



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS – CTG  
ENGENHARIA NAVAL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
**ANÁLISE FLUIDO-ESTRUTURA DE UMA EMBARCAÇÃO ATRAVÉS  
DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA COMPUTACIONAL**

Tasso Carvalho da Silva

Orientador: Prof. Adriano Dayvson Marques Ferreira  
Coorientadora: Prof<sup>ª</sup>. Luciete Alves Bezerra

---

Recife – PE

2018

# **ANÁLISE FLUIDO-ESTRUTURA DE UMA EMBARCAÇÃO ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA COMPUTACIONAL**

Tasso Carvalho da Silva

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Naval.

RECIFE

2018

# ANÁLISE FLUIDO-ESTRUTURA DE UMA EMBARCAÇÃO ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA COMPUTACIONAL

TASSO CARVALHO DA SILVA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE ENGENHEIRO NAVAL

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: FLUIDO-ESTRUTURA

APROVADA EM FORMA FINAL PELO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL DEMEC/CTG/UFPE

---

Prof. Msc. ADRIANO DAYVSON MARQUES FERREIRA  
ORIENTADOR/PRESIDENTE

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. LUCIETE ALVES BEZERRA  
CO-ORIENTADORA

---

Prof. Dr. EDWIN ALTHOR JÜRGEN NIELING LUNDGREN

---

Prof. Dr. JOSÉ CLAUDINO DE LIRA JUNIOR

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Msc. ADRIANO DAYVSON MARQUES FERREIRA (UFPE)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. LUCIETE ALVES BEZERRA (UFPE)

---

Prof. Dr. EDWIN ALTHOR JÜRGEN NIELING LUNDGREN (UFPE)

---

Prof. Dr. JOSÉ CLAUDINO DE LIRA JUNIOR (UFPE)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus que me manteve sempre firme na fé e colocou no meu coração para nunca desistir dos sonhos e a Nossa Senhora que sempre esteve intercedendo por mim, nas viagens, na oração do terço.

Agradeço aos meus pais Fernando e Rejane, eles foram meu alicerce para chegar à esta conquista, agradeço ao meu irmão Tiago que sempre me apoiou e a minha namorada Weliclécia que desde o início do curso esteve ao meu lado nos dias bons e ruins.

Agradeço ao casal Dona Terezinha e Seu Mário que no início do curso me acolheram em sua casa como família.

Agradeço ao meu professor orientador Adriano Dayvson e a minha professora coorientadora Luciete Alves que com paciência e vontade de ensinar passaram um pouco dos seus conhecimentos para que eu concluísse este trabalho.

Agradeço aos professores que me ensinaram do maternal ao ensino médio na minha cidade Palmares-PE e a todos os amigos que me ajudaram, que Deus abençoe cada um. Agradeço a cada professor do curso de engenharia naval que me ajudou a estar formado engenheiro naval.

Duc in Altum! Avance para águas mais profundas (Lc 5, 1-11)

## RESUMO

O presente trabalho apresenta como tema central a análise de Interação Fluido-Estrutura de uma embarcação através de simulação numérica computacional. Foi realizada uma revisão bibliográfica dos seguintes tópicos: análise Fluidodinâmica Computacional (CFD), carregamento induzido por ondas avaliando a integridade estrutural do artefato naval e a utilização de *software* de simulação numérica, dessa forma, foi visto a importância da análise de Interação Fluido-Estrutura para a engenharia naval, pois a integridade estrutural dos navios e plataformas que operam no mar é primordial para garantir a segurança dos tripulantes e de todo ecossistema marinho. O casco analisado foi da embarcação de propulsão por kite da tese de doutorado do professor Edwin Althor do curso de engenharia naval da UFPE, com o objetivo de avaliar a integridade estrutural da embarcação devido ao carregamento de ondas. Assim, foi modelada a geometria 3D no *software* Rhinoceros e importada para o *software* Ansys Aqwa *Diffraction* da *Workbench* onde foi analisado o carregamento de ondas obtendo o campo de pressões no casco e posteriormente foram exportados os resultados para o Ansys *Mechanical* voltado para análise estrutural obtendo as tensões e deformações correspondentes para comparação das propriedades do material.

### **Palavras-Chave:**

Análise fluido-estrutura. Dinâmica dos fluidos computacional. Integridade estrutural. Simulação numérica. Ansys Aqwa. Ansys *Structural*.

## **ABSTRACT**

The present work presents as central theme the analysis of fluid-structure interaction of a vessel through numerical computational simulation. A bibliographic review of the following topics was carried out: Computational Fluid Dynamics (CFD), wave-induced loading evaluating the structural integrity of the naval artifact and the use of numerical simulation software. In this way, the importance of fluid interaction analysis structure for shipbuilding as the structural integrity of ships and platforms operating at sea is paramount in ensuring the safety of crew members and the entire marine ecosystem. The hull analyzed was from the kite propulsion vessel of the doctoral thesis of professor Edwin Althor of the naval engineering course of UFPE, with the objective of evaluating the structural integrity of the vessel due to the loading of waves. Thus, the 3D geometry was modeled in the Rhinoceros software and imported into the Ansys Aqwa Diffraction software from the Workbench where the wave loading was analyzed by obtaining the pressure field in the shell and the results were then exported to Ansys Mechanical for structural analysis obtaining the tensions and corresponding deformations for comparison of the properties of the material.

### **Keywords:**

Fluid-structure analysis. Fluid computational dynamics. Structural integrity. Numerical simulation. Ansys Aqwa. Ansys Structural.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Onda harmônica.....	25
Figura 2: Condição de contorno no leito do mar.....	28
Figura 3: Condição de contorno dinâmica da superfície livre.....	29
Figura 4: Elementos finitos.....	33
Figura 5: Malha estruturada.....	34
Figura 6: Malha não estruturada.....	35
Figura 7: Diagrama (Tensão x Deformação).....	37
Figura 8: Falha de um material.....	38
Figura 9: Teoria da tensão normal máxima.....	39
Figura 10: Teoria da energia de distorção máxima.....	40
Figura 11: Interação Fluido-Estrutura de uma via.....	41
Figura 12: Janela de Vento de um kite definido como semi-hemisfera.....	42
Figura 13: Foto do navio Beluga equipado com propulsão auxiliar por kite.....	42
Figura 14: Casco do barco em modelagem computacional 3D.....	43
Figura 15: Casco flutuador do protótipo.....	43
Figura 16: Geometria 3D Módulo Aqwa.....	44
Figura 17: Geração da malha para análise hidrodinâmica.....	48
Figura 18: Características hidrostáticas peso leve.....	50
Figura 19: Graus de liberdade.....	51
Figura 20: Animação campo de pressões.....	53
Figura 21: Malha para análise estrutural.....	57
Figura 22: Restrição do deslocamento.....	57
Figura 23: Comandos oceânicos (APDL).....	58
Figura 24: Ondas cíclicas, condição 0: leve.....	59
Figura 25: <i>Diffraction (Force/Moment vs Frequency)</i> , condição 0: leve.....	59
Figura 26: <i>RAOs (Phase vs Direction)</i> , condição 0: leve.....	60
Figura 27: Ondas cíclicas, condição 1: piloto.....	60
Figura 28: <i>Diffraction (Force/Moment vs Frequency)</i> , condição 1: piloto.....	61
Figura 29: <i>RAOs (Phase vs Direction)</i> , condição 1: piloto.....	61
Figura 30: Ondas cíclicas, condição 2: piloto e 1 passageiro.....	62
Figura 31: <i>Diffraction (Force/Moment vs Frequency)</i> , condição 2: piloto e 1 passageiro.....	62

Figura 32: RAOs (Phase vs Direction), condição 2: piloto e 1 passageiro. ....	63
Figura 33: Ondas cíclicas, condição 3: piloto e carga excepcional. ....	63
Figura 34: Diffraction (Force/Moment vs Frequency), condição 3: piloto e carga excepcional. ....	64
Figura 35: RAOs (Phase vs Direction), condição 3: piloto e carga excepcional. ....	64
Figura 36: Gradiente de pressões, condição 0: leve. ....	66
Figura 37: Gradiente de pressões, condição 3: piloto e carga excepcional. ....	67
Figura 38: Pressão hidrostática, condição 0: leve. ....	69
Figura 39: Deformação total. ....	69
Figura 40: Tensão normal máxima. ....	70
Figura 41: Tensão equivalente de Von Mises. ....	70
Figura 42: Tensão normal (Eixo Z). ....	71
Figura 43: Reação na restrição do deslocamento, região central. ....	71
Figura 44: Pressão hidrostática, condição 3: piloto e carga excepcional. ....	72
Figura 45: Deformação total. ....	72
Figura 46: Tensão normal máxima. ....	73
Figura 47: Tensão equivalente de Von Mises. ....	73
Figura 48: Tensão normal (Eixo Z). ....	74
Figura 49: Reação na restrição do deslocamento, região central. ....	74



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Pesos e calados em condições leve e carregado.....	44
Tabela 2: Características das malhas. ....	49
Tabela 3: Propriedades dos materiais.....	55
Tabela 4: Propriedades da Fibra de vidro e MDF.....	56
Tabela 5: Resultados hidrodinâmicos. ....	65

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$h$  – Profundidade da água (m)

$\zeta_a$  – Amplitude da onda (m)

$H$  – Altura da onda (m)

$\lambda$  – Comprimento de onda (m)

$T$  – Período da onda (s)

$H/\lambda$  – Declividade da onda

$k$  – Número de onda (rad/m)

$\omega$  – Frequência angular (rad/s)

$c$  – Velocidade de fase (m/s)

$\phi_\omega(x, z, t)$  – Potencial de velocidade (m<sup>2</sup>/s)

$t$  – Tempo (s)

$x$  – Distância horizontal (m)

$z$  – Distância vertical (m)

$P$  – Carga aplicada (N)

$\rho$  – Densidade do fluido (kg/m<sup>3</sup>)

$\sigma$  – Tensão nominal (Pa)

$\delta$  – Variação do comprimento de referência (m)

$L_0$  – Comprimento de referência inicial (m)

$A_0$  – Área da seção transversal inicial (m<sup>2</sup>)

$\varepsilon$  – Deformação nominal

# SUMÁRIO

<b>Capítulo 1 - Introdução .....</b>	<b>14</b>
1.1 - Objetivos.....	15
1.1.1 - Objetivos específicos .....	15
1.2 - Organização do trabalho .....	16
<b>Capítulo 2 - Revisão bibliográfica.....</b>	<b>17</b>
2.1 - Fluidodinâmica Computacional (CFD).....	17
2.2 - Carregamento Induzido por ondas e a avaliação da integridade estrutural da embarcação.....	19
2.3 - <i>Software</i> de simulação numérica.....	21
<b>Capítulo 3 - Fundamentação teórica.....</b>	<b>24</b>
3.1 - Ondas regulares .....	24
3.2 - Ondas regulares teoria potencial.....	26
3.2.1 - Equação de Laplace .....	27
3.2.2 - Condição de contorno no leito do mar .....	28
3.2.3 - Condição de contorno dinâmica da superfície livre.....	29
3.2.4 - Condição de contorno cinemática da superfície livre .....	30
3.2.5 - Velocidade de fase.....	31
3.2.6 - Pressão.....	31
3.2.7 - Equação de Morison .....	31
3.3 - Método dos painéis (Teoria potencial 3D) .....	32
3.4 - Elementos finitos .....	33
3.5 - Classificação das Malhas .....	34
3.5.1 - Malhas Estruturadas X Não-Estruturadas.....	35
3.6 - Análise Estrutural do Artefato Naval.....	36
3.6.1 - Diagrama tensão x deformação convencional .....	37

3.6.2 - Critérios de falha: Teoria da tensão normal máxima.....	38
3.6.3 - Critério de Von Mises.....	39
<b>Capítulo 4 - Metodologia.....</b>	<b>40</b>
4.1 - Embarcações de Propulsão por Kite .....	41
4.2 - Geração da Malha Ansys AQWA .....	44
4.2.1 - Basic global mesh options .....	46
4.2.2 - <i>Advanced global mesh options</i> .....	47
4.3 - Características hidrostáticas.....	50
4.4 - Gráficos hidrodinâmicos .....	51
4.5 - Obtenção do campo de pressões.....	52
4.6 – Aplicação do carregamento do oceano a partir de uma análise hidrodinâmica .....	53
4.7 - Análise estrutural.....	55
4.7.1 - Código numérico que automatiza a integração entre o Ansys Aqwa e o <i>Ansys Mechanical</i> .....	58
<b>Capítulo 5 - Resultados Obtidos .....</b>	<b>58</b>
5.1 – Resultados dos gráficos hidrodinâmicos.....	58
5.1.1 - Condição 0: leve .....	59
5.1.2 - Condição 1: piloto .....	60
5.1.3 - Condição 2: piloto e 1 passageiro .....	62
5.1.4 - Condição 3: piloto e carga excepcional.....	63
5.2 - Análise dos resultados hidrodinâmicos.....	64
5.3 - Mapa dos gradientes de pressões atuantes no casco da embarcação .....	66
5.3.1 - Condição 0: leve .....	66
5.3.2 - Condição 3: piloto e carga excepcional.....	67
5.3.3 - Análise dos resultados do campo de pressões.....	67
5.4 - Tensões e deformações máximas no casco da embarcação .....	68
5.4.1 - Condição 0: leve .....	68

5.4.2 - Condição 3: piloto e carga excepcional.....	72
<b>Capítulo 6 - Conclusões.....</b>	<b>75</b>
<b>Capítulo 7 - Trabalhos futuros .....</b>	<b>76</b>
<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>77</b>

## Capítulo 1 - Introdução

Este trabalho está inserido no ramo da engenharia naval, mais especificamente na análise da Interação Fluido-Estrutura de uma embarcação através de simulação numérica computacional.

A Interação Fluido-Estrutura (FSI) é o acoplamento entre leis de diferentes físicas, em especial as da fluidodinâmica e mecânica estrutural. Este acoplamento leva em consideração o campo de pressão ou térmico de uma análise CFD (Fluidodinâmica Computacional) e as consequências diretas deste carregamento na análise estrutural (AMARAL, 2016).

Os problemas de Interação Fluido-Estrutura estão presentes nas mais diversas áreas de engenharia, tais como obras de engenharia civil, mecânica, aeronáutica, naval, entre outras. A complexidade e o número elevado de operações de cálculo envolvidos na análise dos problemas de Interação Fluido-Estrutura levam à busca de técnicas computacionais que auxiliem a resolução de tais problemas, assim, faz crescer a necessidade de ferramentas computacionais cada vez mais eficientes dedicadas a tal área (ANDRÉ et al., 2009).

A engenharia busca sempre zelar pela segurança como um todo, logo é preciso buscar técnicas eficientes para a determinação de características estruturais, em particular, frequências naturais, fatores de amortecimento e resistência à fadiga da estrutura na presença de fluido. No passado esta análise computacional era feita confiando em um total ou substancial desacoplamento entre os fenômenos relacionados ao fluido e aqueles pertinentes aos sistemas estruturais. Hoje em dia, sabe-se que para uma análise mais refinada dos efeitos fluidos estruturais é necessário contabilizar os efeitos provocados por estes dois meios de forma acoplada. Modernas técnicas de análise e maior poder computacional fizeram com esta nova metodologia se tornasse viável (BORGES; LUZIANO; JÚNIOR, 2007).

Dessa forma, é visto a importância do estudo da Interação Fluido-Estrutura para a engenharia naval, pois a integridade estrutural dos navios e plataformas que operam no mar é primordial para garantir a segurança dos tripulantes e de todo ecossistema marinho.

## 1.1 - Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é realizar análise fluido-estrutura em *software* de simulação numérica que realize o acoplamento das pressões oriundas das ondas e que seja capaz de ser aplicado na estrutura da embarcação escolhida.

### 1.1.1 - Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral propõe-se os seguintes objetivos específicos:

1. Escolher uma geometria que sirva para validar o código numérico.
2. Encontrar as pressões atuantes no casco de uma embarcação devido ao carregamento atuante de ondas.
3. Gerar um código numérico através de linguagem de programação APDL (*Ansys Parametric Design Language*).
4. Avaliar a integridade estrutural da embarcação.

## **1.2 - Organização do trabalho**

Neste capítulo foi apresentado a introdução, o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho de conclusão de curso. No capítulo 2, será apresentado a revisão bibliográfica. No capítulo 3, será apresentado a fundamentação teórica. Prosseguindo com o trabalho, no capítulo 4, será apresentado a metodologia. No capítulo 5 serão apresentados os resultados obtidos. Por fim a conclusão e as sugestões para trabalhos futuros.



## Capítulo 2 - Revisão bibliográfica

Nesta seção será apresentado o estado da arte na análise da Interação Fluido-Estrutura de uma embarcação através de simulação numérica para identificar os métodos e materiais que possibilitam a interação do carregamento de ondas com a análise estrutural. É importante abordar três aspectos principais: análise Fluidodinâmica Computacional (CFD), carregamento induzido por ondas avaliando a integridade estrutural do artefato naval e a utilização de *software* de simulação numérica (RAWSON et al., 2001).

### 2.1 - Fluidodinâmica Computacional (CFD)

Pesquisas recentes mostraram que cada vez mais cresce a capacidade do desenvolvimento CFD voltado para os estudos da engenharia naval e oceânica (ELHANAFI, 2016; LAVRO et al., 2017; STERN et al., 2015). CFD é definido como o conjunto de técnicas de simulação computacional usadas para prever os fenômenos físicos ou físico-químicos que ocorrem em escoamentos (FORTUNA, 2000). A maior parte dos usuários dessa tecnologia estão em universidades e laboratórios, esse cenário é importante para a obtenção de conhecimento, mas é necessário que seja utilizado de forma mais intensa no campo de trabalho para a contribuição da construção e segurança naval (STERN et al., 2015).

A dinâmica dos fluidos computacional é de suma importância para o cálculo da resistência ao avanço e integridade estrutural das embarcações. A previsão de resistência é a mais antiga aplicação de CFD em hidrodinâmica de navios (STERN et al., 2015). Para a utilização de CFD é necessário que primeiro seja gerado uma modelagem geométrica, por exemplo, o casco de uma embarcação. Feita a geometria são implementadas as condições de contorno e as condições que o modelo do casco será submetido, pressão, velocidade, força, frequência das ondas, período, entre outros. Na obtenção dos resultados do escoamento em torno do casco é necessária a geração da malha. A malha pode ser de diversos tipos, retangular, triangular, hexagonal,

cada tipo de malha é específica para dada região do modelo realizado (FORTUNA, 2000).

Dentro dos trabalhos estudados nesta revisão bibliográfica, o estudo de Stern et al (STERN et al., 2015) é o que melhor apresentou a importância CFD para a engenharia naval e a gama de aplicações importantes no ramo naval que a ferramenta CFD tem a contribuir e evoluir ainda mais como na otimização de cascos com menor resistência ao avanço, propulsores mais eficientes e no cálculo da integridade estrutural do casco.

Após os estudos de 6 artigos e 2 livros (DENTALE et al., 2017; ELHANAFI, 2016; FORTUNA, 2000; LAVRO et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2011; RAWSON et al., 2001; STERN et al., 2015; YANG; WANG; WU, 2012), verificou-se os seguintes pontos positivos para CFD:

- As simulações são mais rapidamente produzidas que método de tentativa e erro;
- CFD permite que os parâmetros fornecidos sejam facilmente variados em uma ampla faixa, simplificando a otimização e o projeto de equipamentos e evitando transtornos operacionais;
- Evitam a necessidade de emprego de técnicas de aumentar a escala dos modelos;
- Podem fornecer informações mais detalhadas do que as possíveis de serem obtidas através de medidas;
- Permitem o estudo de situações severas de navegação.

Depois da revisão foi verificado as seguintes limitações para CFD:

- Por razões econômicas, a aplicação da CFD é pouco utilizada nas empresas, devido ao alto custo da licença de utilização do *software* de simulação numérica computacional;
- Os dados de entrada: geometria, propriedades do escoamento normalmente são aproximados;
- As condições iniciais e de contorno representam a situação real muito aproximada;
- Limitações dos métodos numéricos.

## 2.2 - Carregamento Induzido por ondas e a avaliação da integridade estrutural da embarcação

A determinação das cargas hidrodinâmicas e a avaliação das estruturas foram estudados como elementos primordiais de um procedimento de concepção de navios e estruturas *offshore* (BEGOVICA; DAYB; INCECIKB, 2017). Aproximadamente 47% dos trabalhos publicados no período de 2008 a 2012 em revistas internacionais, atividades de investigação e desenvolvimento foram relacionados com a computação de cargas induzidas por ondas, seguido por uma estrutura de tópicos especializados (*slamming*, *sloshing*, etc), (HIRDARIS et al., 2014). As ondas oceânicas são a principal fonte excitante que atua em estruturas oceânicas, a modelagem adequada dessas ondas é primordial para a previsão precisa das cargas hidrodinâmicas, da resposta da estrutura e do desempenho da embarcação (ELHANAFI, 2016).

A integridade estrutural dos navios que operam no mar é de suma importância para garantir a segurança dos passageiros e do ecossistema marinho. A não integridade estrutural pode ocasionar uma catástrofe devido a ruptura do casco (RAWSON et al., 2001). Dessa forma, deve ser assegurado que as forças estruturais globais, assim como detalhes estruturais, estejam compatíveis com o carregamento de ondas que irão sofrer, bem como para a vida útil dos requisitos ambientais de emissões de gases de escape obedecendo as organizações de combate à poluição como a Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL) que tem por objetivo estabelecer normas para a diminuição de poluição por óleos e outras substâncias prejudiciais ao meio ambiente vindas de navios (RAWSON et al., 2001). O problema das cargas induzidas por ondas em navios com alta velocidade é um dos mais exigentes em hidrodinâmica, especialmente quando se considera a excitação por grandes amplitudes de ondas (TEMAREL et al., 2016).

Begovica et al (2017) aborda um estudo orientado para a investigação experimental das cargas atuantes no casco em um navio intacto e em um navio danificado, ambos com velocidade zero. Os experimentos foram realizados no laboratório *Kelvin Hydrodynamic*, laboratório da Universidade de *Strathclyde, Glasgow* usando uma escala 1/51 para o modelo do navio DTMB 5415. O tanque de reboque tem 76 m de comprimento, 4,6 m de largura e tem uma profundidade de 2,15 m, está equipado com

um tipo *multi-flap* absorvendo o carregamento da onda. O objetivo principal deste estudo foi fornecer dados de referência sobre cargas que agem num modelo de navio intacto e danificado DTMB 5415 com velocidade zero. Os resultados mostram que os danos simétricos de dois compartimentos localizados na seção de meio navio aumentam significativamente o amortecimento devido à geração de ondas e vórtices durante o movimento de inundação dentro e fora do compartimento.

A aplicação de (ELHANAFI, 2016) analisa as cargas de ondas hidrodinâmicas em uma coluna de água oscilante (OWC), elas são investigadas através de um sistema 2D e modelagem em dinâmica dos fluidos computacional (CFD) 3D baseada nas equações de Navier-Stokes calculadas por Reynolds (RANS) e no esquema de captura de superfície (VOF). Este trabalho tem como objetivo desenvolver e validar um modelo de CFD baseado em solucionador de equações RANS com um esquema de captura de superfícies VOF introduzido por (HIRT; NICHOLS, 1981) (RANS-VOF) para investigar preliminarmente as cargas hidrodinâmicas de onda atuando em um modelo *offshore* em escala OWC. Assim, foi projetado modelos CFD 2D e 3D baseados em RANS-VOF com o objetivo de estudar o carregamento de ondas em um OWC *offshore*-estacionário sobre uma escala larga dos períodos de onda, das alturas da onda e do amortecimento pneumático. O Modelo é validado em bom acordo contra ondas regulares não-lineares.

O projeto de (TEMAREL et al., 2016) tem como objetivo avaliar criticamente as abordagens analíticas, numéricas e experimentais para a analisar as cargas induzidas por ondas em navios. São discutidas as vantagens e desvantagens de um fluxo potencial relativamente mais simples em comparação com métodos de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) mais demorados e as incertezas na previsão de cargas de onda e abordagens probabilísticas para análise de longo prazo de resposta e fadiga. Também foi avaliada a adequação dos desenvolvimentos atuais nos métodos de previsão para atender as necessidades da indústria e os desafios futuros. Foi visto a importância de utilizar *softwares* que possibilitem resultados com alto grau de confiabilidade e processamento computacional de maior capacidade que proporcione realizar análises numéricas considerando a Interação Fluido-Estrutura. A combinação dessas análises permite representar com fidelidade os fenômenos existentes, favorecendo assim para a segurança de toda a tripulação e meio ambiente.

Dentro dos 3 trabalhos (BEGOVICA; DAYB; INCECIKB, 2017; ELHANAFI, 2016; TEMAREL et al., 2016) revisados, os estudos de (BEGOVICA; DAYB; INCECIKB, 2017) foram os mais significativos, pois apresentaram a importância das cargas hidrodinâmicas e integridade estrutural com resultados experimentais, obtidos em tanques de prova por meio de ensaios de reboque de modelos reduzidos.

### 2.3 - **Software de simulação numérica**

Nesta revisão foi estudado a importância de um *software* de simulação numérica voltado para a engenharia naval que simulasse o carregamento de ondas na embarcação e com este resultado poder ser realizada uma análise estrutural da embarcação. O estudo de (YAO et al., 2015) adota a Teoria Integral de Campo Próximo que, com base na superfície integral, utiliza o *software* Ansys para estabelecer o modelo geométrico preciso e depois calcula as cargas de onda e a função de transferência de movimento através dos módulos Aqwa.

O *software* Ansys Aqwa é um conjunto de ferramentas de análise de engenharia para a investigação dos efeitos da onda, vento e corrente sobre estruturas flutuantes fixas e móveis, incluindo sistemas de armazenamento e descarga (FPSO), semisubmersíveis, plataformas (TLPs), navios, sistemas de energia renovável e *design* de quebra-mar, baseados em métodos dos painéis e na teoria potencial 3D (ANSYS, 2010). Atualmente, os projetos requerem que o *design* e a análise da estrutura sejam realizados de forma eficiente em termos de tempo e custo. A poderosa gama de modelos de alta capacidade de análise permite a avaliação rápida de alternativas, em particular no início de um projeto, reduz os custos e auxilia no cumprimento dos prazos do projeto.

Inicialmente é criada a geometria e os elementos que compõem a malha ao redor da superfície do corpo, dessa forma, o programa resolve as equações baseadas nas condições de contorno incluídas no modelo. No *Workbench*, o Aqwa é dividido em dois módulos: *Hydrodynamic Diffraction* e *Hydrodynamic Response* (ESSS, 2016).

O módulo *Diffraction* é responsável pelo cálculo da hidrodinâmica pura, possuindo um sistema dinâmico oscilando livremente, sem a ação de forças externas, no qual o sistema é submetido a uma perturbação inicial e deixa oscilando livremente,

esta perturbação inicial nesse módulo é fornecida a partir da incidência de ondas regulares (ESSS, 2016). No módulo *Diffraction* é possível realizar as seguintes análises:

- Análise *Multibody* envolvendo interações hidrodinâmica entre os corpos;
- É possível extrair coeficientes hidrodinâmicos, massa adicional e amortecimento;
- Obter gráficos de RAOs para os seis graus de liberdade;
- Inserir os efeitos de segunda ordem em ondas;
- Há a possibilidade de utilizar método híbrido, (Painéis + elementos de *Morison*);
- Radiação acoplada + efeito de *Shielding*, este efeito ocorre quando uma onda incide sobre a face externa de um quebra-mar e recircula por dentro atingindo a outra face desse mesmo quebra-mar;
- Obter a distribuição do campo de pressão ao longo da estrutura.

O módulo *Response* refere-se a extrair as respostas desse mesmo sistema dinâmico, porém terá a ação de forças externas, sob o efeito de ondas, vento e corrente. Dentro deste módulo existem três configurações de respostas possíveis: Estabilidade (estática e dinâmica), Resposta no domínio da frequência e Resposta no domínio do tempo.

- Estabilidade (estática e dinâmica): É possível calcular a posição de equilíbrio estático para múltiplos carregamentos ambientais incidindo sobre o sistema, contendo múltiplas linhas de ancoragem. É possível conhecer as tensões nos cabos e realizar diferentes arranjos das linhas de ancoragem visando minimizar esses esforços. É possível extrair os modos naturais e o percentual de amortecimento de cada uma das estruturas envolvidas na modelagem;
- Resposta no domínio da frequência: É possível extrair o espectro de onda, os espectros de resposta da estrutura e das conexões presentes no modelo;
- Resposta no domínio do tempo: É possível obter a elevação temporal da superfície da onda, a variação da posição, velocidade e aceleração da estrutura ao longo do tempo e também é possível extrair a variação temporal das forças agindo nas estruturas e nas conexões presentes no modelo.

- Na interface do Ansys Aqwa é possível obter as respostas fora do centro de gravidade, através deste tipo de configuração é possível obter um mapeamento do nível de aceleração em pontos distribuídos ao longo da superfície da estrutura.

Os resultados de uma análise do módulo *Diffraction* podem ser mapeados em um produto de mecânica Ansys *Structural*, para uma avaliação estrutural adicional e um projeto detalhado (ANSYS, 2017). O módulo *Structural* do *software* Ansys permite resolver problemas complexos de engenharia estrutural e mecânica e fazer decisões melhores e mais rápidas para os projetos. Com a ferramenta de análise de elementos finitos (FEA), disponível no pacote, é possível personalizar e automatizar soluções para os problemas estruturais mecânicos e parametrizá-los para analisar diferentes cenários de projeto, podendo conectá-lo a outras ferramentas de análise física para conseguir uma fidelidade ainda maior (ANSYS, 2017).

## Capítulo 3 - Fundamentação teórica

No estudo da fundamentação teórica foi visto o conceito de ondas regulares utilizando a teoria potencial, Método dos painéis (Teoria potencial 3D), o conceito de elementos finitos, tipos de malhas e análise estrutural.

### 3.1 - Ondas regulares

Segundo (JOURNÉE AND MASSIE, 2001) ondas regulares são ondas de superfície livre que causam cargas periódicas em todo o tipo de estruturas no mar feitas pelo homem. Não importa se estas estruturas estão fixas ou flutuantes ou se estão na superfície ou no fundo do mar. A maioria das estruturas, até mesmo as chamadas fixas, não são realmente fixas; elas respondem de alguma forma as cargas periódicas induzidas pelas ondas. As ondas e os movimentos resultantes dos navios causam resistência adicional, redução da velocidade de serviço e aumentam o consumo de combustível dos navios.

Para analisar sistemas de ondas, é necessário conhecermos as propriedades das componentes harmônicas simples, tais como campo de pressão no fluido, relação entre comprimento de onda e período, transporte de energia. Ondas são geralmente classificadas em duas outras categorias básicas:

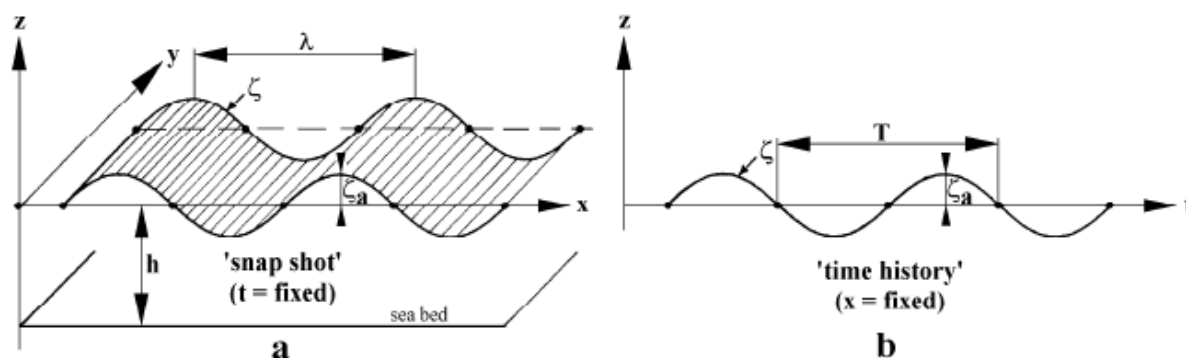
- **Ondas em águas profundas:** quando a profundidade ( $h$ ) for maior que meio comprimento de onda;
- **Ondas em águas rasas:** quando a profundidade for menor do que  $1/20$  do comprimento de onda. O leito do mar tem grande influência nas características destas ondas longas.

A Figura 1 mostra uma onda harmônica vista de duas perspectivas diferentes. A Figura 1-a mostra o que se observaria em uma foto instantânea feita olhando para o lado de um canal de onda (transparente); o perfil da onda é mostrado como uma função da distância ( $x$ ) ao longo do canal em um instante instantâneo ( $t$ ) fixo.



A Figura 1-b é um registro de tempo do nível de água observado em um local ao longo do canal, parece semelhante de várias maneiras a Figura 1-a, porém o tempo (t) substituiu a distância (x) no eixo horizontal.

Figura 1: Onda harmônica.



Fonte: (JOURNÉE AND MASSIE, 2001)

O nível da água tranquila é o nível médio da água ou o nível da água se nenhuma onda estivesse presente. O eixo x é positivo na direção de propagação da onda. A **profundidade da água (h)** é a distância vertical entre o leito do mar e o nível de água tranquila.

O ponto mais alto da onda é chamado de crista e o ponto mais baixo é o cavado. Se a onda é descrita por uma senoide, então sua **amplitude (ζa)** é a distância vertical entre o nível de água tranquila e a crista ou o cavado. A **altura da onda (H)** é a distância vertical entre a crista e o cavado.

A distância horizontal (medida na direção de propagação da onda) entre duas cristas sucessivas é o **comprimento de onda (λ)**. A distância entre duas cristas sucessivas ao longo do eixo do tempo é o **período (T)**. A razão entre a altura da onda e o comprimento de onda é em geral referenciada como **declividade da onda (H/λ)**. Como ondas senoidais são expressas em termos de argumentos angulares, o comprimento de onda e o período são convertidos para ângulos usando o seguinte:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

Onde  $k$  é o número de onda (rad/m) e  $\omega$  é a frequência angular da onda (rad/s). Obviamente, a onda move-se de um comprimento de onda durante um período de modo que sua velocidade ou **velocidade de fase  $c$**  é dada por:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (3)$$

onde:

- $T$  é o período da onda;
- $\lambda$  é o comprimento da onda.

Se a onda move-se na direção positiva do eixo  $x$  (o perfil de onda), a forma da superfície pode ser expressa em função de  $(x)$  e  $(t)$  da seguinte forma senoidal:

$$\zeta = \zeta_a \cos(kx - \omega t) \quad (4)$$

### 3.2 - Ondas regulares teoria potencial

Para utilizar a teoria linear com ondas, é necessário assumir que a inclinação da superfície da água é muito pequena. Isto significa que a declividade da onda é tão pequena que termos nas equações das ondas com magnitude da ordem do quadrado da declividade podem ser ignorados. Usando a teoria linear, segue que deslocamentos harmônicos, velocidades e acelerações das partículas da água e também a pressão harmônica terão uma relação linear com a elevação da onda de superfície (JOURNÉE AND MASSIE, 2001).

O perfil de uma onda simples com declividade pequena assemelha-se a uma função seno ou cosseno e o movimento de uma partícula de água em onda depende da distância abaixo do nível de água tranquila. Por esta razão, escrevemos o potencial de velocidade da seguinte forma:

$$\phi_\omega(x, z, t) = P(z) \sin(kx - \omega t) \quad (5)$$

onde:

$P(z)$  é uma função ainda desconhecida de  $z$ .

O potencial de velocidade das ondas harmônicas tem que satisfazer quatro condições:

1. Equação de Laplace;
2. Condição de contorno no leito do mar;
3. Condição de contorno dinâmica da superfície livre;
4. Condição de contorno cinemática da superfície livre.

### 3.2.1 - Equação de Laplace

Para a obtenção da equação de Laplace foram feitas as seguintes considerações:

- **Escoamentos não viscosos:** ocorre num fluido ideal (não viscoso) o perfil da velocidade é uniforme e as tensões de cisalhamento são nulas já que não existe variação da velocidade (gradiente de velocidade nulo).
- **Escoamentos irrotacionais:** quando as partículas de um fluido, numa certa região, não apresentam rotação em relação a um eixo qualquer.

$$u = \frac{\partial \phi_w}{\partial x} \quad v = \frac{\partial \phi_w}{\partial y} \quad w = \frac{\partial \phi_w}{\partial z} \quad (6)$$

- **Escoamentos incompressíveis:** são escoamentos em que as variações da massa são desprezíveis

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

Combinando a (Eq.6) e a (Eq.7) obtemos a equação de Laplace tridimensional:

$$\frac{\partial^2 \phi_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi_w}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

No caso bidimensional:

$$v = \frac{\partial \phi_w}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

Resulta a equação de Laplace bidimensional:

$$\frac{\partial^2 \phi_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_w}{\partial z^2} = 0 \quad (10)$$

Substituindo a expressão do potencial (Eq.5) na equação de Laplace (Eq.10).

$$\frac{d^2P(z)}{dz^2} - k^2P(z) = 0 \quad (11)$$

Como solução para  $P(z)$ :

$$P(z) = C_1e^{+kz} + C_2e^{-kz} \quad (12)$$

Substituindo a solução para  $P(z)$  (Eq.12) na equação do potencial de onda (Eq.5), obtemos o seguinte:

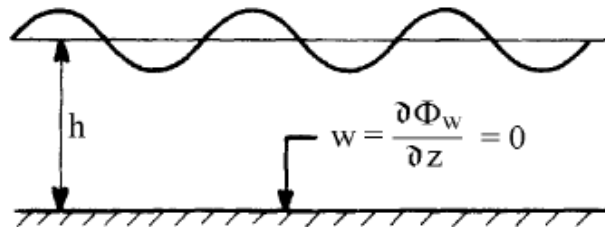
$$\phi_\omega(x, z, t) = (C_1e^{+kz} + C_2e^{-kz}) \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (13)$$

### 3.2.2 - Condição de contorno no leito do mar

Na Figura 2 a seguir é visto a condição de contorno no leito do mar.

$$\frac{\partial \phi_w}{\partial z} = 0 \quad \text{em } z = -h \quad (14)$$

Figura 2: Condição de contorno no leito do mar.



Fonte: (JOURNÉE AND MASSIE, 2001)

Esta condição mostra que o diferencial do potencial de velocidade no leito do mar é nulo. Substituindo o potencial de onda (Eq.13) na condição de contorno de não-penetrabilidade no leito do mar (Eq.14), resulta o seguinte:

$$\frac{C}{2} = C_1e^{-kh} = C_2e^{+kh} \quad (15)$$

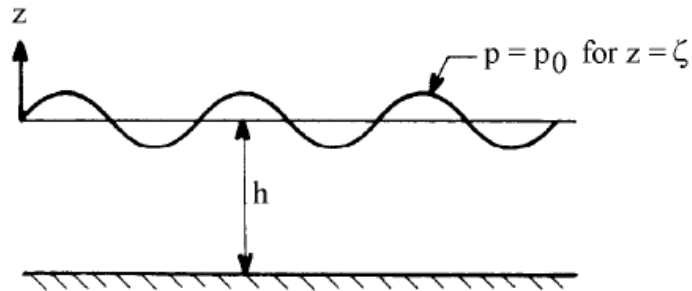
Substituindo este resultado (Eq.15) na expressão do potencial de onda (Eq.13), resulta o seguinte:

$$\phi_\omega(x, z, t) = C \cdot \cosh k(h + z) \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (16)$$

### 3.2.3 - Condição de contorno dinâmica da superfície livre

A Figura 3 mostra a condição de contorno dinâmica da superfície livre, esta condição é utilizada para a obtenção da equação do potencial da onda.

Figura 3: Condição de contorno dinâmica da superfície livre.



Fonte: (JOURNÉE AND MASSIE, 2001)

A pressão do fluido em um determinado ponto é determinada pela **equação de Bernoulli**, que no caso bidimensional com ondas de declividade pequena toma a seguinte forma considerando as seguintes condições:

- Escoamentos não-viscosos;
- Escoamentos incompressíveis;
- Escoamentos irrotacionais;
- Regime não-permanente.

$$\frac{\partial \phi_w}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + gZ = C \quad (17)$$

onde:

- $\rho$  é a densidade do fluido;
- $\phi$  é o potencial de velocidade;
- $p$  é a pressão do fluido.

Aplicando a equação de Bernoulli à superfície livre, resulta:

$$\frac{\partial \phi_w}{\partial t} + g\zeta = 0 \text{ em } z=\zeta \quad (18)$$

O potencial de onda na superfície livre pode ser expandido em uma série de Taylor, tendo em mente que o deslocamento da superfície livre é pequeno. Resultando assim a condição de contorno dinâmica linearizada:

$$\zeta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \text{ em } z=0 \quad (19)$$

Substituindo a equação do potencial da onda (Eq.16) em (Eq.19) obtemos:

$$\zeta = \frac{\omega C}{g} \cdot \cosh kh \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (20)$$

Sabendo que:

$$\zeta_a = \frac{\omega C}{g} \cdot \cosh kh \quad (21)$$

Combinando o resultado anterior (Eq.21) com a expressão do potencial de onda (Eq.16), resulta a seguinte equação para o potencial de onda:

$$\phi_\omega = \frac{\zeta_a g}{\omega} \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (22)$$

### 3.2.4 - Condição de contorno cinemática da superfície livre

Esta condição de contorno significa que a velocidade de uma partícula na superfície livre é igual à velocidade da superfície livre. Portanto, se uma partícula está na superfície livre, ela irá continuar na superfície livre. Isto é expresso matematicamente da seguinte forma:

$$\frac{\partial \phi_w}{\partial z} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \text{ para } z=0 \quad (23)$$

Combinando as condições de contorno dinâmica e cinemática, resulta a condição de **Cauchy-Poisson**:

$$\frac{\partial^2 \phi_w}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi_w}{\partial z} = 0 \text{ para } z=0 \quad (24)$$

Substituindo a expressão do potencial de onda (Eq.22) na condição de Cauchy-Poisson (Eq.24), resulta a **relação de dispersão (Eq.25)**:

$$\omega^2 = kg \tanh kh \quad (25)$$

### 3.2.5 - Velocidade de fase

A velocidade de fase pode ser obtida a partir da relação de dispersão (Eq.25) relacionando com a equação (Eq.3):

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kh} \quad (26)$$

### 3.2.6 - Pressão

A pressão na teoria linear segue da equação de Bernoulli linearizada.

$$p = -\rho g z - \rho \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \quad (27)$$

Combinando o potencial de onda (Eq.22) com a equação de Bernoulli linearizada (Eq.27), resulta a fórmula para o cálculo da pressão:

$$p = -\rho g z + \rho g \zeta_a \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kx - \omega t) \quad (28)$$

### 3.2.7 - Equação de Morison

J.E. Morison, um estudante de graduação da Universidade da Califórnia na época, queria prever forças de onda em um cilindro vertical exposto. Ele simplesmente sobrepôs a força de inércia linear (da teoria de potencial e das opções de oscilação) e a força de arrasto quadrática adaptada (de correntes reais e constantes) para obter a seguinte força resultante (por unidade de comprimento) (JOURNÉE AND MASSIE, 2001):

$$F(t) = F_{inercial}(t) + F_{arrasto}(t) \quad (29)$$

$$F(t) = \frac{\pi D^2}{4} \rho C_m \frac{du}{dt} + \frac{1}{2} \rho C_d D \cdot u(t) |u(t)| \quad (30)$$

onde:

- $F(t)$  é a força em linha paralela à direção do fluxo;
- $D$  é o diâmetro do cilindro;
- $\rho$  é a densidade da água;
- $C_m$  é o coeficiente de inércia;
- $C_d$  é o coeficiente de arrasto;
- $\frac{du}{dt}$  é a aceleração do fluxo;
- $u(t)$  é a velocidade do fluxo.

### 3.3 - Método dos painéis (Teoria potencial 3D)

É um método numérico para o cálculo do escoamento potencial em torno de um corpo, onde o potencial de velocidades é representado por uma distribuição de singularidades (fontes-dipolos) sobre a superfície molhada do corpo. Originalmente desenvolvido para quando não havia velocidade de avanço, posteriormente foi aperfeiçoado distribuindo-se fontes de Rankine sobre a superfície do corpo e a superfície livre do fluido.

O método dos painéis divide a superfície do navio e do fluido ao redor em elementos discretos (painéis). Em cada um destes elementos uma distribuição de fontes e sumidouros é definida, satisfazendo a equação de Laplace. De acordo com (DNV.GL, 2017):

- O comprimento da diagonal dos painéis deve ser menor que 1/6 do menor comprimento de onda analisado;
- Uma malha mais densa deve ser aplicada em áreas com mudanças bruscas de geometria (cantos vivos) e na região da linha d'água quando calculando forças de deriva de ondas;
- Devem ser realizados testes de convergência através do aumento progressivo do número de painéis;
- No cálculo de elevação da superfície da água e velocidades do fluido, uma malha mais densa, da ordem de 1/10 do menor comprimento de onda, deve ser utilizada.

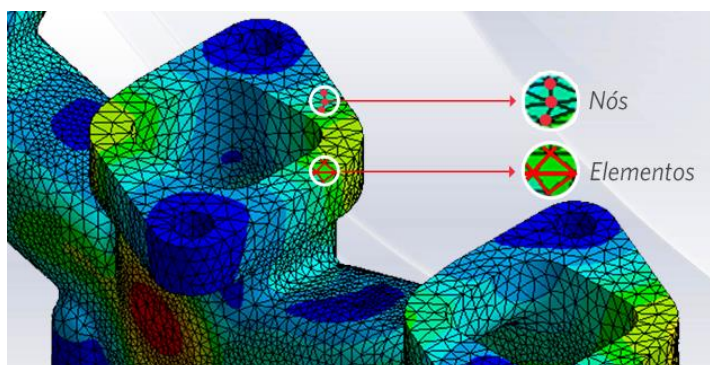


### 3.4 - Elementos finitos

O método dos elementos finitos propõe que o número infinito de variáveis desconhecidas, sejam substituídas por um número limitado de elementos de comportamento bem definido. Essas divisões podem apresentar diferentes formas, tais como a triangular, quadrilateral, entre outras, em função do tipo e da dimensão do problema. Como são elementos de dimensões finitas, são chamados de elementos finitos, termo que nomeia o método (GIUSEPPE MIRLISENNA, 2016).

Os elementos finitos são conectados entre si por pontos, os quais são denominados de nós ou pontos nodais. Ao conjunto de todos esses elementos e nós dá-se o nome de malha. Em função dessas subdivisões da geometria, as equações matemáticas que regem os comportamentos físicos não serão resolvidas de maneira exata, mas de forma aproximada por este método numérico. A precisão do Método dos Elementos Finitos (FEM) depende da quantidade de nós e elementos, do tamanho e dos tipos de elementos da malha. Ou seja, quanto menor for o tamanho e maior for o número deles em uma determinada malha, maior a precisão nos resultados da análise (GIUSEPPE MIRLISENNA, 2016).

Figura 4: Elementos finitos.



Fonte: Giuseppe Mirlisenna, 2016

O Método dos Elementos Finitos pode ser aplicado na resolução e diagnóstico de problemas de análise estrutural por meio da obtenção de deslocamentos, deformações e tensões, também permite representar diversos cenários e avaliar o desempenho de produtos com a aplicação de critérios de resistência, rigidez ou fadiga. Além

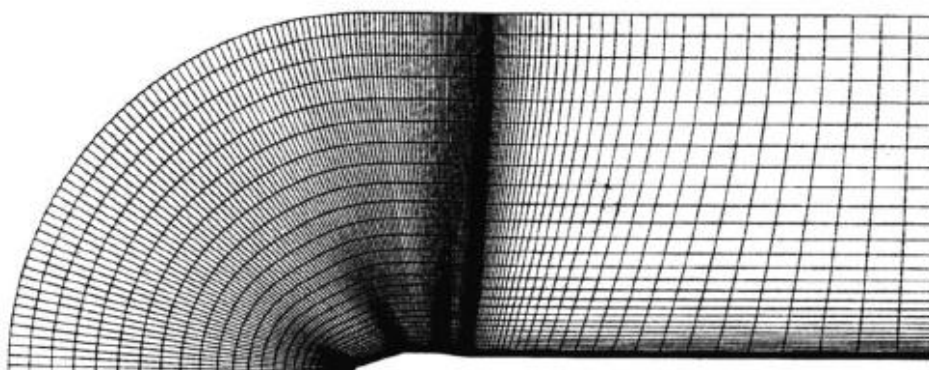
disso, variações do Método dos Elementos Finitos viabilizam a análise térmica, acústica, dinâmica, eletromagnética e de fluídos para casos mais simples de comportamento linear ou outros não lineares, como quando há grandes deslocamentos ou contato entre partes de uma montagem (GIUSEPPE MIRLISENNA, 2016).

É possível, portanto, com as tecnologias atuais realizar integrações com os *softwares* utilizados no desenvolvimento de representação geométrica – conhecidos como **CAD** (*Computer Aided Design*) – com os sistemas baseados no Método dos Elementos Finitos – denominados de **CAE** (*Computer-Aided Engineerig*). Essa integração permite alcançar melhores resultados com análises mais eficientes e ágeis.

### 3.5 - Classificação das Malhas

Quanto à estrutura de dados, as malhas podem ser estruturadas ou não estruturadas. A malha estruturada é caracterizada por conectividade regular, o conjunto de coordenadas e conectividades são mapeados diretamente nos elementos da matriz dos pontos da malha, i.e., pontos vizinhos no domínio físico são elementos vizinhos na matriz dos pontos da malha. Possui portanto, uma estrutura de dados global (e direcional) intrínseca (MACIEL LYRA, 1999). A malha da Figura 5 é um exemplo de malha estruturada, pois apresenta uma estrutura, ou regularidade, na distribuição espacial dos pontos.

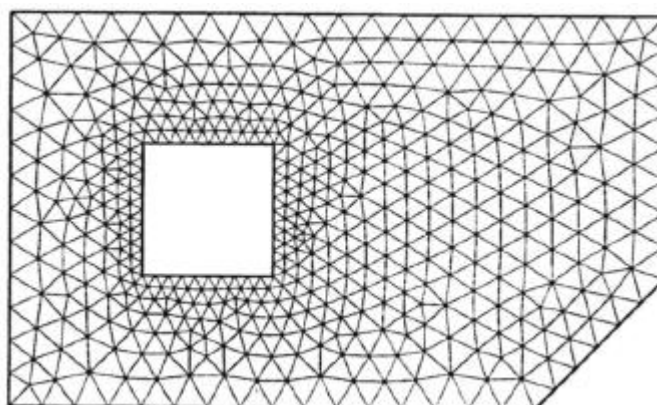
Figura 5: Malha estruturada.



Fonte: (FORTUNA, 2000)

Malha não estruturada é caracterizada pela conectividade irregular, são adequadas para domínios arbitrários e passíveis de refinamento de malha adaptativa. Requer o uso de uma matriz adicional com informações topológicas da malha, i.e., as informações das conexões de um ponto com os seus vizinhos (“matriz de conectividades”) requerendo uma estrutura de dados local (MACIEL LYRA, 1999). A Figura 6 é um exemplo de uma malha não estruturada, possui esse nome devido a ausência de regularidade na disposição dos pontos. Em geral, essa classe de malhas permite a discretização de domínios com geometrias complexas de forma mais direta do que seria possível com malhas estruturadas. Normalmente, malhas não estruturadas são também não uniformes.

Figura 6: Malha não estruturada.



Fonte: (FORTUNA, 2000)

### 3.5.1 - Malhas Estruturadas X Não-Estruturadas

#### Malhas Estruturadas:

Vantagens:

- Implementação simples e eficiente de uma grande classe de algoritmos de solução existentes (*ADI, Multigrid, Métodos Upwind*, etc.);
- Implementação simples e eficiente de algoritmos em computadores de arquiteturas vetorial e/ou paralela;
- Implementação eficiente em termos de requisitos de CPU e memória;

Desvantagens:

- Inadequadas para lidar com domínios complexos;
- Inapropriadas para refinamento adaptativo de malha local;

### **Malhas Não-Estruturadas:**

Vantagens:

- Muito flexível para lidar com domínios complexos;
- Ambiente natural para incorporação de adaptação de malhas;

Desvantagens:

- Maior demanda de tempo de processamento e memória (endereçamento indireto, matrizes topológicas);
- Maior complexidade na implementação de algoritmos em qualquer arquitetura de computadores;

## **3.6 - Análise Estrutural do Artefato Naval**

Para as estruturas flutuantes, tão importante quanto a segurança à estabilidade e à sobrevivência, devido à perda de flutuabilidade oriunda de um alagamento, é a segurança à falhas estruturais que envolve a previsão das cargas impostas a estrutura em serviço, a análise das tensões causadas por aqueles carregamentos em milhares de componentes estruturais, a especificação dos materiais a serem utilizados com base em suas propriedades de resistência, custo, soldabilidade, facilidade de manutenção e a escolha do arranjo estrutural (PERNAMBUCO; NAVAL, 2007).

Uma embarcação deve possuir resistência estrutural suficiente para suportar as cargas sem sofrer falhas ou deformações permanentes. O mesmo poderia ser dito para qualquer estrutura, máquina ou dispositivo projetado pela engenharia. Como qualquer outro objeto de engenharia, o projeto estrutural de embarcações depende da avaliação precisa das cargas, ou das forças, impostas à estrutura durante sua vida útil. Para embarcações, no mar, as cargas resultam de uma ampla variedade de fontes inerentes a natureza, com amplitudes que não são determinadas de maneira determinística (PERNAMBUCO; NAVAL, 2007).

Sempre que uma força é aplicada a um corpo, esta tende a mudar a forma e o tamanho dele. Essas mudanças são denominadas **deformações** e podem ser altamente visíveis ou praticamente imperceptíveis se não forem utilizados equipamentos que façam medições precisas. As **tensões** são forças internas de reação agindo entre as partículas de uma seção transversal de um corpo de material deformável devido às forças externas aplicadas no corpo.

### 3.6.1 - Diagrama tensão x deformação convencional

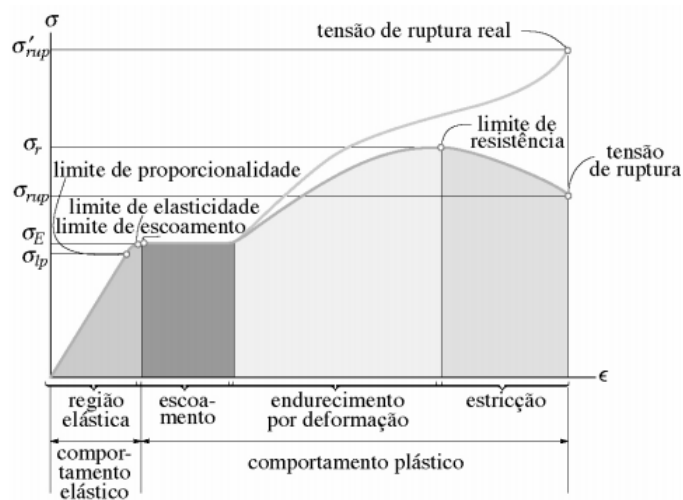
Tensão nominal ou de engenharia: Determina-se com os dados registrados, dividindo-se a carga aplicada  $P$  pela área da seção transversal inicial do corpo de prova  $A_0$ .

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (31)$$

Deformação nominal ou de engenharia: É obtida da leitura do extensômetro, ou dividindo-se a variação do comprimento de referência,  $\delta$ , pelo comprimento de referência inicial  $L_0$ .

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad (32)$$

Figura 7: Diagrama (Tensão x Deformação).



Fonte:(HIBBELER, 2009)

### 3.6.2 - Critérios de falha: Teoria da tensão normal máxima

A teoria da tensão normal máxima afirma que um material frágil falhará, quando a tensão principal máxima  $\sigma_1$  no material atingir um valor limite igual ao limite de resistência à tensão normal que o material pode suportar quando submetido à tração simples (HIBBELER, 2009). Se o material estiver sujeito ao estado plano de tensão, exige-se que:

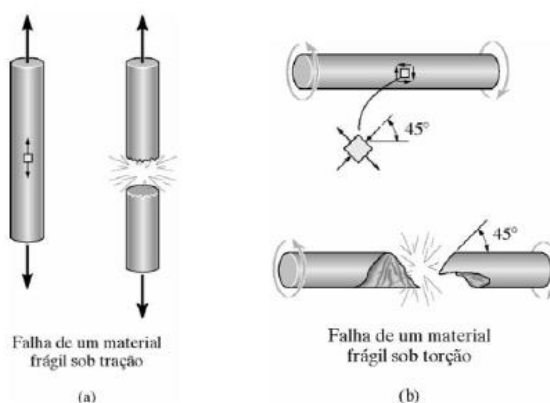
- $|\sigma_1| = \sigma_r$ ; (33)

- $|\sigma_2| = \sigma_r$ . (34)

Essas equações são mostradas no gráfico da Figura 9. Aqui, vemos que, se a coordenada da tensão ( $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ ) em um ponto no material cair sobre o contorno ou fora da área sombreada, diz-se que o material sofreu ruptura. Essa teoria é geralmente atribuída a W. Rankine, que a propôs em meados do século XIX. Constatou-se, por meios experimentais, que a teoria está de acordo com o comportamento de materiais frágeis cujos diagramas tensão-deformação são semelhantes sob tração e sob compressão (HIBBELER, 2009).

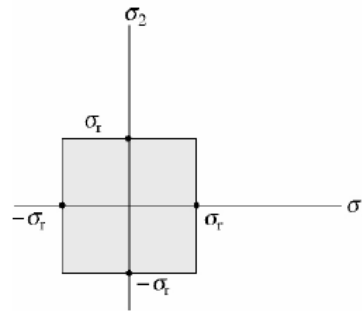
Em um ensaio de tração, a ruptura ocorre quando a tensão normal atinge o limite de resistência  $\sigma_r$  (Figura 8a) . Além disso, em um ensaio de torção, a ruptura frágil ocorre devido à tensão de tração máxima, desde que o plano de ruptura para um elemento esteja a  $45^\circ$  em relação à direção de cisalhamento (Figura 8b).

Figura 8: Falha de um material.



Fonte: (HIBBELER, 2009)

Figura 9: Teoria da tensão normal máxima.



Fonte: (HIBBELER, 2009)

### 3.6.3 - Critério de Von Mises

A teoria de von Mises é utilizada para materiais dúcteis, são materiais que podem ser submetidos a grandes deformações antes de sofrer ruptura, apresentando resultados melhores com dados experimentais e, desse modo, é geralmente mais utilizado nas validações estruturais. O critério de Von Mises leva em consideração os conceitos de energia de distorção de um elemento, que também pode ser interpretado como a energia necessária para que ocorra mudança de forma em um elemento. Esse critério define que um elemento estrutural (dúctil) irá falhar se a energia associada à mudança de forma de um corpo, submetido a um carregamento multiaxial, ultrapassar a energia de distorção de um corpo de prova submetido a um ensaio uniaxial de tração (ENSUS, 2017). A tensão equivalente de Von Mises, pode ser calculada por:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (35)$$

onde:

$\sigma_e$ : Tensão equivalente de Von Mises;

$\sigma_1$ : Tensão máxima principal;

$\sigma_2$ : Tensão média principal;

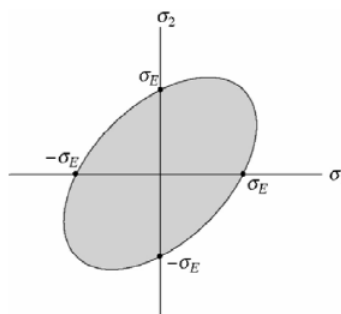
$\sigma_3$ : Tensão mínima principal.

Para casos de estado plano de tensão, podemos considerar a parcela de  $\sigma_2 = 0$ , resultando na Equação (32):

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2} \quad (36)$$

Graficamente, podemos representar a Equação (32) como:

Figura 10: Teoria da energia de distorção máxima.



Fonte: (HIBBELER, 2009)

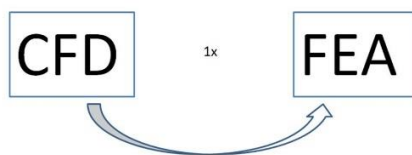
## Capítulo 4 - Metodologia

Para a realização deste trabalho foi visto a importância da utilização da tecnologia CFD e do estudo de um *software* numérico que possibilite a interação do carregamento de ondas com a análise estrutural. Após a revisão bibliográfica foi observado que o *software* que tem as melhores ferramentas voltadas para o tema proposto foi o Ansys. Assim, para o presente trabalho que é voltado para a engenharia naval, que estuda a análise fluido-estrutura serão utilizados os módulos Ansys Aqwa *Diffraction* voltado para o carregamento de ondas e o Ansys *Structural* voltado para análise estrutural.

Após o estudo de (ANSYS, 2017) foi encontrado a vantagem de que o módulo Aqwa é especialmente objetivado para a indústria naval, entretanto foi encontrado uma limitação de acoplamento com o módulo *Structural*, tendo assim que realizar uma programação computacional que leve os dados do módulo Aqwa *Diffraction* para o *Structural*. Em virtudes desses fatos, para proposta de melhoria é necessário que haja uma ligação de dados diretamente entre os dois módulos, facilitando este tipo de análise. Assim, será realizada uma Interação Fluido-Estrutura de uma via, onde a análise CFD será resolvida no módulo Aqwa *Diffraction*, depois os resultados serão exportados e importados para dentro do módulo *Structural*.



Figura 11: Interação Fluido-Estrutura de uma via.



Fonte:(AMARAL, 2016)

Primeiramente, será selecionada uma geometria do casco para a validação do código numérico. A geometria em questão será do barco de propulsão por kite (LUNDGREN, 2015), por já ter a modelagem 3D e o modelo real, mas também, porque existe a busca das características hidrodinâmicas e estruturais da embarcação (LUNDGREN, 2015).

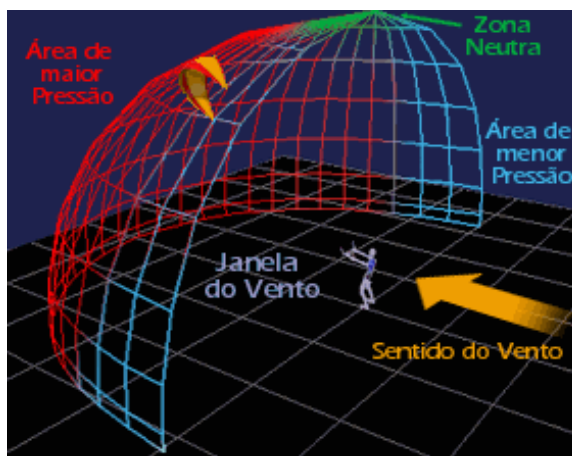
Escolhida a geometria, será importada para o *software* Ansys Aqwa e dessa forma, será gerada a malha no casco e posterior aplicação das condições de contorno e obtenção do campo de pressões atuante no casco da embarcação. A verificação do campo de pressões encontrado será feita através de estudos comparativos.

Prosseguindo, será gerado um código numérico através de linguagem de programação por comandos *Ansys Parametric Design Language* (APDL). Ao final será utilizado o *software* Ansys Mechanical para a geração da geometria estruturada da embarcação, obtendo as tensões equivalentes de Von Mises e deformações correspondentes para comparação das propriedades do material, avaliando a integridade estrutural da embarcação devido a diversos carregamentos e frequências de ondas.

#### 4.1 - Embarcações de Propulsão por Kite

São embarcações que utilizam a força do vento por meio de uma pipa dirigível de alto desempenho aerodinâmico conhecida como Kite. O Kite apresenta a movimentação definido por espaço geométrico chamado de **janela de vento** e possibilita a geração de forças perpendiculares á direção do vento. A janela de vento é a região em que o kite voa em relação ao utilizador do kite. A Figura 12 mostra a forma de meio hemisfério definido pela direção do vento e o raio, isto é o comprimento das linhas do kite (LUNDGREN, 2015).

Figura 12: Janela de Vento de um kite definido como semi-hemisfera.



Fonte:(VERLANGIERI, 2013)

Na Figura 13 está um exemplo de um navio cargueiro aproximadamente 120 metros de comprimento com um sistema utilizando um kite de 200 metros quadrados com o intuito de apresentar uma forma de economizar combustível em navios de porte.

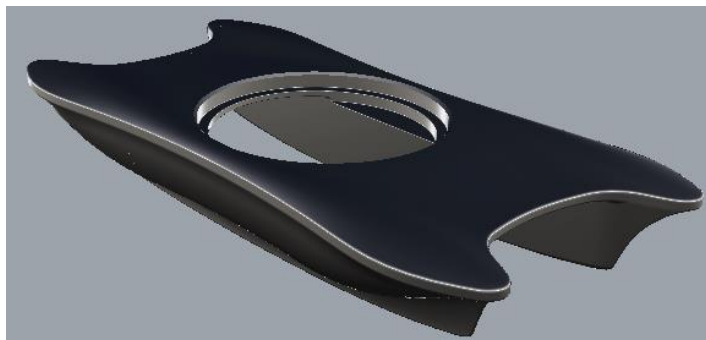
Figura 13: Foto do navio Beluga equipado com propulsão auxiliar por kite.



Fonte: (SKYSAILS, 2011)

Neste trabalho foi estudado um barco movido por kite (LUNDGREN, 2015), onde será analisado a Interação Fluido-Estrutura, ou seja, será estudado o comportamento da estrutura da embarcação devido a incidência de ondas regulares para diferentes frequências. Para a modelagem da embarcação foram utilizados sistemas de projeto de máquinas computacionais CAD em 3D, na Figura 14 é visto o modelo do casco no *software Rhinoceros*:

Figura 14: Casco do barco em modelagem computacional 3D.



Fonte: (LUNDGREN, 2015)

Este casco possui as seguintes características:

- Comprimento: 4,015 (m);
- Boca: 2,000 (m);
- Pontal: 0,680 (m).

A Figura 15 mostra o protótipo confeccionado:

Figura 15: Casco flutuador do protótipo.



Fonte: (LUNDGREN, 2015)

Para a realização deste trabalho foi necessário utilizar os dados de pesos e calados para as condições feitas na tese de doutorado do professor Edwin Althor. Com estes dados é possível obter os resultados dos carregamentos hidrodinâmicos para tais condições vistas na Tabela 1:

Tabela 1: Pesos e calados em condições leve e carregado.

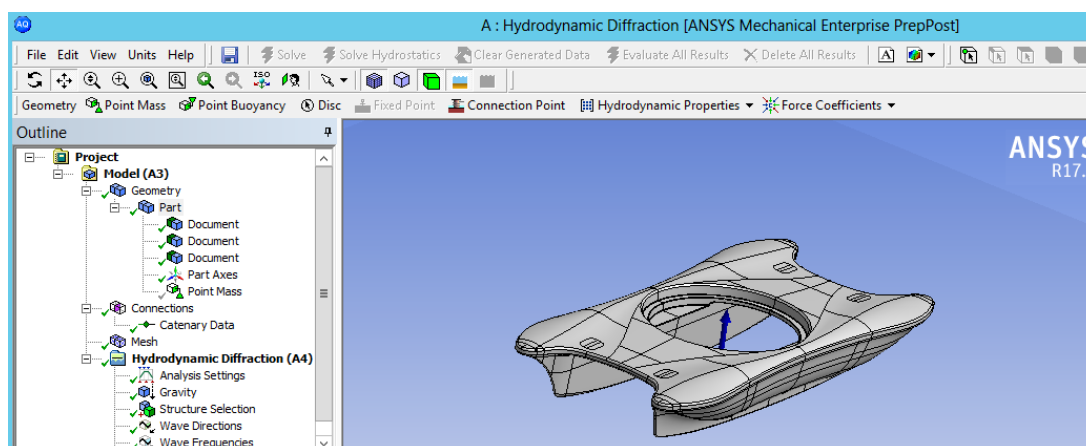
Condição	Peso operacional (kg)	Calado (m)
Condição 0: leve	140	0,246
Condição 1: piloto	220	0,293
Condição 2: piloto e 1 passageiro	300	0,333
Condição 3: piloto e carga excepcional	380	0,368

Fonte: (LUNDGREN, 2015)

## 4.2 - Geração da Malha Ansys AQWA

Para a realização deste trabalho foi necessário a utilização dos computadores do departamento de Engenharia Civil, por possuírem servidores de alto desempenho. No módulo *Aqwa Diffraction* foi importada a geometria da embarcação vinda do *software Rhinoceros*. Assim, foi necessário a geração da malha para posterior cálculo do campo de pressões. Na Figura 16 é visto o modelo 3D na interface do módulo *Aqwa Diffraction*:

Figura 16: Geometria 3D Módulo Aqwa.



Fonte: Ansys Aqwa *Diffraction*

Inicialmente no ícone **Geometry** do Aqwa é necessário importar a embarcação e de forma essencial para o projeto é que só contenham superfícies, pois o módulo *Aqwa Diffraction* apenas realiza o estudo do campo de pressões para as superfícies do corpo. Prosseguindo é necessário dividir a embarcação no calado proposto para o estudo com o comando **Slice**, que é uma divisão, em obras vivas (abaixo da linha de água) e em obras mortas (acima da linha de água).

Assim, já é possível abrir o ícone **Model** e primeiramente inserir no modelo os elementos de massa pontual. As propriedades podem ser inseridas manualmente ou podem ser programadas. Se a definição de massa for definida como manual, a massa do ponto deve ter todas as suas propriedades introduzidas pelo usuário (coordenadas de massa, x, y e z). Se for utilizada uma massa pontual controlada pelo programa, a massa e a posição horizontal serão calculadas a partir dos elementos do painel na estrutura, isto é, excluindo linhas tubulares, linhas de tubo delgadas e corpos de flutuação de pontos. A massa será igual a massa de água deslocada, e a posição horizontal será a do centro da flutuabilidade.

Os momentos de inércia de massa, raios de giros e posição vertical (z) não podem ser determinados pelo programa e devem sempre ser inseridos. Momentos de inércia podem ser definidos diretamente ou através da entrada de raios de giros. Inserindo os raios de giros  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  e  $K_{zz}$ , os valores de inércia são calculados automaticamente. Se for selecionado a entrada direta de inércia, devem ser inseridos os valores  $I_{xx}$ ,  $I_{yy}$  e  $I_{zz}$ . O momento de inércia de massa mede o grau em que um objeto resiste à aceleração de rotação em torno de um eixo, e é o análogo à massa para rotação. O raio de giro é definido pela raiz quadrada da relação entre o momento de inércia de massa e a área da superfície.

Dessa forma, com o auxílio do *software Rhinoceros*, os valores dos raios de giros no centroide da embarcação  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  e  $K_{zz}$  foram calculados utilizando a opção **AreaMoments**:

- $K_{xx} = 0,6514$  m;
- $K_{yy} = 1,1160$  m;
- $K_{zz} = 1,2638$  m.

Depois de inserir as massas pontuais, é importante resolver somente as características hidrostáticas da embarcação, então os resultados hidrostáticos estarão disponíveis e os valores da massa serão calculados antes de realizar a análise Aqwa completa.

No ícone **Mesh** existem opções globais que se aplicam a todas as partes e corpos não suprimidos. Existem também objetos de controle de malha locais que podem ser adicionados à análise para substituir as configurações em partes ou corpos

particulares na análise. Estes parâmetros aplicam-se a toda a estrutura, embora partes ou corpos da estrutura possam ser suprimidos para evitar a criação de malhas desnecessárias. Se forem suprimidos, serão excluídos da análise e exibição subsequente do resultado. Uma observação importante a ser mencionada é que ainda não é possível empregar simetria no módulo Aqwa, portanto, o modelo completo da geometria deve ser gerado.

Existem configurações de malha globais básicas e avançadas disponíveis, bem como a capacidade de adicionar objetos de malha adicionais para executar operações de malha local. Estas são descritas nas seguintes seções:

- *Basic Global Mesh Options;*
- *Advanced Global Mesh Options;*
- *Local Mesh Controls.*

#### **4.2.1 - Basic global mesh options**

Se o controle global estiver configurado como básico, um número limitado de opções de malha estão disponíveis. A malha é gerada automaticamente nos corpos do modelo, sua densidade é baseada na tolerância excedida e nos parâmetros de tamanho de elemento máximo.

***Defeaturing Tolerance*** controla como pequenos detalhes são tratados pela malha. Se o detalhe for menor do que essa tolerância, um único elemento pode abranger sobre ele, caso contrário o tamanho da malha será reduzido nessa área para garantir que o recurso esteja dentro dos parâmetros. A tolerância não pode ser superior a  $0,6 \times$  tamanho máximo do elemento.

***Max Element Size*** controla o tamanho máximo do elemento que será gerado. No Aqwa, isso está explicitamente relacionado à frequência de onda máxima que pode ser utilizada na análise de difração. Se for desejada uma frequência de onda máxima específica, isso pode ser especificado e o tamanho máximo de elemento associado será computado. Se um tamanho de elemento menor for necessário para uma determinada parte do corpo, um ou vários objetos de tamanho de malha podem ser adicionados para refinar a malha.

**Meshing Type** controla o algoritmo que é usado para a geração de malha. O padrão é que ele seja **Program Controlled**, a opção **Surface Meshing Only** é usada somente para geometrias que apenas contêm superfícies, **Combined Meshing** é usado se a geometria também incluir linhas. Se a opção **Program Controlled** falhar ao produzir uma malha satisfatória, você pode controlar a seleção manualmente.

Quanto maior o tamanho máximo do elemento, a acurácia do resultado será menor. A versão de 32 bits do solucionador Aqwa é limitada a 18000 elementos, dos quais 12000 podem estar sendo difratados. A versão de 64 bits do solucionador Aqwa que é utilizado neste trabalho é limitada a 40000 elementos, dos quais 30000 podem estar sendo difratados. Os elementos difratados são os que estão abaixo da linha de água da embarcação.

#### 4.2.2 - *Advanced global mesh options*

Se o controle global da geração de malha for definido como avançado, possui as seguintes opções que são organizadas nos seguintes grupos:

- *Mesh Parameters;*
- *Sizing;*
- *Inflation;*
- *Defeaturing;*
- *Generated Mesh Information.*

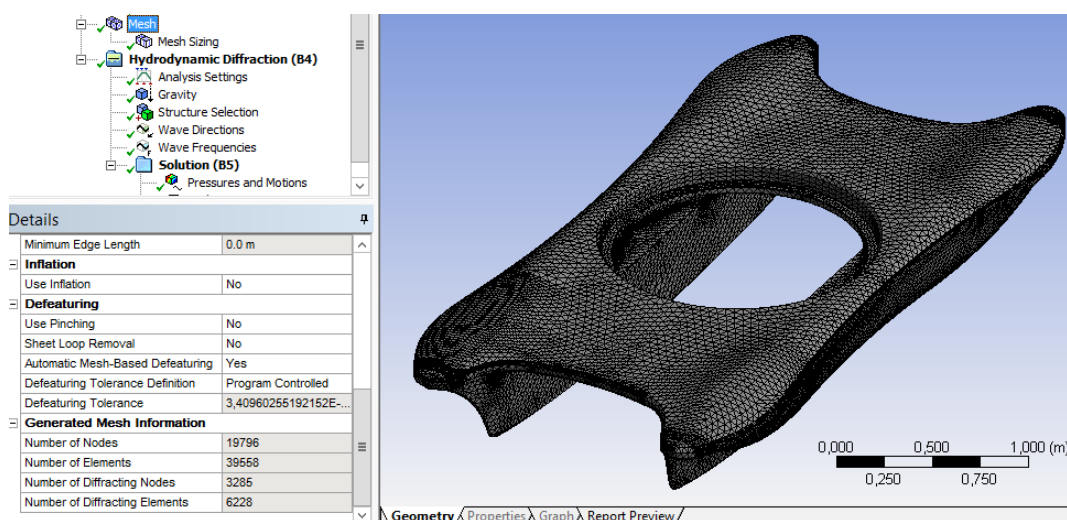
O Aqwa permite controlar o dimensionamento dos elementos na malha nas opções **Sizing** e **Inflation**. O grupo **Inflation** nas superfícies, requer um objeto de controle para ser criado e para especificar qual rosto do modelo será direcionado pelo processo de inflação e de qual limite ele vai começar. A opção **Mesh Local Inflation Control** permite ao usuário selecionar essas seções da geometria e possivelmente definir parâmetros de inflação que diferem dos globais, pois pode haver mais de um desses controles definidos para uma geometria específica. Se a opção **Inflation** for definida como (sim), sem que um desses controles esteja presente, uma mensagem de erro é emitida e a célula é amarelada.

O Aqwa permite controlar a criação da malha em áreas difíceis da geometria, conforme descrito em **Automatic Mesh Based Defeaturing**. Para usar **Pinching**, deve ser criado um objeto de controle local de malha. Se a opção **Pinching** for definido como (sim), sem a presença de um desses controles, uma mensagem de erro é emitida e a célula também fica amarela semelhante ao **Inflation**. Em **Generated Mesh Information** mostra o número de nós e elementos difratados e não difratados na malha. O controle local de malha é dividido em:

- **Sizing Control:** permite o refinamento de uma malha em uma determinada peça ou corpo, permitindo que um tamanho de elemento menor seja associado à geometria. O tamanho do elemento local (**Local Element Size**) pode ser configurado. Qualquer número de objetos de dimensionamento pode ser adicionado conforme necessário.
- **Pinching Control:** A adição desta opção permite remover pequenos recursos no modelo no nível de malha para gerar uma malha melhor.
- **Inflation Control:** permite controlar a inflação, ou seja, o refinamento dos elementos em limites específicos na malha.

Dessa forma, após o estudo das configurações de geração de malha no módulo Aqwa *Diffraction* foi possível configurar a geometria do trabalho. A malha gerada na geometria para a condição de peso leve de 140 kg e calado 0,246 m pode ser vista na Figura 17:

Figura 17: Geração da malha para análise hidrodinâmica.



Fonte: Ansys Aqwa *Diffraction*



A malha gerada obedece aos critérios máximos do módulo Aqwa possuindo um número de elementos menor do que 40000. Assim, o controle global de geração de malha foi configurado como avançado e o tipo de malha foi **Program Controlled**, mas também foi feito o controle de malha **Sizing Control** que permitiu um melhor refinamento da malha. O tamanho do elemento local (**Local Element Size**) foi inserido de modo que exista uma malha de qualidade e o tipo dos elementos foram selecionados **triangulares**, devido a capacidade de aproximar o contorno de estruturas com geometrias complexas. Foi inserido os seguintes valores para a melhor refinamento:

- **Local Element Size:** 0,08 m, elementos: 40486, nós: 20261;
- **Local Element Size:** 0,082 m, elementos: 39558, nós: 19796;
- **Local Element Size:** 0,09 m, elementos: 36550, nós: 18292.

Sabendo que a versão de 64 bits do solucionador Aqwa que foi utilizado neste trabalho possui um limite de 40000 elementos, foi escolhida a malha com **Local Element Size** de 0,082 metros, resultando em 39558 elementos, dos quais 6228 são difratados e 19796 nós, obedecendo aos critérios do *software* e obtendo uma malha de qualidade. Para as outras condições de carregamento também foi necessário a geração da malha, suas características podem ser vistas na tabela abaixo:

Tabela 2: Características das malhas.

Condição	Calado (m)	Elementos	Nós	Difratados
0	0,246	39558	19796	6228
1	0,293	39688	19860	7386
2	0,333	39410	19722	10084
3	0,368	39848	19941	10196

Autor do trabalho feita no *software Excel*

Prosseguindo com o trabalho será analisado as características hidrostáticas da embarcação.

### 4.3 - Características hidrostáticas

No Aqwa *Diffraction* é possível obter resultados hidrostáticos do casco da embarcação movido por kite, permitindo encontrar os centros de flutuabilidade, empuxo e gravidade, são obtidos também os valores dos movimentos dos graus de liberdade *Heave*, *Roll* e *Pitch*, o valor do volume deslocado, entre outros, como pode ser visto no exemplo da Figura 18 para a condição de peso leve de 140 kg e calado 0,246 m.

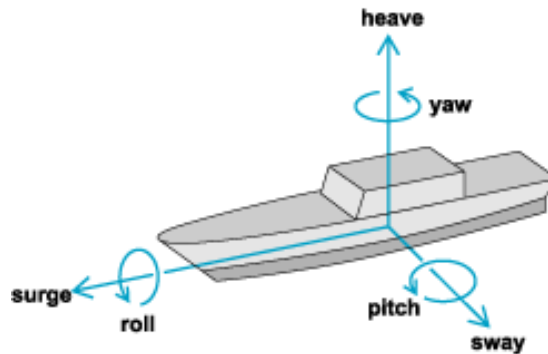
Figura 18: Características hidrostáticas peso leve.

<b>Hydrostatic Stiffness</b>			
Centre of Gravity (CoG) Position:	X: 0. m	Y: 0. m	Z: 0. m
	<b>Z</b>	<b>RX</b>	<b>RY</b>
Heave (Z):	15570.144 N/m	1.5605471 N/°	-12.123172 N/°
Roll (RX):	89.412766 N.m/m	110.87444 N.m/°	-7.312e-2 N.m/°
Pitch (RY):	-694.60657 N.m/m	-7.312e-2 N.m/°	178.44481 N.m/°
<b>Hydrostatic Displacement Properties</b>			
Actual Volumetric Displacement:	0.1431008 m <sup>3</sup>		
Equivalent Volumetric Displacement:	0.1365854 m <sup>3</sup>		
Centre of Buoyancy (CoB) Position:	X: 4.5059e-2 m	Y: 5.7607e-3 m	Z: -6.9305e-2 m
Out of Balance Forces/Weight:	FX: -9.605e-10	FY: 7.4937e-7	FZ: 4.7703e-2
Out of Balance Moments/Weight:	MX: 6.0353e-3 m	MY: -4.7208e-2 m	MZ: -1.724e-7 m
<b>Cut Water Plane Properties</b>			
Cut Water Plane Area:	1.5489881 m <sup>2</sup>		
Centre of Floatation:	X: 4.4611e-2 m	Y: 5.7426e-3 m	
Principal 2nd Moment of Area:	X: 0.6418555 m <sup>4</sup>	Y: 1.0239778 m <sup>4</sup>	
Angle Principal Axis makes with X(FRA):	-2.9927e-3°		
<b>Small Angle Stability Parameters</b>			
CoG to CoB (BG):	6.9305e-2 m		
Metacentric Heights (GMX/GMY):	4.4160328 m	7.0863338 m	
CoB to Metacentre (BMX/BMY):	4.4853373 m	7.1556382 m	
Restoring Moments about Principal Axes (MX/MY):	110.86548 N.m/°	177.90398 N.m/°	

Fonte: Ansys Aqwa *Diffraction*

Um navio no mar se move em seis graus de liberdade: *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* and *yaw*. Os três primeiros são movimentos lineares. *Heave* é o movimento linear ao longo do eixo Z vertical, *sway* é o movimento ao longo do eixo Y transversal, e *surge* é o movimento ao longo do eixo X longitudinal. *Roll* é uma rotação em torno de um eixo longitudinal, *pitch* é uma rotação em torno do eixo transversal e *yaw* é uma rotação ao redor do eixo vertical. A Figura 19 mostra a configuração destes movimentos:

Figura 19: Graus de liberdade.



Fonte: <https://gamedev.stackexchange.com/questions/6502/water-ocean-simulation-and-physics>

#### 4.4 - Gráficos hidrodinâmicos

Os seguintes tipos de análise podem produzir resultados gráficos no módulo Aqwa:

- *Diffraction;*
- *Time Response;*
- *Frequency Domain;*
- *Stability Response;*

Existem vários tipos de gráficos que podem ser exibidos e várias combinações de eixos diferentes que podem ser exibidas. As linhas 2D e as superfícies 3D podem ser plotadas além de uma superfície de contorno. O tipo de gráfico e os eixos serão baseados na seleção que é adicionado no objeto à solução.

Neste trabalho está sendo utilizado o módulo Aqwa *Diffraction* que possui os seguintes tipos de gráfico para a embarcação:

- *Diffraction, Froude-Krylov, Diffraction + Froude-Krylov, Linearized Morison Drag, and Total Exciting Force Including Morison Drag;*
- *Response Amplitude Operators (RAOs) and RAOs with Linearized Morison Drag;*
- *Radiation Damping & Added Mass;*

- *Steady Drift;*
- *Sum QTF and Difference QTF;*
- *Splitting Forces (RAO);*
- *Bending Moment and Shear Force.*

#### 4.5 - Obtenção do campo de pressões

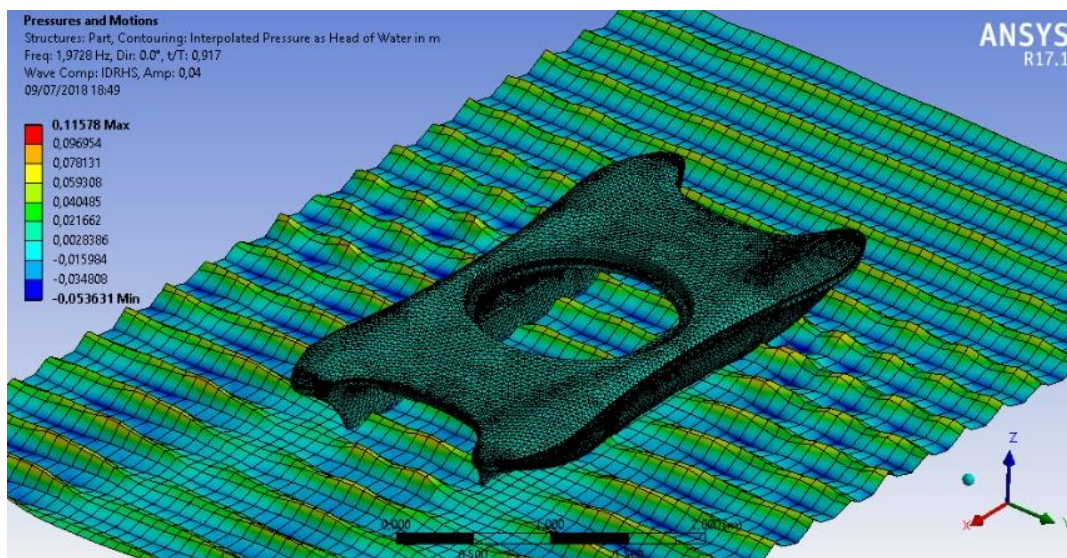
**Pressures and motions** permitem a visualização e exibição de uma série de resultados gerados a partir do Aqwa, uma vez que uma solução hidrodinâmica foi realizada. Para gerar o campo de pressões é necessário que a opção **Generate Wave Grid Pressures** tenha sido definida como Sim (antes da solução ser executada).

As opções **Frequency and Direction** permitem selecionar os diferentes valores de frequências e direções da onda. A amplitude de onda incidente pode ser modificada para fornecer os resultados. Os tipos de resultados podem ser definidos como:

- Cíclica, onde uma posição de fase equivalente do componente de onda incidente pode ser selecionada ou é mostrada no gráfico com o tempo como proporção do período de onda se um intervalo for escolhido;
- Amplitude;
- Valor máximo do resultado selecionado;
- Valor mínimo do resultado selecionado;

Uma sequência de resultados para animação pode ser realizada após de selecionar as configurações desejadas, como pode ser visto no exemplo da Figura 20.

Figura 20: Animação campo de pressões.



Fonte: Ansys Aqwa *Diffraction*

O tipo de contorno da estrutura pode ser definido como ***Interpolated Pressure***, ***Air Gap***, ***Panel Pressure***, ***Resultant Displacement***, ou ***None***. Os elementos não difratados acima da linha de água podem ser visualizados ***Dimmed*** ou ***Zero Pressure***, porém não são afetados pela ação das ondas. A medição de pressão pode ser definida como ***Force/Area*** ou ***Head of Water***.

#### 4.6 – Aplicação do carregamento do oceano a partir de uma análise hidrodinâmica

Pressões e efeitos de movimento de um corpo rígido modelado por análise hidrodinâmica no módulo *Aqwa Diffraction* podem ser importados para análise posterior usando comandos oceânicos APDL. Eles são extraídos de um arquivo de dados hidrodinâmicos. As informações do arquivo de dados hidrodinâmicos são traduzidas em pressões de elementos de superfície ou em pressões de elementos de linha com base na equação de *Morison*. APDL significa *ANSYS Parametric Design Language*, uma linguagem de *script* que pode ser usada para automatizar tarefas comuns ou até mesmo construir modelos em termos de parâmetros (variáveis). Os comandos APDL são os comandos de *script* e englobam uma ampla variedade de outros recursos, como repetição de um comando, macros, ramificação *if-then-else*, *do-loops* e operações escalares, vetoriais e matriciais.

Para que o carregamento de pressões seja analisado no módulo Ansys *Structural*, é necessário gerar um arquivo de dados hidrodinâmicos (**.ahd**), que deve ser preparado em um formato específico para ser lido durante o procedimento de carregamento do oceano. Um arquivo (**.ahd**) chamado **analysis\_1**, que contém os dados da análise de difração hidrodinâmica, é gerado através do utilitário **AQWA2NEUT** do módulo Aqwa com o auxílio do programa **Prompt de comando** que emula o campo de entrada do código inserido.

Para aplicar as cargas das ondas difratadas, é necessário definir um ambiente oceânico e dados de carregamento usando os seguintes comandos:

**Ocdata:** O comando *ocdata* especifica os dados não relacionados à tabela que definem a carga do oceano, como o número da seção oceânica, a profundidade do oceano, entre outros. Para este tipo de análise importando os dados hidrodinâmicos, o tipo de onda no comando *ocdata* da onda do oceano deve ser ajustado para onda difratada ( $KWAVE = 8$ ).

**Octype:** Especifica o tipo de dados de carga do oceano, o tipo de dados oceânicos a serem inseridos após este comando são:

- Basic: A carga básica do oceano, necessária para qualquer carregamento no oceano.
- Curr: Uma corrente de desvio.
- Wave: Um estado de onda oceânica.

**Octable:** O *octable* especifica os dados da tabela que definem a carga do oceano. O programa interpreta a entrada de dados por meio do comando *octable* no contexto do comando *octype* emitido mais recentemente.

**Ocread:** O comando *ocread* importa dados oceânicos que foram definidos externamente (por exemplo, através do sistema de difração hidrodinâmica (AQWA))

Assim, após de realizar a importação dos dados não é necessário que as malhas hidrodinâmicas e estruturais sejam idênticas, a carga é mapeada automaticamente de um para o outro, no entanto, assume-se que o sistema de eixos hidrodinâmicos é idêntico ao utilizado para a análise estrutural.

## 4.7 - Análise estrutural

Depois da importação da geometria para o módulo *structural* foi inserido o material da embarcação como Fibra de vidro e MDF com as suas respectivas propriedades, pois este é o material que forma o casco da embarcação real, proporcionando um resultado mais verdadeiro. Para promover a sustentabilidade da madeira como um recurso natural e melhorar a eficiência estrutural de compósitos de madeira, a fibra de vidro tem sido usada há muito tempo para reforçar compósitos de madeira pré-formados. Muitos pesquisadores aproveitaram a alta resistência da fibra de vidro para aumentar a resistência e a rigidez dos compósitos à base de madeira; isto é, viga estrutural laminada (CAI, 2006).

Para este trabalho foi estudado o artigo de Zhiyong Cai que aborda as características do uso da fibra de vidro para aumentar a resistência da madeira. Os laminados de fibra de vidro e tecido de poliéster foram relatados como tendo um módulo de ruptura de tensão média (MOR) de cerca de 275,0 MPa e um módulo de elasticidade (MOE) de 17,2 a 20,1 GPa (Biblis e Carino 2000). Na Tabela 3 a seguir é mostrado as tensões de rupturas e módulo de elasticidade dos seguintes materiais:

- MDF: placa de fibra de madeira de média densidade;
- G-MDF: MDF reforçado com fibra de vidro;
- *Flakeboard*: peça de madeira construída sinteticamente que não se deforma como madeira cortada natural;
- G-FB = *flakeboard* reforçado com fibra de vidro.

Tabela 3: Propriedades dos materiais.




Sample	Density (kg/m <sup>3</sup> )		MOE (GPa)		MOR (MPa)		IB strength (MPa)						Hardness (kg)	
	Actual	Adj	Actual	Adj	Actual	Adj	Original		After 24-h soak		After 2-h boil		Actual	Adj
							Actual	Adj	Actual	Adj	Actual	Adj		
MDF <sup>a</sup>	664	700	2.64	2.74	27.8	29.4	1.06	1.12	0.69	0.72	0.58	0.61	581.1	591.0
G-MDF	709	700	3.31	3.25	33.4	33.0	1.12	1.01	1.01	1.00	0.94	0.92	666.8	658.3
Flakeboard	723	700	6.01	5.80	43.3	41.9	0.83	0.81	0.56	0.54	0.31	0.30	462.0	446.9
G-FB	737	700	7.14	6.73	51.3	48.7	0.85	0.81	0.63	0.58	0.28	0.26	644.0	611.3

Fonte: (CAI, 2006)

Dessa forma, este trabalho terá como base a Tabela 3 do material G-MDF que é o MDF reforçado com fibra de vidro para os valores máximos, (MOR= 33,4 MPa) e

(MOE= 3,31 GPa). Na Tabela 4 são vistas as características inseridas no Ansys *Structural* de acordo com a Tabela 3:

Tabela 4: Propriedades da Fibra de vidro e MDF.

Properties of Outline Row 3: Fibra de vidro e MDF			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	 Density	709	kg m <sup>-3</sup> ▼
3	 Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio ▼	
5	Young's Modulus	3,31E+09	Pa ▼
6	Poisson's Ratio	0,3	
7	Bulk Modulus	2,7583E+09	Pa
8	Shear Modulus	1,2731E+09	Pa
9	 Tensile Ultimate Strength	33,4	MPa ▼

Fonte: Ansys *Static Structural - Mechanical APDL*

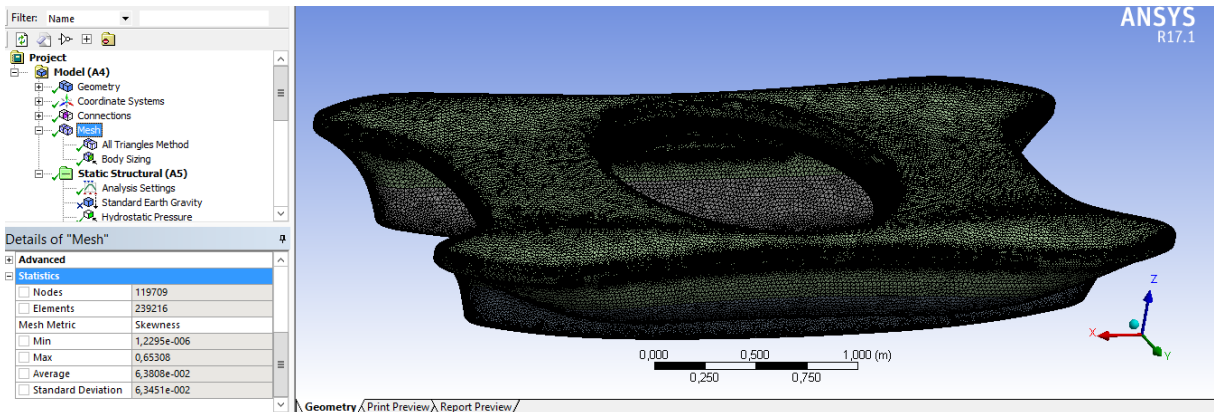
Prosseguindo é gerada a malha da embarcação no módulo *structural* inicialmente sem refinamento, para melhores resultados foi realizado o refinamento da malha seguindo os seguintes passos:

- Com a ferramenta de seleção, selecionar todo o modelo e clicar em “*Apply*” no menu “*Details of Automatic Method - Method*”;
- Selecionar, dentro do menu “*Outline*”, “*Model*”, “*Mesh*”, “*Automatic Mesh*”, “*Method*” a opção “*Triangles*” para compor uma malha com elementos preferencialmente triangulares;
- Selecionar, dentro do menu “*Outline*”, “*Model*”, “*Mesh*”, “*Automatic Mesh*”, “*Behaviour*” a opção “*Soft*”. Assim a malha, nos cantos e regiões de geometria “crítica”, será mais refinada;
- Clicar em “*Mesh*”, “*Generate Mesh*” para gerar a malha.

Assim, foi gerada a malha para análise estrutural, vista na Figura 21:



Figura 21: Malha para análise estrutural.

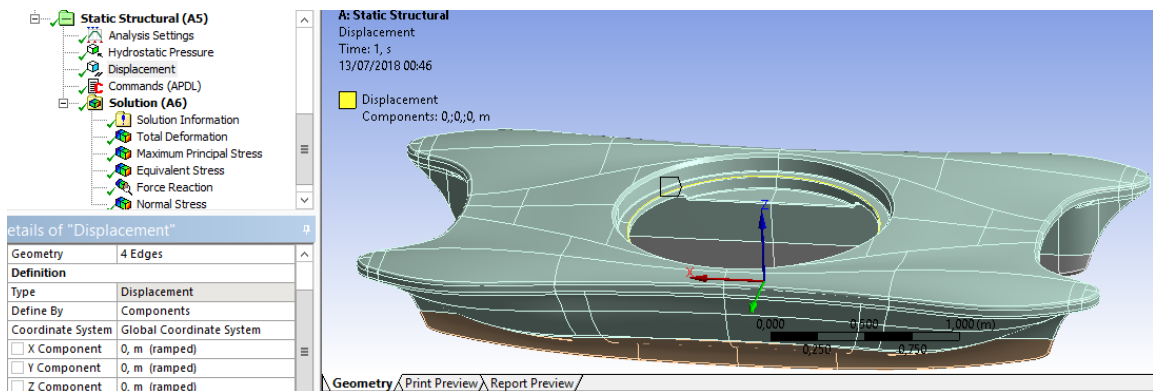


Fonte: Ansys *Static Structural - Mechanical APDL*

- Possuindo 119709 nós e 239216 elementos.

Após a geração da malha foi selecionada as condições de contorno para a embarcação. Foi inserida a opção **Hydrostatic Pressure** e por meio da opção **Displacement** foi escolhida a borda da região central, assim, foi restringido o deslocamento nas três direções x ,y e z, visto na Figura 22:

Figura 22: Restrição do deslocamento.



Fonte: Ansys *Static Structural - Mechanical APDL*

### 4.7.1 - Código numérico que automatiza a integração entre o Ansys Aqwa e o Ansys Mechanical

Na Figura 23 a seguir é visto a linha de comando (APDL) no módulo *structural* que foi utilizada para este trabalho de conclusão de curso. Os comandos inseridos no *script* aplicam o carregamento do oceano a partir da análise hidrodinâmica realizada, o ícone **Commands (APDL)** é inserido na opção **Static Structural**.

Figura 23: Comandos oceânicos (APDL).

```

Commands
! Commands inserted into this file will be executed just prior to the ANSYS SOLVE command.
! These commands may supersede command settings set by Workbench.

! Active UNIT system in Workbench when this object was created: Metric (m, kg, N, s, V, A)
! NOTE: Any data that requires units (such as mass) is assumed to be in the consistent solver unit system.
! See Solving Units in the help system for more information.

! define ocean
matwat=2 ! material number id of the ocean
! water density
mp,dens,matwat,1025.0
acel,0,0,9.80665
! ocean
octype,basic,ocean1
ocdata,depth,matwat
!! diffracted wave
octype,wave
ocdata,8,0.0
octable,1.0,200,0.0
!! ocread to read in external data file
ocread,E:\TCC\Tasso\geotcc_files\dp0\AQW\AQW\AQ\Analysis\analysis_1,ahd

```

Fonte: Ansys *Static Structural - Mechanical APDL*

Feita esta inserção de comandos foi possível obter o mapa dos gradientes de tensões e deformações no casco da embarcação devido ao campo de pressão das ondas, mostrando os pontos máximos de tensões e deformações que serão vistos no capítulo 5: resultados obtidos.

## Capítulo 5 - Resultados Obtidos

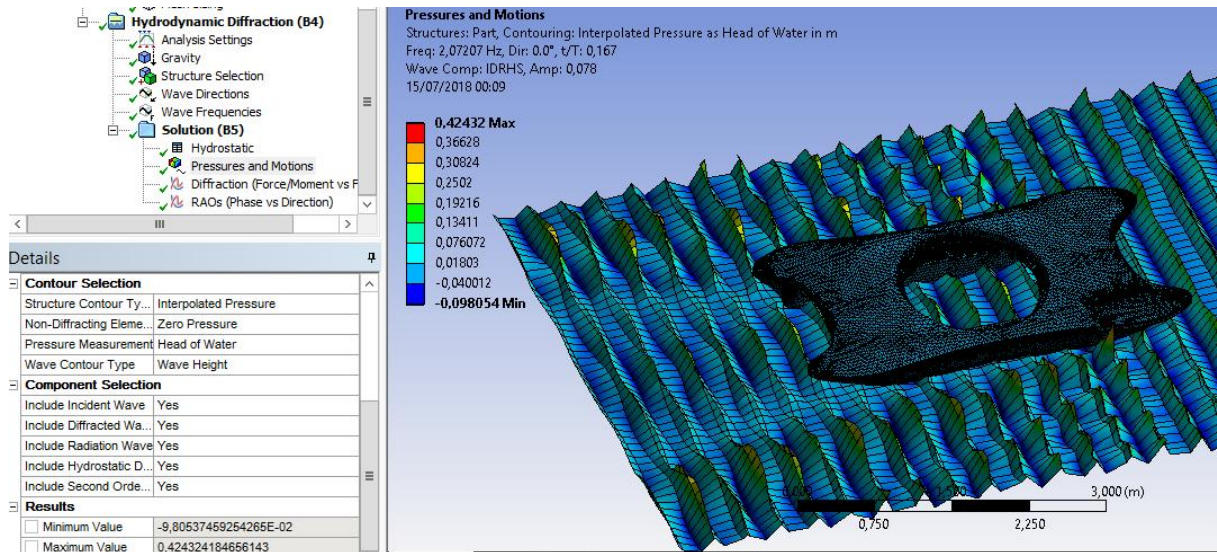
### 5.1 – Resultados dos gráficos hidrodinâmicos

Serão plotados os gráficos das ondas cíclicas, RAO e difração para as 4 condições de carregamento segundo (LUNDGREN, 2015). Foi tomado o critério que a altura máxima da onda não ultrapassasse o convéns da embarcação.

### 5.1.1 - Condição 0: leve

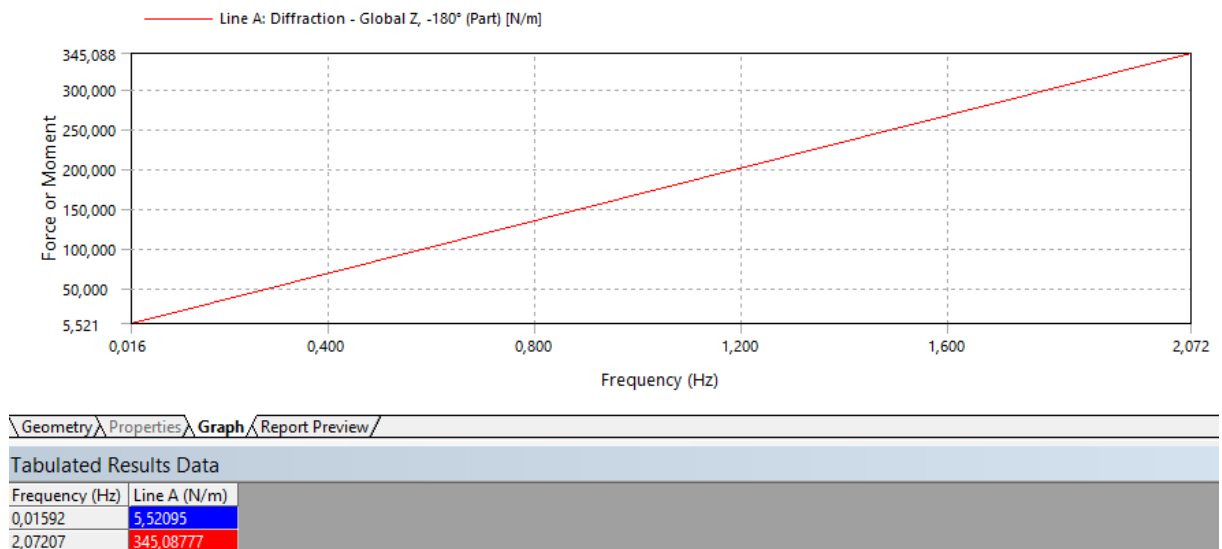
- 140 kg e calado de 0,246 m;
- Frequência máxima da onda: 2,07207 Hz;
- Altura máxima da onda : 0,42432 m.

Figura 24: Ondas cíclicas, condição 0: leve.



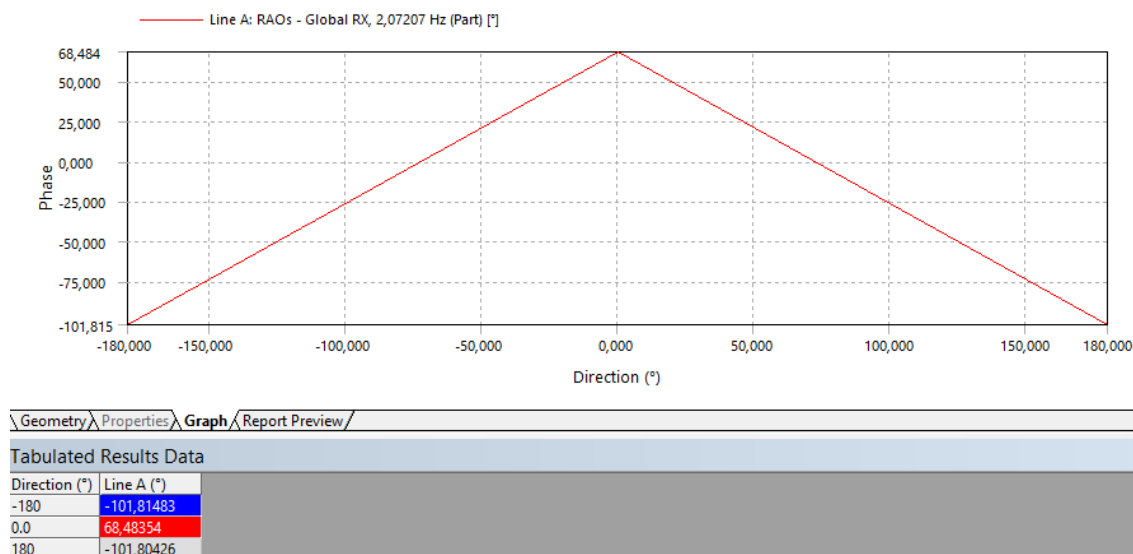
Fonte: Ansys Aqwa *Diffraction*

Figura 25: *Diffraction (Force/Moment vs Frequency)*, condição 0: leve.



Fonte: Ansys Aqwa *Diffraction*

Figura 26: RAOs (*Phase vs Direction*), condição 0: leve.

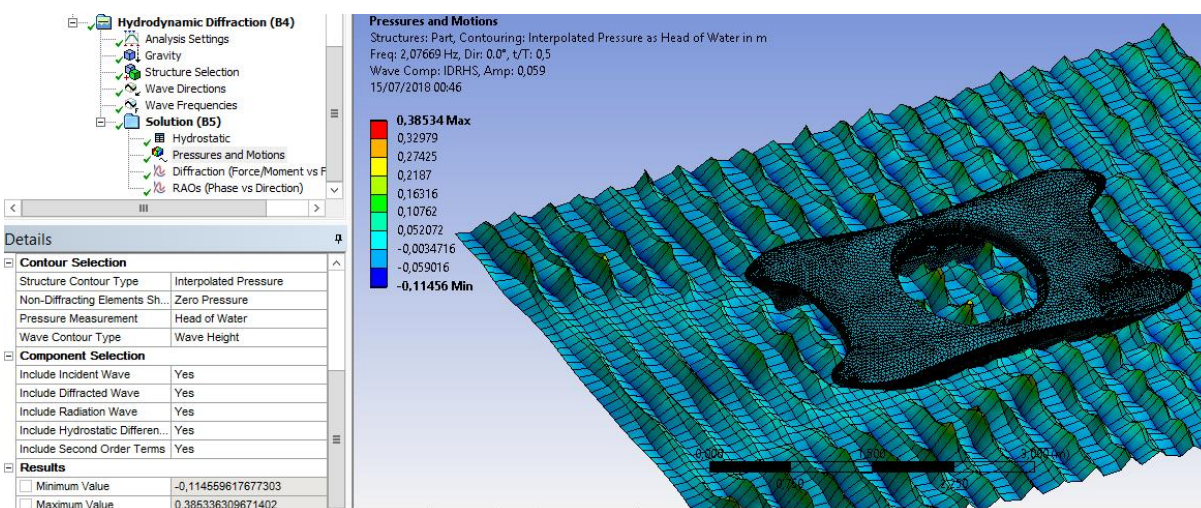


Fonte: Ansys Aqwa *Diffraction*

### 5.1.2 - Condição 1: piloto

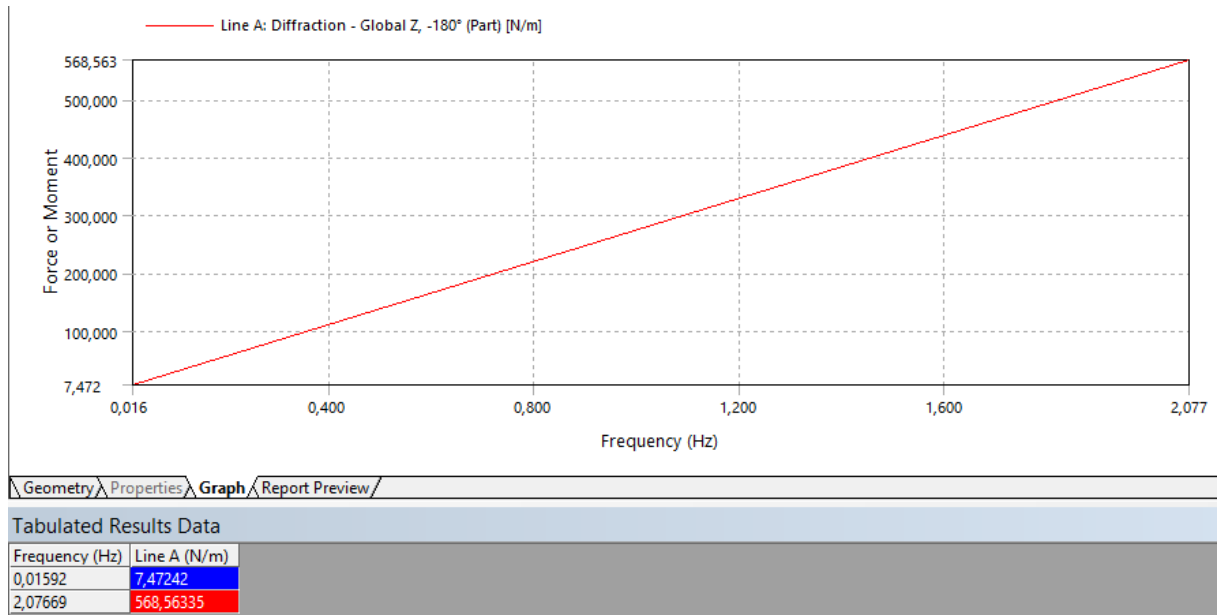
- 220 kg e calado de 0,293 m;
- Frequência da onda: 2,07669 Hz;
- Altura máxima da onda: 0,38534 m.

Figura 27: Ondas cíclicas, condição 1: piloto.



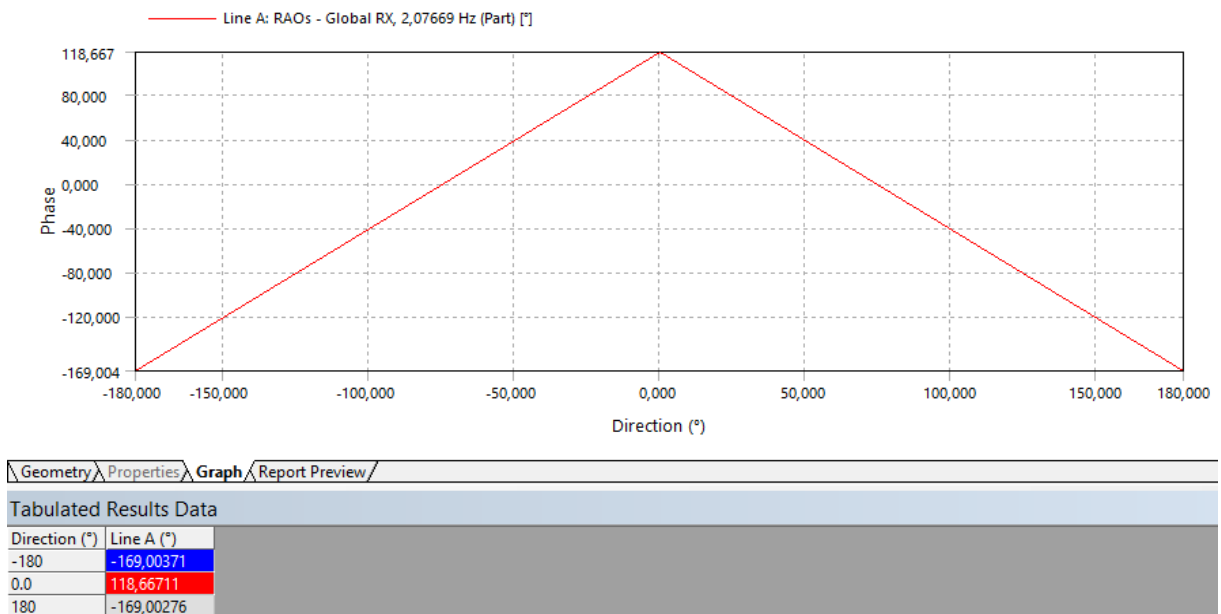
Fonte: Ansys Aqwa *Diffraction*

Figura 28: *Diffraction (Force/Moment vs Frequency)*, condição 1: piloto.



Fonte: Ansys Aqwa *Diffraction*

Figura 29: *RAOs (Phase vs Direction)*, condição 1: piloto.



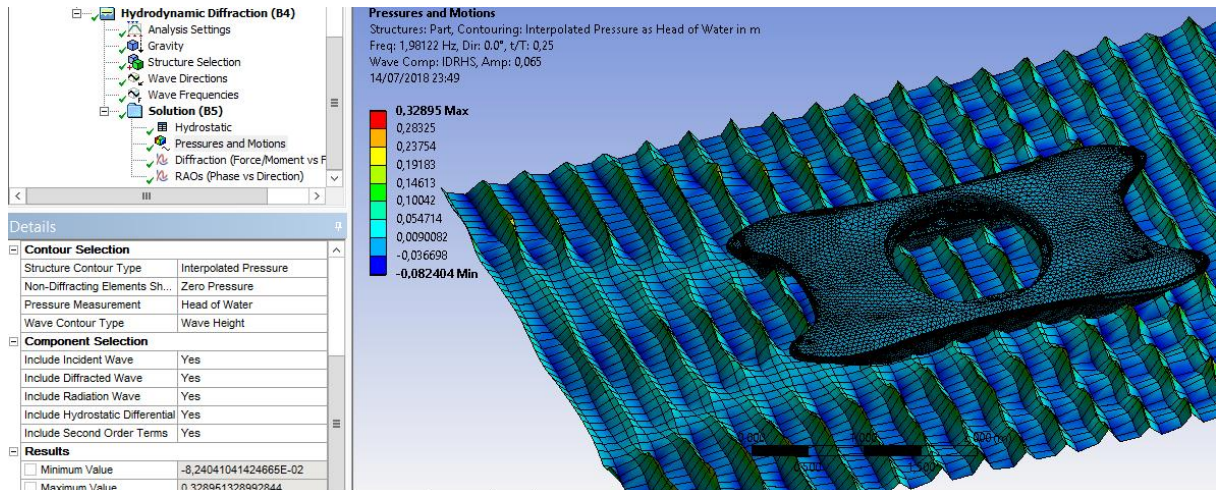
Fonte: Ansys Aqwa *Diffraction*



### 5.1.3 - Condição 2: piloto e 1 passageiro

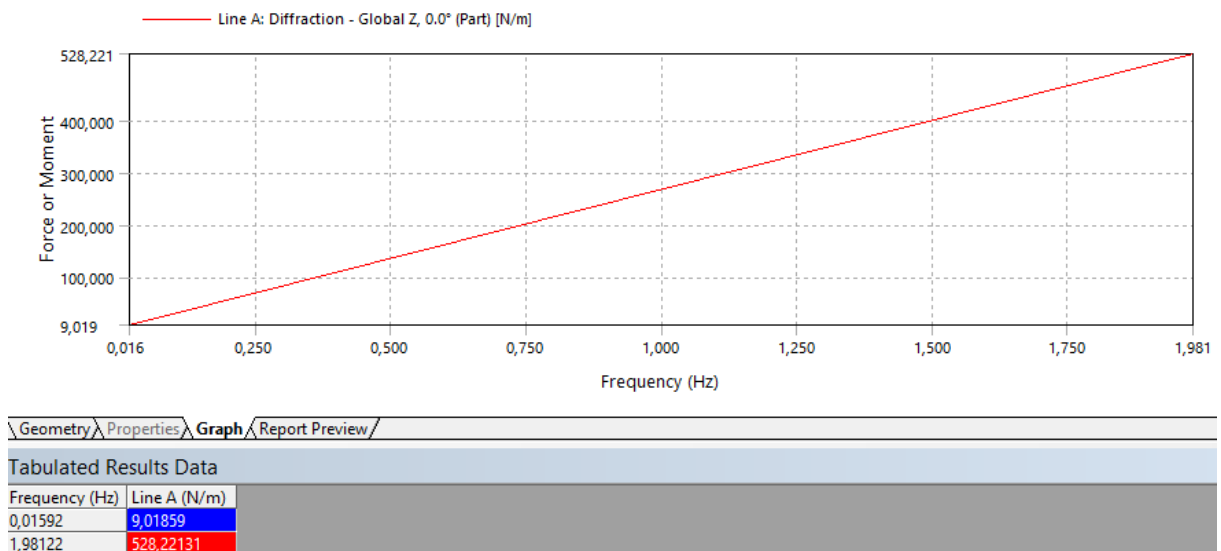
- 300 kg e calado de 0,333 m;
- Frequência da onda: 1,98122 Hz;
- Altura máxima da onda: 0,32895.

Figura 30: Ondas cíclicas, condição 2: piloto e 1 passageiro.



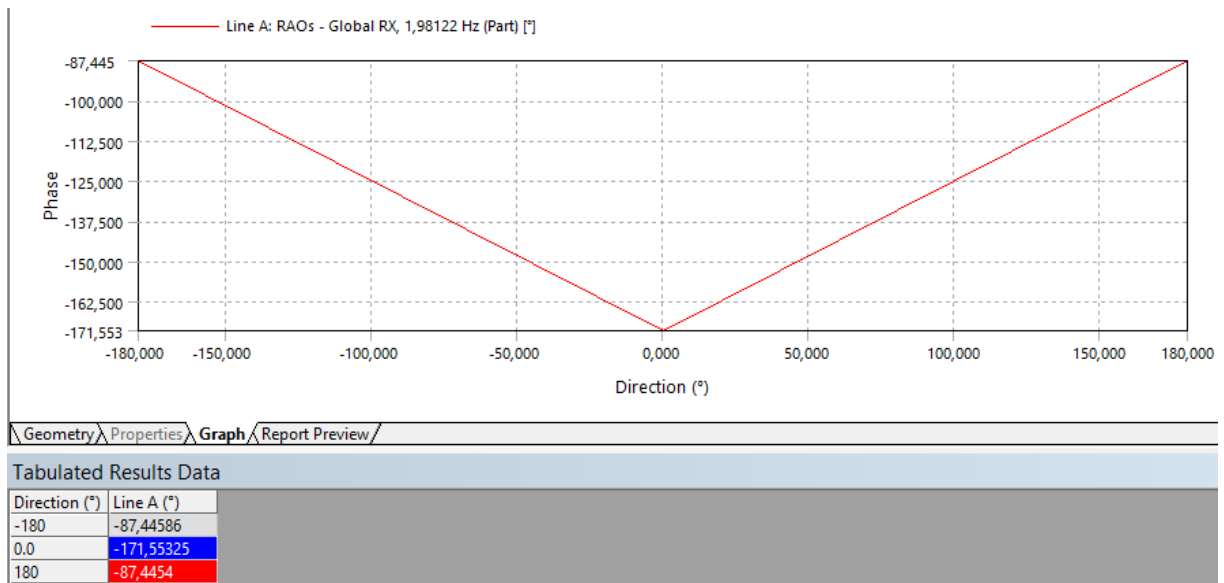
Fonte: Ansys Aqwa Diffraction

Figura 31: Diffraction (Force/Moment vs Frequency), condição 2: piloto e 1 passageiro.



Fonte: Ansys Aqwa Diffraction

Figura 32: RAOs (Phase vs Direction), condição 2: piloto e 1 passageiro.

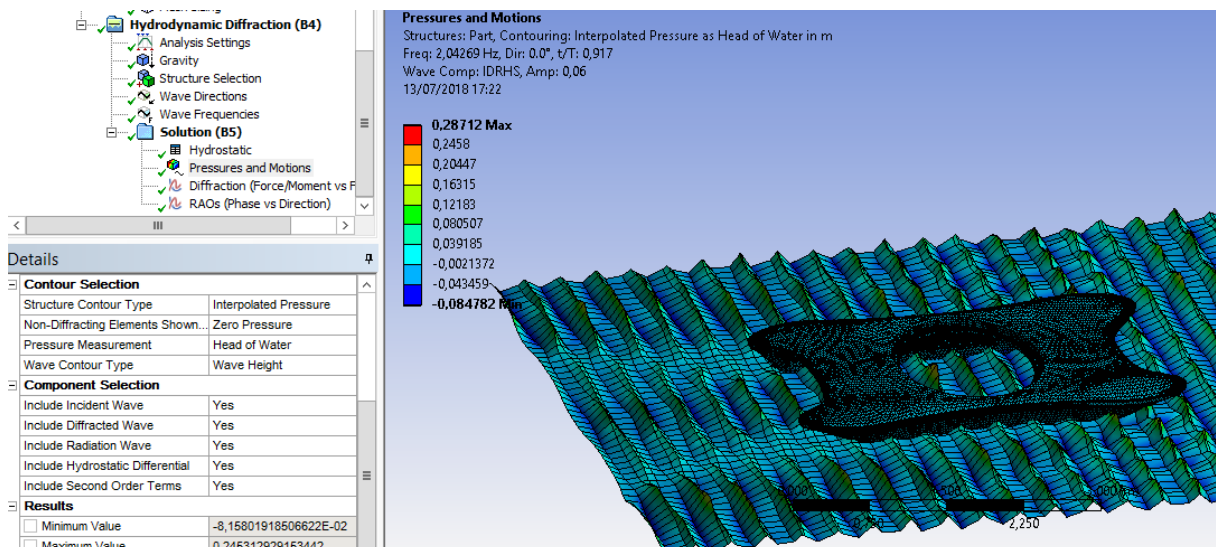


Fonte: Ansys Aqwa *Diffraction*

#### 5.1.4 - Condição 3: piloto e carga excepcional

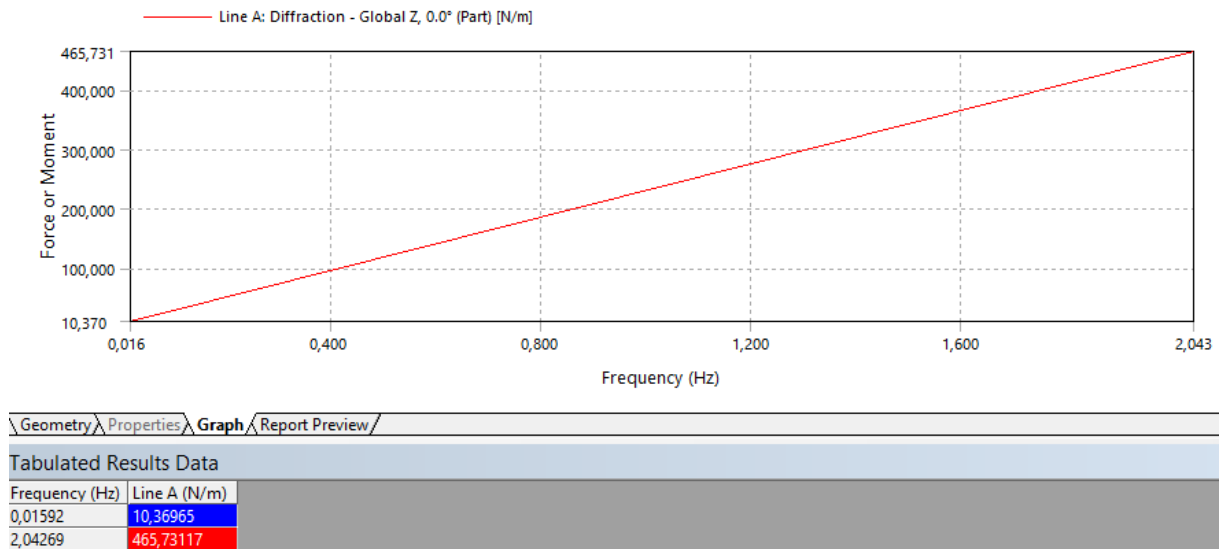
- 380 kg e calado de 0,368 m;
- Frequência da onda: 2,04269 Hz;
- Altura máxima da onda: 0,28712.

Figura 33: Ondas cíclicas, condição 3: piloto e carga excepcional.



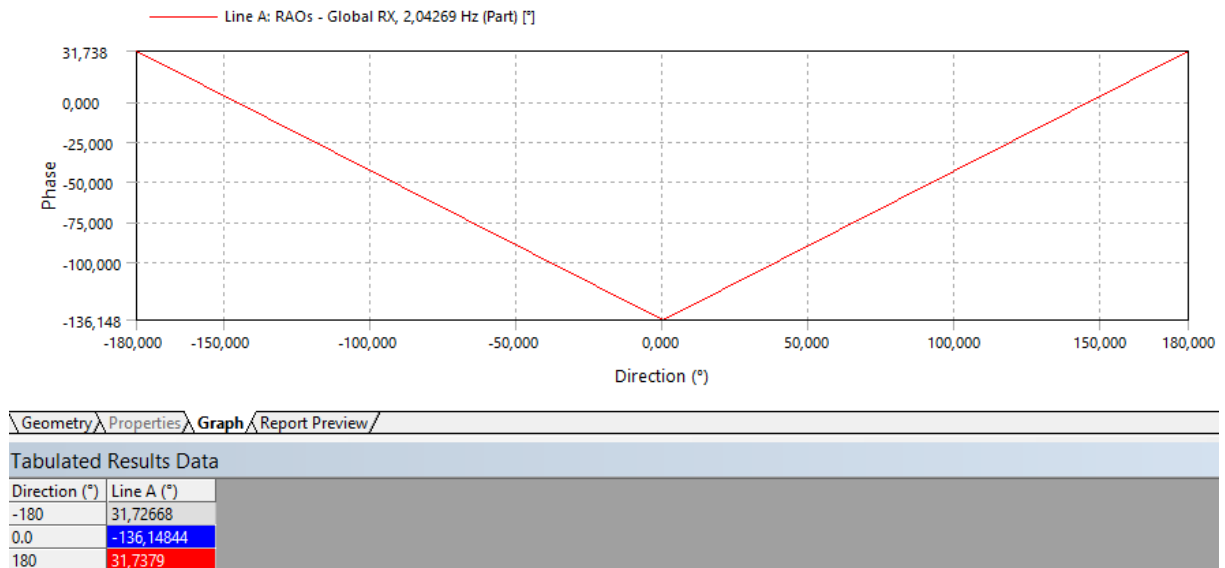
Fonte: Ansys Aqwa *Diffraction*

Figura 34: *Diffraction (Force/Moment vs Frequency)*, condição 3: piloto e carga excepcional.



Fonte: Ansys Aqwa *Diffraction*

Figura 35: *RAOs (Phase vs Direction)*, condição 3: piloto e carga excepcional.



Fonte: Ansys Aqwa *Diffraction*

## 5.2 - Análise dos resultados hidrodinâmicos

Na Tabela 4 são vistos os resultados hidrodinâmicos para as 4 condições de carregamento para o barco movido por kite que possui as seguintes características:

- Comprimento: 4,015 (m);



- Boca: 2,000 (m);
- Pontal: 0,680 (m).

Tabela 5: Resultados hidrodinâmicos.

Condição	Condição 0	Condição 1	Condição 2	Condição 3
Peso operacional (kg)	140	220	300	380
Calado (m)	0,246	0,293	0,333	0,368
Frequência da onda (Hz)	2,07207	2,07669	1,98122	2,04269
Altura máx. da onda (m)	0,42432	0,38534	0,32895	0,28712
Difração máx. em heave (N/m)	345,1	568,6	528,2	465,7

Fonte: Autor do trabalho feita no *software Excel*

Os resultados obtidos para a condição leve, da embarcação com o calado de 0,246 m, sofrendo a incidência de ondas com frequência de 2,07207 Hz, traz a condição de altura máxima da onda de 0,42432 m, limite máximo para navegar nestas condições, pois se for aumentada a amplitude de onda para esta frequência máxima de incidência devido ao pequeno pontal da embarcação, as ondas passarão do convés podendo trazer risco à navegação. Para a condição 3 do piloto e carga excepcional totalizando 380 kg com calado de navegação de 0,368 m e altura máxima da onda de 0,28712 m foi o limite máximo para o critério adotado. Para as condições 1 e 2 de carregamento também foi seguido o mesmo critério de segurança.

Foram extraídos os gráficos de difração que é o movimento das ondas que atravessam um obstáculo, as cristas das ondas caem gerando novas ondas que se movem para frente e para os lados. A onda se espalha e uma parte dela varre por trás do obstáculo, nesses gráficos foram mostrados a relação da força/momento com a frequência da onda em heave que é o movimento linear ao longo do eixo Z vertical.

Foram plotados os gráficos de RAOs (*Phase vs Direction*), o Operador de Amplitude de Resposta (RAO) que representa uma função transferência de um sistema linear, e no caso do movimento de embarcações, nos indica o quanto esta irá mexer, adimensionalizado pela onda, para uma determinada frequência de onda. Depois da obtenção destes resultados foi possível exportar os dados dos carregamentos hidrodinâmicos para serem analisados estruturalmente como serão vistos no capítulo 5.5.

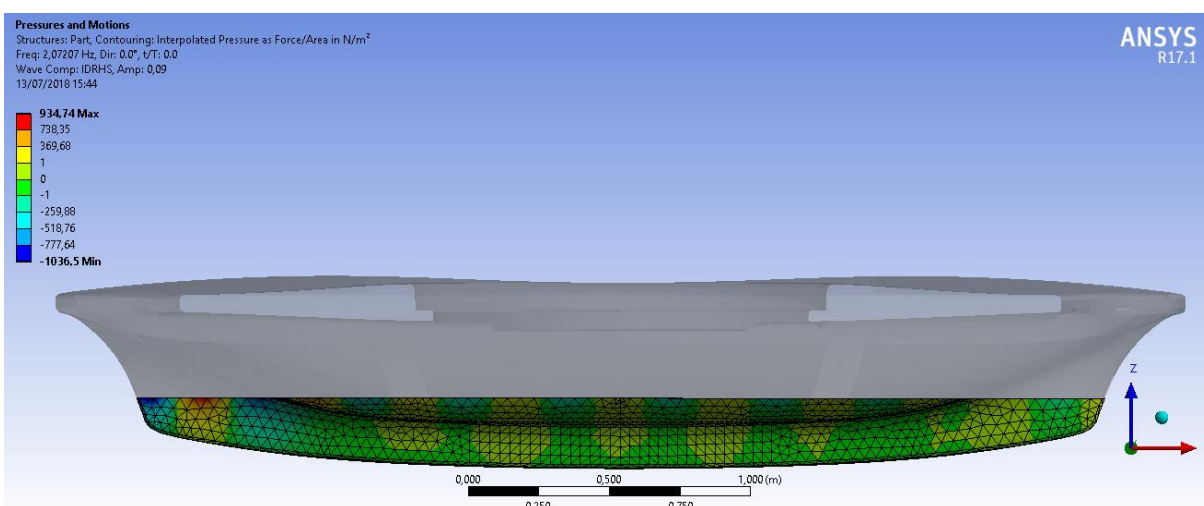
### 5.3 - Mapa dos gradientes de pressões atuantes no casco da embarcação

Para a análise destes resultados, serão avaliados as condições de peso leve e a condição 3 de piloto com carga excepcional abrangendo assim, o valor mínimo e máximo do calado de navegação do barco.

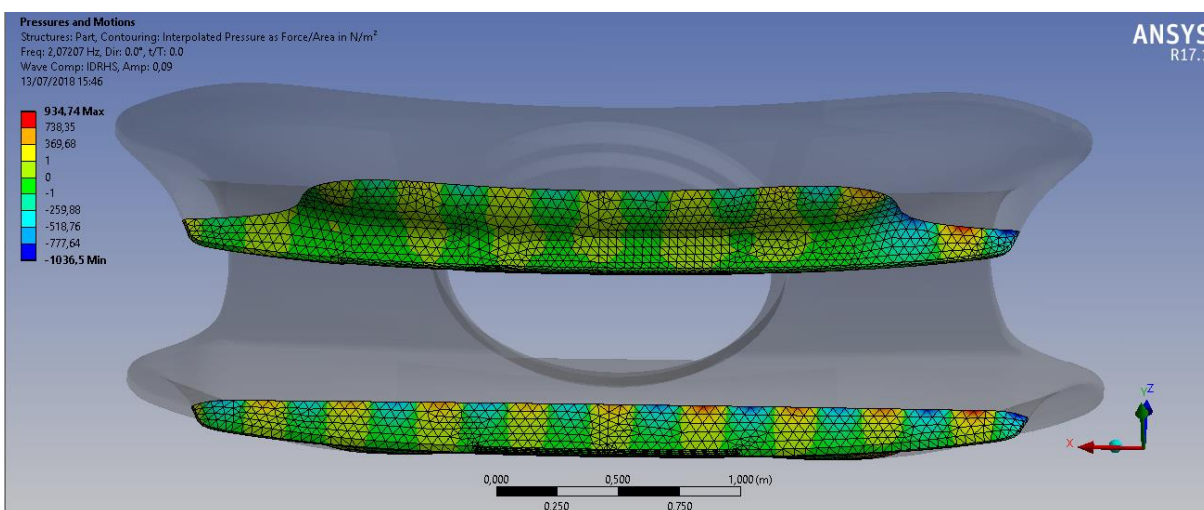
#### 5.3.1 - Condição 0: leve

Figura 36: Gradiente de pressões, condição 0: leve.

(a)



(b)

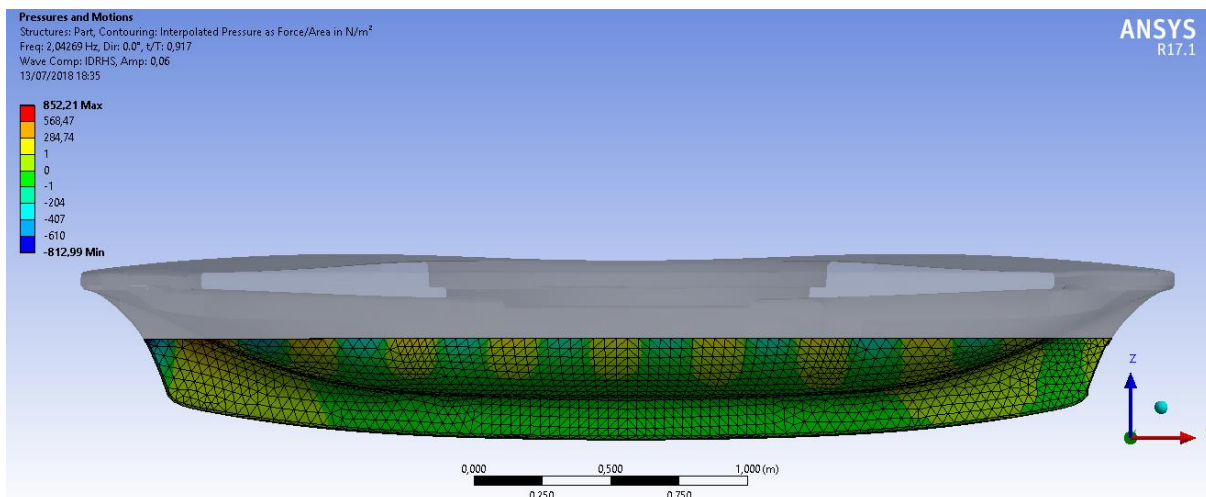


Fonte: Ansys Aqwa *Diffraction*

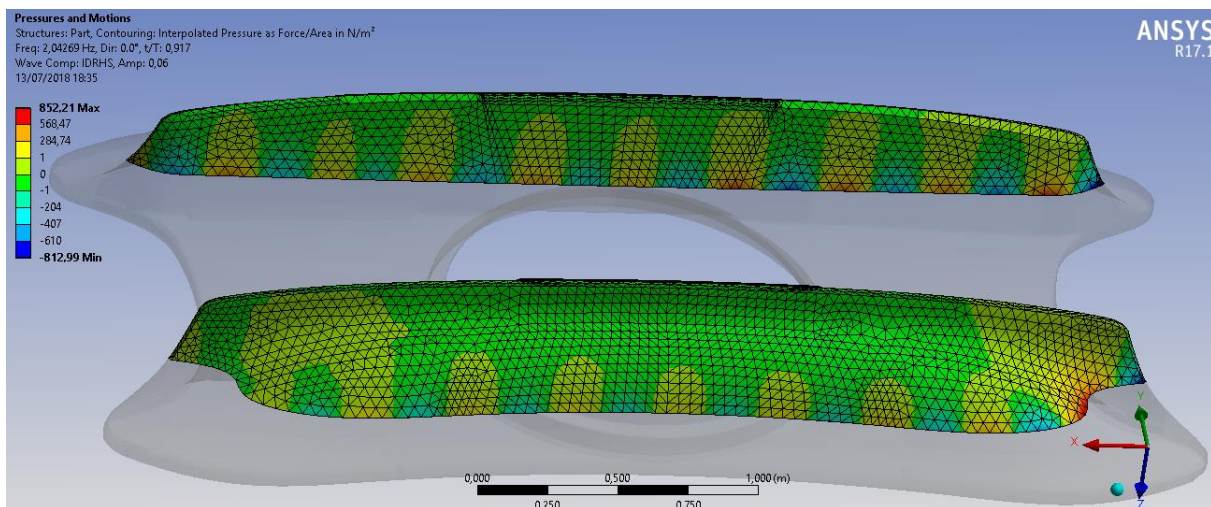
### 5.3.2 - Condição 3: piloto e carga excepcional

Figura 37: Gradiente de pressões, condição 3: piloto e carga excepcional.

(a)



(b)



Fonte: Ansys Aqwa *Diffraction*

### 5.3.3 - Análise dos resultados do campo de pressões

Foi observado para estes resultados do campo de pressões, que o módulo Aqwa calcula a variação de pressão na embarcação de acordo com o calado, oscilando com a forma da onda para os resultados máximos e mínimos de pressões.

Dessa forma, é necessário calcular a pressão hidrostática na embarcação para obter o resultado geral da pressão de incidência de onda no módulo *Structural*. A pressão hidrostática é a força que as moléculas de fluidos exercem umas sobre as outras devido à atração gravitacional da Terra. Essa força ocorre quando um líquido está em movimento ou em completa paralisação.

#### 5.4 - Tensões e deformações máximas no casco da embarcação

Será realizado o estudo através das linhas de comando (APDL) que importa os dados das pressões oceânicas vindas do Ansys Aqwa.

Para esta análise estrutural, sabendo que a embarcação de estudo deste trabalho é formada por madeira com fibra de vidro, será adotado o critério de falha para materiais frágeis, conforme a teoria da tensão normal máxima – W. Rankine – 1800. A teoria da tensão normal máxima estabelece que um material frágil falha quando a tensão principal máxima  $\sigma_1$  atinge um valor limite igual ao limite de resistência que o material suporta quando submetido a tração simples (HIBBELER, 2009).

##### 5.4.1 - Condição 0: leve

De forma inicial é necessário inserir a opção da Pressão hidrostática (Ph) que possui a seguinte fórmula:

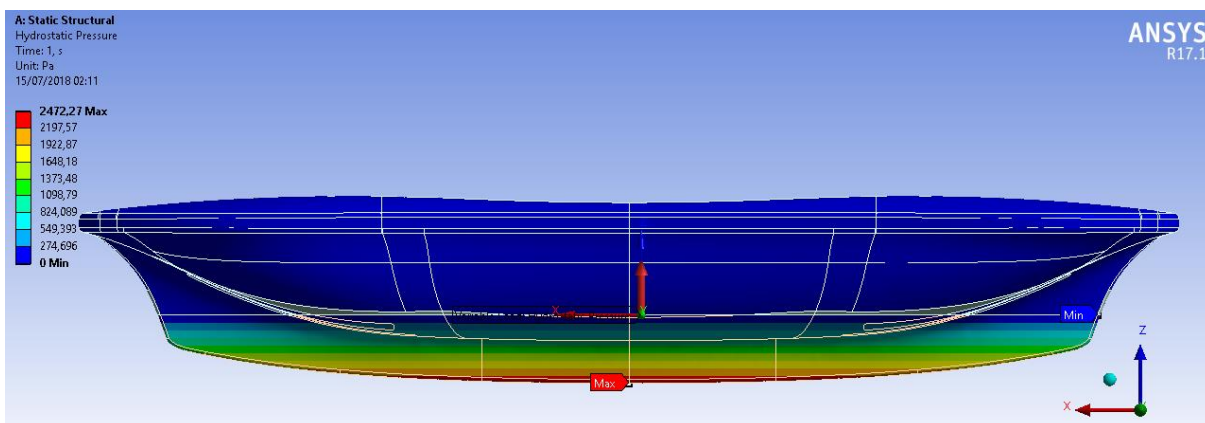
$$Ph = \rho \cdot g \cdot h \quad (37)$$

onde:

- $g = 9,8066 \text{ m/s}^2$ ;
- $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ ;
- $h = 0,246 \text{ m}$ .

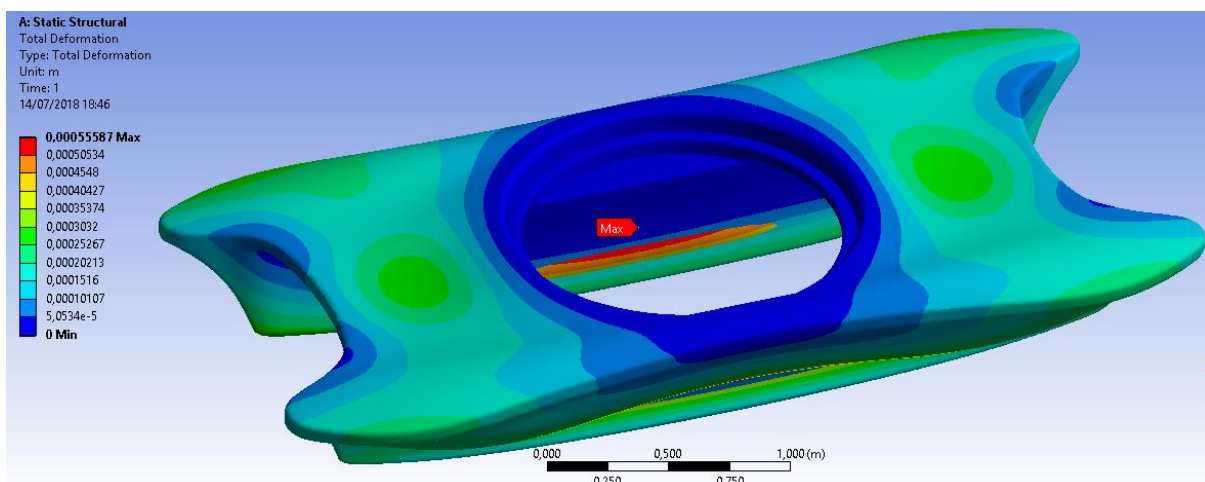
Substituindo estes valores na Equação 37 obtemos  $Ph = 2472 \text{ Pa}$ , mesmo valor calculado no software Ansys *Structural* visto na Figura 38:

Figura 38: Pressão hidrostática, condição 0: leve.



Fonte: Ansys *Static Structural - Mechanical APDL*

Figura 39: Deformação total.

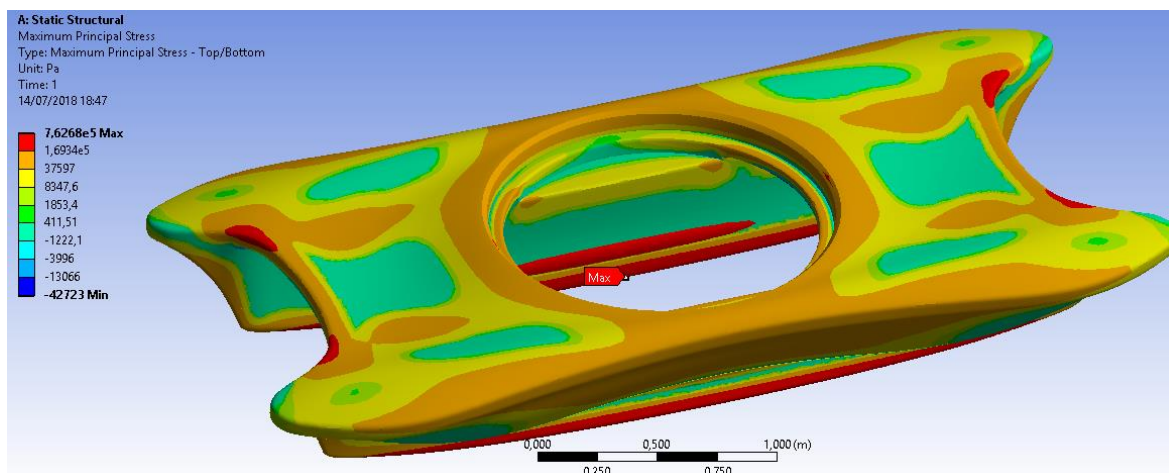


Fonte: Ansys *Static Structural - Mechanical APDL*

- A maior deformação obtida no módulo Structural foi de aproximadamente 0,55 mm, portanto esta deformação não impediu o funcionamento da embarcação, logo este critério obteve aprovação.



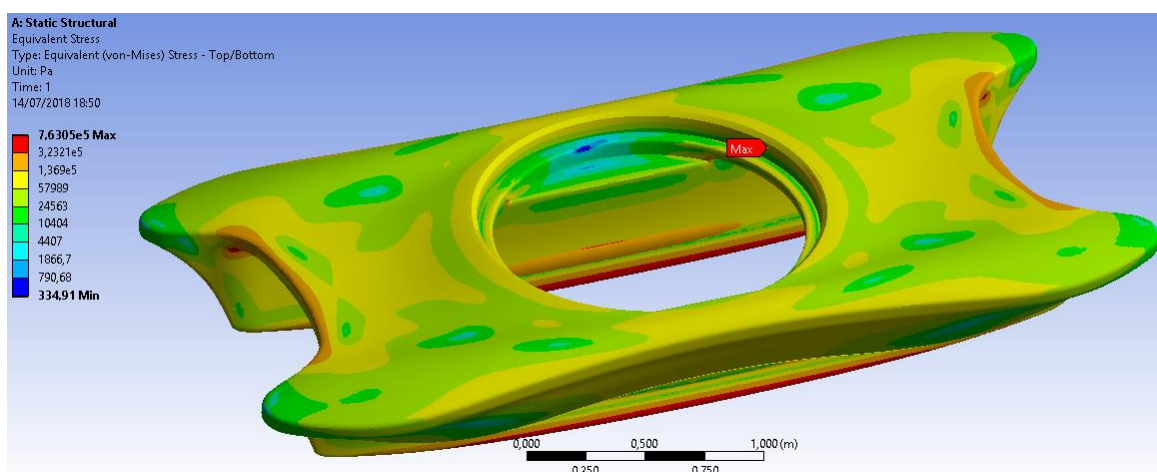
Figura 40: Tensão normal máxima.



Fonte: Ansys *Static Structural - Mechanical APDL*

- De acordo com critério de falha para materiais frágeis, conforme a teoria da tensão normal máxima – W. Rankine e com base nos estudos de (CAI, 2006), o material G-MDF que é o MDF reforçado com fibra de vidro, possui os seguintes valores máximos, ( Módulo de tensão de ruptura = 33,4 MPa) e (Módulo de elasticidade = 3,31 GPa). Devido a esses critérios, foi visto que neste caso as regiões da embarcação não irão fraturar, pois a tensão máxima obtida de  $7,62e5 \text{ Pa} < 33,4e6 \text{ Pa}$ .

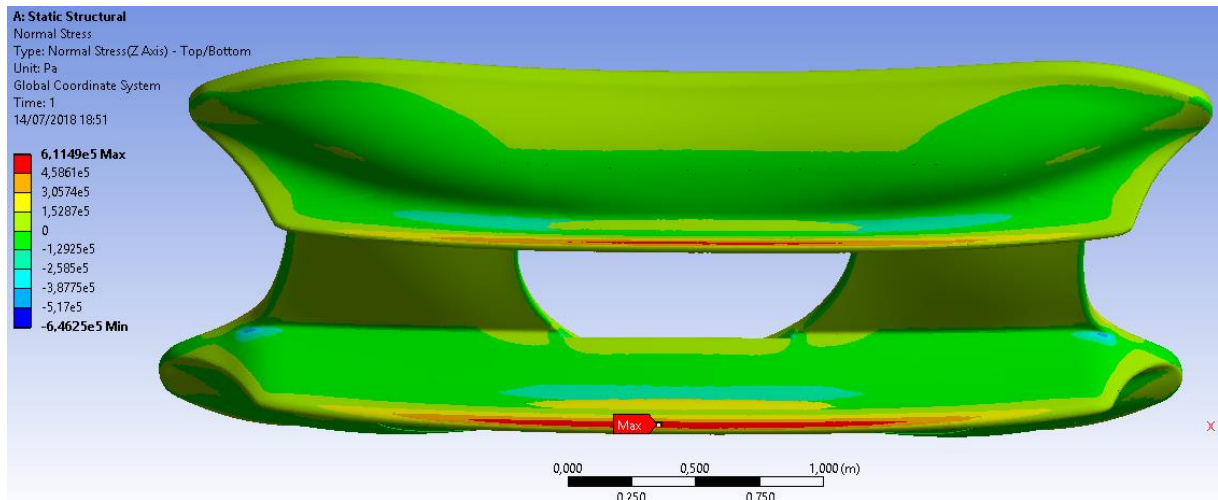
Figura 41: Tensão equivalente de Von Mises.



Fonte: Ansys *Static Structural - Mechanical APDL*

- A tensão máxima equivalente de Von Mises foi de  $7,63e5 \text{ Pa} < 33,4e6 \text{ Pa}$ , sendo aprovada neste critério.

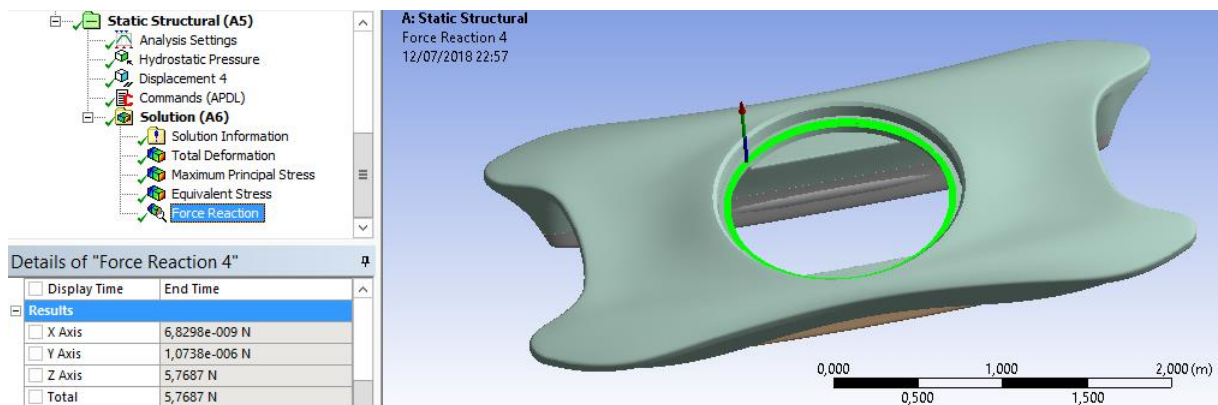
Figura 42: Tensão normal (Eixo Z).



Fonte: Ansys Static Structural - Mechanical APDL

- A tensão normal em Z possui valor máximo no fundo do casco da embarcação de  $6,11e5 \text{ Pa} < 33,4e6 \text{ Pa}$ , atende ao critério.

Figura 43: Reação na restrição do deslocamento, região central.



Fonte: Ansys Static Structural - Mechanical APDL

- Na Figura 43 é mostrada a força na região da restrição do deslocamento, nos 3 eixos x, y e z, é visto no eixo z uma diferença mínima de 5,7 N que equivale a 0,5 kg de força, estando assim a embarcação em equilíbrio entre o peso e o empuxo.

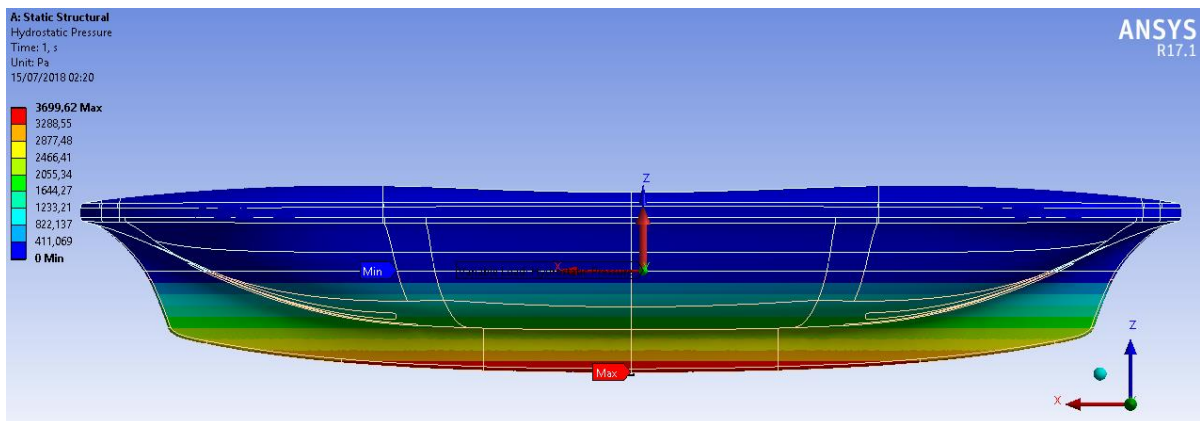
### 5.4.2 - Condição 3: piloto e carga excepcional

Para o cálculo da pressão hidrostática para a condição 3 temos os seguintes valores:

- $g = 9,8066 \text{ m/s}^2$ ;
- $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ ;
- $h = 0,368 \text{ m}$ .

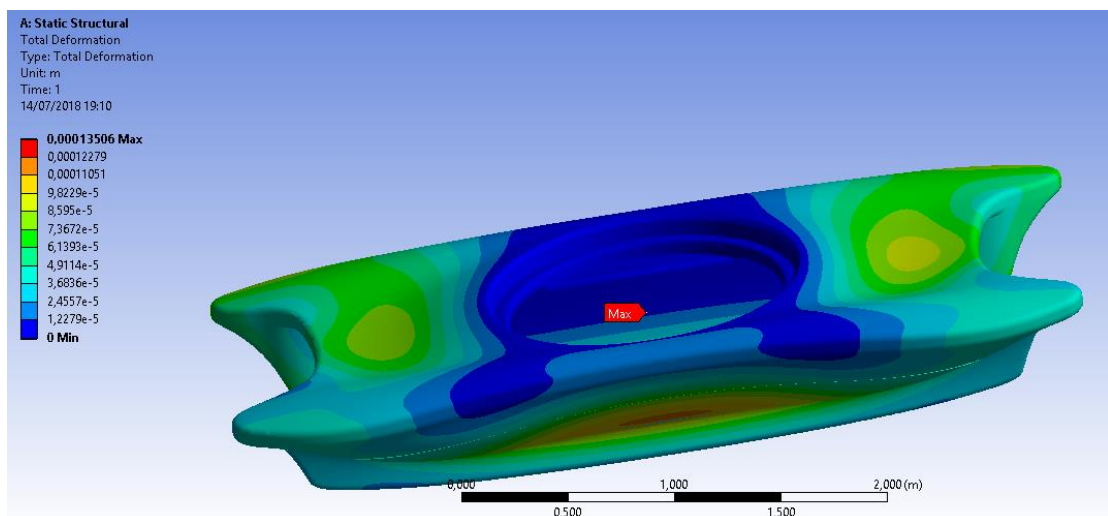
Substituindo estes valores na Equação 37 obtemos  $Ph = 3699 \text{ Pa}$ , mesmo valor calculado no software Ansys *Structural* visto na Figura 44:

Figura 44: Pressão hidrostática, condição 3: piloto e carga excepcional.



Fonte: Ansys *Static Structural* - *Mechanical APDL*

Figura 45: Deformação total.

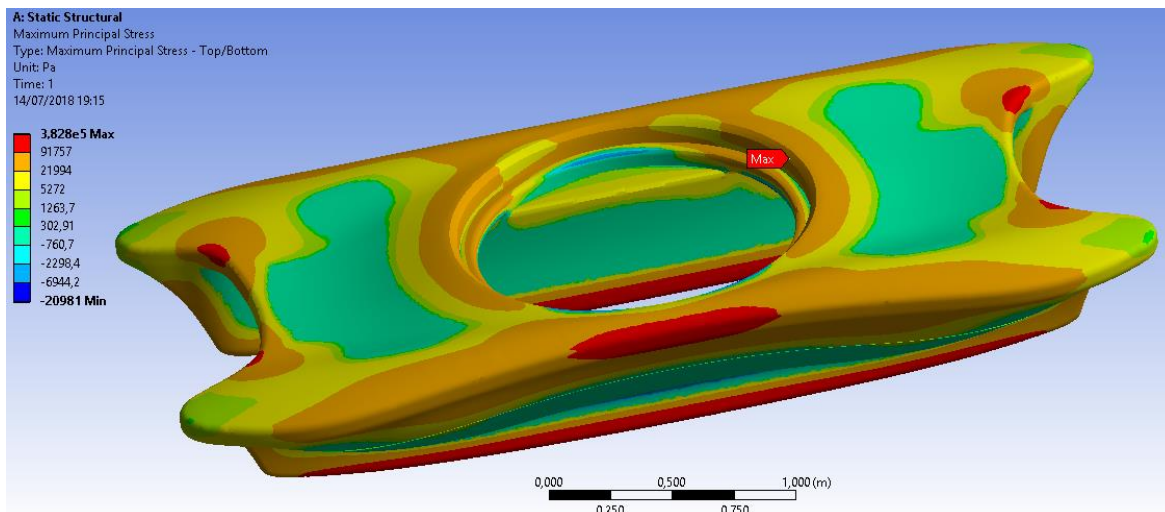


Fonte: Ansys *Static Structural* - *Mechanical APDL*



- A maior deformação obtida no módulo Structural foi de aproximadamente 0,135 mm, portanto esta deformação não impedi o funcionamento da embarcação, logo este critério obteve aprovação.

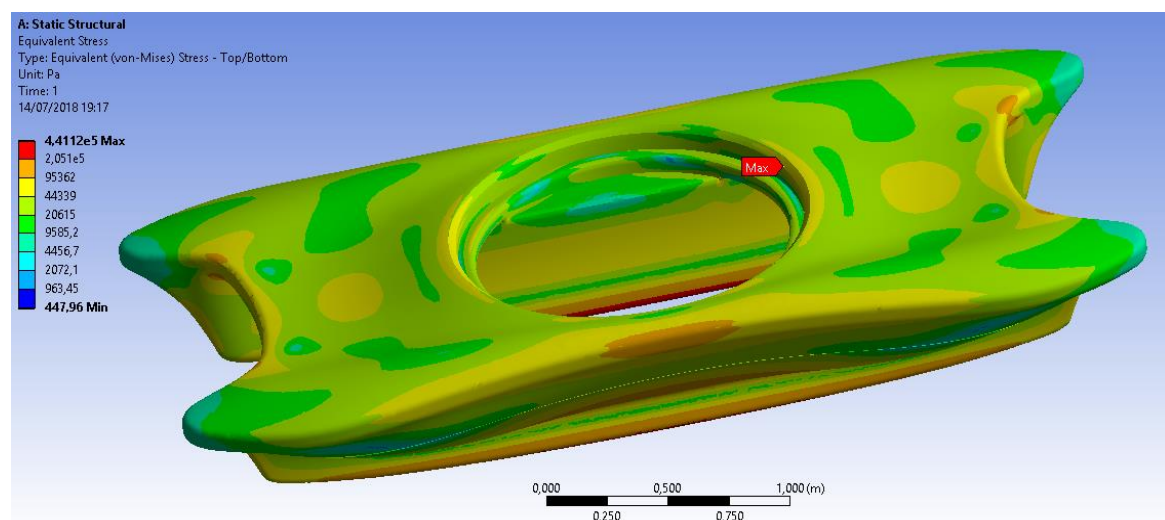
Figura 46: Tensão normal máxima.



Fonte: Ansys *Static Structural - Mechanical APDL*

- O valor máximo obtido para a tensão normal máxima para esta condição foi de  $3,828e5 \text{ Pa} < 33,4e6 \text{ Pa}$ , sendo assim, conforme critério de falha para materiais frágeis adotado neste trabalho, o barco para esta condição máxima de carregamento está aprovado conforme tensão normal máxima calculada.

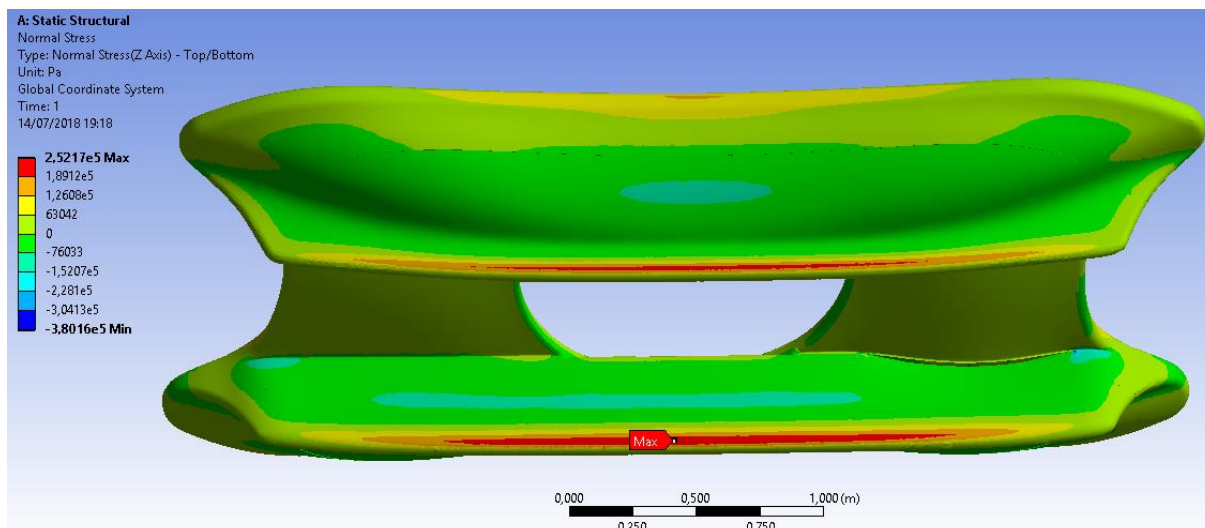
Figura 47: Tensão equivalente de Von Mises.



Fonte: Ansys *Static Structural - Mechanical APDL*

- A tensão máxima equivalente de Von Mises foi de  $4,41e5$  Pa  $<$   $33,4e6$  Pa, sendo aprovada neste critério.

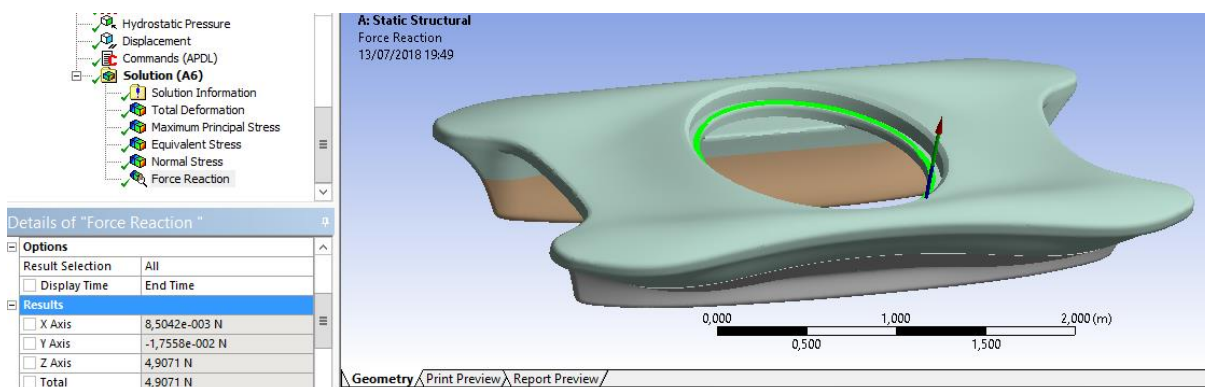
Figura 48: Tensão normal (Eixo Z).



Fonte: Ansys Static Structural - Mechanical APDL

- A tensão normal em Z possui valor máximo no fundo do casco da embarcação de  $2,52e5$  Pa  $<$   $33,4e6$  Pa, atende ao critério.

Figura 49: Reação na restrição do deslocamento, região central.



Fonte: Ansys Static Structural - Mechanical APDL

- Na Figura 49 é mostrada a força na região da restrição do deslocamento, nos 3 eixos x, y e z, é visto no eixo z uma diferença mínima de 4,9 N que equivale a 0,5 kg de força, estando assim a embarcação em equilíbrio entre o peso e o empuxo.

## Capítulo 6 - Conclusões

Ao final deste trabalho foi possível aprofundar neste tema tão importante para a engenharia naval que é a análise fluido-estrutura do artefato naval. Neste trabalho foi tomado como modelo real o barco de propulsão por kite da tese de doutorado do professor Edwin Althor. Com o modelo computacional desta embarcação foi possível avaliar a integridade do casco devido ao carregamento de ondas para diferentes frequências e carregamentos, questão fundamental que é avaliar a segurança para todas as engenharias. A partir deste trabalho sobre análise fluido-estrutura, outros poderão ser feitos tomando como base o *software* Ansys Aqwa voltado especialmente para a engenharia naval. Na realização deste trabalho todos os resultados atenderam aos critérios de segurança na avaliação estrutural do barco movido por kite. Para o aprendizado do *software* Ansys Aqwa com todas as suas ferramentas foi um trabalho árduo, mas no final foi obtido êxito. Para melhoria do módulo Aqwa e do *Mechanical*, proponho uma opção de acoplamento do carregamento oceânico de forma automática, ajudando aos estudos acadêmicos referentes a análise fluido-estrutura.

## Capítulo 7 - Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- A otimização da geometria da embarcação da tese de doutorado do professor Edwin Althor devido às baixas tensões encontradas neste trabalho;
- A comparação com resultados via volumes finitos.

## Referências bibliográficas

AMARAL, L. **Interação Fluido-Estrutura**. Disponível em: <<http://www.esss.com.br/blog/2016/04/interacao-fluido-estrutura-o-que-e/>>. Acesso em: 11 dez. 2017.

ANDRÉ, R. et al. Análise De Interação Fluido-Estrutura Pelo Método Dos Elementos Finitos. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, v. 11, n. 53, p. 187–191, 2009.

ANSYS. **Ansys Aqwa Brochure**, 2010. Disponível em: <<http://resource.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/brochure/ansys-aqwa-brochure.pdf>>

ANSYS, I. **Structures: FEA Simulation | ANSYS**. Disponível em: <<http://www.ansys.com/zh-TW/products/structures>>. Acesso em: 11 dez. 2017.

BEOVICA, E.; DAYB, A. H.; INCECIKB, A. An experimental study of hull girder loads on an intact and damaged naval ship. **Ocean Engineering**, v. 133, p. 47–65, 2017.

BORGES, A. S.; LUZIANO, W.; JÚNIOR, P. Análise Fluido Estrutural Utilizando O Ansys ®. p. 1–10, 2007.

CAI, Z. Selected properties of MDF and flakeboard overlaid with fiberglass mats. v. 56, n. 10155, p. 142–146, 2006.

DENTALE, F. et al. A CFD approach to rubble mound breakwater design. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, p. 1–7, 2017.

DNV.GL. **Método dos Painéis (Teoria Potencial 3D)**. Disponível em: <<https://www.dnvgl.com.br/>>. Acesso em: 13 dez. 2017.

ELHANAFI, A. Prediction of regular wave loads on a fixed offshore oscillating water column–wave energy converter using CFD. **Journal of Ocean Engineering and Science**, v. 0, n. 4, p. 1–16, 2016.

ENSUS. **Análise de Tensões**. Disponível em: <<http://ensus.com.br/analise-de-tensoes/>>. Acesso em: 13 dez. 2017.

ESSS, G. **ANSYS Channel Partner for Brazil and South America**. Disponível em:

<[http://www.esss.com.br/software\\_ansys.php](http://www.esss.com.br/software_ansys.php)>. Acesso em: 11 dez. 2017.

FORTUNA, A. DE O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos**. São Paulo: Edusp- Editora da Universidade de São Paulo, 2000.

GIUSEPPE MIRLISENNA, M. S. **Método dos elementos finitos**. Disponível em: <<http://www.esss.com.br/blog/2016/01/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso em: 6 dez. 2017.

HIBBELER. **Resistência dos Materiais**. 7° ed. São Paulo: Pearson, 2009.

HIRDARIS, S. E. et al. Considerations on the potential use of Nuclear Small Modular Reactor (SMR) technology for merchant marine propulsion. **Ocean Engineering**, v. 79, n. March, p. 101–130, 2014.

HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, v. 39, n. 1, p. 201–225, 1981.

JOURNÉE AND MASSIE. **Offshore Hydromechanics**. 5° ed. [s.l: s.n.]. v. 47

LAVRO, J. et al. Wave impact loads on wave-piercing catamarans. v. 131, n. November 2015, p. 263–271, 2017.

LUNDGREN, E. A. J. N. **Desenvolvimento Conceitual, Projeto, Construção e Testes de um Barco Bidirecional sem Leme movido por Kite**. Recife, 2015.

MACIEL LYRA, P. R. **Geração de malhas**, 1999.

OLIVEIRA, A. G. et al. Aplicações da fluidodinâmica computacional (CFD) nas tecnologias de destilação, FCC e coqueamento retardado na engenharia básica de abastecimento do Cenpes. **Boletim Técnico da PETROBRAS**, v. 54, n. 1–2, p. 107–116, 2011.

PERNAMBUCO, U. F. DE; NAVAL, C. D. E. **APOSTILA DE PROJETO ESTRUTURAL 1**, 2007.

RAWSON, K. J. et al. **Basic Ship Theory**. Fifth ed. London: British Library, 2001.

SKYSAILS. **Embarcação movida por kite**. Disponível em: <<http://www.skysails.info/english/media/photos-and-graphics/>>. Acesso em: 11 jan.

2017.

STERN, F. et al. Recent progress in CFD for naval architecture and ocean engineering. **Journal of Hydrodynamics**, v. 27, n. 1, p. 1–23, 2015.

TEMAREL, P. et al. Prediction of wave-induced loads on ships: Progress and challenges. **Ocean Engineering**, v. 119, p. 274–308, 2016.

VERLANGIERI, N. **Janela de vento**. Disponível em: <[http://www.kitesurfmania.com.br/school\\_det.asp?id\\_article=250&id\\_category=15](http://www.kitesurfmania.com.br/school_det.asp?id_article=250&id_category=15)>. Acesso em: 11 jan. 2018.

YANG, B.; WANG, Z. C.; WU, M. Numerical simulation of naval ship's roll damping based on CFD. **Procedia Engineering**, v. 37, p. 14–18, 2012.

YAO, Z. et al. Calculation and analysis of the wave load of jack-up offshore wind turbine installation vessel during dynamic positioning. n. *Icismme*, p. 1043–1047, 2015.