



PROGRAMA FRANCISCO EDUARDO MOURÃO SABOYA DE  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

Dissertação de Mestrado

OBTENÇÃO DA RESPOSTA DE UMA  
EMBARCAÇÃO VIRTUAL SUJEITA A  
EXPLOSÕES SUBMARINAS

CÉSAR AUGUSTO BERNARDI WERLE

JUNHO DE 2023

CÉSAR AUGUSTO BERNARDI WERLE

OBTENÇÃO DA RESPOSTA DE UMA EMBARCAÇÃO  
VIRTUAL SUJEITA A EXPLOSÕES SUBMARINAS

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Programa Francisco Eduardo Mourão Saboya  
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da  
UFF como parte dos requisitos para a obtenção  
do título de Mestre em Ciências em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Antonio Lopes Gama, D.Sc. (PGMEC/UFF)

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
NITERÓI, 14 DE JUNHO DE 2023

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE  
Gerada com informações fornecidas pelo autor

W489o Werle, César Augusto Bernardi  
Obtenção da Resposta de uma Embarcação Virtual Sujeita a  
Explosões Submarinas / César Augusto Bernardi Werle. - 2023.  
96 f.

Orientador: Antonio Lopes Gama.  
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,  
Escola de Engenharia, Niterói, 2023.

1. Projeto Estrutural. 2. Análise Estrutural. 3. Explosões  
Submarinas. 4. Dinâmica Explícita. 5. Produção  
intelectual. I. Gama, Antonio Lopes, orientador. II.  
Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. III.  
Título.

CDD - XXX

# OBTENÇÃO DA RESPOSTA DE UMA EMBARCAÇÃO VIRTUAL SUJEITA A EXPLOSÕES SUBMARINAS

Esta Dissertação é parte dos pré-requisitos para a obtenção do título de

## **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos

Aprovada em sua forma final pela Banca Examinadora formada pelos professores:

---

Prof. Antonio Lopes Gama (D.Sc.)  
Universidade Federal Fluminense  
(Orientador)

---

Prof. Luiz Carlos da Silva Nunes (D.Sc.)  
Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco (D.Sc.)  
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET

## Agradecimentos

Primeiramente a Deus, o qual me agraciou com a vida e com a saúde para a elaboração e a conclusão deste trabalho, em plena pandemia.

Aos meus pais, Justina e Rudemar, por ensinarem desde cedo, o real valor do esforço, determinação e caráter para a suplantação dos inúmeros desafios ao longo da vida.

À minha amada esposa Tatiana, meus filhos Yasmin e Théo, e a minha sogra Maria Lúcia, por todo o carinho e sacrifícios enfrentados durante a fase de preparação deste estudo.

Ao meu irmão Leandro, minha nora Juliana e a adorada Joana, por todo o incentivo.

Ao meu orientador, professor Antonio Lopes Gama, por toda a confiança depositada e os inúmeros conhecimentos compartilhados.

Ao CC(EN) Brenno Moura e ao CC(EN) Silva Lopes, pelo auxílio técnico prestado, e ao Laboratório de Ensaio Dinâmico e Análise de Vibração (LEDAV) da UFRJ, pela cessão do modelo virtual do catamarã utilizado na simulação.

À banca examinadora, pelas valorosas sugestões e pelo tempo dedicado na análise deste trabalho.

À Marinha do Brasil, instituição militar a qual tenho a honra de pertencer, por ter possibilitado a minha capacitação profissional.

A todos que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, pois nada fizemos de maneira isolada.

*“Whoever can hold the sea has command of everything.”*  
*Themistocles (524-460 B.C.)*

# RESUMO

Após a Segunda Guerra Mundial, iniciou-se uma grande demanda para aumentar a resistência dos meios navais ao choque devido a explosões submarinas. Este fenômeno causa altos deslocamentos, velocidades e acelerações na estrutura e nos equipamentos a bordo dos navios. É de extrema importância para os projetistas obter a resposta da estrutura para reduzir a possibilidade de falha estrutural e dos principais equipamentos dotados a bordo. Este trabalho tem por objetivo obter a resposta dinâmica de uma embarcação (em termos de deslocamentos, velocidades e acelerações) sujeita a explosões submarinas em um ambiente virtual. Utilizando a metodologia de dinâmica explícita disponível na plataforma do software Ansys®, modelou-se o fenômeno físico e, após a definição das condições iniciais e de contorno inseridas no modelo, foi possível extrair os deslocamentos, as velocidades e as acelerações impostas pelo efeito explosivo em determinados pontos de interesse na estrutura de uma embarcação genérica. Simplificações foram necessárias, visando a otimização do *hardware* empregado na solução do problema proposto. Dos eventos contendo três cargas explosivas distintas (88 kg, 600 kg e 1.850 kg) de PETN 1.5, observou-se o aumento da resposta nos pontos selecionados conforme o aumento do peso da carga explosiva empregada. Adicionalmente, foi constatado que as respostas em termos de acelerações e tensões máximas são maiores abaixo do convés principal, devido ao maior impacto da onda de pressão e de choque ocorrer na área do casco em contato com a água. Cabe destacar que, utilizando-se as modernas ferramentas computacionais disponíveis, pode-se obter em diferentes cenários, de maneira relativamente rápida e a um custo aceitável, a resposta da estrutura naval sujeita a explosões submarinas.

Palavras-Chave: Explosões Submarinas; Resposta Estrutural; Dinâmica Explícita.

# ABSTRACT

After the World War II, a huge effort to increase the UNDEX (Underwater Explosions) shock resistance of naval ships was performed. These phenomena induce high displacements, velocities and accelerations in the ship's structure and onboard equipment. It is of extreme importance for the designers to reduce the possibility of structural and main onboard equipment failure due to UNDEX. The main goal of this work is to obtain the dynamic response of a generic ship subjected to UNDEX in a virtual environment. Using the explicit dynamic method available in the Ansys® platform it was possible to determine the displacements, velocities and accelerations imposed by the explosive effect at the points of interest in a virtual structure of a catamaran. Simplifications was necessary, to optimize the hardware employed in the proposed problem. Discrete-event simulations using three distinct explosive loads (88 kg, 600 kg and 1,850 kg), showed an increasing response in the selected points with the increasing of the explosive charge employed. Additionally, it was observed that the response in terms of accelerations and maximum stress are higher at bellow main deck because of the highest shock and pressure wave impact that occur at the hull area in contact with the water. It was concluded that, using the explicit dynamic method, the severe damage imposed to the structure of a ship due to UNDEX can be determined. It was also noticed that, employing the advanced CAE (Computed Aided Engineering) tools, it is possible to obtain the response of the ship's structure caused by UNDEX in different scenarios, relatively quickly, and with an acceptable financial cost.

Key-Words: UNDEX (Underwater Explosions); Structural Response; Explicit Dynamics.

# SUMÁRIO

Agradecimentos .....	iv
Epígrafe .....	v
Resumo .....	vi
Abstract .....	vii
Lista de Figuras .....	xi
Lista de Tabelas .....	xv
Lista de Símbolos .....	xvi
Nomenclaturas e Definições .....	xviii

## **Capítulo 1. Introdução**

1.1. Considerações Gerais .....	1
1.2. Descrição do Trabalho .....	2
1.3. Objetivo Geral e Objetivos Secundários .....	3

## **Capítulo 2. A Cinemática das Explosões Submarinas e seus Efeitos em Meios Navais**

2.1. Introdução .....	4
2.2. O Fenômeno Físico das Explosões Submarinas.....	5
2.2.1. A Onda de Choque.....	7
2.2.2. O Movimento de Bolha Gasosa.....	11
2.2.3. Efeitos de Superfície.....	13
2.3 Principais Danos em Meios Navais.....	15
2.4 Medidas de Redução do Dano Causado pelas Explosões Submarinas.....	21

### **Capítulo 3. Evolução da Simulação Computacional em Explosões Submarinas**

3.1. Introdução .....	25
3.2 Diferenças entre o Método Implícito e Explícito.....	26
3.3 Abordagem Euleriana <i>versus</i> Lagrangeana.....	31
3.4 Abordagem ALE ( <i>Arbitrary Lagrangean Eulerian</i> ) e SPH ( <i>Smoothed Particle Hydrodynamics</i> ).....	33
3.5 Abordagem com elementos acústicos.....	35
3.6 Resultados Obtidos com a Simulação de Explosões Submarinas em Embarcações.....	37

### **Capítulo 4. Modelagem Numérica do Problema Proposto**

4.1. Introdução .....	43
4.2. Modelagem do Problema.....	46
4.3. Simplificações Adotadas.....	51
4.4. Validação do Método.....	54

### **Capítulo 5. Resultados Obtidos**

5.1. Introdução .....	58
5.2. Apresentação dos Resultados.....	59
5.2.1. Resposta em termos de deslocamento total.....	60
5.2.2. Resposta em termos de velocidade total.....	61
5.2.3. Resposta em termos de aceleração total.....	63
5.2.4. Resposta em termos de tensão máxima segundo von Mises.....	63
5.3. Análise Comparativa dos Resultados.....	66

## **Capítulo 6. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros**

6.1. Conclusão .....68

6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros.....69

**Referências Bibliográficas** .....71

**APÊNDICE A: Gráficos do Balanço de Energia**

## Lista de Figuras

Figura 1 – Tipos de carga submarinas.....	5
Figura 2 – Alguns efeitos físicos gerados em explosões submarinas .....	6
Figura 3 – Efeito da reflexão do fundo do mar e da superfície da água na explosão submarina.....	9
Figura 4 – Onda de choque e movimento de bolhas no fenômeno das explosões submarinas.....	12
Figura 5 – Efeitos de superfície em explosões submarinas.....	14
Figura 6 – Limites da cavitação volumétrica em explosões submarinas.....	15
Figura 7 – Representação do Fator de Choque de Quilha.....	16
Figura 8 – Danos causados por explosões de contato na Fragata USS Samuel B. R. (A) e no Porta-Aviões USS Tripoli (B).....	18
Figura 9 – Danos causados por explosão sem contato no cruzador USS Princeton.....	19
Figura 10 – Valores de aceleração em diferentes pontos de uma embarcação.....	20
Figura 11 – USS Gerald R. Ford (CVN 78) em um evento de FSST.....	23
Figura 12 – Ilustração do processo iterativo do método de integração de Newton-Raphson.....	27
Figura 13 – Ilustração do emprego do método explícito para fenômenos físicos com duração de tempo inferior a um segundo.....	28
Figura 14 – Ilustração do método da diferença central de tempo no método de dinâmica explícita.....	29
Figura 15 – Ilustração da diferença entre as formulações Euleriana e Lagrangeana.....	32
Figura 16 – Ilustração dos deslocamentos nodais em uma abordagem ALE.....	33
Figura 17 – Ilustração dos elementos de uma solução tradicional de MEF (A) e o conceito da solução de partículas sem malha do método SPH (B).....	34
Figura 18 – Ilustração dos elementos de referência do método DDA: estrutura submersa (S), volume de fluido cavitando (V) e a fronteira da camada DAA (D).....	36

Figura 19 – Gráfico da velocidade vertical obtida em um evento de FSST e por meio de simulações.....	39
Figura 20 – Gráfico da velocidade vertical obtida em um evento de FSST e por meio de simulações.....	40
Figura 21 – Gráficos da velocidade vertical (A), da pressão total normalizada (B) e da deflexão central para cada método empregado (C).....	42
Figura 22 – Modelo tridimensional do catamarã utilizado no trabalho.....	44
Figura 23 – Modelagem virtual utilizado no trabalho.....	44
Figura 24 – Pontos acima do convés principal.....	45
Figura 25 – Pontos abaixo do convés principal.....	46
Figura 26 – Fluxograma de pré-processamento.....	47
Figura 27 – Fluxograma de pós-processamento.....	48
Figura 28 – Malha gerada no modelo tridimensional.....	49
Figura 29 – Vista do ponto de detonação e do leito marinho.....	50
Figura 30 – Gráfico das parcelas de pressão constituintes do modelo JWS.....	51
Figura 31 – Fator de <i>skewness</i> da malha utilizada no modelo tridimensional adotado neste trabalho.....	53
Figura 32 – Gráfico dos deslocamentos obtidos no modelo virtual (A) e experimentalmente (B).....	54
Figura 33 – Refinamento da malha para a validação do método utilizado.....	55
Figura 34 – Deslocamento máximo obtido no módulo de Dinâmica Explícita do ANSYS®.....	56
Figura 35 – Gráfico do teste de malha efetuado no módulo de Dinâmica Explícita do Ansys®.....	57
Figura 36 – Gráfico dos Impulsos e Momentos gerados pela carga explosiva de 5 gramas de TNT.....	57
Figura 37 – Tipos de minas submarinas adotadas por alguns países.....	59
Figura 38 – Deformação total da estrutura superior para a carga explosiva de 88 kg.....	60

Figura 39 – Deformação total da estrutura superior para a carga explosiva de 600 kg.....	60
Figura 40 – Deformação total da estrutura superior para a carga explosiva de 1.850 kg.....	60
Figura 41 – Deformação total da estrutura inferior para a carga explosiva de 88 kg.....	61
Figura 42 – Deformação total da estrutura inferior para a carga explosiva de 600 kg.....	61
Figura 43 – Deformação total da estrutura inferior para a carga explosiva de 1.850 kg.....	61
Figura 44 – Velocidade total da estrutura superior para a carga explosiva de 88 kg.....	62
Figura 45 – Velocidade total da estrutura superior para a carga explosiva de 600 kg.....	62
Figura 46 – Velocidade total da estrutura superior para a carga explosiva de 1.850 kg.....	62
Figura 47 – Velocidade total da estrutura inferior para a carga explosiva de 88 kg.....	62
Figura 48 – Velocidade total da estrutura inferior para a carga explosiva de 600 kg.....	62
Figura 49 – Velocidade total da estrutura inferior para a carga explosiva de 1.850 kg.....	63
Figura 50 – Aceleração total da estrutura superior para a carga explosiva de 88 kg.....	63
Figura 51 – Aceleração total da estrutura superior para a carga explosiva de 600 kg.....	63
Figura 52 – Aceleração total da estrutura superior para a carga explosiva de 1.850 kg.....	63
Figura 53 – Aceleração total da estrutura inferior para a carga explosiva de 88 kg.....	64
Figura 54 – Aceleração total da estrutura inferior para a carga explosiva de 600 kg.....	64
Figura 55 – Aceleração total da estrutura inferior para a carga explosiva de 1.850 kg.....	64
Figura 56 – Tensão máxima da estrutura superior para a carga explosiva de 88 kg.....	64
Figura 57 – Tensão máxima da estrutura superior para a carga explosiva de 600 kg.....	65
Figura 58 – Tensão máxima da estrutura superior para a carga explosiva de 1.850 kg.....	65
Figura 59 – Tensão máxima da estrutura inferior para a carga explosiva de 88 kg.....	65
Figura 60 – Tensão máxima da estrutura inferior para a carga explosiva de 600 kg.....	65
Figura 61 – Tensão máxima da estrutura inferior para a carga explosiva de 1.850 kg.....	65

Figura 62 – Gráfico 1 do balanço de energia do evento de explosão submarina simulado..... A-I

Figura 63 – Gráfico 2 do balanço de energia do evento de explosão submarina simulado..... A-II

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Coeficientes para diferentes cargas explosivas.....	8
Tabela 2.2 – Coeficiente $C_r$ do TNT para diferentes pressões incidentes.....	8
Tabela 2.3 – Classificação das explosões submarinas.....	17
Tabela 3.1 – Caracterização da dimensão do elemento nodal em função do tipo.....	31
Tabela 5.1 – Resposta da estrutura acima do convés principal.....	66
Tabela 5.2 – Resposta da estrutura abaixo do convés principal.....	67

## Lista de Símbolos

$P_p$  - Pico de pressão (MPa)

$C_r$  - Coeficiente de amplificação

$n$  – constante baseada em experimentos de explosão submarina

$W$  - Peso da carga explosiva (Kg)

$R$  - Distância radial entre a carga explosiva e o alvo (metros)

$Z$  – Fator de Choque ou Fator de Choque de Casco ( $\text{Kg}^{1/3}/\text{m}$ )

$Z^{-1}$  - Alcance Escalar ( $\text{m}/\text{Kg}^{1/3}$ )

$K_p$  - Fator específico para o pico de pressão

$\alpha_p$  - Expoente específico para o pico de pressão

$P_{so}$  – Pressão Incidente (MPa)

$K_I$  - Fator específico para a redução do impulso

$\alpha_I$  - Expoente específico para a redução do impulso

$t_d$  – Duração do evento (em milissegundos)

$t_c$  – Tempo de chegada (em milissegundos)

$t_f$  – Tempo final (em milissegundos)

$\theta$  - Constante de tempo (em milissegundos)

$C_w$  - Velocidade acústica

$T$  – Período (segundos)

$K_{per}$  - Fator específico

$R_{m\acute{a}x}$  – Raio máximo da bolha gasosa (metros)

$Z_k$  - Fator de Choque de Quilha

$\phi$  - Ângulo entre a linha horizontal que passa ao centro da carga explosiva e a quilha do navio

$[m]$  – Matriz de massa

$[c]$  – Matriz de amortecimento

$[K]$  – Matriz de rigidez

$\{\ddot{X}\}$  – Vetor de aceleração

$\{\dot{X}\}$  – Vetor velocidade

$\{X\}$  – Vetor de deslocamento

$\{F\}$  – Vetor de força

$\Delta t$  - Incremento de tempo (segundos)  
 $u_n$  - Deslocamento no tempo n  
 $\dot{u}_n$  - Velocidade no tempo n  
 $\ddot{u}_n$  - Aceleração no tempo n  
 $\ddot{x}_i$  - Componentes de aceleração nodal (i=1, 2 e 3)  
 $F_i$  - Forças agindo no ponto nodal  
 $m$  - Massa atribuída ao nó  
 $b_i$  - Componentes de aceleração do corpo  
 $C$  - Coeficiente global de amortecimento de Rayleigh  
 $\alpha$  - Coeficiente constante de Rayleigh  
 $\beta$  - Coeficiente constante de Rayleigh  
 $f$  - Fator de estabilidade do incremento  
 $h$  - Característica da dimensão do menor elemento (metros)  
 $c$  - Velocidade do som no material (m/s)  
 $p$  - pressão da Equação de Estado de JWL (em kbar)  
 $E$  - Energia interna por unidade de massa  
 $\rho_0$  - Densidade de referência  
 $\rho$  - Densidade do material  
 $A, B, R_1, R_2$  e  $\omega$  - Parâmetros da Equação de Estado de JWL obtidos experimentalmente

## Nomenclaturas e Definições

ABS – *American Bureau of Shipping*. Sociedade Classificadora Norte-Americana.

ALE - *Arbitrary Lagrangean Eulerian*. Método Lagrangeano Euleriano Arbitrário. Ver Capítulo 3.

CAD – *Computer Aided Design*. Projeto assistido por computador. Compreendido basicamente pelos *softwares* nos quais é possível efetuar os projetos de componentes em ambiente virtual.

CAFE – *Cavitating Acoustic Finite Element*. Método utilizando elementos acústicos para a solução de interações fluido-estrutura. Ver Capítulo 3.

CASE – *Cavitating Acoustic Spectral Element*. Método utilizando elementos acústicos para a solução de interações fluido-estrutura. Ver Capítulo 3.

DAA - *Doubly Asymptotic Approximation*. Metodologia para a resolução de problemas contendo explosões em meios fluidos.

Evento Explosivo – Duração de tempo no qual perdura o efeito da detonação da carga explosiva, desde o instante inicial da detonação até o instante final da onda de choque e pressão por ela gerada.

FSST - *Full Ship Shock Trial* – Evento de teste de choque em ambiente controlado para avaliar o desempenho da estrutura e equipamentos navais de um navio de guerra sujeitos a detonação de uma carga explosiva.

*Heaving* – Arfagem. Movimento da embarcação ascendente e descendente no eixo vertical, passando pelo centro de gravidade da mesma.

H-6 – Formado por 45% RDX, 30% de TNT, 20% de alumínio em pó e 5% parafina. Explosivo militar usado em bombas.

HBX-1 – *High Blast Explosive*. Explosivo militar tipo 1 utilizado em bombas.

HBX-3 – *High Blast Explosive*. Explosivo militar tipo 3 utilizado em bombas.

MEF – Método dos Elementos Finitos. procedimento numérico para determinar soluções aproximadas de problemas de valores sobre o contorno de equações diferenciais.

MCP – Motor de Combustão Principal. Motor de combustão interna que aciona os componentes responsáveis por gerar a força de empuxo para movimentar a embarcação.

PETN - Tetranitrato de Eritrina ou Tetranitrato de Pentaeritrina. Explosivo comercial.

Pentolito – Mistura de 50% de PETN e 50% de TNT. Explosivo de uso militar e civil.

*Pitching* – Caturro. Movimento da embarcação girando em torno do seu centro de gravidade no sentido proa-popa e popa-proa.

*SPH - Smoothed Particle Hydrodynamics*. Método de geração de malha em elementos finitos. Ver Capítulo 3.

TNT – Trinitrotolueno. Explosivo militar.

USA - *Underwater Shock Analysis. Solver* baseado na metodologia DAA para a resolução de problemas envolvendo explosões em meios fluidos.

*Whipping* - Repentino movimento de flexão da quilha de um navio decorrente do impacto de uma onda no casco.

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1. Considerações Gerais

Com o advento da Segunda Guerra Mundial houve uma grande demanda para aumentar a resistência dos meios navais ao choque mecânico oriundo de explosões submarinas [1]. Uma intensa pesquisa foi conduzida, especialmente pela Marinha dos Estados Unidos, com o intuito de prover melhor proteção aos navios e superar o problema de choque. Ainda é exposto que o uso de explosivos sem contato (ver Capítulo 3) associados ao dano por choque mecânico em máquinas e equipamentos navais rapidamente enaltecera a necessidade de conhecer os efeitos oriundos por tais explosões.

Este fenômeno causa altos deslocamentos, velocidades e acelerações na estrutura da embarcação e, por conseguinte, nos equipamentos a bordo. Portanto, é de extrema importância para os projetistas obterem os parâmetros dinâmicos ocasionados por tais explosões, como forma de tentar reduzir a possibilidade de falha da estrutura e dos principais equipamentos navais.

## 1.2. Descrição do Trabalho

Com base nas novas tecnologias aplicadas ao método de elementos finitos, dentre estas a dinâmica explícita, disponível na plataforma do software comercial Ansys®, modelou-se o fenômeno físico da explosão submarina. Tal modelagem basicamente foi composta pelo modelo virtual do navio, do explosivo e do meio aquático no qual o fenômeno ocorre.

Após a definição das condições iniciais e de contorno impostas no modelo, foi possível executar o *solver* do software para então se obter os deslocamentos, as velocidades e as acelerações impostas pelo efeito explosivo em determinados pontos de interesse na estrutura de uma embarcação genérica. Adicionalmente, também foi possível de se obter o campo de tensões atuantes na estrutura naval analisada.

No capítulo 1 é efetuada uma breve descrição deste trabalho, bem como a abordagem dos objetivos.

No capítulo 2 está presente a revisão sobre a cinemática das explosões submarinas, além do embasamento teórico e as equações empíricas associadas. Também se elencou alguns dos principais danos causados por estas explosões em meios navais, além de formas de minimizar a ocorrência destes, aumentando a confiabilidade das estruturas e dos sistemas vitais.

No capítulo 3 foi executada uma breve revisão sobre a evolução da simulação computacional empregando-se o Método dos Elementos Finitos (MEF) no contexto das explosões submarinas.

No capítulo 4 foram discutidas as considerações efetuadas no modelo proposto, tanto sob a forma de simplificações adotadas, quanto sob a forma de limitações de certas variáveis, necessitando a simplificação e desconsideração de certos fenômenos físicos. Além disso, é exposto sobre a validação do método utilizando o módulo de Dinâmica Explícita do Ansys®.

No capítulo 5 os resultados são apresentados e discutidos, tornando o emprego do método da dinâmica explícita como uma valiosa ferramenta na predição da resposta dinâmica de uma estrutura submetida a uma explosão submarina.

No capítulo 6 é apresentada a conclusão deste estudo, bem como as sugestões de trabalhos futuros, de forma a torná-lo mais robusto, mediante a melhoria das simplificações adotadas, além de um possível teste com modelo, em escala real ou reduzida.

### **1.3.Objetivo Geral e Objetivos Secundários**

O objetivo geral deste trabalho é obter os deslocamentos, as velocidades, as acelerações e as tensões máximas equivalentes de determinados pontos de interesse na estrutura de uma embarcação, gerados a partir de uma explosão submarina, como forma de antever possíveis problemas estruturais advindos desta explosão.

Como objetivos secundários, podemos destacar:

- Compreender a dinâmica das explosões submarinas, efetuando uma revisão bibliográfica das equações governantes;
- Discorrer sobre os principais danos em meios navais gerados pelas explosões submarinas e apontar as principais formas de minimizar os efeitos danosos nos meios navais;
- Efetuar uma revisão sobre a evolução da modelagem computacional abrangendo o fenômeno das explosões submarinas em meios navais, bem como os principais métodos utilizados; e
- Modelar e implementar em ambiente virtual, segundo o método explícito de solução, as condições iniciais e de contorno para obtenção das respostas dinâmicas do modelo da embarcação adotado.

# Capítulo 2

## A Cinemática das Explosões Submarinas e seus Efeitos em Meios Navais

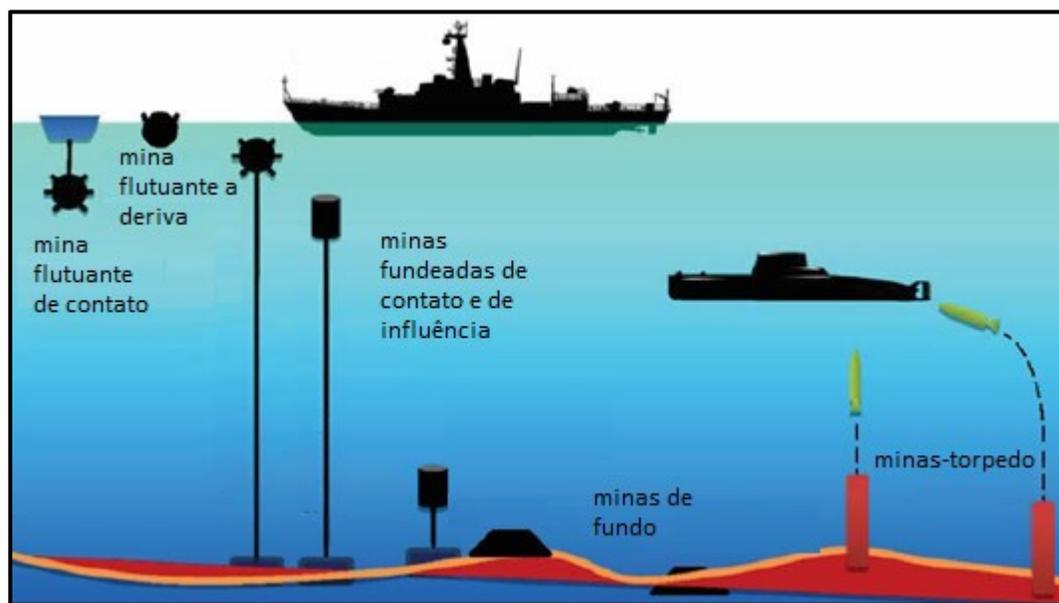
### 2.1.Introdução

Estudos envolvendo o fenômeno do choque mecânico proveniente de explosões submarinas ganharam impulso desde os conflitos da Primeira Guerra Mundial. A partir de então, o resultado destes estudos refletiu-se na adoção de medidas protetivas nos cascos das embarcações. No período entre guerras, foi desenvolvido e melhorado o projeto de arranjos especiais do casco para reduzir o efeito danoso destas explosões. Ainda neste contexto, durante a Segunda Guerra Mundial, houve um uso ainda mais acentuado de explosivos submersos, causando inúmeras avarias não somente no casco, mas em máquinas vitais e demais equipamentos de bordo, enfatizando assim a necessidade de conhecer todos os efeitos associados às explosões submarinas, conforme observado por Keil [1].

Keil [1] também destaca que o fenômeno físico das explosões submarinas é um evento de repentina liberação de energia, da ordem temporal de milissegundos. Isto implica em uma fase de resposta do casco do navio, sendo sujeito a altas velocidades transitórias, seguidas de baixas velocidades de resposta de movimento de *heaving, pitching e whipping*, podendo ser associadas com altos deslocamentos relativos.

Explosões submarinas são geradas por uma ampla variedade de cargas. Exemplos de explosivos submersos podem ser encontrados em Szturomski [2], dentre eles, podemos citar: minas de flutuação, minas de fundeio, minas de fundo, minas torpedo. Quanto ao tipo de sensor de detonação, são mencionados os de diferença de pressão, campo magnético, potencial elétrico e campo hidrodinâmico.

A Figura 1 ilustra alguns tipos de cargas submarinas, com diferentes configurações de profundidade de detonação.



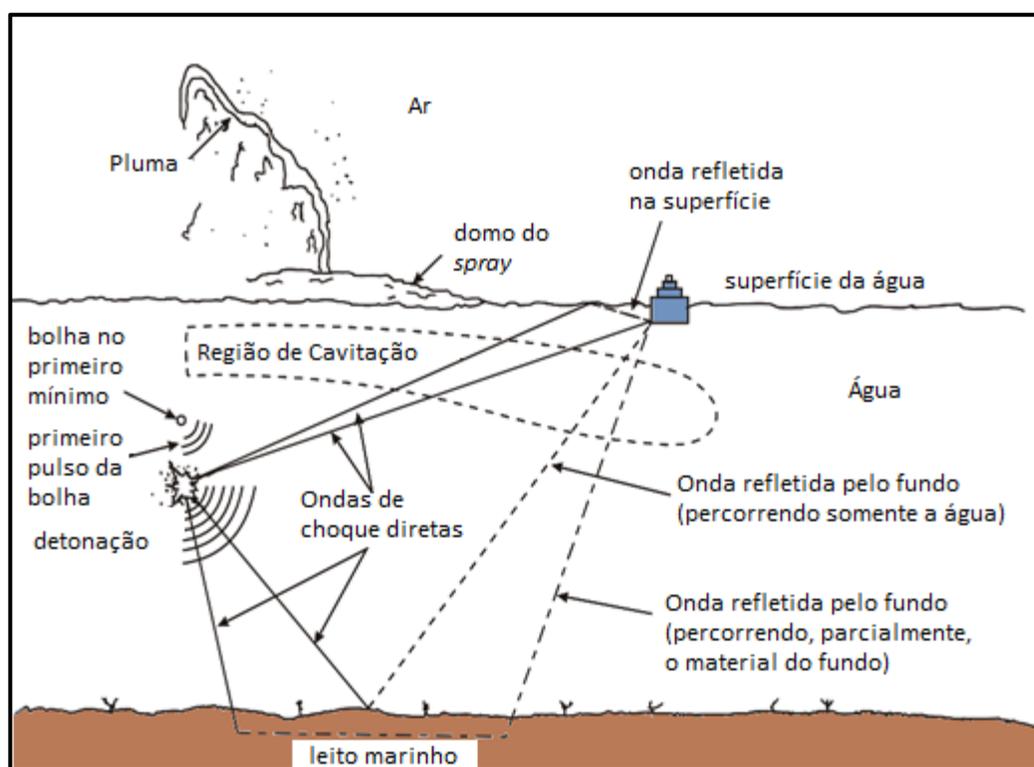
**Figura 1** - Tipos de cargas submarinas.  
Fonte: Adaptado de Szturomski [2].

## 2.2.O Fenômeno Físico das Explosões Submarinas

Embora as pesquisas envolvendo o fenômeno das explosões submarinas tenham se iniciado a partir da Primeira Guerra Mundial, Cole [3] publicou em 1948 um livro consolidando o resultado de uma intensa pesquisa realizada durante a Segunda Guerra Mundial. Nele, o autor efetua uma completa revisão teórica sobre o fenômeno das explosões submarinas, incluindo dados obtidos experimentalmente juntamente com a Marinha dos Estados Unidos.

O fenômeno físico de uma explosão submarina é complexo, pois trata-se da propagação de energia de grande intensidade, imersa em um meio fluido, em um curto espaço de tempo e, quando a onda de pressão incide sobre o alvo, ocorre também uma interação fluido-estrutura, gerando não-linearidades.

A Figura 2 ilustra alguns efeitos físicos relacionados com os eventos desencadeados de uma explosão submarina. Primeira onda de choque, onda de choque direta e refletida, migração de bolha, região de cavitação de quilha, domo de spray e pluma são alguns dos efeitos presentes em uma explosão submarina.



**Figura 2** – Alguns efeitos físicos gerados em explosões submarinas.  
Fonte: Adaptado de Constanzo [4].

Cole [3] segmenta o fenômeno de uma explosão submarina em três fases: a onda de choque, movimento da bolha gasosa e efeitos de superfície. Esta classificação será detalhada a seguir, considerando a água como um meio homogêneo e um fluido incompressível.

### 2.2.1. A Onda de Choque

Segundo Cole [3] a primeira causa de perturbação em uma explosão submarina é a chegada da onda de pressão como reação explosiva na camada de água. Imediatamente, esta pressão inicia a liberação de uma intensa pressão contrapondo-se ao movimento da massa líquida de água. No caso de explosões de grande intensidade, como o Trinitrotolueno – TNT, o aumento da pressão cresce em uma ordem temporal de milissegundos, seguido por um aproximado decaimento exponencial. Uma vez iniciada, a perturbação no meio fluido propaga-se radialmente para fora como uma onda compressiva sendo esta abrupta onda frontal denominada onda de choque.

Cole [3] inicialmente aponta que o pico de pressão gerado pela onda de choque pode ser calculado de forma empírica, sendo esta igualmente adotada por Keil [1].

Cabe mencionar que tal formulação é ainda utilizada até os dias atuais, mediante a inserção do parâmetro  $C_r$ , conforme notação da Sociedade Classificadora ABS [5]. Esta expressão é mostrada pela Equação 2.1.

$$P_p = C_r \cdot K_p \left( \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{\alpha_p} \quad (2.1)$$

sendo  $P_p$  o pico de pressão (MPa),  $C_r$  o coeficiente de amplificação,  $K_p$  um fator específico para o pico de pressão,  $W$  o peso da carga explosiva (Kg),  $R$  a distância radial entre a carga explosiva e o alvo (metros) e  $\alpha_p$  o expoente específico para o pico de pressão.

Cabe destacar que para diferentes tipos de materiais explosivos há diferentes coeficientes supracitados. A Tabela 2.1 apresenta os coeficientes para diferentes tipos de cargas explosivas, utilizando o Sistema Internacional de Unidades (SI). Estes coeficientes comporão as equações vistas adiante nesta seção.

**Tabela 2.1**– Coeficientes para diferentes cargas explosivas.

Tipo de Carga Explosiva	$K_p$	$\alpha_p$	$K_I$	$\alpha_I$	$K_r$	$K_{per}$
TNT	52,4	1,13	5,75	0,89	12,67	4,27
Pentolito ( <i>Pentolite 50/50</i> )	56,5	1,14	5,73	0,91	12,88	4,34
H-6	59,2	1,19	6,58	0,91	-	-
HBX-1	56,7	1,15	6,42	0,85	14,14	4,76
HBX-3	50,3	1,14	6,33	0,90	-	-

Fonte: ABS [5], Chung e Shin [6].

A Sociedade Classificadora ABS [5] aponta que quando a pressão da onda de choque atinge o alvo, ela é refletida no sentido contrário, fazendo com que esta pressão seja amplificada. Não será apontado todos os fatores envolvidos nesta amplificação do choque, como ângulo de incidência ( $\phi$ ), difração, flexibilidade da superfície do alvo, entre outros. A Tabela 2.2 apresenta o coeficiente  $C_r$  para diferentes pressões incidentes ( $P_{so}$ ) de TNT, com ângulo de incidência de zero grau. Em questões práticas, para  $P_{so} \leq 50\text{MPa}$ , um  $C_r$  de 2,09 deve ser adotado.

**Tabela 2.2** - Coeficiente  $C_r$  do TNT para diferentes pressões incidentes.

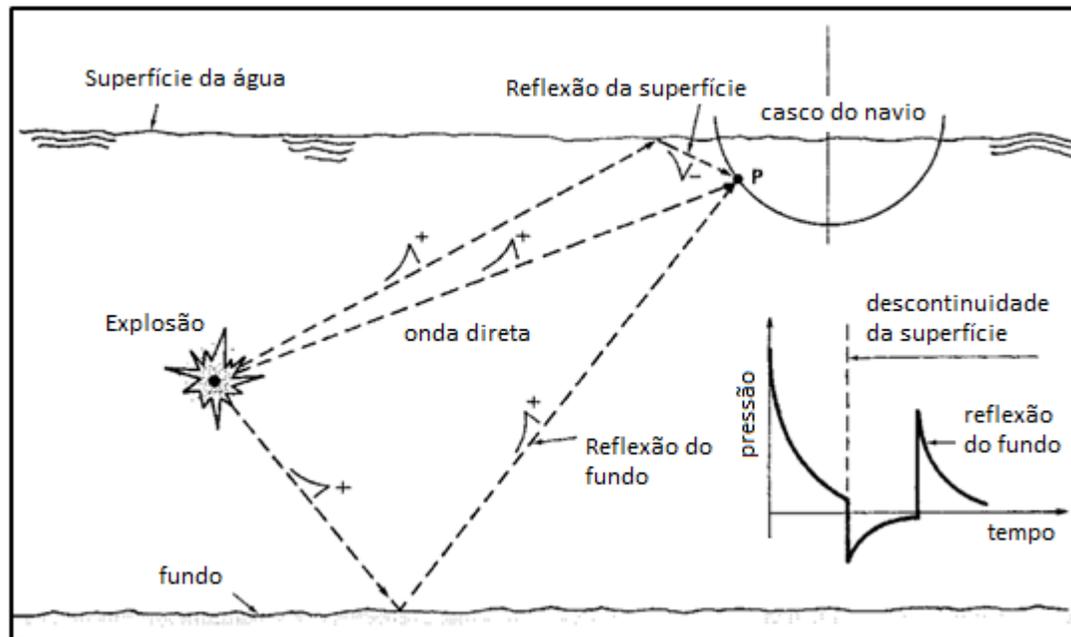
	Pressão Incidente (MPa)						
	$\leq 50$	100	200	500	1.000	2.500	5.000
$C_r$	2,09	2,17	2,3	2,6	2,92	3,44	3,93

Fonte: ABS [5].

Ainda sobre a onda de pressão, segundo Constanzo [4], ao mesmo tempo que a onda de choque atinge diretamente o alvo (neste caso o casco de uma embarcação), visto que a mesma se propaga radialmente, uma parte desta atinge a superfície e é refletida de volta para o fluido como uma onda negativa. A onda chega até um ponto de interesse defasada no tempo da onda de choque direta, o que reduz abruptamente o decaimento da onda de choque incidente para um valor negativo. Somando-se a esses efeitos, um terceiro caminho percorrido pela onda de pressão é o fundo do mar. Dependendo da natureza do material encontrado no fundo, o resultado da onda refletida pode variar entre uma onda refletida de

natureza positiva. Normalmente, um reforço da onda positiva é refletido e, neste caso, um incremento na amplitude da onda de pressão ocorre.

A Figura 3 ilustra o fenômeno de reflexão da superfície e do fundo do mar no fenômeno de uma explosão submarina.



**Figura 3** - Efeito da reflexão do fundo do mar e da superfície da água na explosão submarina.  
 Fonte: Adaptado de Constanzo [4].

Um fator importante para avaliar uma explosão é o Fator de Choque ( $Z$ ), sendo a razão entre a raiz cúbica do peso da carga explosiva ( $W$ ) e a distância radial entre a carga explosiva e o alvo ( $R$ ), conforme encontrado em ABS [5], Cole [3] e Tasdelen [7]. A Equação 2.2 apresenta tal parâmetro.

$$Z = \frac{W^n}{R} \quad (2.2)$$

onde  $n$  é um valor que varia baseado em experimentos de explosão submarina. Devido a esta variação, para ABS [5] e Cole [3]  $n=1/3$  e, para Tasdelen [7]  $n=1/2$ .

O decaimento exponencial da pressão em função do tempo  $P(t)$  é dado pela Equação 2.3. De acordo com ABS [5] e Reid [9], as expressões a seguir também são denominadas como Expressões da Similitude para explosões submarinas.

$$P(t) = P_p \cdot e^{\left(\frac{-t}{\theta}\right)} \quad (2.3)$$

sendo  $P_p$  o pico de pressão,  $t$  o tempo e  $\theta$  a constante de tempo, obtido a partir da Equação 2.4.

$$\theta = W^{\frac{1}{3}} \left[ K_{\theta} \left( \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{\alpha_{\theta}} \right] \quad (2.4)$$

sendo  $K_{\theta} = \frac{K_I}{K_p}$ ,  $\alpha_{\theta} = \alpha_I - \alpha_P$ ,  $K_I$  o fator específico para a redução do impulso e  $\alpha_I$  o expoente específico para a redução do impulso. Tais constantes foram expressas na Tabela 2.1.

Ainda em relação ao tempo de duração do fenômeno da explosão submarina, ABS [5] cita as Equações 2.5, 2.6 e 2.7, onde, respectivamente são apresentados a duração do evento, o tempo de chegada e o tempo final, normalmente expressos em milissegundos.

$$t_d = 6,7 \cdot \theta \quad (2.5)$$

sendo  $\theta$  a constante de tempo.

$$t_c = \frac{R}{C_w} \quad (2.6)$$

sendo  $R$  a distância radial entre a carga explosiva e o alvo ( $R$ ) e  $C_w$  a velocidade acústica obtida pela raiz quadrada da razão entre o coeficiente de elasticidade da água (em MPa) e a massa específica da água do mar ( $1.025 \text{ kg/m}^3$ ).

$$t_f = t_d + t_c \quad (2.7)$$

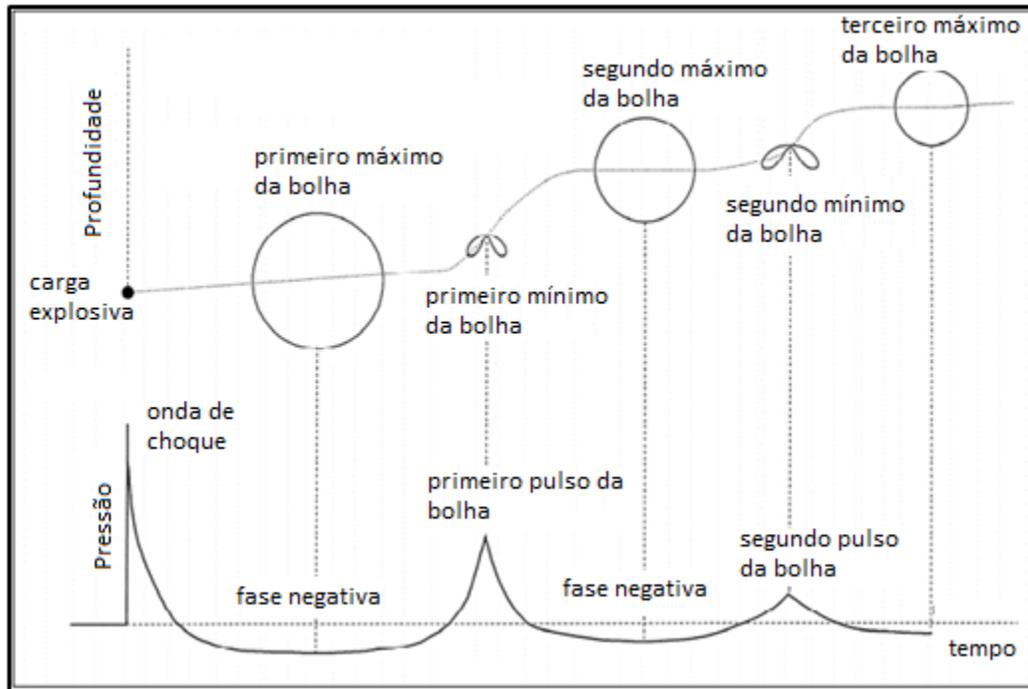
### 2.2.2. O Movimento de Bolha Gasosa

Cole [3] menciona que após a emissão da onda de choque, os produtos de uma explosão submarina continuam a se expandir em uma razão menor. Simplificações teóricas de que a densidade na fronteira da bolha gasosa é considerada (não compressiva) e de que a bolha retém uma forma aproximadamente esférica durante o movimento ascendente levam a uma previsão aproximada do raio, trajetória e período do movimento.

Em um dos raros trabalhos produzidos no Brasil sobre explosões submarinas, Motta [10] complementa que devido à inércia, a bolha se expandirá até que a sua pressão interna seja inferior à pressão hidrostática, e iniciará um processo de contração. Essa contração se dará até um ponto em que a pressão interna da bolha seja tal que se contraporá à pressão hidrostática e à inércia das partículas gasosas, quando passará a se expandir novamente. Esse processo se repetirá indefinidamente, até que a bolha gasosa encontre a superfície ou até que a massa gasosa seja totalmente misturada ao meio líquido – apesar das simplificações consideradas, a bolha gasosa e o meio líquido não têm uma fronteira imiscível de fato. Em cada momento em que há inversão de expansão para contração, ou vice-versa, da bolha gasosa, é gerado um pulso de pressão, com amplitudes cada vez menores. Estudos mostram que o primeiro pulso da bolha gasosa tem amplitude de cerca de 70% da onda de choque, apesar de sua energia total ser superior à da onda de choque. A bolha gasosa terá um movimento ascendente no meio líquido até o ponto em que aflora na superfície do mesmo.

ABS [5] ainda complementa que, embora a duração do segundo pulso da bolha gasosa ser significativamente maior do que o pulso inicial, o seu dano estrutural no alvo (casco da embarcação) também deve ser considerado.

A Figura 4 ilustra o fenômeno da pressão incidente da onda de choque e o surgimento posterior das bolhas gasosas no decorrer do tempo da explosão submarina.



**Figura 4** - Onda de choque e movimento de bolhas no fenômeno das explosões submarinas.  
 Fonte: Adaptado de Conzanzo [4].

Chung e Shin [6] complementam que as oscilações da bolha gasosa podem persistir para dez ou mais ciclos, em alguns casos. O número de observações destas oscilações é limitado pela perda de energia em virtude da turbulência, efeitos de distúrbio da gravidade e das camadas limite. O movimento da bolha gasosa é então afetado pelo empuxo e pela proximidade da superfície da água e do leito submarino.

Chung e Shin [6] ainda apresentam que o período ( $T$ ) e o raio máximo ( $R_{\text{máx}}$ ) da bolha gasosa podem ser empiricamente calculadas pelas Equações 2.8 e 2.9.

$$T = K_{per} \left[ \frac{(0,4536 \cdot W)^{\frac{1}{3}}}{(0,3048 \cdot R + 33)^{\frac{5}{6}}} \right] \quad (2.8)$$

sendo  $K_{per}$  um fator específico (ver Tabela 2.1),  $W$  o peso da carga explosiva (kg),  $R$  a distância radial entre a carga explosiva e o alvo (metros).

$$R_{m\acute{a}x} = 0,3048 \cdot K_r \left[ \frac{(0,4536 \cdot W)^{\frac{1}{3}}}{(0,3048 \cdot R + 33)^{\frac{1}{3}}} \right] \quad (2.9)$$

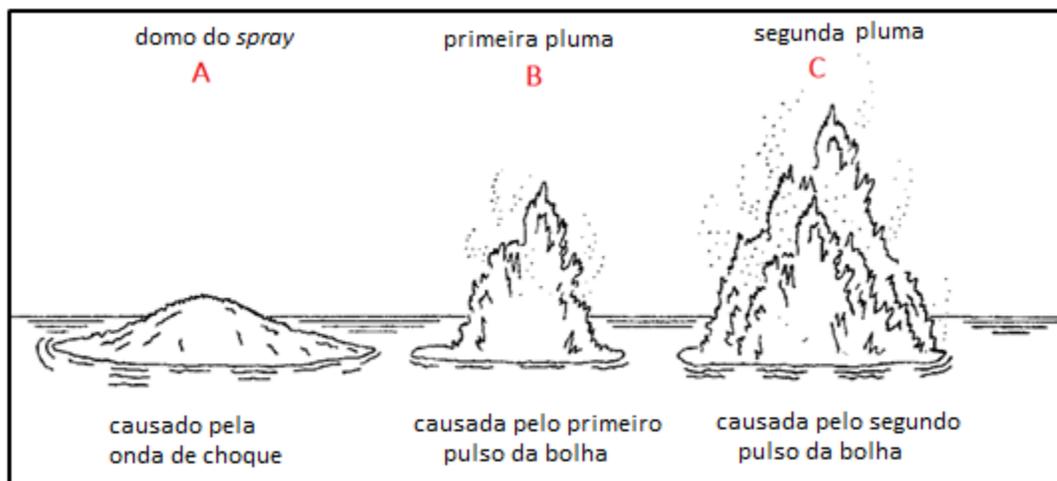
sendo  $K_r$  um coeficiente específico (ver Tabela 2.1),  $W$  o peso da carga explosiva (kg),  $R$  a distância radial entre a carga explosiva e o alvo (metros).

### 2.2.3. Efeitos de Superfície

Cole [3] menciona que a mais óbvia e espetacular característica de uma explosão submarina são as perturbações na superfície da água. O primeiro efeito da explosão submarina que chega à superfície é a onda de choque. Esta onda chega em diferentes pontos e é visível como uma expansão repentina na superfície, formando uma espécie de domo (Figura 6A). Seguido da onda de choque, há um crescimento do domo, em formato de *spray* de água, ocasionado por um grande volume de névoa branca de água gerado pela reflexão da onda de choque na superfície (Figura 6B). Esse fenômeno ocorre devido ao primeiro pulso da bolha. Na sequência, ocorre o segundo efeito da pluma, onde o domo é muito menor e mais irregular do que o primeiro. Este segundo efeito da pluma é ocasionado pelo segundo pulso da bolha. O segundo efeito da pluma, embora menor, acaba por adicionar-se ao primeiro, devido ao fenômeno da superposição (Figura 6C).

Cole [3] finaliza este tópico dizendo que o jato de água ocorre aproximadamente no centro da explosão (direção vertical) de forma muito rápida, e continua a ascender até a altura máxima. Em seguida, devido à reação de forças, o efeito da resistência do ar e a ação da força da gravidade, sua velocidade reduz-se a zero e começa a retornar até a superfície da água.

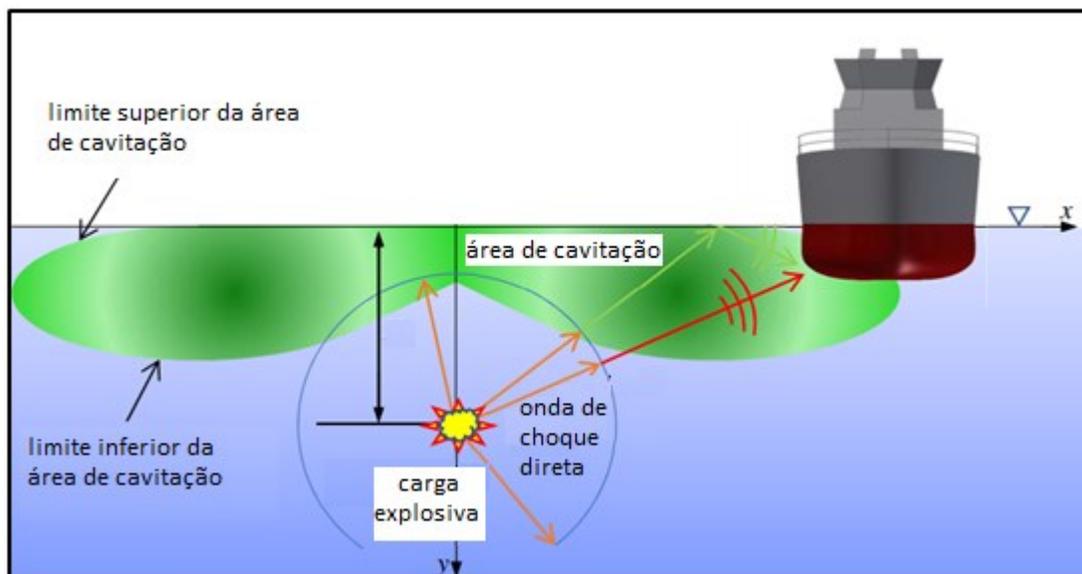
A Figura 5 ilustra estes efeitos de superfície em uma explosão submarina.



**Figura 5** – Efeitos de superfície em explosões submarinas.  
 Fonte: Adaptado de Constanzo [4].

Constanzo [4], ABS [5] e Schneider [11] adicionam que ocorre também um outro efeito de superfície chamado cavitação volumétrica. Esta cavitação ocorre quando a onda de choque compressiva viaja para a superfície e é refletida de volta para o fluido como uma onda de tração. O fluido líquido então não consegue sustentar esta tração e então cavita, transformando de contínuo e homogêneo para um fluido não-homogêneo (região de vapor). A razão para a cavitação volumétrica ser de interesse para a análise do fenômeno da explosão submarina é que a zona de cavitação atua próxima à superfície, e, devido aos efeitos da gravidade e da pressão atmosférica atuando de cima contra o fluxo ascendente da bolha expansiva oriundo de baixo, causa o efeito de golpe de Aríete, gerando assim uma segunda onda de choque em um pulso compressivo.

A Figura 6 ilustra o efeito da cavitação volumétrica oriundo de uma explosão submarina.



**Figura 6** – Limites da cavitação volumétrica em explosões submarinas.  
 Fonte: Adaptado de Szturomski [2].

Não será mais aprofundado este fenômeno por não ser o escopo deste trabalho e também ser um dos fatores simplificados neste trabalho. Maiores detalhes, inclusive a modelagem matemática da fronteira limite da camada de cavitação, podem ser encontrados em Marcus [12], Smith [13] e Ucar [14].

### 2.3.Principais Danos em Meios Navais

Conforme mencionado anteriormente, a partir da I Guerra Mundial e, de forma mais enfática, a partir da II Guerra Mundial, as explosões submarinas ocasionaram inúmeras avarias e perdas de meios navais.

A partir de então, muito se tem avançado no sentido de compreender o mecanismo do dano nos meios navais e como minimizar a possibilidade de falhas estruturais e de equipamentos vitais a estes meios.

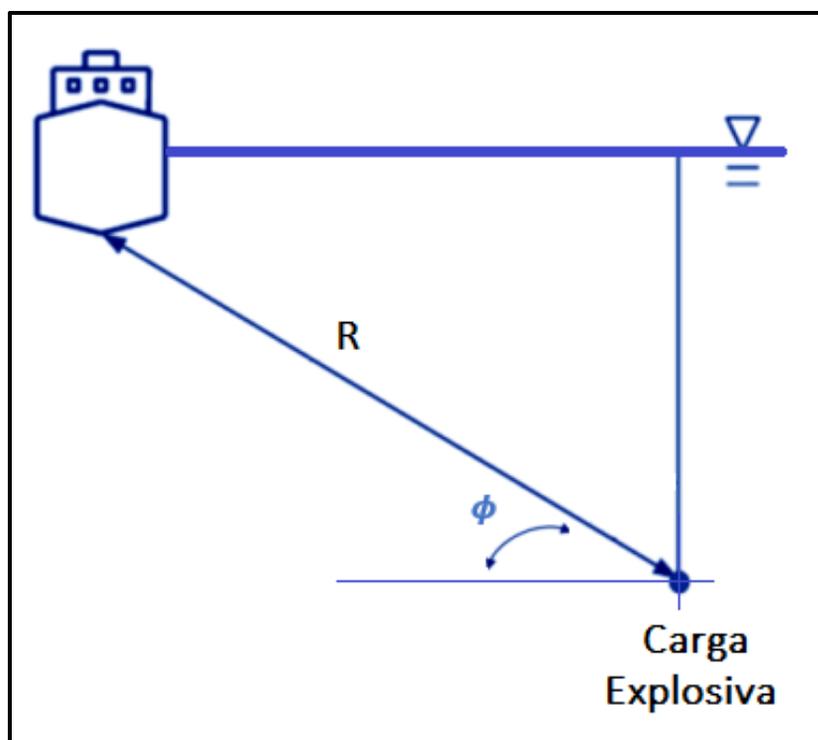
O dano causado por uma explosão submarina em um meio naval depende diretamente do Fator de Choque ( $Z$ ), pois é este índice que reflete a intensidade da referida explosão no alvo.

Ainda referente ao índice Z, Reid [9] também o chama de Fator de Choque de Casco. Para o caso de uma explosão possuir um ângulo em relação à horizontal, este índice passa a se chamar de Fator de Choque de Quilha ( $Z_k$ ), cuja fórmula é apresentada na Equação 3.1.

$$Z_k = Z \cdot \left[ \frac{(\text{sen } \phi + 1)}{2} \right] \quad (3.1)$$

sendo Z o Fator de Choque e  $\phi$  o ângulo entre a linha horizontal que passa ao centro da carga explosiva e a quilha do navio.

A Figura 7 ilustra o Fator de Choque de Quilha. Nota-se que para valores de  $\phi$  grandes (próximos a  $90^\circ$ ), com a carga explosiva posicionada diretamente abaixo do navio, o Fator de Choque de Quilha é igual ao Fator de Choque de Casco.



**Figura 7** – Representação do Fator de Choque de Quilha.  
Fonte: Adaptado de Tasdelen [7].

Estabelecido o índice Z ou  $Z_k$ , ao qual Bisyk *et al.* [15] denomina de coeficiente de distância, o mesmo classifica as explosões submarinas de acordo com a Tabela 2.3.

**Tabela 2.3** – Classificação das explosões submarinas.

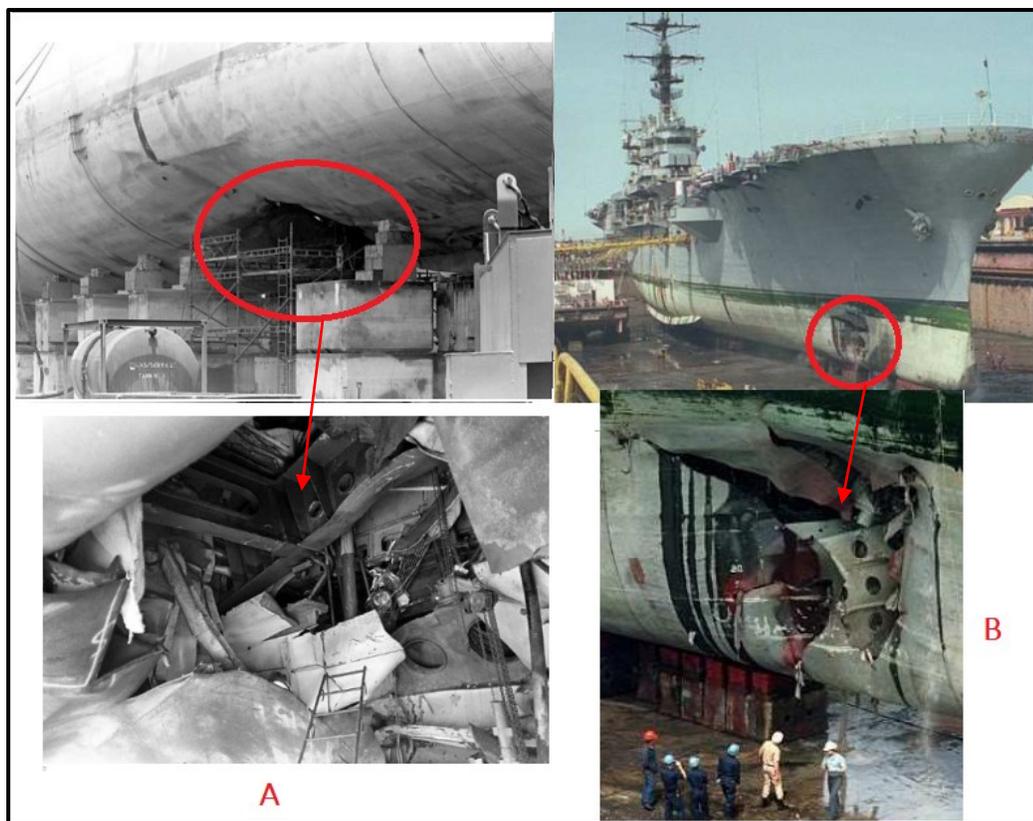
<b>Classificação</b>	<b>Z (Kg<sup>1/3</sup>/m)</b>
Explosão de contato	$\approx 0,053$
Explosão de campo próximo	$0,053 \leq Z < 0,4$
Explosão de campo médio	$0,4 \leq Z \leq 4$
Explosão de campo distante	$4 < Z \leq 40$

Fonte: Bisyk *et al.* [15].

Szturomski [2] sugere uma classificação das explosões submarinas considerando apenas a distância entre a carga explosiva e o alvo (R). Segundo o mesmo, estas são classificadas como explosões de contato, explosões sem contato de campo próximo e explosões sem contato de campo distante.

Portanto, segundo Szturomski [2], uma explosão de contato ocorre a uma distância R de 0 até 12 metros, ou seja, a parte imersa do navio está em contato com a zona de impacto da bolha gasosa. Nesta situação a onda de choque atinge diretamente o casco do navio, fazendo com que haja a falha do chapeamento daquela região por deformação plástica. Este dano causa consequente alagamento daquele espaço interno, além dos estilhaços atingirem anteparas internas, equipamentos e redes, além de tripulantes que possam estar nas proximidades.

A Figura 8 (A) apresenta o dano no casco da Fragata USS Samuel B. Roberts ocorrido em 1988 e a Figura 8 (B) apresenta o dano no Porta-aviões USS Tripoli ocorrido em 1991.



**Figura 8** – Danos causados por explosões de contato na Fragata USS Samuel B. Roberts (A) e no Porta-Aviões USS Tripoli (B).  
Fonte: Szturomski [2].

Szturomski [2] aponta que uma explosão de campo próximo ocorre a uma distância  $R$  de 2 até 20 metros, ou seja, a parte imersa do navio não entra em contato direto com a zona de impacto da bolha gasosa. Este tipo de explosão pode causar deformações plásticas no casco da embarcação (sem ruptura), danos na quilha do navio, além de danificar equipamentos e seus mecanismos.

Tasdelen [7] complementa que os efeitos da migração da bolha gasosa fazem com que ocorra uma oscilação de pressão abaixo da quilha do navio, podendo ocorrer a ruptura da referida estrutura.

A Figura 9 apresenta o dano no casco do cruzador de mísseis guiados USS Princeton, ocorrido em 1991, por uma mina submarina.



**Figura 9** – Danos causados por explosão sem contato no cruzador USS Princeton.  
Fonte: Szturomski [2].

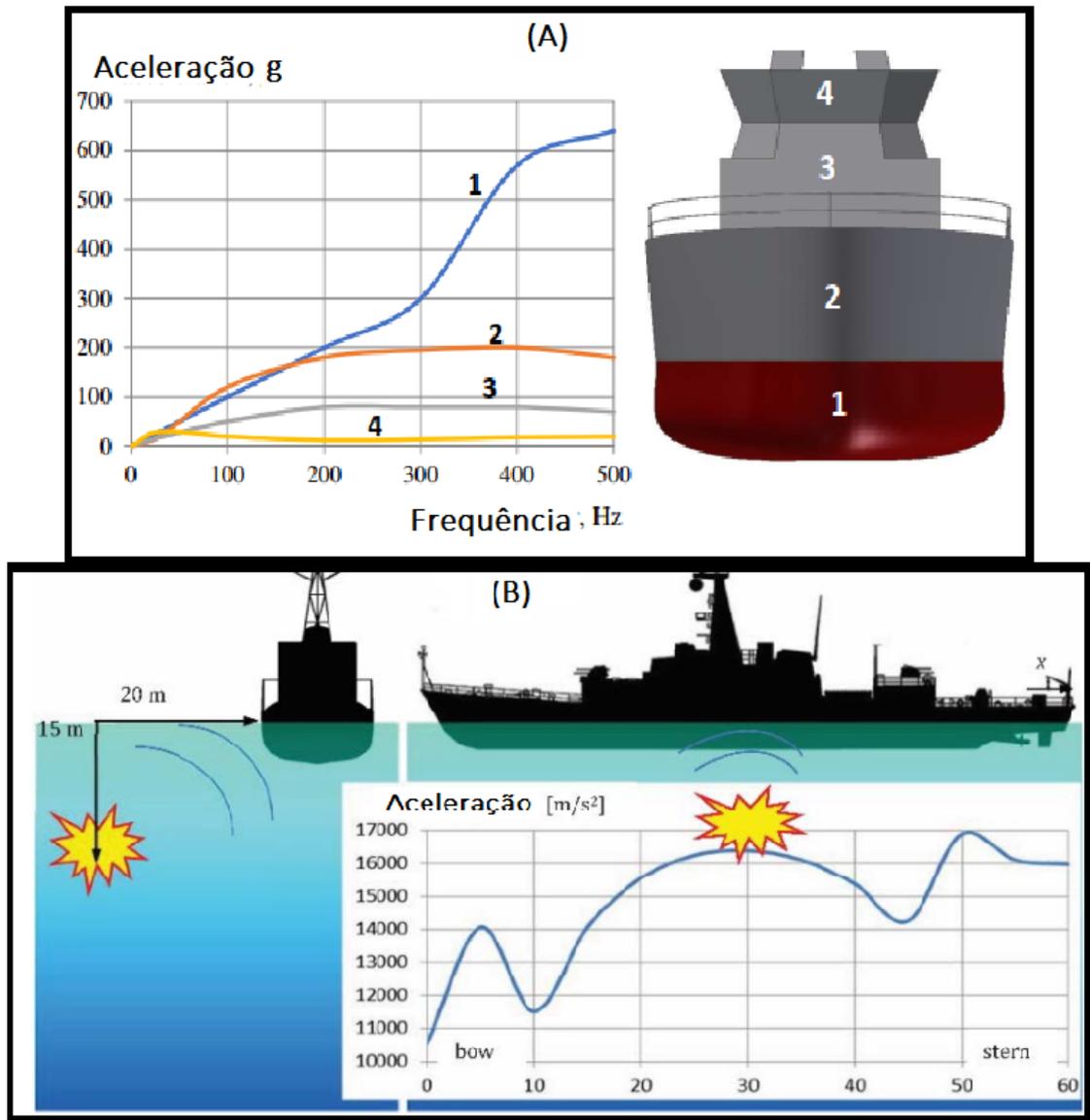
Szturomski [2] ainda indica que uma explosão de campo distante ocorre a uma distância  $R$  com mais de 30 metros. Em caso de explosões distantes, o chapeamento do casco não rompe, embora possa haver certa deformação. A onda de pressão causa grande aceleração na estrutura e também falhas em equipamentos e mecanismos.

Nesse sentido, Keil [1] complementa que durante as várias fases de resposta do casco de uma embarcação sujeita a altas velocidades transientes seguidas de baixas velocidades de *heaving*, *pitching* e *whipping* associados a um grande deslocamento relativo. Um outro padrão de dano relaciona-se com as conexões mecânicas entre os diversos tipos de componentes e equipamentos, devido aos movimentos relativos de suas fundações e suportes.

Reid [9] observa que a onda de choque percorre a casco do navio, sendo que parte de sua energia é transmitida ao caso e outra parte é transmitida às anteparas e conveses do navio a uma relativa velocidade de translação. Regiões rígidas do navio, como as anteparas feitas em aço, a velocidade é transmitida com uma baixa atenuação para os conveses superiores. Segundo o mesmo, a velocidade transmitida entre conveses geralmente varia de 20% a 30%. Isto explica a variação da resposta dinâmica a medida que a velocidade percorre o meio naval tanto no sentido proa-popa quanto no sentido quilha até a superestrutura. Szturomski [2] conclui então dizendo que, nos conveses superiores, a intensidade do dano é reduzida devido ao menor valor de aceleração.

A Figura 10 (A) e ilustra os diferentes valores de aceleração em pontos distintos de uma embarcação sujeita a uma explosão submarina sem contato de um campo distante e a

Figura 10 (B) a variação da aceleração entre a proa e a popa em uma explosão de 250 Kg de TNT a uma distância R de 25 metros. Nota-se os altos valores das acelerações decorrentes da explosão submarina ao longo da embarcação e também a grande variação, conforme a localização a bordo.



**Figura 10** –Valores de aceleração em diferentes pontos de uma embarcação.  
 Fonte: Adaptado de Szturomski [2].

## **2.4. Medidas de Redução do Dano Causado pelas Explosões Submarinas**

Em virtude dos inúmeros danos causados pelas explosões submarinas em meios navais ao longo dos anos, muito se tem avançado em tecnologias para a sua redução, conferindo maior capacidade de sobrevivência em cenários bélicos. Embora não seja o escopo deste estudo, apresenta-se a seguir uma breve explicação sobre as melhores práticas adotadas, como medidas de projeto, para que sejam minimizados os efeitos de uma explosão submarina na estrutura e equipamentos de bordo. Tal procedimento serve como um guia prático ao projetista, aumentando assim a resistência ao choque no projeto do meio naval.

Kok [16] cita que a habilidade do navio permanecer flutuando após sofrer um ataque é o único objetivo relacionado à sua vulnerabilidade. Claro que somado a isto, deve ser considerado também sua capacidade de mobilidade e potência. Portanto, para um navio não perder seus sistemas vitais, o mesmo elenca algumas práticas para redução da vulnerabilidade.

Kok [16] então aponta que melhorias na integridade estrutural e do casco são necessárias. Estas melhorias podem ser alcançadas por meio de um projeto estrutural prevendo as altas cargas oriundas de uma explosão submarina, da seleção de melhores e mais resistentes materiais, ou por meio da inserção de proteção balística e/ou materiais compósitos.

Já para o caso de proteção de sistemas vitais (propulsão, manobra e sistema de armas), Kok [16] menciona que a redução da vulnerabilidade pode ser conferida diminuindo-se o número de partes móveis destes sistemas, instalando-os em locais menos suscetíveis a altas acelerações/velocidades/deslocamentos, investir na proteção dos mesmos (dimensionamento de juntas, suportes e absorvedores de choque mecânico) e também da adoção de redundâncias destes sistemas, inclusive com sua separação física.

A Sociedade Classificadora ABS [5] inclui uma recomendação de que equipamentos essenciais (ou vitais) devem ser projetados para permanecer em funcionamento para o máximo nível de choque a qual o meio naval for submetido. Dessa forma, jazentes de máquinas e equipamentos essenciais devem atender requisitos de choque especificados no contrato de aquisição. Por exemplo, os Motores de Combustão Principais (MCP) devem ser

montados à estrutura do navio mediante ligações aparafusadas considerando as forças estáticas e dinâmicas impostas durante o evento de choque.

ABS [5] também cita algumas boas práticas já consolidadas no tocante à jazentes, válvulas e redes.

A respeito de jazentes (bases de equipamentos), as principais recomendações são:

- i. Os componentes do jazente devem ser construídos em material robusto, com um peso adequado e com uma resistência requerida evidenciando a facilidade de manutenção, segurança e confiabilidade;
- ii. O material usado na construção deve ser resistente ou protegido contra a corrosão causada pela água do mar, *spray* ou outra atmosfera encontrada em serviço;
- iii. Todos os jazentes devem incorporar em seu projeto as características que prevenirão que o equipamento montado se solte em caso de falha por ocorrência de choque de impacto;
- iv. Os jazentes devem ser projetados para suportar as deflexões que ocorrem em qualquer direção; e
- v. Folgas entre o equipamento/jazente e a vizinhança deve ser prevista para evitar obstruções/colisões durante as deflexões dinâmicas.

Com relação a válvulas e tubulações, as principais recomendações são:

- i. O corpo das válvulas não deve ser confeccionado em material frágil, geralmente com a elongação inferior a 10%;
- ii. O material da sede da válvula deve ser capaz de permanecer funcional contra a distorção induzida durante o evento de choque;
- iii. Enrijecedores não devem ser utilizados para reforçar o corpo das válvulas;
- iv. O contato entre os equipamentos e as tubulações deve ser previsto em um cenário de choque; e
- v. Abraçadeiras não devem ser diretamente soldadas em tubulações de aço.

ABS [5] ainda adiciona que jazentes de equipamentos não testados por normas reconhecidas, podem ser aceitos, desde que testes sejam realizados em laboratório

(dispositivo de teste de choque) ou em barcas ou plataformas flutuantes de choque, com a unidade completa (jazente, o equipamento com seus controles, instrumentos e demais acessórios).

Neste contexto, a Marinha dos Estados Unidos vem submetendo os primeiros navios de determinada classe a explosões submarinas. Segundo Brenner [17] este teste, (também chamados de *Full Ship Shock Trial* - FSST) é realizado empregando-se 2/3 do nível de choque de projeto, com o intuito de verificar o nível de sobrevivência do navio, sempre no regime elástico dos materiais constituintes.

A Figura 11 mostra o porta-aviões USS Gerald R. Ford (CVN 78) realizando um evento de FSST, em 2021. Nota-se que os equipamentos estão em estado operacional (as rampas defletoras de jato, no convoo, acionadas) demonstrando a necessidade de teste em um cenário o mais próximo do real possível.



**Figura 11** –USS Gerald R. Ford (CVN 78) em um evento de FSST.

Fonte: <https://www.naval.com.br/blog/2021/06/20/testes-de-choque-total-do-porta-avioes-uss-gerald-r-ford-cvn-78/>. Acesso em 22 de junho de 2021.

Porém, Schneider e Shin [18] alertam que os FSST requerem anos de planejamento e de preparação, além de serem extremamente custosos. Por exemplo, testes com explosões submarinas realizados no USS John Paul Jones (DDG 53) em 1994, e no USS Winston S. Churchill (DDG 81) em 2001, consumiram um total de US\$ 50 milhões.

No entanto, com o avanço da capacidade computacional ao longo dos anos, o evento do choque causado por explosões submarinas também passou a ser efetuado de forma virtual, em modelos utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF), o que vem contribuindo para a economicidade e relativa rapidez na execução destes testes.

Estes referidos testes virtuais requerem uma grande capacidade computacional para processar o evento da explosão submarina, da ordem de alguns milissegundos, além dos efeitos não-lineares inerentes a tal fenômeno.

# Capítulo 3

## A Evolução da Simulação Computacional em Explosões Submarinas

### 3.1.Introdução

Schneider e Shin [18] apontam que avanços na capacidade dos computadores ao longo de poucas décadas vem permitindo muitos avanços de testes em ambientes virtuais. Dentre esses testes com modelos virtuais está o caso de simulações envolvendo meios navais sujeitos a explosões submarinas. Dentre os benefícios destas simulações, Schneider e Shin [18] ainda mencionam que isto tem permitido aos engenheiros não apenas poupar milhões de dólares, mas também proporciona avanços significativos no projeto. A criação de um ambiente virtual de explosões submarinas para prever o efeito da onda de choque apresenta-se como uma ferramenta de projeto extremamente útil e uma atrativa alternativa para os futuros FSST.

Nesse sentido, muitas metodologias foram desenvolvidas e aprimoradas para possibilitar o avanço nas simulações envolvendo elementos finitos. Aliado a isso, devido à especificidade do fenômeno físico das explosões submarinas, muitos códigos foram também aprimorados, para auxiliar na solução das simulações de tal fenômeno.

A seguir, é efetuada uma breve abordagem sobre alguns dos principais métodos utilizados nos códigos de MEF (Método dos Elementos Finitos) que vem possibilitando grandes avanços na área de choque oriundo de explosões submarinas.

### 3.2. Diferenças entre o Método Implícito e Explícito

A Equação 3.1 apresenta a equação governante da dinâmica para um corpo contendo massa, rigidez e amortecimento, sujeito a uma força  $F$ .

$$[m]\{\ddot{X}\} + [c]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F\} \quad (3.1)$$

onde:

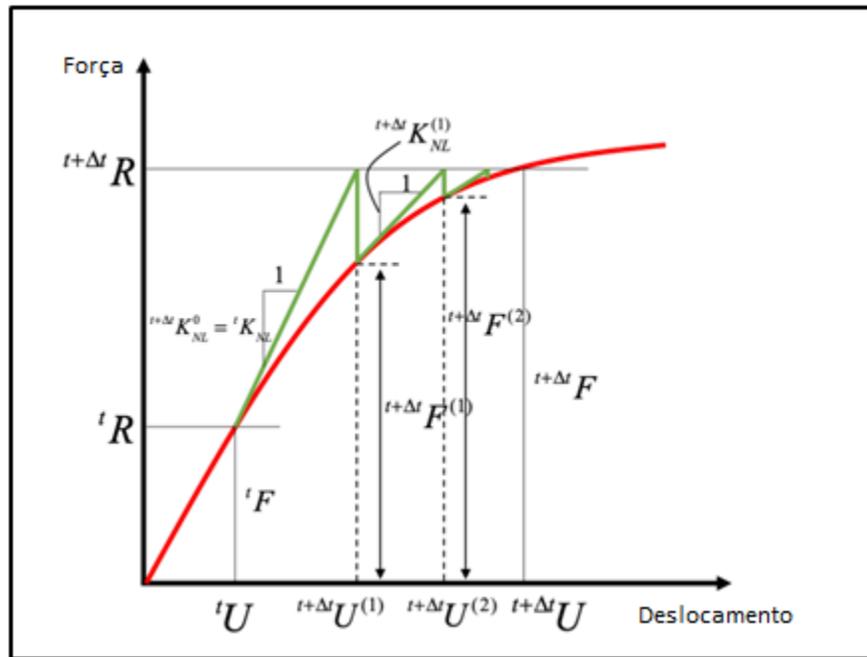
$[m]$ ,  $[c]$ ,  $[K]$  – Matriz de massa, matriz de amortecimento e matriz de rigidez, respectivamente;

$\{\ddot{X}\}$ ,  $\{\dot{X}\}$ ,  $\{X\}$  – Vetor de aceleração, velocidade e deslocamento, respectivamente; e

$\{F\}$  – Vetor de força.

Balakrishnan *et al.* [19] apresentam que a partir da abordagem do Método dos Elementos Finitos, a resolução da Eq. 4.1 para uma análise de dinâmica transiente (como é o caso das explosões submarinas) considera as equações de equilíbrio de forças de inércia, de amortecimento e de rigidez. Utilizando-se a metodologia implícita para a resolução do problema, o método de integração de Newmark é utilizado em pontos discretos. Adicionalmente, para problemas envolvendo não-linearidades (geometria, alguns tipos de contato e grandes deformações), o método de Newton-Raphson também é empregado para a inversão da matriz de rigidez dinâmica equivalente. Poucos incrementos de tempo são requeridos para atingir a convergência.

A Figura 12 apresenta o processo iterativo do método implícito empregando a metodologia de Newton-Raphson para solução, onde a cada iteração, a matriz de rigidez vai sendo atualizada.



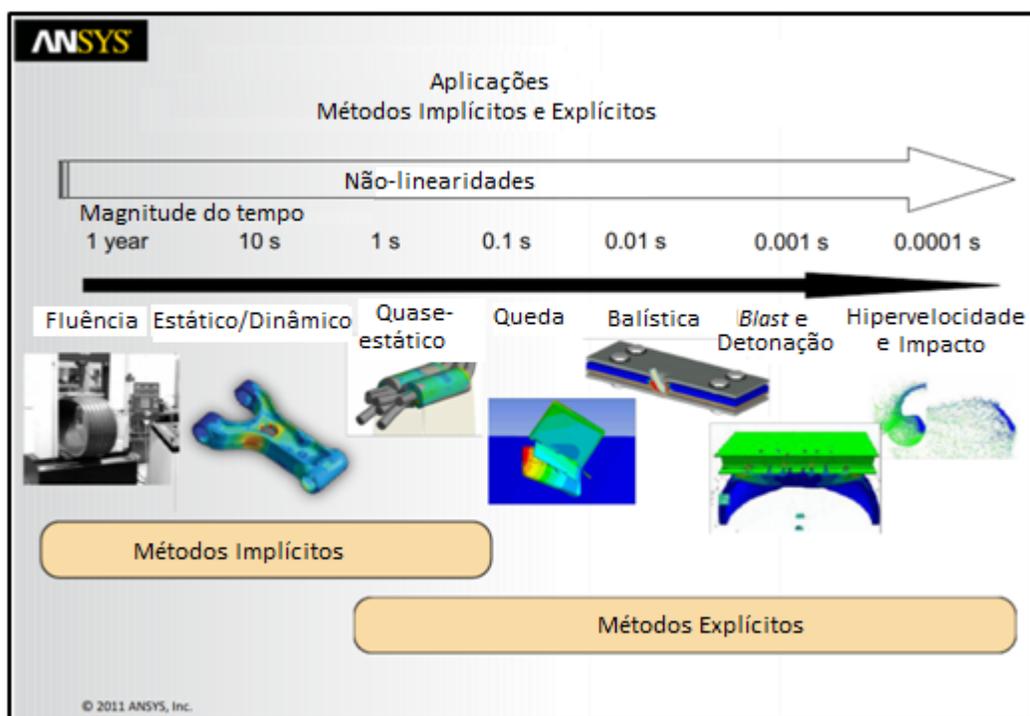
**Figura 12** – Ilustração do processo iterativo do método de integração de Newton-Raphson.  
Fonte: Adaptado de Yang [20].

ANSYS [21] apresenta que a análise de dinâmica explícita é utilizada para determinar a resposta dinâmica de uma estrutura sujeita à propagação de onda (tensões equivalentes), impactos e mudanças repentinas de carregamentos ao longo do tempo. Alterações de momento entre o corpo em movimento e seus efeitos inerciais são importantes aspectos considerados neste tipo de análise. Além disso, complementa que este tipo de análise é usada para a modelagem de fenômenos altamente não lineares.

Tasdelen [7] ainda complementa que a integração explícita é muito indicada para interação fluido-estrutura, pequenos ou grandes deslocamentos, bem como altas velocidades de partículas. É também capaz de resolver não-linearidades em estruturas, sendo portanto, recomendado para o emprego em explosões submarinas.

Pett [22] apresenta a Figura 13, onde fica evidente que à medida que aumenta o número de não-linearidades presentes no fenômeno físico, além da redução da magnitude do

tempo, é necessário o emprego da metodologia explícita para a resolução do problema. Nota-se também que a magnitude de tempo para o evento das explosões submarinas (*detonation and blast*) é da ordem de milissegundos.

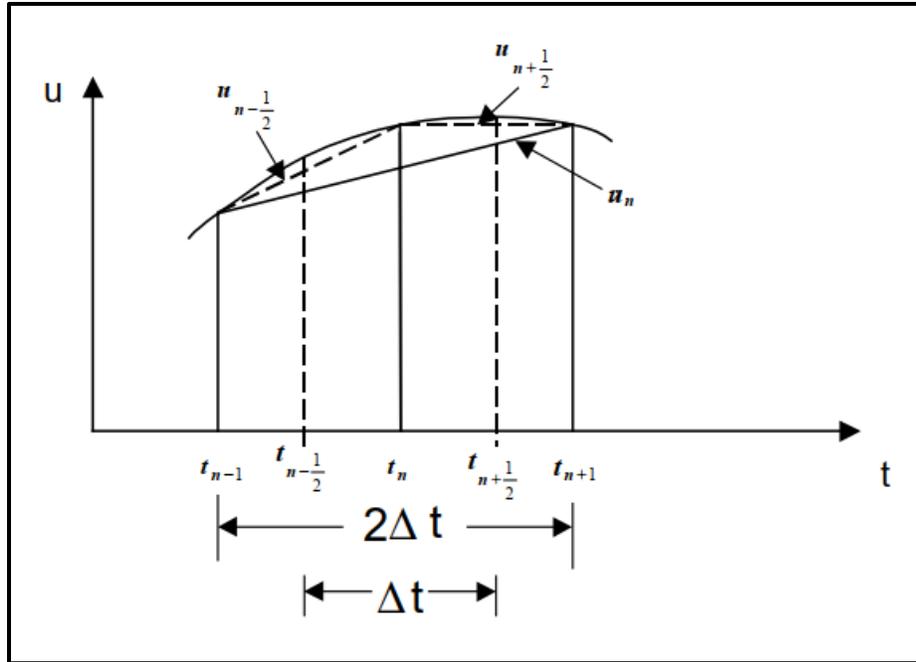


**Figura 13** – Ilustração do emprego do método explícito para fenômenos físicos com duração de tempo inferior a um segundo.

Fonte: Adaptado de Pett [22].

Neste contexto, Bradbeer [23] ressalta que para a modelagem de uma explosão submarina, para se ter a captura da passagem da onda de choque, é necessário um incremento de tempo muito pequeno e, portanto, a resolução por método explícito se torna computacionalmente mais eficiente. Ainda complementa que uma vantagem secundária do método explícito, na modelagem do evento de choque, que na ausência do requisito de equilíbrio das forças internas e externas do corpo, em cada passo de tempo, permite a modelagem de um corpo flutuante, adquirindo movimentos de corpo livre durante a solução.

ANSYS [21] aponta que o método de solução utilizado na dinâmica explícita é a diferença central de tempo de integração (também conhecido como método *Leapfrog*). A Figura 14 ilustra o conceito deste método, onde  $u$  é o deslocamento,  $\Delta t$  é o incremento de tempo ou intervalo dividido em instante próximo ( $u_{n+1}$ ), atual ( $u_n$ ) e anterior ( $u_{n-1}$ ).



**Figura 14** – Ilustração do método da diferença central de tempo no método de dinâmica explícita.  
Fonte: Sánchez [24].

Considerando então o método da diferença central de tempo, para um deslocamento  $u_n$  (no tempo  $n$ ), terá a sua velocidade associada e sua respectiva aceleração apresentadas pelas Equações 3.2 e 3.3, respectivamente.

$$\dot{u}_n = \frac{1}{2\Delta t} (u_{n+1} - u_{n-1}) \quad (3.2)$$

$$\ddot{u}_n = \frac{1}{\Delta t} (\dot{u}_{n+\frac{1}{2}} - \dot{u}_{n-\frac{1}{2}}) = \frac{1}{\Delta t^2} (u_{n+1} - 2u_n - u_{n-1}) \quad (3.3)$$

ANSYS [21] ainda complementa que este método consiste na solução da aceleração no nó da malha, a qual, após o cálculo das forças atuantes (internas e externas) naquele ponto, esta resultante de força é dividida pela massa atribuída naquele nó. A Equação 3.4 apresenta esta formulação da solução em termos de aceleração.

$$\ddot{x}_i = \frac{F_i}{m} + b_i \quad (3.4)$$

onde:

$\ddot{x}_i$  – Componentes de aceleração nodal ( $i=1, 2$  e  $3$ );

$F_i$  – Forças agindo no ponto nodal;

$m$  – Massa atribuída ao nó; e

$b_i$  – Componentes de aceleração do corpo.

Calculada a aceleração no nó  $i$ , em um tempo  $n$ , é obtida então a velocidade (em um tempo  $n+1/2$ ) e o deslocamento (em um tempo  $n+1$ ) deste ponto, por meio das Equações 3.5 e 3.6.

$$\dot{x}_i^{n+1/2} = \dot{x}_i^{n-1/2} + \ddot{x}_i^n \Delta t^n \quad (3.5)$$

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \dot{x}_i^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad (3.6)$$

ANSYS [21] adiciona ainda que as vantagens do método explícito são:

- i. As equações são desacopladas, permitindo que sejam solucionadas de forma independente, ou seja, não há iteração durante o processo de integração;
- ii. Não há necessidade da verificação de convergência; e
- iii. Não há necessidade de inversão na matriz de rigidez. As não linearidades são incluídas no vetor de forças internas.

Balakrishnan *et al.* [19] apontam que o método explícito é condicionalmente estável. Esta estabilidade é atingida desde que o incremento de tempo seja menor do que o incremento de tempo crítico da estrutura a ser simulada. Neste sentido, ANSYS [21] complementa que para garantir a estabilidade e a precisão da solução, o incremento de tempo adotado no método explícito deve atender a condição de CFL (Courant-Friederichs-Levy). Esta condição implica que o referido incremento de tempo é limitado pela perturbação (onda de choque) não pode propagar mais longe que a menor dimensão característica do elemento da malha, em um único incremento. A Equação 3.7 apresenta a condição de CFL.

$$\Delta t \leq f \cdot \left[ \frac{h}{c} \right] \quad (3.7)$$

onde:

$\Delta t$  é o incremento de tempo

$f$  é o fator de estabilidade do incremento (sugestão de 0,9)

$h$  é a característica da dimensão do menor elemento

$c$  é a velocidade do som no material

A Tabela 3.1 apresenta a caracterização da dimensão do elemento nodal em função do tipo de elemento da malha.

**Tabela 3.1** – Caracterização da dimensão do elemento nodal em função do tipo.

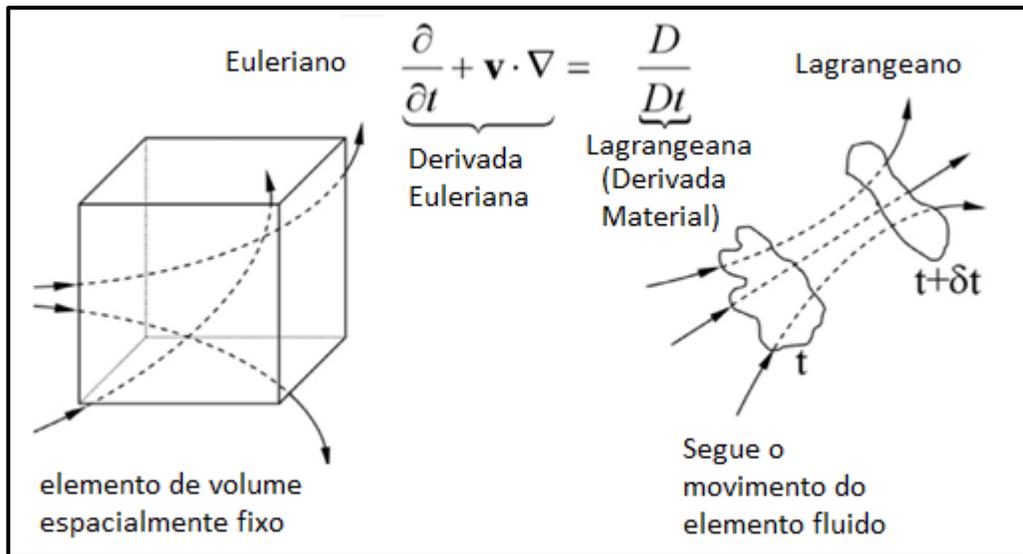
<b>Tipo de Elemento</b>	<b>h - Característica da Dimensão do Menor Elemento</b>
Hexagonal/Pentagonal	O volume do elemento dividido pelo quadrado da maior diagonal e multiplicado por $\sqrt{2/3}$
Tetraédrico	A distância mínima entre o nó do elemento e sua face oposta
Casca Quad	A raiz quadrada da área da casca do elemento
Casca Tri	A mínima distância entre o nó do elemento e seu vértice oposto
Viga	O comprimento do elemento

Fonte: ANSYS [21].

### 3.3. Abordagem Euleriana *versus* Lagrangeana

Em um processo de solução via MEF, os deslocamentos e deformações da malha são obtidos segundo a referência da abordagem Euleriana ou Lagrangeana. LS-DYNA [25] apresenta que as técnicas de solução envolvendo a formulação Lagrangeana, geralmente utilizadas quando envolvem moderadas distorções no elemento. Quando estas distorções são excessivas ou há ruptura do material, uma formulação Euleriana torna-se necessária.

A Figura 15 ilustra a diferença entre as formulações Euleriana e Lagrangeana. Basicamente é como se no primeiro caso o material fluísse por meio de um volume (malha) fixa. Neste contexto, o volume do elemento é constante e a massa pode variar. Já em um sistema Lagrangeano, é como se a malha se movesse juntamente com o corpo, fazendo com que a massa do elemento seja fixa e o volume possa variar.



**Figura 15** – Ilustração da diferença entre as formulações Euleriana e Lagrangeana.  
 Fonte: Adaptado de Shadloo *et al.* [26].

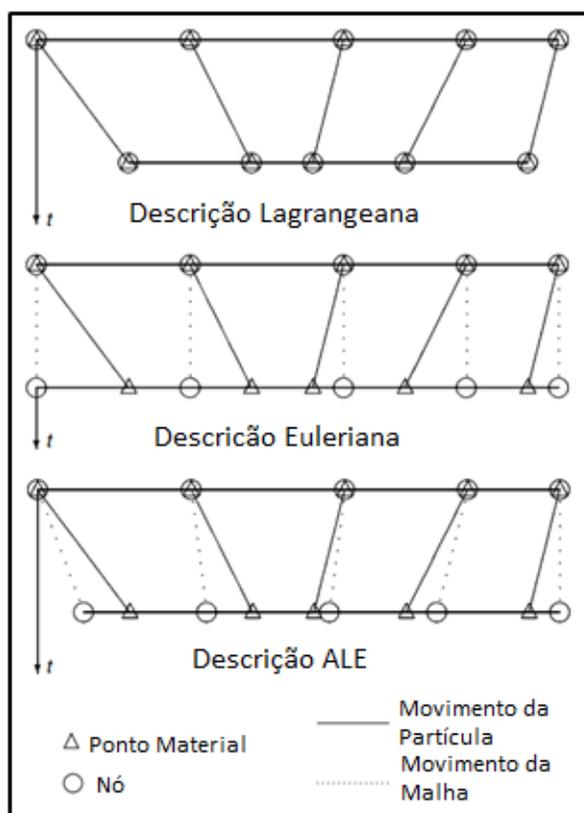
AUTODYN [27] apresenta que comparado com uma abordagem Lagrangeana, a formulação Euleriana tende a ter uma solução mais rápida, embora o transporte de material através da malha precise ser calculado. Interfaces de material, superfícies livres, comportamento do material variando com o tempo geralmente são mais fáceis de especificar segundo a referência Lagrangeana. Ainda acrescenta que a maior desvantagem da abordagem Lagrangeana é de que, se um excessivo movimento de material ocorre, a malha numérica pode se tornar altamente distorcida levando a uma solução errônea e ineficiente. Para reduzir este efeito, o uso da técnica do rezoneamento através do remapeamento da distorção, é uma das formas para então minimizar este problema.

AUTODYN [27] ainda conclui que por causa da inerente eficiência, a referência Lagrangeana é comumente utilizada quando as deformações e as condições de contorno permitirem. Porém grandes deformações e dinâmica de gases e fluidos são geralmente modelados com uma abordagem Euleriana.

### 3.4. Abordagem ALE (*Arbitrary Lagrangean Eulerian*) e SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*)

Donea *et al.* [28] aponta que em virtude das deficiências de uma abordagem puramente Lagrangeana ou Euleriana, uma técnica numérica foi desenvolvida, envolvendo

as melhores características da abordagem Lagrangeana e Euleriana. Essa técnica é denominada ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) e os nós da malha podem se mover continuamente (abordagem Lagrangeana) ou permanecerem fixos (como na abordagem Euleriana) ou até mesmo moverem-se arbitrariamente conforme especificado em um rezoneamento contínuo. A Figura 16 apresenta esta característica. Neste contexto, ainda é apresentado que em virtude deste movimento computacional da malha proporcionado pela abordagem ALE, problemas com grandes distorções podem ser resolvidos utilizando-se a parcela do método Lagrangeano, com maior precisão do que a oferecida pela abordagem Euleriana.



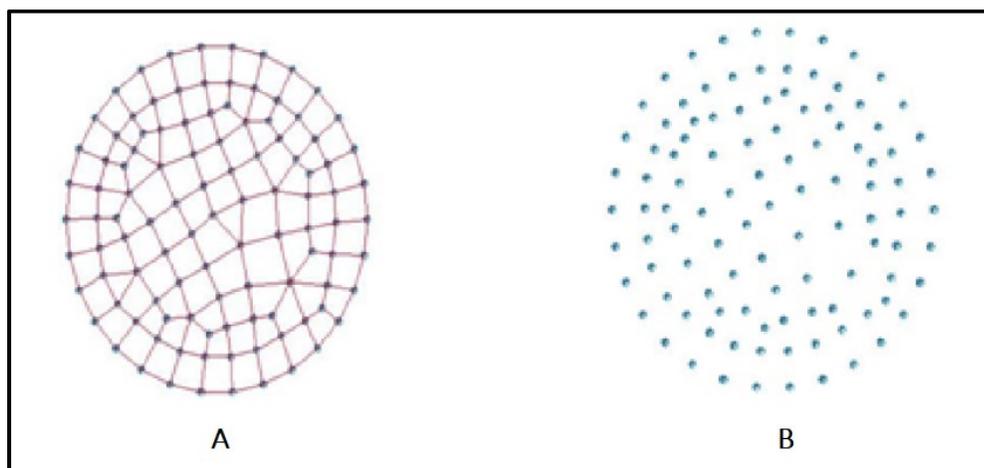
**Figura 16** – Ilustração dos deslocamentos nodais em uma abordagem ALE.  
 Fonte: Adaptado de Donea *et al.* [28].

Donea *et al.* [28] ainda conclui que devido a versatilidade da abordagem ALE, a implementação deste método requer um procedimento de atualização da malha que atribua a velocidade e o deslocamento em cada passo de tempo. Nesse sentido, basicamente dois métodos de atualização da malha são adotados: regularização da malha e adaptação da malha.

O primeiro deles mantém a malha computacional o mais regular possível, com o intuito de impedir penetração de elementos da malha durante o processamento da solução. O outro método mantém a concentração dos elementos em zonas de um gradiente de solução abrupto e, mediante a adoção de um critério de erro máximo tolerado, a malha é novamente gerada por meio de um algoritmo.

Conforme LS-DYNA [25], o método SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) foi desenvolvido para evitar as limitações de entrelaçamento da malha encontradas em problemas envolvendo grandes deformações. A principal diferença entre os métodos tradicionais apresentados até aqui é a ausência de malha no método SPH. Para a solução do problema, as equações governantes das partículas são resolvidas por novos métodos computacionais implementados.

A Figura 17 apresenta o conceito de malhas e nós presentes nas soluções tradicionais de MEF e o conceito de partículas sem malhas empregadas no método SPH.



**Figura 17** – Ilustração dos elementos de uma solução tradicional de MEF (A) e o conceito da solução de partículas sem malha do método SPH (B).

Fonte: Messahel [29].

Shadloo *et al.* [26] complementa que as partículas são dotadas de volume, massa, momento, temperatura, concentração e outras propriedades hidrodinâmicas. Então o método SPH assume que os campos das partículas de interesse são interpolados a partir de todas as partículas contínuas de uma determinada fronteira. Para a redução do tempo computacional empregado, a abordagem SPH também inclui os efeitos das partículas da circunvizinhança da partícula em questão, variando a interação em um domínio com um raio predefinido.

Messahel [29] acrescenta que um método alternativo para multi-materiais envolvendo a formulação ALE para a solução de problemas envolvendo propagação de ondas de choque em fluxos multifásicos é o método SPH. Ainda complementa que para problemas de choque (como o caso de explosões submarinas), o método ALE é comumente aplicado na indústria de defesa. Na última década, o método SPH vem crescendo em acuracidade e estabilidade numérica, e seu uso vem sendo cada vez maior na indústria para a solução de problemas com interação fluido-estrutura.

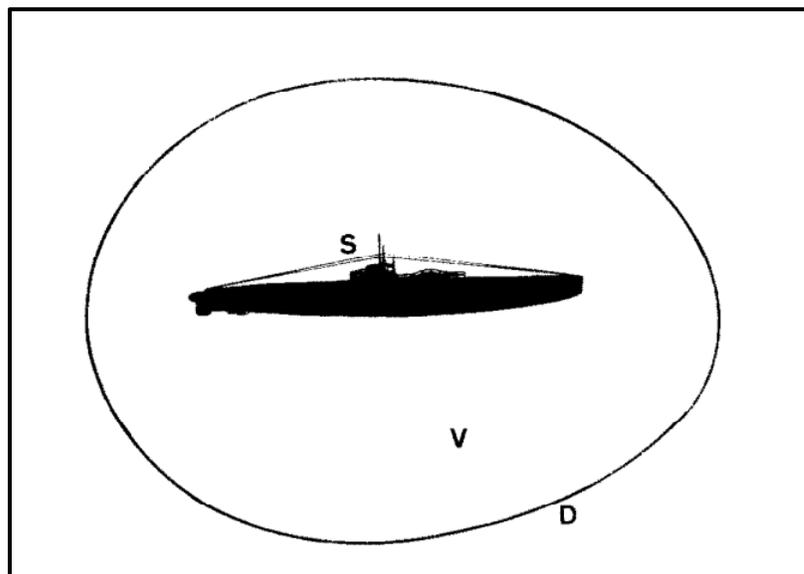
Nastasescu e Marzavam [30] concluem que usando o método SPH, além do fato de ser validado para a mecânica dos fluidos, traz aos usuários uma grande vantagem: a solução automática da interação fluido-estrutura. Com apenas uma execução do *solver*, podem ser resolvidas três componentes do problema envolvendo explosões submarinas: água, explosivo e estrutura.

### **3.5. Abordagem com Elementos Acústicos**

Uma outra técnica de solução para resolver problemas de explosões submarinas, envolvendo cavitação em fluidos, é a adoção de elementos acústicos. Neste contexto, Felippa e Deruntz [31] desenvolvem um método denominado DAA (*Doubly Asymptotic Approximation*) baseada na formulação deslocamento-potencial. Tal método descreve a interação fluido-estrutura em termos das variáveis da superfície “molhada” somente, evitando o ônus computacional produzido pelos elementos de volume fluido na vizinhança da estrutura. Nesse sentido, a estrutura submersa no fluido, sendo este idealizado como um meio acústico incapaz de transmitir tensões de tração. Adicionalmente, uma onda compressiva transiente propaga-se através do fluido e atinge a estrutura. Se a estrutura for suficientemente flexível e a pressão ambiental hidrostática suficientemente baixa, a onda de reflexão rarefeita induz a cavitação em uma sub-região transversal a onda de choque antes de atingir a estrutura. Este fenômeno é denominado cavitação do casco, já descrita na seção 2.2.3. Por causa da natureza não-linear da cavitação, um tratamento do elemento de contorno de todo o domínio do fluido, com base em uma “membrana DAA”, que envolve a estrutura é descartada.

A Figura 18 apresenta a estrutura de um meio naval (S), submerso em um volume de fluido cavitando (V), delimitado pela camada DAA (D). Diante disso, complementam que a camada DAA deve ser posicionada envolvendo a sub-região de fluido cavitando. Para isso,

alguns processos iterativos podem ser necessários. Tal processo consiste em monitorar a pressão circunvizinha a estrutura submersa: se em uma análise prévia a porção de fluido permanece pressurizada (não há queda na pressão), então a camada DAA deve ser movida para a proximidade da estrutura, reduzindo assim o custo computacional.



**Figura 18** – Ilustração dos elementos de referência do método DAA: estrutura submersa (S), volume de fluido cavitando (V) e a fronteira da camada DAA (D).  
Fonte: Felippa e Deruntz [31].

Lu e Brown [32] denominam a metodologia DAA como sendo o primórdio do método CAFE (*Cavitating Acoustic Finite Element*), sendo então introduzido o fator de amortecimento. Atualmente, softwares comerciais como LS-DYNA e ABAQUS utilizam o método CAFE, porém ainda necessitando de grande refinamento de malha para atingir uma solução satisfatória.

Do método proposto por Felippa e Deruntz [31] ainda deu origem ao denominado CASE (*Cavitating Acoustic Spectral Element*), como forma de contornar a maneira naturalmente dispersiva do método CAFE. Para isto, conforme Lu e Brown [31], o método CASE utiliza bases de funções de alta ordem com interpolações nodais nas raízes dos polinômios ortogonais, como forma de reduzir o erro das interpolações, assim reduzindo sua dispersão.

Lu e Brown [32] ainda complementam que embora os elementos de alta ordem sofrem mais oscilações para uma onda de choque descontínua (fenômeno de Gibbs), a abordagem

envolvendo o método CASE apresenta a mesma acuracidade que o método CAFE para alguns casos (dentre eles o fenômeno das explosões submarinas em navios de superfície), com menos recursos computacionais. Enfatizam que naquele trabalho foi utilizado o princípio básico da metodologia CAFE/CASE para a modelagem do fluido, acoplado ao *solver* de análise estrutural explícita do ABAQUS. Por fim, concluem que o erro normalizado, para um mesmo número de graus de liberdade, do método CASE de alta ordem é inferior que o do método CASE linear, o qual é inferior ao método CAFE linear.

Lu [33] ainda destaca que a principal tarefa na aplicação dos métodos CAFE/CASE para a simulação de um navio de superfície sujeito a uma explosão submarina de campo distante é a geração da malha fluida no entorno da geometria irregular do casco. Uma malha hexadominante é necessária, em virtude de sua precisão e eficiência computacional, além de necessitar menos elementos para um mesmo número de graus de liberdade.

### **3.6. Resultados Obtidos com a Simulação de Explosões Submarinas em Embarcações**

Com a evolução dos métodos de solução supracitados, aperfeiçoados e implementados ao longo dos anos nos códigos de MEF, está sendo possível atingir uma boa reprodução das respostas dinâmicas e dos danos causados nos meios navais, pelo choque mecânico advindo de explosões submarinas.

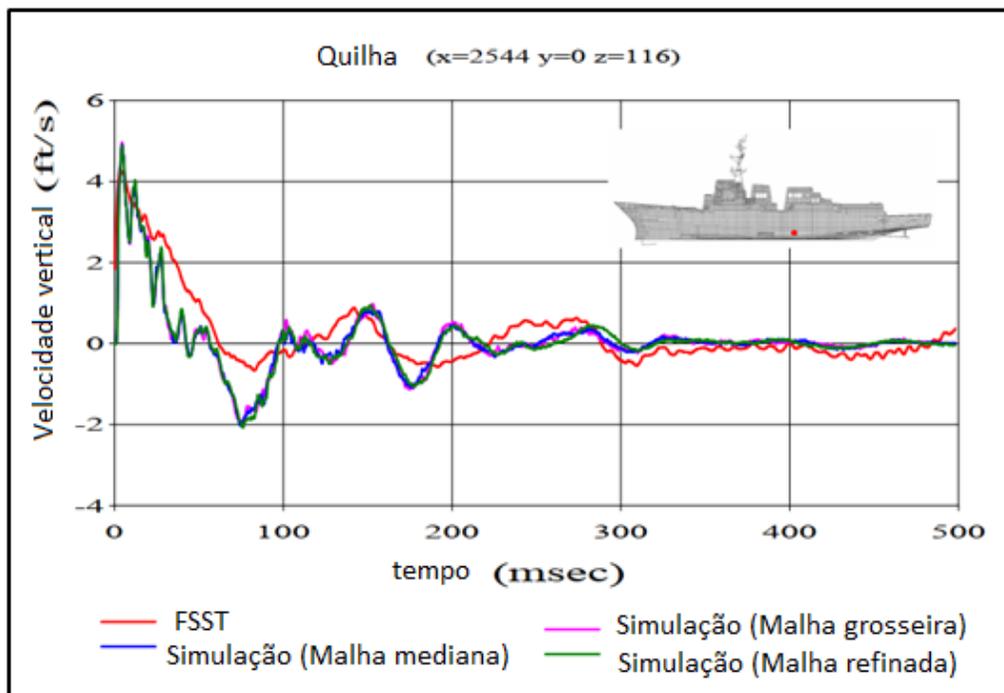
Na década de 90, Corbell [33], Cook [35] e Wood [36] publicaram seus estudos envolvendo o choque mecânico utilizando os códigos de MEF disponíveis naquela época. Sendo a capacidade de processamento computacional ainda limitada até então, serviram de referência e estímulo para que, anos mais tarde, outros autores aprimorassem tais estudos envolvendo o choque mecânico oriundo de explosões submarinas.

Deste modo, já então no século XXI, Schneider [11], Ucar [14], Schneider e Shin [18], Petrusa [37], Didoszak [38], entre outros, munidos de códigos de MEF mais avançados e uma capacidade computacional inúmeras vezes maior, obtiveram resultados muito próximos dos obtidos a campo, medidos durante os FSST.

Schneider [11] indica que em seu trabalho foi empregado o código do software LS-DYNA para a obtenção da resposta dinâmica da estrutura submersa e o solver USA (*Underwater Shock Analysis*), o qual é baseado na metodologia DAA, para a resolução da interação fluido-estrutura. Para a aquisição dos resultados a campo (no evento de FSST)

foram utilizados mais de 600 sensores posicionados em pontos de interesse em um navio da Marinha dos Estados Unidos (USS Winston S. Churchill).

Analisando os resultados da simulação e os resultados obtidos no evento de choque posteriormente tratados e corrigidos, se pode observar uma boa correlação entre os valores absolutos dos mesmos. A Figura 19 apresenta a comparação da velocidade vertical medida em um evento de FSST e de simulações com a malha grosseira, média e refinada (150 mil nós, 200 mil e 250 mil nós, respectivamente) para um determinado ponto localizado a meia nau. Schneider [11] acrescenta que a simulação de choque oriundo de uma explosão submarina conduzirá, em um futuro próximo, a uma análise da extensão dos danos nos sistemas de um navio, ainda na fase de projeto.



**Figura 19** – Gráfico da velocidade vertical obtida em um evento de FSST e por meio de simulações.  
Fonte: Adaptado de Schneider [11].

Didoszak [38] menciona que em seu trabalho foi empregado também o software LS-DYNA para a obtenção da resposta dinâmica do meio naval modelado, e também empregado o solver USA (*Underwater Shock Analysis*) para a resolução da interação fluido-estrutura. Já para a aquisição dos resultados a campo (no evento de FSST), foram utilizados aproximadamente 620 sensores posicionados em pontos de interesse no navio USS Winston

S. Churchill, da Marinha dos Estados Unidos, igualmente integrados a um filtro passa-baixa com um limite de 250 Hz.

Didoszak [38] também propôs melhorias no trabalho de Schneider [9], realizando aprimoramento no coeficiente de amortecimento da estrutura. Dessa forma, a mesma propõe utilizar um coeficiente de amortecimento de Rayleigh com  $\alpha = 19,2$  e  $\beta = 2,09 \times 10^{-6}$ , ao invés de um coeficiente global de amortecimento da estrutura de 4% (adotando-se  $\alpha = 2,64$  e  $\beta = 49,9 \times 10^{-6}$ ) empregado anteriormente. A Equação 3.5 apresenta o amortecimento de Rayleigh sob a forma matricial.

$$C = \alpha[M] + \beta[K] \quad (3.5)$$

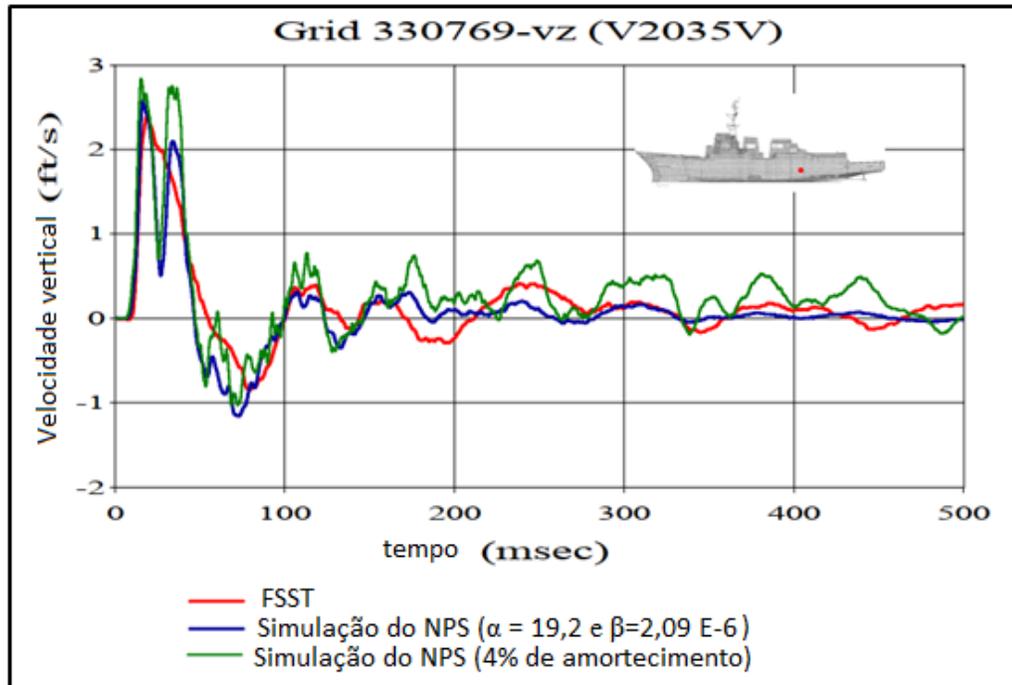
onde:

$\alpha$  e  $\beta$  são coeficientes constantes de Rayleigh

M é a matriz de massa

K é a matriz de rigidez

A Figura 20 apresenta a comparação da velocidade vertical das simulações realizadas em um determinado ponto da embarcação, variando-se o fator de amortecimento, e posteriormente comparando-se com os dados obtidos no teste de choque do navio USS Winston S. Churchill. Destes dados se pode perceber o quanto significativo que é a adoção do coeficiente de amortecimento adequado pela estrutura de modo a representar adequadamente o comportamento dinâmico da mesma na simulação do evento de choque.

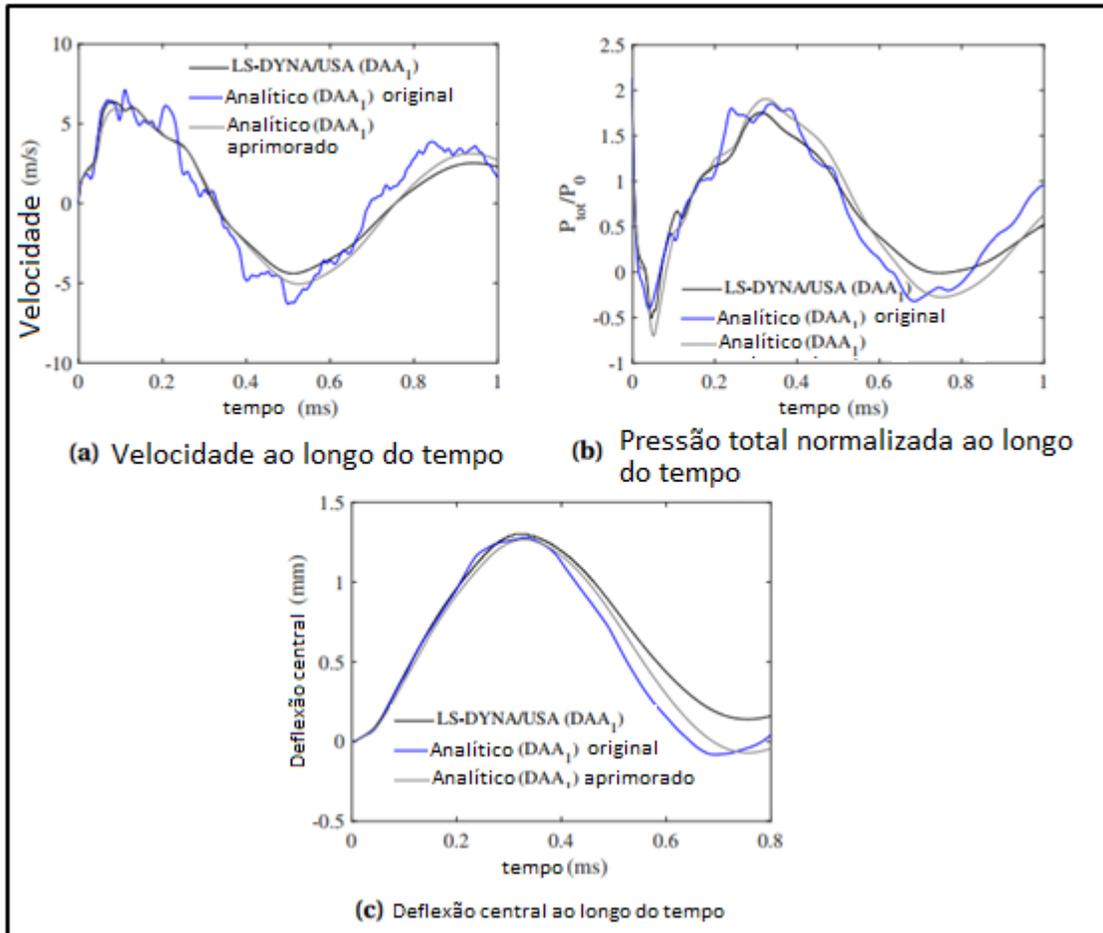


**Figura 20** – Gráfico da velocidade vertical obtida por meio de simulações e em um evento de FSST.  
 Fonte: Adaptado de Didoszak [38].

Didoszak [38] ainda complementa que estas simulações conduzidas em um ambiente virtual permitem a avaliação dos sistemas do navio além dos limites de projeto, sem trazer riscos para o navio, tripulação e meio ambiente. Esta abordagem tem adicionado benefícios incorporando os resultados obtidos nas simulações nos estágios finais da espiral de desenvolvimento do projeto dos navios militares. Incorporando melhorias no projeto de um navio ainda na fase anterior à construção, é possível reduzir atrasos no cronograma e custos com retrabalho.

Ainda nesse contexto, em seu recente trabalho de 2020, Sone Oo [39] obteve importantes resultados no emprego de painéis confeccionados em materiais compósitos sujeitos a explosões submarinas. Utilizando uma metodologia que emprega o *solver* LS DYNA/DAA e também uma metodologia analítica desenvolvida e implementada no ambiente MATLAB, foi possível obter uma grande redução no tempo de simulação computacional por meio da abordagem analítica, embora ainda com a limitação de ambos os métodos em modelar e obter o impacto na pressão total advinda dos efeitos do fenômeno da cavitação.

A Figura 21 apresenta a velocidade (a), a pressão total relativa (b) e a deflexão central (c) obtidas por meio do método LS DYNA/DAA e do método analítico em ambiente MATLAB.



**Figura 21** – Gráficos da velocidade vertical (A), da pressão total normalizada (B) e da deflexão central para cada método empregado (C).

Fonte: Adaptado de Sone Oo [39].

Do breve contexto da evolução da simulação do evento de explosões submarinas em meios navais e de seus resultados alcançados ao longo do tempo, fica evidente todo o esforço e trabalho contínuo que vem sendo empregado para a melhoria e aperfeiçoamento dos códigos computacionais, para que seja alcançada cada vez mais a convergência com os resultados obtidos experimentalmente, com um custo computacional adequado.

# Capítulo 4

## Modelagem Numérica do Problema Proposto

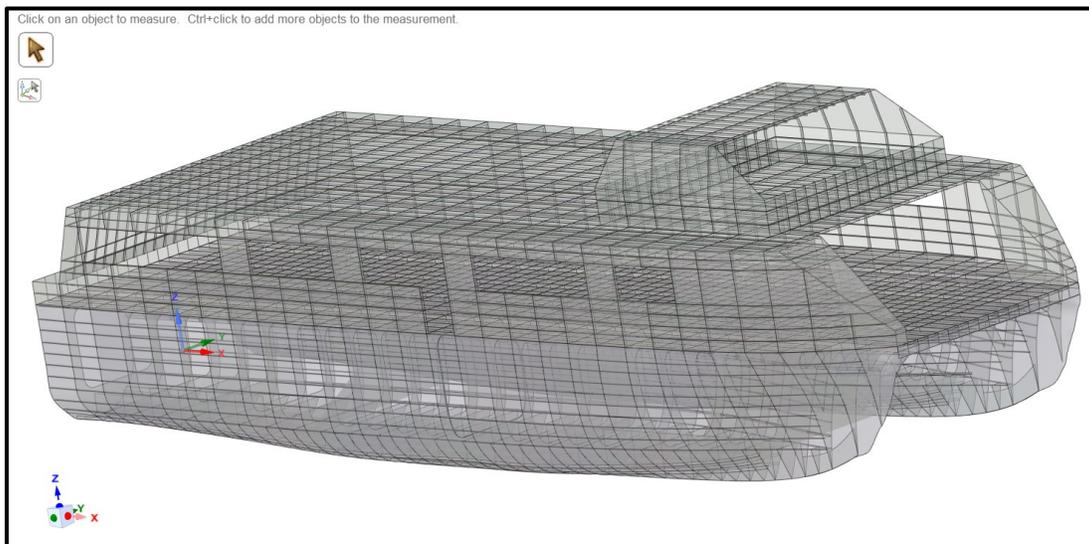
### 4.1.Introdução

Conforme já abordado anteriormente, este trabalho obteve a resposta (em termos de deslocamento, velocidade e aceleração) de um meio naval submetido à uma explosão submarina. O *software* empregado para este fim foi o módulo de Dinâmica Explícita do Ansys® na versão 2022 R1, disponível na Diretoria de Engenharia Naval (DEN) da Marinha do Brasil.

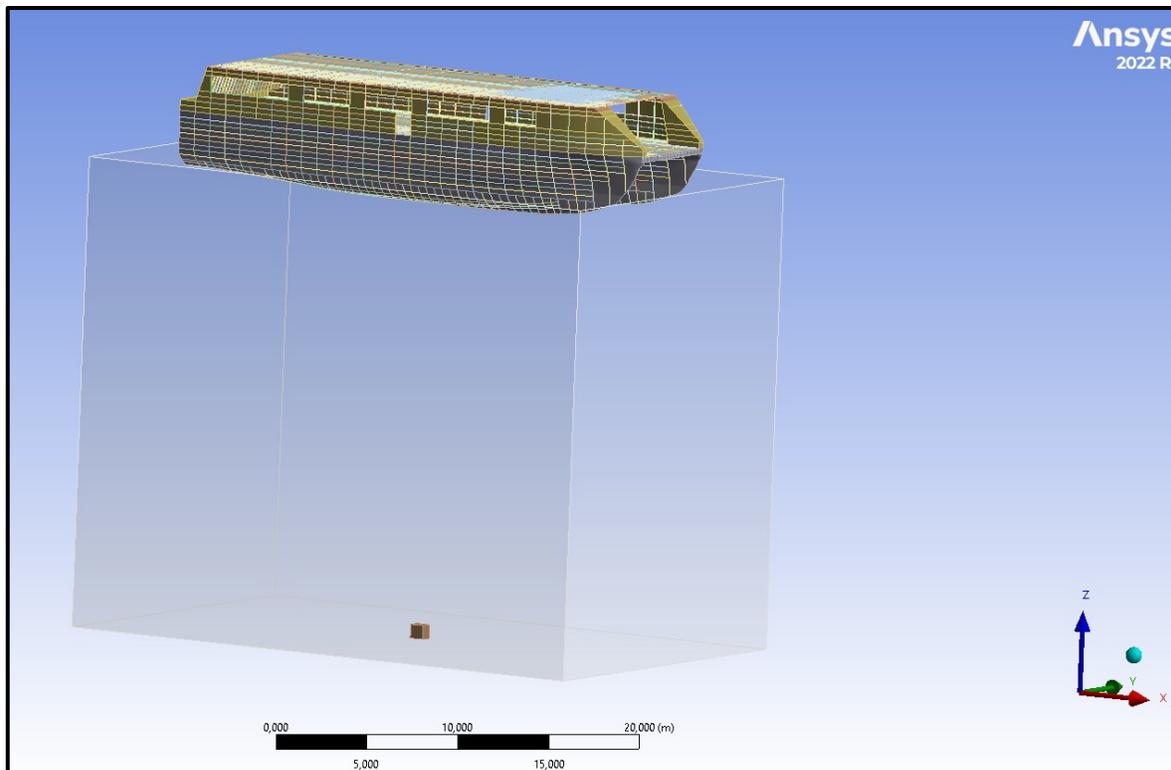
Devido ao segredo militar e a revelação de possíveis vulnerabilidades de um navio de guerra, alternativamente a um meio naval foi empregada uma embarcação comercial. Cabe destacar que uma vez estabelecido o método, o emprego do modelo virtual pode ser facilmente substituído.

Para isto, foi utilizado o modelo virtual de um catamarã com 29 metros de comprimento total x 9,57 metros de boca x 0,94 metro de calado (ver Figuras 22 e 23), sendo que a embarcação real é utilizada para transporte de passageiros entre as cidades do Rio de Janeiro e Niterói. O deslocamento leve aproximado do modelo virtual é de 346 toneladas, visto que se optou por ser construída em aço estrutural. Para este trabalho foi utilizado o

modelo virtual de um catamarã, cedido pelo LEDAV – Laboratório de Ensaio Dinâmico e Análise de Vibração - da UFRJ.



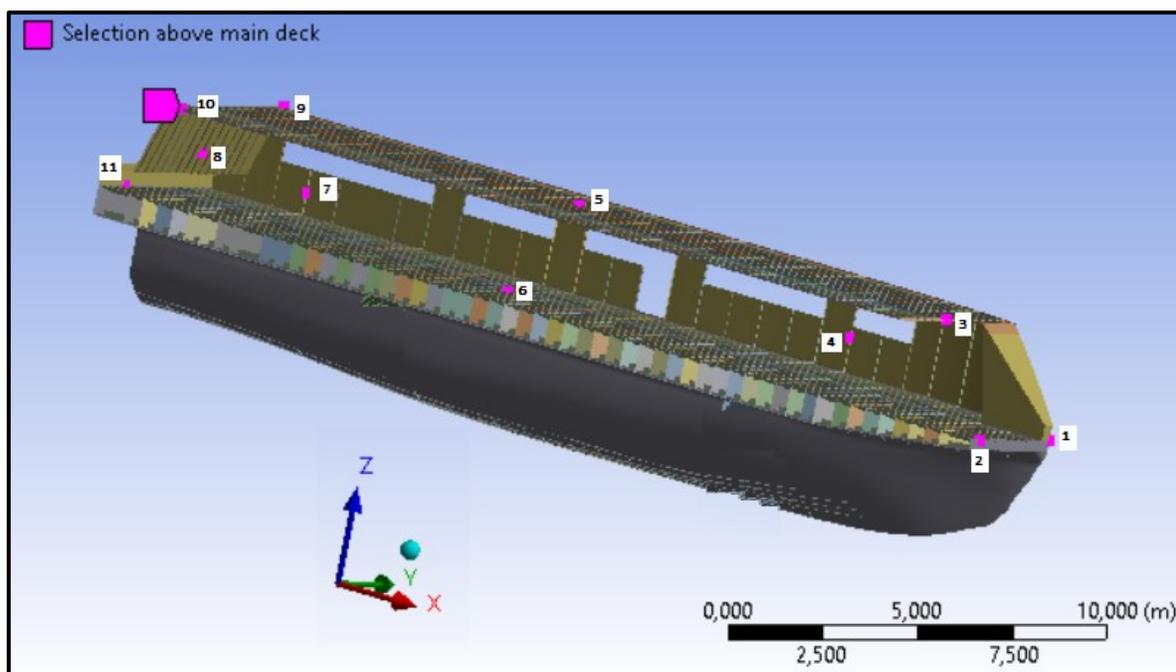
**Figura 22** – Modelo tridimensional do catamarã utilizado no trabalho.



**Figura 23** – Modelagem virtual utilizado no trabalho.

Para a apresentação dos resultados em termos de deslocamento, velocidade, aceleração e tensão máxima, foram considerados 11 pontos espalhados acima do convés principal e 12 pontos espalhados abaixo do convés principal (Figuras 24 e 25, respectivamente). Tais pontos representam locais onde poderão ser posicionados equipamentos vitais na embarcação, como itens do sistema de propulsão, sistema de geração, equipamentos eletrônicos de controle e monitoração, sistema de combustível, entre outros.

Cabe mencionar que estes pontos podem ser alterados conforme a necessidade do projeto, devido à flexibilidade do software utilizado (módulo de Dinâmica Explícita do Ansys®).



**Figura 24** – Pontos acima do convés principal.

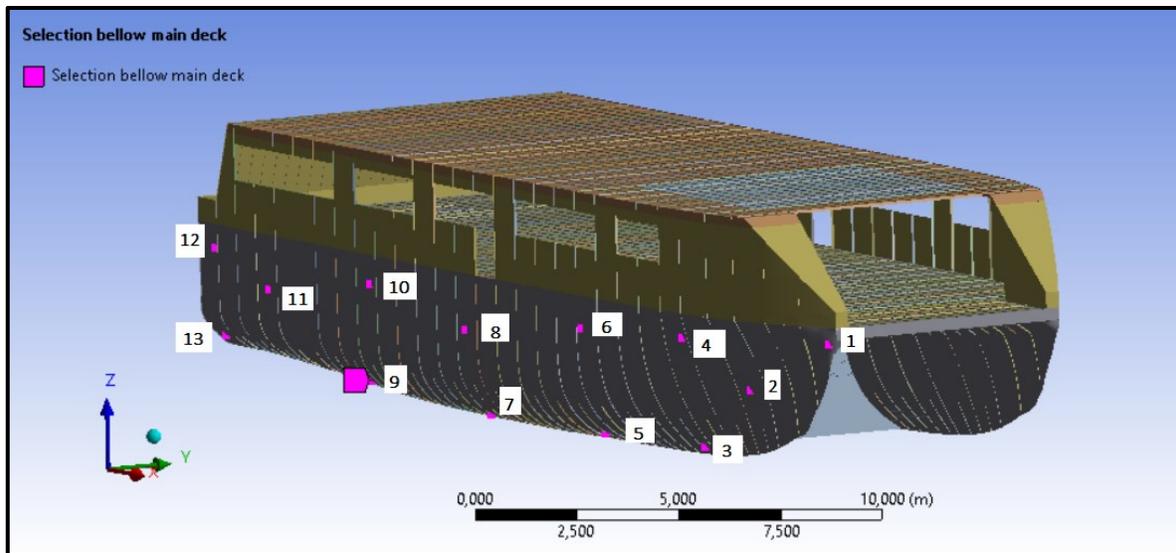


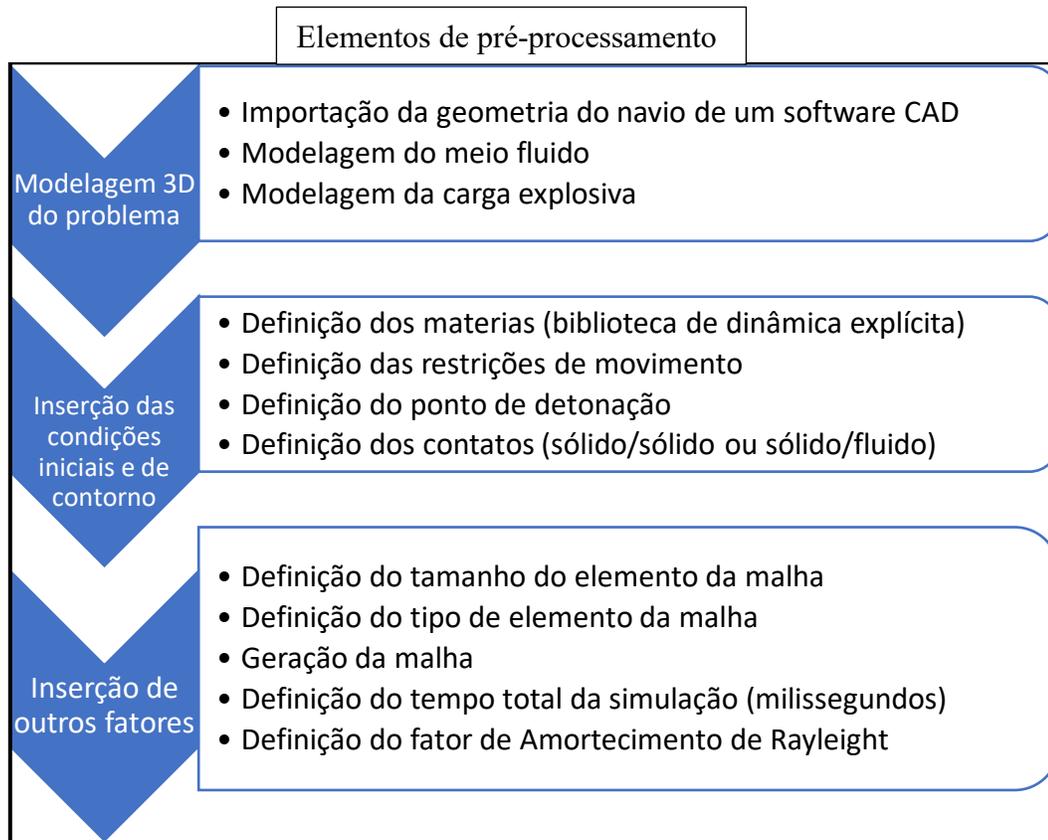
Figura 25 – Pontos abaixo do convés principal.

#### 4.2. Modelagem do Problema

O módulo de Dinâmica Explícita do Ansys® é compatível com importações de geometrias de outros *softwares* de projetos CAD (*Computer Aided Design*), convertendo-as para as extensões de arquivo .agdb ou .scdoc, adequados para a interface do *Mechanical* (sub módulo de Dinâmica Explícita para a solução do problema).

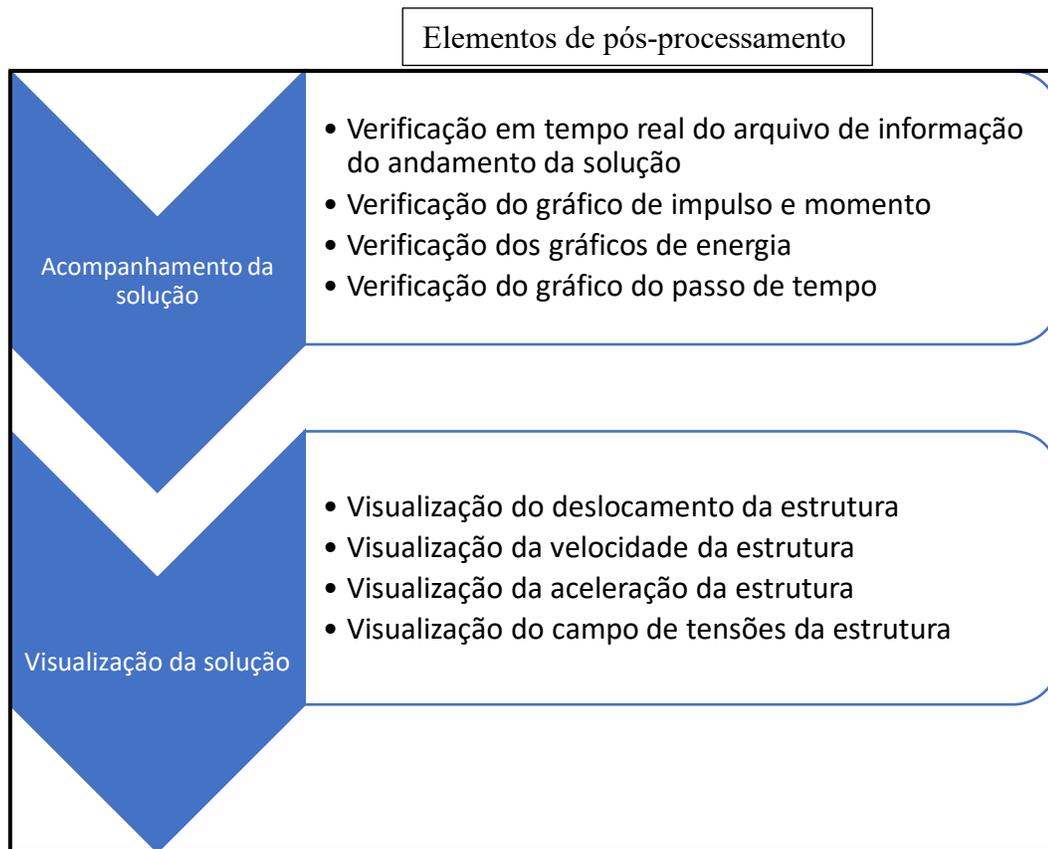
De forma mais objetiva e simplificada, foram elaborados os fluxogramas de pré-processamento e de pós-processamento, compreendendo todos os principais passos empregados na simulação numérica realizada deste trabalho.

A Figura 26 apresenta o fluxograma de elementos de pré-processamento, desde a definição da geometria utilizada, definição do ponto de detonação, geração da malha até a configuração dos parâmetros específicos na interface do módulo de dinâmica explícita.



**Figura 26** - Fluxograma de pré-processamento.

A Figura 27 apresenta o fluxograma de elementos de pós-processamento, desde a verificação do processo de solução, mediante gráficos de acompanhamento, até a visualização da resposta da estrutura obtida, em termos de deslocamento, velocidade e aceleração.

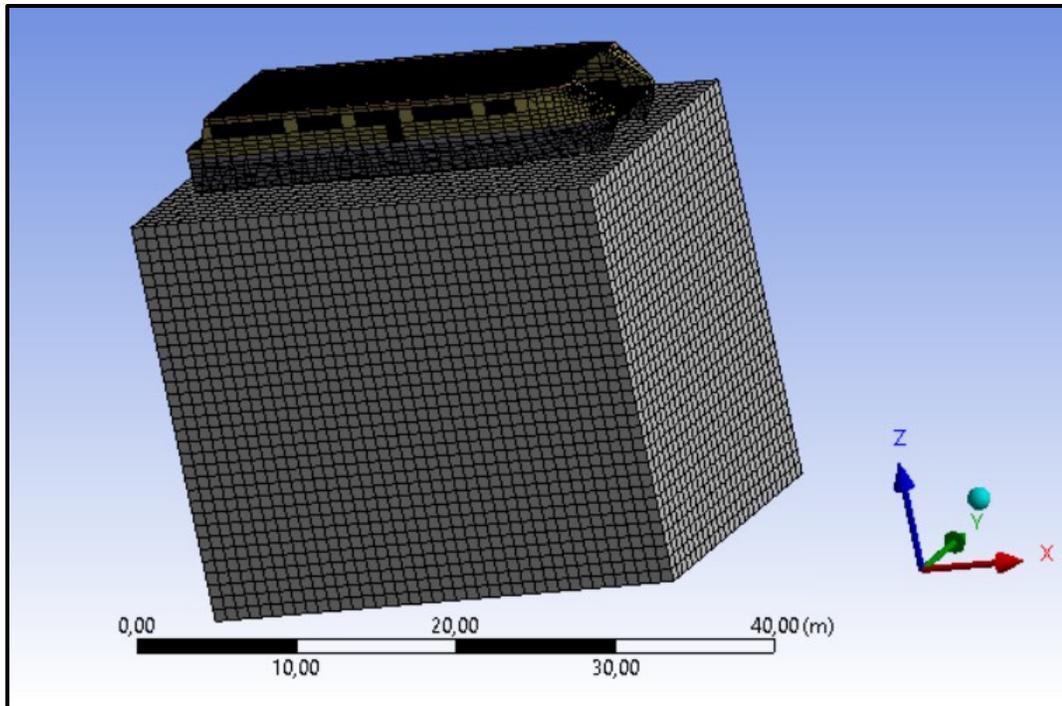


**Figura 27** - Fluxograma de pós-processamento.

Após a modelagem tridimensional do problema proposto, compreendendo o catamarã, o meio fluido e a carga de explosivo, foi gerada a malha dos referidos componentes na interface do submódulo *Mechanical*. Os elementos modelados são do tipo hexaédricos e tetraédricos de ordem linear (primeira ordem). A Figura 28 apresenta a malha gerada, sendo esta composta de 320.997 elementos e 86.098 nós.

Conforme já mencionado no capítulo 3, o tamanho do menor elemento gerado na malha impacta diretamente no passo de tempo (*time step*) que o *software* utiliza para o cálculo da resposta obtida, ou seja, quanto menor o tamanho do elemento da malha (para fluido ou sólido), menor será o passo de tempo e, por conseguinte, maior será o custo computacional utilizado.

Com o intuito de simplificar e facilitar a configuração deste trabalho, optou-se por utilizar a função onde o próprio software vai calculando e atualizando o passo de tempo utilizado na simulação. Para este estudo, o passo de tempo médio utilizado pelo software foi de  $3,99 \times 10^{-8}$  segundos.

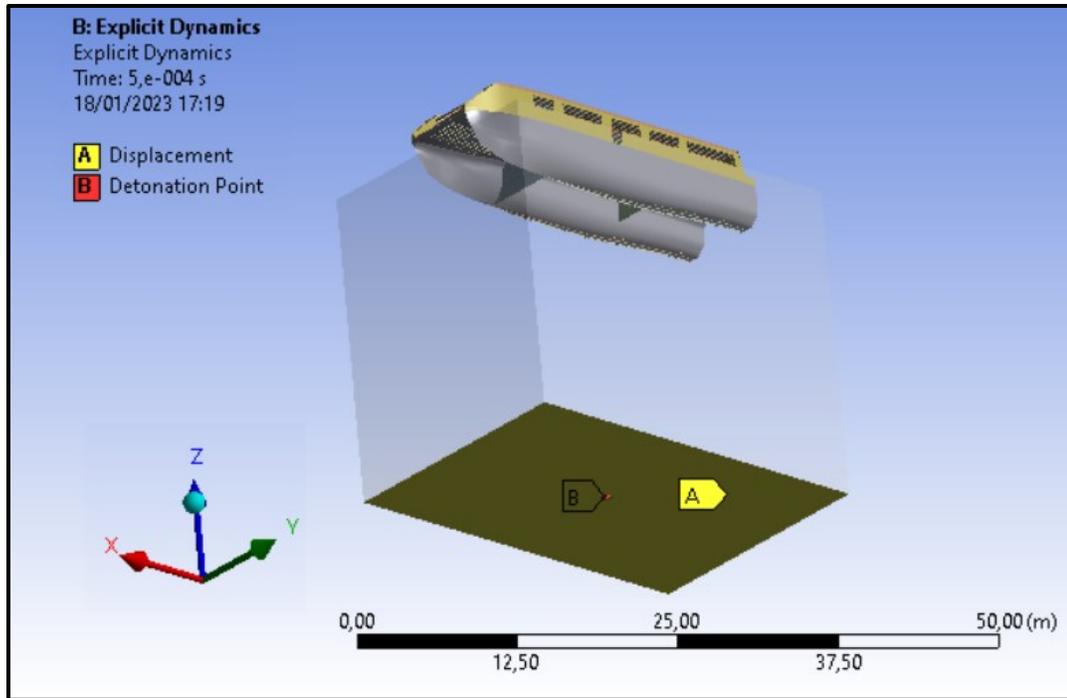


**Figura 28** – Malha gerada no modelo tridimensional.

Como condições iniciais e de contorno, foram efetuadas as seguintes considerações:

- O material do catamarã é o aço estrutural (tensão de escoamento de 290 MPa e tensão de ruptura de 470 MPa);
- O material do elemento explosivo é o PETN 1.5 - Tetranitrato de Pentaeritrina (densidade 1.500 Kg/m<sup>3</sup>);
- O meio fluido foi considerado como sendo água salgada;
- A velocidade relativa do meio fluido e a velocidade inicial do catamarã é nula;
- O contato entre os diferentes componentes estruturais do catamarã é do tipo colado (*bonded*);
- A face inferior do meio fluido possui restrição de movimento nos três eixos (deslocamento zero), simulando assim o leito marinho;
- O calado de 0,94 metro foi inserido manualmente no modelo.

A Figura 29 apresenta o ponto de detonação escolhido e a restrição de movimento nos três eixos da face inferior do meio fluido, simulando o leito marinho.



**Figura 29** – Vista do ponto de detonação e do leito marinho.

Com relação à detonação presente no próprio módulo de dinâmica explícita, convém salientar que facilita bastante a simulação, visto que desta forma, o usuário apenas modela a carga e insere o ponto de detonação na mesma. Isto faz com que não seja necessário o cálculo e a subsequente inserção manual (via importação de cargas na estrutura) das pressões geradas no decorrer do evento simulado.

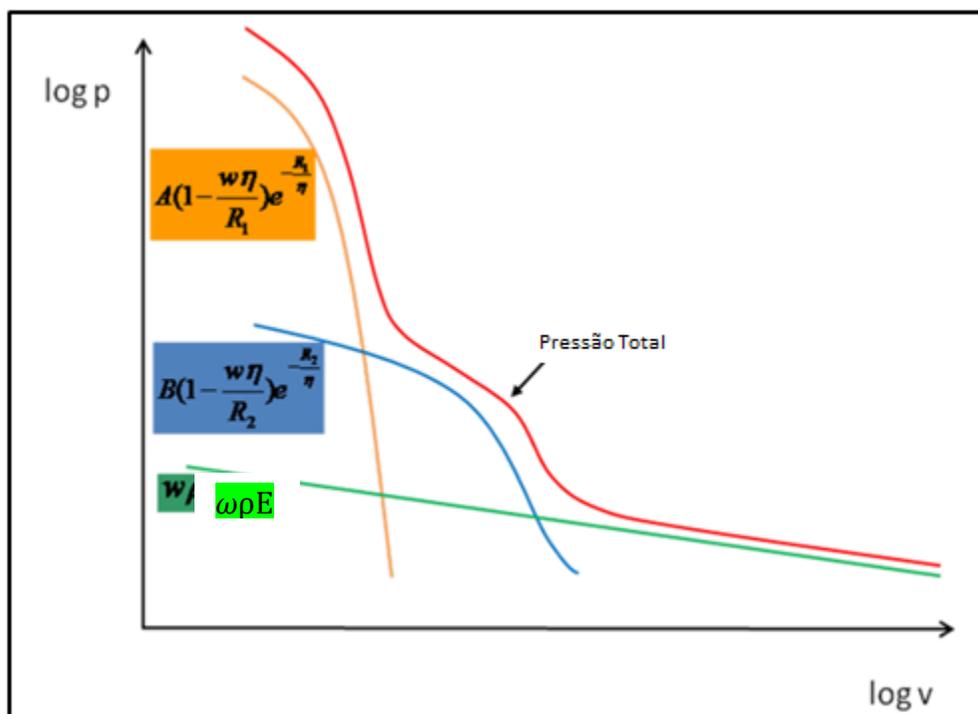
No tocante a equação de estado adotada pelo *software*, segundo ANSYS [21], é utilizado o modelo JWL (Jones, Wilkins e Lee), sendo apresentado na Equação 4.1 abaixo.

$$p = A \left[ 1 - \frac{\omega\eta}{R_1} \right] e^{\frac{R_1}{\eta}} + B \left[ 1 - \frac{\omega\eta}{R_2} \right] e^{\frac{R_2}{\eta}} + \omega\rho E \quad (4.1)$$

onde:

$p$  é a pressão (em kbar),  $E$  é a energia interna por unidade de massa,  $\rho_0$  é a massa específica de referência,  $\rho$  é a massa específica do material e  $\eta = \frac{p}{\rho_0}$ . Os valores  $A$ ,  $B$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  e  $\omega$  são obtidos experimentalmente. Estes parâmetros possuem uma relação de interdependência, fazendo com que a mudança em um destes altera o efeito dos demais.

Cabe destacar que este cálculo é resolvido automaticamente pelo solver, facilitando e agilizando o processo de solução para o usuário. A Figura 30 apresenta esquematicamente as parcelas das composições do modelo de equação de estado de JWS, sendo apresentada a pressão em função do volume específico em escala logarítmica.



**Figura 30** – Gráfico das parcelas de pressão constituintes do modelo JWS.  
 Fonte: Adaptado de ANSYS [21].

### 4.3.Simplificações Adotadas

De forma diferente da metodologia adotada por Schneider [11], Ucar [14], Tasdelen [7], Schneider [11], Petrusa [37] e Didoszak [38], onde as iterações da carga explosiva com o meio fluido foram resolvidas utilizando-se um solver externo (baseado, por exemplo, na metodologia DAA - *Doubly Asymptotic Approximation*), neste trabalho foi utilizado o solver integrado ao módulo de Dinâmica Explícita do Ansys®. Isto faz que sejam desconsiderados efeitos de cavitação abaixo do casco do meio naval, impactando de certa forma no resultado final. Conforme visto adiante, esta limitação poderá ser fruto de trabalhos futuros, aumentando a abrangência do fenômeno simulado.

Outro aspecto importante a ser mencionado é o efeito hidrostático no modelo tridimensional simulado. Mediante a informação do calado de projeto (0,94 metro), foi modelado de tal forma que a linha d'água atingisse esta marcação inicial no casco do catamarã. Porém, esta condição não é atualizada após o impacto da onda de choque com o casco da embarcação, não sendo alterada esta condição com as oscilações da pressão nas obras vivas. Ou seja, o modelo simulado neste estudo é como se fosse uma “condição inicial estática”. Atualizações desta condição somente poderão ocorrer utilizando-se metodologia de co-simulação, paralelamente empregando o módulo AQWA do Ansys® e um *software* de CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

Adicionalmente não foram inseridos os equipamentos de bordo, uma vez que o foco foi somente a análise da resposta estrutural. Cabe destacar que a adição destes equipamentos acaba por impactar na resposta global, pela inclusão destas massas localizadas, podendo ser efetuada esta comparação de resultados em uma análise de trabalhos futuros.

Devido a restrições de *hardware*, o modelo utilizado empregou a metodologia de malha Euleriana/Lagrangeana (virtual) para a composição da malha dos elementos sólido/fluido. Deste modo, foi exigido um tempo computacional menor para a solução do problema. Modelos de fluido que utilizam malha SPH, por exemplo, o custo computacional é muito maior quando comparada com uma malha mais simples, como foi o caso adotado neste trabalho.

Também nesse sentido, visto que há necessidade dos elementos que constituem a malha serem prioritariamente hexagonais no módulo de Dinâmica Explícita, a carga explosiva modelada foi em formato geométrico de cubo, facilitando a geração deste tipo de elemento. Cargas em formato cilíndrico ou esférico diversos tipos de elementos para completar a geometria gerada, impossibilitando executar o *solver* do módulo de Dinâmica Explícita do Ansys®.

Adicionalmente foi removido o passadiço do catamarã simulado, para reduzir o número de elementos da malha (e assim também reduzindo o custo computacional), visto que os maiores deslocamentos, velocidades e acelerações não ocorrem nos conveses superiores (conforme Szturomski [2]).

Visto a complexidade do modelo e o elevado número de elementos gerados (mais de 320 mil), não foi possível executar o teste de malha, em virtude das limitações de *hardware*

disponível. Isto, repentinamente, de um tempo demandado pelo *solver* de algumas horas de simulação, passaria para dias e, em um refinamento mais ousado, para meses.

Desse modo, de forma alternativa, foi utilizado o fator de qualidade da malha denominado. Segundo ANSYS [40], uma faixa de *skewness* de 0 até 0,5 é um padrão de elemento muito bom; sendo de 0,5 até 0,8 um padrão bom e até 0,94 um padrão aceitável. Acima de 0,98 é considerado um padrão inaceitável de elemento.

A Figura 31 apresenta o fator de *skewness* da malha utilizada no modelo tridimensional do problema abordado neste trabalho. Somente 0,037% dos elementos (121 elementos) estão situados na faixa com *skewness* de 0,9 (aceitável), demonstrando que a malha adotada para a simulação está com um padrão muito bom (até 0,5 de *skewness*).

A própria geometria do casco do meio naval adotado causa uma dificuldade adicional na geração da malha, devido às curvas a ele inerentes. Isto impacta tanto no fator de *skewness* quanto na obtenção de elementos hexaédricos de primeira ordem.

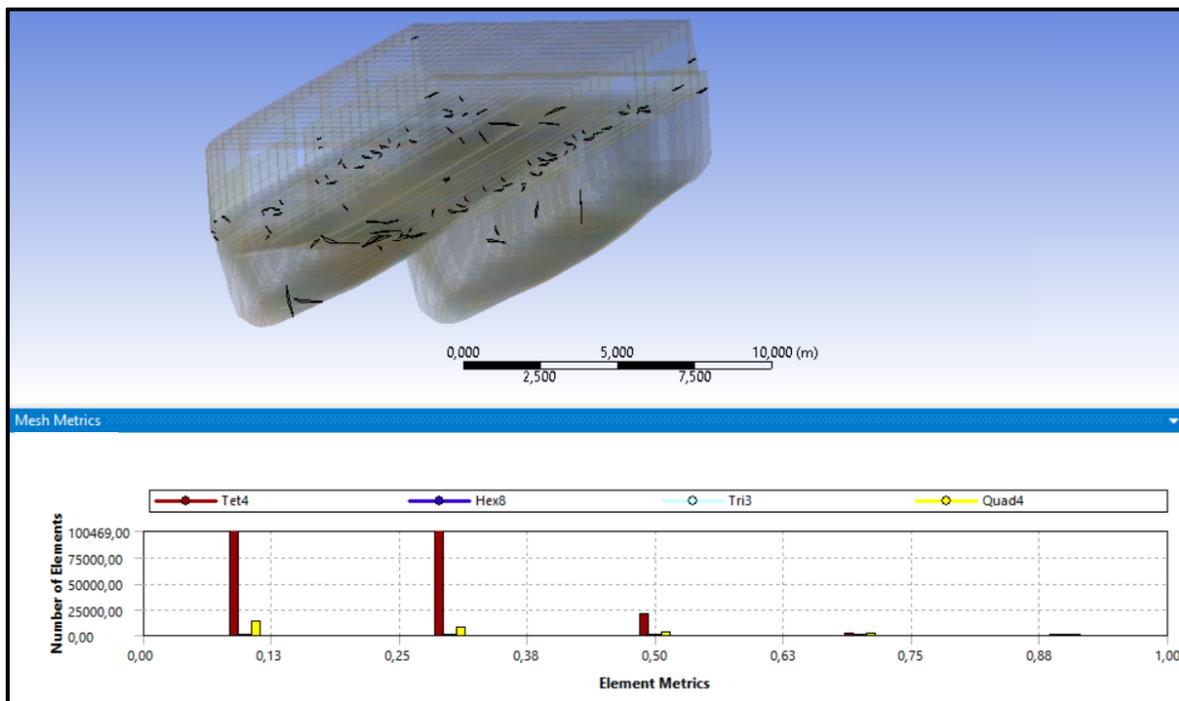


Figura 31 – Fator de *skewness* da malha utilizada no modelo tridimensional adotado neste trabalho.

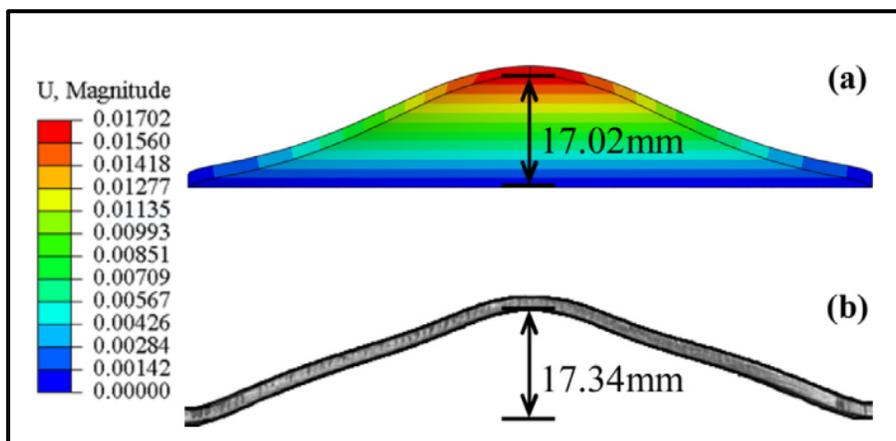
#### 4.4. Validação do Método

Visto que uma alternativa para a validação dos resultados obtidos seria obter um modelo virtual tridimensional simulado em outro *software* e implementar este no módulo de solução de Dinâmica Explícita do Ansys®. Neste momento, isto ainda não se faz possível, em virtude da necessidade de que seja efetuado contato com autores que já ensaiaram seus modelos (como Schneider [11], Petrusa [37] e Didoszak [38]) e também que seja efetivamente disponibilizado tais modelos, visto que se tratam de navios militares ainda em serviço ativo (classe de destróieres da Classe Arleigh Burke da Marinha dos Estados Unidos).

Também não foi possível efetuar a verificação dos resultados executando-se um teste tanto em escala real (similar a um FSST - *Full Ship Shock Test*, consumindo assim alguns milhões de reais) quanto com um modelo em escala reduzida, em virtude dos altos custos para a construção de um modelo fiel ao modelo virtual e da posterior instalação de sensores adequados para a aquisição dos dados obtidos.

Como forma alternativa, utilizou-se o modelo proposto por Zhang *et al.* [41], onde uma placa de raio  $r = 53$  mm e de espessura  $t = 1,9$  mm foi submetida a uma explosão submarina de uma carga de 5 gramas de TNT, posicionada a uma distância de 25 mm da referida chapa. O método numérico utilizado foi o *Runge–Kutta discontinuous Galerkin* (RKDG) acoplado a um programa de elementos finitos. Foi efetuada a comparação dos deslocamentos com um modelo físico experimental citado em Jacob *et al.* [42].

A Figura 32 apresenta o deslocamento do modelo virtual obtidos por Zhang *et al.* [41], comparados com o experimento apresentado em Jacob *et al.* [42].



**Figura 32** – Gráfico dos deslocamentos obtidos no modelo virtual (a) e experimentalmente (b).  
Fonte: Zhang *et al.* [41].

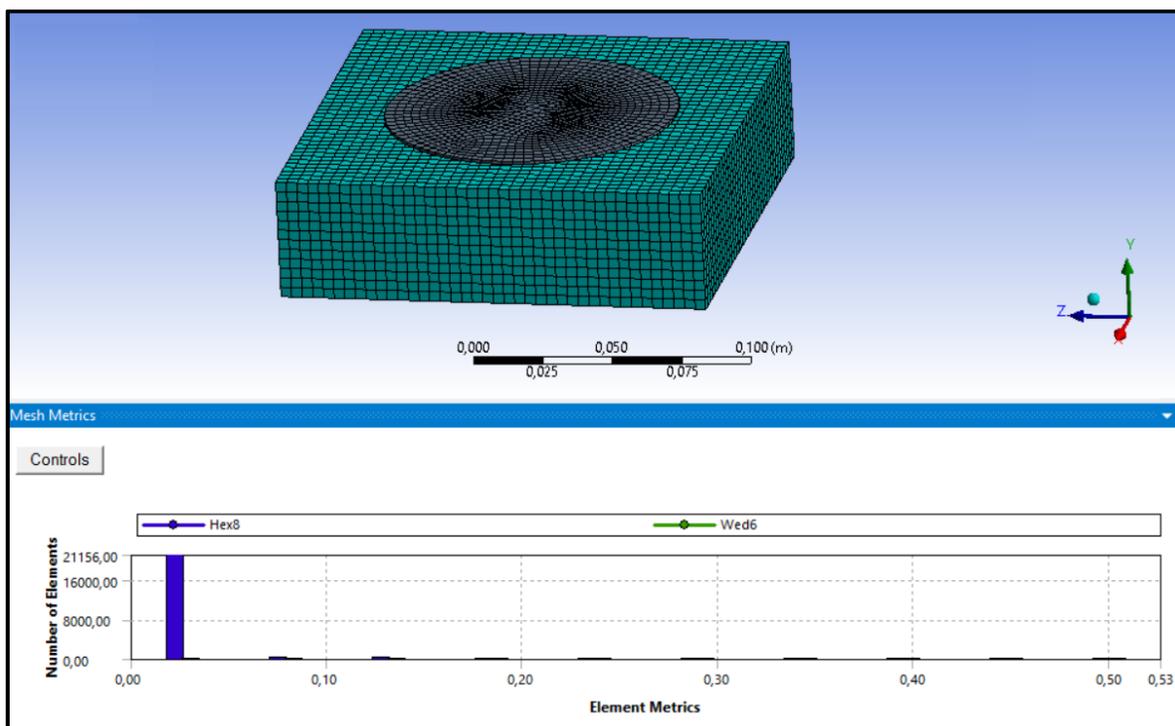
Com base nesta proposta, foi modelado virtualmente o corpo de prova (chapa circular em aço estrutural), o meio fluido (água) e a carga explosiva (TNT).

Inicialmente foi gerada uma malha com 2.026 elementos contendo 2.994 nós. O deslocamento obtido no centro da placa foi de 12,14 milímetros (70% do obtido experimentalmente por Jacob *et al.* [42]) e um tempo de referência na simulação sendo 1.

Visto a divergência de resultado, foram sendo executados testes na malha mediante refinamentos consecutivos.

A Figura 33 apresenta a malha refinada com 21.773 elementos e 26.294 nós. Para esta configuração, também foi executado o teste de “*skewness*” na malha, com o intuito de verificação da qualidade de cada elemento da mesma.

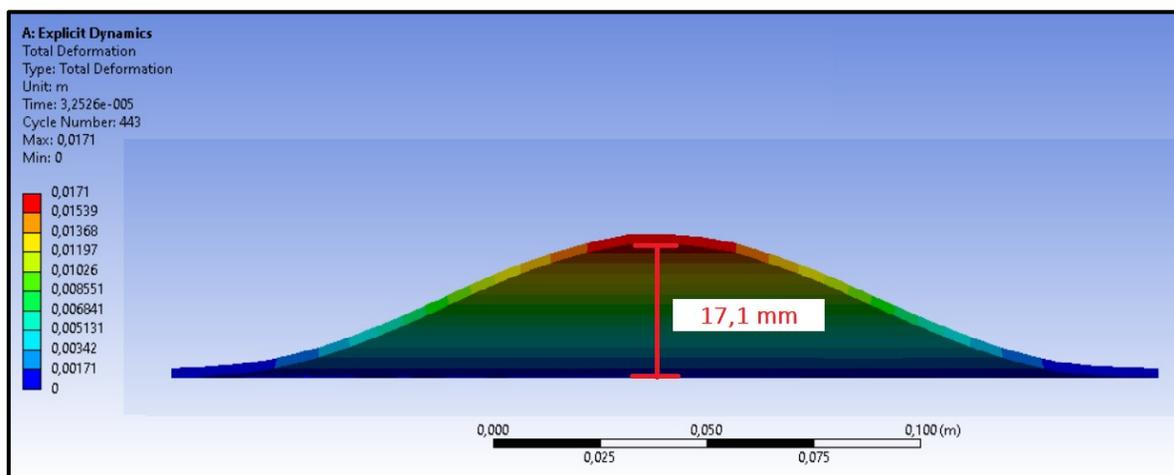
Nota-se que a maioria dos elementos estão na faixa de elementos classificada como de excelentes a muito bons, segundo escala encontrada em ANSYS [40].



**Figura 33** – Refinamento da malha para a validação do método utilizado.

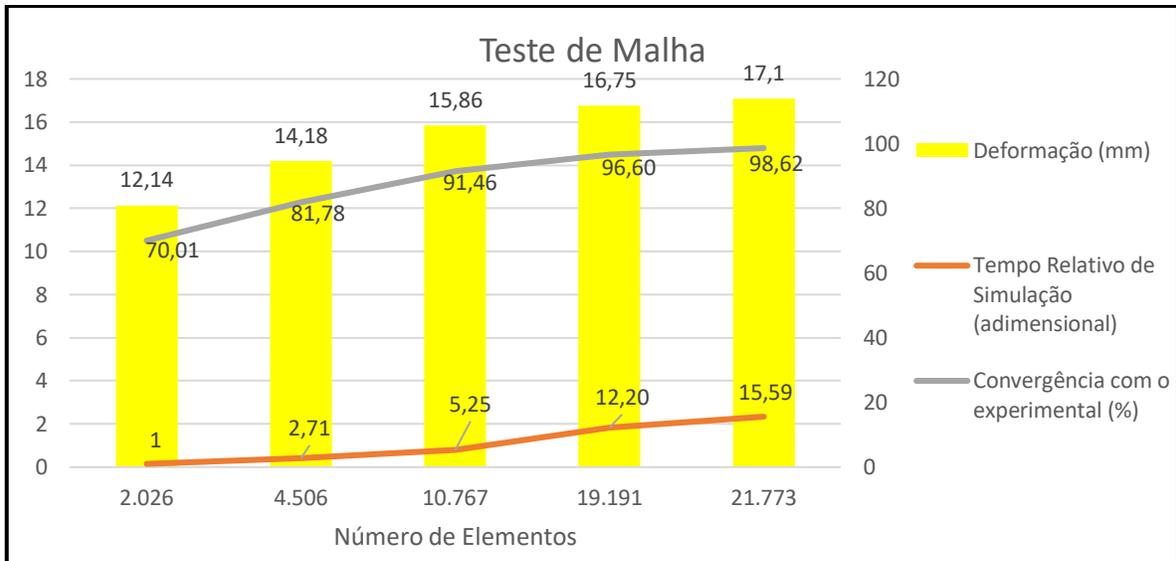
Nesta nova condição, o deslocamento obtido foi de 17,1 milímetros (99% do obtido experimentalmente por Jacob *et al.* [42]). Isto reflete-se em um menor passo de tempo

utilizado pelo solver, aumentam-se a precisão da simulação. Porém, o custo computacional necessário para alcançar esta precisão foi cerca de 15,59 vezes maior do que o necessário para a primeira malha. Cabe ainda destacar que, empregando-se a última malha, o modelo deste trabalho foi mais preciso que o adotado por Zhang *et al.* [41] em cerca de 0,5%. A Figura 34 apresenta o resultado final do deslocamento obtido no módulo de Dinâmica Explícita do Ansys®.



**Figura 34** – Deslocamento máximo obtido no módulo de Dinâmica Explícita do Ansys®.

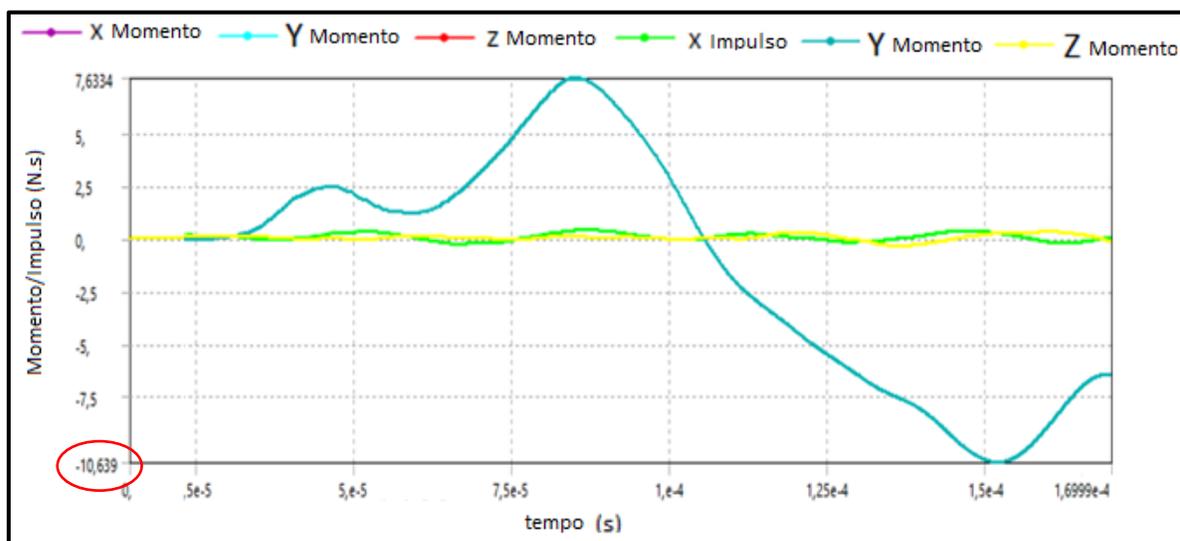
A Figura 35 apresenta o resumo do teste de malha efetuado, comparando-se o resultado obtido com o experimento encontrado em Jacob *et al.* [42]. Conforme apresentado nesta figura, para se obter uma precisão superior a 90% (a partir da terceira malha), o custo computacional eleva-se para mais de 5 vezes o inicial; sendo que, conforme mencionado anteriormente, para a última malha, o custo supera em 15 vezes. Para um caso mais simples, conforme este exemplo, não chega a consumir muitos minutos; porém, em um caso complexo, conforme o catamarã utilizado neste trabalho, pode representar um aumento de meses de simulação.



**Figura 35** – Gráfico do teste de malha efetuado no módulo de Dinâmica Explícita do Ansys®.

Adicionalmente, também foi verificado o impulso, em N.s, gerado pela explosão submarina. Esse dado é apresentado em Jacob *et al.* [42], onde é explicitado o valor de 10,33 N.s, obtido experimentalmente. O valor encontrado na simulação realizada no módulo de Dinâmica Explícita do Ansys® foi de 10,64 N.s no eixo Y de coordenadas (no sentido negativo do eixo) – uma divergência de cerca de 3%.

Maiores detalhes da variação dos impulsos e momentos decorrentes da carga explosiva podem ser visualizados na Figura 36.



**Figura 36** – Gráfico dos Impulsos e Momentos gerados pela carga explosiva de 5 gramas de TNT.

# Capítulo 5

## Resultados Obtidos

### 5.1.Introdução

Foram simulados três cenários distintos de explosões submarinas neste trabalho: a uma distância constante do casco da embarcação de 24 metros, três cargas explosivas de 88 quilogramas, 600 quilogramas e 1.850 quilogramas foram detonadas alternadamente e obtidas as respostas da estrutura do catamarã em termos de deslocamento, velocidade e aceleração. Também foi possível a obtenção das tensões equivalentes (segundo critério de von Mises) da estrutura do catamarã, afetadas pela alteração no campo de pressões oriunda da explosão submarina.

A profundidade de 24 metros foi selecionada por tratar-se de uma situação plausível de se depositar minas submarinas nesta profundidade ao longo da costa, de uma baía ou canal na foz de um rio.

Já a carga explosiva de PETN-5 foi selecionada por já estar disponibilizada na biblioteca de materiais do módulo de Dinâmica Explícita do Ansys®.

Quanto as massas de explosivo selecionadas, cabe destacar que as mesmas possuem padrões parecidos com minas de fundo citadas por Szturomski [2]. A Figura 37 apresenta um extrato de algumas minas utilizadas por países para proteção fluvial/marítima.

Minas de Fundeio Fixas				Minas de Fundo Fixas			
País	Nome	Profundidade [m]	Massa [kg]	País	Nome	Profundidade [m]	Massa [kg]
França	<i>H 30</i>	1-500	300	França	<i>MCC 23</i>	150	530
Espanha	<i>MO-90</i>	5-340	300		<i>TSM 3530</i>	100	1000
Alemanha	<i>DM 11 UMC</i>	1-500	40	Alemanha	<i>FG 1</i>	60	535
Russia	<i>AMG-1</i>	13-100	262		<i>DM 61</i>	60	450
	<i>GM</i>	10-200	300	Russia	<i>AMD-1000</i>	4-200	782
	<i>KAM</i>	10-40	300		<i>MDM-1</i>	12-120	1120
	<i>KSM</i>	10-210	300		<i>MDM-5</i>	8-300	1350
	<i>Lira</i>	25-250	250		<i>Serpey</i>	8-50	750
	<i>M-08</i>	6-110	115		<i>UDM-2</i>	-	800
	<i>M-26</i>	6-139	240	Suécia	<i>BGM 100</i>	5-100	105
	<i>PM-1</i>	15-25	230	Reino Unido	<i>M Mk 2</i>	9-36	462
	<i>PM-2</i>	45-290	245		<i>Sea Urban</i>	5-200	600
Minas remotamente controladas					<i>Stonefish</i>	10-200	500
Dinamarca	<i>MTP 19</i>	3-20	300	Itália	<i>Manta</i>	2,5-100	150-180
Russia	<i>KRM</i>	40-100	300		<i>MN 102</i>	5-300	630
	<i>MDS</i>	4-150	480		<i>MR-80</i>	5-300	380-865
	<i>SMDM-1 and 2</i>	4-150	480 and 800		<i>MRP</i>	6-300	620

Figura 37 - Tipos de minas submarinas adotadas por alguns países.  
Fonte: Adaptado de Szturomski [2].

## 5.2. Apresentação dos Resultados

Foram simulados os eventos explosivos contendo a variação do peso da carga detonada de PETN-5 e então obtidas as respostas da estrutura do catamarã modelado.

Conforme já citado, a foram selecionados pontos na parte superior e inferior do catamarã, como forma de verificar a variação das respostas ao longo da estrutura, em pontos onde poderão ser instalados equipamentos vitais da embarcação.

A seguir são apresentados os gráficos das respostas na parte superior e inferior do convés principal, para os três cenários já citados (variando-se o Fator de Choque de Casco

através do peso de explosivo empregado). A curva superior do gráfico (em verde) apresenta o valor máximo da resposta da estrutura para a variável em questão e a curva inferior (em azul) apresenta o valor mínimo.

### 5.2.1. Resposta em termos de deslocamento total

As Figuras 38 a 40 apresentam as deformações na estrutura acima do convés principal do catamarã, para as cargas explosivas de 88 quilogramas, 600 quilogramas e 1.850 quilogramas.

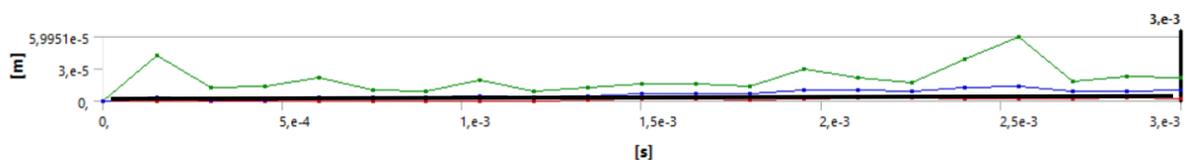


Figura 38 – Deformação total da estrutura superior para a carga explosiva de 88 kg.

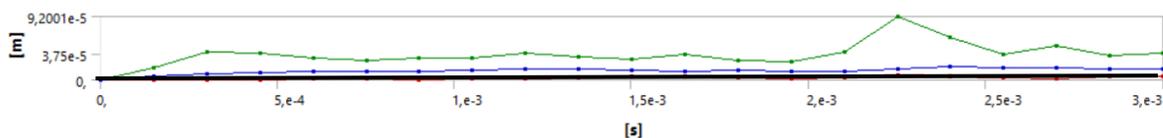


Figura 39 – Deformação total da estrutura superior para a carga explosiva de 600 kg.

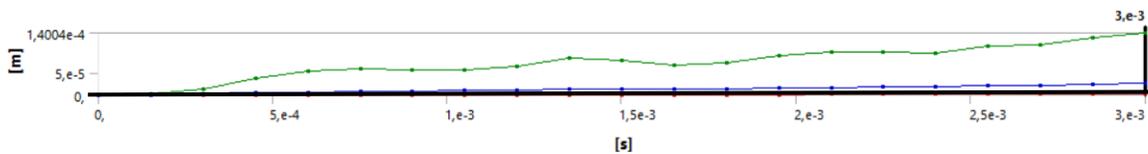
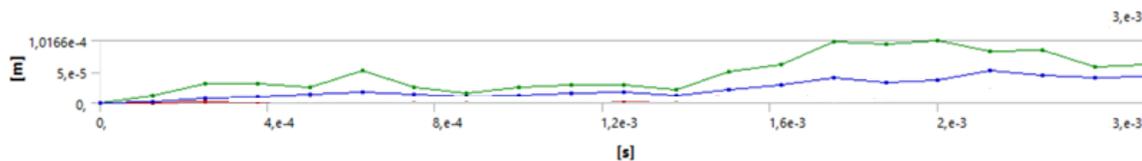
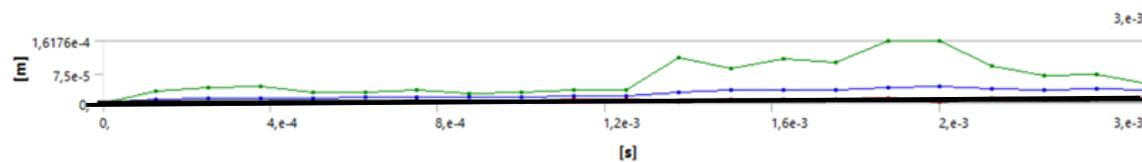


Figura 40 – Deformação total da estrutura superior para a carga explosiva de 1.850 kg.

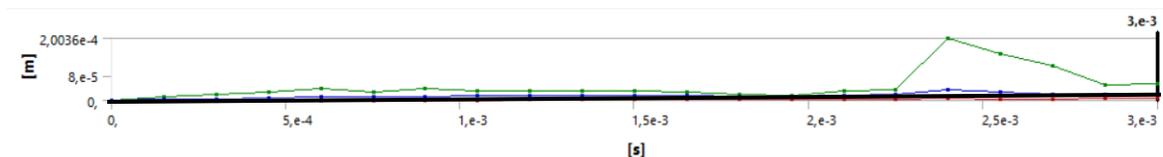
As Figuras 41 a 43 apresentam as deformações na estrutura abaixo do convés principal do catamarã, para as cargas explosivas de 88 quilogramas, 600 quilogramas e 1.850 quilogramas.



**Figura 41** – Deformação total da estrutura inferior para a carga explosiva de 88 kg.



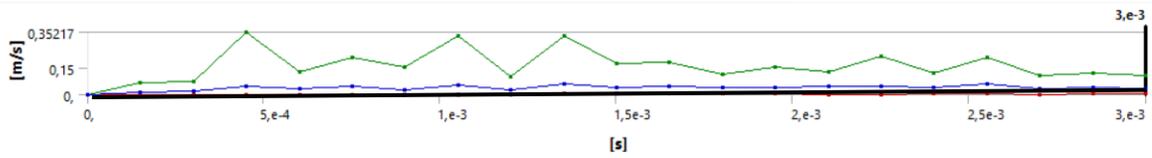
**Figura 42** – Deformação total da estrutura inferior para a carga explosiva de 600 kg.



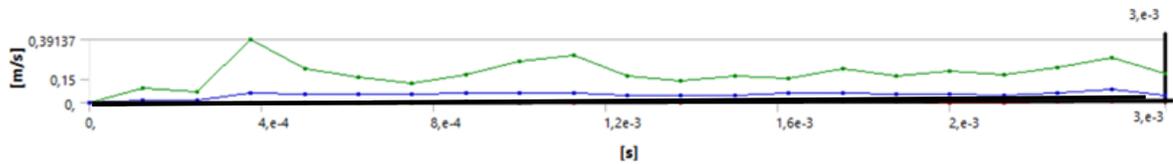
**Figura 43** – Deformação total da estrutura inferior para a carga explosiva de 1.850 kg.

### 5.2.2. Resposta em termos de velocidade total

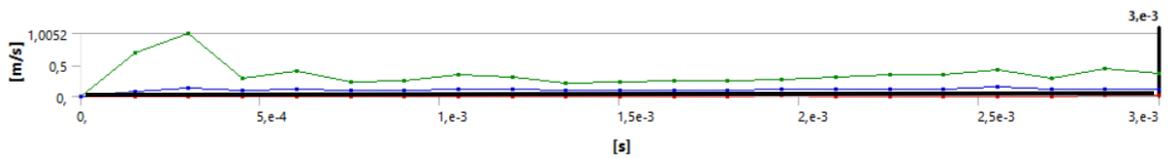
As Figuras 44 a 46 apresentam as velocidades na estrutura acima do convés principal do catamarã, para as cargas explosivas de 88 quilogramas, 600 quilogramas e 1.850 quilogramas.



**Figura 44** – Velocidade total da estrutura superior para a carga explosiva de 88 kg.

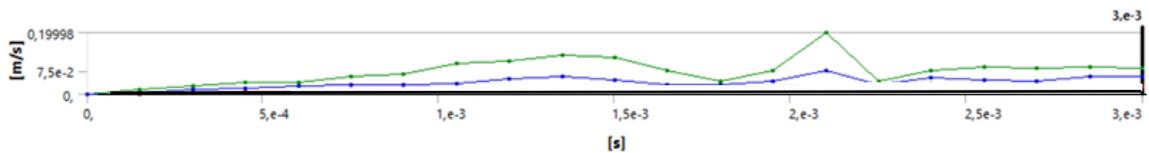


**Figura 45** – Velocidade total da estrutura superior para a carga explosiva de 600 kg.

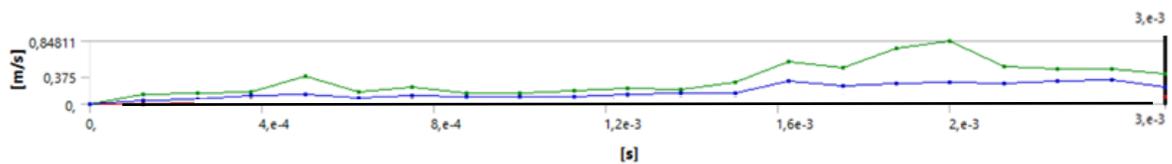


**Figura 46** – Velocidade total da estrutura superior para a carga explosiva de 1.850 kg.

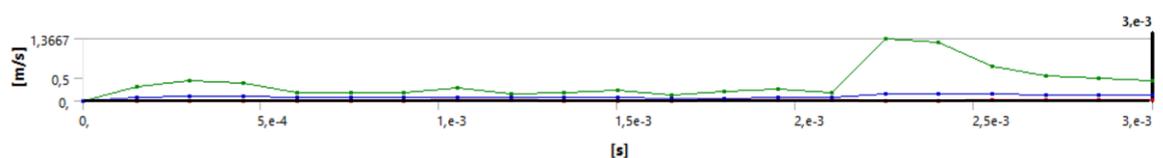
As Figuras 47 a 49 apresentam as velocidades na estrutura abaixo do convés principal do catamarã, para as cargas explosivas de 88 quilogramas, 600 quilogramas e 1.850 quilogramas.



**Figura 47** – Velocidade total da estrutura inferior para a carga explosiva de 88 kg.



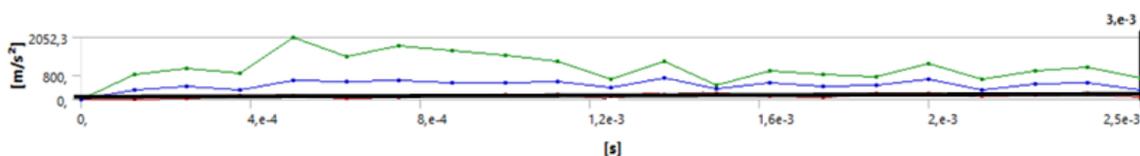
**Figura 48** – Velocidade total da estrutura inferior para a carga explosiva de 600 kg.



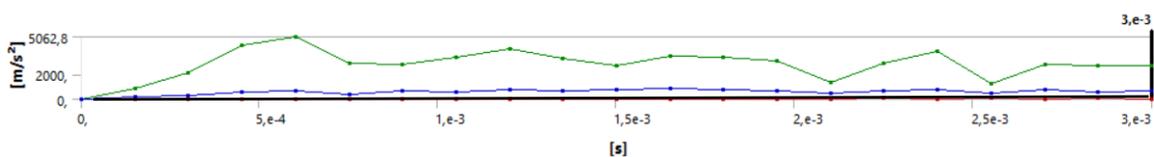
**Figura 49** – Velocidade total da estrutura inferior para a carga explosiva de 1.850 kg.

### 5.2.3. Resposta em termos de aceleração total

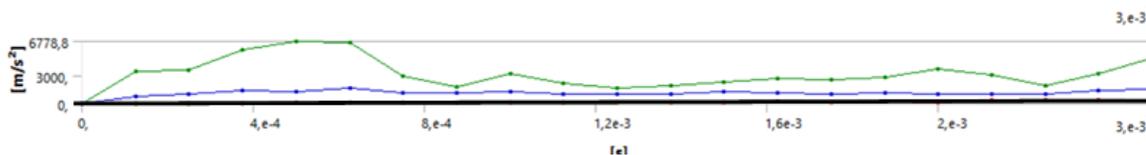
As Figuras 50 a 52 apresentam as acelerações na estrutura acima do convés principal do catamarã, para as cargas explosivas de 88 quilogramas, 600 quilogramas e 1.850 quilogramas.



**Figura 50** – Aceleração total da estrutura superior para a carga explosiva de 88 kg.

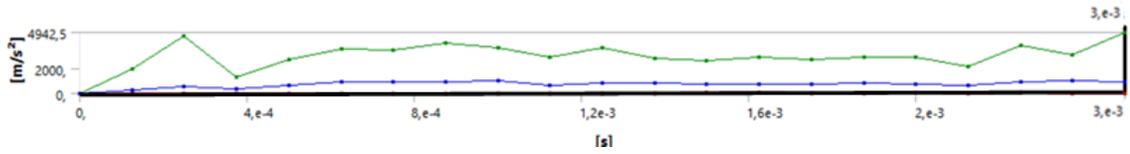


**Figura 51** – Aceleração total da estrutura superior para a carga explosiva de 600 kg.

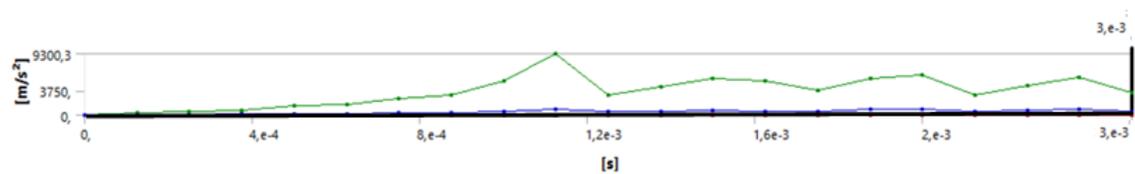


**Figura 52** – Aceleração total da estrutura superior para a carga explosiva de 1.850 kg.

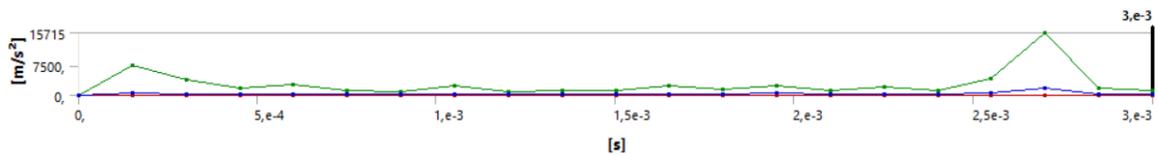
As Figuras 53 a 55 apresentam as acelerações na estrutura abaixo do convés principal do catamarã, para as cargas explosivas de 88 quilogramas, 600 quilogramas e 1.850 quilogramas.



**Figura 53** – Aceleração total da estrutura inferior para a carga explosiva de 88 kg.



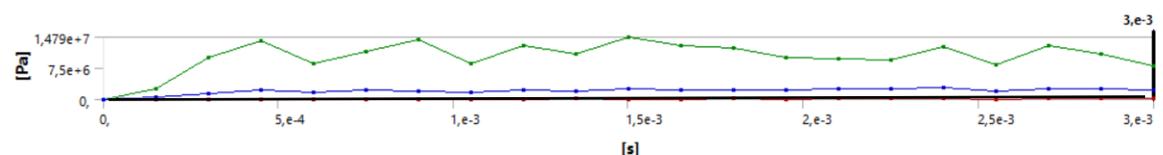
**Figura 54** – Aceleração total da estrutura inferior para a carga explosiva de 600 kg.



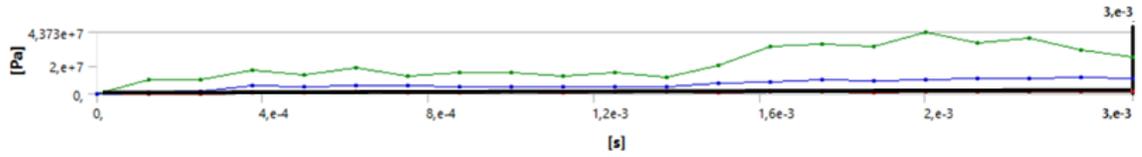
**Figura 55** – Aceleração total da estrutura inferior para a carga explosiva de 1.850 kg.

#### 5.2.4. Resposta em termos de tensão máxima segundo von Mises

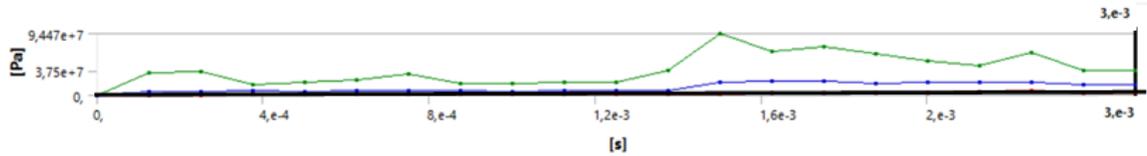
As Figuras 56 a 57 apresentam as tensões máximas segundo von Mises na estrutura acima do convés principal do catamarã, para as cargas explosivas de 88 quilogramas, 600 quilogramas e 1.850 quilogramas.



**Figura 56** – Tensão máxima da estrutura superior para a carga explosiva de 88 kg.

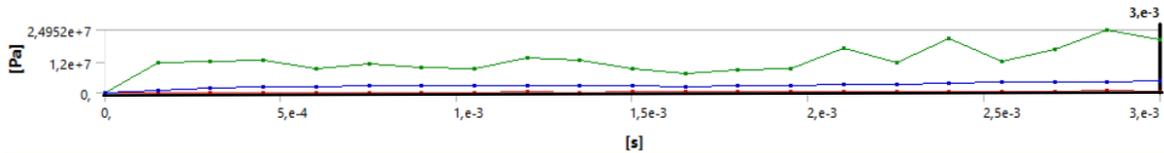


**Figura 57** – Tensão máxima da estrutura superior para a carga explosiva de 600 kg.

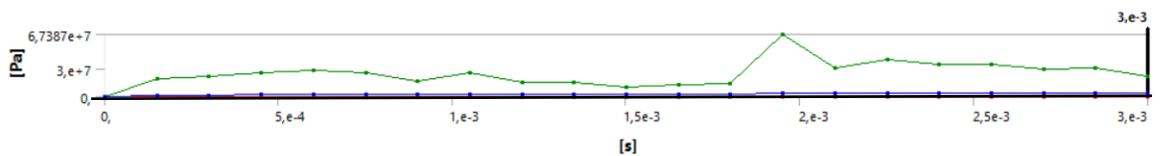


**Figura 58** – Tensão máxima da estrutura superior para a carga explosiva de 1.850 kg.

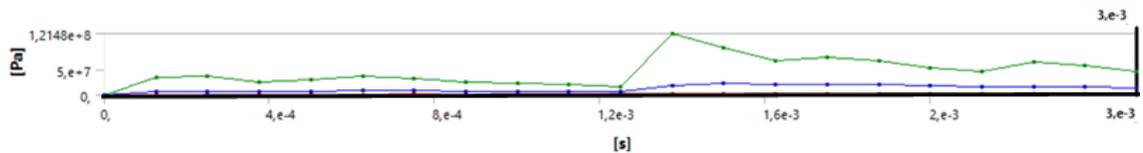
As Figuras 59 a 61 apresentam as tensões máximas segundo von Mises na estrutura abaixo do convés principal do catamarã, para as cargas explosivas de 88 quilogramas, 600 quilogramas e 1.850 quilogramas.



**Figura 59** – Tensão máxima da estrutura inferior para a carga explosiva de 88 kg.



**Figura 60** – Tensão máxima da estrutura inferior para a carga explosiva de 600 kg.



**Figura 61** – Tensão máxima da estrutura inferior para a carga explosiva de 1.850 kg.

### 5.3. Análise Comparativa dos Resultados

Para a análise comparativa das respostas, registradas nas Tabelas 5.1 e 5.2, cabe destacar que são as máximas, desde o instante inicial até o término do evento simulado (3 milissegundos), uma vez que o objetivo é o de aumentar a resistência ao choque da estrutura e dos equipamentos instalados a bordo.

Outro ponto importante é que a comparação de parâmetros da resposta da estrutura do catamarã é obtida com a variação do Alcance Escalar (ou Fator de Choque de Casco), considerando os 3 cenários das cargas explosivas de PETN 1.5. Neste quesito, cabe salientarmos novamente que a profundidade da carga foi considerada invariável (24 metros) e também com ângulo  $\phi$  de  $90^\circ$  (carga explosiva posicionada exatamente embaixo do casco).

**Tabela 5.1** – Resposta da estrutura acima do convés principal.

Z (Kg <sup>1/3</sup> /m) / Característica	0,185 (Kg <sup>1/3</sup> /m) – 88 Kg de PETN 1.5	0,351 (Kg <sup>1/3</sup> /m) - 600 Kg de PETN 1.5	0,511 (Kg <sup>1/3</sup> /m) - 1.850 Kg de PETN 1.5
Deslocamento Total Máximo (m)	0,59 x 10 <sup>-4</sup>	0,92 x 10 <sup>-4</sup>	1,4 x 10 <sup>-4</sup>
Velocidade Total Máxima (m/s)	0,35	0,39	1,0
Aceleração Total Máxima (m/s <sup>2</sup> )	2.052,3	5.062	6.778,8
Máxima Tensão Equivalente (MPa)	14,79	43,7	94,47

**Tabela 5.2** – Resposta da estrutura abaixo do convés principal.

Z (Kg <sup>1/3</sup> /m) / Característica	0,185 (Kg <sup>1/3</sup> /m) – 88 Kg de PETN 1.5	0,351 (Kg <sup>1/3</sup> /m) - 600 Kg de PETN 1.5	0,511 (Kg <sup>1/3</sup> /m) - 1.850 Kg de PETN 1.5
Deslocamento Total Máximo (m)	1,0 x 10 <sup>-4</sup>	1,6 x 10 <sup>-4</sup>	2,0 x 10 <sup>-4</sup>
Velocidade Total Máxima (m/s)	0,2	0,84	1,36
Aceleração Total Máxima (m/s <sup>2</sup> )	4.942,5	9.300,0	15.715,0
Máxima Tensão Equivalente (MPa)	24,9	67,3	121,4

Nas Tabelas 5.1 e 5.2 podemos verificar que, conforme era esperado, com o aumento do peso da carga explosiva adotada, aumenta-se também a característica da resposta (e o nível de dano!) da estrutura impactada. O importante a ser destacado é que o projetista deve analisar os dados da resposta em todo o instante de tempo da duração do evento explosivo, para que não incorra no erro de verificar somente a média de determinada característica. Neste caso, convém salientar que se considere os picos dos valores destes parâmetros em determinados instantes de tempo, o que é muito mais severo para determinado componente estrutural ou equipamento vital a ser analisado.

Adicionalmente, foi constatado que as respostas, principalmente em termos de acelerações e tensões máximas, são amplificadas nos pontos abaixo do convés principal (Tabela 5.2), devido ao maior impacto da onda de pressão e de choque ocorrer na área do casco em contato com a água. Além deste fator, há também a dissipação da onda de choque dos conveses inferiores até os conveses superiores da estrutura da embarcação, conforme apresentado em Szturomski [2], e em ANG e HAN [43].

# Capítulo 6

## Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

### 6.1. Conclusão

Embora este trabalho tenha necessitado adotar várias simplificações para que seja executada a simulação da resposta da estrutura naval sujeita a uma carga explosiva, foi possível a total obtenção destes parâmetros em termos de deslocamento, velocidade e aceleração, além do campo de tensões gerado.

Também é possível acompanhar em tempo real a variação da energia do sistema simulado, mediante gráficos que o próprio *solver* do módulo de Dinâmica Explícita do Ansys® vai fornecendo ao longo do processo de solução. No Apêndice A são apresentadas as Figuras 78 e 79, onde se pode verificar que a resposta da estrutura naval se inicia logo após a detonação da carga explosiva, anterior a 0,5 ms. Também é possível verificar a pequena variação de Energia de Erro e de Energia de Hourglass do modelo simulado, contribuindo para a confiabilidade dos resultados obtidos.

Mediante a análise dos dados obtidos para os 3 cenários considerados, é importante que o projetista deva analisar os dados da resposta em todo o instante de tempo da

duração do evento explosivo, para que não incorra no erro de verificar somente a média de determinada característica de interesse ou no instante de tempo final do evento.

Para o padrão de malha adotado neste trabalho (composta de 320.997 elementos e 86.098 nós), o tempo médio de simulação foi de 11 horas.

Com este trabalho, fica evidente que, utilizando-se as modernas ferramentas computacionais disponíveis, pode-se obter, em diferentes cenários, de maneira relativamente rápida e a um custo aceitável, a resposta dinâmica da estrutura naval considerada.

## 6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Conforme mencionado neste trabalho, algumas simplificações foram necessárias para a obtenção dos resultados neste momento. Assim sendo, melhorias podem ser futuramente executadas como forma de aumentar a robustez e eficiência da resposta da embarcação aos eventos explosivos a ela impostos.

A seguir são elencados os principais tópicos de sugestões para trabalhos futuros, dando seguimento a este estudo:

- Validação dos resultados apresentados neste trabalho, seja por meio de um ensaio com modelo em real ou escala reduzida;
- Adoção de um algoritmo ou *solver* externo que tenha abrangência nos fenômenos de cavitação no casco;
- Adição dos principais equipamentos de bordo, comparando-se os resultados obtidos mediante esta condição;
- Utilização do método da co-simulação para que seja atualizada a condição de calado do casco durante o evento explosivo, superando a condição estática utilizada neste trabalho;
- Simulação compreendendo um tempo final maior (até 300 milissegundos, por exemplo), avaliando se há alterações significativas nos resultados;
- Aplicação de multicritérios de falha no modelo naval utilizado, obtendo assim todos os modos de falha da estrutura a ser analisada;

- Variação do ângulo  $\phi$  da carga explosiva em relação ao casco da embarcação, verificando o impacto na resposta da estrutura naval considerada;
- Inserção no modelo tridimensional de sistemas vitais na embarcação, com seus equipamentos e redes/dutos, com o intuito de verificação da resistência ao choque dos mesmos;
- Emprego de outros métodos na malha gerada citados neste estudo, como por exemplo a metodologia SPH e ALE para o modelo fluido, confrontando a possível alteração na resposta da estrutura naval considerada e o custo computacional necessário; e
- Mediante a evolução do módulo de Dinâmica Explícita do Ansys®, quanto ao tipo de elemento da malha tridimensional, modelar e utilizar cargas explosivas com outros formatos geométricos, avaliando a interferência ou não nos resultados obtidos.

## Referências Bibliográficas:

- [1] Keil, A. H., "*The Response of Ships to Underwater Explosions*", Structural Mechanics Laboratory Research and Development Report, Virginia, USA, 1961.
- [2] Szturomski, B., "*The Effect of an Underwater Explosion on a ship*". Scientific Journal of Polish Naval Academy, pp. 57-73, 2015.
- [3] Cole, R. H., "*Underwater Explosions*", Princeton University Press, Princeton, USA, 1948.
- [4] Costanzo, F., "*Underwater Explosion Phenomena and Shock Physics.*" Structural Dynamics, Vol.3, pp. 917–938. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Ed. Springer, New York, NY, USA, 2011.
- [5] American Bureau of Shipping. "*Guide for Building and Classing International Naval Ships*". Spring -Texas, USA, 2022.
- [6] Chung, J. e Shin, Y. "*Simulation of dynamic behaviour of high-speed catamaran craft subjected to Underwater Explosion*". Ships and Offshore Structures. Ed. Taylor and Francis. London - UK, 2013.
- [7] Tasdelen, E., "*Shock Analysis of On-board Equipment Submitted to Underwater Explosion*". Institut Catholique d'Arts et Metiers (ICAM). Nantes, France, 2018.
- [8] Karlos, V. e Solomos, G., "*Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components.*" JRC Technical Reports, Ispra – Italy, 2013.
- [9] Reid, W. D., "*The Response of Surface Ships to Underwater Explosion*". Department of Science and Technology Organization – Aeronautical and Maritime Research Laboratory. Melbourne -Victoria, Australia, 1996.

- [10] Motta, A.A. “*Otimização Expedita de Cargas Explosivas Submarinas com Vistas aos seus Efeitos Terminais em Estruturas de Aço Submersas*”. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro - RJ, Brasil, 2004.
- [11] Schneider, N. A., “*Prediction of Surface Ship Response to Severe Underwater Explosions using a Virtual Underwater Shock Environment*”. Naval Postgraduated School. Monterey - Califórnia, USA, 2003.
- [12] Marcus, M. H., “The response of a Cylindrical Shell to Bulk Cavitation Loading”. Naval Surface Weapons Center. Silverspring - Meryland, USA. 1983.
- [13] Smith, J. R., “*Effect of Fluid Mesh Truncation on the Response of a Floating Shock Platform (FSP) Subjected to an Underwater Explosion (UNDEX)*”. Naval Postgraduated School. Monterey - Califórnia, USA, 1999.
- [14] Ucar, H., “*Dynamic Response of a Catamaran Hull Ship Subjected to Underwater Explosion*”. Naval Postgraduated School. Monterey - Califórnia, USA, 2006.
- [15] Bisyk, S., Davydovskiy L, Hutov I., Slyvinskyi O., Aristarkhov O., Lilov I., “*Comparison of Numerical Methods for Modeling the Effect of Explosion on Protective Structures*”. International Scientific Journal “Trans Motauto World”. Year IV, ISSUE 1, p.p. 20-23. WEB ISSN 2534-8493. 2019.
- [16] Kok, R. E., “*Submarine Machinery Cradle: Structural Dynamic Design and Analysis Techniques using Frequency Domain Structural Synthesis*”. Naval Postgraduated School. Monterey - Califórnia, USA, 1994.
- [17] Brenner, M. “*Navy Ship Underwater Shock Prediction and Testing Capability Study*”. JASON – The MITRE Corporation. Monterey–McLean - Virginia, USA, 2007.
- [18] Schneider, N. A., Shin, Y., “*Ship shock trial modeling and simulation of USS Winston S. Churchill (DDG 81)*”. Naval Postgraduated School. Monterey - Califórnia, USA, 2003.

- [19] Balakrishnan, K., Sharma, A., Ali, R., “*Comparison of Explicit and Implicit Finite Element Methods and its Effectiveness for Drop Test of Electronic Control Unit*”. 11<sup>th</sup> International Symposium on Plasticity and Impact Mechanics. doi: 10.1016/j.proeng.2016.12.042, Procedia Engineering 173, p.p. 424 – 431, 2017.
- [20] Yang, B., “*Comparisons of Implicit and Explicit Time Integration Methods in Finite Element Analysis for Linear Elastic Materials and Quasi-Brittle Material in Dynamic Problems*”. Delft University of Technology. Delft, Netherlands, 2019.
- [21] ANSYS, “*ANSYS Explicit Dynamic Analysis Guide*”. Release 2019 R2. ANSYS Inc. Canonsburg - Pennsylvania, USA, 2019.
- [22] Pett, A., “*Introduction to Explicit Dynamics using ANSYS Workbench*”. ANSYS Inc., 2011.
- [23] Bradbeer, N. I. C., “*Implications for Underwater Shock Response of Adopting Simplified Structural Styles in Warships*”. University College of London. London - UK, 2013.
- [24] Sánchez, C. A. A., “*Estudo de Impacto usando Elementos Finitos e Análise Não-Linear*”. Universidade de São Carlos, São Carlos – SP – Brasil, 2001.
- [25] LS-DYNA, “*LS-DYNA – Theory Manual*”. Livermore Software Technology Corporation (LSTC). Livermore - Califórnia, USA, 2019.
- [26] Shadloo, M. S., Oger, G., Touzé, D. L., “*Smoothed Particle Hydrodynamics Method for Fluid Flows, Towards Industrial Applications: Motivations, Current State, and Challenges*”. Computers and Fluids 136. p.p. 11–34. Elsevier, 2016.
- [27] AUTODYN, “*AUTODYN – Explicit Software for Nonlinear Dynamics – Theory Manual*”. Century Dynamics, 2005.
- [28] Donea, J., Huerta, A., Ponthot, J. -Ph., Rodríguez-Ferran, A., “*Arbitrary Lagrangean-Eulerian Methods*”. The Encyclopedia of Computational Mechanics, Wiley. Vol. 1, Chapter 14, pp. 413-437, 2004.

- [29] Messahel, R., “*ALE and SPH Formulations for Fluid Structure Interaction: Shock Waves Impact*”. Université de Lille. Lille, France, 2016.
- [30] Nastasescu. V., Marzavam, S., “*Numerical Simulation of an Underwater Explosion by SPH Method*”. Applied Mechanics, Vol. 61, N° 1, p.p. 89–107 , Bucharest. 2016.
- [31] Felippa, C. A., Deruntz, J. A., “*Finite Element Analysis of Shock-Induced Hull Cavitation*”. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 44, pp. 297-337. North Holland, 1984.
- [32] Lu, Z., Brown, A., “*Application of the Spectral Element Method in a Surface Ship Far-Field UNDEX Problem*”. Shock and Vibration, Volume 2019, 16 pág. 2019.
- [33] Lu, Z., “*Computationally-Effective Modeling of Far-Field Underwater Explosion for Early Stage Surface Ship Design*”. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg – Virginia, USA. 2020.
- [34] Corbell, R. D., “*Shock Qualification of Combat Systems Equipment using Tuned Mounting Fixtures on the US Navy Mediumweight Shock Machine*”. Naval Postgraduated School. Monterey - California, USA, 1992.
- [35] Cook, R. E., “*Submarine Machinery Cradle: Structural Dynamic Design and Analysis Techniques using Frequency Domain Structural Synthesis*”. Naval Postgraduated School. Monterey - California, USA, 1994.
- [36] Wood, S. L., “*Cavitation Effects on a Ship-Like Box Structure Subjected to an Underwater Explosion*”. Naval Postgraduated School. Monterey - California, USA, 1998.
- [37] Petrusa, D. C., “*Evaluation on Analysis of DDG-81 Simulated Athwartship Shock Response*”. Naval Postgraduated School. Monterey - California, USA, 2004.
- [38] Didoszak, J. M., “*Parametric Studies of DDG-81 Ship Shock Trials Simulations*”. Naval Postgraduated School. Monterey - California, USA, 2004.

- [39] Sone Oo, Y. P. S. O., “*Development of Analytical Formulae to Determinate the Dynamic Response of Composite Plates Subjected to Underwater Explosions*”. École Central de Nantes. Nantes, FRA, 2020.
- [40] ANSYS, “*Lecture 7: Mesh Quality & Advanced Topics*”. Release 15. ANSYS Inc. Local não disponível, 2015.
- [41] Zhang, Z.F., Wang, G., Wang, L.K., Zhang, A.M., Silberschmidt, V.V., “*Underwater explosion of cylindrical charge near plates: Analysis of pressure characteristics and cavitation effects*”. Loughborough's Research Repository. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.06.009> Acesso em 20 de Dezembro de 2022.
- [42] Jacob, N., Nurick, G. N., Langdon, G.S., “*The effect of stand-off distance on the failure of fully clamped circular mild steel plates subjected to blast loads*”. Blast Impact and Survivability Research Unit (BISRU), Department of Mechanical Engineering, University of Cape Town, Rondebosch, South Africa, Ano não disponível.
- [43] ANG B. H., HAN M. J., “*Managing Shock Requirements of Shipboard Equipment*”. DSTA HORIZONS, 2013. Disponível em <https://www.semanticscholar.org/paper/MANAGING-SHOCK-REQUIREMENTS-OF-SHIPBOARD-EQUIPMENT-Hwee-Jeremy/af53120d389f537ed7ce9f273aaa33d822b9959f>. Acesso em 20 de Maio de 2023.

## APÊNDICE A: Gráficos do Balanço de Energia

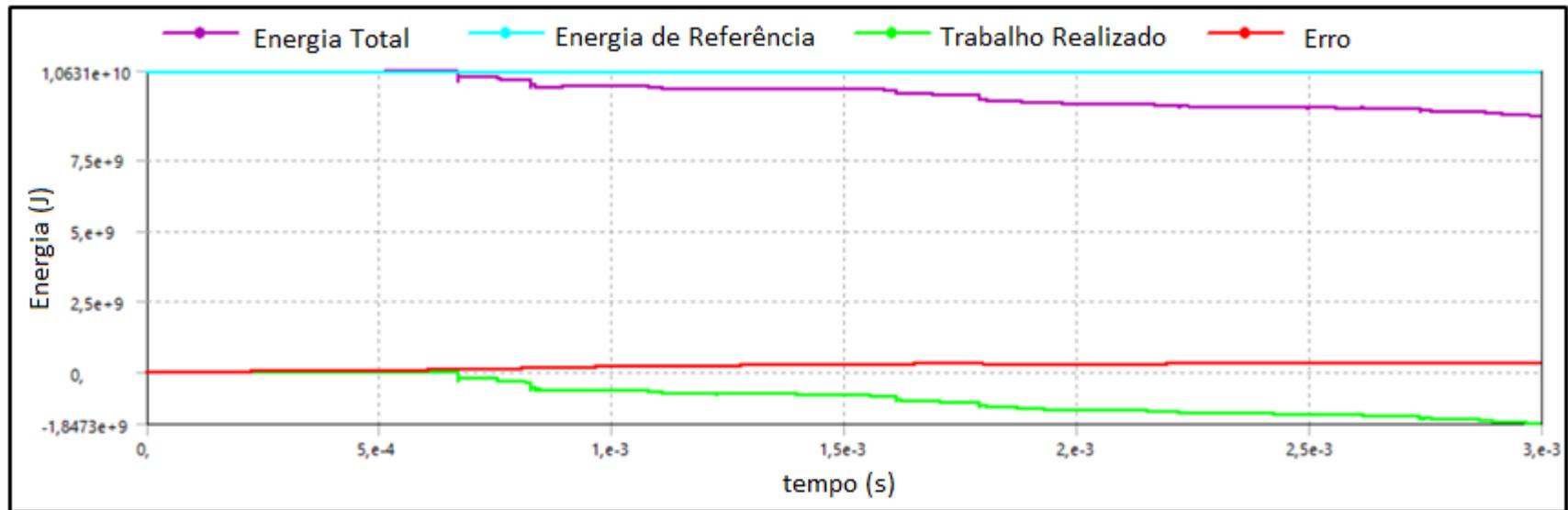


Figura 62 – Gráfico 1 do balanço de energia do evento de explosão submarina simulado.

APÊNDICE A: Gráficos do Balanço de Energia

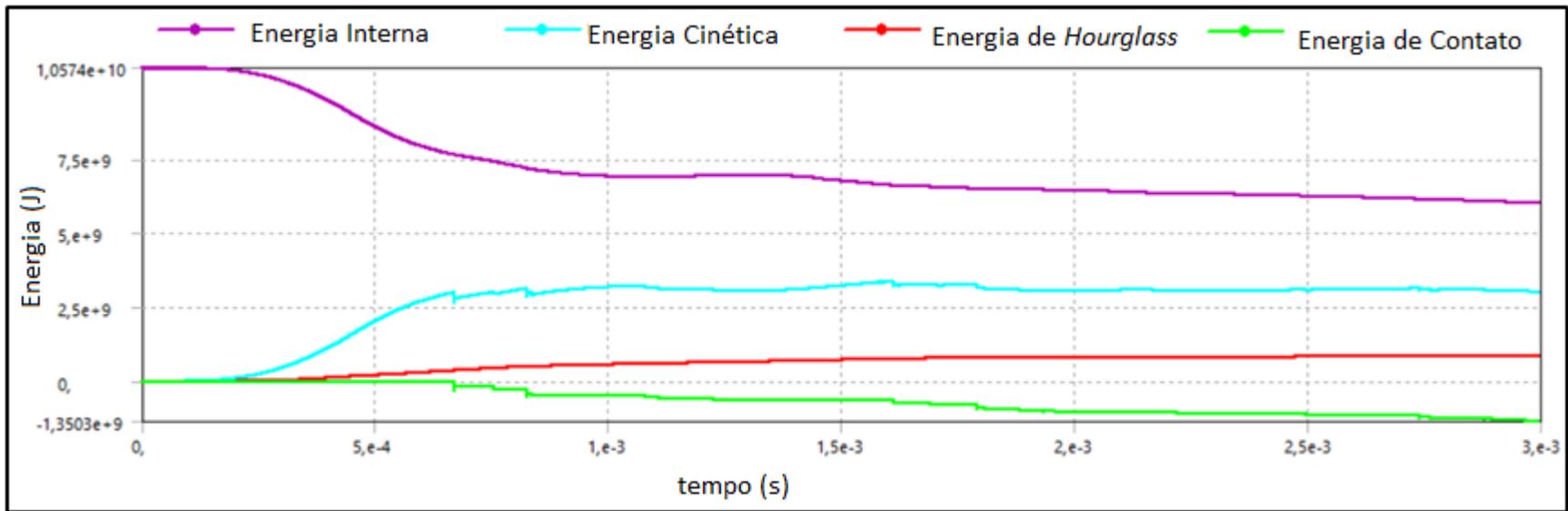


Figura 63 – Gráfico 2 do balanço de energia do evento de explosão submarina simulado.