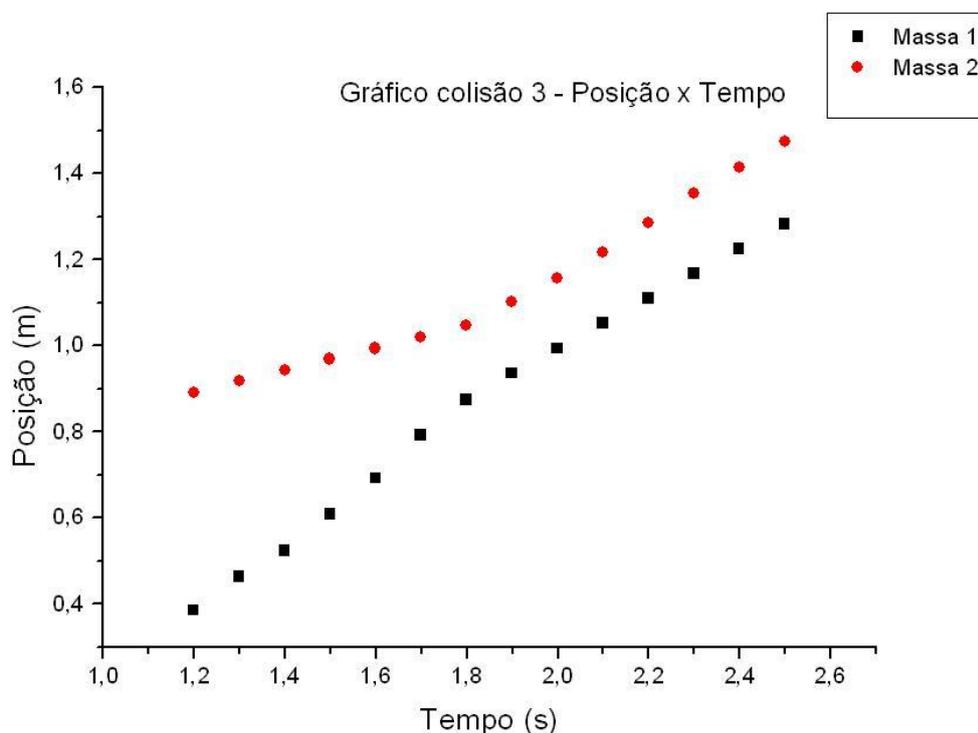
foram simulados diversos casos de colisão entre dois carrinhos em um trilho de ar. Nas figuras a seguir pode-se visualizar alguns resultados obtidos pela autora.

Figura 12 – Representação da colisão elástica entre dois carrinhos em um trilho de ar.



Fonte: Gonçalves (2010).

Figura 13 – Representação da colisão inelástica entre dois carrinhos em um trilho de ar.



Fonte: Gonçalves (2010).

Através dos gráficos expostos acima, pode-se observar o fenômeno descrito anteriormente: o afastamento dos objetos após uma colisão inelástica é menor do que o observado na colisão elástica, para as mesmas condições de análise. Tal redução no afastamento entre as peças, pode ser explicado através da diminuição da velocidade causada pela absorção de energia durante o impacto.

### 2.6.1. Colisão inelástica em uma embarcação

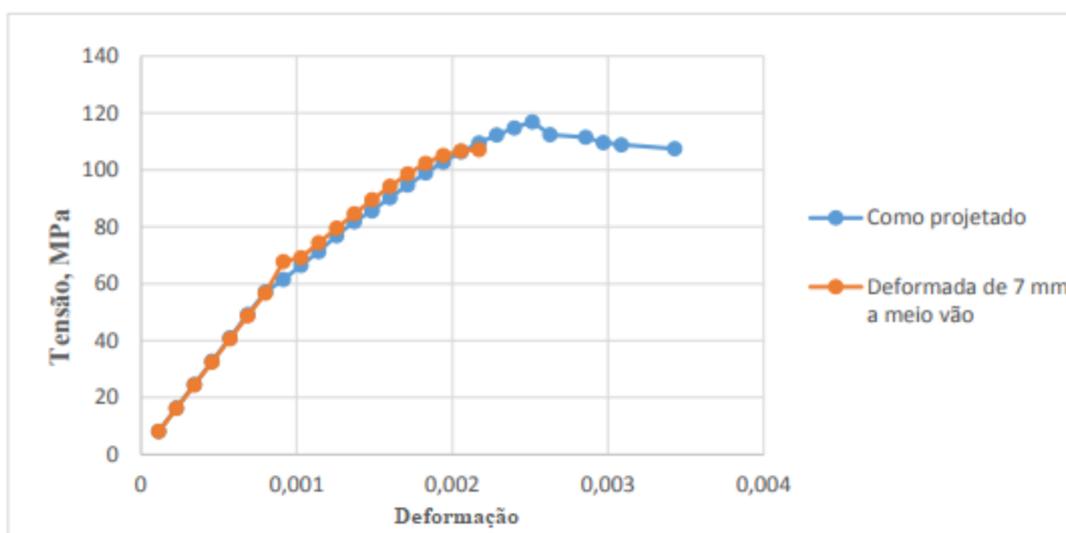
A colisão do casco de uma embarcação contra a superfície da água durante o slamming pode ser descrito de maneira análoga a colisão entre esferas, resultando na deformação das unidades de chapeamento da lancha.

Conforme Elarbi (2015), após uma colisão a rigidez da placa diminui devido a ocorrência da deflexão, sendo este processo caracterizado como uma colisão inelástica. De acordo com o estudo realizado pelo autor, um painel reforçado

longitudinalmente não apresenta variação significativa de tensão em uma colisão mesmo já possuindo certa deformação.

Conforme o gráfico apresentado na Figura 14, após a colisão de um painel inicialmente deformado há uma redução de aproximadamente 65% na deformação, entretanto não há redução expressiva da tensão, ou seja, a deformação inicial presente no painel não parece influenciar significativamente na resistência estrutural da estrutura. (ELARBI, 2015)

Figura 14 – Curva de Tensão por Deformação para um painel reforçado longitudinalmente.



Fonte: Adaptado de Elarbi (2015).

Isso posto, conforme a teoria de absorção de energia apresentada anteriormente, quando o fundo da embarcação colidir contra a superfície da água - assumindo que a mesma é rígida; e este impacto causar absorção de energia, então as chapas “voltarão” com velocidade relativa menor.

### **3. METODOLOGIA**

Como mencionado anteriormente, o presente trabalho propõe o desenvolvimento e análise do comportamento e da eficiência de um novo conceito de arranjo estrutural proposto para embarcações de alta velocidade.

O desenvolvimento proposto foi aplicado a um caso conhecido, cuja análise foi detalhada em Amaral (2016).

Para este fim, os parâmetros que caracterizam o arranjo estrutural de uma embarcação de planeio e os esforços solicitantes, como a pressão dinâmica e a pressão estática, foram determinados de acordo com a norma DNV (2012).

As etapas seguintes envolveram a análise computacional utilizando os programas comerciais Hyperworks e Star CCM+®, para prever o comportamento desta nova proposta de arranjo estrutural. Em seguida, com auxílio de uma planilha Excel foi calculada a pressão de slamming para fins de comparação com os resultados gerados pela análise CFD. Neste capítulo é apresentada e discutida a metodologia utilizada no desenvolvimento proposto.

#### **3.1. Modelo de projeto**

Para este trabalho foi utilizado como base o modelo desenvolvido por Amaral (2016), que serviu de estudo de caso para verificação do novo conceito de arranjo estrutural proposto para embarcações de alta velocidade. As dimensões e características da embarcação estudada podem ser observadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Dimensões e características da embarcação.

<b>Características da embarcação</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
Comprimento entre perpendiculares [m]	L <sub>PP</sub>	12,40
Comprimento na linha d'água [m]	L <sub>LWL</sub>	11,75
Boca [m]	B	3,40
Calado de projeto [m]	T	0,85
Deslocamento [t]	$\Delta$	15,50
Coeficiente de bloco	C <sub>B</sub>	0,48
Velocidade Máxima [nós]	V	31,00
Ângulo de deadrise no LCG [graus]	$\beta$	19,30

Fonte: Adaptado de Amaral (2016).

Tabela 2 - Variação geométrica ao longo do comprimento.

<b>Posição Longitudinal</b>	<b>Ângulo de deadrise</b>	<b>Altura do Chine*</b>	<b>Boca</b>
<b>(%)</b>	<b>[graus]</b>	<b>[m]</b>	<b>[m]</b>
0,00L	11,54	0,39	3,40
0,10L	12,60	0,38	3,40
0,20L	13,67	0,37	3,40
0,30L	14,73	0,35	3,40
0,40L	15,85	0,32	3,40
0,50L	18,47	0,28	3,40
0,60L	22,92	0,21	3,00
0,70L	28,80	0,13	2,50
0,80L	30,00	0,02	2,50
0,90L	30,00	-0,10	2,50
1,00L	30,00	-0,27	2,40

\* Altura do chine à linha d'água (fora d'água - negativo)

Fonte: Adaptado de Amaral (2016).

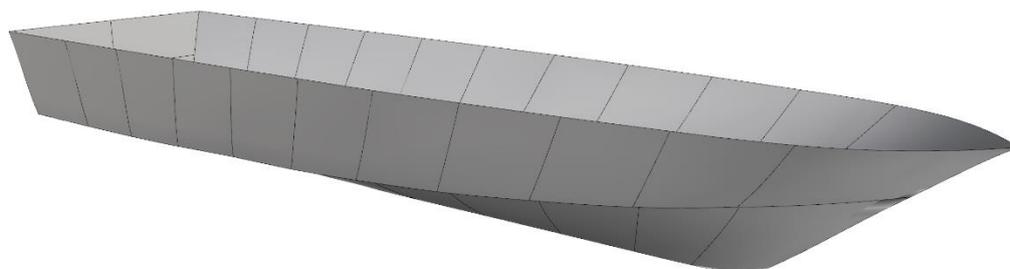
### 3.1.1. Modelagem CAD

Para analisar o arranjo estrutural proposto, se faz necessário modelar o casco de acordo com as dimensões descritas nas Tabelas 1 e 2. Tal modelagem foi realizada utilizando o programa Rhinoceros®, e o resultado final é apresentado na Figura 15.

A seguir, o arranjo estrutural foi acrescentado ao casco com auxílio do programa Solidworks®. O arquivo CAD contém informações sobre o casco descrito em termos de superfície (sem volume), este foi exportado em formato IGES para

posteriormente se utilizado na análise em elementos finitos e na abordagem CFD, descritas na fundamentação teórica.

Figura 15 - Casco modelado no Rhinoceros.



Fonte: O Autor (2017).

A modificação do arranjo estrutural, visando gerar as diferentes configurações analisadas neste trabalho, foi feita diretamente no programa Hyperworks, no qual modificou-se a malha para afastar as cavernas das chapas do fundo da embarcação, tal como proposto.

### 3.1.2. Arranjo estrutural utilizado

O modelo estrutural desenvolvido respeita a norma DNV (2012), em especial a seção Design Loads (Pt. 3, Ch. 1), a qual apresenta formulações para calcular as pressões ao longo do comprimento do casco.

O arranjo estrutural utilizado nas análises foi desenvolvido por Amaral (2016), a qual propôs um procedimento automatizado para a obtenção de um arranjo estrutural otimizado para embarcações de alta velocidade.

O arranjo proposto para a embarcação descrita e modelada na seção anterior, possui 2 reforçadores longitudinais posicionados a 1m de cada bordo, 3 cavernas e 3 anteparas, sendo duas anteparas estanques a 1,5m e 7,1m em relação à popa e uma antepara de colisão a 11,78m da popa.

O comprimento e a espessura de cada porção de chapa do fundo podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 – Características dos painéis.

<b>Fundo</b>	<b>Comprimento [m]</b>	<b>Espessura [mm]</b>
1	0,80	9,35
2	0,70	9,23
3	2,00	11,32
4	3,60	12,82
5	1,60	12,60
6	3,10	8,30
7	1,04	7,61

Fonte: Adaptado de Amaral (2016).

É importante destacar que o arranjo estrutural proposto por Amaral (2016), foi desenvolvido em material compósito. Entretanto, como forma de reduzir o custo computacional das análises, utilizou-se alumínio como material constituinte da embarcação estudada. Tal alteração não influencia de maneira significativa a rigidez da embarcação, uma vez que ambos materiais possuem propriedades mecânicas similares em geral; apenas o peso total da lancha será afetado, o qual não será considerado nesta pesquisa.

A espessura utilizada nas anteparas foi de 25mm, sendo esta obtida após informações disponibilizadas por estaleiros por meio de questionário e pesquisas na literatura.

Conforme o arranjo obtido por Amaral (2016) o costado possui 3mm de espessura, as longarinas e cavernas possuem 20mm. e suas dimensões estão apresentadas nas tabelas a seguir.

Tabela 4 – Dimensões das longarinas.

<b>Fundo</b>	<b>Altura [m]</b>	<b>Largura interna [m]</b>
1	0,130	0,078
2	0,130	0,091
3	0,140	0,084
4	0,160	0,096
5	0,160	0,096
6	0,110	0,077
7	0,120	0,096

Fonte: Adaptado de Amaral (2016).

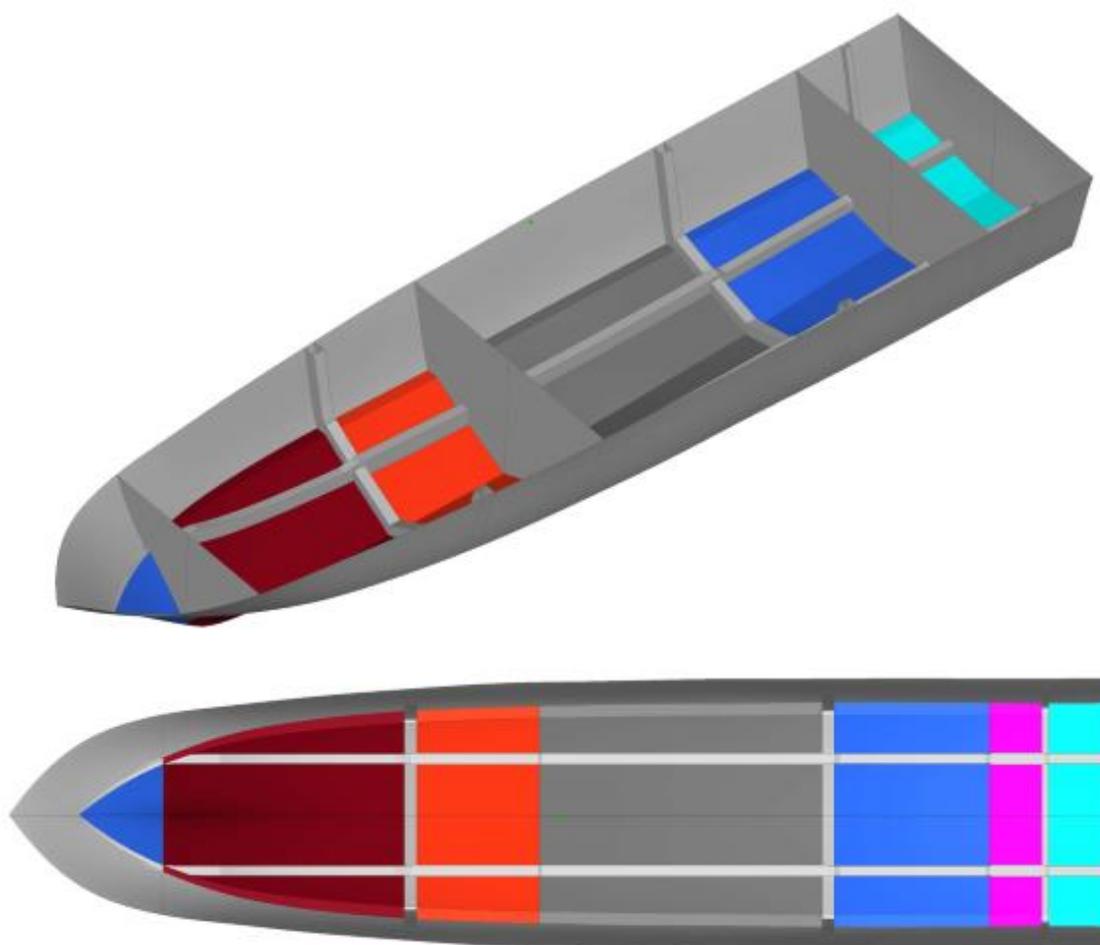
Tabela 5 – Dimensões das cavernas.

<b>Caverna</b>	<b>Altura [m]</b>	<b>Largura interna [m]</b>
1	0,070	0,042
2	0,150	0,105
3	0,160	0,112

Fonte: Adaptado de Amaral (2016).

A geometria do arranjo utilizado é mostrada na Figura 16, onde cada painel descrito entre anteparas (e/ou cavernas), está representado por uma cor distinta.

Figura 16 – Arranjo estrutural.



Fonte: O Autor (2017).

### 3.2. Pressão de Slamming

Conforme mencionado anteriormente os esforços produzidos pelo efeito de slamming podem causar vibrações transitórias na embarcação, podendo ocasionar danos estruturais na parte inferior do casco, o que inclui deflexões nas chapas e estruturas internas da embarcação. Com base nisso se faz necessário uma análise minuciosa destes esforços, uma vez que podem causar falha do material na região do fundo da embarcação.

A interpretação dos resultados dar-se-á através da comparação dos resultados gerados pela simulação numérica utilizando CFD com aqueles obtidos

através do cálculo sugerido pela norma, os resultados serão analisados e discutidos buscando uma melhor compreensão do fenômeno de slamming.

### 3.2.1. Cálculo segundo a norma

Para estimativa dos esforços utilizou-se a seção Design Loads da norma Rules for Classification of High Speed, Light Craft and Naval Surface Craft da Det Norske Veritas (DNV, 2012). De modo a obter uma aproximação da pressão de slamming atuando no fundo da embarcação, utilizou-se a equação do item C200, seção 2 (Pt. 3, Ch. 1).

$$P_{sl} = 1,3k_l \left( \frac{\Delta}{nA} \right)^{0,3} T_o^{0,7} \frac{50 - \beta_x}{50 - \beta_{cg}} a_{cg} \quad \left[ \frac{kN}{m^2} \right] \quad (1)$$

Onde  $k_l$  é o fator de distribuição longitudinal da pressão de slamming (obtido por meio da Figura A.1 do ANEXO A),  $n$  é o número de cascos,  $A$  é a área de projeto do elemento em  $m^2$ ,  $T_o$  é o calado a  $L_{pp}/2$  em condições normais de operação e na velocidade de serviço em  $m$ , e  $\beta_x$  é o ângulo de deadrise na seção transversal analisada. A aceleração vertical de projeto no centro de gravidade,  $a_{cg}$ , é obtida de acordo com o item B201 da seção 2 do capítulo 1 da norma, cujo valor deve ser maior ou igual a:

$$a_{cg} = \frac{V}{\sqrt{L_{PP}}} \frac{3,2}{L_{PP}^{0,76}} f_g g_0 \quad \left[ \frac{m}{s^2} \right] \quad (2)$$

Onde  $V$  é a velocidade máxima de operação em nós,  $L_{PP}$  é o comprimento entre perpendiculares em  $m$ ,  $f_g$  é um fator de aceleração que depende do tipo de embarcação e sua restrição de serviço,  $g_0$  é a aceleração da gravidade em  $m/s^2$ .

Embora a norma permita estimar o módulo da pressão em uma chapa do casco, essa não define como aplicar a pressão de slamming ao casco para que se realize a simulação numérica.

Segundo Amaral (2016), o modelo de carregamento considerando valores de pressão constantes em cada um dos painéis resulta em degraus entre cada dois painéis, o que não representam adequadamente a realidade. A autora então realizou

um estudo sobre o carregamento aplicado ao fundo do casco, no qual encontrou uma função polinomial que representa de maneira satisfatória a variação da pressão ao longo do comprimento, considerando os valores apresentados na Tabela 6, os quais foram calculados pela norma.

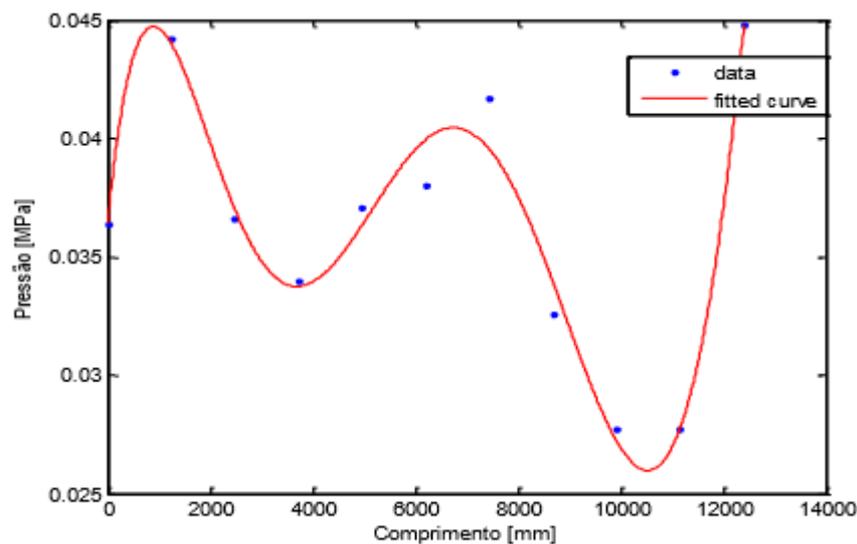
Tabela 6 – Pressão de slamming em cada chapa do fundo.

Chapa	Pressão [MPa]
1	0,03878
2	0,04495
3	0,03776
4	0,04761
5	0,04852
6	0,03602
7	0,04485

Fonte: Adaptado de Amaral (2016).

Na Figura 17 pode-se observar os valores de pressão de acordo com a norma e a curva polinomial de grau 7 apresentada por Amaral (2016).

Figura 17 – Pressão de slamming ao longo do comprimento do casco.



Fonte: Amaral (2016).

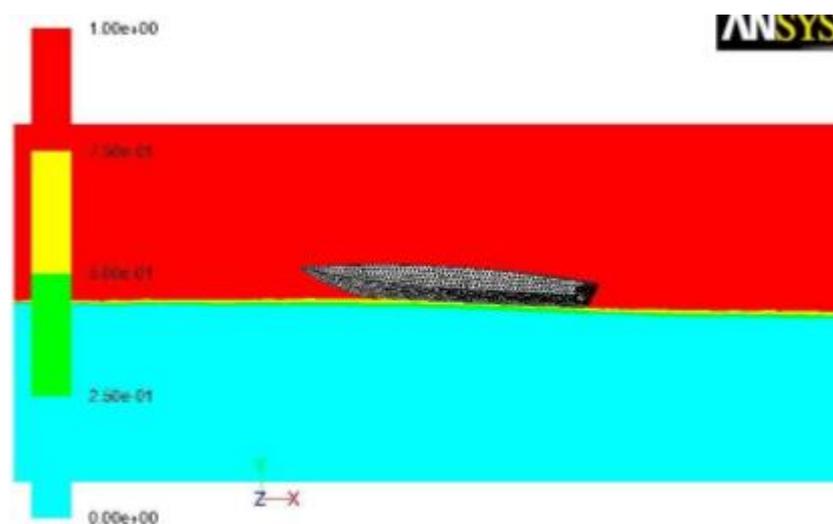
A curva identificada na Figura 17 é descrita pela Equação (3), cujos coeficientes podem ser observados no ANEXO A.

$$P_{sl} = p_1x^7 + p_2x^6 + p_3x^5 + p_4x^4 + p_5x^3 + p_6x^2 + p_7x + p_8 \quad (3)$$

### 3.2.2. Análise CFD

O método de simulação a qual se baseia este trabalho será realizado em CFD com regime multifásico, como apresentado na Figura 18, no qual a embarcação é interpretada como um corpo rígido com movimento.

Figura 18 - Simulação bifásica de embarcação de planeio.



Fonte: <http://www.cfd-online.com> (2010).

O programa empregado nesta análise foi o Star CCM+® o qual unifica as diversas etapas de construção da simulação em um único programa. (IERVOLINO, 2015).

O estagiário de engenharia naval Leonardo Martins da empresa Marine Composites, realizou o estudo da pressão de slamming na embarcação utilizada neste trabalho e os resultados obtidos, servirão como verificação das pressões calculadas pela norma.

A geométrica CAD gerada no programa Rhinoceros foi exportada para o módulo geométrico do Star CCM+ onde são definidas duas regiões distintas: o volume de controle (contendo o escoamento multifásico de fluido) e a embarcação.

A qualidade da geometria influencia diretamente na precisão da construção da malha e no resultado da simulação, conferindo a esta etapa atenção minuciosa a detalhes. (IERVOLINO, 2015).

O Volume de Controle (VC), zona de interesse para o estudo é onde, tipicamente, encontra-se o volume de fluido a ser analisado. O VC gerado consiste de um paralelepípedo, no qual o casco está inserido, cujas dimensões foram definidas a partir de cada extremidade da embarcação, conforme a tabela abaixo.

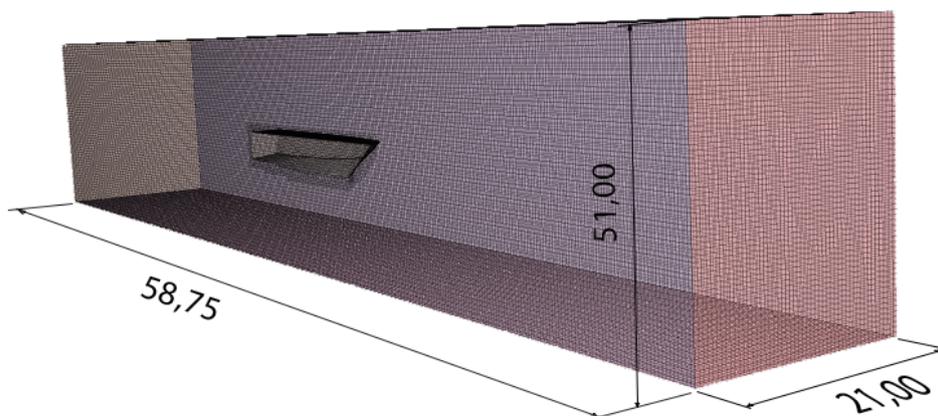
Tabela 7 – Dimensões do tanque de reboque virtual.

Parâmetros	Dimensionamento	Dimensão final [m]
Comprimento	1,5 Lwl a vante	58,75
	2,5 Lwl a ré	
Altura	30T abaixo e acima da linha d'água	51,00
Largura	0,75Lwl em cada bordo	21,00

Fonte: O Autor (2017).

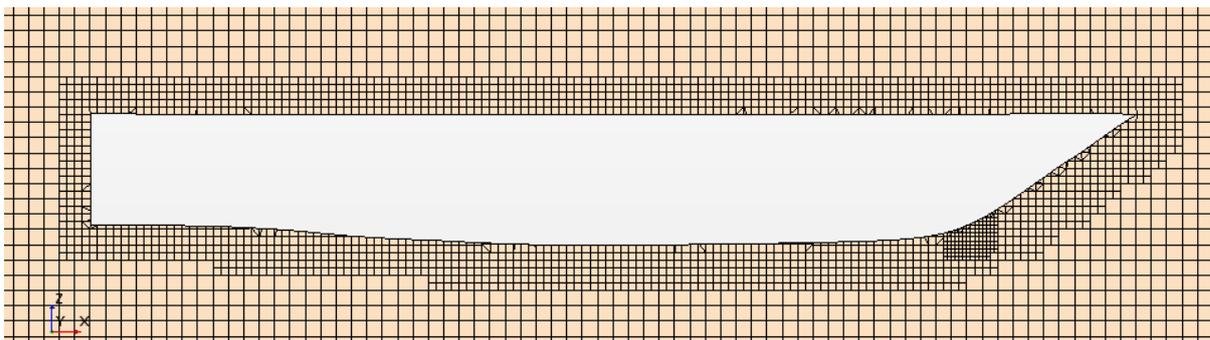
Nas figuras a seguir pode-se observar o VC modelado, com respectivas cotas e sistema de coordenadas.

Figura 19 – Vista isométrica do volume de controle.



Fonte: O Autor (2017).

Figura 20 – Vista lateral do volume de controle.



Fonte: O Autor (2017).

O volume de controle foi seccionado ao meio, longitudinalmente, de modo que a interação entre os dois VC's corresponda a interação das duas fases, ar e água.

A malha gerada possui 1 milhão de elementos, com tamanhos máximos e mínimos de 20cm nas regiões mais afastadas do casco e 5cm nas regiões mais próximas, respectivamente. Tais dimensões dos elementos da malha foi determinada com base em outras simulações que utilizam ondas apresentadas no tutorial do programa. Como não há apenas um parâmetro para definir a convergência do problema, esta foi determinada após a convergência da aceleração vertical e deslocamento vertical da embarcação, sendo assim, o número de iterações utilizadas para convergência foi 3700, aproximadamente.

O Time Step foi considerado a partir do tamanho de elemento, admitindo-se que uma partícula de fluido se deslocaria 1 elemento de malha por Time Step, sendo assim o valor empregado foi de 0,01s. O modelo de turbulência utilizado foi o k-ε, modelo geral que representa de maneira adequada o problema avaliado.

A onda aplicada tem as seguintes características: 5ª ordem, velocidade de 2,5 m/s, altura significativa de 1m, 10m de profundidade e 15m de comprimento.

Utilizando o modelo DFBI (Dynamic Fluid Body Interaction), simulou-se a embarcação com 26 nós de velocidade e CG aproximadamente na altura da linha d'água sobre o centro de carena. O passo de tempo utilizado foi de 0,1s.

A matriz de inércia de massa foi calculada utilizando o trabalho de Lloyd (1989) para comportamento em ondas, através das Equações (4) e (5), cujos resultados obtidos estão apresentados na Tabela 8.

$$I_{xx} = 0,3^2 B^2 \Delta \quad [ton * m^2] \quad (4)$$

$$I_{yy} = I_{zz} = 0,225^2 L_{LWL}^2 \Delta \quad [ton * m^2] \quad (5)$$

Tabela 8 – Inércia de massa.

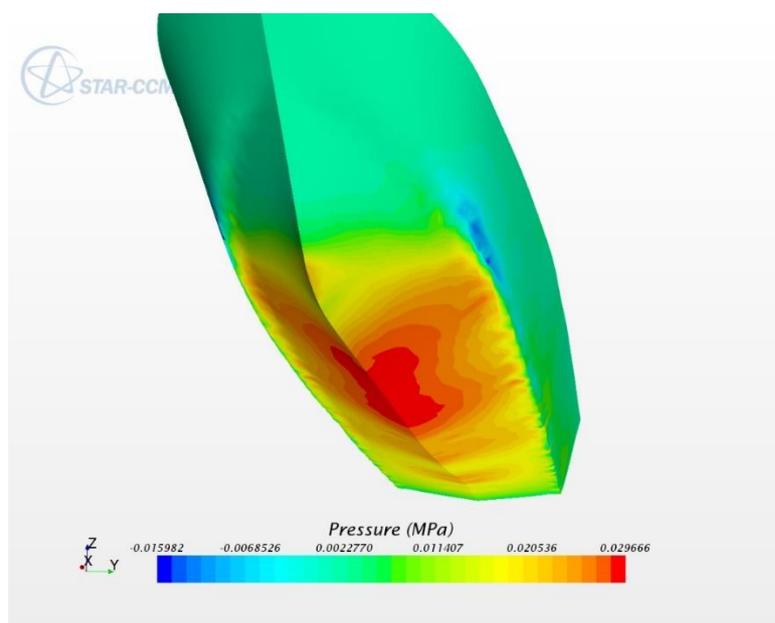
Inércia de massa [kg*m <sup>2</sup> ]	
I <sub>xx</sub>	16126,2
I <sub>yy</sub>	108335,9
I <sub>zz</sub>	108335,9

Fonte: O Autor (2017).

As simulações foram realizadas em somente um dos bordos da embarcação, considerando condição de simetria no plano diametral e a lancha teve os movimentos de heave e pitch liberados após 0,5s de tempo físico se simulação, ou seja, inicialmente as ondas atingiam o casco com a mesma velocidade da embarcação, e após 0,5s a mesma entrou em movimento com a velocidade considerada na análise.

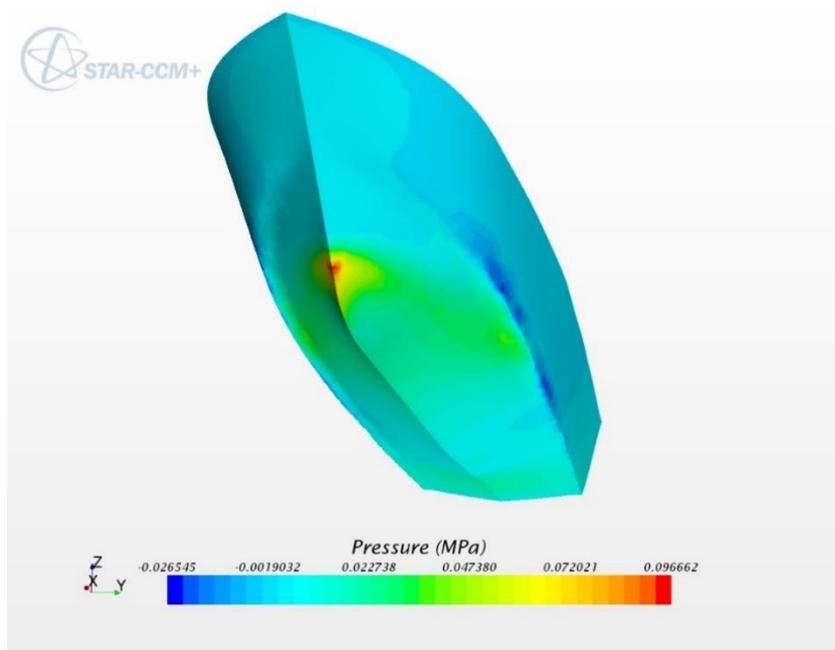
Os resultados das simulações são apresentados nas Figuras 21 e 22. O programa STAR-CCM+ contabiliza, dentro da parcela de pressão, a contribuição viscosa e de ondas. Porém, tais parcelas não foram avaliadas individualmente, pois tal análise foge ao escopo deste trabalho.

Figura 21 – Distribuição de pressão no fundo do casco em regime de planeio em MPa.



Fonte: O Autor (2017).

Figura 22 – Distribuição de pressão no fundo do casco na batida de proa em MPa.



Fonte: O Autor (2017).

Ao analisar os resultados percebe-se que, em regime de planeio (antes de ocorrer a batida de proa), as pressões possuem um patamar relativamente estável. Entretanto, cada vez que a lancha arfa na passagem da onda, ocorre um choque excessivo da proa, aumentando bruscamente a pressão a vante da embarcação. Tal comportamento pode ser observado a partir dos resultados apresentados na tabela a seguir. É importante ressaltar que, para efeitos de comparação, tomou-se o valor máximo da pressão de slamming calculado pela norma.

Tabela 9 – Variação da pressão de slamming.

Regime	Pressão - análise CFD [MPa]	Pressão - norma [MPa]
Planeio	0,015 – 0,03	-
Batida de proa	0,06 – 0,10	0,05

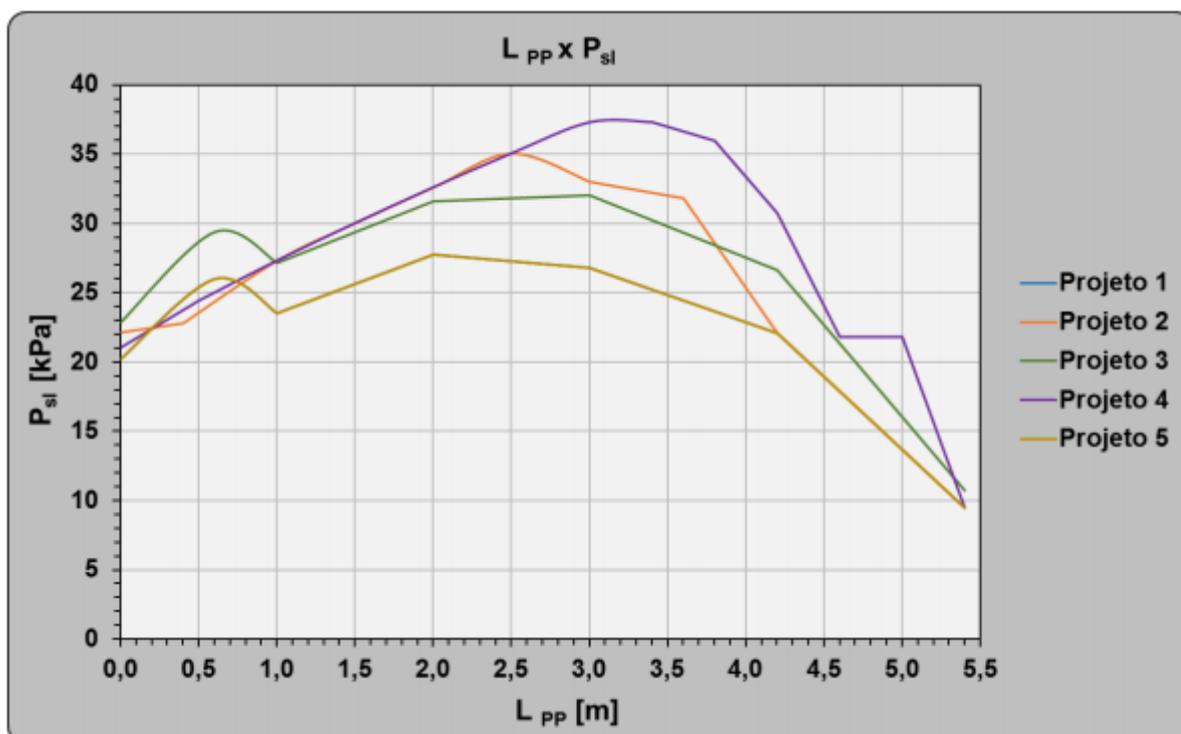
Fonte: O Autor (2017).

Os resultados obtidos condizem com o comportamento esperado de uma embarcação planantes e os valores gerados se encontram na mesma ordem de grandeza aos calculados pela norma

É possível ainda, avaliar a variação do ângulo de trim da embarcação, o qual aumenta até atingir um pico, o que caracteriza a condição máxima do planeio antes de ocorrer a batida de proa, e então, o trim começa a cair quando a embarcação retoma sua estabilidade em planeio.

Como não foi possível obter de maneira precisa um gráfico que demonstrasse a distribuição de pressão obtida na simulação numérica em CFD, se faz necessário uma análise comparativa do comportamento em slamming de embarcações semelhantes. Salles (2017), fez um estudo da variação da pressão de slamming ao longo do comprimento de uma embarcação, variando seu arranjo estrutural. No gráfico da figura abaixo pode-se observar os resultados obtidos pelo autor, cujo comportamento do Projeto 1 (embarcação similar à utilizada nesta pesquisa) apresentado no gráfico, é análogo à distribuição observada neste trabalho.

Figura 23 – Distribuição da pressão de slamming ao longo do comprimento da embarcação.



Fonte: SALLES (2017).

A análise CFD ajudou a estabelecer o campo de pressões utilizado ao longo das simulações estruturais, foco do presente trabalho. No entanto, para se manter fiel ao trabalho original, manteve-se o campo de pressões proposto pela norma DNV

(2012) e utilizado por Amaral (2016) para as análises referentes a pressão de slamming.

### 3.3. Caracterização do material

Como referido anteriormente, um dos materiais comumente utilizados na fabricação de lanchas é o alumínio. Um dos principais motivos que levam o emprego deste material é sua alta relação resistência/peso, sendo possível alcançar com uma liga de alumínio naval uma relação de 112 MPa/kg contra 76 MPa/kg em uma liga de aço naval. Aliado a isso, pode-se citar também a suas excelentes propriedades anticorrosivas, elevada condutibilidade térmica, além de ser um material não magnético, evitando assim, possíveis danos aos componentes eletrônicos à bordo. (SAVI, 2014) e (MARTINS, 2008).

Na construção de embarcações de alta velocidade, o alumínio se apresenta como uma boa alternativa em relação aos aços navais, pois apesar de possuir um custo inicial elevado, se caracteriza por ser um material leve. Portanto, o custo é compensado com o aumento de capacidade de carga, uma vez que o peso total da embarcação é menor, se comparado à mesma construção em aço. (MARTINS, 2008).

Além das vantagens expostas, um dos motivos que levaram a escolha deste material, foi a redução do custo computacional nas análises em elementos finitos quando comparado à uma embarcação fabricada em material composto. Isso posto, para projeto em questão foi adotado o material descrito, cujas propriedades são apresentadas na tabela abaixo.

Tabela 10 - Propriedades do alumínio.

<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	2,7
<b>Condutibilidade térmica a 25°C [Cal/cm/°C]</b>	0,53
<b>Ponto de fusão [°C]</b>	660
<b>Módulo de elasticidade [MPa]</b>	69000
<b>Tensão de escoamento [MPa]</b>	255
<b>Tensão última [MPa]</b>	290
<b>Poisson, <math>\nu</math></b>	0,33

Fonte: Hibbeler (2004).

Os limites de resistência a serem utilizados nas análises, são definidos conforme os critérios da seção Hull Structural Design, Aluminium Alloy da norma DNV (2012), onde estabelece-se que para embarcações construídas em liga de alumínio a tensão equivalente pode ser definida como:

$$\sigma_e = 180f_1 [MPa] \quad (6)$$

Sendo:

$$f_1 = \frac{\sigma_f}{240} [MPa] \quad (7)$$

Onde  $\sigma_f$  representa a tensão de escoamento do alumínio.

### 3.4. Cálculo da deflexão máxima do painel

Os elementos estruturais de uma embarcação sofrem a ação de diferentes tipos de carregamento, desde o próprio peso da embarcação até a ação da pressão de água no fundo do casco. Tais cargas se distribuem nas unidades de chapeamento e são transferidas aos perfis que as sustentam. Assim, todos os elementos estruturais de uma embarcação sofrem a ação de esforços destes carregamentos e como consequência, cada elemento sofre uma deflexão específica (AUGUSTO, 2004).

No presente trabalho examinou-se o efeito da pressão de slamming, calculada anteriormente, na maior porção de chapa do fundo da embarcação. Neste caso desconsiderou-se as cavernas, visto que as mesmas serão afastadas nas análises a serem realizadas, portanto o comprimento do painel é dado pela distância entre as anteparas.

De modo a avaliar a deflexão máxima em uma placa do casco, optou-se por verificar o deslocamento máximo no centro geométrico de uma placa engastada em suas quatro bordas, representando assim uma placa situada entre duas anteparas e duas longarinas, sendo esta a placa considerada como estrutura terciária da embarcação analisada. O emprego desta condição de contorno justifica-se por meio da condição de simetria da carga entre duas placas adjacentes, cuja teoria será aprofundada na próxima seção.

Para as análises realizadas a seguir, foram consideradas as seguintes características para a placa em estudo:

Tabela 11 - Características da placa avaliada.

Parâmetro	Valor/Característica
Comprimento [m]	5,6
Largura [m]	1,4
Espessura [mm]	12
Pressão [MPa]	0,04
Material	Alumínio
Tipo de carregamento	Uniformemente distribuído
Condição de contorno	Engastado nos quatro lados

Fonte: O Autor (2017).

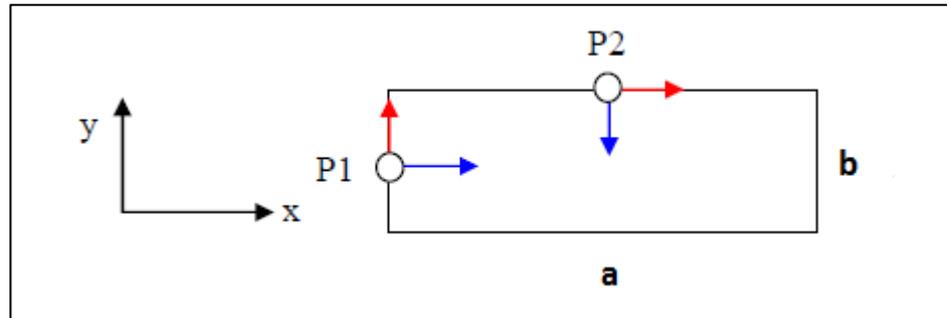
#### 3.4.1. Método Analítico

Segundo Augusto (2004), o painel estrutural garante a estanqueidade da embarcação, uma vez que é composto pela unidade de chapeamento (a qual corresponde pela porção de placa contida entre dois reforçadores transversais e dois reforçadores longitudinais) e dos próprios reforçadores que enrijecem o chapeamento.

As placas do fundo da embarcação recebem a distribuição de pressão em primeira instância e transmitem o carregamento recebido aos perfis. Porém as unidades de chapeamento também apresentam deflexão própria que, ao contrário das vigas, deve ser avaliada ao longo de duas direções (AUGUSTO, 2004).

Devido à simetria do carregamento, que impossibilita que a seção da quilha junto a antepara sofra rotação, as extremidades das placas do fundo são consideradas engastadas. (AUGUSTO, 2004). Sendo assim, os pontos críticos estão localizados no centro de cada um dos lados que definem a unidade de chapeamento, como pode ser observado na Figura 24.

Figura 24 - Pontos Críticos da Unidade de Chapeamento.



Fonte: O Autor (2017).

Timoshenko e Woinowski-Krieger (1959) apresentaram um equacionamento para avaliar os esforços sofridos pelos painéis do fundo da embarcação o qual relaciona a deformação da estrutura com a solicitação recebida, através da rigidez do material.

A solução do problema para placas de lados engastados é obtida na forma gráfica através das seguintes equações:

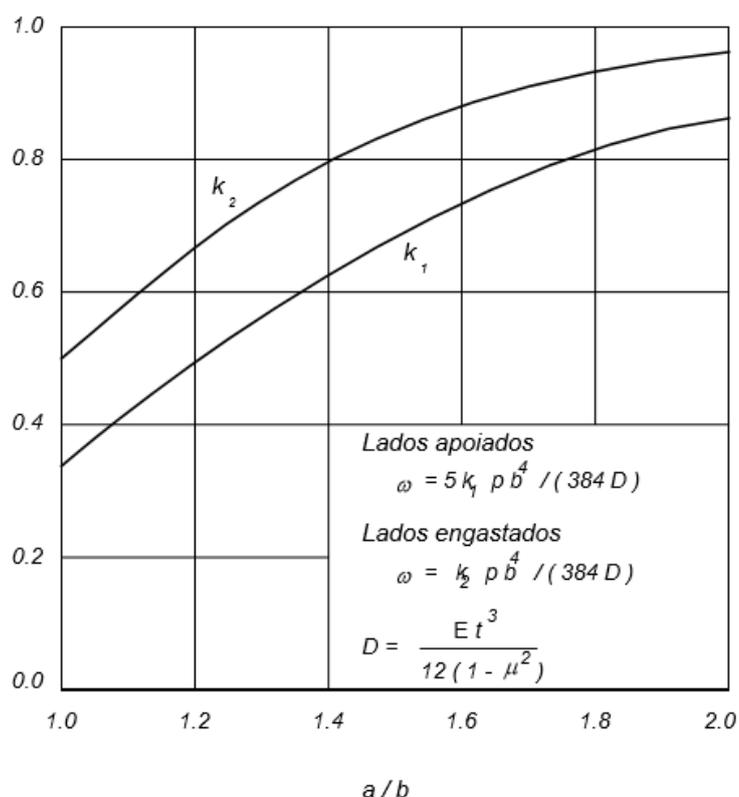
$$\omega = \frac{k_2 p b^4}{(384 D)} \quad [mm] \quad (8)$$

Onde  $k_2$  é o coeficiente obtido através do gráfico da Figura 25,  $p$  é a pressão aplicada no painel em Pa,  $b$  é o menor lado do painel em mm e  $D$  corresponde ao módulo de rigidez a flexão de placa, sendo obtido pela Equação (9).

$$D = \frac{E t^3}{12(1 - \mu^2)} \quad [Pa * mm^3] \quad (9)$$

Onde  $E$  é o módulo de elasticidade do material em Pa,  $t$  é a espessura do painel em mm e  $\mu$  é o coeficiente de Poisson do material. Sendo assim, quanto maior o valor de  $D$ , maior a rigidez da placa e menor o valor da deflexão existente ao longo da placa. (AUGUSTO, 2004).

Figura 25 - Teoria das Pequenas Deflexões.



Fonte: Augusto (2004).

Com base nas equações acima, pode-se obter o valor de deflexão máxima na chapa avaliada, sendo esta de 31,35mm. Tal estimativa servirá de base para definir a faixa de distâncias entre o fundo e as cavernas, denominado neste trabalho de “gap”, cuja discussão é apresentada no próximo tópico.

### 3.5. Análise paramétrica

O arranjo estrutural de uma embarcação consiste, basicamente, em placas reforçadas de modo a adquirir a rigidez necessária para suportar os esforços os quais a embarcação será submetida, sem resultar em acréscimo de peso à estrutura (SANTOS, 2011). Sendo assim, diversos são os parâmetros que influenciam na resistência de um arranjo estrutural, como por exemplo, número de reforçadores, espessura dos painéis, espaçamento entre reforços, dentre outros.

Conforme mencionado anteriormente, a colisão entre duas superfícies causa transformação de energia cinética, podendo ser esta na forma de deformação do material.

No caso das embarcações, o fundo colide com a água e se deforma entre as cavernas, e esta deformação é transmitida para a estrutura secundária.

As cavernas consistem em peças curvas que tem como principal função dar forma a embarcação e sustentar o chapeamento exterior. (FONSECA, 2002). Isso posto, pode-se avaliar a influência destes reforços no arranjo estrutural proposto, dado que as chapas se deformam entre cavernas.

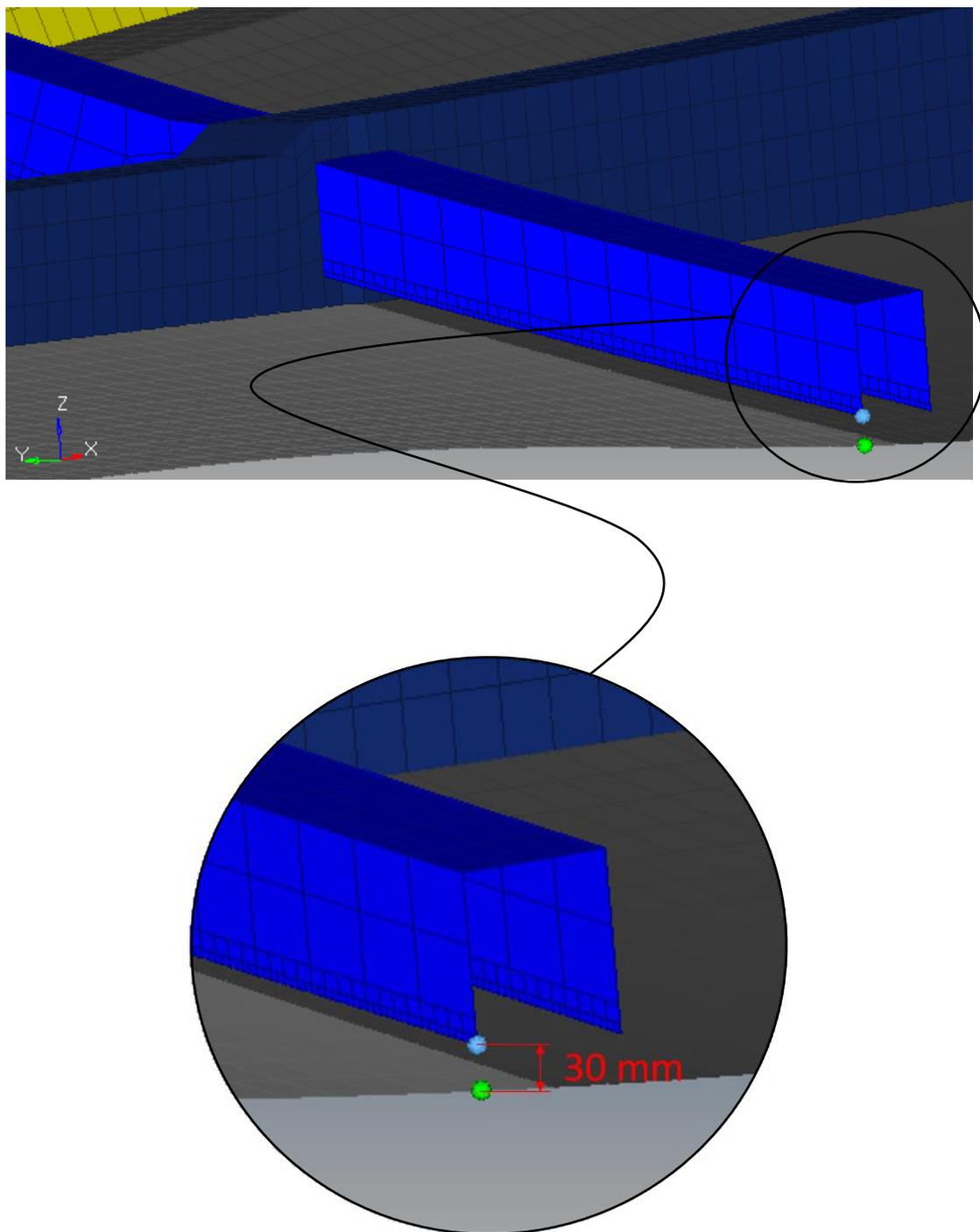
Como forma de quantificar a influência dos reforços na estrutura como um todo, e mitigar o movimento de pitch causado pelo ricochete do casco ao sofrer slamming, realizaram-se estudos variando a distância das cavernas ao fundo da embarcação, de modo a minimizar a aceleração vertical devido ao slamming através da dissipação de energia quando o casco colide com a água.

Os seguintes valores de gap foram simulados: 5mm, 10mm, 20mm, 30mm e 40mm. Foram determinados com base na deflexão máxima do maior painel da embarcação.

O limite da distância foi obtido à partir da análise estrutural em elementos finitos, ao avaliar-se a tensão máxima na estrutura de modo que esta não seja maior que o limite de resistência adotado, descrito no item 3.3 cujo valor é apresentado no próximo tópico.

Na figura abaixo é apresentada a proposta analisada, destacando a separação das cavernas do fundo do casco.

Figura 26 – Distância entre o fundo e as cavernas.



Fonte: O Autor (2017).

### 3.6. Simulação computacional do projeto estrutural

Para realizar os cálculos do projeto estrutural de acordo com a norma também foi necessário especificar a tensão máxima de projeto ( $\sigma_n$ ). Como mencionado no item 3.3, a DNV especifica que para embarcações construídas em liga de alumínio a tensão

máxima de projeto é definida a partir da tensão de escoamento do material, e é chamada de tensão equivalente. Portanto, para o projeto em questão, a tensão máxima a ser adotada é de 191,25MPa.

Como forma de avaliar o campo de tensões atuantes na embarcação, fez-se uma análise estrutural por meio de simulação computacional usando o Método dos Elementos Finitos. A simulação foi realizada utilizando o programa comercial da Altair®, o Hyperworks® (plataforma de simulação de CAE), de modo a realizar uma análise estática do projeto estrutural e verificar os pontos críticos da embarcação. O processador utilizado foi o OptiStruct, disponibilizado pelo pacote de processamento. Abaixo segue um fluxograma simplificado das etapas de processamento do programa utilizado.

Figura 27 – Etapas de processamento do programa Hyperworks®.



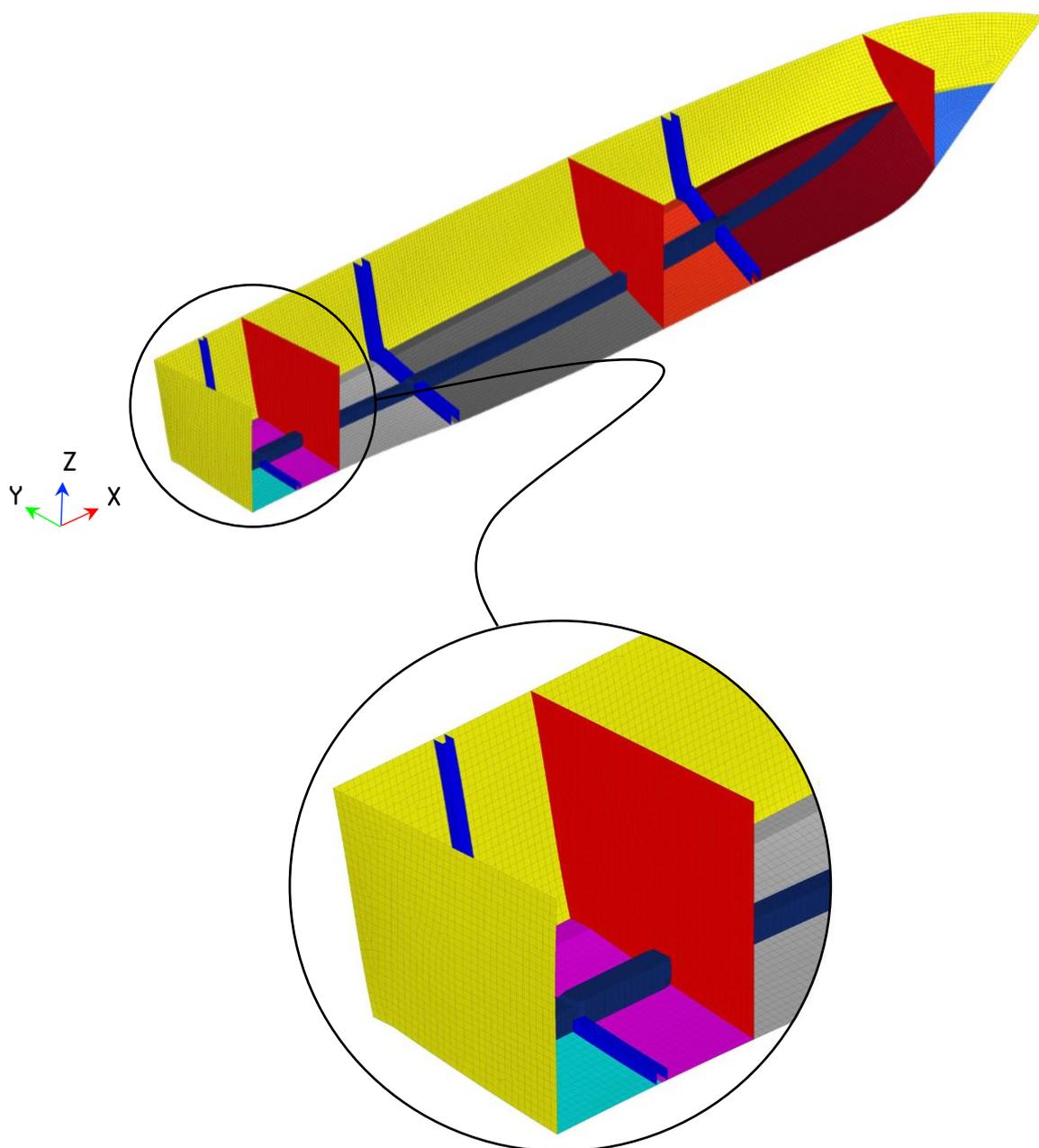
Fonte: O Autor (2017).

Na análise em questão, verificaram-se as máximas tensões principais a fim de se avaliar o comportamento da estrutura ao afastar as cavernas do fundo da embarcação. Além disso, o estudo numérico também permitiu a verificação dos pontos críticos da estrutura.

O arranjo estrutural utilizado foi acrescentado ao casco com auxílio do programa Solidworks e em seguida gerou-se um arquivo “STEP”, o qual contém informações sobre o casco em termos de superfície (sem volume).

Da maneira análoga à análise em CFD, o casco modelado no programa Rhinoceros foi exportado para o pré-processador Hypermesh onde foi gerada a malha para posterior análise pelo solver OptiStruct. A malha utilizada apresenta as mesmas características da proposta por Amaral (2016), com elementos quadriláteros do tipo casca de tamanho médio de 50 mm (Figura 28).

Figura 28 – Malha do casco.



Fonte: O Autor (2017).

Segundo Amaral (2016), o elemento casca representa de maneira eficiente as geometrias que compõem a estrutura avaliada, por possuírem espessura muito menor que as demais dimensões, além de apresentarem menor custo computacional se comparado à utilização de elementos do tipo sólido.

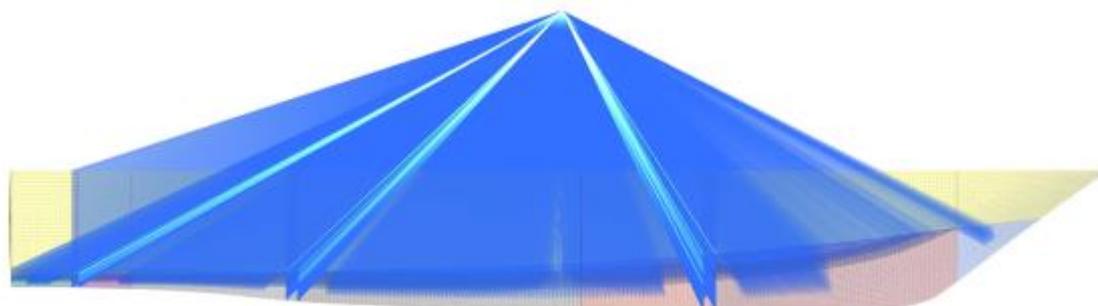
O sistema de coordenadas utilizado apresenta o eixo x na direção do comprimento da embarcação, o eixo y na direção da boca e o eixo z na direção do calado, como ilustrado na Figura 28.

A malha gerada é então importada para o Hyperworks, onde foram aplicadas as condições de contorno e carregamento. No pré-processamento, definiu-se que a malha era formada por elementos PSHELL de segunda ordem de forma a representar de maneira satisfatória a curvatura gerada pela atuação da pressão.

As análises foram realizadas considerando apenas um bordo da embarcação por haver simetria na geometria e no carregamento, de modo a reduzir o custo computacional. Sendo assim, determinou-se a condição de simetria nos nós do plano diametral, onde restringiu-se os seguintes graus de liberdade: deslocamento no eixo y, rotação em torno do eixo x e em torno do eixo z.

Ainda no pré-processamento, foram aplicados os valores da pressão de slamming, a qual foi aplicada apenas no fundo do casco. Em seguida, determinou-se como condição de contorno que os graus de liberdade dos nós da malha dos reforçadores longitudinais, das cavernas (nós escravos) e alguns nós do fundo, estariam ligados aos graus de liberdade de uma geometria (nó mestre) posicionada acima da embarcação por meio da função RBE3 presente no Hyperworks, como apresentado na Figura 29. Essa abordagem foi inicialmente proposta por Amaral (2016) para realizar o equilíbrio das pressões atuantes no fundo do casco.

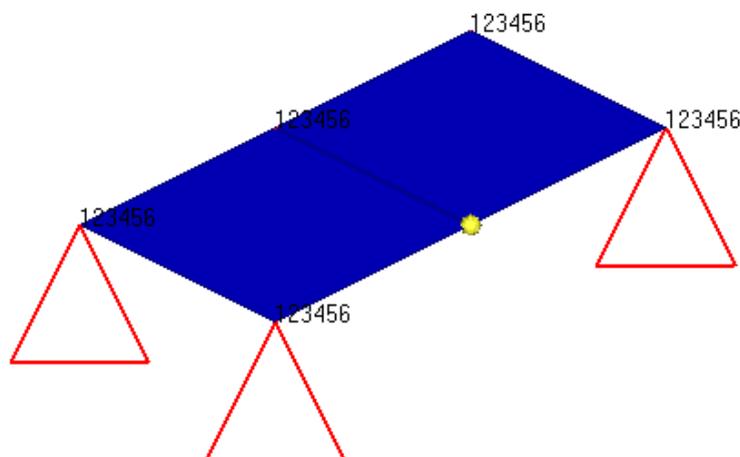
Figura 29 – Condição de contorno aplicada ao casco.



Fonte: O Autor (2017).

Na Figura 30 pode-se visualizar a geometria de acoplamento engastada nas extremidades e o nó mestre (em amarelo).

Figura 30 – Geometria de Acoplamento.



Fonte: O Autor (2017).

De modo a avaliar de maneira correta a influência deste tipo de acoplamento, fizeram-se algumas análises variando a posição, quantidade de geometrias e nós ligados à ela. A geometria gerada é do tipo PSHELL, com os nós da extremidade engastados e o nó do centro acoplado com a embarcação.

Esse acoplamento permite que a força de reação resultante neste nó seja igual ao somatório do campo de pressão no casco. Segundo a Altair Engineering Inc. (2017), essa função de acoplamento serve para distribuir cargas sem induzir rigidez indesejada, não tratando-se de um elemento de conexão mas sim um elemento que induz movimento a um nó como uma função da média ponderada de outros nós.

Utilizou-se deste artifício a fim de se evitar o movimento de corpo rígido do casco, pois se fossem consideradas as condições reais não haveria restrições ao seu movimento e o programa não conseguiria solucionar as equações de equilíbrio. Conforme a avaliação realizada por Amaral (2016), este método apresenta resultados satisfatórios em termos de representação das respostas da estrutura à um carregamento.

Vale ressaltar que foi realizada uma simplificação ao realizar a análise de modo estático, uma vez que a pressão de slamming é de natureza dinâmica.

## 4. RESULTADOS

Esta seção compreende os resultados das análises da influência da geometria de acoplamento, assim como a análise paramétrica dos gaps entre as cavernas e o fundo da embarcação.

O limite dos gaps avaliados foi determinado através do critério exposto no item 3.3, que define a máxima tensão admissível para este projeto. Sendo assim, a tensão resultante nos casos avaliados não pode ser maior que 191,25MPa.

A obtenção das tensões máximas principais desconsideram acúmulos de tensões em cantos vivos, uma vez que, os cantos vivos serão eliminados por meio de reforço extra de material, aumentando a espessura ou inserindo chapas de sustentação (borboletas) nestas regiões.

### 4.1. Análise da função de acoplamento

De modo a avaliar o comportamento estrutural da embarcação em relação à condição de contorno utilizada, foram realizadas análises com diferentes tipos de acoplamento, sendo os seguintes casos abordados:

- Caso 1: uma geometria de acoplamento em cada extremidade da embarcação, ligadas aos nós das cavernas, longarinas e alguns nós do fundo;
- Caso 2: duas geometria de acoplamento posicionadas no Lpp da embarcação e conectadas aos nós das cavernas, longarinas e alguns nós do fundo;
- Caso 3: três geometrias de acoplamento: uma na proa, uma na popa e uma no meio da embarcação, conectadas aos nós das cavernas, longarinas e alguns nós do fundo;
- Caso 4: uma geometria de acoplamento em cada extremidade da embarcação, ligadas aos nós das cavernas, longarinas e alguns nós do fundo e do costado;
- Caso 5: geometria de acoplamento no meio da embarcação ligada aos nós das cavernas, longarinas e alguns nós do fundo.

Os casos em que há mais de um nó mestre para o acoplamento, dividiu-se os nós escravos conforme a região de alcance de cada geometria, para não conectar todos os nós mestres a todos os nós escravos, evitando fornecer rigidez desnecessária à estrutura.

A Tabela 12 apresenta os resultados de deslocamento máximo e tensão principal máxima para cada caso avaliado.

Tabela 12 – Deslocamento máximo e tensão principal máxima para cada caso avaliado.

<b>Caso</b>	<b>Deslocamento Máximo (Z) [mm]</b>	<b>Tensão Principal [MPa]</b>
1	6,26	57,80
2	6,26	57,80
3	6,26	57,80
4	6,07	57,70
5	6,26	57,80

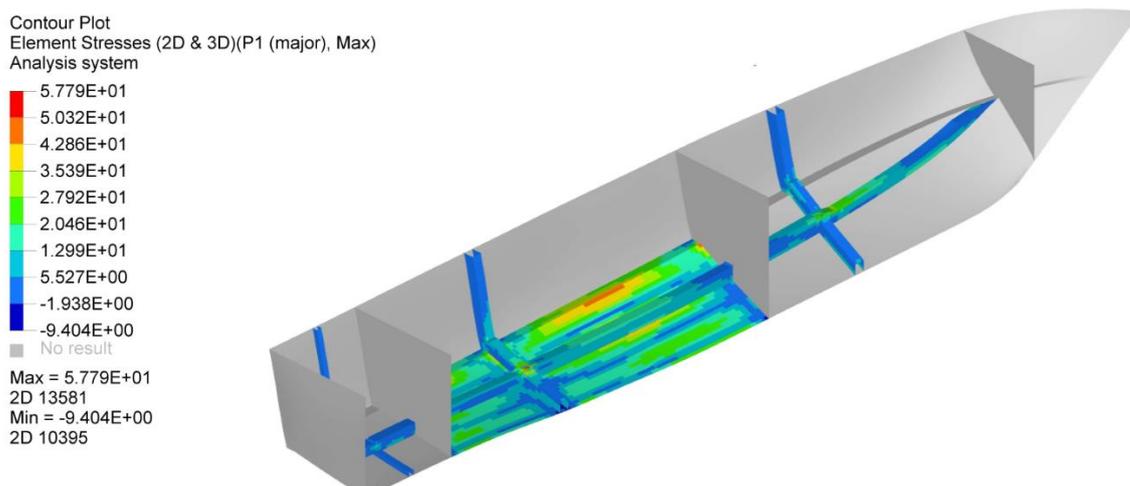
Fonte: O Autor (2017).

É importante destacar que os pontos críticos em cada caso apresentaram a mesma posição física na estrutura, e a avaliação dos resultados desconsidera concentrações de tensões provenientes da influência do tipo de acoplamento ou de cantos vivos, conforme mencionado anteriormente.

Através dos resultados expostos, pode-se perceber que a estrutura não sofre grandes influência com a variação no tipo acoplamento. A mudança nos resultados observados no caso 4, pode ser atribuída à rigidez extra fornecida à estrutura ao acoplar alguns nós do costado ao nó mestre, causando uma redução na tendência natural de alquebramento da embarcação.

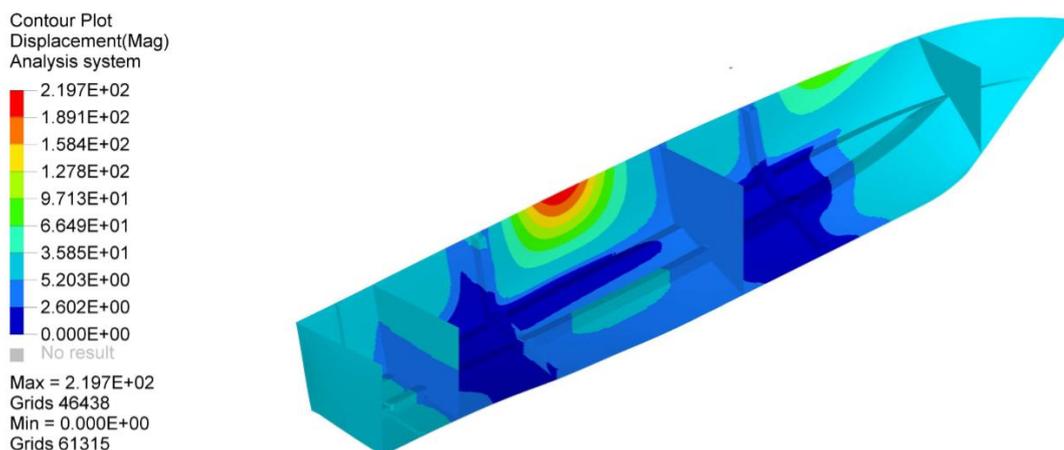
Isso posto, o caso 5 é o que mais se assemelha ao modelo exposto por Amaral (2016), sendo este portanto o padrão adotado para seguir as análises paramétricas. Os resultados de tensão e deslocamento do caso 5 podem ser observados nas figuras a seguir.

Figura 31 – Campos de tensões (MPa) para o caso 5.



Fonte: O Autor (2017).

Figura 32 – Campos de deslocamentos (mm) para o caso 5.



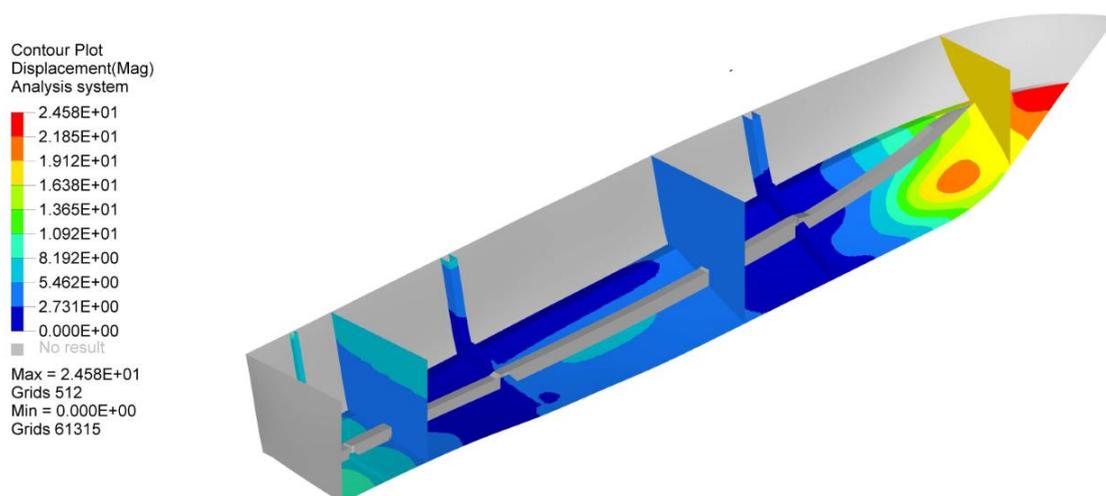
Fonte: O Autor (2017).

Alguns resultados dos demais casos podem ser observados no APÊNDICE A.

Ao avaliar o comportamento da estrutura como um todo, pode-se tirar conclusões equivocadamente em virtude do Princípio de Saint-Venant, o qual supõe que o efeito das cargas locais aplicadas sobre uma estrutura é puramente local. Segundo Horgan (1989), o princípio de Saint-Venant estabelece que as regiões próximas à aplicação de cargas ou restrições, podem atingir valores elevados de tensão, cuja intensidade diminui na medida em que se afasta dessas regiões, tendendo ao valor médio de tensão. Sendo assim, na figura a seguir apresenta-se o

campo de deslocamentos local do fundo da embarcação, uma vez que os resultados obtidos apresentam efeito similar à teoria exposta.

Figura 33 – Campos de deslocamentos (mm) do fundo para o caso 5.



Fonte: O Autor (2017).

#### 4.2. Simulação computacional do projeto estrutural

Na análise da estrutura, avaliou-se os valores máximos de tensão nas seguintes regiões: fundo, caverna e longarinas, para a condições de carregamento exposta no item 3.2.1.

De modo a facilitar o tratamento dos resultados, as regiões do fundo foram divididas em 7 grupos delimitados pelos reforçadores transversais (Figura 16). Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 13 – Tensão máxima principal [MPa] nos diversos painéis para cada parâmetro avaliado.

Tensão máxima por painel [MPa]						
Painel	Gap 1 [5mm]	Gap 2 [10mm]	Gap 3 [20mm]	Gap 4 [30mm]	Gap 5 [40mm]	Sem Gap
1	62,73	68,29	68,45	73,18	74,93	31,76
2	64,66	69,97	70,42	77,12	82,99	37,38
3	49,73	53,21	53,43	57,37	74,67	43,51
4	55,32	55,89	58,65	62,53	69,59	50,43
5	49,02	54,40	54,58	55,46	55,61	33,77
6	91,00	86,40	82,19	80,83	72,93	77,29
7	42,48	40,54	40,15	32,62	31,57	32,09

Fonte: O Autor (2017).

Tabela 14 – Resultados das análises nas cavernas para cada parâmetro avaliado.

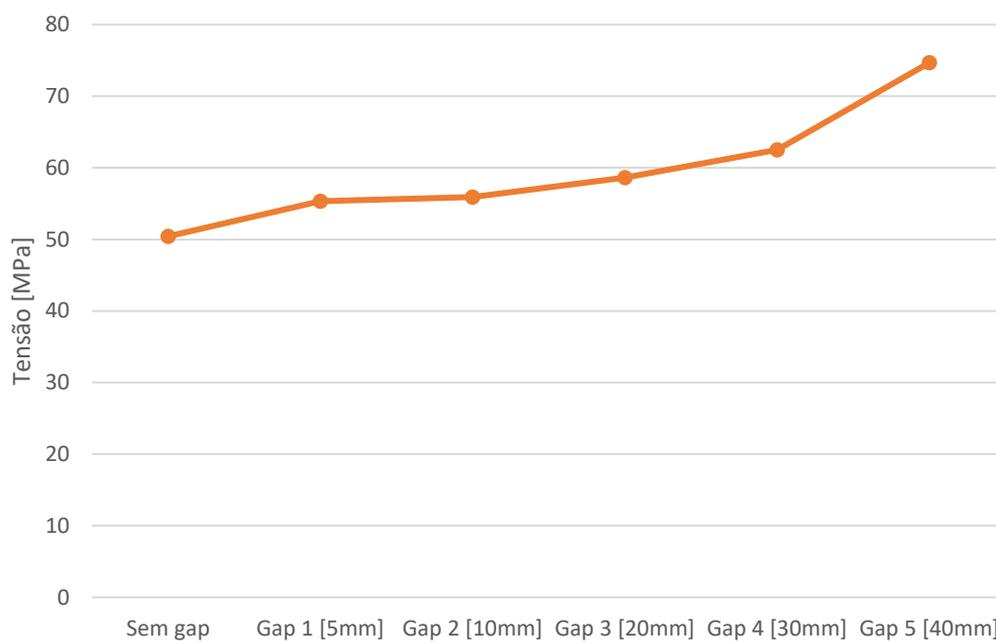
Grandeza	Gap 1 [5mm]	Gap 2 [10mm]	Gap 3 [20mm]	Gap 4 [30mm]	Gap 5 [40mm]	Sem Gap
Tensão [MPa]	17,91	22,91	54,87	59,48	59,50	16,06
Deslocamento (Z) [mm]	3,92	4,86	5,09	5,52	6,78	3,07

Fonte: O Autor (2017).

Porém, é importante ressaltar que a Tabela 14 apresenta os máximos valores de tensão do conjunto de cavernas.

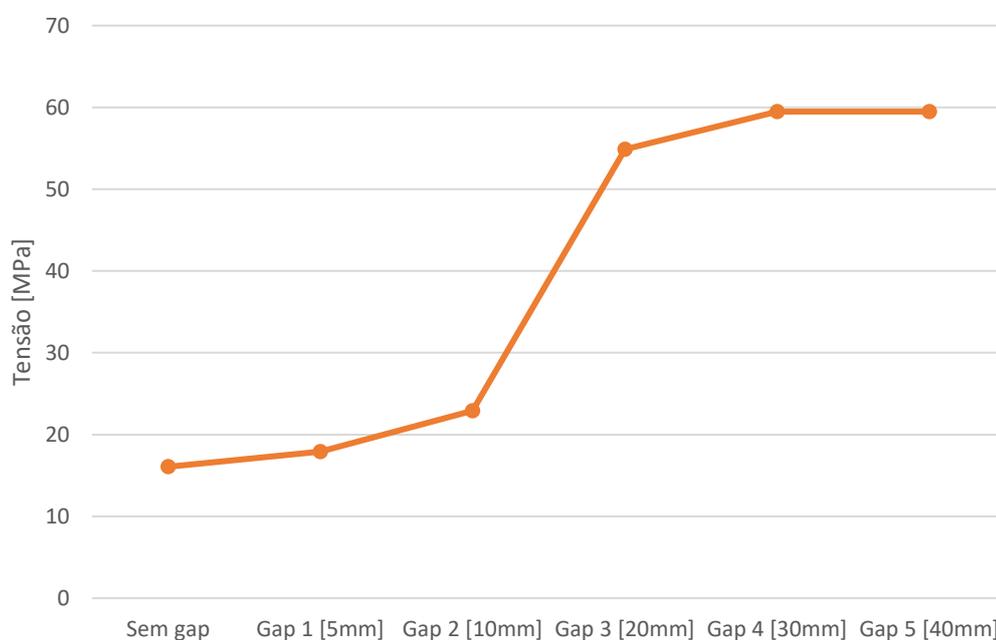
Para uma visualização mais adequada da tendência de conversão dos resultados, elaborou-se os gráficos expostos a seguir. Devido a tendência natural de alquebramento da embarcação, optou-se por avaliar o fundo à meia nau de modo a facilitar a comparação dos resultados com caso apresentado no item anterior, sem as cavernas afastadas.

Figura 34 – Gráfico da tensão máxima principal no fundo 4 para os casos avaliados.



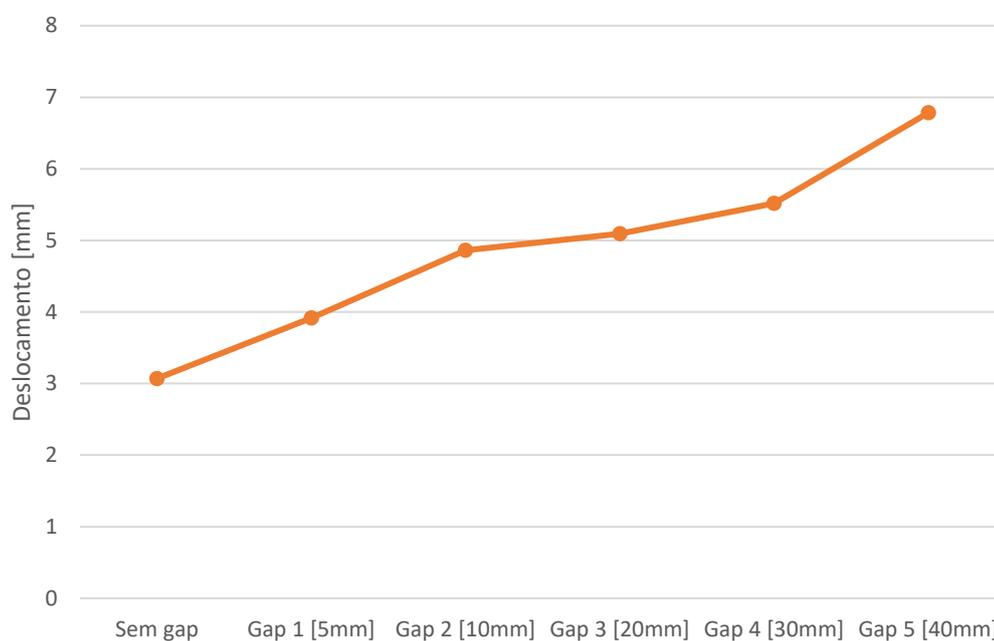
Fonte: O Autor (2017).

Figura 35 – Gráfico da tensão máxima principal nas cavernas da embarcação para os casos avaliados.



Fonte: O Autor (2017).

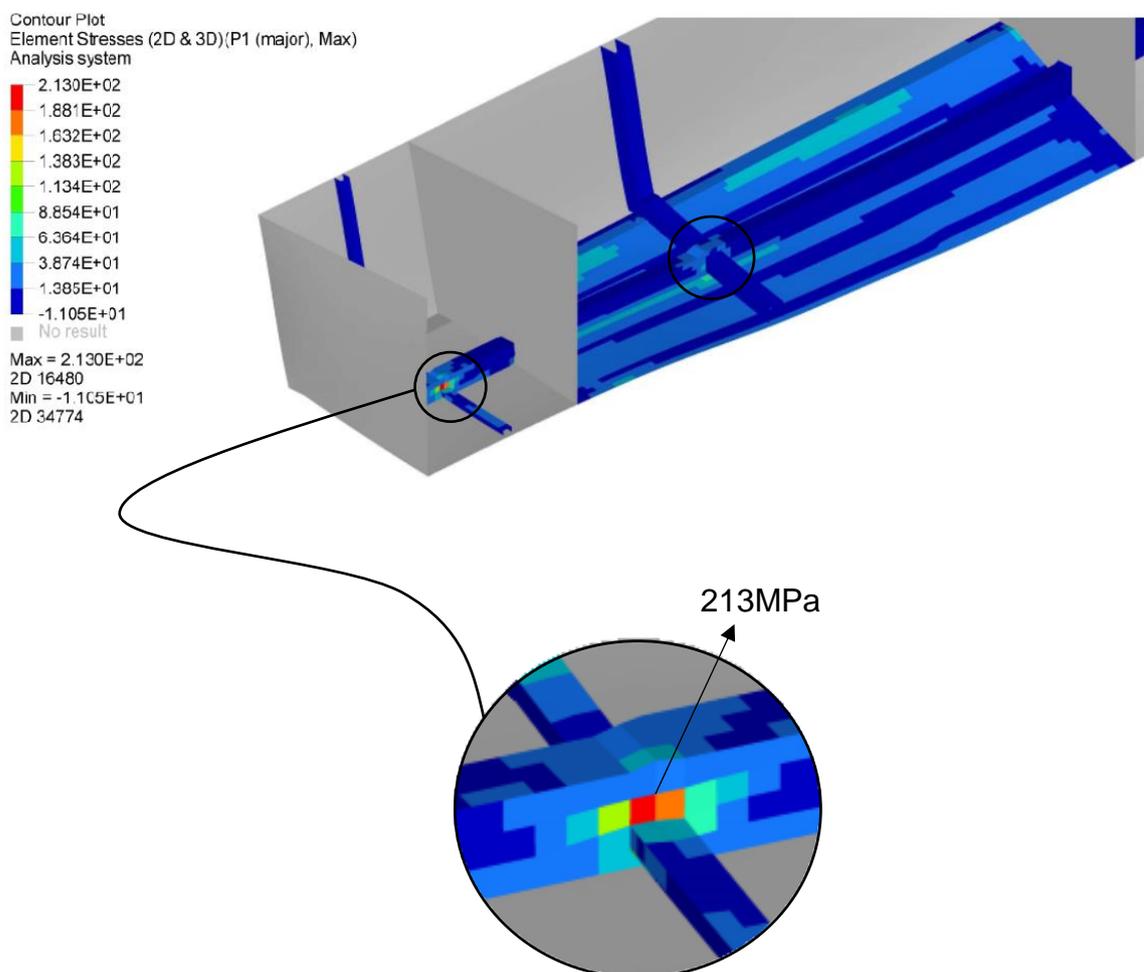
Figura 36 – Gráfico do deslocamento máximo nas cavernas da embarcação para os casos avaliados.



Fonte: O Autor (2017).

O limite para as distâncias entre o fundo da embarcação e as cavernas foi determinado com base no critério de projeto adotado (tensão máxima de projeto), onde pode-se obter um espaçamento máximo de 30mm visto que as análises apontaram que para uma distância de 40mm ocorre elevada concentração de tensões na interface caverna/longarina, sobrecarregando o reforçador longitudinal. Tal acúmulo de tensão pode ser observado na figura abaixo.

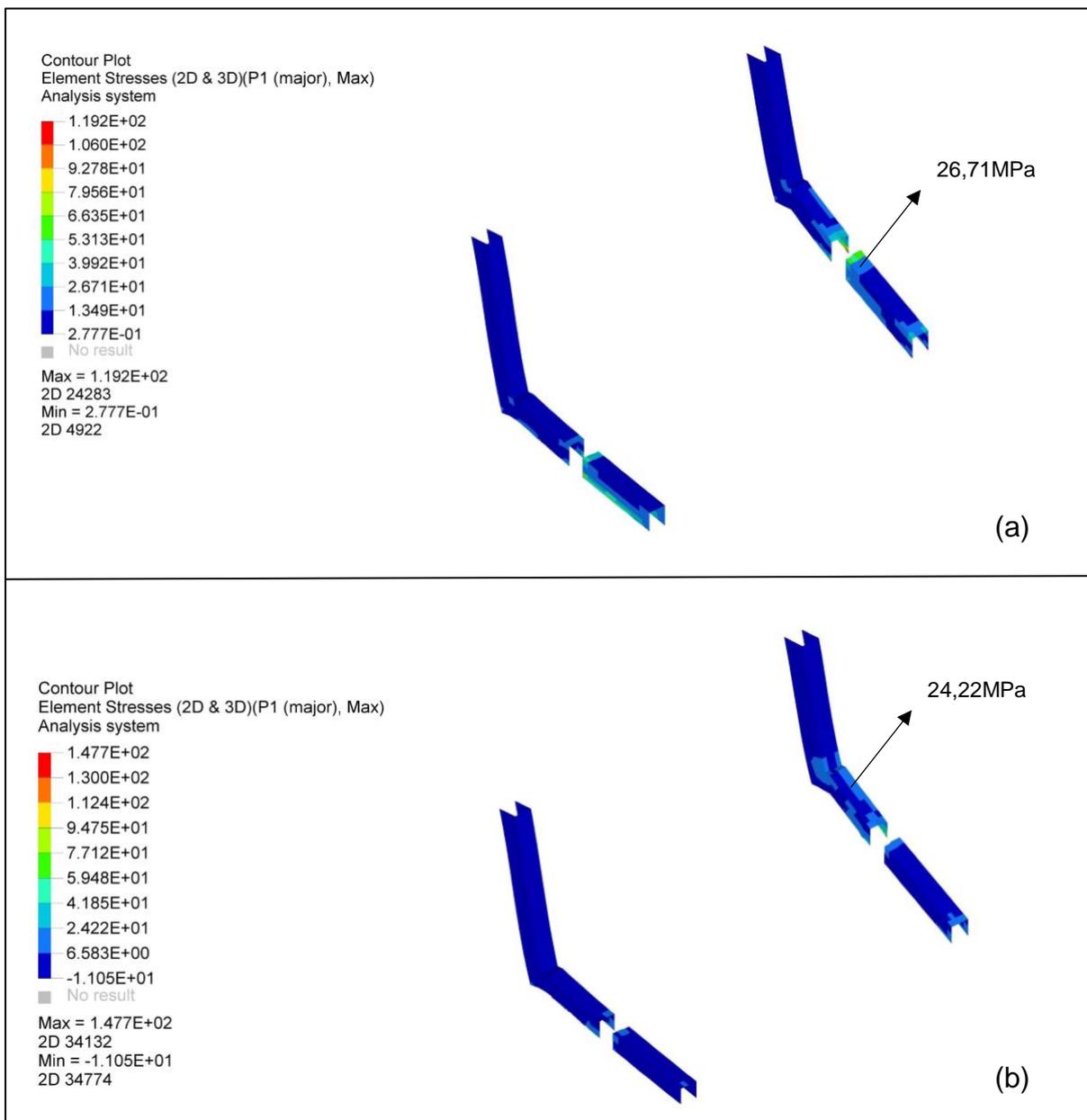
Figura 37 – Acúmulo de tensão (MPa) nos reforçadores.



Fonte: O Autor (2017).

Como se pode notar, tanto as tensões quanto as deflexões tendem a aumentar com um incremento na distância das cavernas ao fundo. Em contrapartida, notou-se que as duas cavernas mais à vante da embarcação apresentaram uma queda na tensão principal, reduzindo de 26,71MPa para 24,22MPa, na Figura 38 é exposto tal diminuição. Isso ocorre, pois ao aumentar o gap entre a caverna e o fundo da embarcação reduz-se a colisão entre tais componentes. Sendo assim, quando o fundo sofre a ação de uma pressão de slamming o mesmo se deforma, porém sem transmitir de maneira significativa os esforços para os reforçadores transversais.

Figura 38 – (a) Tensão em MPa na análise com 5mm de gap; (b) Tensão em MPa na análise com 30mm de gap .

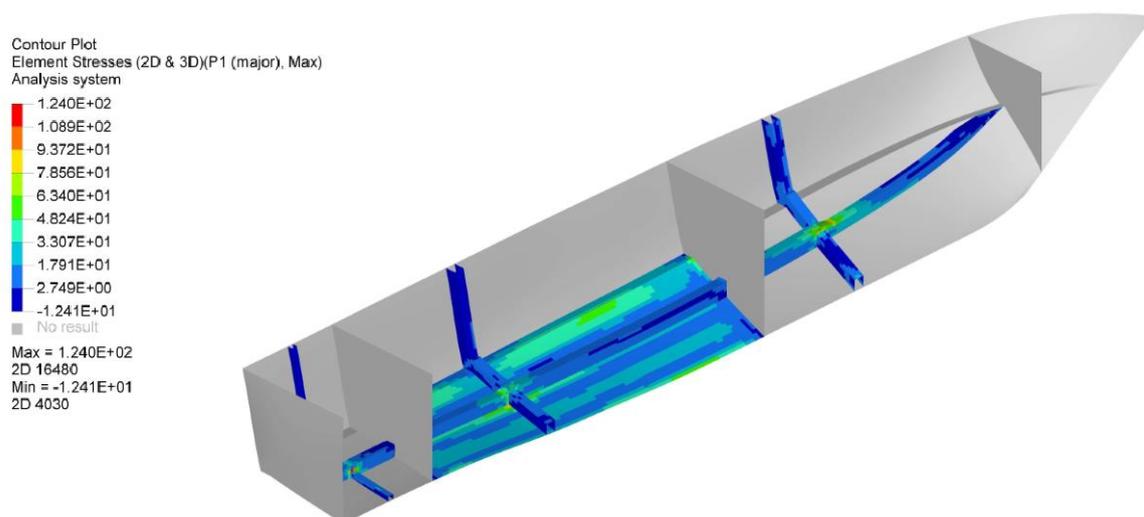


Fonte: O Autor (2017).

Um dos motivos que causaram um aumento da tensão da caverna mais à popa da embarcação é o fato desta apresentar menores dimensões se comparado às outras, além de estar posicionada em uma região cuja pressão aplicada é maior.

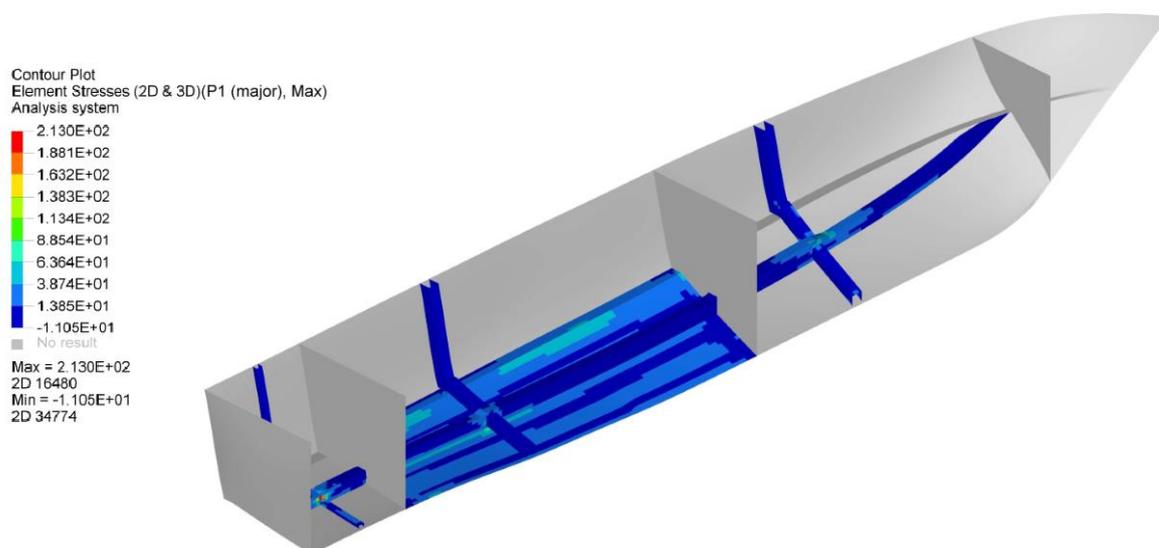
Nas figuras abaixo estão ilustrados o campo de tensões e deslocamentos dos modelos com menor e maior gap, respectivamente (5mm e 30mm).

Figura 39 – Campos de tensões (MPa) para a análise de um gap de 5mm.



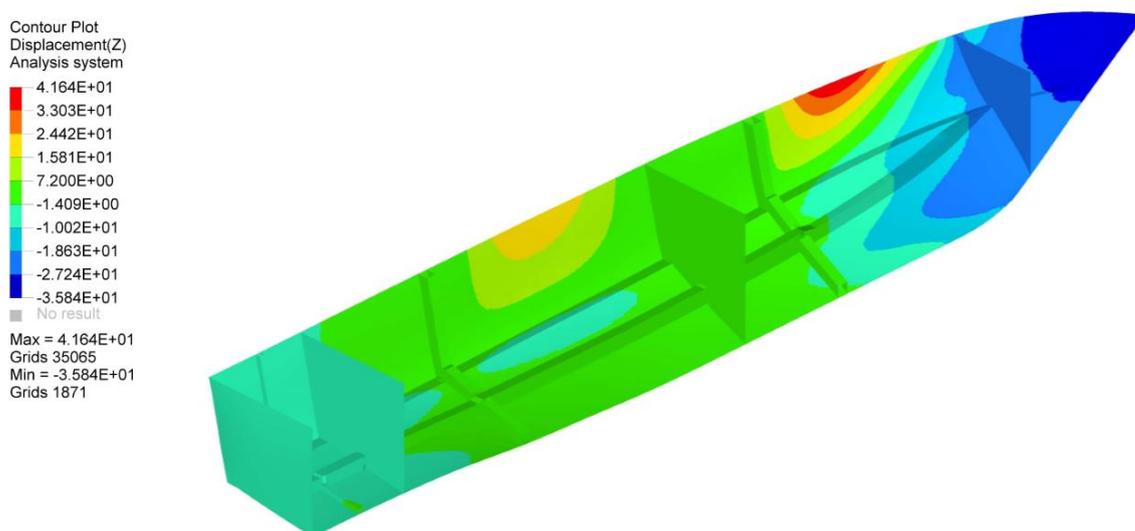
Fonte: O Autor (2017).

Figura 40 – Campos de tensões (MPa) para a análise de um gap de 30mm.



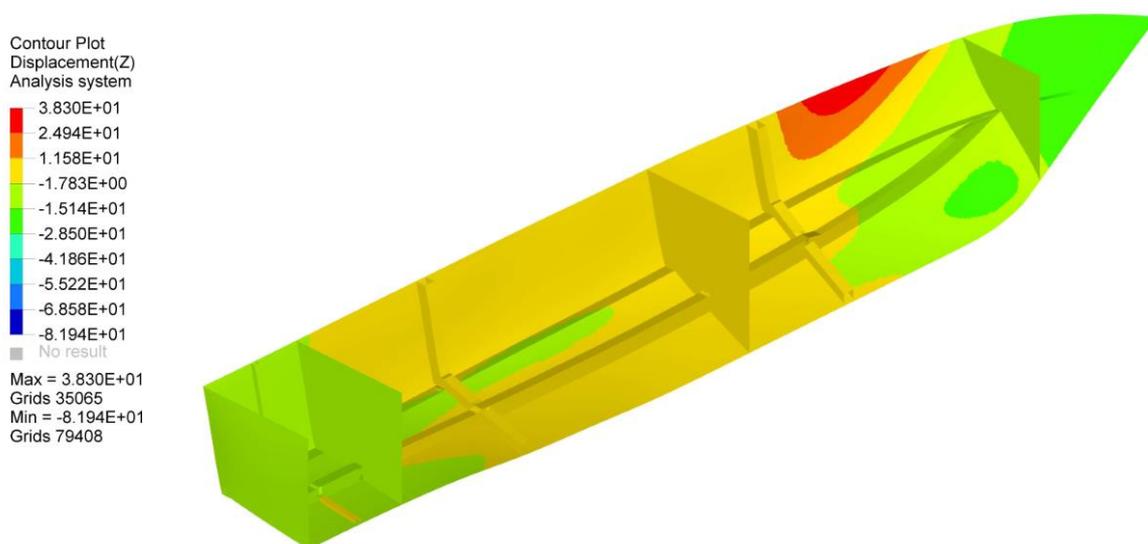
Fonte: O Autor (2017).

Figura 41 – Campos de deslocamentos (mm) para a análise de um gap de 5mm.



Fonte: O Autor (2017).

Figura 42 – Campos de deslocamentos (mm) para a análise de um gap de 30mm.



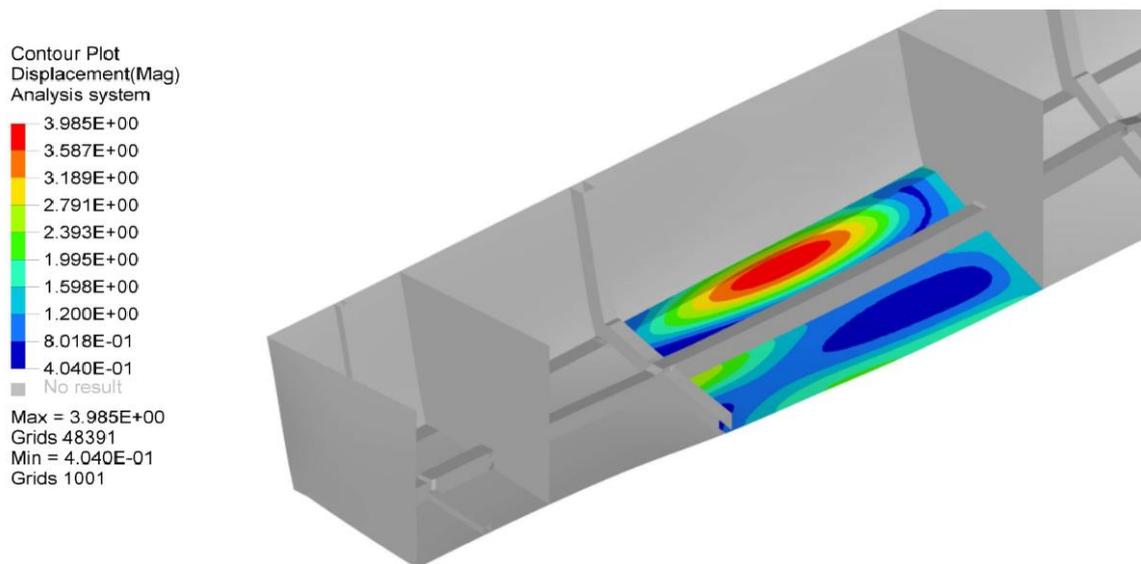
Fonte: O Autor (2017).

Alguns resultados dos demais gaps podem ser observados no APÊNDICE B.

Assim como no caso anterior se faz necessário avaliar o campo de deslocamentos local, devido ao Princípio de Saint-Venant. Nas figuras a seguir

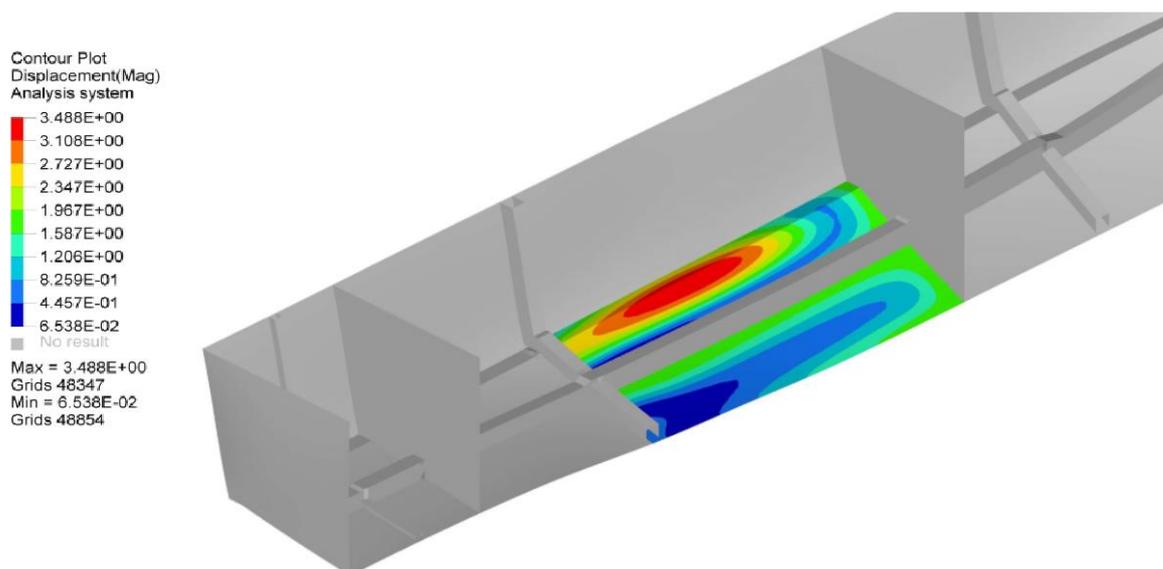
apresentam-se o campo de deslocamentos local do fundo 4, para os casos de gap de 5mm e 30m, respectivamente.

Figura 43 – Campos de deslocamentos (mm) do fundo 4 com um gap de 5mm.



Fonte: O Autor (2017).

Figura 44 – Campos de deslocamentos (mm) do fundo 4 com um gap de 30mm.



Fonte: O Autor (2017).

Observando o campo de tensões do caso apresentado no item anterior, em que não há afastamento entre o fundo e as cavernas, constata-se o aumento tanto do deslocamento quanto da tensão na embarcação. Contudo, a tensão nas cavernas reduz, acarretando numa diminuição da colisão do fundo com as cavernas.

Por meio dos resultados obtidos nas análises, não é possível dizer que não haverá falha nas regiões onde há acúmulo de tensões. Ainda que o caso real apresente tensões menores que as das simulações devido à condição de contorno adotada, outros tipos de carregamento e acoplamentos devem ser estudados, como por exemplo, esforços torcionais. Todavia, tais resultados facilitam a visualização das regiões em que a embarcação será mais solicitada, além de fornecer uma estimativa do comportamento estrutural para o arranjo proposto.

## 5. CONCLUSÃO

No presente trabalho apresentou-se uma análise paramétrica do projeto estrutural de uma embarcação de alta velocidade de acordo com as normas da DNV (2012), variando a distância entre o reforçador transversal e o fundo, com o intuito de reduzir o desconforto dos passageiros, por meio da absorção da energia decorrente da colisão de slamming.

Também, analisou-se a influência da condição de contorno utilizada na resposta estrutural da embarcação. Além disso, uma análise CFD foi realizada para que se verificasse o campo de pressões no fundo da lancha, de modo a obter um comparativo com os resultados sugeridos pela norma. Outrossim, realizou-se uma análise estrutural utilizando o Método dos Elementos Finitos para a verificação do campo de tensões da estrutura, bem como para avaliar o comportamento estrutural do arranjo proposto.

Conforme mencionado no andamento deste projeto, a concepção da estrutura de uma embarcação é baseada, entre outros, no estudo da resistência mecânica, uma vez que a resistência à deflexão destas estruturas depende da estabilidade de diversos reforços de espessura fina, sujeitos a vários tipos de carregamento. No decorrer deste trabalho, pode-se constatar que a rigidez de uma placa com reforços longitudinais diminui depois da ocorrência de uma deformação, uma vez que esta apresenta comportamento em colisão inelástico. Este fator se torna crucial para a análise de embarcações de alta velocidade, posto que estas estão em constante colisão com a água.

Como conclusão percebe-se que o desacoplamento do fundo do casco em relação às cavernas não compromete a integridade estrutural da embarcação, e que a deformação do casco pode absorver parte da energia resultante da colisão do casco com a água, reduzindo o desconforto de passageiros quando se navega em condições severas de mar.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se a simulação de outras geometrias de estruturas e materiais, ou uma avaliação da influência do número de

carvernas levando em conta as recomendações citadas nesse trabalho. Também pode-se realizar a análise de vibrações e estudo dinâmico do arranjo proposto, a fim de determinar qual modelo de arranjo estrutural é mais eficiente em termos de absorção de energia das ondas.

Por fim, poder-se-ia realizar uma análise acoplada que considerasse a interação fluido-estrutura ao longo de todo processo de aceleração de uma lancha, além da navegação em planeio quando esta se encontra com ondas, apresentando slamming.

## REFERÊNCIAS

ALTAIR ENGINEERING INC. **Hyperworks 13.0**. Disponível em: <[https://connect.altair.com/CP/SA/training/self\\_paced/aero\\_v13/PDF/chapter7\\_demonstration.pdf](https://connect.altair.com/CP/SA/training/self_paced/aero_v13/PDF/chapter7_demonstration.pdf)>. Acesso em: 01 out. 2017.

AMARAL, Janaína R de. **Otimização do projeto estrutural de embarcações de alta velocidade produzidas em material compósito**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016. 94 p.

\_\_\_\_\_. **Comparação de Diferentes Modelos de Carregamento e Vínculo na Simulação Estrutural de Lanchas Usando Método dos Elementos Finitos**. SOBENA, Rio de Janeiro, nov. 2016. 9p.

APE Marine Design. **Análise de Embarcações**. Disponível em: <<http://www.apemarinedesign.com/servico/analise-de-embarcacoes.html>>. Acesso em: 30 out. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8035: Arquitetura Naval**. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.

AUGUSTO, Oscar B. **Estrutura terciária do navio**. Escola Politécnica da Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, jan. 2004. 51 p. Versão 1.4.

BERTRAN, Volker. **Practical ship hydrodynamics**. Butterworth-Heinemann. Grã Bretanha, 2000.

CARDOSO, Ademar Azevedo. **Síntese racional automatizada de Cavernas de Embarcações**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994. 168 p.

DET NORSKE VERITAS (DNV). **Rules for classification of high speed, light craft and naval surface craft**. 2012. Disponível em: <<https://rules.dnvgl.com/servicedocuments/dnv>>. Acesso em: 30 ago.2016.

ELARBI, Moussaoui. **Determinação da Resistência Estrutural Remanescente de Painéis Reforçados Sujeitos à Encurvadura**. Dissertação (Mestrado) – Escola Naval, Alfeite, 2015. 113 p.

ERGUEL engenharia. **Projeto estrutural**. Disponível em: <<http://www.erguel.com.br/site/index.php/projeto-estrutural>>. Acesso em: 30 out. 2016.

FONSECA, Maurílio M. **Arte naval**. 6. ed. Rio de Janeiro: Serviço de Documentação da Marinha, 2002.

GIUGLIANO, Monica. O Brasil entra na corrida pelas riquezas marítimas. **DefesaNet**. Brasília, 04 jul. 2014. Disponível em:

<<http://www.defesanet.com.br/naval/noticia/15879/O-Brasil-entra-na-corrída-pelas-riquezas-maritimas/>>. Acesso em: 25 set. 2016.

GONÇALVES, Marina. **Colisões em uma dimensão**. Relatório – Universidade Estadual de Londrina. Departamento de Física, Londrina, [2010]

HALLIDAY D.; RESNICK R. e WALKER J. **Fundamentos de Física: mecânica**. Volume 1. 8ª edição. Editora LTC, 2009.

HERMUNDSTAD, Ole A.; MOAN, Torgeir. Efficient calculations of slamming pressures on ships in irregular seas. **Journal of Marine Science and Technology**. Noruega: 2007, p. 160-182.

HIBBELER, Russell C. **Resistência dos materiais**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

HORGAN, C. O. **Recent developments concerning Saint Venant's principle: an update**. v.42, p.295-303, 1989.

IERVOLINO, L. A. **Estudo de resistência ao avanço de embarcação de planeio: Comparação entre método Savitsky e CFD**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015. 88 p.

International association of classification societies (IACS). **Classification Societies - What, Why and How?**. 2011. Disponível em: <[http://www.iacs.org.uk/document/public/explained/class\\_whatwhy&how.pdf](http://www.iacs.org.uk/document/public/explained/class_whatwhy&how.pdf) >. Acesso em: 30 out. 2015.

International maritime organization (IMO - HSC CODE). **International code of safety for high-speed craft**. [S. I.]. The Maritime and Coastguard Agency, 2000.

IST SISTEMAS. **Análise CFD**. Disponível em: <<http://istsistemas.com.br/meios-porosos/>>. Acesso em: 03 nov. 2016.

LEWIS, Edward V. **Principles of naval architecture: Stability and Strength**. USA: The Society of Naval Architects and Marines Engineers, 1988.

LLOYD, Adrian R.J.M. **Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Weather**. New York: Ellis horwood limited, 1989.

MACIEL, Roelton. **Setor náutico de Santa Catarina prepara retomada nos negócios**. 09 maio 2016. Disponível em: <<http://dc.clicrbs.com.br/sc/noticias/noticia/2016/05/setor-nautico-de-santa-catarina-prepara-retomada-nos-negocios-5796758.html>>. Acesso em: 25 set. 2016.

MANSOUR, Alaa; LIU, Donald. **The principles of naval architecture series: strength of ships and ocean structures**. USA: The Society of Naval Architects and Marines Engineers, 2008.

MARTHA, Luiz F. **Métodos básicos da análise de estruturas**. Rio de Janeiro: [20--?], 328 p.

MARTINS, Natacha C. da E. **Soldadura de ligas de alumínio de construção naval**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Nova de Lisboa. Departamento de Ciência dos Materiais, Lisboa, 2008. 123 p.

MARZO, Giuseppe R. Di. **Aplicação do método dos elementos finitos na análise de tensões induzidas em cabos umbilicais**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, São Paulo, 2010. 106 p.

MORAES, Hito B.; José M. A. Vasconcellos. **Análise da resistência de onda em catamarãs de alta velocidade**. Rio de Janeiro: 2004, 31 p.

RAYBOULD, Ken. The membrane concept. **Professional BoatBuilder**, n. 150, p. 22-24, 2014.

RAYES, Christian B.; TANCREDI Thiago P. **Parametric model to structural design of high speed boats built with composite materials**. In: International Congress of Mechanical Engineering (COBEM). São Paulo: ABCM, 2013 p. 13.

REIS, Mari A. F.; NETO, Agostinho S. De A. **Simulação de Colisões Dirigidas ao Ensino de Física**. Universidade Luterana do Brasil, Rio Grande do Sul, jul./dez. 2002. 14p.

RIBEIRO, H. J. C. **Equilíbrio dinâmico de cascos planadores**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002. 188 p.

SALLES, Marcos V. **Projeto conceitual/preliminar de uma lancha de 21 pés com abordagem baseada em otimização**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017. 134 p.

SANTOPIETRO, David. **O que são colisões elásticas e inelásticas?** Disponível em: <<https://pt.khanacademy.org/science/physics/linear-momentum/elastic-and-inelastic-collisions/a/what-are-elastic-and-inelastic-collisions>>. Acesso em: 12 set. 2017.

SANTOS, Marco A. da S. **Análise do comportamento estrutural de uma lancha salva-vidas**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Nova de Lisboa, jul. 2011. 121 p.

SAVI, B. M., **Desenvolvimento tecnológico para soldagem MIG de ligas de alumínio 5083 H116**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. 101 p.

SOUZA, Sâmara P. **Elementos estruturais de navios**. Rio de Janeiro: 2011.

TANCREDI, Thiago P. **A estrutura primária do navio**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo 10 fev. 2004.

TEIXEIRA, Mariane M. **Colisões elásticas e inelásticas**. Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/colisoes-elasticas-inelasticas.htm>>. Acesso em: 12 set. 2017.

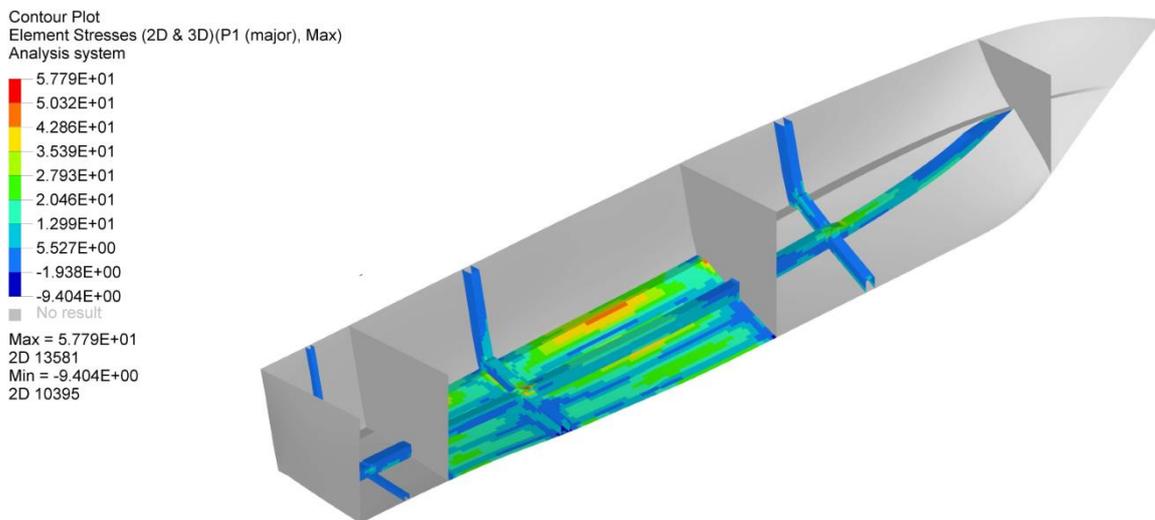
TIMOSHENKO, S.; WOINOWSKI-KRIEGER, S. **Theory of plates and shells**. 2ª edição. EUA: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1959. 580 p.

VIANA, Ricardo L.; FERNANDES, Alcione S. **Colisões elásticas entre duas esferas: Um tratamento intermediário para estudantes de graduação**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

WESTIN, Michelle F.; RIBEIRO, Rafael T. **Método Dos Elementos Finitos Na Simulação De Tensão E Elasticidade Em Placas**. Minas Gerais: 2009.

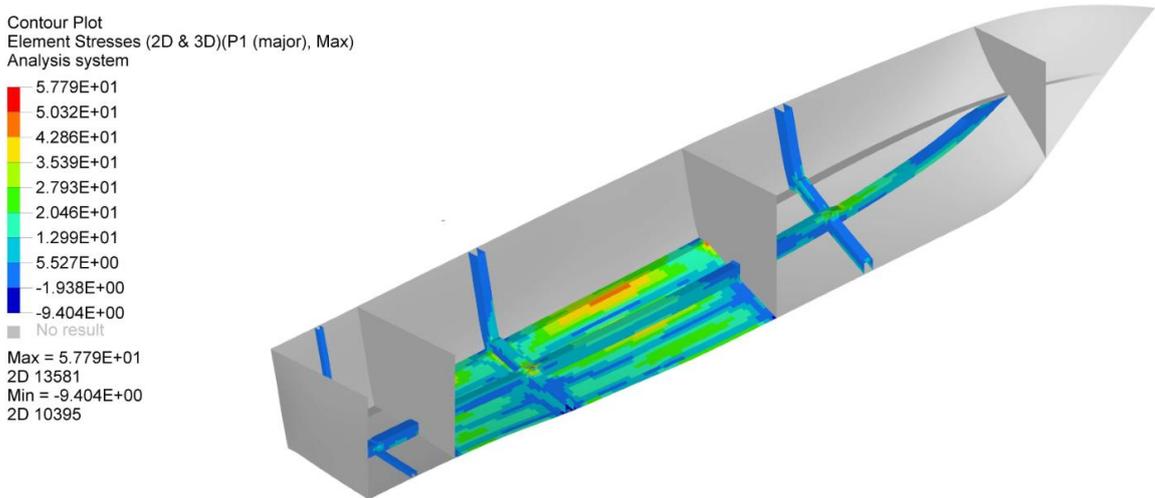
## APÊNDICE A – Resultados das análises sem gap

Figura A 1 – Tensão principal do caso 1 em MPa.



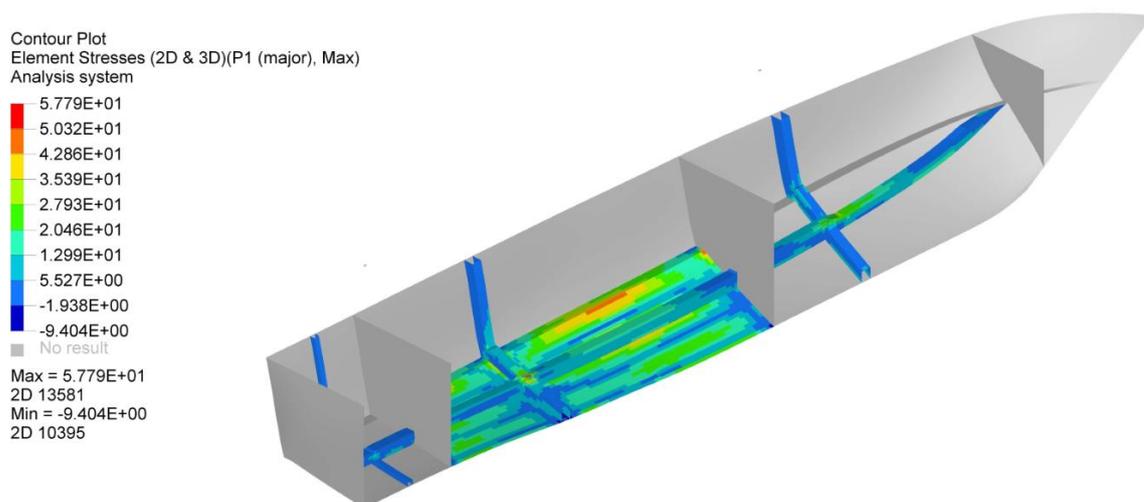
Fonte: O Autor (2017).

Figura A 2 – Tensão principal do caso 2 em MPa.



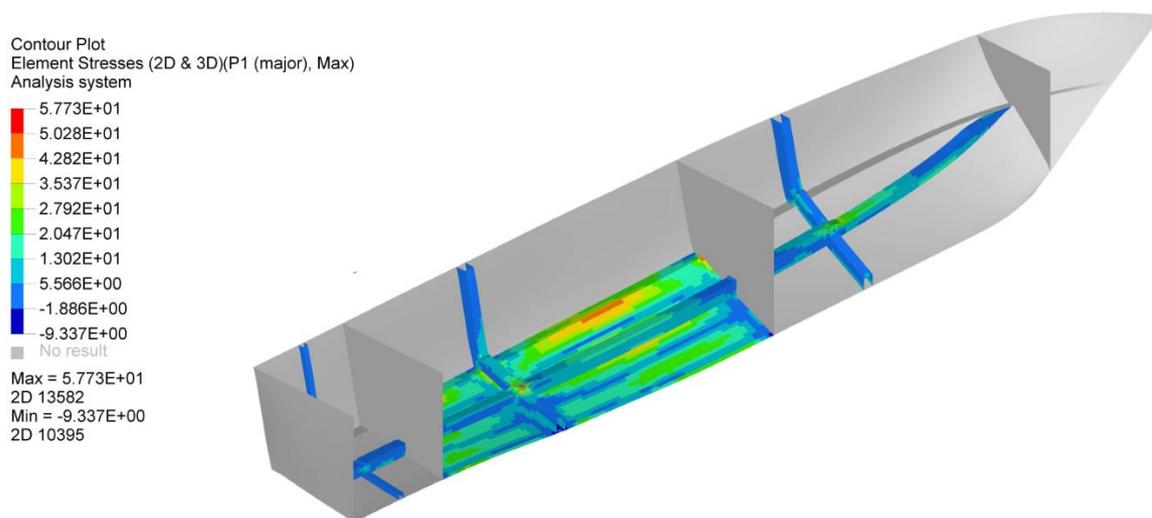
Fonte: O Autor (2017).

Figura A 3 – Tensão principal do caso 3 em MPa.



Fonte: O Autor (2017).

Figura A 4 – Tensão principal do caso 4 em MPa.



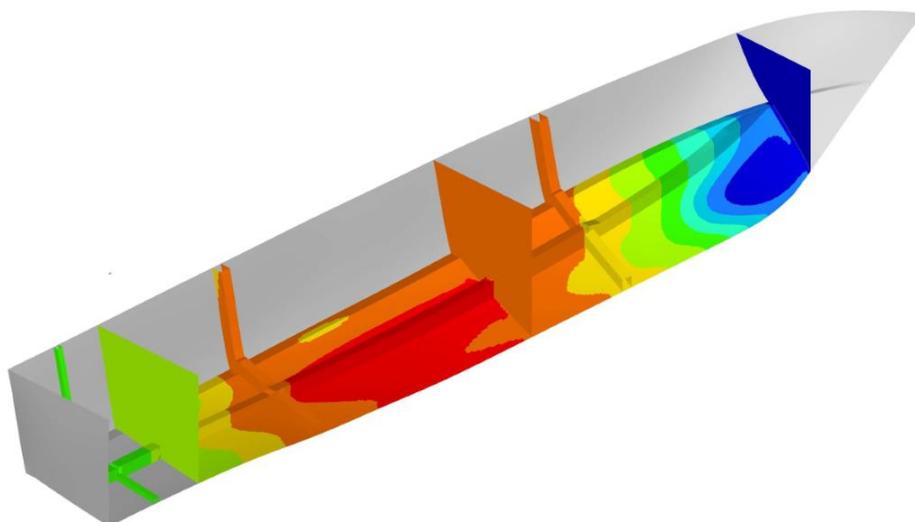
Fonte: O Autor (2017).

Figura A 5 – Deslocamento vertical do caso 1 em mm.

Contour Plot  
Displacement(Z)  
Analysis system

6.259E-06
3.409E-06
5.591E-07
-2.291E-06
-5.141E-06
-7.991E-06
-1.084E-05
-1.369E-05
-1.654E-05
-1.939E-05
No result

Max = 6.259E-06  
Grids 5528  
Min = -1.939E-05  
Grids 37331



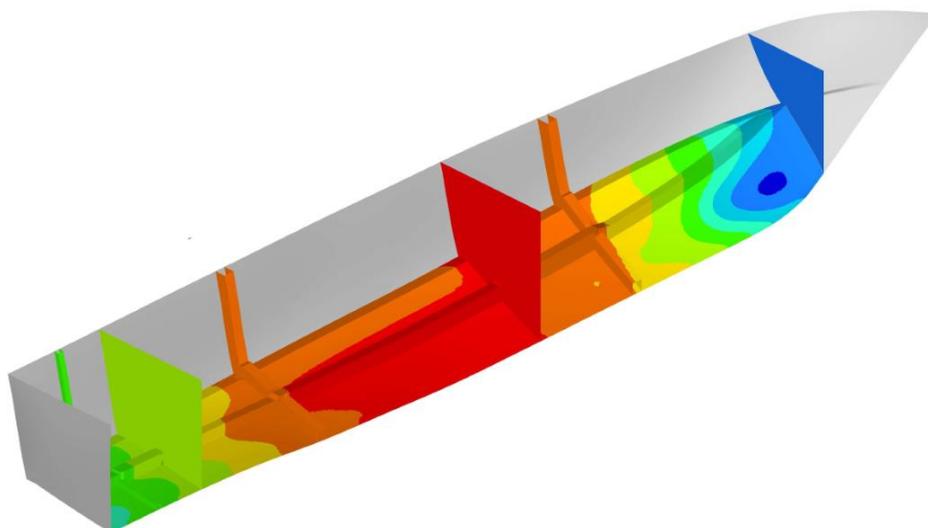
Fonte: O Autor (2017).

Figura A 6 – Deslocamento vertical do caso 2 em mm.

Contour Plot  
Displacement(Z)  
Analysis system

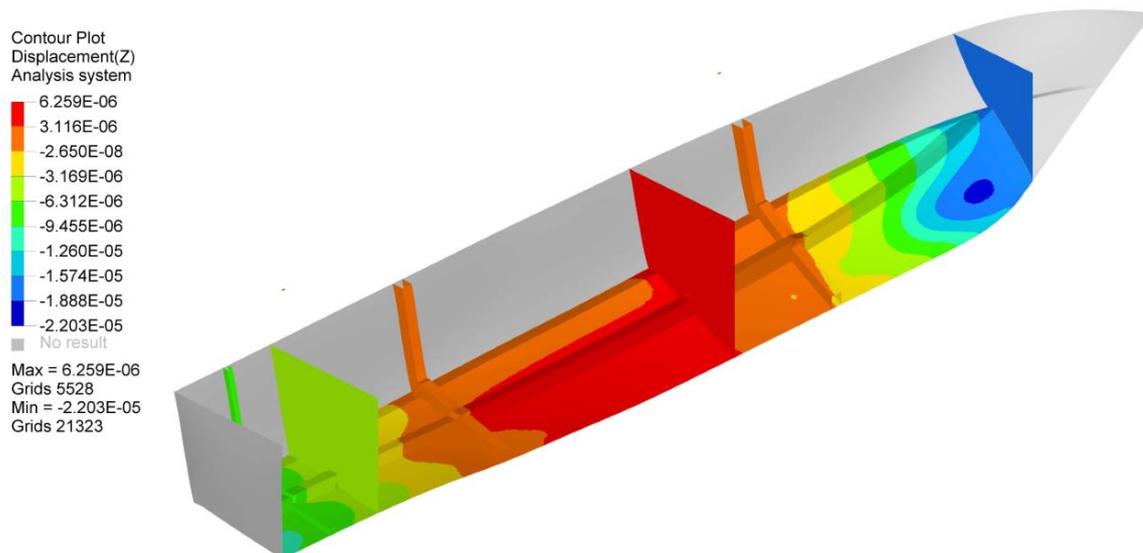
6.259E-06
3.116E-06
-2.650E-08
-3.169E-06
-6.312E-06
-9.455E-06
-1.260E-05
-1.574E-05
-1.888E-05
-2.203E-05
No result

Max = 6.259E-06  
Grids 5528  
Min = -2.203E-05  
Grids 21323



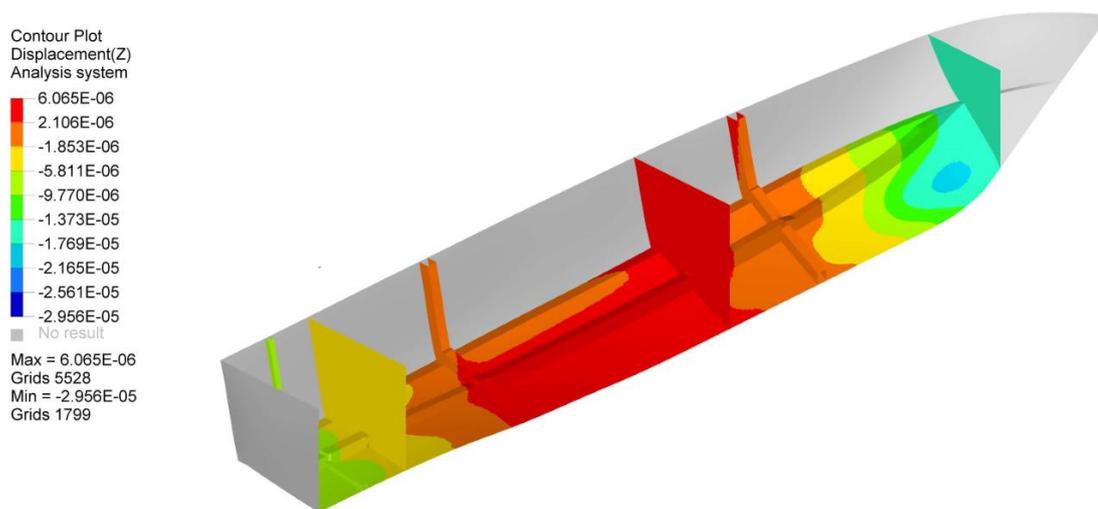
Fonte: O Autor (2017).

Figura A 7 – Deslocamento vertical do caso 3 em mm.



Fonte: O Autor (2017).

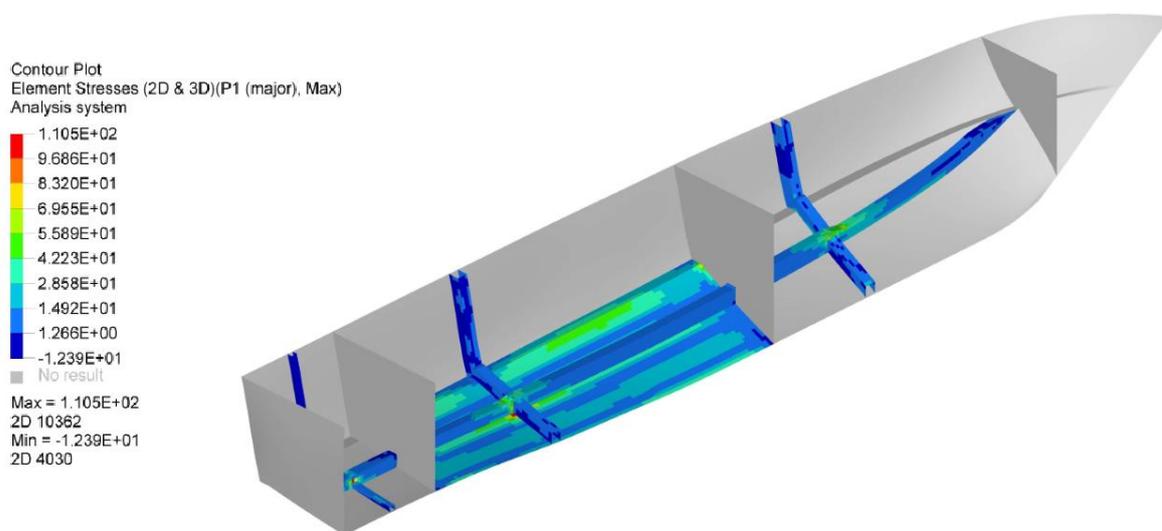
Figura A 8 – Deslocamento vertical do caso 4 em mm.



Fonte: O Autor (2017).

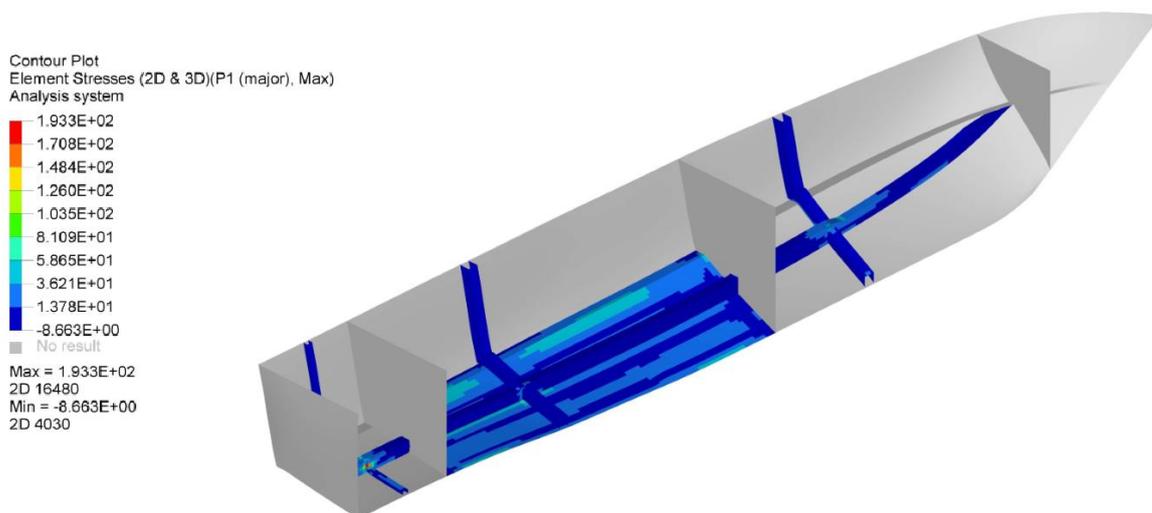
## APÊNDICE B – Resultados das análises com gap

Figura B 1 – Tensão principal do gap de 10mm no fundo 4 em MPa.



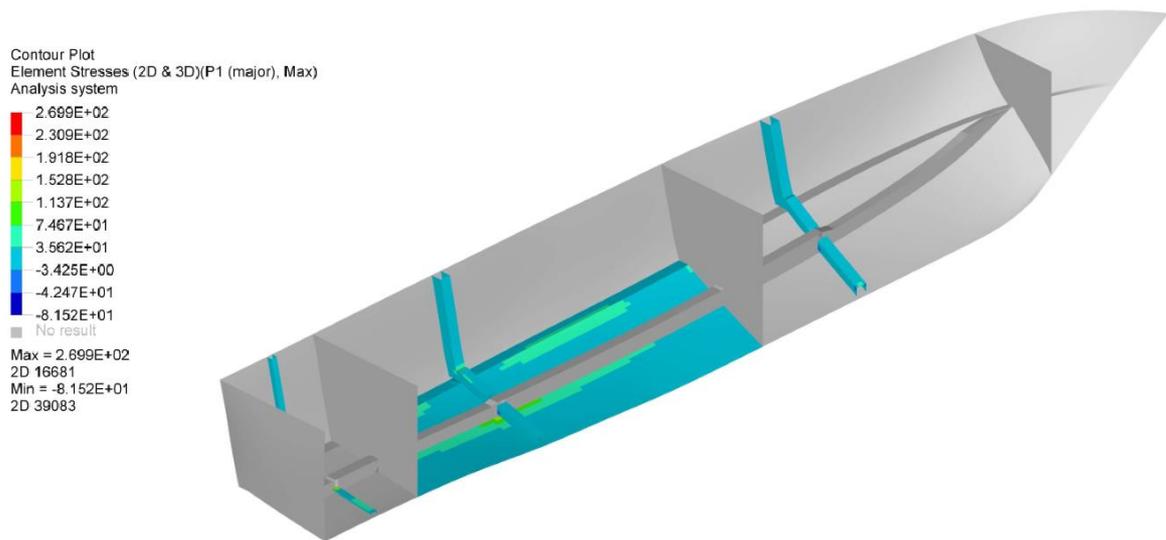
Fonte: O Autor (2017).

Figura B 2 – Tensão principal do gap de 20mm no fundo 4 em MPa.



Fonte: O Autor (2017).

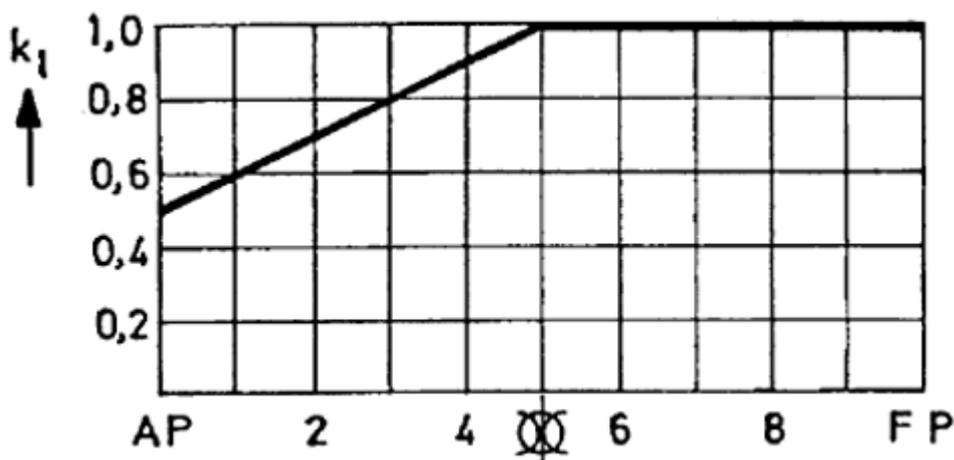
Figura B 3 – Tensão principal do gap de 40mm no fundo 4 em MPa.



Fonte: O Autor (2017).

## ANEXO A

Figura A.1 1 - Fator de distribuição longitudinal para a pressão de slamming.



Fonte: DNV (2012, p. 15).

Tabela A.1 – Coeficientes da função de distribuição de pressão ao longo do casco.

Coeficiente	Valor
$p_1$	2,330e-30
$p_2$	-1,082e-24
$p_3$	4,620e-20
$p_4$	-7,526e-16
$p_5$	5,611e-12
$p_6$	-1,876e-8
$p_7$	2,209e-5
$p_8$	0,03643

Fonte: Adaptado de Amaral (2016).