



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL**

**ANÁLISE DE ESFORÇOS RESULTANTES DE IMPACTOS ENTRE BARCAÇAS DE
COMBOIOS FLUVIAIS PARA MODELAGEM DE UM SISTEMA DE
AMORTECIMENTO DE CHOQUES UTILIZANDO TEORIA DE ANÁLISE MULTI-
CORPOS**

FERNANDO COSTA DA CRUZ

**Belém-PA
Março/2018**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL**

**ANÁLISE DE ESFORÇOS RESULTANTES DE IMPACTOS ENTRE BARCAÇAS DE
COMBOIOS FLUVIAIS PARA MODELAGEM DE UM SISTEMA DE
AMORTECIMENTO DE CHOQUES UTILIZANDO TEORIA DE ANÁLISE MULTI-
CORPOS**

FERNANDO COSTA DA CRUZ

Dissertação de Mestrado Submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal do Pará como requisito final para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Naval.

Área de Concentração: Tecnologia Naval
Orientador: Dr. Newton Sure Soeiro

**Belém-PA
Março/2018**

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C955a Cruz, Fernando Costa da
ANÁLISE DE ESFORÇOS RESULTANTES DE IMPACTOS ENTRE BARCAÇAS DE COMBOIOS
FLUVIAIS PARA MODELAGEM DE UM SISTEMA DE AMORTECIMENTO DE CHOQUES
UTILIZANDO TEORIA DE ANÁLISE MULTI-CORPOS / Fernando Costa da Cruz. - 2018.
154 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Naval (PPGENAV), Instituto de
Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Newton Sure Soeiro
Coorientação: Prof. Dr. Hito Braga de Moraes.
1. Barcaças. 2. Transporte. 3. Ondas. 4. Tensões. 5. Comboio. I. Soeiro, Newton Sure. *orient.* II. Título

CDD 623.87

FERNANDO COSTA DA CRUZ

ANÁLISE DE ESFORÇOS RESULTANTES DE IMPACTOS ENTRE BARCAÇAS DE
COMBOIOS FLUVIAIS PARA MODELAGEM DE UM SISTEMA DE
AMORTECIMENTO DE CHOQUES UTILIZANDO TEORIA DE ANÁLISE MULTI-
CORPOS

Dissertação de Mestrado Submetida ao Corpo Docente do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval da
Universidade Federal do Pará Como Requisito Final Para
Obtenção do Título de Mestre em Engenharia Naval.

Belém-PA, 09 de Março de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Newton Sure Soeiro

Co-orientador: Prof. Dr. Hito Braga de Moraes

Membro: Prof. Dr. Mounsif Said

Membro Externo: Prof. Dr. Gustavo da Silva Vieira de Melo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus amados pais, Miguel Miranda e Maria Auxiliadora, aos meus Mestres Docentes, aos meus irmãos e a todos os meus amigos

AGRADECIMENTOS

Agradeço à instituição UFPA – Universidade Federal do Pará, a todo seu corpo docente, direção e administração, por proporcionar ensino de excelência na área de Engenharia Naval.

À Instituição CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela disponibilização de uma bolsa de mestrado para auxílio financeiro e suporte material no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador, o Professor Dr. Newton Sure Soeiro, por ter aceitado o desafio de direcionar essa dissertação, por todo o esforço, competência e pela dedicação na elaboração deste trabalho.

Agradeço ao meu Co-orientador, o Professor Dr. Hito Braga de Moraes, pelos momentos de incentivo, pela confiança depositada, pelo profissionalismo e pela atenção aplicada no desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço ao Professor Dr. Nélio Moura de Figueiredo, pelos conselhos sobre a complexa área de desenvolvimento de trabalhos na área acadêmica e pelos momentos de grande força e incentivo.

Agradeço ao membro componente da banca examinadora, o Professor Dr. Mounsif Said, pelos conselhos passados na área de elementos finitos e por seu apoio nas proposições de simplificações para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao membro externo ao programa de pós-graduação em engenharia naval, professor Dr. Gustavo da Silva Vieira de Melo, por ter aceito participar da banca oficial examinadora desta dissertação.

Agradeço ao Professor Especialista Roberto Serra Pacha, pela oportunidade concedida para ministrar aulas na disciplina de Economia Aplicada no curso de Engenharia Ferroviária e Logística.

Ao excelente corpo docente da Faculdade de Engenharia Naval da UFPA. Agradeço aos Professores André Vinicius, Emanuel Loureiro, Pedro Lameira e Yuri Guedes pelos conhecimentos passados durante anos com empenho e qualidade.

Aos meus irmãos, Filipe e Flávia Costa da Cruz, pelo companheirismo, compreensão nos momentos difíceis e pela motivação.

Ao meu pai, Miguel Evangelista Miranda da Cruz e a minha Mãe, Maria Auxiliadora Costa da Cruz, pelo amor incondicional em diversos momentos de dificuldade. Por terem me dado a oportunidade de progredir como ser humano e pelos valores passados com sacrifício e trabalho duro.

Aos meus companheiros de graduação e de profissão que me acompanharam nesta jornada de pós-graduação, em especial a Amanda Ferreira, Breno Silva, Caio Benjamin, Gelson Neto, Harlysson Wheiny, Lucca Miranda e Vitor Cardoso. Agradeço a todos pelos momentos de descontração.

Agradeço a Taiane Santana pelo apoio com o trabalho no software *ANSYS AQWA* delineando os principais aspectos e as principais ferramentas do programa. Agradeço a Samuel Johnson pelo apoio junto ao trabalho apresentado no 10º Seminário Internacional de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior da Sociedade Brasileira de Engenharia Naval.

Agradeço em especial a todos os valiosos amigos que fiz no curso de Pós-graduação em Engenharia Naval da UFPA, em especial a Ana Farias, Marilene Portilho, Nilson Nahum, e a meu amigo de infância, Matheus Mattos. Agradeço a todos pelo apoio, força e auxílio depositados no ano de desenvolvimento de minha dissertação. Agradeço a todos os não citados que fazem parte da turma de mestrado de 2017 do programa de pós-graduação em engenharia naval, pelo excelente clima de convivência.

A todos os meus companheiros de pós-graduação que me acompanharam nestes dois anos de estudos e de trabalho duro: Priscila Palitot, Felipe Gunnar, Munik Holanda, Carlos Augusto, Marcelo Bastos e Marina de Sousa, agradeço a todos pelos momentos de divertimento e de descontração.

Finalmente, agradeço a Deus por todos os dons e virtudes, pela saúde plena e, principalmente, por todo amor que recebi e ainda recebo em minha vida.

RESUMO

Nesta dissertação é realizada uma análise sobre o comportamento operacional de comboios de barcaças fluviais em regiões de navegação com presença de ondas, ventos e correntezas. É desenvolvido um estudo com o intuito de determinar os esforços solicitantes presentes nos elementos de amarração e nos pontos de contato entre barcaças de comboios quando estes navegam em condições perigosas de navegação. Um estudo teórico é realizado, identificando os principais movimentos de resposta de corpos flutuantes. Nesse caso, é desenvolvido um modelo utilizando o software *ANSYS AQWA 17* para identificação dos níveis de esforços provindos de impactos entre barcaças que compõem as formações, bem como o grau e comportamento dos esforços de tração presentes nos cabos de amarração ao longo do tempo. Ademais, é utilizado um estudo prático como modelo comparativo de dados, sendo muito importante para a validação dos resultados alcançados pelo modelo computacional. Desta forma, o cenário proposto dentro do programa computacional descreve características ambientais para descrever o problema de navegação de maneira clara. Ao término deste trabalho os níveis dos esforços captados dentro do modelo computacional são apresentados, sendo divididos em dois modelos de comboios fluviais, um comboio com barcaças para transporte de soja e outro com barcaças para transporte de minério de ferro, sendo discriminados os locais das solicitações mais elevadas. Destaca-se ainda o papel desbravador deste trabalho, no que concerne aos problemas percebidos dentro da área de segurança operacional de comboios fluviais, utilizando para isso ferramentas de Elementos Finitos como ferramenta principal de avaliação.

. Palavras-chave: Barcaças; Transporte; Ondas; Tensões; Comboio; Segurança.

ABSTRACT

In this dissertation an analysis is performed on the operational behavior of river barges convoys in navigation regions with presence of waves, winds and currents. A study is carried out to determine the applicant forces present in the mooring elements and in the contact points between barges in flotillas when they are sailing in dangerous navigation conditions. A theoretical study is carried out, identifying the main response movements of floating bodies. In this case, a model is developed using the ANSYS AQWA 17 software to identify the stress levels from impacts between barges that make up the formations, as well as the degree and behavior of the tensile stresses present in the mooring ropes over time. In addition, a practical study is used as a comparative model of data, being very important for the validation of the results achieved by the computational model. In this way, the proposed scenario within the computational program describes environmental characteristics to describe the navigation problem in a clear way. At the end of this work the levels of effort captured within the computational model are presented, being divided into two models of fluvial flotillas, a convoy with barges for soybean transportation, and another with barges for the transport of iron ore, being discriminated the locations of the higher levels of effort. It is important to note the pioneering role of this work in relation to the problems perceived within the area of operational safety of fluvial flotillas, using Finite Element tools as the main evaluation tool.

Keywords: Barges; Transport; Waves; Stresses; Flotillas; safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Exemplo de comboio de barcaças fluviais.	16
Figura 1.2 – Modelo típico de comboio em formação (3x5) navegando.	20
Figura 1.3 – Ilustração de elementos de atracação por cabos de aço.	20
Figura 1.4 – Visualização do costado próximo a proa da barcaça, em destaque as marcas de calado e os cabeços em segundo plano. Fonte: O Autor.	21
Figura 1.5 – Avarias na região do trincaniz com ondulações.	22
Figura 1.6 – Região de proa de uma barcaça com proa Raked.	22
Figura 1.7 – Região do costado onde é possível verificar uma zona de impacto no sentido longitudinal. Fonte: O Autor.	23
Figura 1.8 – Região do espelho de popa da barcaça, atentando para o formato de popa Box da barcaça. Fonte: O Autor.	23
Figura 1.9 – Fluxograma Delimitador da Subdivisão de Capítulos da Dissertação.	29
Figura 2.1 – Sistema de Coordenadas para Cálculo de Momento Fletor, força lateral e Coeficientes Hidrodinâmicos. Fonte: Eda (1972).	36
Figura 2.2 – Exemplo de formação de comboio sobre influência de um trem de onda. ..	37
Figura 2.3 – Corpos Flutuantes avançando com velocidade U em um cenário com determinada direção de incidência de onda.	39
Figura 2.4 – Delineamento do Algoritmo de Contato com base nos pontos de contorno de duas barcaças. Fonte: Luperi e Pinto (2014).	40
Figura 2.5 – Representação esquemática da carga resultante da interação de contato entre duas barcaças. Fonte: Luperi e Pinto (2014).	40
Figura 2.6 – Exemplos de mecanismos de amarração entre barcaças por cabos de aço.	41
Figura 2.7 – Modelo de Formação de Comboio de Barcaças em simulação de impacto sobre pilar de ponte. Fonte: Luperi e Pinto (2014).	41
Figura 2.8 – Representação de um elemento de defesa fixo ao corpo 1 e entrando em contato com o corpo 2, dentro da modelagem do ANSYS AQWA (2017). Fonte: ANSYS (2017).	46
Figura 2.9 – Padrão geral dos elementos – (a) elementos, (b) elementos matriciais e (c) matriz global. Fonte: Zienkiewicz, et. al (2013).	49
Figura 2.10 – Elemento de quatro nós utilizado pelo ANSYS AQWA (2017) para delimitação das superfícies de casco. Fonte: ANSYS (2017).	50

Figura 2.11 – Elemento com seção tubular representando os elementos utilizados pelo ANSYS AQWA (2017). Fonte: ANSYS (2017).	50
Figura 2.12 – Modelo de Representação do domínio fluido, de profundidade h, e do sistema de referências utilizados. Fonte: MENEZES (2013).	52
Figura 2.13 – Modelo de representação da obtenção do espectro de mar a partir das componentes harmônicas das elevações da superfície livre do estado de mar analisado. Fonte: Menezes (2013).	57
Figura 2.14 – Espectro de Pierson-Moskowitz para um mar totalmente desenvolvido com diferentes velocidades de vento. Fonte: Pinheiro (2015).	59
Figura 2.15 – Delimitação da Relação das Forças de Radiação e Flutuação com os Termos de Amortecimento e Rigidez Hidrostática, respectivamente. Fonte: Skandali (2015).	64
Figura 2.16 – Delimitação dos seis graus de liberdade de um corpo flutuante.	65
Figura 2.17 – Superfície de dois corpos flutuantes posicionados lado a lado para uma análise multi-corpos no programa WAMIT. Fonte: Menezes (2013).	70
Figura 2.18 – Modelo de representação da defesa através de associação entre um elemento de mola e um amortecedor. Fonte: Menezes (2013).	73
Figura 3.1 – Sistema de balsas de pequeno porte.	74
Figura 3.2 – Identificação do modelo tridimensional do mecanismo de acoplamento simples.	75
Figura 3.3 – Ilustração em perspectiva do sistema de acoplamento.	75
Figura 3.4 – Identificação do sistema de chapas, cabos e para-choques.	76
Figura 3.5 – Unidade de Conteção e Acumulação de alta pressão a ar. Fonte: Mooring and Anchoring Ships Vol 1, Clark et al. (2009).	77
Figura 3.6 – Unidade de contenção portuária a Vácuo de 40 toneladas.	78
Figura 4.1 – Foto do Modelo Real de Comboio de Balsas de Travessia Utilizado no Trabalho por Guha (2013). Fonte: Guha et al. (2013)	81
Figura 4.2 – Vista do Sistema de Balsas Modelado por Guha (2013) no AQWA.	81
Figura 4.3 – Ilustração dos elementos de malha da configuração de uma barçaça Raked com 900.000 elementos de casca (shell) no LS-DYNA. Fonte: Consolazio et al. (2012). ..	83
Figura 4.4 – Vista dos reforços estruturais de proa de uma barçaça tipo Raked.	84
Figura 4.5 – Discretização das zonas de contato e de corpo rígido delimitadas para as barçaças, juntamente com a formação de comboio. Fonte: Consolazio et al. (2012).	84
Figura 4.6 – Resultado da simulação de impacto de esmagamento proa-popa (sem demonstração da malha refinada). Fonte: Consolazio et al. (2012).	85

Figura 4.7 – Dispositivo de captação de esforços – Esquerda. Renderização da viga acoplada a um sensor de medição de esforços de impactos. Fonte: Consolazio et al. (2012).	85
Figura 4.8 – Elementos rígidos representativos das componentes de flutuação atuantes sobre o casco da barcaça do tipo Raked utilizada em simulação.	86
Figura 4.9 – Sistema real de representação do modelo com vários graus de liberdade do comboio.	87
Figura 5.1 – Ilustração das Dimensões dos modelos de Barcaças Box.	91
Figura 5.2 – Ilustração das Dimensões dos modelos de Barcaças Raked.	92
Figura 5.3 – Delimitação das zonas de contato entre barcaças.	92
Figura 5.4 – Fluxograma delimitador da rotina de trabalho apresentada por Haruzo Eda.	93
Figura 5.5 – Fluxograma delimitador da metodologia de estudo para análise multi-corpos, baseada na metodologia empregada por Menezes (2013). Fonte: O autor.	94
Figura 5.6 – Forma de Casco de Barcaça <i>Box</i> Modelada no Programa Rhinoceros.	95
Figura 5.7 – Forma de Casco da Barcaça <i>Raked</i> Modelada no Programa Rhinoceros. ..	95
Figura 5.8 – Forma de Casco da Barcaça de Minério de Ferro Modelada no Programa Rhinoceros.	96
Figura 5.9 – Vista em perspectiva das barcaças com os centro de gravidade em verde e o pontos de acoplamento dos cabos nos vértices pretos. Fonte: ANSYS (2017).	96
Figura 5.10 – Modelo de elementos de painéis delimitadores das superfícies dos cascos das barcaças. Fonte: ANSYS (2017).	97
Figura 5.11 – Representação de um trem de onda incidente com altura de 1,5 m, em direção de 90°. Fonte: ANSYS (2017).	98
Figura 5.12 – Representação do campo de pressão atuando sobre duas barcaças atracadas com incidência de -135°. Fonte: ANSYS (2017).	98
Figura 5.13 – Modelo de aplicação dos elementos tipo <i>fenders</i> disponíveis na biblioteca de elementos de amortecimento do AQWA. Fonte: ANSYS (2017).	99
Figura 5.14 – Indicação da matriz de inserção dos dados relativos a corrente (<i>current</i>), ao vento (<i>wind</i>) e ao espectro de onda irregular (<i>Irregular Wave</i>).	99
Figura 5.15 – Vista em Perspectiva dos Pontos da Formação de Barcaças Utilizada no Software ANSYS AQWA. Fonte: ANSYS (2017).	100
Figura 5.16 – Posição da Origem do Sistema de Barcaças Delimitado no <i>Design Modeler</i> do <i>Anslys</i>	101

Figura 5.17 – Estrutura em Árvore de subdivisão da Rotina de Trabalho Empregado pelo ANSYS AQWA nos modelos <i>Hydrodynamic Diffraction</i> e <i>Hydrodynamic Response</i>.....	101
Figura 5.18 – Identificação da Malha de Elementos de Delimitação para os Cascos das Barcaças. Fonte: ANSYS (2017).	103
Figura 5.19 – Vista de perfil Longitudinal do Campo de Pressão atuante nos Cascos das Barcaças. Fonte: ANSYS (2017).	104
Figura 5.20 – Vista em Perspectiva do modelo tridimensional de duas barcaças de minério de ferro acopladas. Fonte: ANSYS (2017).	105
Figura 5.21 – Vista do Elemento Representativo do Cabo de Amarração e do Elemento de Defesa. Fonte: ANSYS (2017).	105
Figura 5.22 – Malha de Elementos Finitos Utilizada para Representar a Superfície do Casco das Barcaças de Minério de Ferro. Fonte: ANSYS (2017).....	106
Figura 5.23 – Modelo de Resposta dos Campos de Pressão e Movimento para Direção de onda a 0°. Fonte: ANSYS (2017).....	106
Figura 5.24 – Níveis de Forças de Compressão nas Defensas Acopladas para Análise das Barcaças de Minério de Ferro. Fonte: ANSYS AQWA 2017.....	109
Figura 5.25 – Níveis virtuais de Esforços de Compressão nas Defensas Acopladas para Análise das Barcaças de Minério de Ferro. Fonte: ANSYS AQWA 2017.	110
Figura 6.1 – Curva de Reação x Deflexão de Defensas.	111
Figura 6.2 – Comportamento de histerese do material constituinte da defesa.....	112
Figura 7.1 – Coeficientes de Massa Adicional em Função da Frequência de Incidência de Ondas. Fonte: AQWA (2017).	117
Figura 7.2 – Coeficientes de Amortecimento Potencial em Função da Frequência de Incidência de Ondas. Fonte: AQWA (2017).....	118
Figura 7.3 – Operadores de Amplitude de Resposta para os Movimentos Translacionais. Direção de Onda Incidente: 0°. Fonte: ANSYS AQWA (2017).	119
Figura 7.4 – Operadores de Amplitude de Resposta para os Movimentos Rotacionais. Direção de Onda incidente: 0°. Fonte: ANSYS AQWA (2017).....	120
Figura 7.5 – Operadores de Amplitude de Resposta para os Movimentos Translacionais. Direção de Onda incidente: 30°. Fonte: ANSYS AQWA (2017).....	120
Figura 7.6 – Operadores de Amplitude de Resposta para os Movimentos Rotacionais. Direção de Onda incidente: 30°. Fonte: ANSYS AQWA (2017).....	121
Figura 7.7 – Operadores de Amplitude de Resposta para os Movimentos Translacionais. Direção de Onda incidente: 60°. Fonte: ANSYS AQWA (2017).....	121

Figura 7.8 – Operadores de Amplitude de Resposta para os Movimentos Rotacionais. Direção de Onda incidente: 60°. Fonte: ANSYS AQWA (2017).	122
Figura 7.9 – Operadores de Amplitude de Resposta para os Movimentos translacionais. Direção de Onda incidente: 90°. Fonte: ANSYS AQWA (2017).	122
Figura 7.10 – Operadores de Amplitude de Resposta para os Movimentos Rotacionais. Direção de Onda incidente: 90°. Fonte: ANSYS AQWA (2017).	123
Figura 7.11 – Padrão de Esforços na Direção Longitudinal da Defesa (<i>Timestep</i> = 0,1s; T = 1000 s). Fonte: ANSYS Hydrodynamic Response.	124
Figura 7.12 – Padrão de Esforços na Direção Transversal da Defesa (<i>Timestep</i> = 0,1s; T = 1000 s). Fonte: ANSYS Hydrodynamic Response.	124
Figura 7.13 – Padrão de Esforços na Direção Vertical da Defesa (<i>Timestep</i> = 0,1s; T = 1000 s). Fonte: ANSYS Hydrodynamic Response.	125
Figura 7.14 – Padrão de Resposta de Esforços Atuantes no Cabo 1.	126
Figura 7.15 – Padrão de Espectro de Resposta de Esforços Atuantes no Cabo 2.	126
Figura 7.16 – Modelo Computacional das Barcaças de Minério de Ferro em formação 3x2.	127
Figura 7.17 – Modelo representativo dos cabos de amarração utilizados na análise.	128
Figura 7.18 – Representação dos pontos selecionados para posicionamento dos elementos de defesa utilizados na medição dos impactos entre cascos. Fonte: ANSYS AQWA (2017).	128
Figura 7.19 – Modelo de defesa omnidirecional (formato esférico virtual) utilizado para medir os impactos entre embarcações. Fonte: ANSYS AQWA (2017).	128
Figura 7.20 – Identificação das defensas utilizadas na análise.	129
Figura 7.21 – Indicação da enumeração das barcaças. Fonte: ANSYS AQWA (2017).	129
Figura 7.22 – Indicação dos cabos de amarração alocados no comboio de barcaças de minério de ferro. Fonte: ANSYS AQWA (2017).	130
Figura 7.23 – Formação do comboio de transporte de minério de Ferro com 9 barcaças e um empurrador. Fonte: NAGADO, LUKINE e MENDONÇA (2012).	134
Figura 7.24 – Esquema do acoplamento feito pelo empurrador e pela barcaça de atracação.	134
Figura 7.25 – Vista do passadiço do empurrador com navegação em plena carga.	135
Figura 7.26 – Vista geral do comboio de 9 barcaças para transporte de minério vazias (esquerda) e totalmente carregadas (direita). Fonte: NAGADO, LUKINE e MENDONÇA (2012).	135

Figura 7.27 – Modelo de cabeços e de amarração utilizados para o estudo prático.	136
Figura 7.28 – Modelo de acelerômetro posicionado no convés da barça de nº 6 para medição dos movimentos das barças durante o teste. Fonte: NAGADO, LUKINE e MENDONÇA (2012).	136
Figura 7.29 – Modelo de célula de carga utilizada para medir os índices de tensões presentes nos cabos de amarração das barças. Fonte: NAGADO, LUKINE e MENDONÇA (2012).	137
Figura 7.30 – Amarração do comboio utilizando cabos de propileno (cor Amarela) de 4 polegadas. Fonte: NAGADO, LUKINE e MENDONÇA (2012).	137
Figura 7.31 – Visualização do aspecto de amarração das barças.....	138
Figura 7.32 – Modelo de formação de barças de soja de 60,96 m de comprimento. ..	139
Figura 7.33 – Níveis de esforços de tração medidos nos cabos de aço da formação 3x2 de barças de soja. Fonte: ANSYS AQWA (2017).	140
Figura 7.34 – Enumeração do comboio de barça de soja.....	140
Figura 7.35 – Identificação dos cabos de amarração empregados no comboio de barças de soja.	141
Figura 7.36 – Enumeração das defensas longitudinais empregadas na análise de barças de soja. Fonte: ANSYS AQWA (2017).	141
Figura 7.37 – Identificação das defensas de proa empregadas na análise das barças de soja.	142
Figura 7.38 – Identificação do número das defensas alocadas na popa das barças. ..	142
Figura 7.39 – Níveis de forças captadas pelas defensas (<i>fenders</i>) que atuam na formação de barças de soja. Fonte: ANSYS AQWA (2017).	143
Figura 7.40 – Modelo de defensas em modelo computacional formado por elementos amortecedores esféricos. Fonte: Rhinoceros 4.0.	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Faixas de variação de altura de onda máxima dentro de uma faixa efetiva de velocidades de propagação de onda. Fonte: Sogreah (2011)	60
Tabela 2-2 – Tabela de indicação dos níveis dos estados de mar, alocando a altura de onda como variável dependente de cada nível. Fonte: WMO.....	60
Tabela 5-1- Dimensões principais e porte bruto das barcaças utilizadas na análise.....	90
Tabela 5-2 – Dimensões Principais do Modelo de Barcaças de Minério de Ferro.	93
Tabela 5-3 – Posição do centro de gravidade das barcaças para a condição totalmente carregada. Fonte: ANSYS (2017).	97
Tabela 5-4 – Resultados para os coeficientes de rigidez hidrostática calculados para os movimentos no plano vertical Fonte: ANSYS (2017).	98
Tabela 5-5 – Delimitação da Posição do Centro de Gravidade das Barcaças presentes no ANSYS AQWA. Fonte: ANSYS (2017).....	102
Tabela 5-6 – Indicação dos Raios de Giração e dos Momentos de Inércia para os eixos locais de cada barcaça. Fonte: <i>Rhinoceros 4.0</i>	102
Tabela 5-7 – Momentos de Inércia Calculados com base no deslocamento carregado e nos raios de giração. Fonte: ANSYS (2017).	103
Tabela 5-8 – Indicação da Posição do Centro de Gravidade das Barcaças de Minério de Ferro. Fonte: AQWA (2017).....	107
Tabela 5-9 – Raios de Giração e Momentos de Inércia Calculados.....	107
Tabela 5-10 – Dados das Defensas Utilizados para Formação do Polinômio de resposta de Esforços. Fonte: O Autor.	108
Tabela 5-11 – Dados das Defensas Empregados na Adequação dos Coeficientes de Amortecimento aos Coeficientes Polinomiais que Regem a Função de Tração nas Defensas.	109
Tabela 6-1 – Distância de separação entre embarcações em função do deslocamento de embarcações. Fonte: PIANC (2002).	113
Tabela 6-2 – Guia referencial de cálculo de dimensões de defensas em função do deslocamento relativo e da velocidade de atracação entre embarcações. Fonte: PIANC (2002).	114
Tabela 7-1 – Componentes de Esforços nas Três Direções para as Defensas Omnidimensionais de 0,5 m de Comprimento. Fonte: ANSYS AQWA.	125
Tabela 7-2 – Forças atuantes nos cabos de amarração. Estado de Mar 90° - JONSWAP.	127

Tabela 7-3 – Níveis de esforços captados para a barcaça de Minério de Ferro 1.....	130
Tabela 7-4 – Níveis de Esforços captados para a Barcaça de Minério de Ferro 2.	130
Tabela 7-5 – Níveis de Esforços captados para a Barcaça de Minério de Ferro 3.	131
Tabela 7-6 – Níveis de Esforços captados para a Barcaça de Minério de Ferro 4.	131
Tabela 7-7 – Níveis de Esforços captados para a Barcaça de Minério de Ferro 5. ...	131
Tabela 7-8 – Níveis de Esforços captados para a Barcaça de Minério de Ferro 6.	131
Tabela 7-9 – Níveis de esforços presentes nos cabos de aço que amarram as barcaças de minério de ferro. Fonte: ANSYS AQWA (2017).	132
Tabela 7-10 – Leitura dos Esforços nas amarras dos cabos das barcaças de Bombordo do Comboio. Fonte: NAGADO, LUKINE e MENDONÇA (2012).	138

LISTA DE SÍMBOLOS

- λ_e : Comprimento de onda de encontro;
 ω_e : Frequência de Encontro;
 λ_{proj} : Projeção do Comprimento de Ondas de Encontro;
 σ : Frequência de onda;
 K : Número de onda;
 σ : Frequência de onda;
 g : Aceleração gravitacional;
 h : Profundidade da região de navegação;
 m : Massa de um amortecedor viscoelástico;
 \ddot{x} : Variável de aceleração na direção x;
 k : Elemento de Rigidez de um amortecedor viscoelástico;
 i : Parcela imaginária do número complexo equivalente a $\sqrt{-1}$;
 η : Fator de perda de amortecedores viscoelástico;
 x : Deslocamento na direção longitudinal da embarcação;
 y : Deslocamento na direção transversal da embarcação;
 z : Deslocamento na direção vertical da embarcação;
 R_e : Notação para parte real de um número complexo;
 E_A : Energia de amortecimento;
 W : Deslocamento do Navio;
 C_m : Coeficiente de massa virtual;
 C_E : Coeficiente de excentricidade;
 C_c : Coeficiente de configuração do cais;
 C_a : Coeficiente de amortecimento;
 F_s : Fator de segurança;
 V_A : Velocidade de aproximação do navio;
 $A_{K,j}$: Coeficiente de massa adicional ($k,j = 1 \dots 6$);
 $B_{K,j}$: Coeficiente de amortecimento potencial ($k,j = 1 \dots 6$);
 ∇ : Operador gradiente;
 \emptyset : Função potencial;
 V : Vetor de velocidades (m/s);
 ρ : Densidade do meio fluído (kg/m^3);

p_0 : Pressão atmosférica;
 ξ : Elevação de superfície livre;
 C : Constante da equação de Bernoulli;
 i, j : Índices de grau de liberdade dos corpos flutuantes variando de 1 à 6;
 H : Altura de onda;
 E : Energia por unidade de área harmônica;
 n : Número de componentes harmônicas;
 T_z : Período entre zeros adjacentes;
 $S(\omega)$: Função densidade espectral;
 H_s : Altura significativa de onda;
 ω : Frequência circular de onda;
 ω_p : Frequência circular de pico;
 N : Número de corpos flutuantes;
 γ : Fator de pico do espectro de mar de JONSWAP;
 $\gamma_{\text{água}}$: Densidade da água doce (1000 kg/m^3);
 L_{pp} : Comprimento entre perpendiculares;
 F : Força de excitação;
 f_j : Força de excitação no grau de liberdade j ;
 t : Variável tempo;
 ϕ_w : Potencial de onda incidente;
 ϕ_d : Potencial de onda difratada;
 C : Matriz de restauração hidrostática;
 B : Matriz de Amortecimento (Amortecimento potencial + potencial de irradiação);
 M : Matriz de massa (termos de inércia);
 τ : Instante de aplicação de deslocamento impulsivo;
 A_{xx} : Coeficiente de Massa Adicional para o Avanço;
 A_{yy} : Coeficiente de Massa Adicional para a Deriva;
 A_{zz} : Coeficiente de Massa Adicional para a Arfagem;
 A_{rxx} : Coeficiente de Massa Adicional para o Jogo;
 A_{ryy} : Coeficiente de Massa Adicional para o Caturro;
 A_{rzz} : Coeficiente de Massa Adicional para a Guinada;
 B_{xx} : Coeficiente de Amortecimento Potencial para o Avanço;
 B_{yy} : Coeficiente de Amortecimento Potencial para a Deriva;

Bzz: Coeficiente de Amortecimento Potencial para a Arfagem;

Brxx: Coeficiente de Amortecimento Potencial para o Jogo;

Bryy: Coeficiente de Amortecimento Potencial para o Caturro;

Brzz: Coeficiente de Amortecimento Potencial para a Guinada.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativas.....	18
1.1.1	Problemas Encontrados dentro da Navegação de Comboios Fluviais.....	18
1.1.2	Relevância do Problema	19
1.1.3	Zonas Avariadas de Barcaças	21
1.2	Hipóteses.....	23
1.3	Objetivos.....	24
1.3.1	Objetivo Geral	24
1.3.2	Objetivos Específicos	25
1.4	Estrutura do Trabalho.....	25
1.5	Fluxograma do trabalho	26
1.6	Trabalhos Existentes	29
1.6.1	Artigos Científicos e Trabalhos Técnicos.....	29
1.6.2	Dissertações e Teses	32
1.6.3	Livros	33
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	35
2.1	Dinâmica de Movimento e Impacto entre Barcaças.....	35
2.1.1	Movimentos Lineares e Não Lineares de Barcaças em Fluido Perfeito	35
2.1.2	Determinação de Esforços em Comboios de Barcaças.....	35
2.1.3	Carregamentos de Sucção.....	38
2.1.4	Carregamentos por Interação de Ondas	38
2.2	Delineamento de Algoritmo de Contato para impactos de Barcaças	39
2.3	Modelo de Cálculo de Esforços nas Conexões das Barcaças	42
2.4	Definições Básicas Sobre Projeto de Amortecedores	43
2.4.1	O Processo de Amortecimento.	43
2.4.2	Amortecedores de Material Viscoelástico	43

2.4.3	Cálculo de Defensas pelo Método Energético	44
2.4.4	Elemento Utilizado para Delimitação das Defensas.....	45
2.5	Aspectos Básicos Sobre o Método de Elementos Finitos.....	47
2.5.1	Fundamentos do Método de Elementos Finitos.....	47
2.5.1.1	Análise de Estruturas	48
2.5.1.2	Condições de Contorno.....	48
2.5.2	Elemento de Superfície Utilizado na Análise	49
2.5.3	Elemento de Conexão (Cabos de amarração).....	50
2.6	Metodologia de Modelação de Ondas	51
2.6.1	Teoria Linear de Ondas	51
2.6.1.1	Condição de Contorno Cinemática na Superfície Livre	53
2.6.1.2	Condição de Contorno Dinâmica na Superfície Livre.....	54
2.6.1.3	Condição de Contorno no Fundo	55
2.6.1.4	Solução do Problema de Valor de Contorno	55
2.6.2	Modelagem de Estados de Mar.....	56
2.6.2.1	Espectro de Pierson-Moskowitz	58
2.6.2.2	Espectro de JONSWAP	59
2.6.3	Modelagem do Vento	60
2.6.4	Modelagem dos Esforços de Correnteza	61
2.6.5	Teoria Potencial	62
2.6.5.1	Potencial de Velocidades	62
2.6.5.2	Segunda Lei de Newton.....	63
2.7	Aspectos Gerais sobre os Movimentos de Embarcações.....	64
2.7.1	Análise no Domínio da Frequência	65
2.7.2	Análise no Domínio do Tempo.....	67
2.7.3	Análise de Sistemas Multi-corpos.	69
2.7.3.1	Cálculo das Forças Hidrodinâmicas	70

2.7.3.2	Equação dos Movimentos.....	71
2.7.4	Metodologia de Simulação das Defensas de Contato.....	72
3	MODELOS DE MECANISMOS DE ATRACAÇÃO DE CORPOS FLUTUANTES	74
3.1	Mecanismo Portátil de Atracação de Balsas.....	74
3.2	Sistema de Atracação por Mecanismo Pneumático.....	76
3.3	Sistemas de Atracação Portuário a Vácuo.....	77
4	MODELOS DE TRABALHOS TÉCNICOS NA ÁREA DE ANÁLISE MULTI-CORPOS.....	79
4.1	Aplicação do <i>ANSYS AQWA 17</i> em um sistema modular de 4 Balsas.....	79
4.2	Determinação de Impactos entre Barcaças pelo <i>LS-DYNA</i>.....	82
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	88
5.1	Apresentação do Software <i>ANSYS</i>.....	89
5.2	Metodologia de Análise Computacional Utilizada pelo <i>AQWA</i>.....	89
5.3	Modelagem Computacional das Barcaças.....	90
5.3.1	Topologia estrutural.....	90
5.4	Procedimento de Análise Computacional.....	93
5.4.1	Análise Preliminar de duas Barcaças Acopladas.....	96
5.4.2	Análise de uma Formação de Barcaças 3x2.....	100
5.4.3	Análise de Barcaças de Minério de Ferro.....	104
5.4.4	Propriedades dos Cabos de Amarração.....	107
5.4.5	Propriedades das Defensas.....	108
6	METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DE DEFENSA PARA EMBARCAÇÕES ATRACADAS.....	111
6.1	Aspectos Básicos e Delimitação do Comportamento Histerético.....	111
6.2	Modelo de Atracação Navio com Navio (<i>Ship-to-Ship</i>).....	112
6.2.1	Distância de separação da Defesa.....	113
6.2.2	Absorção de energia.....	114
6.2.3	Considerações Operacionais da Embarcação.....	115

7	RESULTADOS ALCANÇADOS	116
7.1	Análise de Barcaças de Minério de Ferro	116
7.1.1	Gráficos de Massa Adicional ($A(\omega)$)	116
7.1.2	Gráficos de Amortecimento Potencial ($B(\omega)$)	118
7.1.3	RAOs (Response Amplitude Operators)	119
7.1.4	Análise no Domínio do Tempo	123
7.1.4.1	Esforços nas Defensas	123
7.1.4.2	Esforços nos Cabos de Aço	125
7.1.5	Análise para uma Formação de Comboio maior (3x2)	127
7.1.5.1	Modelo de comparação	133
7.2	Análise das Barcaças de Soja	139
7.3	Modelo de Defesa Proposto	143
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	145
9	PROPOSIÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	148
	REFERÊNCIAS	150
10	ANEXOS	154
10.1	Matrizes de Massa	154
10.2	Coefficientes Hidrodinâmicos	155
10.2.1	Matrizes de Massa Adicional	155
10.2.2	Amortecimento	156
10.2.3	Restituição Hidrostática	157
10.3	Análise no Domínio do Tempo	157

1 INTRODUÇÃO

O sistema de navegação brasileiro, no que concerne ao modelo de transporte de cargas ao longo de toda malha hidroviária brasileira, é de fundamental importância para o progresso econômico do país e para desenvolvimento da integração nacional. A apresentação da proposta inicial deste trabalho atenta para o contexto global do modelo de navegação utilizado atualmente. Com base na necessidade de se utilizar um sistema eficiente, moderno e seguro, visando o transporte de milhares de toneladas de diversos tipos de cargas, é utilizado um modelo de transporte através de formações de comboios de barcaças fluviais.

Comboios de barcaças apresentam limitações operacionais em regiões com condições ambientais adversas. O sistema acaba utilizando um conjunto de amarração simples, com cabos de aço, para manter fixo um número determinado de embarcações, mantendo a integração da formação, propelidas por um empurrador (embarcação preparada para este tipo de operação com elevada potência e alta capacidade de produzir empuxo).

Percebe-se ainda que as barcaças acabam apresentando movimentos de respostas provindos das excitações do ambiente (ondas e ventos). Nesse caso existe o perigo para a estrutura interna das embarcações, amplamente constatado pelos impactos que surgem através da movimentação irregular e aleatória das barcaças. Ou seja, além dos elementos de amarração, um sistema de proteção para amenizar os efeitos dos impactos seria de grande valia para conferir segurança e desempenho para esse sistema de transporte.

O cenário do transporte de soja na região Amazônica apresenta dentro de seus problemas principais a presença de forças que surgem na região de acoplamento entre as barcaças que formam os comboios, principalmente quando estas navegam em regiões com elevada incidência de ventos e ondas. Levando-se em conta esse problema foi elaborado um estudo para desenvolver um mecanismo de amortecimento entre as barcaças capaz de garantir confiabilidade no transporte de grãos sólidos em regiões de navegação que venham a trazer enorme perigo para a travessia dos comboios.

Segundo Pinto, Lee e Jonqua (2011), na Amazônia o transporte fluvial tem particularidades distintas do restante do território brasileiro. Devido às características ambientais dessa região, o subsistema hidroviário é bastante utilizado para a circulação de pessoas e de mercadorias entre cidades localizadas às margens de rios que integram a

bacia amazônica, sendo fator preponderante para o desenvolvimento dessas localidades. Na Figura 1.1 é ilustrado um modelo de comboio fluvial de barcaças graneleiras.



Figura 1.1 – Exemplo de comboio de barcaças fluviais.
Fonte: amaggi.com.br/downloads.

Além de constituir um estímulo para atividades industriais, comerciais e turísticas, o transporte fluvial incorpora novos aspectos sociais e ambientais, ao desempenhar um importante papel para o desenvolvimento sustentável da região, preservando a identidade cultural e mantendo a rede de socialização das comunidades (PATRÍCIO, 2007).

Assim, o modelo atual de transporte de graneis sólidos pelas vias fluviais amazônicas necessita de um estudo detalhado a respeito das condições mínimas de segurança para a navegação, necessárias para a redução de riscos relacionados com a integridade estrutural das embarcações utilizadas neste ambiente.

As embarcações fluviais de grande porte para transporte de cargas apresentam de maneira geral, duas características importantes: baixos calados, como consequência de restrições de profundidades de maior parte de hidrovias; grandes deslocamentos, resultantes da otimização econômica do sistema de transportes. (PADOVEZI, 2003, pág. 20)

As principais medidas necessárias ao desenvolvimento tecnológico do sistema de transporte fluvial brasileiro devem estar correlacionadas com a revisão das características de amarração, condições estruturais e com o padrão de resposta a um ambiente com elevada incidência de ondas e ventos.

Com isso, torna-se possível verificar a capacidade de absorção de esforços do sistema de amarras que interligam as barcaças do comboio fluvial. Ao mesmo tempo é possível realizar um estudo hidrodinâmico para averiguar qual a melhor formação de

comboio capaz de lidar com ondas com frequência de incidência, altura e comprimentos de ondas da região da Baía de Marajó.

Dentro da ambientação histórica, as relações da ampla capacidade produtiva brasileira de grãos sólidos, como a soja e o milho, fazem com que estudos teóricos e práticos sejam interessantes para grandes empresas do setor e acabem por servir como base para modelos pautados em soluções baratas e confiáveis.

Desse modo, esse trabalho visa modelar um sistema simples de amortecimento entre barcaças fluviais capaz de minimizar os esforços resultantes dos impactos gerados pelos movimentos translacionais e rotacionais das embarcações.

“[...] Dependendo da velocidade dos ventos, ocorre a formação de ondas com alturas tais que prejudicam a navegação, aumentando a resistência ao avanço e os esforços nas amarras dos comboios, colocando em risco a segurança da navegação” (PADOVEZI, 2003, pág. 29).

Segundo Padovezi (2003), o peso da qualidade e da concepção de embarcações tem sido minimizado. As concepções e a construção de embarcações fluviais, são, geralmente, consideradas padronizadas. Durante longo período poucas inovações tecnológicas ocorreram nas embarcações fluviais de carga, particularmente nos comboios de barcaças.

Para vias com formações de ondas, são verificados movimentos excessivos, riscos de rupturas de amarras e instabilidades. Uma das soluções para trechos de vias navegáveis que apresentem grande incidência de ondas e de ventos está no reforço das amarras, estudos das formas de casco e de sistemas de informação com base em banco de dados a respeito do estado de ondas, levando-se em conta ainda a própria capacidade de lastro das barcaças. Tudo isso para compilar um sistema de acoplamento moderno para as barcaças.

Sabendo-se que Padovezi (2003) informa que a utilização de lastro em barcaças acaba proporcionando uma menor área vélica lateral, devido ao aumento do calado pelo carregamento adicional, além de uma elevação na manobrabilidade do comboio e na diminuição da intensidade dos movimentos das embarcações em ondas.

Não são muito frequentes situações de navegação com ondas: mesmo em locais com amplo trecho favorável à formação de ondas, é necessária a existência de ventos com alta intensidade durante períodos relativamente longos. Por outro lado, o mecanismo de amarração entre as barcaças é extremamente solicitado em regiões de navegação turbulentas sendo necessário um dimensionamento cauteloso.

1.1 Justificativas

A realização desta pesquisa tem como base fundamental a atenuação de um problema de navegação presente no cenário amazônico de navegação de comboios fluviais. Este tema é crucial para futuros cenários de navegação de comboios fluviais em regiões turbulentas.

Dentre os benefícios que esse trabalho pode vir a trazer para o setor de navegação fluvial podemos destacar o desenvolvimento de um sistema que amenize o trabalho de operadores de comboios em regiões que apresentam risco de segurança à navegação, conferindo proteção física e operacional sobre o patrimônio de grandes conglomerados empresariais que dependem desse modelo de transporte. Ademais, a diversificação do transporte fluvial é notada e o raio de ação máximo para o carregamento e descarregamento das barcaças é verificado.

Além disso, o papel deste trabalho possui um grande benefício para a área acadêmica, propiciando as bases delineadoras para um problema pouco estudado, porém, com grandes potenciais de aplicação no mercado e nas análises de projeto de segurança operacional de comboios de barcaças fluviais.

1.1.1 Problemas Encontrados dentro da Navegação de Comboios Fluviais

Analisando as características dos problemas presentes no transporte hidroviário, existem ineficiências e incorreções que acabam resultando em perdas consideráveis quando computadas por toda a vida útil das embarcações fluviais, sendo estas perdas de origem econômica ou ambiental. Dando ênfase para os erros de concepção de projeto, que por sua vez acabam por elevar os riscos de uma embarcação sofrer um determinado tipo de acidente (Padovezi, 2003).

Com base nas características de projeto balizadas por normas técnicas, padrões de construção são definidos para dinamizar o fluxo de produção, atendendo assim a demanda do setor de transportes, relacionada com comboios fluviais. Sabendo-se que o modelo de transporte por frotas de barcaças apresenta uma ampla necessidade de planejamento para embarque e desembarque de cargas, evitando congestionamentos e filas em locais críticos como eclusas, zonas de navegação com reduzida largura de via, além de regiões com baixa profundidade, com a citação abaixo são informadas as relações com os principais aspectos negativos deste modelo.

“A operação de comboios com chatas vazias traz preocupações extras quanto à segurança porque elas apresentam características de baixa manobrabilidade, grande área exposta ao vento, principalmente na direção lateral, e baixa visibilidade” (PADOVEZI, 2003, pág. 26).

A partir de fatores relacionados com questões de projeto, de construção e de operação, é necessário filtrar e demonstrar os aspectos inerentes aos problemas ambientais que acabam por oferecer riscos ao sistema de transporte de cargas. Os aspectos citados por Padovezi (2003), no que diz respeito aos problemas encontrados em regiões com elevadas incidências de ondas e ventos, se encaixam com as proposições iniciais deste trabalho, mostrando a influência da natureza junto aos riscos oferecidos a comboios fluviais.

Diante do exposto, conclui-se que trechos de vias com grandes larguras acabam propiciando condições favoráveis para a formação de ondas a partir da ação irregular de ventos. É importante pontuar ainda que existem formações em trechos do rio Amazonas, da Lagoa dos Patos e em reservatórios dos rios Tietê, Paraná e São Francisco. Em função da velocidade dos ventos são verificadas formações de ondas com alturas prejudiciais para a navegação, elevando-se variáveis como a resistência ao avanço do conjunto e, principalmente, os esforços nos sistemas de amarração dos comboios.

1.1.2 Relevância do Problema

Dentro do cenário do transporte de granéis sólidos e líquidos pelas vias naturais da região amazônica verificamos a presença de diversos tipos de formações de barcaças para o transporte fluvial. A Figura 1.2 ilustra um modelo de comboio de barcaças com formação de três linhas por cinco colunas para navegação em região fluvial.



Figura 1.2 – Modelo típico de comboio em formação (3x5) navegando.
Fonte: Rodrigues (2014).

No que concerne ao sistema de atracação entre barcaças amplamente utilizado nos dias de hoje, podemos indicar o modelo ilustrado na Figura 1.3, que consiste em um mecanismo de atracação por cabo de aço.

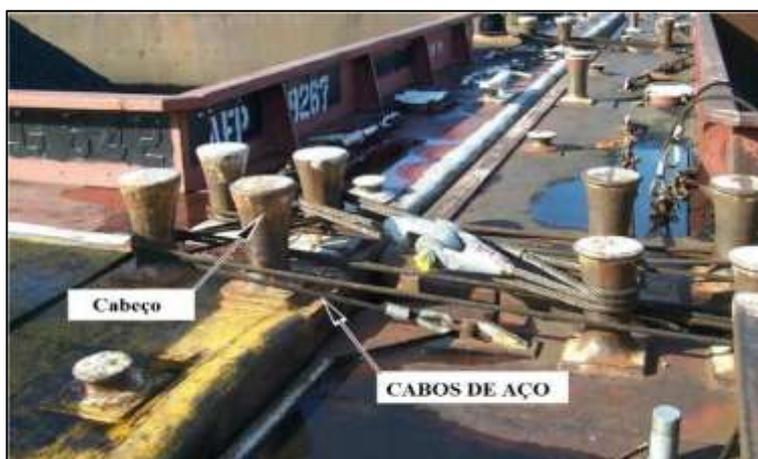


Figura 1.3 – Ilustração de elementos de atracação por cabos de aço.
Fonte: Rodrigues (2014).

Verificou-se no trabalho técnico de Nagado, Lukine e Mendonça (2012) que os esforços sobre os cabos de amarração são diretamente proporcionais à altura das ondas e a velocidade de operação do comboio. Na presença de dimensões de ondas significativas e com a influência das marés sobre a velocidade do comboio, a amarração das barcaças com cabos de aço não é adequada. Ademais, seria necessário aumentar significativamente o diâmetro dos cabos, aumentando o peso do conjunto de amarração, dificultando o manuseio desses elementos.

Os sistemas de cabos de propileno se mostraram eficientes, absorvendo os esforços provocados pelas ondas, durante as manobras de giro e no teste de parada brusca.

Mesmo tomando o comboio menos rígido, segundo Nagado, Lukine e Mendonça (2012) o novo sistema de amarração não altera significativamente a manobrabilidade do comboio.

1.1.3 Zonas Avariadas de Barcaças

Neste tópico são apresentadas algumas ilustrações relativas à situação de avaria de uma barcaça graneleira de 2000 toneladas de porte bruto docada em um estaleiro típico da região amazônica. As principais regiões solicitadas a partir do padrão de avarias são apresentadas.

Com base nas características operacionais e com as condições de navegação enfrentadas por comboios fluviais verificamos na Figura 1.4 as zonas de avarias provocadas por impactos irregulares.



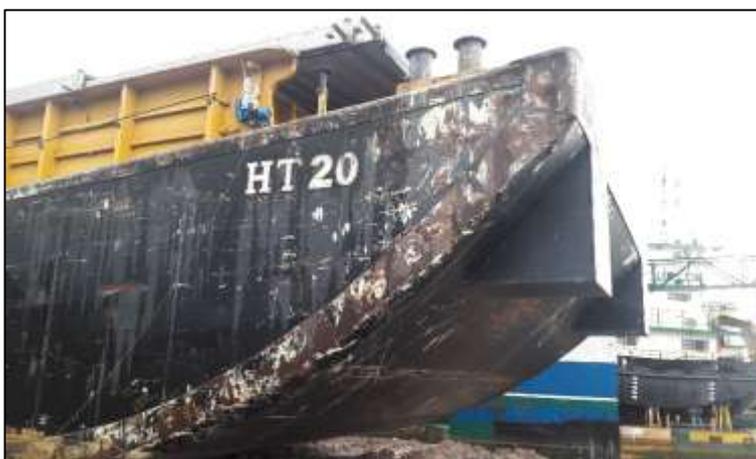
Figura 1.4 – Visualização do costado próximo a proa da barcaça, em destaque as marcas de calado e os cabeços em segundo plano. Fonte: O Autor.

Pequenas ondulações na região de transição entre o convés e o costado da barcaça são indicadas na Figura 1.5.



**Figura 1.5 – Avarias na região do tricaniz com ondulações.
Fonte: O Autor.**

Na Figura 1.6 é possível identificar a região de proa de uma barcaça tipo *Raked* com alguns pontos de colisão por contato.



**Figura 1.6 – Região de proa de uma barcaça com proa *Raked*.
Fonte: O Autor.**

A Figura 1.7 ilustra a região do costado logo abaixo do tricaniz da barcaça graneleira com alguns índices de impacto.



Figura 1.7 – Região do costado onde é possível verificar uma zona de impacto no sentido longitudinal. Fonte: O Autor.

A região do espelho de popa pode ser visualizada na Figura 1.8, sabendo-se que esta região apresenta grande índice de impacto por contato do tipo proa-popa.



Figura 1.8 – Região do espelho de popa da barça, atentando para o formato de popa *Box* da barça. Fonte: O Autor.

1.2 Hipóteses

Para a análise numérica deste problema, são consideradas as seguintes hipóteses simplificadoras:

- As variáveis utilizadas para modelar o cenário computacional são relacionadas com a altura de onda, a velocidade operacional do comboio, a variação dos movimentos relativos verticais entre barças, os efeitos de manobra de giro do comboio, atentando-se para a inversão de giro (Zig-Zag);

- A forma do casco é dividida em duas regiões utilizando o plano de linha d'água como referência base, em uma região difratante (Obras vivas – região do casco submersa) e uma região não-difratante (Obras mortas – região do casco acima da linha d'água);
- A contabilização dos contatos entre estruturas é realizada por elementos denominados *Fenders*, sendo classificados a partir das suas características de amortecimento;
- Para os elementos de amarração consideramos a utilização de elementos com seções tubulares, consistindo no único tipo de seção presente na biblioteca de elementos de conexão do *ANSYS AQWA (2017)*;
- O espectro de onda utilizado para modelar o sistema global de ondas que atua sobre o comboio de barcaças incorpora o modelo de *JONSWAP*, possuindo uma boa aplicabilidade e manuseio relativamente simples e eficaz;
- Os cascos das barcaças são considerados como corpos rígidos flutuando em meio fluido. Nesse caso, os esforços estruturais internos não são considerados;
- O cenário de navegação utilizado para a simulação deste trabalho no *AQWA* é delimitado por um contorno de 550 metros de largura por 450 metros de comprimento, representando assim um amplo campo de propagação de ondas. Ademais, a profundidade do modelo é fixada em 30 metros, correspondendo à média presente na Baía do Guajará;
- Salienta-se que o cenário modelado apresenta algumas limitações, pelo fato da análise apresentar um baixo índice de carregamentos conservativos. Outra limitação está relacionada com a modelagem computacional máxima de até oito corpos flutuantes dentro do modelo de simulação de navegação.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Como objetivo geral é proposta a realização de uma análise utilizando o Método de Elementos Finitos para calcular os níveis de esforços no conjunto de amarração de dois

modelos de comboios de barcaças e os esforços providos de impactos entre os cascos de barcaças de comboios fluviais, quando estes navegam em condições de navegação com presença de ondas elevadas e ventos.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta dissertação são sumariamente apresentados logo abaixo:

- Utilização de simulações de elementos finitos para quantificar os carregamentos aplicados nas barcaças, através de pontos de cargas, para a condição de carregamento totalmente carregada das barcaças, além das forças nos cabos de amarração;
- Filtrar os dados obtidos para o carregamento a partir da simulação de elementos finitos e utilizar um método de comparação dos resultados com a formulação matemática proposta e com os resultados experimentais obtidos de execuções técnicas já realizadas;
- Quantificar e de organizar a relação entre a frequência de incidência de ondas com a frequência de excitação dos principais regimes de movimentos na qual as barcaças fluviais estão submetidas, de acordo com suas características hidrodinâmicas e estruturais.

1.4 Estrutura do Trabalho

Logo abaixo a estrutura da dissertação é delimitada, sendo dividida em 8 capítulos apresentados da seguinte forma:

No capítulo 2 da dissertação é realizada a fundamentação teórica, com o intuito de organizar e caracterizar as informações junto ao tema proposto. São levantadas teorias relevantes para a realização de estudos dentro da dinâmica de movimentos lineares e não lineares de corpos flutuantes atracados, abrangendo a área de análise multi-corpos.

No capítulo 3 é apresentada uma lista de elementos de atracação disponíveis atualmente, além do estado da arte a respeito de mecanismos de atracação de corpos flutuantes, sendo discriminados os pontos positivos de utilização de cada elemento de amarração.

No capítulo 4 alguns exemplos de modelagens computacionais realizadas com comboios de balsas e barcaças são ilustrados, exemplificando algumas metodologias de aplicação, juntando a análise computacional com modelos teóricos e dados físicos encontrados a partir de experimentações.

No capítulo 5 a metodologia utilizada neste trabalho é apresentada, ademais, o procedimento de análise computacional é descrito com o intuito de apresentar para a comunidade acadêmica a interface de trabalho utilizada por programas modernos. A parte técnica do problema é destacada, ressaltando a topologia estrutural e os demais parâmetros delineadores da operação do conjunto de barcaças, como o porte bruto, o deslocamento total, o deslocamento leve, a posição do centro de gravidade das barcaças, os raios de giração e os momentos de inércia.

No capítulo 6 as características de projeto de sistema de amortecimento são levadas em consideração, dando destaque para a relação dinâmica do projeto com as condições de contorno do problema.

No capítulo 7 os resultados alcançados são apresentados de maneira sucinta e organizada, levando-se em consideração o método utilizado, as hipóteses simplificadoras empregadas e os mecanismos de controle propostos para as condições de contorno do problema.

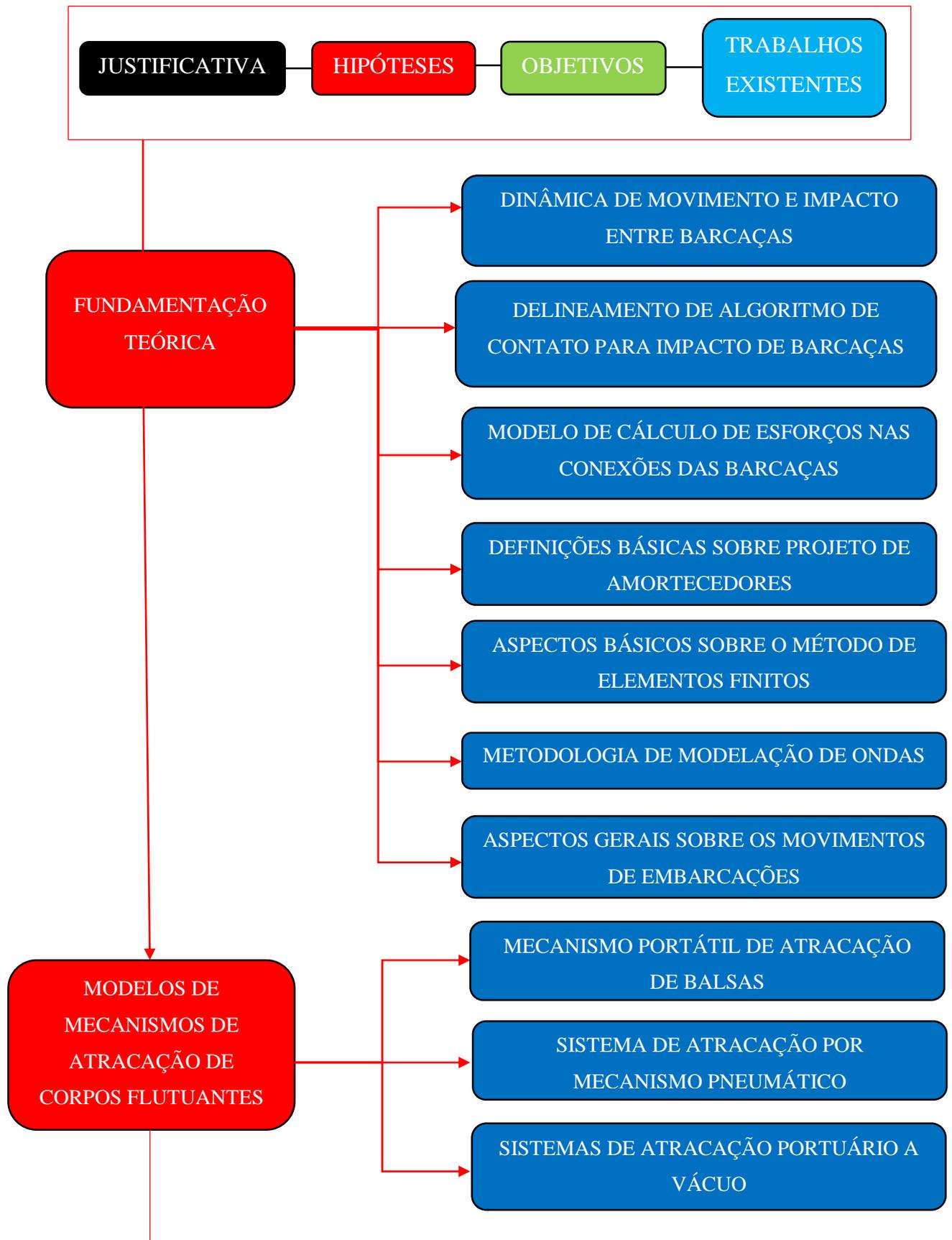
No capítulo 8 as considerações finais sobre a realização do trabalho são apresentadas, demonstrando os principais aspectos dos resultados alcançados com relação aos parâmetros iniciais da análise e da interpretação dos dados.

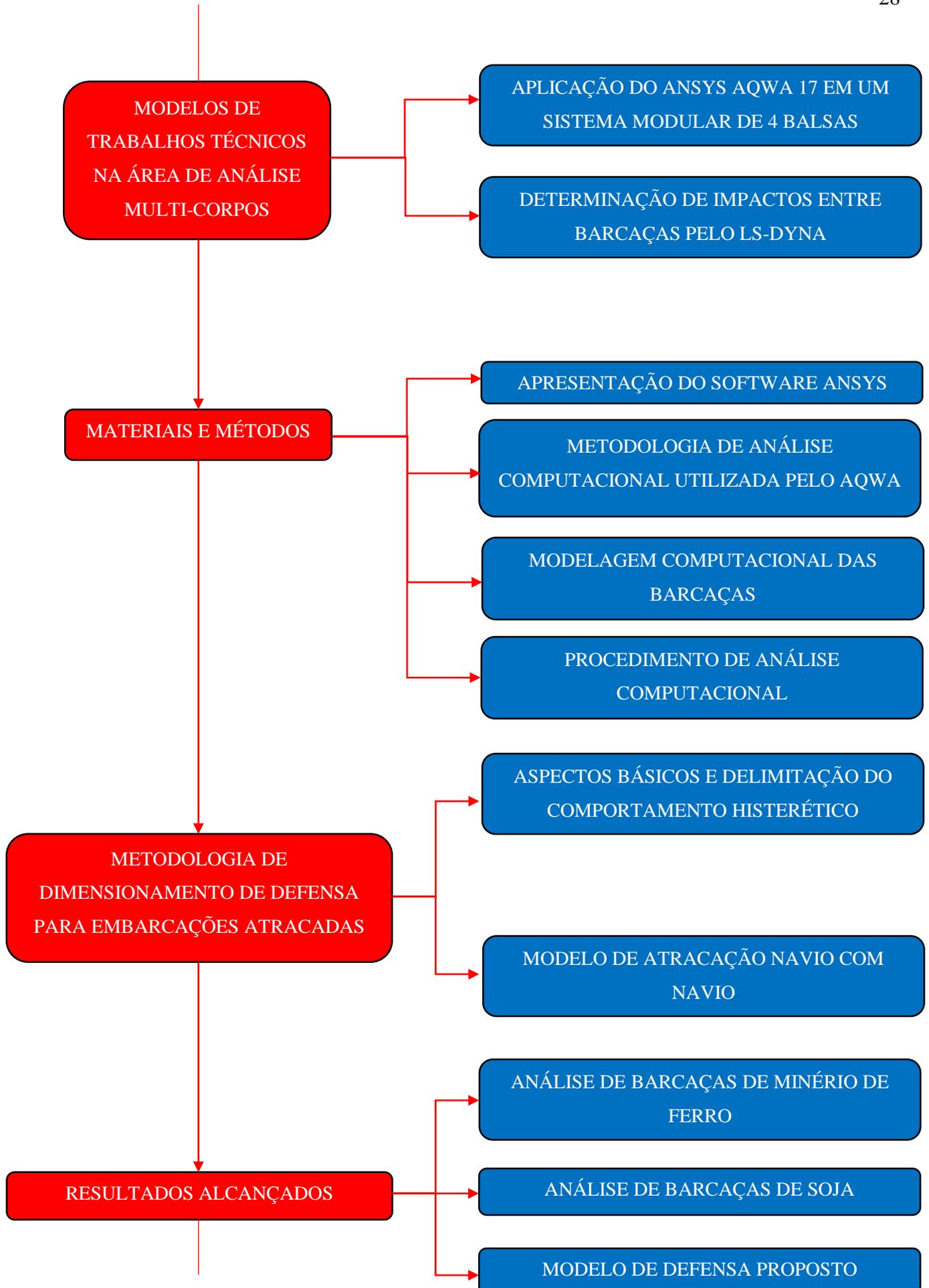
No capítulo 9 são definidas proposições para trabalhos futuros, demonstrando os pontos a serem considerados e validados, além da realização de análises adicionais que venham a complementar o procedimento metodológico desenvolvido neste trabalho.

Os Anexos são apresentados logo após as referências bibliográficas no tópico 10 desta dissertação. Neste tópico final do trabalho são indicadas as formulações dos termos matriciais presentes nas equações informadas no capítulo 2 deste trabalho.

1.5 Fluxograma do trabalho

O fluxograma da dissertação informa a subdivisão organizada do trabalho em seus principais tópicos de estudo, organizando e direcionando a pesquisa dentro do objetivo proposto. Baseando-se na estrutura indicada no Tópico 1.4 o fluxograma é apresentado na Figura 1.9.





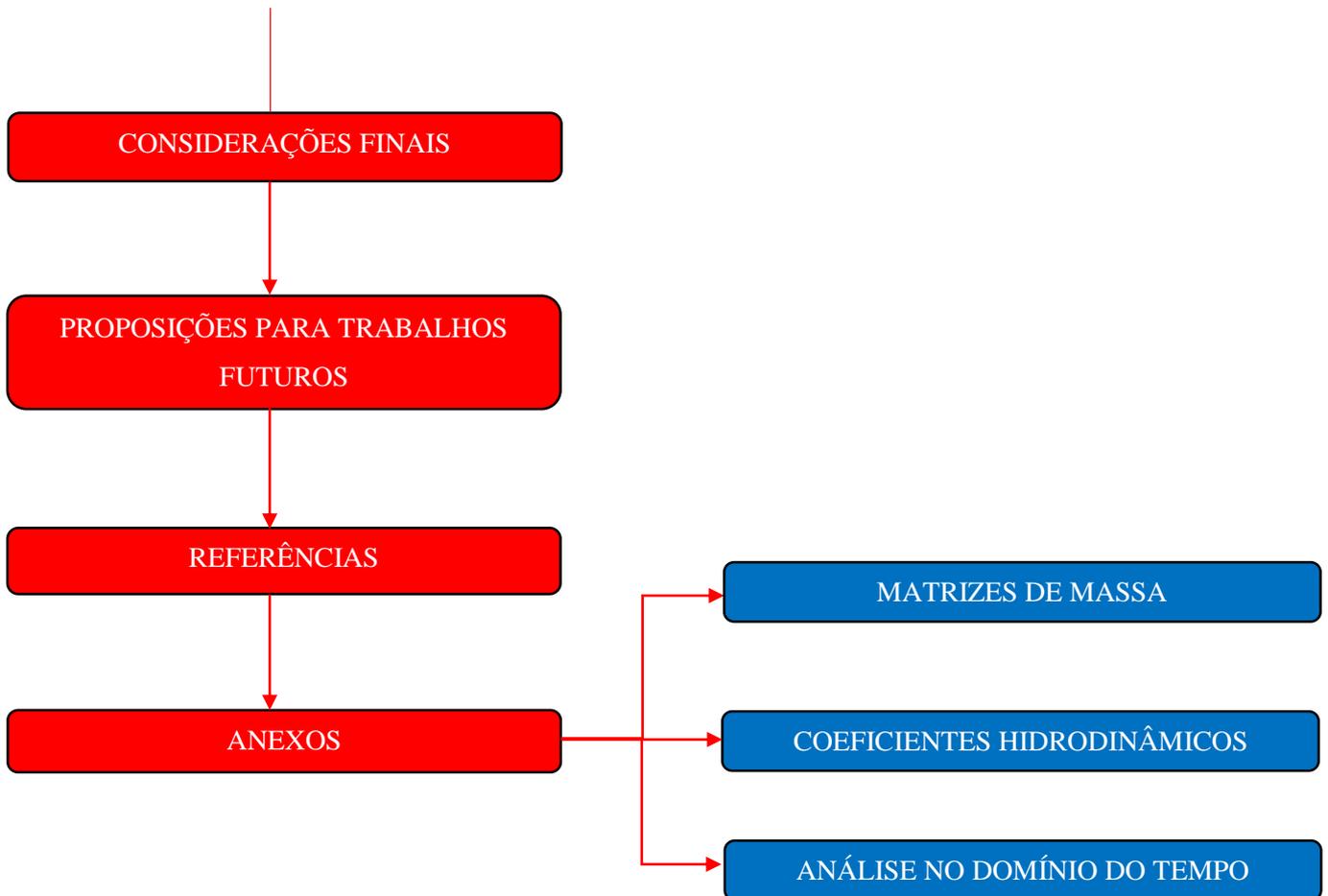


Figura 1.9 – Fluxograma Delimitador da Subdivisão de Capítulos da Dissertação.
 Fonte: O Autor.

1.6 Trabalhos Existentes

Diante das características da problemática proposta a respeito de comboios fluviais, buscou-se um aprofundamento teórico sobre o problema dentro da literatura técnica especializada. Foram organizados diversos elementos de pesquisas e artigos científicos que abrangem esta área específica da engenharia naval. Assim, nesta seção da dissertação são levantados comentários sobre os principais trabalhos encontrados na literatura técnica para formulação do embasamento teórico específico para o assunto proposto.

1.6.1 Artigos Científicos e Trabalhos Técnicos

Charles Rodrigues (2014) apresentou um trabalho com o intuito de quantificar as forças máximas de impacto devido a choques de comboios de barcaças em muros de concreto a partir de uma modelagem numérica por elementos finitos utilizando um algoritmo de contato no *LS-DYNA 3-D*. Foi desenvolvido um modelo computacional em

alta resolução das barcaças para quantificar os esforços de contato entre as barcaças durante a ação dos choques. Um modelo de refino para a barcaça que entra em contato com o muro de concreto é utilizado como ferramenta de redução do gasto de tempo computacional, considerando o restante das barcaças da formação como corpos rígidos com reduzido número de elementos de malha.

Wolff (2003) avalia em um artigo as vantagens e desvantagens do transporte de graneis líquidos através de barcaças oceânicas, levando-se em conta a quantidade de exigências e normas regulamentadoras que governam o projeto e a operação deste tipo de embarcação. No desenvolvimento do trabalho é possível verificar o comportamento das linhas de fluxo hidrodinâmico incidente ao redor da proa da barcaça, além dos principais dispositivos de carregamento e descarregamento desta embarcação.

Consolazio et. al. (2012) propõe uma análise de elementos finitos dinâmica não-linear de um modelo computacional de um comboio de barcaças empregando-se relações precisas de força e deformação entre os principais impactos existentes entre barcaças, além da aferição do nível de tensão presente nos cabos de amarração que interligam as barcaças de comboios fluviais. Os dados levantados por este trabalho são de extrema importância para realizar simulações de impactos de comboios fluviais em paredes flexíveis que representam a zona de acostagem de hidrovias. Através de diversas simulações foi possível quantificar as forças em função de variáveis como o ângulo de incidência de uma barcaça em relação à outra, a velocidade de impacto e o número de barcaças que formam o comboio.

Eda (1972) apresenta um artigo sobre um estudo que relaciona as características de performance de um comboio fluvial. Para alcançar o objetivo proposto, este autor realizou teste com modelos reduzidos em Laboratório. Simultaneamente foram realizados procedimentos computacionais para prever os parâmetros de estabilidade direcional e capacidade de manobra em águas calmas. Ademais, foram determinadas as forças provindas dos movimentos de guinada e deriva além do cálculo de momentos fletores nas amarras para regiões com ondas.

Silva (2006) propõe um estudo em um artigo a respeito de sistemas de barcaças oceânicas, dando enfoque aos benefícios técnicos e logísticos desse modelo de embarcação. As possibilidades de transportes e as vantagens comparativas são declaradas utilizando-se variáveis como a capacidade de transporte, completando a análise com um estudo de caso efetuado durante o desenvolvimento da solução logística mais eficiente.

Luperi e Pinto (2014) realizam um estudo com simulações de comboios fluviais em pilares de pontes que acabam por contribuir para o delineamento das condições de contorno do problema. É atestado ainda que as diversas colunas de barcaças que formam o comboio se comportam de maneira diferente para cada condição de impacto e que esse comportamento não é bem estudado pela literatura técnica. Com esta análise os autores acabaram por produzir um procedimento de estimativa da quantidade de impulso entregue por uma formação de barcaças para uma condição de impacto frontal sobre uma estrutura de ponte.

Guha, Somayajula e Falzarano (2013) relatam em um artigo publicado em um Congresso Internacional de Estabilidade de Embarcações que o sistema de comboio de barcaças sem propulsão é utilizado para movimentação de veículos e cargas pesadas de regiões oceânicas para regiões costeiras. Neste trabalho, é realizada uma simulação numérica utilizando o AQWA para um comboio composto por quatro balsas, com o intuito de gerar entendimento a respeito do comportamento do movimento e estimar os carregamentos sobre os conectores dos módulos. Efeitos de águas rasas e esforços de segunda ordem são apresentados.

Vantorre, Verzhbitskaya e Laforce (2002) apresentam um modelo de testes desenvolvido em um tanque de provas de forma a melhorar a qualidade de um sistema de medição dos parâmetros envolvidos na interação de dois cascos de navios navegando próximos um do outro. Nesse caso, uma análise de manobra de ultrapassagem é realizada neste trabalho. Partindo do princípio de que a manobrabilidade e a estabilidade direcional de embarcações podem ser afetadas através da interação entre os cascos dos navios e os limites dos contornos dentro da área de navegação. Os valores de forças e Momentos laterais em função da posição das embarcações são encontrados e plotados em relação a distância entre cascos.

Filgueiras (2017) realiza um estudo no seu trabalho de conclusão de curso dentro da área de análise de esforços em cabeços de amarração, bem como a delimitação de suas estruturas de reforço via Método de Elementos Finitos. Com análise realizada no *Ansys Mechanical APDL*, pode-se avaliar o grau dos esforços provindos de um ensaio de amarração de um empurrador e instruir assim algumas modificações no projeto adotado para o dimensionamento do cabeço.

Leheta, Elhewy e Mohamed (2013) avaliam em seu artigo alguns procedimentos de cálculo para avaliação dos efeitos de impactos de colisão entre formações de comboios

fluviais e pilastras de pontes. Nesse caso, uma simulação em uma parede rígida é realizada utilizando o software *LS-DYNA 3D*. Um modelo convencional de elementos finitos é criado para representar a barcaça de impacto, modelando o cenário para duas diferentes velocidades de forma a mostrar a resposta dos diferentes tipos de danos na embarcação.

1.6.2 Dissertações e Teses

Padovezi (2003) avalia em sua tese de doutorado procedimentos de projetos de comboios fluviais adaptados a vias navegáveis, tendo como objetivo a redução nos custos de transporte. Toma-se enfoque na alteração do fator de otimização das formas de casco de barcaças quando as condições físicas das hidrovias não podem ser modificadas. Ressalta-se ainda a menor agressão ao meio ambiente tomando atitudes mais pontuais no que diz respeito ao modelo de formato de comboio e de dimensões das barcaças. Um dos principais objetivos dessa tese foi o de constatar a utilização de uma ferramenta de projeto mais abrangente para comboios fluviais.

Silva (2012) em sua dissertação de mestrado intitulada de *Modeling And Analysis of Two Alternatives for Underway Ship-to-Ship Transfer of Oil in Open Sea* (Modelagem e Análise de duas alternativas de transferência de óleo navio para navio em mar aberto) realiza um estudo a respeito da interação hidrodinâmica entre duas embarcações petroleiras navegando em conjunto. O modelo apresenta formulações matemáticas a respeito dos movimentos das embarcações provocados pela incidência de ondas irregulares. O enfoque principal do trabalho acaba ficando pautado na caracterização do modelo no software *WAMIT*, que apresenta um modelo de cálculo hidrodinâmicos pautados no método dos painéis planos.

A dissertação de mestrado de Aseka (2002) apresenta a quantificação do amortecimento em amortecedores, como uma base para o projeto e construção de amortecedores viscoelásticos, delimitando experimentalmente as suas propriedades, atuando paulatinamente na redução das amplitudes de vibração em estruturas submetidas às excitações dinâmicas. Neste trabalho, o projeto de um amortecedor viscoelástico é desenvolvido, utilizando-se recursos locais. Seu comportamento é determinado e variáveis como temperatura, frequência e amplitude de vibração são avaliadas, tirando-se conclusões sobre a aplicação deste tipo de amortecedor, em construções e estruturas industriais.

De Decker (2005) analisa o padrão de resposta de movimento dentro do campo de transferência de cargas entre duas embarcações navegando em mar aberto com direção paralela. O levantamento dos resultados das teorias de Opheim (2005) e de Vantorre (2001) dentro da área de análise de dois cascos em paralelo apresentam algumas considerações no que dizem respeito as funções de interpolação que são geradas no processo de descrição dos coeficientes adimensionais que medem a distância de interação entre cascos.

1.6.3 Livros

Sobrinho (2006) apresenta em seu livro *Introdução ao Método dos Elementos Finitos* conceitos teóricos tomando como base diversas aplicações em áreas da engenharia civil, mecânica e naval. É realizada a descrição do conceito básico de elementos finitos a partir do desenvolvimento de um modelo para uma partícula em queda livre. Posteriormente, o autor aborda as áreas de calor, elasticidade, mecânica dos fluidos, comportamento dinâmico de estruturas e geração automática de malhas. É possível verificar ainda que à medida que a complexidade dos modelos aumenta, um embasamento teórico profundo se faz necessário para realizar a modelagem adequadamente.

Hughes e Paik (2010) descrevem no livro *Ship Structural Analysis and Design* (Análise e Projeto de Estruturas de Navios) o modelo de elementos finitos como ferramenta fundamental para realização de análises estruturais de embarcações, sendo possível realizar a execução de diversos tipos de análises com base em princípios teóricos pautados nas áreas de resistência dos materiais, dinâmica estrutural e de mecânica dos sólidos. As aplicações em áreas específicas dentro da área de análise estrutural de embarcações são clareadas, tendo como exemplo a abordagem da teoria de placas, o método de cálculo de esforços provenientes de impactos de ondas na estrutura terciária de embarcações, além de apresentar um modelo para aferição de níveis de deformação e tensão para painéis estruturais submetidos a pressões externas.

Segundo Avelino Filho (2012), no livro *Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE/Análise Dinâmica*, é possível analisar os princípios básicos que embasam o método de elementos finitos dentro da área de análises dinâmicas. É proposta uma visão mais equilibrada a respeito dos fenômenos físicos e dos recursos de matemática aplicada, aplicando a precisão do rigor científico numa linguagem mais acessível. Com base nos

recursos disponíveis neste livro é possível estudar alguns modelos práticos presentes em elementos finitos.

Fish e Belytschko (2009) apresentam em seu livro *Um Primeiro Curso em Elementos Finitos*, um modelo didático de apresentação dos pormenores que regem os princípios de sistemas discretos e formulações forte e fraca para problemas unidimensionais, até a apresentação de tutoriais para programas comerciais na área de elementos finitos. Esta obra acaba servindo como livro texto para diversos estudantes iniciantes na área de análise computacional.

Kim e Sankar (2011), apresentam no livro *Introdução à Análise e ao Projeto em Elementos Finitos* um trabalho acessível sobre as principais teorias que regem o campo de estudos do método de elementos finitos (MEF). Nesse trabalho, as noções mais elementares de projetos com elementos finitos são abordadas, de modo que os engenheiros possam utilizar esta ferramenta com eficiência e saibam interpretar os resultados de forma adequada. O trabalho citado neste parágrafo aborda modelos de elementos finitos unidimensionais, incluindo elementos de viga e de treliça, bem como elementos finitos bidimensionais e tridimensionais simples.

Zienkiewicz, Taylor e Zhu (2013), na 7ª edição do livro *The Finite Element Method: its Basis & Fundamentals* (O Método de Elementos Finitos: suas Bases e Fundamentos) é possível constatar um trabalho embasado em bases teóricas sólidas e nos principais fundamentos matemáticos da análise de elementos finitos. Abordando os princípios de álgebra vetorial essenciais para o domínio do assunto. Ainda, apresentam um estudo sobre problemas de elasticidade linear, formas variacionais e aproximação de elementos finitos por uma dimensão, funções de forma de elasticidade em duas e três dimensões e ainda um tópico sobre os fundamentos principais do trabalho com elementos de casca como um caso especial de análise tridimensional.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os principais aspectos teóricos que podem ser correlacionados com a problemática apresentada no capítulo 1 deste trabalho, levando-se em conta a delimitação dos aspectos básicos sobre o método de elementos finitos e a dinâmica de movimentação de embarcações.

2.1 Dinâmica de Movimento e Impacto entre Barcaças

2.1.1 Movimentos Lineares e Não Lineares de Barcaças em Fluido Perfeito

O movimento de uma barcaça retangular em meio fluante pode ser estudado dentro da teoria de escoamento potencial. Sabe-se que técnicas de simulação numérica podem ser baseadas no método de correlação de equações *Euler-Lagrange*. Isso acaba permitindo a simulação do escoamento e da descrição dos movimentos resultantes tanto a partir das condições de contorno lineares ou não lineares, atuantes sobre o casco e sobre a superfície livre (GUHA, SOMAYAJULA e FALZARANO, 2013).

O movimento de *roll* (jogo) próximo ou não de sua região de ressonância é uma exceção conhecida à regra para previsão de movimentos de navios e barcaças. Sabendo que existem formulações de radiação de difração conhecidas por predizer a resposta de movimento. Para barcaças, entretanto, a não linearidade das forças de excitação (devido à grande variação da superfície molhada do casco) deve ser levada em consideração. A importância desses dois fatores tem levado a análises controversas (GUHA, SOMAYAJULA e FALZARANO, 2013).

2.1.2 Determinação de Esforços em Comboios de Barcaças

A utilização de formações de barcaças em canais de navegação tem crescido em larga escala nos últimos anos, muito devido a sua vantagem operacional dentro de uma área de atuação de sistemas de transporte para pequenas velocidades, sendo capaz de suportar modos flexíveis de transporte.

Como comboios fluviais ainda trafegam em canais de navegação estreitos, com trechos apresentando elevado índice de sinuosidade, uma técnica é proposta com modelos em escala reduzida para aferir os parâmetros hidrodinâmicos relacionados com a capacidade de manobra de determinada formação de comboios. Com ajuda

computacional é possível atestar a capacidade de movimento de guinada, bem como o cálculo de forças laterais e de arrasto, todos obtidos a partir do teste de ensaio em um braço rotativo (EDA, 1972).

Eda (1972) propõe um teste em escala reduzida de uma formação de barcaças simples utilizando um fator de redução de escala de 50, utilizando como referência para isso modelos de barcaças com um comprimento total de 191,56 pés (58,4 m), 35 pés (10,67 m) de largura e um pontal de 14,58 pés (4,44 m), calculando as características hidrodinâmicas para um calado de 10,42 pés (3,18 m). A Figura 2.1 ilustra o modelo utilizado por Eda, atentando-se para o fato de que o experimento reproduz os níveis de momento fletor lateral atuantes nos acoplamentos das barcaças.

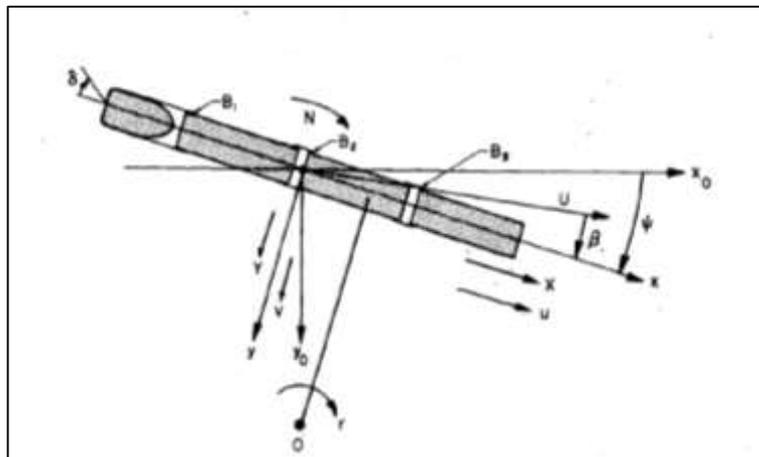


Figura 2.1 – Sistema de Coordenadas para Cálculo de Momento Fletor, força lateral e Coeficientes Hidrodinâmicos. Fonte: Eda (1972).

Eda (1972) obtém dados das forças verticais e longitudinais, além dos momentos fletores laterais nas conexões das barcaças a partir de um teste com modelos em escala reduzida. Foram consideradas para este experimento barcaças totalmente carregadas, bem como um número de *Froude* de 0,15 para o conjunto, correspondendo a um valor de 7 nós em escala real. A relação entre a altura de onda e o comprimento de onda foi da ordem de 1/100.

Assim, a Figura 2.2 mostra uma formação de comboio com três barcaças, ilustrando o tipo de experimento reduzido feito por Eda (1972), com base no trem de onda incidente sobre uma formação das barcaças.

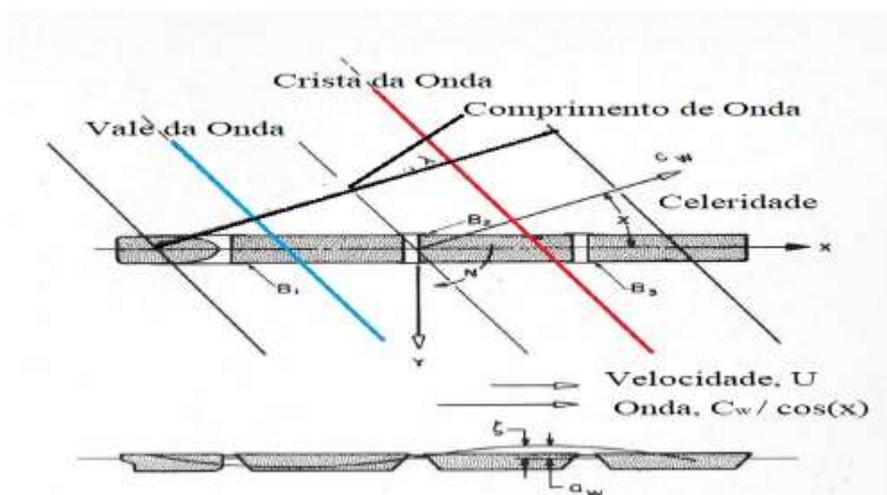


Figura 2.2 – Exemplo de formação de comboio sobre influência de um trem de onda.
Fonte: Eda (1972).

Conforme Eda (1972) os procedimentos computacionais foram realizados para prever as respostas das forças verticais e dos momentos fletores laterais atuantes em comboios de barcaças. Nessa análise, o sistema foi restringido no plano horizontal (efeito dos movimentos de *surge*, *sway* e *yaw* foram desconsiderados) e submetido a um movimento uniforme com velocidade constante. Foram considerados os parâmetros hidrodinâmicos dos cascos das barcaças e do empurrador. Conforme a Figura 2.3, o modelo de cálculo computacional estruturado por Eda (1972) apresenta o seguinte procedimento de análise: Movimento entre Embarcações Navegando Atracadas

Com base em Silva (2012), condições de navegação entre dois navios separados por uma distância menor que 3 metros apresentam alguns aspectos complicadores, dentro do ponto de vista hidrodinâmico. Na verdade, importantes efeitos são envolvidos com base no comportamento do fluido que escoar entre os cascos. Podemos dividir este fenômeno em duas classes principais:

O fenômeno descrito acima pode ser descrito com base em **carregamentos de sucção**, que surgem a partir da alteração do campo de pressão devido ao comportamento irregular do fluido localizado entre os cascos, em águas calmas, e entre as **interações de ondas**, que relacionam o trem de ondas gerado entre os cascos com os movimentos de resposta das embarcações (SILVA, 2012). A influência desses dois efeitos é determinante para descrever a dinâmica de operações com atracações costado-costado.

2.1.3 Carregamentos de Sucção

Quando duas embarcações navegam atracadas com velocidade relativa nula, o escoamento de água entre as mesmas é distribuído de tal forma que o campo de pressão resultante induz uma força de sucção entre os cascos. Diante de uma explicação mais simplificada para este fenômeno, indicamos a presença de um campo de velocidades de maior intensidade no fluido presente na região entre os cascos. Isso acaba levando a uma redução no campo de pressão, resultando assim, em forças de sucção (SILVA, 2012).

Segundo Silva (2012), estudos relacionados com essa área de pesquisa – águas profundas e velocidade relativa nula - são incipientes. As principais pesquisas da área estão relacionadas com as manobras de navios com separação considerável entre cascos em um cenário de águas rasas.

Silva (2012) afirma que existem estudos e dados apropriados para este tipo de operação em (DE DECKER, 2006). A metodologia aplicada consiste na utilização de dados de águas rasas retirados de Vantorre, Verzhbitskaya e Laforce (2002) para criar assim uma regressão polinomial de estimativa de interações entre forças e momentos atuando em embarcações com navegação paralela e velocidade relativa nula.

2.1.4 Carregamentos por Interação de Ondas

Assumindo dois corpos flutuando em águas calmas, um deles é forçado a oscilar e perturbar a superfície da linha d'água ao seu entorno, induzindo assim movimentos no segundo corpo, que por sua vez irão afetar o fluido, e assim por diante. Se estes corpos são submetidos a determinado trem de ondas, eles acabarão sendo constantemente forçados a entrar em oscilação (SILVA, 2012).

Segundo Silva (2012) o comprimento de onda de encontro, λ_e , está associado com a frequência de encontro ω_e . A projeção do comprimento de ondas, λ_{proj} , que incidem sobre a direção de avanço de uma embarcação é dada pela Equação 2.1.

$$\lambda_{proj} = \lambda_e \sin(\beta) \quad \text{Eq. 2.1}$$

Na Figura 2.3 verificamos um modelo adaptado de Silva (2012) onde é possível verificar a direção de propagação de ondas e a direção de navegação de avanço de duas embarcações espaçadas por uma distância d .

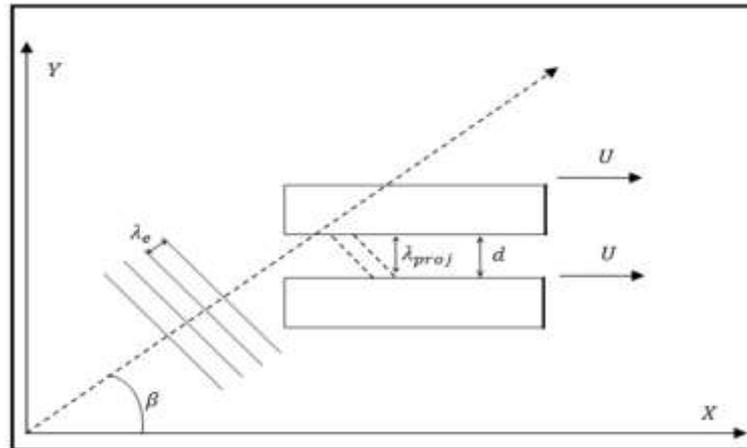


Figura 2.3 – Corpos Flutuantes avançando com velocidade U em um cenário com determinada direção de incidência de onda.

Fonte: Silva (2012).

2.2 Delineamento de Algoritmo de Contato para impactos de Barcaças

O trabalho de Luperi e Pinto (2014) apresenta embasamento a partir de uma série de testes de impactos realizados em modelos de comboios em escala reduzida, simulando cenários de condições de esmagamento por colisões frontais entre o sistema e uma estrutura rígida.

Um algoritmo de contato que detecta as interações entre diferentes elementos do modelo é implementado. Este algoritmo determina os pontos correspondentes da malha particular de cada barcaça, estando acoplado dentro do contorno definido pela malha das barcaças adjacentes.

Com isso, Luperi e Pinto (2014) definem uma linha reta interligando o ponto que está sendo considerado até um ponto localizado a uma determinada distância em uma direção especificada. Se esta linha cruzar o contorno de um elemento adjacente um número ímpar de vezes, o ponto fica posicionado dentro do contorno, sendo classificado como um ponto de contato. Caso contrário, o ponto é definido como externo ao contorno. Uma zona de contato é então determinada aplicando-se este procedimento várias vezes ao longo do contorno das barcaças.

Assim, em sua direção normal, a superposição de contato e a velocidade relativa tangencial r são calculadas. Esses parâmetros são utilizados para determinar as forças de contato resultantes dentro do comboio de barcaça. Onde a sua direção depende exclusivamente da velocidade tangencial relativa entre as barcaças, além disso, μ representa o coeficiente friccional.

Na Figura 2.4 identificamos o modelo de algoritmo utilizado para descrever o comportamento de impacto em função dos parâmetros de velocidade e de rigidez do sistema, delimitando os pontos que fazem parte do domínio do contorno do casco das barcaças.

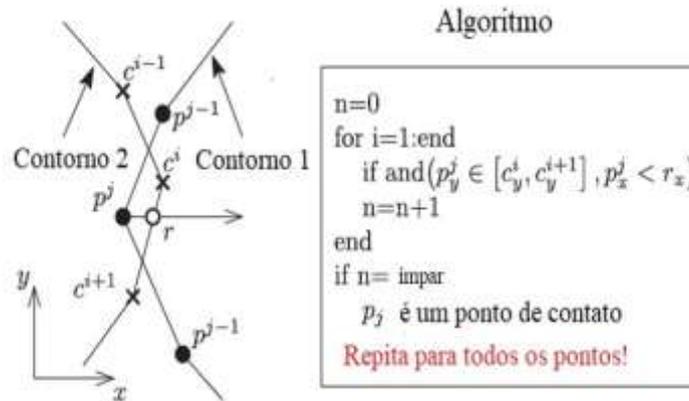


Figura 2.4 – Delineamento do Algoritmo de Contato com base nos pontos de contorno de duas barcaças. Fonte: Luperi e Pinto (2014).

Na Figura 2.5 é ilustrado o diagrama de computação dos esforços, sendo delimitadas as regiões de contato entre duas barcaças, além dos contornos das embarcações. O perfil da força resultante com base nas componentes de atrito e de força normal também são ilustrados nesta Figura.

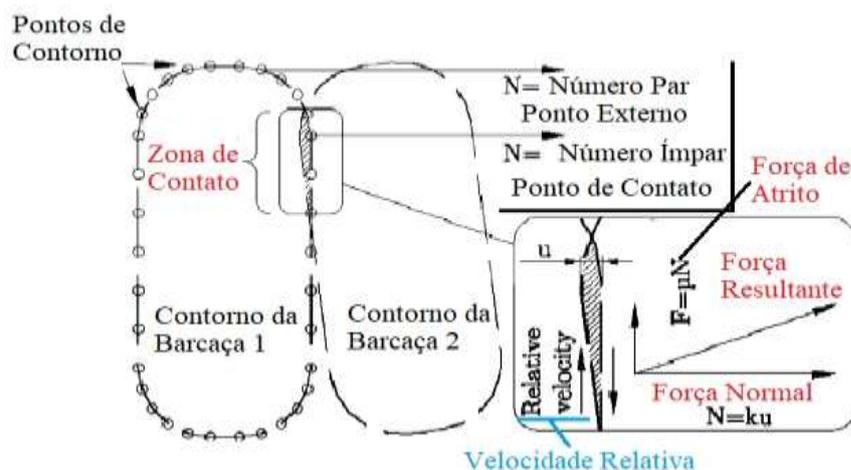


Figura 2.5 – Representação esquemática da carga resultante da interação de contato entre duas barcaças. Fonte: Luperi e Pinto (2014).

Segundo Luperi e Pinto (2014), as amarrações do sistema são definidas por elementos unidimensionais, sendo capazes apenas de resistir a esforços de tração assumindo um comportamento perfeitamente elástico. Nesse caso, a falha do material

para esses elementos é considerada após a deformação axial exceder um certo limite, definido pelas propriedades mecânicas do material que constitui o cabo. Deslocamentos longitudinais e transversais são considerados, já os deslocamentos verticais não são computados para esta análise bidimensional.

Na Figura 2.6 são ilustrados três modelos de amarração entre barças, representando os principais modelos estudados por Luperi e Pinto (2014).

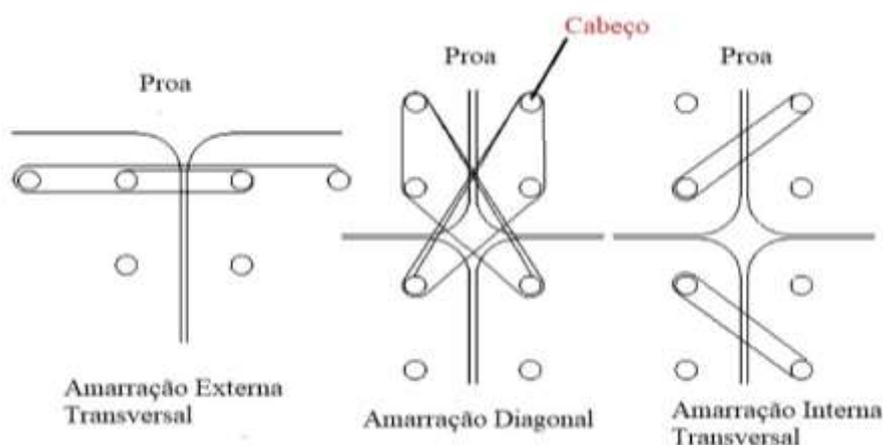


Figura 2.6 – Exemplos de mecanismos de amarração entre barças por cabos de aço. Fonte: Luperi e Pinto (2014).

A Figura 2.7 ilustra o modelo de formação de comboio de barças utilizado pelo autor do trabalho sobre algoritmos de contato para predição das zonas de falha nas amarras quando o comboio colide com uma estrutura rígida (pilar de ponte).

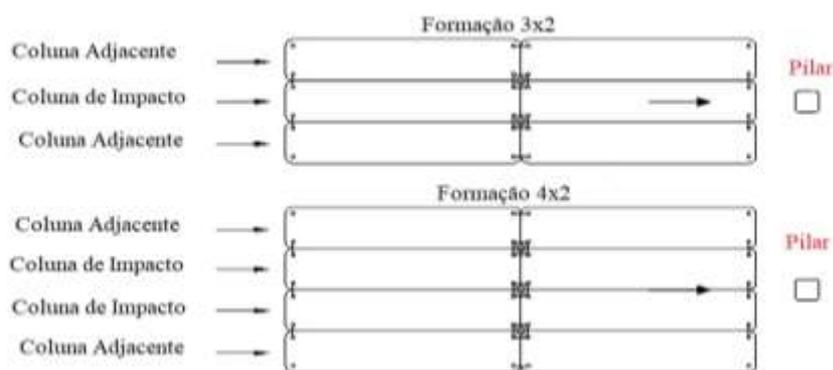


Figura 2.7 – Modelo de Formação de Comboio de Barças em simulação de impacto sobre pilar de ponte. Fonte: Luperi e Pinto (2014).

Pelo fato dos métodos propostos por Consolazio et al. (2012) serem considerados para um grau de liberdade, a influência de uma linha de barças adjacente não pode ser explicitamente levada em consideração para estudos de impactos multi-corpos. Entretanto, esses métodos propiciam avanços no campo de análises de colisões entre

corpos flutuantes, os efeitos de linhas adjacentes de barcaças tanto para o cálculo de energia e de força para grandes formações de barcaças ainda apresentam um elevado nível de incerteza.

2.3 Modelo de Cálculo de Esforços nas Conexões das Barcaças

A partir do momento que avaliamos os impactos presentes em comboios de empurra, precisamos avaliar a questão da influência do grau do impacto na capacidade propulsiva do empurrador. No que se refere aos impactos provindos de choques em bancos de areias, é avaliado o nível de influência da desaceleração oriunda do impacto no cálculo dos esforços nos elementos de conexão das barcaças. A desaceleração, a velocidade operacional do comboio, a distância de parada e a variável do tempo são determinantes para clarear a seleção da análise de impactos.

Porém, o método utilizado para esse trabalho deve estar interligado ao modo como os esforços provindos das interações entre ondas irregulares e as embarcações influenciam as respostas destas conexões. O modelo numérico precisa simular o conjunto de barcaças navegando em mar aberto sobre influência de um trem de onda realístico. O efeito da profundidade é um importante fator que pode alterar a função de transferência de resposta da embarcação e a frequência das ondas de acordo com a relação de dispersão descrita na Equação 2.2, retirada de Guha, Somayajula e Falzarano (2013).

$$\sigma^2 = g * k * \tanh(kh) \quad \text{Eq. 2.2}$$

Onde:

σ : Frequência de onda;

k : Número de onda;

g : Aceleração gravitacional;

h : Profundidade da região de navegação.

Deve-se atentar para a tangente hiperbólica representada pela nomenclatura *tanh*.

Segundo Pinheiro (2015) a profundidade relativa permite quantificar a dispersão e diferenciar águas profundas, intermédias e pouco profundas. Nesse caso, em águas profundas ocorre uma elevada dispersão em frequência e poucas interações não lineares,

ao passo que em águas pouco profundas acontece o contrário. Em águas com profundidades intermediárias, nenhum dos fenômenos é negligenciável.

As barcaças são conectadas umas sobre as outras através da utilização de elementos que resistam à flexão e ao cisalhamento. Esses elementos dão possibilidade para as embarcações caturrarem (*pitching*) livremente e se afastarem entre si, sobre a influência de ondas.

2.4 Definições Básicas Sobre Projeto de Amortecedores

Os conceitos fundamentais necessários à compreensão do fenômeno de amortecimento existente na resposta de um sistema são apresentados neste capítulo, com base na influência das variáveis de operação e dos parâmetros de amortecimento. Inicialmente, este tópico trata da classificação do amortecimento em material e não material, destacando-se os tipos de amortecedores mais comuns, discutindo os modelos do comportamento de amortecedores e os métodos de quantificação dos parâmetros de amortecimento.

2.4.1 O Processo de Amortecimento.

Amortecedores e Isoladores tornaram-se necessários para propiciar a redução ou mesmo isolar os níveis de vibrações que provocam fadiga em componentes estruturais de diversos mecanismos presentes na área da engenharia.

Conforme Aseka (2002), os materiais comportam-se de maneira específica, no que se refere às características de dissipação de energia, com base na diversidade de estruturas atômicas. Medindo-se a energia dissipada pelos materiais, a cada ciclo de deformação, verifica-se que esse nível energético é relativamente baixo para a maioria dos materiais estruturais.

Diversos modelos matemáticos são propostos na literatura técnica para quantificar a energia eliminada de estruturas e para estudar o comportamento dos elementos de amortecimento, além de existir uma grande variedade de experimentos realizados.

2.4.2 Amortecedores de Material Viscoelástico

Denominados de amortecedores passivos, estes componentes podem ser viscosos, metálicos, de atrito seco ou de material viscoelástico. Os amortecedores de material

viscoelástico são amplamente utilizados e muito versáteis, tendo evoluído como consequência do desenvolvimento ocorrido na indústria aeronáutica, em meados do século XX, com o avanço das pesquisas de turbinas a Jato.

Segundo Aseka (2002), amortecedores viscoelásticos utilizam polímeros ou borrachas que provocam dissipação de energia através de cisalhamento. São indicados para corpos com elevadas frequências, com baixos índices de vibração e situados em regiões com elevada incidência eólica. O sistema acaba sendo constituído por duas chapas envolvendo um material viscoelástico.

A partir das proposições de Aseka (2002), a rigidez e o amortecimento são representados pela rigidez complexa $K^* = K(1 + i * \eta)$. É afirmado ainda que alguns cuidados devem ser tomados ao se projetar amortecedores deste tipo, tendo em vista que os parâmetros k e η , rigidez e fator de perda, respectivamente, variam de acordo com as condições de operação. A Equação 2.3 informa a resposta de movimento de um sistema de um grau de liberdade, com amortecedor de material viscoelástico excitado harmonicamente.

$$m\ddot{x} + k(1 + i\eta)x = R_e(F_0 e^{i\omega t}) \quad \text{Eq. 2.3}$$

Onde:

m : Massa;

η : Fator de perda;

k : Rigidez;

R_e : Simboliza a componente real do número complexo;

\ddot{x} : Corresponde a variável da aceleração;

x : Variável do deslocamento;

i : Número complexo $\sqrt{(-1)}$.

2.4.3 Cálculo de Defensas pelo Método Energético

Existem quatro métodos amplamente utilizados no dimensionamento e no projeto de sistemas de defensas, para a determinação da energia de acostagem: o método cinético clássico, o método estatístico, a modelação física e a modelação matemática, conforme indicado em (LEAL, 2011)

O método estatístico consiste na avaliação das ações por intermédio de dados estatísticos, obtidos através do conhecimento das características dos navios e das condições de manobra. Entretanto, este método pode apresentar algumas limitações caso não existam dados suficientes para realização do projeto. Já no modelo cinético clássico, sendo este o mais antigo, a energia absorvida pela defesa deve ser igual à transmitida pela embarcação à estrutura de acostagem, afetada por um coeficiente de segurança, sendo imposto para regiões aonde o processo de acostagem não pode ser feito em condições normais. A Equação 2.4 demonstra a relação da Energia de Amortecimento em função das variáveis descritas no parágrafo seguinte.

$$E_A = \frac{1}{2} * \frac{W}{g} * V_A^2 * C_m * C_E * C_C * C_a * F_S \quad \text{Eq. 2.4}$$

Onde:

- W: Peso do navio;
- g: Aceleração da gravidade (9,81 m/s²);
- V_A: Velocidade de aproximação do navio (m/s);
- C_m: Coeficiente de massa virtual;
- C_E: Coeficiente de excentricidade;
- C_C: Coeficiente de configuração do cais;
- C_a: Coeficiente de amortecimento;
- F_S: Fator de segurança.

2.4.4 Elemento Utilizado para Delimitação das Defensas

Dentro da análise do programa *ANSYS AQWA 2017* o modelo empregado pode ser definido com base em um exemplo de defesa contendo rigidez não linear, uma componente de fricção e amortecimento. Atua somente na compressão entre pontos de uma estrutura a outra. Denotando L_0 como o comprimento inicial da defesa não submetida a esforços de compressão, T a magnitude da força de compressão definida por uma função polinomial de quinta ordem representada pela Equação 2.5.

$$T = \begin{cases} K_1 \Delta L + K_2 (\Delta L)^2 + K_3 (\Delta L)^3 + K_4 (\Delta L)^4 + K_5 (\Delta L)^5 & \text{se } \Delta L > 0 \\ 0 & \text{se } \Delta L \leq 0 \end{cases} \quad \text{Eq. 2.5}$$

Onde:

k_j ($j=1,5$): coeficientes da função polinomial;

$\Delta L = L_0 - L_d$: alongamento captado nas defensas;

L_0 : Comprimento inicial das defensas;

L_d : distância entre dois pontos de contato entre defensas.

A componente de fricção deste elemento é calculada com base na Equação 2.6.

$$F_f = \mu T \quad \text{Eq. 2.6}$$

A força de amortecimento é apenas aplicada na direção da força de compressão, perpendicular ao plano de contato da defesa com a superfície do casco da barcaça. A modelagem é feita com base em um material com amortecimento linear, definida com base na Equação 2.7.

$$F_d = \beta K_f \frac{dL_d}{dt} \quad \text{Eq. 2.7}$$

Onde:

β : Coeficiente de amortecimento;

K_f : Termo de rigidez do elemento de defesa.

A Figura 2.8 delimita o modelo de ilustração da aplicação do elemento *fender* no software ANSYS AQWA 2017.

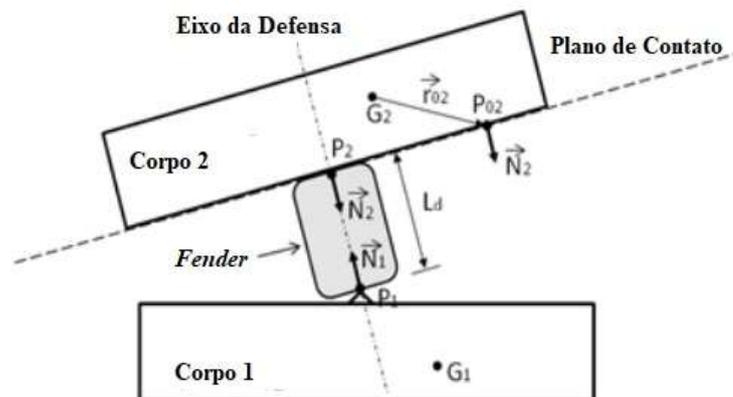


Figura 2.8 – Representação de um elemento de defesa fixo ao corpo 1 e entrando em contato com o corpo 2, dentro da modelagem do ANSYS AQWA (2017). Fonte: ANSYS (2017).

2.5 Aspectos Básicos Sobre o Método de Elementos Finitos

O Método de Elementos Finitos em sua concepção é um modelo de cálculo muito elegante e poderoso, haja vista que acaba por incluir vários procedimentos numéricos, além de técnicas arrojadas de solução de diversos problemas em várias áreas do conhecimento.

Segundo Kim e Sankar (2011), o método de elementos finitos (MEF) é uma ferramenta importante e imprescindível em praticamente todos os ramos da engenharia. Um dos motivos para sua popularidade é sua utilização no desenvolvimento de programas computacionais versáteis que possam vir a resolver muitos problemas práticos sem demandar treinamentos longos e extenuantes.

Segundo Hughes e Paik (2010), o método foi concebido e constituído principalmente dentro de cálculos matriciais, sendo de suma importância destacar o ponto de partida da análise, utilizando elementos bidimensionais e tridimensionais para a representação do objeto de estudo e do meio contínuo. Após esta parte, o método acabou sendo desenvolvido para sólidos tridimensionais, placas sob flexão, placas finas e espessas. Esses elementos foram aplicados para análise estática linear, indo diretamente de encontro com áreas como a dinâmica de resposta de acoplamentos e não linearidades de materiais e modelos geométricos.

2.5.1 Fundamentos do Método de Elementos Finitos

Como mencionado anteriormente, o conceito básico do método de elementos finitos é o mesmo da análise matricial sequencial: especificamente, uma estrutura qualquer pode ser representada por um conjunto de elementos estruturais individuais conectados entre si através de um número discreto de nós.

Hughes e Paik (2010) descrevem ainda que para a utilização do método matricial é essencial que a continuidade estrutural seja representada em termos de um número finito de variáveis discretas. Essas variáveis correspondem aos deslocamentos nodais, e em alguns casos, as suas correspondentes derivadas. Se os últimos são incluídos, denominamos de graus de liberdade ao invés de deslocamentos nodais, mas isso não provém de elementos de geometria simples.

Para se alcançar uma solução exata, consolidando a representação por elementos finitos, as condições de equilíbrio devem ser satisfeitas e apresentarem compatibilidade

geométrica. Ainda, as condições elucidadas logo acima devem ser feitas em todos os elementos componentes da malha.

Em Hughes e Paik (2010) um modelo discreto não é capaz de representar exatamente um modelo contínuo, mesmo com um número elevado de variáveis discretas empregadas no cenário de cálculo. Estes problemas pontuais acabam sendo negligenciados e localizados de forma restrita por conta do pequeno tamanho dos elementos finitos de representação. No modelo de elementos finitos não é possível assegurar que todos os quatro parâmetros de cálculos sejam respeitados com exatidão, mesmo com a redução no tamanho e na elevação do número de elementos de malha.

2.5.1.1 Análise de Estruturas

“Para se obter a solução completa para uma estrutura hipotética é necessário atender as condições de compatibilidade de deslocamentos e de equilíbrio de forças e momentos. Para qualquer sistema com um número ‘n’ de deslocamentos nodais” (ZIENKIEWICZ, et al. 2013).

Segundo Zienkiewicz, et al. (2013), se todas as condições de equilíbrio forem satisfeitas nos nós dos elementos discriminados de qualquer estrutura as equações que governam o problema irão conter os deslocamentos como variáveis, e a partir do momento que forem resolvidas o problema é solucionado. Os esforços internos podem ser facilmente determinados utilizando as características estabelecidas para cada elemento.

2.5.1.2 Condições de Contorno

Segundo Zienkiewicz, et al. (2013), torna-se impossível solucionar um problema estático sem concluir a substituição de das condições de contorno que restringem os movimentos dos nós que representam os suportes da estrutura. Nesse caso os deslocamentos não podem ser determinados pelas forças em uma situação como essa. Esse fato pode ser interpretado matematicamente através de uma matriz K singular, sem possuir matriz inversa. A descrição dos deslocamentos apropriados após a fase de acoplamento permite que uma única solução seja obtida, excluindo-se as linhas e as colunas apropriadas das matrizes.

Quando todas as condições de contorno são inseridas nas equações do sistema, a solução pode ser apresentada a partir da determinação dos deslocamentos nodais, solucionando-se assim o problema das forças internas em cada elemento.

Com base no padrão geral utilizado para consolidar as relações de correlação dos parâmetros com base em equações matriciais discutidas nesse tópico, a Figura 2.8 indica cinco elementos discretos interconectados. Essa composição de malha genérica pode ser utilizada para um problema estrutural, elétrico, ou qualquer outro modelo linear (ZIENKIEWICZ et al. 2013).

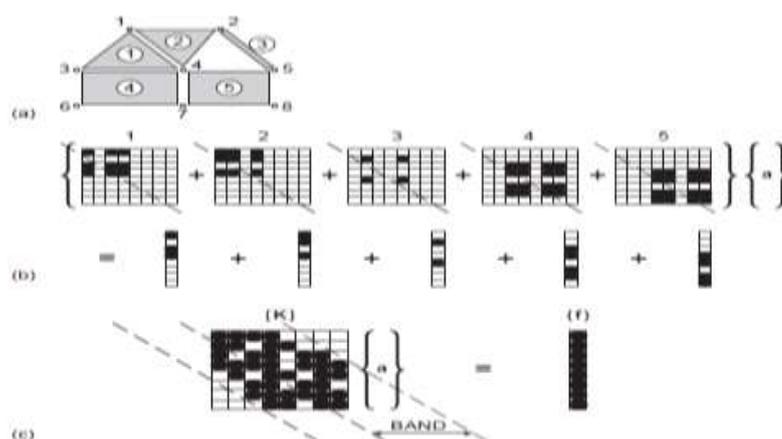


Figura 2.9 – Padrão geral dos elementos – (a) elementos, (b) elementos matriciais e (c) matriz global. Fonte: Zienkiewicz, et. al (2013).

2.5.2 Elemento de Superfície Utilizado na Análise

Dentro da análise empregada neste trabalho é extremamente necessária a definição dos elementos de superfície utilizados para representar as superfícies do casco das embarcações. O tipo de elemento acaba por ser classificado em função do seu número de nós, além de conter as características da geometria e do material que constitui a estrutura. Dentro da biblioteca podemos utilizar o elemento quadrilateral com quatro nós como é indicado na Figura 2.10.

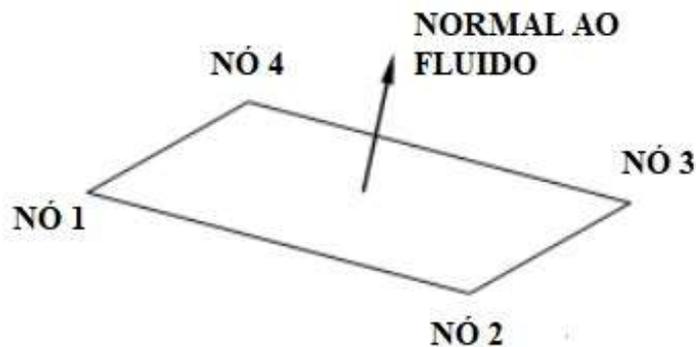


Figura 2.10 – Elemento de quatro nós utilizado pelo ANSYS AQWA (2017) para delimitação das superfícies de casco. Fonte: ANSYS (2017).

2.5.3 Elemento de Conexão (Cabos de amarração)

Os elementos de conexão entre cascos são representados por elemento tubulares como descritos na Figura 2.11.

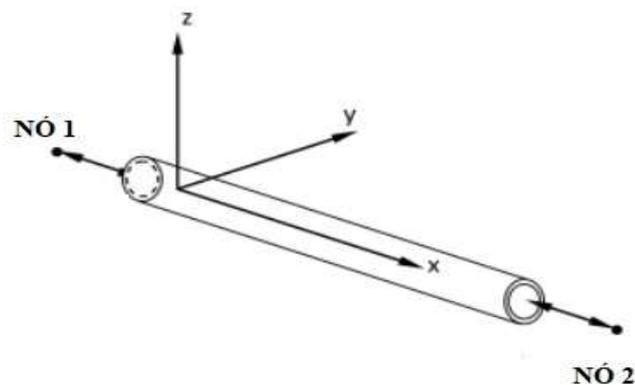


Figura 2.11 – Elemento com seção tubular representando os elementos utilizados pelo ANSYS AQWA (2017). Fonte: ANSYS (2017).

Um modelo simples numérico de conjunto de amarração é empregado, sendo definido com base na sua rigidez por unidade de comprimento, pelo comprimento do cabo não estendido e por dois pontos utilizados pelas linhas de amarração. Essa linha é considerada sem massa, e acaba sendo definida por uma linha reta. No que concerne a função matemática que rege o comportamento deste elemento, destacamos a seguinte relação dada pela Equação 2.8.

$$T = \begin{cases} K(L - L_0) & \text{se } L > L_0 \\ 0 & \text{se } L \leq L_0 \end{cases} \quad \text{Eq. 2.8}$$

Onde:

K : Rigidez por unidade de comprimento do cabo de amarração;

L_0 : Comprimento inicial do cabo de amarração modelado;

L : Alongamento definido pela relação $|X_1(t) - X_2(t)|$;

t : Variável que representa o tempo;

$X_1(t)$ e $X_2(t)$: Coordenadas dos pontos de atracação para cada um dos corpos flutuantes interligados.

Esse tipo de elemento apenas está sujeito a determinação de esforços de tração.

2.6 Metodologia de Modelação de Ondas

Conforme Menezes (2013), dentro da análise de corpos flutuando com amarrações, verificamos que tanto as unidades flutuantes como os elementos de amarração estão sujeitos a forças ambientais. Esses esforços são proporcionados por ventos, correntes e ondas para os corpos flutuantes, ao passo que os cabos estão sujeitos apenas aos efeitos de ondas e correntes. Nesta seção do trabalho, apresentamos a formulação para a representação dessas componentes.

2.6.1 Teoria Linear de Ondas

Segundo Menezes (2013) o modelo matemático que descreve o problema delimita pressões, velocidades e acelerações das partículas do fluido, sem considerar a presença de um corpo. Nota-se a presença de um modelo de interação do fluido com corpos flutuantes ou imersos, descritos pela teoria da difração, e determina as cargas no corpo que resultam da movimentação induzida pelas ondas. Na Figura 2.12 podemos verificar um exemplo de sistema de referência sobre a superfície livre de um volume de controle.

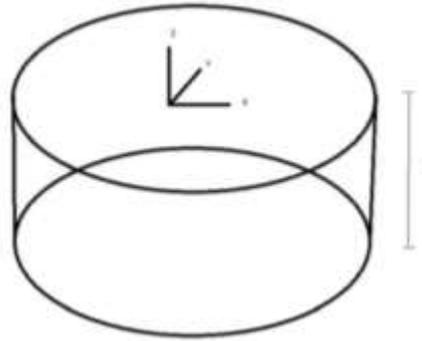


Figura 2.12 – Modelo de Representação do domínio fluido, de profundidade h , e do sistema de referências utilizados. Fonte: MENEZES (2013).

Com base em Faltinsen (1990), a teoria linear de ondas está estruturada com base na premissa de que o escoamento pode ser considerado incompressível, invíscido e irrotacional. Deste modo, o campo de velocidades no domínio do tempo pode ser representado através de uma função potencial que apresenta o formato descrito pela Equação 2.9.

$$\mathbf{V} = \nabla\phi = \frac{\partial\phi}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial\phi}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial\phi}{\partial z}\mathbf{k} \quad \text{Eq. 2.9}$$

Onde o operador gradiente ∇ é definido conforme a Equação 2.10:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z}\mathbf{k} \quad \text{Eq. 2.10}$$

Do modelo de irrotacionalidade verificamos conforme Menezes (2013) que o vetor da velocidade é escrito pela Equação 2.11 a seguir.

$$\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{V} \quad \text{Eq. 2.11}$$

De acordo com a teoria básica presente em Menezes (2013), argumenta-se que o fluido apresenta característica incompressível. Nesse caso, o divergente do campo de velocidades, sendo alcançado pelo produto escalar entre o operador gradiente e o vetor velocidades \mathbf{V} também é nulo, conforme notação indicada na Equação 2.12.

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad \text{Eq. 2.12}$$

A Equação descrita em 2.13, conforme Menezes (2013), é denominada Equação de Laplace¹, sendo válida em todo o domínio fluido. Acoplado-se as condições de contorno pode-se estabelecer um PVC, ou problema de valor de contorno.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \mathbf{i} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \mathbf{j} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \mathbf{k} \quad \text{Eq. 2.13}$$

Menezes (2013) descreve o campo de pressões com base na Equação de Bernoulli, que é válida para as considerações estabelecidas na definição do problema em relação ao regime de escoamento (incompressível, irrotacional e invíscido). Além disso, o único campo de forças externas atuante é o gravitacional e a constante C corresponde ao fator da pressão atmosférica na Equação 2.14.

$$p + \rho gz + \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\rho}{2} |\nabla \phi|^2 = C \quad \text{Eq. 2.14}$$

2.6.1.1 Condição de Contorno Cinemática na Superfície Livre

Para a modelagem da expressão que governa o comportamento da superfície livre dentro da condição de contorno cinemática, precisamos lembrar que a derivada material, conforme Menezes (2013), é dada pela Equação 2.15.

$$\frac{DF}{Dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla F \quad \text{Eq. 2.15}$$

Onde:

\mathbf{V} : Vetor do campo de velocidades;

T : instante de tempo.

Definimos a superfície livre pela Equação 2.16.

$$z = \xi(x, y, t) \quad \text{Eq. 2.16}$$

Onde:

ξ : Elevação da superfície livre.

Com isso, a função F pode ser escrita e mostrada com base na Equação 2.17.

¹ Conforme indicado em Menezes (2013) a equação de Laplace surge a partir da Equação de Navier-Stokes, após o procedimento de adoção das premissas de irrotacionalidade, incompressibilidade e ausência de viscosidade para o escoamento.

$$F(x, y, z, t) = z - \xi(x, y, t) = 0 \quad \text{Eq. 2.17}$$

Com base em Menezes (2013) a equação acima indica que uma partícula fluida pertencente à superfície livre permanece nela. Sendo a Função F igual a zero, a sua derivada material também é considerada nula, nesse caso as equações apresentam a forma indicada pela Equação 2.18.

$$\frac{\partial}{\partial t}(z - \xi(x, y, t)) + \nabla\phi \cdot \nabla(z - \xi(x, y, t)) = 0 \quad \text{Eq. 2.18}$$

2.6.1.2 Condição de Contorno Dinâmica na Superfície Livre

Para essa condição, Menezes (2013) afirma que a pressão na superfície livre é igual à pressão atmosférica (p_0) com base na Equação 2.19.

$$C = \frac{p_0}{\rho} \quad \text{Eq. 2.19}$$

Lembrando-se que esse fator estava relacionado com a constante C da Equação de Bernoulli (Eq. 2.11). Substituindo-se a Equação 2.19 na Equação 2.14 obtemos a condição de contorno dinâmica na superfície livre conforme indicado na Equação 2.20.

$$g\xi + \frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{1}{2}\left(\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial z}\right)^2\right) = 0 \text{ em } z = \xi(x, y, t) \quad \text{Eq. 2.20}$$

Conforme Menezes (2013), as equações indicadas logo acima apresentam termos não lineares. Ao assumirmos que a amplitude das ondas é pequena em relação aos seus comprimentos simplifica-se a solução do sistema. Essa aproximação é suficiente para resolver boa parte dos problemas práticos. Ao desprezarmos os termos não-lineares das condições de contorno cinemática e dinâmica, podemos descrever os termos conforme as Equações 2.21 e 2.22.

$$\frac{\partial\xi}{\partial t} = \frac{\partial\phi}{\partial z} \text{ condição cinemática em } z = 0 \quad \text{Eq. 2.21}$$

$$g\xi + \frac{\partial\phi}{\partial t} = 0 \text{ condição dinâmica em } z = 0 \quad \text{Eq. 2.22}$$

O AQWA apresenta um sistema simples de convenção de sinais. A direção das ondas é definida com base no ângulo do eixo X global positivo em relação a direção de propagação da onda, aferida no sentido anti-horário. Nesse caso, a onda se propagando

ao longo do eixo X (de $-X$ para $+X$) possui uma direção angular de 0° . Já as ondas se propagando ao longo do eixo Y (de $-Y$ para $+Y$), possuem direção de onda em 90° .

Forças e momentos são positivos na mesma direção dos movimentos correspondentes. A elevação de onda incidente é calculada pela Equação 2.23.

$$h = a \cdot \cos(-\omega t + kx \cdot \cos(\theta) + ky \cdot \sin(\theta)) \quad \text{Eq. 2.23}$$

Onde:

a : Amplitude de onda (m);

ω : Frequência de onda (rad/s);

t : Tempo (s);

k : Número de onda;

x e y : Posição da elevação de onda dada;

θ : Direção de propagação de onda.

2.6.1.3 Condição de Contorno no Fundo

Segundo Menezes (2013) para uma partícula fluída não é permitido penetrar através do leito marinho, sendo o fundo considerado para o cenário modelado para o problema. Esta condição de impenetrabilidade é definida matematicamente através da Equação 2.24. Deve-se atentar que essa é a condição de contorno do fundo, onde h representa a profundidade do volume de fluido considerado.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \text{ em } z = -h \quad \text{Eq. 2.24}$$

2.6.1.4 Solução do Problema de Valor de Contorno

Segundo Faltinsen (1990) o modelo acoplado para a condição de contorno linearizada na superfície livre, para a condição de contorno no fundo e a Equação de Laplace forma um Problema de Valor de Contorno, ou PVC.

Conforme descrito em Menezes (2013) uma solução analítica para o problema não é possível sendo necessário aplicar uma série de aproximações numéricas existentes na literatura. Dentro de uma delas, a função potencial é aproximada por uma Série de Potências que dependem do parâmetro de perturbação ε baseado na Equação 2.25.

$$\phi = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \phi_n \quad \text{Eq. 2.25}$$

O parâmetro ε descreve a declividade de onda e é dada pela Equação 2.26.

$$\varepsilon = \pi \frac{\xi_a}{\lambda} \quad \text{Eq. 2.26}$$

Onde:

ξ_a : Amplitude da onda;

λ : Comprimento de onda.

O número de onda (k) é dado pela Equação 2.27.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{Eq. 2.27}$$

Dessa forma o parâmetro de perturbação pode ser reescrito conforme a Equação 2.28.

$$\varepsilon = \frac{k\xi_a}{2} \quad \text{Eq. 2.28}$$

Por conseguinte, dentro da função potencial, a elevação de onda ξ também pode ser aproximada por uma série de potências conforme a Equação 2.29.

$$\xi = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \xi_n \quad \text{Eq. 2.29}$$

É empregado o método de separação de variáveis para a sua solução. Com base em Faltinsen (1990), a Equação 2.30, que expressa o potencial ϕ , satisfaz a Equação de Laplace e suas condições de contorno.

$$\xi = e^{kz} (A \cdot \cos(kx) + B \cdot \sin(kx)) \cos(\omega t + \alpha) \quad \text{Eq. 2.30}$$

2.6.2 Modelagem de Estados de Mar

Sabendo-se que o modelo matemático apresentado no tópico 2.7.1 trata apenas de um único trem de ondas, definido por sua altura H e o período T , caracterizando assim um estado típico de mar regular ou onda determinística conforme indicado por Menezes (2013).

A representação espectral de um estado de mar irregular é mais realista, além de ser mais utilizada nas simulações numéricas *offshore*. Neste modelo, o estado de mar irregular é representado pela superposição linear de várias componentes harmônicas de ondas regulares, com seus respectivos pares altura/período e fase. Ou seja, um mar irregular pode ser interpretado como uma superposição de diversos mares regulares. Para uma dada locação, medições e estudos estatísticos ajudam um modelo de espectro adequado para a representação da distribuição de densidade de energia apropriada das ondas do mar (MENEZES, 2013, pág. 37)

A formulação básica que define a expressão da energia espectral em função de uma faixa contínua de frequência de onda, dando a energia contida para um determinado estado de mar é dada pela Equação 2.31 conforme Menezes (2013).

$$E = \frac{\rho g}{8} H^2 \quad \text{Eq. 2.31}$$

Onde:

E : Energia por unidade de área harmônica;

ρ a densidade da água;

H a altura de onda;

g a aceleração da gravidade (9,806 m/s²).

Para n componentes harmônicas, a energia por unidade de área do estado de mar é dada pela Equação 2.32 conforme indicado por Menezes (2013).

$$E = \frac{\rho g}{8} \sum_{i=1}^n H_i^2 \quad \text{Eq. 2.32}$$

A Figura 2.13 mostra a constituição de um espectro de densidade de energia através das componentes harmônicas.

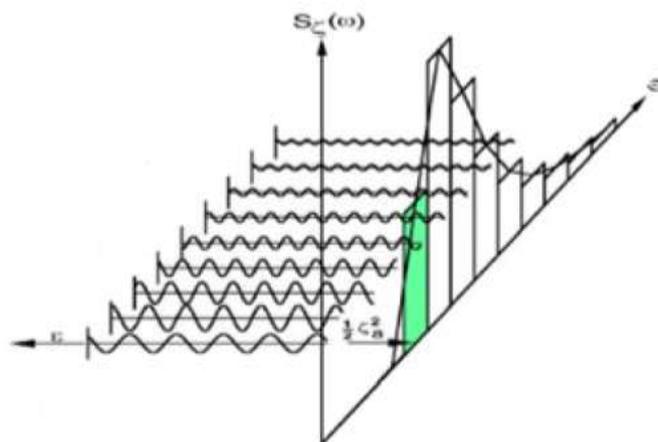


Figura 2.13 – Modelo de representação da obtenção do espectro de mar a partir das componentes harmônicas das elevações da superfície livre do estado de mar analisado. Fonte: Menezes (2013).

A área sobre a curva é numericamente igual à energia por unidade de área dada pela Equação 2.32. A região em destaque verde na Figura 2.13 corresponde à energia por unidade de área das componentes harmônicas do estado de mar. Para cada tipo de locação é possível utilizar um modelo espectral específico.

Conforme Menezes (2013) este modelo corresponde a um mecanismo estatístico que normalmente depende de parâmetros como altura significativa de onda (H_s), período entre picos (T_p), período entre zeros adjacentes (T_z), além de coeficientes adicionais de forma.

Segundo Menezes (2013) os espectros de mar mais utilizados para descrever o comportamento da costa brasileira são os de JONSWAP e Pierson-Moskowitz. As formulações desses espectros são descritas adiante através das Equações 2.33 e 2.34 respectivamente.

2.6.2.1 Espectro de Pierson-Moskowitz

Segundo Pinheiro (2015) *Pierson-Moskowitz* 1964 assumiram que caso o vento soprasse de maneira constante em um longo período de tempo e sobre uma área extensa, as ondas entram em equilíbrio com o vento. Este modelo corresponde a um modelo de mar totalmente desenvolvido, consistindo em estado de mar produzido por ventos que sopram de maneira constante por longas distâncias e por vários dias. Foram utilizadas medições de ondas feitas por acelerômetros em navios meteorológicos britânicos no Atlântico Norte.

$$S(\omega) = \frac{H_s^2}{4} \left(\frac{2\pi}{T_z}\right)^4 \omega^{-5} e^{-\left(\frac{2\pi}{T_z}\right)^4 \omega^{-4}} \quad \text{Eq. 2.33}$$

Conforme Menezes (2013), $S(\omega)$ corresponde à função densidade espectral, ω a frequência circular de onda, H_s a altura significativa de onda e T_z ao período entre zeros adjacentes. A Figura 2.14 demonstra um exemplo de espectro de *Pierson-Moskowitz*, relacionando a densidade espectral (em m^2/Hz) com uma determinada faixa de frequências, além da inserção do fator de velocidade do vento.

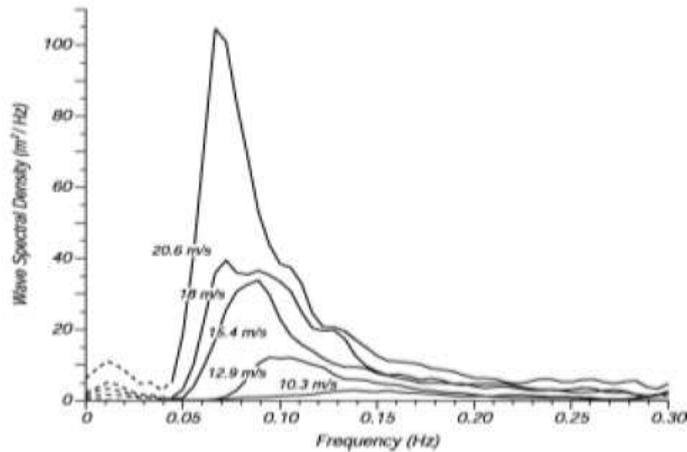


Figura 2.14 – Espectro de Pierson-Moskowitz para um mar totalmente desenvolvido com diferentes velocidades de vento. Fonte: Pinheiro (2015).

2.6.2.2 Espectro de JONSWAP

Em Pinheiro (2015) é informado que entre 1968 e 1969 um extensivo programa de medição de ondas, conhecido como *Joint North Sea Wave Project* (JONSWAP) foi realizado no mar do Norte. Dentro dessa análise foram obtidos dados de uma formulação espectral para ondas geradas por ventos limitados, conforme é indicada na Equação 2.34.

$$S(\omega) = \frac{320H_s^2}{T_p^4} \omega^5 e^{-1.25\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}} \gamma e^{-\frac{(\omega-\omega_p)^2}{2\sigma^2\omega_p^2}} \quad \text{Eq. 2.34}$$

Conforme Menezes (2013), $S(\omega)$ corresponde à função densidade espectral, ω a frequência de excitação, ω_p é a frequência circular de pico, γ corresponde ao fator de pico sendo normalmente igual a 3,3 e σ o parâmetro de forma dado pela Equação 2.35.

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a = 0,07, \text{ para } \omega \leq \omega_p \\ \sigma_b = 0,09 \text{ para } \omega > \omega_p \end{cases} \quad \text{Eq. 2.35}$$

No que se refere às ondas da Baía do Marajó, nas análises realizadas em Sogreah (2011), foi verificado que a altura de onda máxima, bem como sua variação são da ordem indicada pela Tabela 2-1.

Tabela 2-1 – Faixas de variação de altura de onda máxima dentro de uma faixa efetiva de velocidades de propagação de onda. Fonte: Sogreah (2011)

Velocidade de onda	Altura de onda	
	Efetiva	Variação
m/s	m	m
6	0,49	0,40 - 0,60
8	0,70	0,55 - 0,90
14	1,35	1,0 - 1,80
20	2,10	1,5 - 2,5

De acordo com a variação da altura de onda descrita na Tabela 2-1, a condição do estado de mar pode ser identificada na Tabela 2-2 com base na altura de onda.

Tabela 2-2 – Tabela de indicação dos níveis dos estados de mar, alocando a altura de onda como variável dependente de cada nível. Fonte: WMO.

Código de Estado de Mar (WMO)	Altura de Onda (m)	Condição
0	0	Calma (sem onda)
1	0 – 0,1	Calma (com onda)
2	0,1 – 0,5	Suave
3	0,5 – 1,25	Leve
4	1,25 – 2,5	Moderado
5	2,5 - 4	Irregular
6	4 - 6	Muito Irregular
7	6 - 9	Alto
8	9 - 14	Muito Alto
9	Mais de 14	Fenomenal

É evidente que de acordo com os dados indicados pela bibliografia de Sogreah (2011) é possível classificar a Baía do Marajó, de acordo com classificação da WMO², em estado de mar número 4 ou estado SS4, como é mundialmente convencionado.

2.6.3 Modelagem do Vento

Segundo Menezes (2013), existem duas maneiras de se modelar as cargas de ventos que atuam sobre uma estrutura flutuante. Primeiramente, devemos tratar o vento

² WMO – Organização Meteorológica Mundial.

constante em termos de direção e velocidade, ao passo que, no segundo procedimento, pode-se modelar o vento como uma composição de duas componentes: uma estacionária com base na velocidade média e outra variável com o tempo, sendo obtida através de formulações espectrais empíricas³.

Menezes (2013) afirma que cargas ambientais eólicas possuem períodos de excitação da ordem de 1 a 10 minutos, podendo induzir carregamentos dinâmicos para unidades flutuantes estáticas. O modelo de construção do espectro de vento se dá da mesma forma do espectro de mar. Nesse caso, são amostradas diversas frequências correspondentes as componentes harmônicas do espectro com densidade de energia conhecida.

Segundo informações contidas em El-Robrini et al. (2006), é possível identificar que o litoral norte do Estado do Pará sofre influência de ondas formadas a partir dos alísios, que, por regra geral, apresentam alturas de ondas abaixo de 1-1,5 m em mar aberto, tendo como embasamento os dados contidos em no CPTEC/INPE⁴.

Segundo Pinheiro (1987), na região da baía do Guajará, as ondas quebram com altura significativa de 1 m e períodos em torno de 8 segundos. A superfícies das águas nas proximidades da ilha de Mosqueiro, em condições de baixamar, é caracterizado como um sistema relativamente tranquilo, com presença de pequenas ondulações que não chegam a 0,3 m de altura.

2.6.4 Modelagem dos Esforços de Correnteza

Segundo Pinheiro (2015) a ação de correntezas sobre embarcações tem três componentes: forças de pressão, forças de atrito e forças induzidas por fenômenos de instabilidade dinâmica, sendo que estas últimas são difíceis de quantificar. De outra forma, os efeitos das correntes se traduzem na alteração do perfil de agitação marítima.

A Equação 2.36 mostra a relação de forças devido a correntezas com relação aos coeficientes das embarcações.

³ Conforme identificado por Menezes (2013) existem recomendações de Sociedades Classificadoras para se representar a ação dos ventos de maneira constante. Neste caso, deve-se utilizar a velocidade média para rajadas de 1 minuto. Para parcelas espectrais, considera-se um intervalo de tempo de 1 hora. Nos dois casos, as rajadas são medidas a uma altura de 10 metros acima do nível do mar.

⁴ CPTEC -Centro de Pesquisa de Tempo e Estudos Climáticos; INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

$$F_i^C = \frac{\gamma_{\text{água}}}{2g} C_{ic} U_C^2 D L_{pp} \quad \text{Eq. 2.36}$$

Onde:

F_i^C : Componente segundo a força aplicada sobre a embarcação devido à corrente (KN);

C_{ic} : Fatores de forma de embarcações;

U_C : Módulo da velocidade média da corrente;

D : Calado da embarcação (de nomenclatura - *Draft*);

L_{pp} : Comprimento entre perpendiculares.

2.6.5 Teoria Potencial

2.6.5.1 Potencial de Velocidades

Com base em Skandali (2015), a massa adicional e os coeficientes de amortecimento, bem como as forças de ondas são determinadas com a partir da distribuição de pressão ao longo do casco, que provém da Equação 2.37 que acopla os potenciais de velocidades. O potencial de um corpo flutuante é expresso como uma soma dos potenciais da onda incidente não perturbada (ϕ_w), do potencial devido a difração de uma onda incidente (ϕ_d) e do potencial de radiação devido aos seis movimentos do corpo flutuante ϕ_r .

$$\phi = \phi_r + \phi_w + \phi_d \quad \text{Eq. 2.37}$$

Deve se atentar que o fluido é assumido como incompressível, invíscido e irrotacional sem nenhum efeito de tensão de superfície livre. Ademais, a teoria potencial é desenvolvida para ondas regulares unidirecionais. Utilizando os potenciais de velocidade, as pressões hidrodinâmicas na superfície do corpo podem ser obtidas a partir da Equação de Bernoulli linearizada conforme a Equação 2.38 (SKANDALI, 2015).

$$P = -\rho \frac{d\phi}{dt} - \rho g z = -\rho \left(\frac{d\phi_r}{dt} + \frac{d\phi_w}{dt} + \frac{d\phi_d}{dt} \right) \quad \text{Eq. 2.38}$$

Onde:

ρ : Densidade da água;

g : aceleração da gravidade;

z: profundidade.

Deve-se atentar que a integração da pressão sobre a superfície submersa \mathbf{S} do corpo resulta em forças e momentos hidrodinâmicos, como visto na Equação 2.39.

$$F_{total} = - \iint (\rho * \mathbf{n}) \cdot dS = \rho \iint \left(\frac{d\phi_r}{dt} + \frac{d\phi_w}{dt} + \frac{d\phi_d}{dt} + \rho g z \right) \mathbf{n} \cdot dS \quad \text{Eq. 2.39}$$

Onde \mathbf{n} é a matriz de direção dos cossenos do elemento de superfície dS representada pela Equação 2.40.

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} \cos(n, x) \\ \cos(n, y) \\ \cos(n, z) \\ y\cos(n, z) - z\cos(n, y) \\ z\cos(n, x) - x\cos(n, z) \\ x\cos(n, y) - y\cos(n, x) \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 2.40}$$

2.6.5.2 Segunda Lei de Newton

Com base na segunda lei de Newton descrita na Equação 2.41, o comportamento do cenário do problema pode ser descrito a partir da subdivisão em componentes de solicitações provindos de diferentes ambientes.

$$M \cdot \ddot{X}(\omega) = F_{total} \quad \text{Eq. 2.41}$$

Neste caso, as forças e os momentos hidrodinâmicos podem ser divididos em quatro partes com base na Equação 2.42.

$$M \cdot \ddot{X}(\omega) = F_r + F_w + F_d + F_s \quad \text{Eq. 2.42}$$

Onde:

F_r: Forças e Momentos hidrodinâmicos devidos à radiação de ondas provocadas pela oscilação do corpo flutuante;

F_w: Forças e Momentos hidrodinâmicos devidos ao movimento do corpo provocado pela aproximação de ondas não perturbadas;

F_d: Forças e Momentos devidos às ondas difratadas;

F_s: Forças e Momentos devidos à Flutuação hidrostática.

As forças e momentos que estão associados com o potencial de radiação também podem ser expressos em termos do potencial de massa e do amortecimento potencial. A explicação a partir da equação de movimento pode ser visualizada em *Skandali* (2015) e é mostrada na Figura 2.15.

$$\begin{array}{c}
 -A(\omega) \cdot \ddot{X}(\omega) - B(\omega) \cdot \dot{X}(\omega) \\
 \uparrow \\
 M \cdot \ddot{X}(\omega) = F_{total} = F_r + F_w + F_d + F_s \\
 \downarrow \\
 -C \cdot X(\omega)
 \end{array}$$

Figura 2.15 – Delimitação da Relação das Forças de Radiação e Flutuação com os Termos de Amortecimento e Rigidez Hidrostática, respectivamente. Fonte: Skandali (2015)

Nesse caso, se o potencial de velocidades devido aos movimentos nos seis graus de liberdade é conhecido, a massa adicional e os coeficientes de amortecimento podem ser calculados.

2.7 Aspectos Gerais sobre os Movimentos de Embarcações

De maneira tradicional, é considerado que o movimento de uma embarcação compreende uma combinação complexa dentro de seis graus de liberdade dependentes entre si como é indicado na Figura 2.16.

Surge – Avanço (x): movimento linear ao longo de seu eixo longitudinal;

Sway – Deriva (y): movimento linear ao longo de seu eixo transversal;

Heave – Arfagem (z): movimento linear ao longo de seu eixo vertical;

Roll – Balanço (ϕ): movimento de giro do corpo em torno de seu eixo longitudinal;

Pitch – Cabeceio (θ): movimento de giro do corpo em torno de seu eixo transversal;

Yaw – Guinada (ψ): movimento de giro do corpo em torno de seu eixo vertical.

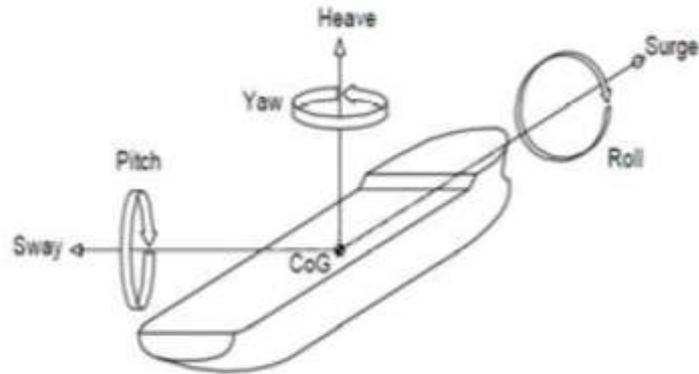


Figura 2.16 – Delimitação dos seis graus de liberdade de um corpo flutuante.
Fonte: Menezes (2013).

Conforme Menezes (2013) os movimentos são frequentemente agrupados segundo seu plano de atuação: para o plano horizontal (avanço, deriva e guinada) ou para o plano vertical (arfagem, balanço e cabeceio). É importante frisar que Pinheiro (2015) aponta que qualquer movimento imposto a embarcações livres no plano horizontal não origina forças ou momento de restituição, tendo em vista que a posição relativa dos centros de empuxo e de gravidade se mantém inalterada. Já para os movimentos no plano vertical, são originados momentos que obrigam a embarcação regressar à sua posição inicial de equilíbrio.

Com isso em mente podemos descrever a fundamentação matemática que rege a complexa área de movimentação de embarcações em estado livre ou amarradas quando excitadas por fatores ambientais externos.

2.7.1 Análise no Domínio da Frequência

Conforme Menezes (2013) as forças externas são classificadas de acordo com a restauração hidrostática, a força de excitação de onda e a reação do meio fluido aos movimentos do corpo (forças de irradiação). Ao substituímos estas componentes na Equação 2.41, isolando a força externa para o segundo membro e agrupando os termos proporcionais à aceleração, velocidade e deslocamento no primeiro membro, encontramos a Equação 2.43.

$$\left((M_{j,k} + A_{j,k}(\omega)) \ddot{x}_j + (B_{j,k}(\omega) + B_{ex j,k}) \dot{x}_j + (C_{j,k} + C_{ex j,k}) x_j \right) = F_j^{ext} \quad \text{Eq. 2.43}$$

j e k: correspondem aos graus de liberdade variando de 1 a 6;

M: Matriz que agrupa os termos de massa do navio, tomando a forma de momento de inércia para movimentos rotacionais;

A: Corresponde a matriz massa-adicional de água deslocada oriundo do potencial de movimentação do navio;

B: É a matriz que constitui a soma das matrizes de amortecimento potencial obtida a partir do potencial de irradiação;

B_{ex} : Corresponde a matriz de amortecimento externo, que é independente da frequência, útil para incluir termos viscosos que não são cobertos pela teoria potencial;

C: Corresponde a matriz de restauração hidrostática, dependendo das formas do casco;

C_{ex} : Matriz de restauração externa. Pode ser utilizada para incluir efeitos de restauração que não se devem a geometria do casco em si (linhas de ancoragem, por exemplo);

F: Informa os valores das forças de excitação, sendo composta pela soma das forças devido aos potenciais de onda incidente e de difração.

Nos Anexos estão indicadas as matrizes que descrevem os parâmetros de inércia, amortecimento e restauração hidrostática presentes na Equação 2.43.

Com base em Pinheiro (2015) e Menezes (2013), ao supor que as forças de excitação são harmônicas no tempo conforme a Equação 2.44.

$$F = f_j e^{-i\omega t + \delta} \quad \text{Eq. 2.44}$$

Nesse caso os deslocamentos também apresentarão comportamento harmônico conforme Equação 2.45.

$$X = x e^{-i\omega t + \varphi} \quad \text{Eq. 2.45}$$

As expressões que descrevem o comportamento das velocidades e das acelerações são obtidas através das derivadas de deslocamento conforme as Equações 2.46 e 2.47.

$$\dot{X} = -ix\omega e^{-i\omega t + \varphi} \quad \text{Eq. 2.46}$$

$$\ddot{X} = -x\omega^2 e^{-i\omega t + \varphi} \quad \text{Eq. 2.47}$$

Substituindo-se as componentes harmônicas das Equações 2.46 e 2.47 na Equação 2.43 obtemos a Equação 2.48.

$$(-\omega^2 \cdot (M_{j,k} + A_{j,k}(\omega)) - i\omega(B_{j,k}(\omega) + B_{ex j,k}) + (C_{j,k} + C_{ex j,k}))x e^{-i\omega t + \varphi} = f_j e^{-i\omega t + \delta}$$

Eq. 2.48

Com base na Equação 2.43 os coeficientes de massa adicional e de amortecimento potencial variam com a frequência e com o grau de liberdade. As forças de excitação e os deslocamentos são dependentes da frequência, da direção da onda incidente e do grau de liberdade. Os RAOs (*Response Amplitude Operators*) são obtidos a partir da relação apresentada na Equação 2.49.

$$x = \frac{f}{(-\omega^2(M_{j,k} + A_{j,k}(\omega)) - i\omega(B_{j,k}(\omega) + B_{ex j,k}) + (C_{j,k} + C_{ex j,k}))}$$

Eq. 2.49

O deslocamento x dado pela Equação 2.49 é um número complexo, onde pode ser obtido o módulo e a fase a partir da composição das parcelas reais e imaginárias, respectivamente.

2.7.2 Análise no Domínio do Tempo

Para realizar tal procedimento (Simulação multi-corpos no domínio do tempo) segue-se o passo a passo abaixo retirado do *Principles of Naval Architecture. Volume III*.

- Análise de difração dentro da teoria multi-corpos no domínio da frequência para calcular a inércia (**M**), a massa adicional (**A**), o amortecimento (**B**), as forças de ondas provindas dos RAOs, além das funções quadráticas de transferência (QTFs). As forças de deslizamento são calculadas pelo método de integração de pressão;
- Preparação dos termos hidrostáticos para todos os corpos;
- Cálculo das funções de retardamento no domínio do tempo a partir dos valores de massa adicional e dos valores de amortecimento no domínio da frequência;
- Preparação da rigidez, do amortecimento e fricção do sistema (para modelos considerando os efeitos viscosos);
- Cálculo dos traços temporais das forças de ondas dos RAOs e dos movimentos de baixa frequência (QTFs) tomando como base o espectro

de onda. Esses traços temporais são calculados prioritariamente para a simulação ser efetuada;

- Análise e performance da simulação no domínio do tempo;
- Os termos de amortecimento viscoso são importantes e não podem ser calculados com ferramentas computacionais. (Os movimentos de baixa frequência provindos de forças viscosas provindas de índices de baixas frequências).

Deve-se atentar para o fato de que os movimentos de alta frequência são calculados em análises no **domínio da frequência**, e os movimentos de baixa frequência são determinados em análises no **domínio do tempo**.

Com base no *Principles of Naval Architecture. Volume III – Motions in Waves and Controllability* (1989), os coeficientes hidrodinâmicos para análises corpo-a-corpo possuem mais efeitos nos movimentos horizontais que não possuem termos de restauração como *Surge, Sway e Yaw*.

Para qualquer cálculo de movimentação de navios, a determinação dos coeficientes da força de excitação e de amplitudes de movimentos, representam o problema principal que pode ser simplificado com a teoria de subdivisão da embarcação em seções. Os coeficientes de massa adicional e de amortecimento potencial, para cada seção, são calculados facilmente utilizando-se a teoria bi-dimensional da hidrodinâmica. Assim, a análise linear de movimento das embarcações nos garante uma excelente previsão sobre grande número de condições de excitação de ondas sobre diversas formas de cascos.

Conforme Pinheiro (2015) a partir da resolução das equações de movimento do navio no domínio do tempo é possível incluir todas as não linearidades do sistema de amarração, do amortecimento viscoso e das forças de arrasto. Após a determinação das funções de resposta para o impulso, é necessário determinar a série temporal das forças exercidas pela agitação incidente na embarcação imobilizada.

A equação dos movimentos no domínio do tempo é descrita em função dos coeficientes hidrodinâmicos obtidos a partir da análise no domínio da frequência. Estes, por sua vez, incorporam a interação entre os corpos flutuantes de modo que uma simulação multi-corpos no domínio do tempo apresenta como ponto de partida fundamental a análise no domínio da frequência.

Após realizada a análise no domínio da frequência, as matrizes e os vetores da Equação dos movimentos no domínio do tempo devem ser expandidos até a ordem 6N. A seguinte relação de parâmetros é retirada de Menezes (2013) e apresenta o formato com base na Equação 2.50.

$$[A'_{ij} + M_{ij}]\ddot{x}_j + \int_0^t K_{ij}(t - \tau)\dot{x}_j d\tau + C_{ij}x_j = F_{excj} \quad i,j = 1 \dots 6N \quad \text{Eq. 2.50}$$

Dentro desta equação a matriz de massa M_{ij} é acrescida do termo de massa adicional A'_{ij} , além de serem calculadas as matrizes contendo as integrais de convolução com a função de memória dadas pelas Equações 10.13 e 10.14 nos Anexos do trabalho, respectivamente. A matriz de rigidez hidrostática [C] é dada pela Equação 10.16 e não apresenta diferenças em relação à sua definição no domínio da frequência (MENEZES, 2013). A força de excitação F_{excj} para um sistema multi-corpos, corresponde a um vetor de dimensão 6N dado pela Equação 2.51.

$$F_{exc} = \begin{Bmatrix} F_{exc1} \\ \vdots \\ F_{exc6N} \end{Bmatrix} \quad \text{Eq. 2.51}$$

Nesse caso a força arbitrária no tempo é obtida a partir de funções de transferência e do espectro de mar. Segundo Menezes (2013) a força externa provém do potencial de difração e da onda incidente, ao se efetuar uma análise multi-corpos a integração de pressões é feita com base em potenciais que agrupam a interação entre os corpos através de suas ondas difratadas e irradiadas. Assim, é garantido o acoplamento hidrodinâmico no domínio da frequência, este será imediatamente levado em consideração na passagem para o domínio do tempo através de funções de transferência.

2.7.3 Análise de Sistemas Multi-corpos.

Para uma análise com vários corpos flutuantes, primeiramente deve-se expandir as Equações dadas no tópico 2.7.1 para os seis graus de liberdade, até a ordem N, onde N número de corpos flutuantes envolvidos neste problema. A Figura 2.17 ilustra um exemplo de modelagem multi-corpos no software WAMIT.

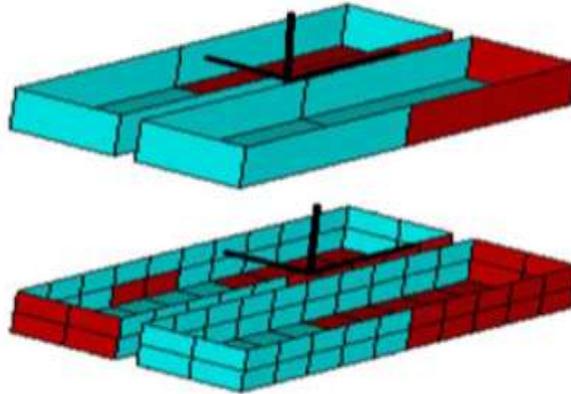


Figura 2.17 – Superfície de dois corpos flutuantes posicionados lado a lado para uma análise multi-corpos no programa WAMIT. Fonte: Menezes (2013).

O amparo matemático é dado pelas equações presentes nos subtópicos 2.7.3.1 e 2.7.3.2, retiradas de Menezes (2013).

2.7.3.1 Cálculo das Forças Hidrodinâmicas

O cálculo da pressão hidrodinâmica dentro da análise multi-corpos pode ser representado com base na Equação 2.52.

$$P = -i\omega\rho[\phi_w + \phi_d + \sum_{j=1}^{6N} \phi_j n_j] \quad \text{Eq. 2.52}$$

A força de excitação do sistema pode ser representada pelo resultado da soma das integrais de pressão devido aos potenciais de onda incidente e de difração. A Equação 2.53 descreve essa relação.

$$F_{excj}(\omega) = i\omega\rho e^{-i\omega t} \int_S (\phi_w + \phi_d) n_j dS \quad j = 1 \dots 6N \quad \text{Eq. 2.53}$$

A integração das pressões provindas dos potenciais de irradiação forma a Equação 2.54.

$$F_{irr}(\omega) = i\omega\rho \int_S (\phi_j) n_j dS \quad j = 1..6N \quad \text{Eq. 2.54}$$

Retirando-se de Menezes (2013) a relação de semelhança entre uma análise multi-corpos e uma análise de um corpo só, obtemos a Equação 2.55 que ilustra os termos de massa adicional e de amortecimento potencial, provindos da integração da força gerada pela integração de pressão devido ao potencial de irradiação.

$$[\omega^2 A_{k,j}(\omega) + i\omega B_{k,j}(\omega)] = i\omega\rho \int_S (\phi_j) n_j dS \quad j, k = 1..6N \quad \text{Eq. 2.55}$$

É possível descrever os termos $A_{k,j}(\omega)$ e $B_{k,j}(\omega)$ em termos de parcelas reais e imaginárias a partir do potencial de irradiação, conforme indicam as Equações 2.56 e 2.57.

$$A_{kj}(\omega) = \text{Re} \left[i \frac{\rho}{\omega} \int_S (\phi_j) n_j dS \right] \quad \text{Eq. 2.56}$$

$$B_{kj}(\omega) = \text{Im} \left[i \frac{\rho}{\omega} \int_S (\phi_j) n_j dS \right] \quad \text{Eq. 2.57}$$

2.7.3.2 Equação dos Movimentos

Passando para o cálculo matricial, expandimos as grandezas vetoriais e matriciais da Equação 2.56 para a ordem $6N$. Ao assumirmos que as forças e os deslocamentos são harmônicos, da mesma forma que na análise pelo domínio da frequência, conforme Menezes (2013), a equação do movimento é escrita conforme a Equação 2.58.

$$\left[(-\omega^2 [M_{j,k} + A_{j,k}(\omega)]) - i\omega (B_{j,k}(\omega) + B_{exj,k}) + (C_{i,k} + C_{exj,k}) \right] x e^{-i\omega t + \varphi} = F_j e^{-i\omega t} \quad \text{Eq. 2.58}$$

A Equação 2.58 apresenta a solução acoplada do problema hidrodinâmico multi-corpos. É interessante notar que as ondas incidentes no sistema, ao serem difratadas devido à presença de um dos corpos, funcionam como ondas incidentes nos outros. Isto também ocorre para ondas irradiadas devido ao movimento de um dos corpos, que ao se propagarem, se sobrepõem às ondas difratadas e incidentes, intensificando a excitação recebida pelos corpos restantes (MENEZES, 2013).

Os vetores que contém as forças de dimensão $6N$ possuem contribuições de atenuação, assim como de intensificação, dependendo da onda incidente. Conforme Menezes (2013), o mesmo raciocínio é aplicado para a Equação 2.38, onde as matrizes de massa adicional e amortecimento potencial obtidas estão afetadas pela presença de todos os corpos.

Segundo Menezes (2013), uma onda não perturbada incidindo de proa sobre embarcações posicionadas lado a lado acaba gerando carregamento lateral sobre as mesmas, o que não aconteceria se as mesmas fossem analisadas isoladamente. Os *RAOs*, ou *Response Amplitude Operator*, para o deslocamento (x) passam a ser diferentes de zero

para os movimentos de *Roll*, *Sway* e *Yaw*, mesmo para mares incidindo sobre a proa da embarcação. Para ondas incidindo de través⁵ há ocorrência de *Pitch* e *Surge*.

A presença de outros corpos altera os parâmetros de massa adicional. O amortecimento potencial na frequência natural $B_{j,j}(\omega_n)$, bem como a parcela viscosa $B_{ex,j,j}$, também são afetados pela presença de um sistema de vários corpos flutuantes. Os efeitos divergentes no que se refere ao comportamento dinâmico das embarcações quando comparados com análise de sistemas flutuantes solitários se refletem nas curvas de RAOs, e são mais significativos quanto maior for o porte das unidades flutuantes e menor for a distância entre os cascos (Menezes, 2013).

2.7.4 Metodologia de Simulação das Defensas de Contato

Segundo Menezes (2013) as defensas somente atuam quando a distância entre as unidades flutuantes seja menor que a dimensão transversal da própria defesa. Caso contrário, as forças de reação normal e tangencial são contabilizadas como nulas. É necessário o desenvolvimento de um modelo de contato geométrico capaz de identificar o toque entre as embarcações e as defensas, assim como um modelo físico, que em um estágio posterior ao contato, seja capaz de mensurar adequadamente as forças de reação e os atritos provindos do sistema de defensas.

Assim dizendo, a própria biblioteca do *ANSYS AQWA* (2017) informa que a função polinomial que rege o comportamento das defensas no programa é indicada por um polinômio de quinta ordem. A Equação 2.59 informa a relação, com os respectivos coeficientes de amortecimento de cada grau de deflexão.

$$T = \begin{cases} K_1(\Delta L) + K_2(\Delta L)^2 + K_3(\Delta L)^3 + K_4(\Delta L)^4 + K_5(\Delta L)^5, & \text{se } L > L_0 \\ 0 & \text{se } L \leq L_0 \end{cases} \quad \text{Eq. 2.59}$$

Onde:

L_0 : Comprimento da defesa antes da deflexão ΔL ;

T : Esforço de compressão de reposta nas defensas.

⁵ Través é o termo utilizado dentro da área naval para classificar mares incidindo perpendicularmente ao eixo longitudinal de embarcações.

Nesse caso, a simulação com cascos próximos uns aos outros, deve ser realizada com base no risco de choque entre estes cascos. Segundo Menezes (2013) para uma análise de dois cascos seriam necessárias uma malha superficial para o estudo hidrodinâmico, e outra para a verificação da condição de contato para embarcação. Assim, a defesa pode ser tratada como sendo composta por um material visco-elástico, e para este caso, pode ser interpretada como uma associação entre um elemento rígido e um amortecedor, como está indicado na Figura 2.18.

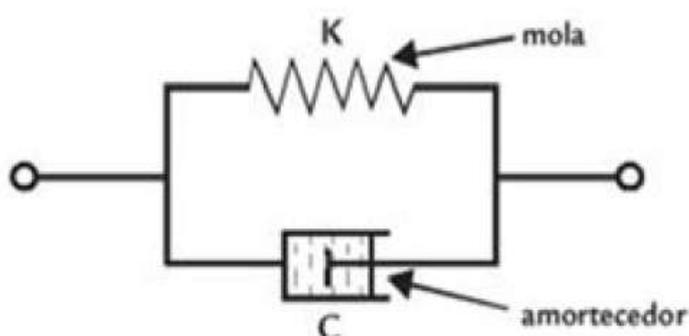


Figura 2.18 – Modelo de representação da defesa através de associação entre um elemento de mola e um amortecedor. Fonte: Menezes (2013).

Segundo Menezes (2013), ao passar da simulação acoplada no tempo, a distância entre os corpos é mensurada. Nesse caso, se houver contato entre uma embarcação com alguma defesa, é possível obter a velocidade da embarcação e, portanto, sua energia cinética. Nesse caso, as componentes normais e tangenciais são utilizadas para determinação dos esforços nessas duas direções.

Retirando-se de Menezes a Equação 2.60 abaixo informa o comportamento viscoelástico da defesa, onde F_n é justamente o resultado da soma das parcelas de elasticidade e de amortecimento.

$$F_n = k\mathbf{n} + c\dot{\mathbf{n}} \quad \text{Eq. 2.60}$$

Onde \mathbf{n} corresponde a deformação na defesa, \mathbf{k} é o termo de rigidez, \mathbf{c} o coeficiente de amortecimento da defesa e $\dot{\mathbf{n}}$ a velocidade de deformação da defesa.

3 MODELOS DE MECANISMOS DE ATRACAÇÃO DE CORPOS FLUTUANTES

Dentro da área de modelos de atracação de barcaças é interessante estudar os diversos tipos de mecanismos utilizados, ou mesmo criados em forma de patentes, para facilitar as condições de operação de objetos flutuantes que necessitam de modelos de acoplamento bem definidos.

3.1 Mecanismo Portátil de Atracação de Balsas

Um sistema de conexão entre barcaças deve atender a uma série de critérios operacionais e particulares dos usuários e proprietários das embarcações. A utilização de sistemas de atracação com opções flexíveis pode satisfazer essas condições durante operações de transporte de cargas diárias. A Figura 3.1 mostra um modelo de formação de balsas para transporte de carga no convés que apresentam mecanismos simples e práticos para a tripulação. Salienta-se o fato da minimização de pessoal necessário para acoplar o sistema conector ao longo de toda a formação do comboio.

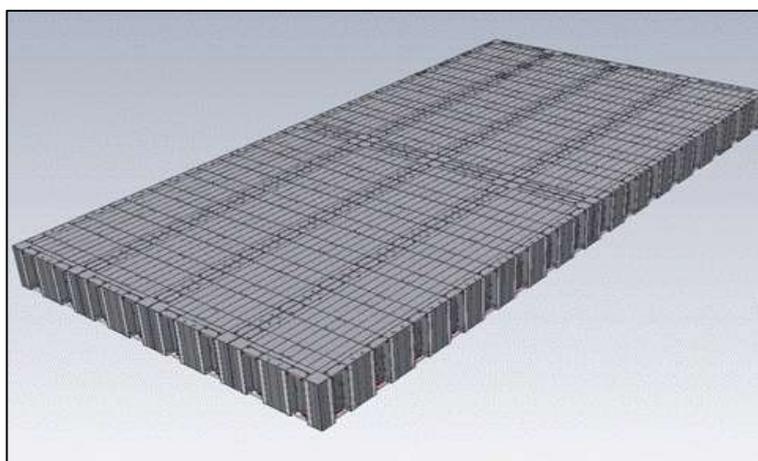


Figura 3.1 – Sistema de balsas de pequeno porte.

Fonte: AMERICAN BARGES, LLC. http://americanbarges.com/index_files/Page442.html.

As balsas que formam esse sistema possuem 40 pés (12,20 m) de comprimento e 10 pés (3,00 m) de boca e possuem características portáteis. Projetadas para o transporte de carretas no convés, esses modelos de embarcações podem ser facilmente conectados e transformados em plataformas de transportes de grandes dimensões.

Esse sistema é apresentado e patenteado pela empresa *AMERICAN BARGES LINE COMPANY, LLC*, sendo esta uma empresa de transporte de diversos tipos de materiais,

como: carvão, granéis sólidos e líquidos, produtos de aço e minérios sediada nos Estados Unidos da América, em *Jacksonville*, Flórida. O sistema de acoplamento é ilustrado na Figura 3.2.

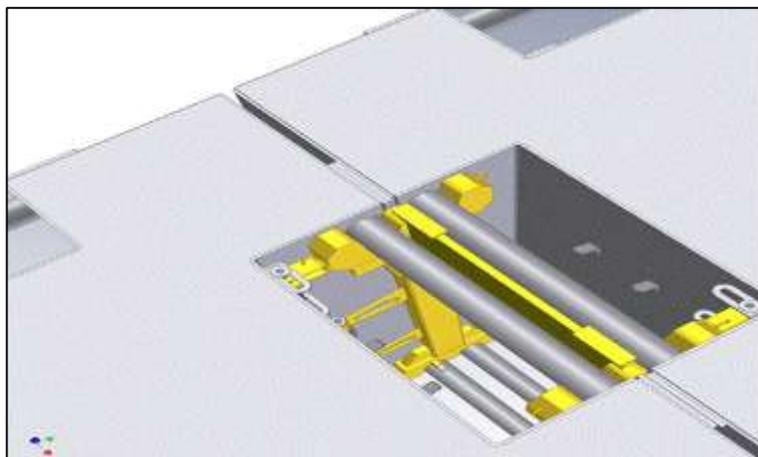


Figura 3.2 – Identificação do modelo tridimensional do mecanismo de acoplamento simples.

Fonte: AMERICAN BARGES, LLC.

http://americanbarges.com/index_files/Page442.html.

A Figura 3.2 apresenta o sistema acionado, sendo que esse modelo é totalmente mecânico, não possuindo mecanismos automáticos de acionamento. De acordo com os mecanismos apresentados é possível identificar o sistema de acoplamento a partir de outro ângulo como é ilustrado na Figura 3.3.

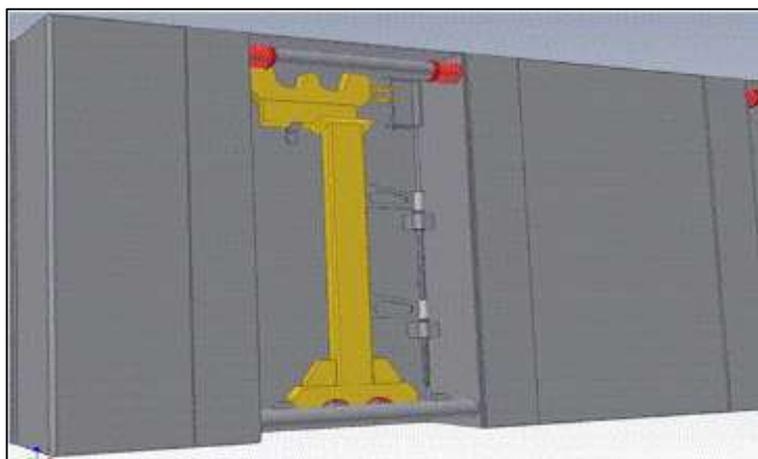


Figura 3.3 – Ilustração em perspectiva do sistema de acoplamento.

Fonte: AMERICAN BARGES, LLC.

http://americanbarges.com/index_files/Page442.html.

Como desvantagens deste sistema de comboios modulares de balsas podemos citar a presença de detritos rochosos, materiais providos da região de carga como peças de concreto e de aço, que podem vir a adentrar na região do acoplamento entre as

embarcações. Dessa forma, problemas de conexão são criados dificultando a operação e aumentando os custos com base no tempo gasto com reparos.

3.2 Sistema de Atracação por Mecanismo Pneumático

Segundo o modelo de patente para sistemas de acoplamentos entre barcas publicado por Capron (1990), indicado pela Figura 3.4, é possível acoplar duas embarcações distintas utilizando um sistema de chapas de material metálico dispostas paralelamente entre si em relação a um eixo transversal de referência. Dentro deste modelo a atracação seria de proa-popa, dispoendo de três chapas acopladas por diversos cabos de aço em atracação diagonal cruzada, onde uma terminação dos cabos é posicionada em um canto de chapa integrada a embarcação e outra fica acoplada a segunda chapa intermediária entre as barcas.

Na Figura 3.4 a descrição do sistema é apresentada indicando-se os elementos de rigidez e de amortecimento.

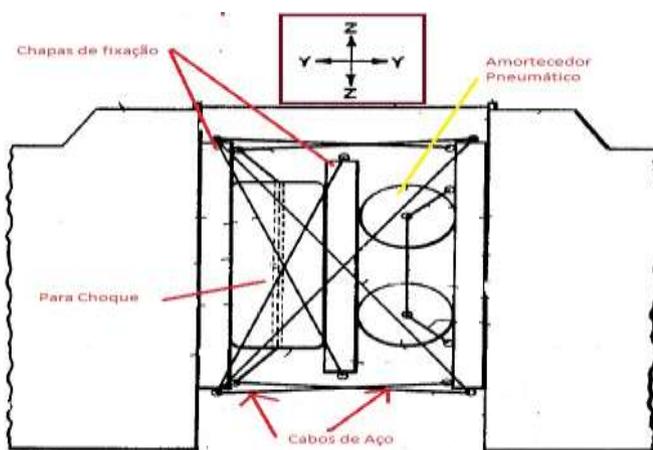


Figura 3.4 – Identificação do sistema de chapas, cabos e para-choques.
Fonte: United States Patent, Capron (1990).

Segundo Capron (1990), o sistema é posicionado verticalmente entre a primeira e a segunda chapa de aço (no sentido da direita para a esquerda do eixo Y, com a presença de um primeiro par de para-choques pneumáticos que são rotativamente montados sob a primeira chapa. Um segundo elemento de amortecimento é presente entre o segundo par de chapas configurando assim as características de amortecimento dos elementos.

3.3 Sistemas de Atracação Portuário a Vácuo

O sistema de atracação a vácuo propicia flexibilidade similar aos cabos de aço mantendo ainda a componente de atracação horizontal, paralela ao eixo longitudinal da embarcação, que mantém a embarcação ancorada com segurança. O movimento de arfagem (*Surge*) do navio é resistido por cilindros hidráulicos incorporados ao sistema que funcionam como amortecedores de atuação passiva, limitando a ação dos esforços verticais do sistema global que representa a embarcação.

Segundo Clark et al. (2009), sensores de monitoramento integrados ao sistema acabam por auxiliar operadores portuários sobre indicações de perigos de desatracação nos mecanismos de acoplamento que mantêm a embarcação em contato com as defensas do porto. A Figura 3.5 mostra um esquema planificado do mecanismo de controle desse aparelho e uma vista em perspectiva do aparelho de contato para atracação.

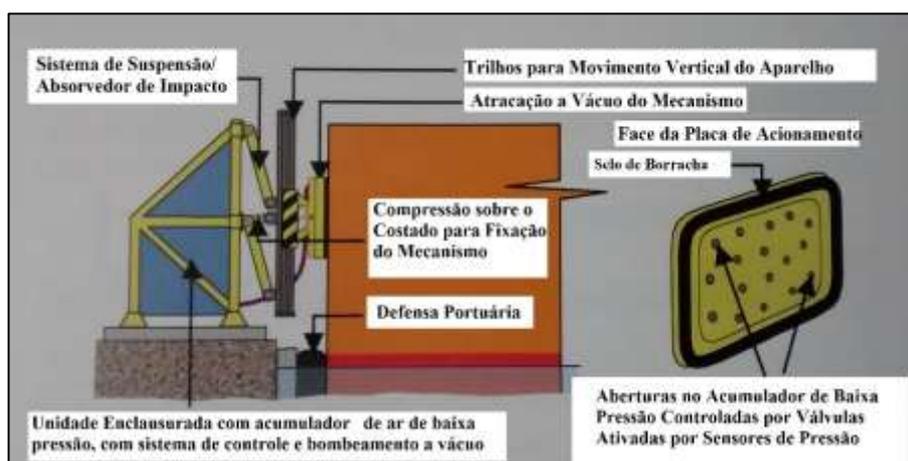


Figura 3.5 – Unidade de Conteção e Acumulação de alta pressão a ar. Fonte: *Mooring and Anchoring Ships Vol 1*, Clark et al. (2009).

É possível verificar em Clark et al. (2009), que o dispositivo de atracação é conectado por válvulas a um acumulador de baixa pressão mantido por um sistema de bombeamento a vácuo, sendo este ativado por sensores que detectam o aumento de pressão em torno de $1,53 \text{ ton/m}^2$. Se levarmos em consideração a pressão atmosférica média de $10,197 \text{ ton/m}^2$ ao nível do mar, então a pressão exercida sobre cada unidade de área em m^2 corresponde a cerca de 9 ton/m^2 . Além disso, com as mudanças de condições ambientais e nos níveis de pressão, os valores de pressão podem chegar a ordem 8 toneladas por m^2 .

O modo como o sistema é disposto permite o livre movimento vertical das embarcações na presença de variações de marés, ou mesmo de mudanças de calado devido aos processos de carregamento e de descarregamento contínuo, quando este estiver situado em porto. Trilhos guias verticais direcionam o movimento das pás verticalmente, impondo um limite para as variações de deslocamento ao longo do eixo vertical do sistema de referência (CLARK et al. 2009).

A Figura 3.6 mostra a vista em perspectiva do mecanismo, identificando os eixos de referência para os movimentos translacionais e rotacionais do modelo.

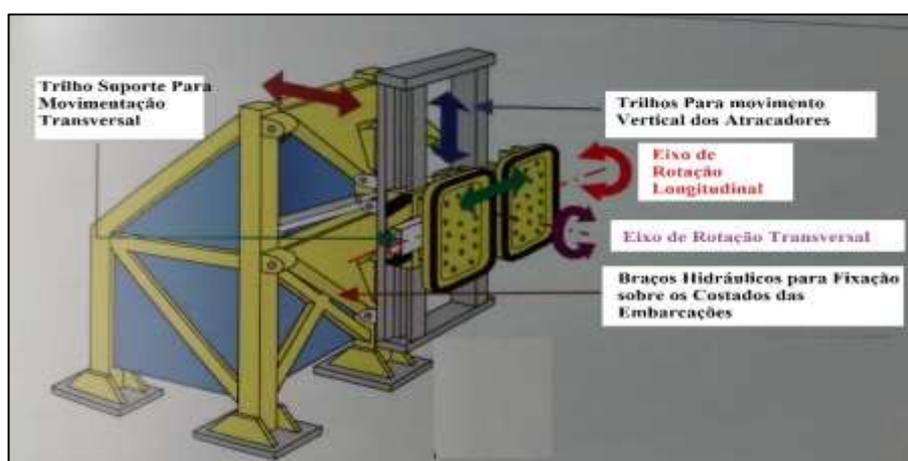


Figura 3.6 – Unidade de contenção portuária a Vácuo de 40 toneladas.
 Fonte: *Mooring and Anchoring Ships Vol 1*, Clark et al. (2009).

Sabe-se que pelo menos duas unidades são espaçadas ao longo da via horizontal do aparelho, paralela ao píer de atracação portuário. Cilindros hidráulicos pressionam o mecanismo contra a superfície do casco da embarcação, sendo que a vedação é composta por tiras de borracha (CLARK et al. 2009)

Com base em Clark et al. (2009), a indústria especializada na construção desses dispositivos produz mecanismos com nível de capacidade de pressão variando de 20 a 80 toneladas, elevando assim o número de dispositivos de atracação. Para fixação com eficiência máxima, determina-se uma distância de 25% a 30% do comprimento total da embarcação para vante e para ré de sua seção mestra com base nos pontos fixos de posicionamento do sistema de atracação.

4 MODELOS DE TRABALHOS TÉCNICOS NA ÁREA DE ANÁLISE MULTICORPOS

4.1 Aplicação do ANSYS AQWA 17 em um sistema modular de 4 Balsas

Neste trabalho foi escolhido para o desenvolvimento do modelo computacional dos comboios de barcaças o *software* denominado AQWA. Este programa pertence ao pacote do ANSYS, que acaba respondendo diretamente às necessidades técnicas apresentadas neste trabalho, como a modelagem dos cascos das barcaças, a discretização dos elementos de amarração e dos pontos de contato entre as superfícies de contorno dos cascos. É uma ferramenta computacional extremamente importante dentro do processo de cálculo dos esforços solicitantes nas amarrações entre corpos flutuantes, além da captação dos níveis dos contatos entre corpos.

Este programa possui um modelo de descrição do comportamento de flutuação de sistemas que representam embarcações e até mesmo terminais de atracação fixos, correlacionando as relações dos fatores ambientais externos aos comportamentos de respostas dos corpos flutuantes. Além de apresentar uma interface gráfica simples, é bastante intuitivo e rápido no processo de determinação dos resultados dos cálculos dos esforços.

Assim, Guha et al. (2013) apresenta um trabalho de análise de um sistema de balsas modulares de travessia composto por três módulos de carregamento e um módulo de propulsão. Esse sistema é utilizado para movimentação de veículos e cargas pesadas de regiões oceânicas para regiões costeiras. As conexões não lineares entre os módulos e os movimentos combinados do sistema são de interesse para a segurança operacional.

A modelagem numérica é feita utilizando análise hidrodinâmica através da ferramenta ANSYS AQWA na versão 14.0. A geometria da embarcação é criada utilizando uma versão do *Rhinoceros 4.0*. Para esta análise, o comboio de quatro embarcações é dividido em um módulo de propulsão, dois módulos intermediários e um módulo de atracação de proa

Dentro deste trabalho os métodos de análise probabilística pelo domínio da frequência são baseados na linearidade do grau de excitação das ondas incidentes sobre funções de respostas de transferências da embarcação. O mecanismo de conexão não linear entre os cascos acaba tornando a resposta dinâmica do sistema não linear (GUHA, et al. 2013).

Nesse caso é proposta uma aproximação por uma análise no domínio do tempo, incluindo os efeitos de não linearidade dos conectores mecânicos, vários cascos interagindo entre si e os efeitos de águas rasas, garantindo assim um maior nível de precisão para o sistema.

As ondas de difração e as forças de radiação são calculadas no domínio da frequência e posteriormente transformadas para funções de resposta de impulso no domínio do tempo. As juntas mecânicas são modeladas com uma combinação de cabos de atracação não lineares e defensas com coeficientes de rigidezes obtidos a partir do modelo em escala real (Captação de dados em Modelo Real). Os esforços nas embarcações e conectores são obtidos a partir de condições de mares irregulares, incluindo forças de deriva de segunda ordem, posteriormente, os efeitos sobre todos os conectores são calculados no domínio do tempo (GUHA et al. 2013).

Em Guha et al. (2013), devido aos carregamentos nos cabos de atracação e nas defensas apresentarem uma natureza de difícil aferição, necessitando de auxílio estatístico para validação numérica, torna-se necessário um tratamento mais cuidadoso dos resultados na fase de pós processamento do problema.

Wang e Moan (2004) sugerem a utilização do método do Diagrama de Pareto Generalizado, sendo este superior no que diz respeito a expressão de carregamentos em estruturas, onde o comportamento do conjunto sobre funções de distribuição requer cautela. Comparações a respeito dos efeitos de águas rasas, multi-corpos e do índice de relevância das forças de deriva de segunda ordem são também discutidos nessa referência.

Cada módulo possui dois elementos de conexão transversais na proa e na popa. Esses elementos asseguram o movimento relativo de arfagem (*Heave*), formando assim um mecanismo de conexão adaptado para condições de mar aberto, assegurando uma grande faixa de movimentação. O comportamento efetivo dessa junta pode ser expresso em termos de coeficientes de rigidezes para deriva (*Sway*), arfagem (*heave*), cabeceio (*pitch*) e para o movimento de jogo (*roll*). Nota-se que os movimentos de avanço (*surge*) e guinada (*yaw*) não são restringidos pelos elementos conectores.

A Figura 4.1 mostra o sistema de embarcações real utilizado na referência indicada.



Figura 4.1 – Foto do Modelo Real de Comboio de Balsas de Travessia Utilizado no Trabalho por Guha (2013). Fonte: Guha et al. (2013)

Posteriormente, na Figura 4.2 apresentamos o sistema modelado computacionalmente no software *Rhinoceros 4.0* com um conjunto de malha padrão determinado pelo software *ANSYS AQWA 14.0*.

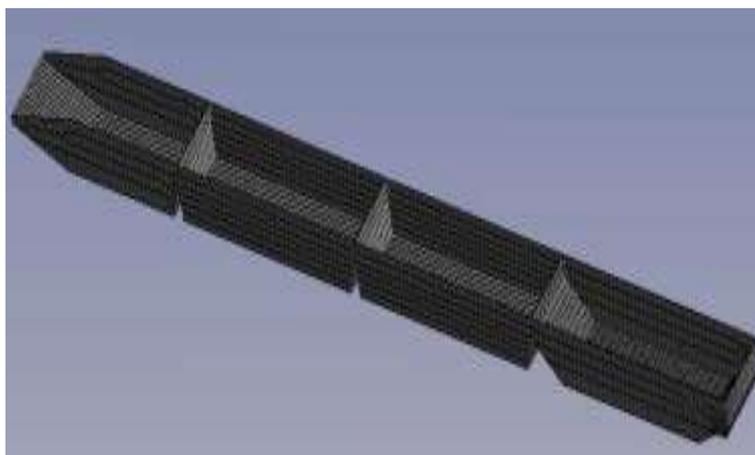


Figura 4.2 – Vista do Sistema de Balsas Modelado por Guha (2013) no AQWA. Fonte: Guha et al. (2013).

As balsas modulares são projetadas até a quilha, e a proa e a popa de duas embarcações consecutivas são separadas uma da outra por uma distância de 0,13 m. A meia nau da balsa de propulsão é selecionada para ser o ponto zero de referência para toda a modelagem, assim as balsas intermediárias e a balsa de vante são alocadas ao longo da direção do eixo x.

No trabalho de Guha et al. (2013) um sistema de quatro pontos é utilizado para atracar as embarcações. Esses cabos de amarras são utilizados artificialmente para manter o modelo numérico fixo, sem se deslocar da posição inicial de simulação devido as forças de deriva de segunda ordem. As âncoras são alocadas acima do nível do mar e os cabos

apresentam comportamento linear. Os elementos flexores são modelados utilizando linhas de atracação não lineares com comprimento apropriado e com valores de rigidezes obtidos a partir dos dados do modelo em escala real.

4.2 Determinação de Impactos entre Barcaças pelo *LS-DYNA*

Luperi e Pinto (2014) afirmam que Consolazio et al. (2012) fez grandes avanços no campo da análise de colisões de barcaças de comboios. Ademais, a sua grande contribuição inclui ainda um estudo avançado sobre as relações de esmagamento de proa para colisões perpendiculares ou oblíquas entre barcaças. É estruturado ainda um método de análise dinâmica de colisões além da aplicação de uma técnica simplificada de carregamentos em função do tempo.

Consolazio et al. (2012) mostra que dois tipos de modelos de barcaças modeladas em elementos finitos podem ser desenvolvidos para se estudar o comportamento das relações internas entre barcaças nas formações de comboios fluviais. Diferentes tipos de barcaças são diferenciados principalmente pelo seu papel na formação.

Devido ao elevado gasto de tempo computacional necessário para realizar uma análise completa de um comboio com todas as barcaças definidas a partir de conjuntos de malhas de elementos finitos altamente refinadas, Consolazio et al. (2012) modela o comboio com apenas um conjunto de malha apresentando elevado índice de refinamento para o comboio como um todo.

A principal função das barcaças modeladas com índices de precisão de malha reduzidos consiste na captação precisa dos efeitos dinâmicos associados ao contato entre barcaças durante o cenário de impacto. A partir dessa relação de índices de precisão entre modelos de barcaças, com a modelagem precisa de apenas uma barcaça, o problema torna-se numericamente eficiente (CONSOLAZIO et al. 2012).

Uma malha de alta resolução contendo mais de 900.000,00 elementos de casca não lineares é utilizada na análise da barcaça no *LS-DYNA* por Consolazio et al. (2012). Para cada uma das três regiões da barcaça, as superfícies externas e os elementos estruturais internos são modelados discretamente. Ao longo das regiões a espessura do chapeamento varia entre 5/16” e 5/8”. Elementos reforçadores internos são formados especificamente de elementos unidirecionais.

Na Figura 4.3 pode ser visualizada uma vista em perspectiva dos elementos que compõem o modelo computacional da estrutura da barcaça.

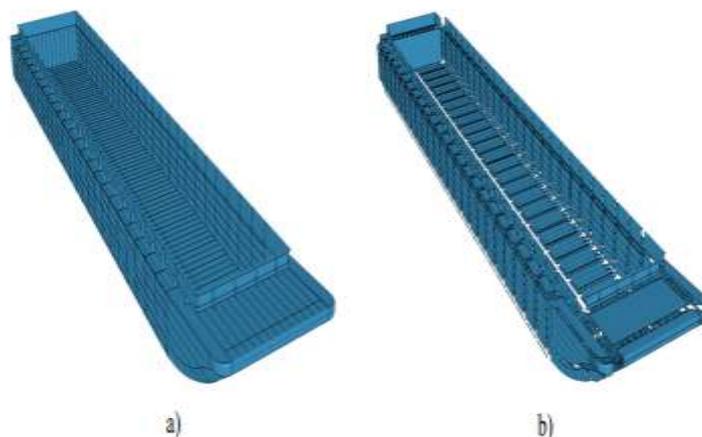


Figura 4.3 – Ilustração dos elementos de malha da configuração de uma barçaça *Raked* com 900.000 elementos de casca (*shell*) no *LS-DYNA*. Fonte: Consolazio et al. (2012).

A região da proa é composta de quatorze elementos internos curvados, elementos enrijecedores transversais e diversos elementos de placas externos com espessuras variadas simulando o chapeamento do casco. A região do espaço de carga consiste no chapeamento do fundo da barçaça e o do *Hopper* que são interligadas por elementos transversais enrijecedores do chapeamento.

Componentes em aço em barçaças são unidas por juntas de solda. No software *LS-DYNA* os cordões de solda são modelados através de elementos de vigas rígidos que interligam dois nós. A falha nos cordões de solda é levada em consideração através da exclusão do elemento em caso de falha nas juntas dos elementos de casca. Cordões de solda são distribuídos ao longo de toda a geometria da barçaça com uma densidade suficiente para simular as soldas presentes no modelo real das barçaças. Na Figura 4.4 a estrutura da proa do modelo de barçaça *Raked* apresentado por Consolazio et al. (2012) é ilustrada, identificando o reforçamento estrutural interno e os chapeamentos do convés e do fundo.

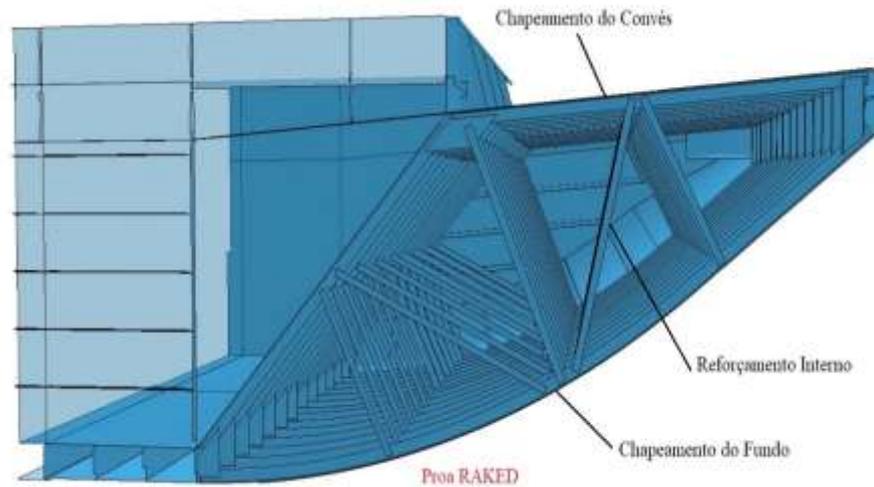


Figura 4.4 – Vista dos reforços estruturais de proa de uma embarcação tipo *Raked*.
Fonte: Consolazio et al. (2012).

A Figura 4.5 apresenta o modelo de embarcação com as regiões de contato e as regiões consideradas rígidas. A forma de contato da embarcação com um modelo de parede rígida é simulada de acordo com os parâmetros de velocidade e de deslocamento das embarcações, com a formação sendo discretizada em um comboio 3x3. O detalhamento de malha é realizado apenas em uma embarcação para a simulação do comboio como um todo (Análise global), já para a análise local o modelo apresenta a configuração ilustrada na imagem da esquerda contida na Figura 4.5.

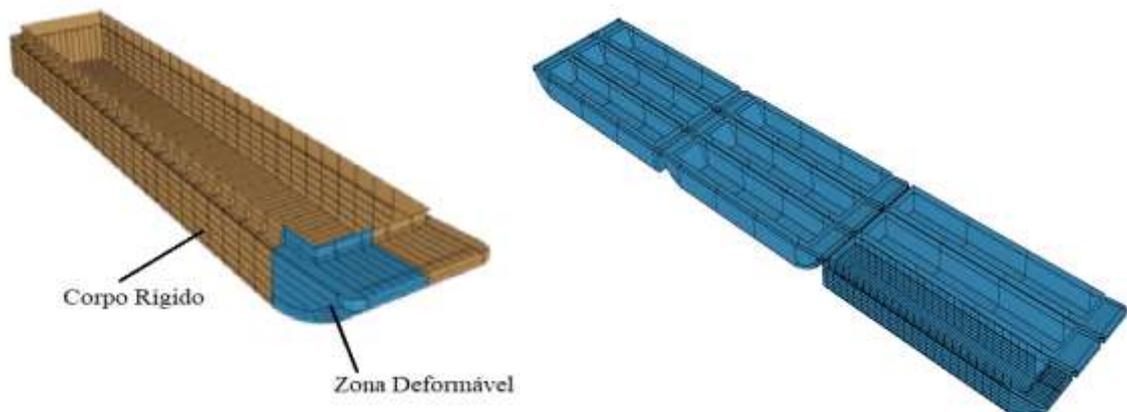


Figura 4.5 – Discretização das zonas de contato e de corpo rígido delimitadas para as embarcações, juntamente com a formação de comboio. Fonte: Consolazio et al. (2012).

A Figura 4.6 ilustra a resposta da simulação de impacto de esmagamento proa-popa, não apresentando a demonstração da malha discretizada. O modelo indicado na

Figura apresenta o resultado de uma simulação de impacto entre uma barça, com proa e popa no formato *Raked*, em contato com a popa de uma barça com proa *Raked*.

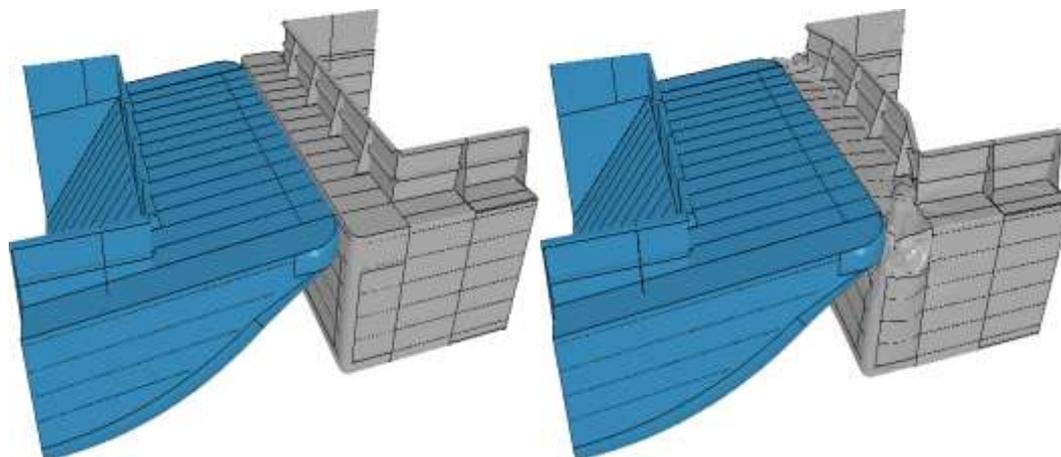


Figura 4.6 – Resultado da simulação de impacto de esmagamento proa-popa (sem demonstração da malha refinada). Fonte: Consolazio et al. (2012).

Consolazio et al. (2012) ainda introduz um elemento de contato na parte da proa das barças para avaliação dos níveis de impactos presentes entre as embarcações e paredes rígidas de simulação de contato. A Figura 4.7 ilustra o dispositivo adaptado pelo autor do trabalho evidenciando o modelo físico e a modelagem computacional do mecanismo.

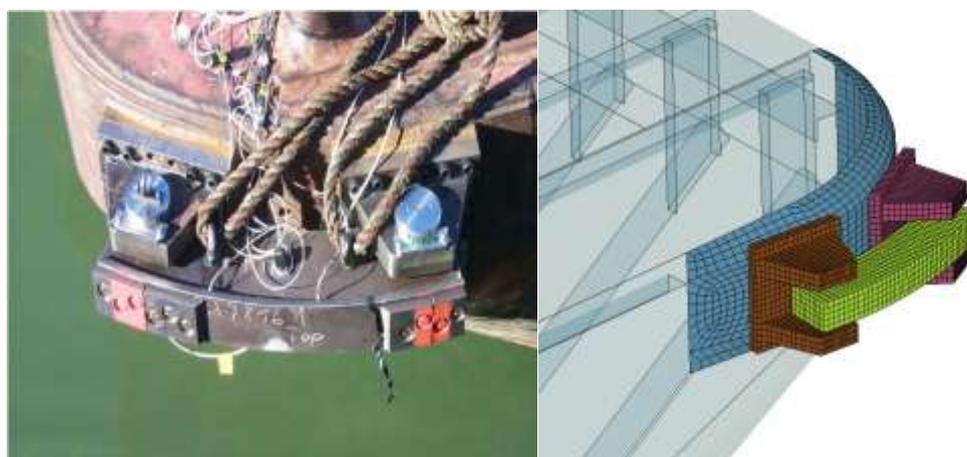


Figura 4.7 – Dispositivo de captação de esforços – Esquerda. Renderização da viga acoplada a um sensor de medição de esforços de impactos. Fonte: Consolazio et al. (2012).

Molas de empuxo são definidas como elementos elásticos não lineares. A rigidez de cada mola de empuxo, K_i , é determinada calculando-se a área efetiva bruta da barça suportada por cada mola e multiplicando-se esse valor pela densidade da água. Esses valores de rigidezes são pequenos, variando entre 0,001 kip/in (ksi) para 0,004 kip/in (ksi), e exclui os modelos de esforços de empuxo concentrados que atuam no casco das

embarcações. Ademais, os valores de rigidezes variam na proporção da área de superfície suportada por cada elemento rígido (CONSOLAZIO et al. 2012).

Forças gravitacionais estão presentes no modelo de elementos finitos da barça para todas as simulações de impactos. Em conjunto com a aplicação do carregamento gravitacional, um esquema de calibragem nas molas de empuxo é empregado para assegurar que as forças de empuxo compatíveis sejam geradas. O uso de molas de fluatibilidade sem calibragem, em um campo gravitacional, implica em uma excitação dinâmica não-física (CONSOLAZIO et al. 2012).

A Figura 4.8 ilustra o modelo de representação dos esforços de empuxo de uma barça desenvolvido no trabalho de Consolazio et al. (2012).

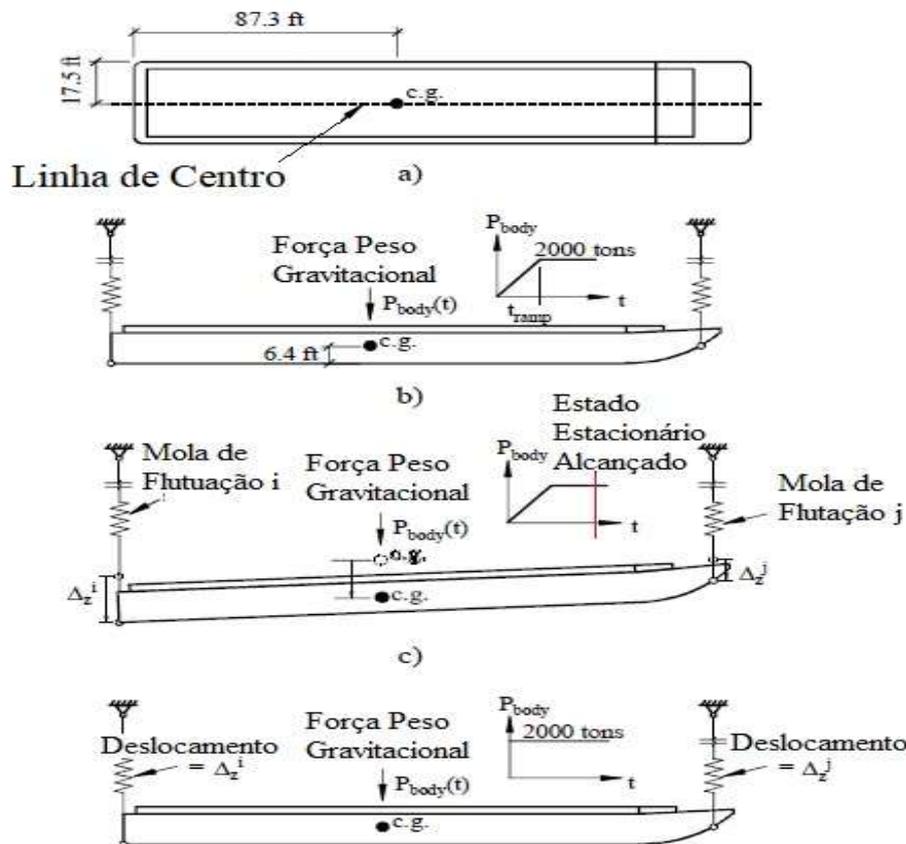


Figura 4.8 – Elementos rígidos representativos das componentes de flutuação atuantes sobre o casco da barça do tipo *Raked* utilizada em simulação.

Fonte: Consolazio et al. (2012).

Sabendo-se que nesse processo, a força peso do carregamento é aplicada sobre a barça ao longo de um grande intervalo de tempo (quase-estática), os pesos aplicados produzem deslocamentos uniformes nas barças e nos elementos de fluatibilidade. Consequentemente, esses deslocamentos relacionados com os elementos rígidos são

utilizados para definir a condição inicial de equilíbrio para uma mesma relação de força e deformação entre os elementos de flutuação.

Nesse caso, para todas as condições simuladas, a gravidade é aplicada instantaneamente e de forma constante. Entretanto, as forças de flutuação e os carregamentos gravitacionais são compilados dentro do equilíbrio dinâmico. Assim, somente níveis mínimos de excitação artificial dinâmica ocorrem dentro dos elementos de flutuação nas simulações de colisão.

Patev, Barker e Koelstler III (2003) introduzem um modelo de análise de simulação de impacto de um comboio fluvial de transporte de minério, avaliando os índices de respostas presentes nas articulações das embarcações.

Para isso, eles modelam todas as embarcações que se chocam com uma parede rígida, sem atrito a partir da representação de um modelo com vários graus de liberdade. A Figura 4.9 representa as características do modelo do problema. Uma das limitações da análise é baseada nas deformações permanentes nos cantos das barcas. O modelo ainda requer configurações nos coeficientes que compõem a matriz de rigidez do sistema. Assume-se por fim que o modelo é baseado em simulações de impactos de navios de grande calado, não sendo feita uma análise de validação para comboios de barcas.

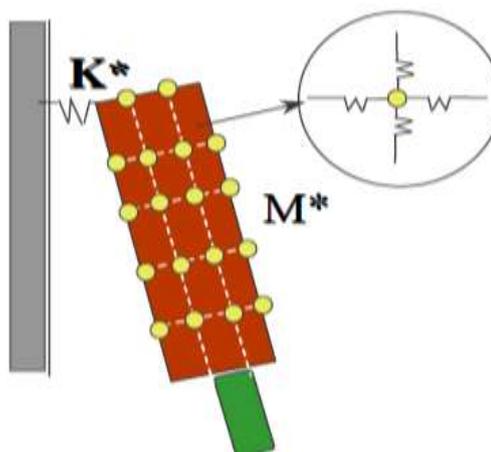


Figura 4.9 – Sistema real de representação do modelo com vários graus de liberdade do comboio.
Fonte: Patev, Barker e Koelstler III (2003).

K^* representa a rigidez de contato entre o sistema com o comboio fluvial e o fator M^* indica os parâmetros de massa e inércia das embarcações.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Após a revisão e organização das principais referências teóricas, a seleção do modelo da embarcação que será utilizada para o estudo de caso em função das condições de modelagem computacional disponíveis foi feita, levando-se em conta as suas características hidrostáticas, características estruturais e a complexidade da forma do casco, para os formatos de barcas do tipo *Box* e *Raked*.

Com a modelagem tridimensional concluída em plataforma computacional, o procedimento de análise de elementos finitos pode ser realizado com o intuito de determinar o nível dos esforços provenientes do choque entre os modelos das embarcações.

Para a modelagem computacional em três dimensões utiliza-se o software *Rhinoceros 4.0* para modelar os cascos das embarcações em formato tridimensional, muito devido a sua interface de trabalho de fácil manuseio e aprendizado intuitivo.

O manual do usuário *ANSYS AQWA* (2017) apresenta a possibilidade da simulação do comportamento de determinada forma de corpo flutuante em um ambiente com ondas, ventos e correntezas apresentar inconsistências no que diz respeito a sua análise de validação. O modelo poderá ser acoplado a um mecanismo numérico de células de cargas, presente no próprio *AQWA*, para determinação dos esforços provenientes do contato entre as embarcações alocadas nas partes da proa e da popa dos corpos.

A análise hidrodinâmica deve ser realizada com base na definição dos parâmetros como o número de corpos envolvidos na análise, o fato das embarcações possuírem tanques internos, além do posicionamento dos corpos ao longo do sistema de coordenadas. A definição e as características das linhas de amarração devem ser realizadas, bem como os elementos de proteção para os cascos (defensas).

Com os resultados, o mecanismo de amortecimento poderá ser desenvolvido com base nos dados encontrados relacionados aos carregamentos estruturais medidos pelas células de carga. Como metodologia preliminar para o desenvolvimento de um sistema de defensas, frisamos a metodologia de projeto baseada no sistema energético, muito utilizado como modelo preliminar em projetos de defensas portuárias.

Para esse procedimento, será necessário considerar os parâmetros relacionados com os efeitos de ondas na forma de casco das barcas, tendo em vista que o método de

energia utilizado não considera os efeitos de formações de ondas no cálculo das deflexões e das dimensões principais das defensas.

5.1 Apresentação do Software ANSYS

Dentro deste trabalho, destacamos a necessidade de se utilizar um *Software* comercial capaz de realizar a construção de modelos computacionais, além da transferência de modelos geométricos de estruturas, produtos e componentes. O modelo de aplicação das cargas e dos dados é feito de maneira amigável, com estudo de respostas físicas, tais como os níveis de esforços, as distribuições de temperatura e comportamento de campos eletromagnéticos.

O pacote de análise estrutural do *ANSYS* permite solucionar diversos problemas de engenharia, além de tomar decisões de projeto apuradas e rápidas. Como ferramenta de análise principal podemos colocar em evidência o Método de Elementos Finitos, descrito no tópico 2.5 do capítulo 2 desta dissertação. Além disso, o *software* é capaz de personalizar e automatizar simulações, realizando ainda parametrizações em diversos tipos de cenários.

Este referido *software* conecta facilmente com outras plataformas e ferramentas de análise física, proporcionando um realismo ainda maior na previsão do comportamento e desempenho de situações complexas.

Há duas formas de se utilizar o programa, a primeira é por meio da interface gráfica de usuário (GUI). Tal forma segue as convenções mais acessíveis de programas baseados em *Windows*. A segunda é por arquivos de comando. Essa abordagem por arquivos de comando apresenta mais dificuldades de manuseio, contudo, possui a vantagem de que toda análise pode ser descrita em um pequeno arquivo de texto. Tal abordagem permite modificações de modelos simples e apenas requisitos mínimos de espaços de arquivos.

5.2 Metodologia de Análise Computacional Utilizada pelo AQWA

O *AQWA* possibilita a utilização de um conjunto de ferramentas de engenharia para investigação de efeitos de ondas, ventos e correntezas em sistemas flutuantes como navios, plataformas de exploração petrolífera, sistemas renováveis de energia e outros tipos de estruturas marítimas.

Este programa se divide na parte de análise difratante (*Hydrodynamic Diffraction*) e de respostas hidrodinâmicas (*Hydrodynamic Response*).

O *AQWA hydrodynamic Diffraction* integra um ambiente para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos primários para aferir movimentos complexos e realizar análises de resposta. Análises tridimensionais lineares de difração e radiação são feitas para sistemas de corpos múltiplos, levando-se em conta todos os efeitos de interação hidrodinâmica que ocorrem entre os corpos. Uma função quadrática de transferência é utilizada para computar efeitos de forças de ondas de segunda ordem (*ANSYS AQWA USER MANUAL*, 2017).

Já o *Aqwa Hydrodynamic Response* garante a realização de análises dinâmicas dentro das condições de performance de estruturas flutuantes no domínio do tempo. Uma grande gama de conexões como cabos de amarração, articulações e defensas são adaptadas para a modelagem de condições de amarração das embarcações (*ANSYS AQWA USER MANUAL*, 2017).

Esta ferramenta é classificada como modular, totalmente integrada com as análises na área de hidrodinâmica de corpos flutuantes, baseadas em teorias de métodos de difração e radiação tridimensional. Ademais, apresenta um vasto leque de análises, com os requisitos estando relacionados aos efeitos hidrodinâmicos para todos os tipos de estruturas *Offshore/Marine*, incluindo *FPSOs* (*Floating Production Storage and Offloading* – Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Distribuição), além de navios, semissubmersíveis e dispositivos de energia.

5.3 Modelagem Computacional das Barcaças

5.3.1 Topologia estrutural

Dentro desse estudo, dois tipos de barcaças são utilizados para realização das simulações dos impactos, sendo um modelo do tipo *Box* e outro do tipo *Raked*. As barcaças do tipo *Box* apresentam formato retangular, com a popa e a proa apresentando perfil reto, já a barcaça tipo *Raked* apresenta perfil de proa hidrodinâmico, abaulado, sendo utilizada como embarcação de proa na formação dos comboios. As dimensões de cada modelo de barcaça são apresentadas na tabela 5-1 logo abaixo:

**Tabela 5-1- Dimensões principais e porte bruto das barcaças utilizadas na análise.
Fonte: Dados de projetos de barcaças graneleiras.**

Parâmetro	Barcaça <i>Box</i>	Barcaça <i>Raked</i>
Comprimento Total (m)	60,96	60,96
Boca Moldada (m)	10,67	10,67
Pontal Moldado (m)	4,27	4,27
Calado Carregado (m)	3,66	3,56
Peso Leve (t)	283	275
Porte Bruto (t)	2087,5	1890

Diante do escopo deste trabalho, é necessário delimitar um modelo de análise de barcaças similares aos padrões utilizados hoje nas vias fluviais da região amazônica. Por isso, dois modelos de barcaças, o tipo *Raked* e o tipo *Box*, são delimitados, destacando-se as dimensões principais e o deslocamento carregado das mesmas. A Figura 5.1 abaixo indica as dimensões padronizadas para barcaças do tipo *Box*.

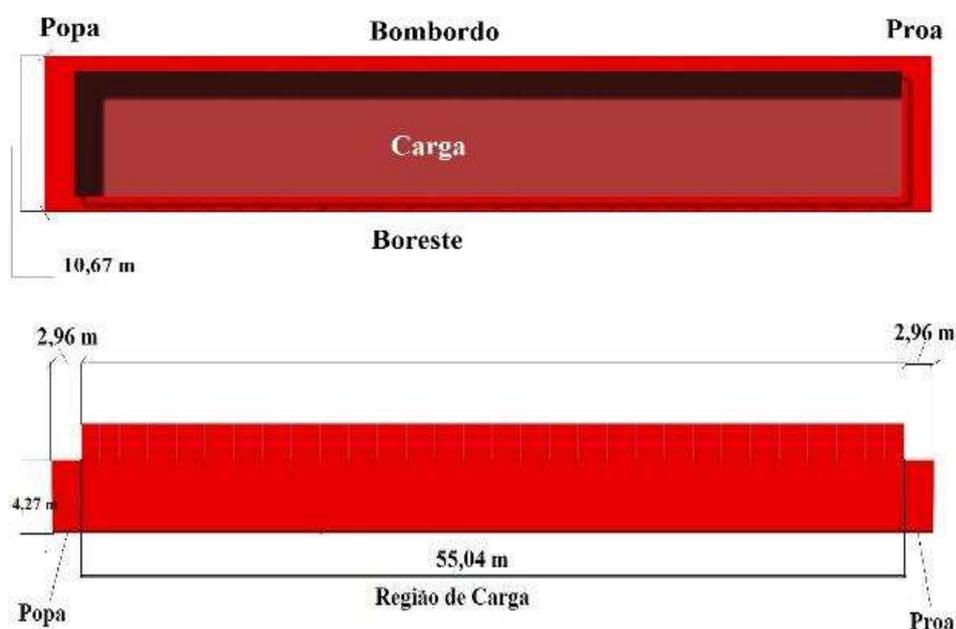


Figura 5.1 – Ilustração das Dimensões dos modelos de Barcaças Box.
Fonte: O Autor.

A Figura 5.2 indica as dimensões padronizadas para barcaças do tipo *Raked*, indicando o tamanho da cota de elevação do convés principal na região da proa da embarcação de 0,55 m.



Figura 5.2 – Ilustração das Dimensões dos modelos de Barças Raked.
Fonte: O Autor.

A Figura 5.3 ilustra claramente as regiões de impacto presente em comboios fluviais sobre influência de ondas e ventos de alta intensidade, indicadas como colisões de popa-proa (contorno azul) e costado-costado (contorno verde).

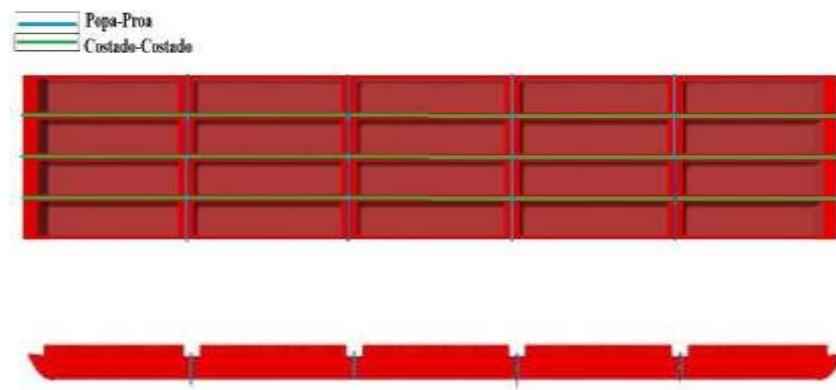


Figura 5.3 – Delimitação das zonas de contato entre barças.
Fonte: O Autor.

Dentro dos procedimentos padrões de validação e de comparação experimental é proposta a modelagem de um modelo secundário de barças para transporte de minério de ferro, apresentando dimensões maiores que as barças de soja identificadas nas Figuras 5.1 e 5.2.

Na Tabela 5-2 são apresentadas as dimensões das barças para transporte de minério de ferro escolhidas para validação através da comparação com os resultados experimentais obtidos por Nagado, Lukine e Mendonça (2012) em um teste de navegação realizado na baía do Marajó.

Tabela 5-2 – Dimensões Principais do Modelo de Barcaças de Minério de Ferro.
Fonte: Nagado, Lukine e Mendonça (2012).

Parâmetro	Barcaça Tipo - Box
Comprimento Total (m)	80,00
Boca Moldada (m)	16,00
Pontal Moldado (m)	6,50
Calado Carregado (m)	5,20
Peso Leve (t)	770
Porte Bruto (t)	5880

5.4 Procedimento de Análise Computacional

O procedimento de análise computacional é realizado com base na metodologia utilizada por Eda (1972), com base na solução das equações de movimento indicadas no tópico 2.7 deste trabalho. O objetivo final é determinar os carregamentos laterais devidos às ondas e aos movimentos irregulares para os seis graus de liberdade das barcaças, como é possível identificar no fluxograma de trabalho delimitado pela Figura 5.4.

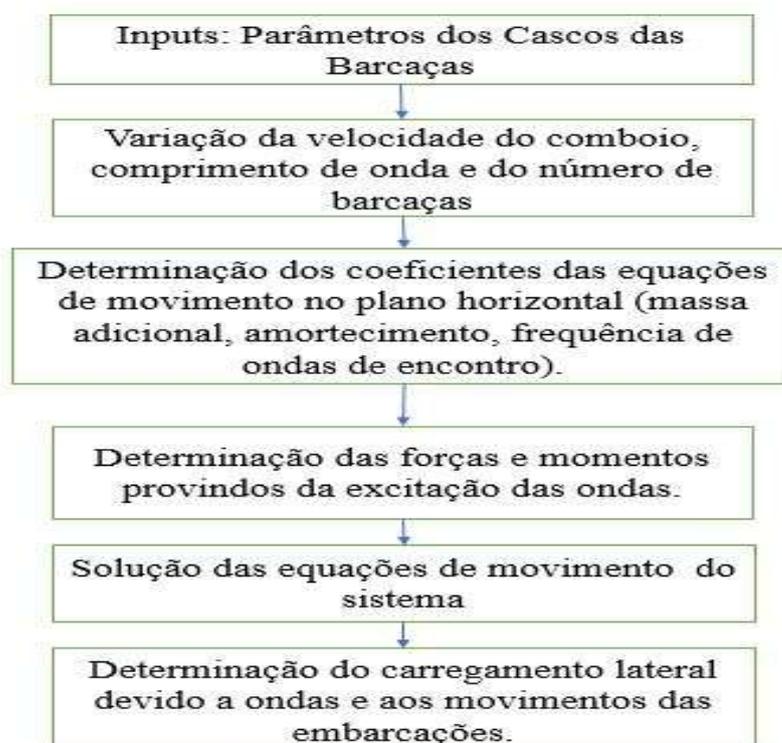


Figura 5.4 – Fluxograma delimitador da rotina de trabalho apresentada por Haruzo Eda.
Fonte: Eda (1972)

Para este trabalho, torna-se extremamente viável a utilização da metodologia empregada por Menezes (2013) para determinação das respostas hidrodinâmicas de um

sistema de dois navios plataforma de produção e de armazenamento de petróleo, atracados entre si. Dentro desse cenário, este estudo é classificado no campo de teorias de análise multi-corpos e acaba apresentando procedimento descrito pela Figura 5.5.

O programa emprega a memória necessária de acordo com o número de painéis de difração empregado na simulação. A quantidade de memória (em MBytes) requerida para a análise de difração e radiação pode ser determinada pela Equação 5.1.

$$M = 300 + \left(\frac{N}{1000}\right)^2 \cdot 8^2 \quad \text{Eq. 5.1}$$

Onde:

N: Número de painéis difratantes presentes na simulação;

M: Memória mínima do computador necessária para realizar a simulação.

A Figura 5.5 demonstra o fluxograma delineador da metodologia de estudo empregada dentro de uma análise multi-corpos.

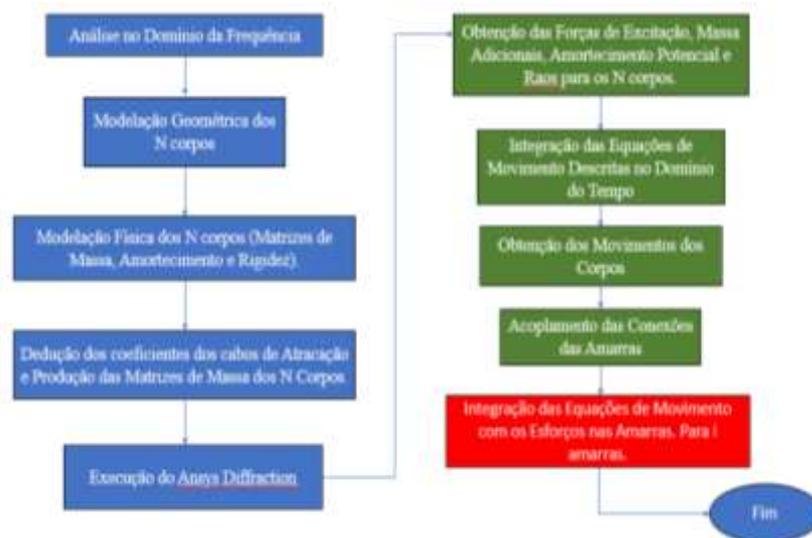


Figura 5.5 – Fluxograma delimitador da metodologia de estudo para análise multi-corpos, baseada na metodologia empregada por Menezes (2013). Fonte: O autor.

Deixando bem claro que as forças ambientais de excitação externa devem ser acopladas no domínio do tempo. A interação entre as defensas e os cabos de amarração deve estar muito bem representada. Menezes (2013) propõe que o contato entre as defensas seja determinado tridimensionalmente e as componentes de carga atuantes nas direções perpendicular e tangencial das defensas sejam definidas e modeladas sem não-linearidades.

Após a edificação do casco das barças, a forma do casco pode ser exportada do software *Rhinoceros 4.0* para o *ANSYS AQWA*, em formato *IGES*⁶, compatível com a plataforma do programa de modelagem geométrica do *ANSYS (Design Modeler)*. O modelo de formato do casco das barças tipo *Box* que representa o volume difratante e o volume não difratante é apresentado na Figura 5.6.

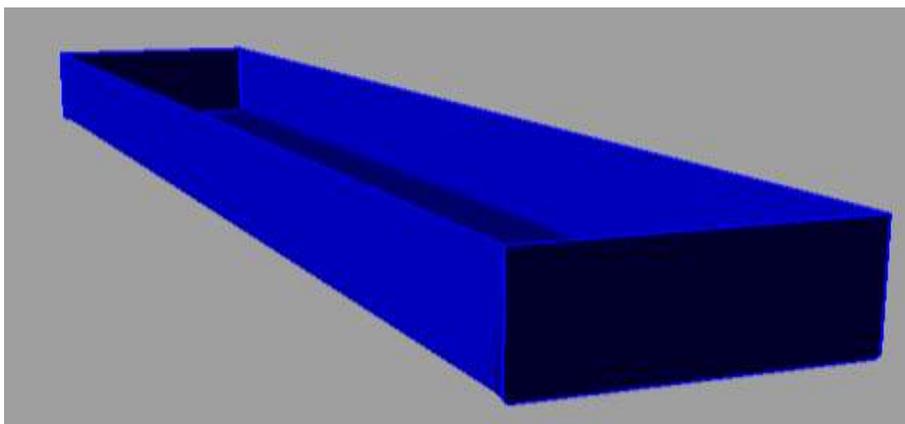


Figura 5.6 – Forma de Casco de Barça *Box* Modelada no Programa Rhinoceros.
Fonte: O Autor.

Para o formato de casco do tipo *Raked*, ilustrado na Figura 5.7, o modelo no *ANSYS AQWA* não foi capaz de modelar a malha com um nível de confiabilidade elevado. A razão de aspecto dos elementos formados na região da proa abaulada passou do limite inferior que integra o programa, da ordem de 0,333.

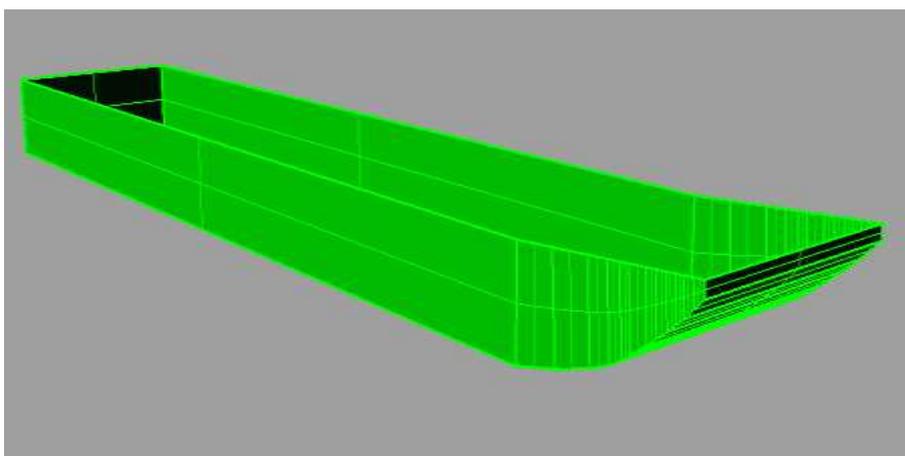


Figura 5.7 – Forma de Casco da Barça *Raked* Modelada no Programa Rhinoceros.

⁶ *IGES – Initial Graphics Exchange Specification* - Especificação Inicial de Intercâmbio Gráfico. Conforme MIRANDA e SILVA (2005) o padrão *IGES* formata o arquivo como um texto puro. Este padrão acaba facilitando a migração para qualquer plataforma do computador conhecida. O arquivo é composto de dois tipos de entidades: as geométricas e não geométricas. Linhas, pontos e superfícies são classificadas como geométricas e as não geométricas são os textos explicativos, as designações de cores e outras entidades semelhantes.

Fonte: O Autor.

Nesse caso, optou-se apenas por avaliar a forma do casco das barçaças tipo *Box*. A forma do casco da barçaça de minério de ferro foi retirada de um plano de arranjo geral de uma embarcação típica com as dimensões descritas na Tabela 5-2. A Figura 5.8 ilustra o modelo de formato de casco desse modelo de barçaça no software *Rhinoceros 4.0*.

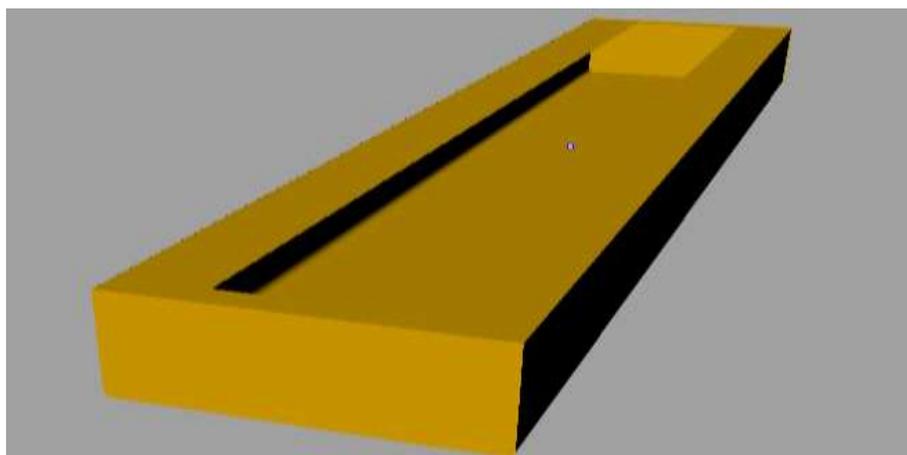


Figura 5.8 – Forma de Casco da Barçaça de Minério de Ferro Modelada no Programa Rhinoceros.
Fonte: O Autor.

5.4.1 Análise Preliminar de duas Barçaças Acopladas

O modelo indicado na Figura 5.9 mostra a vista tridimensional de um modelo com duas barçaças tipo *Box* acopladas, totalmente carregadas, com um espaçamento de 0,5 metro entre estes corpos flutuantes. Este modelo foi testado com a braçola edificada, como método de comparação da influência da forma das regiões não-difratantes na parte submersa da geometria.

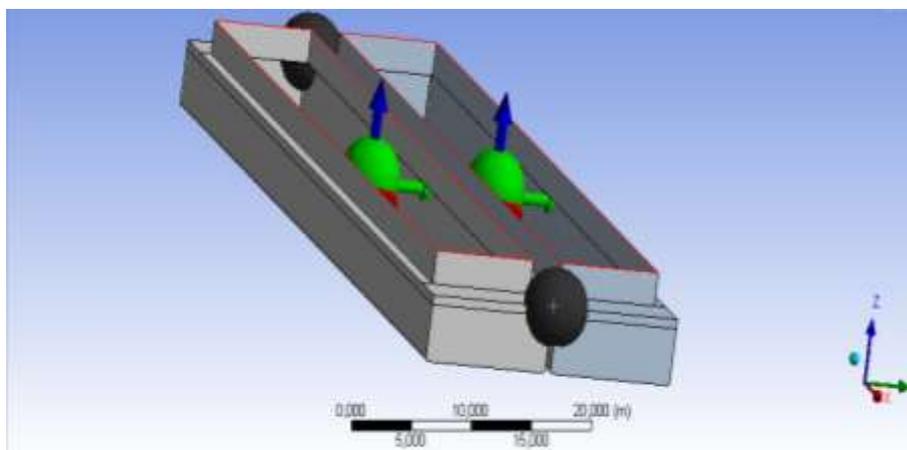


Figura 5.9 – Vista em perspectiva das barçaças com os centro de gravidade em verde e o pontos de acoplamento dos cabos nos vértices pretos. Fonte: ANSYS (2017).

A origem do sistema de eixos coordenados foi posicionada na barcaça mais à esquerda na vista em perspectiva da Figura 5.10. A malha com os painéis é identificada na Figura 5.10. Foi utilizado um tamanho máximo de elementos de 1,2 m, permitindo um cálculo de frequências de incidência de onda de até 0,552 Hz. O número total de elementos foi da ordem de 8490 para os dois cascos acoplados.

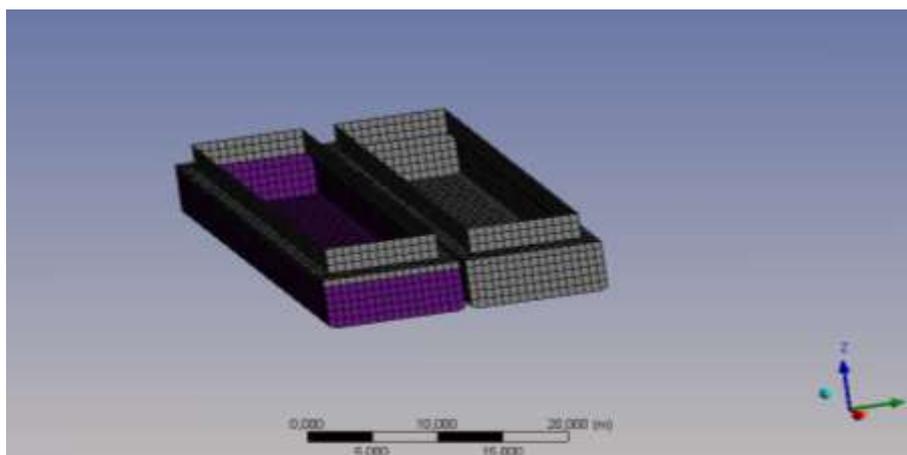


Figura 5.10 – Modelo de elementos de painéis delimitadores das superfícies dos cascos das barcaças.
Fonte: ANSYS (2017).

A posição do centro de gravidade das barcaças, na condição de plena carga, é dada logo abaixo pela Tabela 5-3. O valor da posição vertical do centro de gravidade foi retirado de um memorial de cálculo de projeto de barcaças desse porte. O deslocamento é calculado pelo próprio ANSYS AQWA a partir das características de volume dos corpos flutuantes.

Tabela 5-3 – Posição do centro de gravidade das barcaças para a condição totalmente carregada.
Fonte: ANSYS (2017).

Embarcações da Formação 2x1	Deslocamento Toneladas	Posição do Centro de Gravidade (m)		
		x (m)	y (m)	z (m)
Barcaça 1/Origem	2373,5	0,00	0,00	0,50
Barcaça 2/ Bombordo	2373,5	0,00	11,17	0,50

A Tabela 5-4 mostra os resultados dos coeficientes de rigidez hidrostática dos movimentos no plano vertical.

Tabela 5-4 – Resultados para os coeficientes de rigidez hidrostática calculados para os movimentos no plano vertical Fonte: ANSYS (2017).

Rigidez Hidrostática	z	Rx	Ry
Heave (Z)	6378653,500 N/m	0,037216 N/°	0,036806 N/°
Roll (RX)	2,1323359 N.m/m	111654,74 N.m/°	-0,0039175 N.m/°
Pitch (RY)	2,1088278 N.m/m	-0,0039175 N.m/°	33531366 N.m/°

O modelo de representação do sistema é dado por um modelo de ondas com altura de 1,5 m, com uma faixa de frequência de ondas indo de 0 até o limite de frequência calculadas pelo software que é da ordem 0,552 Hz para 8490 elementos. A Figura 5.11 representa o modelo de duas barcaças atracadas sob incidência de um trem de onda ainda não atrelado com as características do espectro de mar.

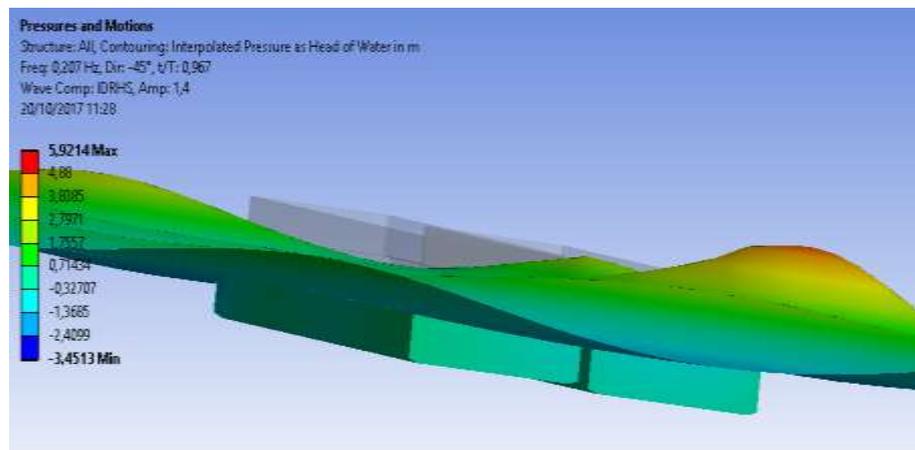


Figura 5.11 – Representação de um trem de onda incidente com altura de 1,5 m, em direção de 90°.
Fonte: ANSYS (2017).

A Figura 5.12 ilustra o comportamento das barcaças sob incidência de um trem de onda direcionado a 45° para bombordo da proa das barcaças.

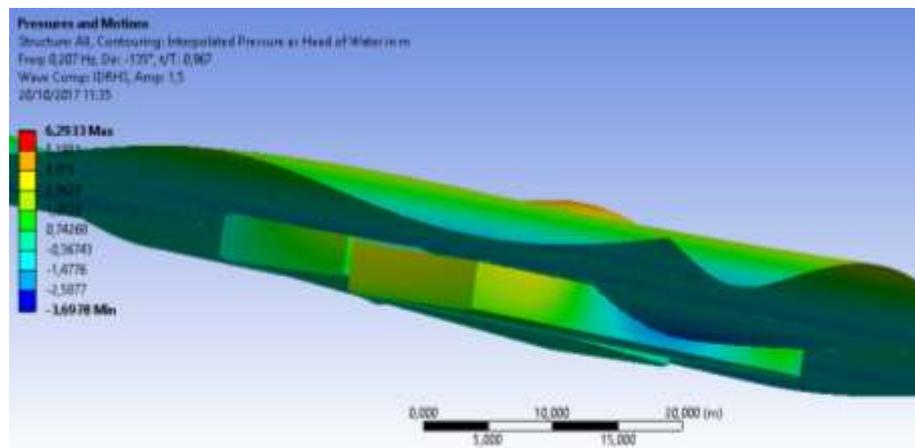


Figura 5.12 – Representação do campo de pressão atuando sobre duas barcaças atracadas com incidência de -135°. Fonte: ANSYS (2017).

Posteriormente foi alocado um elemento de defesa nos pontos de contato localizados nos vértices dos cascos das barcaças, entretanto, é necessário definir o coeficiente de amortecimento do material, bem como o coeficiente friccional. A Figura 5.13 indica os elementos tipo *fenders* inseridos no problema.

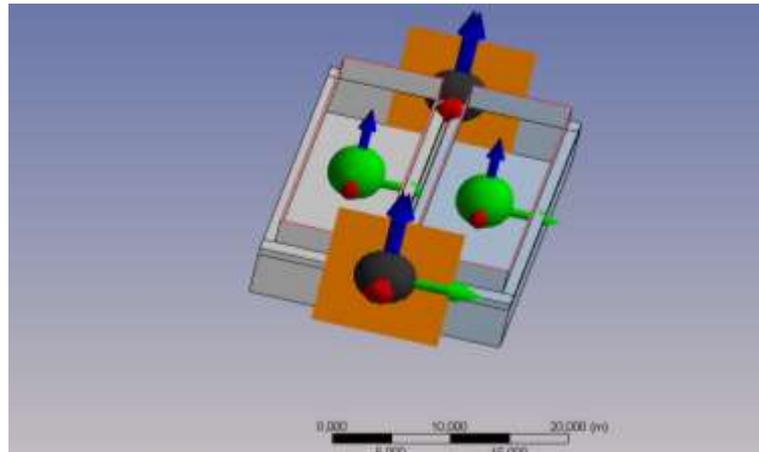


Figura 5.13 – Modelo de aplicação dos elementos tipo *fenders* disponíveis na biblioteca de elementos de amortecimento do AQWA. Fonte: ANSYS (2017).

As forças nos elementos de defesa e nos cabos de amarração devem ser delimitadas com base no padrão de análise do ANSYS *Hydrodynamic Response*. Para isso o modelo necessita da inserção dos parâmetros do espectro de mar, das velocidades de correnteza e de vento, como está indicado na Figura 5.14.

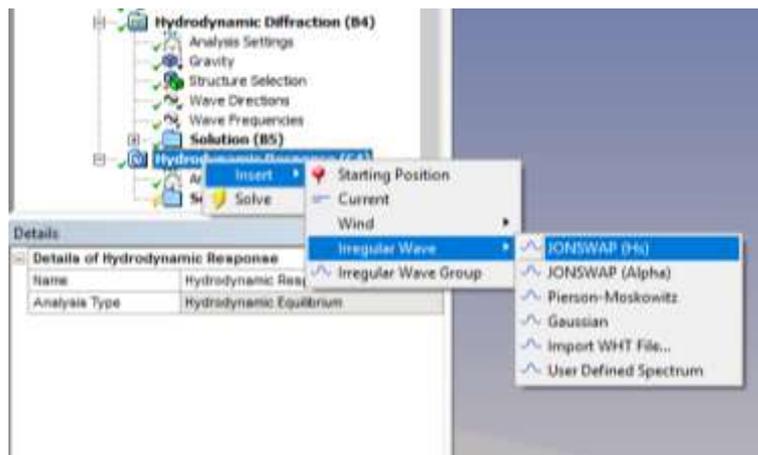


Figura 5.14 – Indicação da matriz de inserção dos dados relativos a corrente (*current*), ao vento (*wind*) e ao espectro de onda irregular (*Irregular Wave*).
Fonte: ANSYS (2017).

Os valores de corrente devem estar relacionando os dados de profundidade (em m), de velocidade da corrente (em m/s) e sua direção (em °), podendo ser inseridos como arquivo de tabela no próprio ANSYS AQWA. O espectro de onda necessita de uma

frequência inicial e uma final, além da altura significativa de onda, o valor do coeficiente Gamma (γ) e a frequência de pico.

Esse procedimento para duas barcaças de soja foi realizado como metodologia preliminar de adaptação do *software*, facilitando assim a modelagem do modelo pelo operador, além de propiciar a identificação das características computacionais, das funcionalidades e do conjunto operacional do programa.

5.4.2 Análise de uma Formação de Barcaças 3x2

O modelo apresentado na Figura 5.15 indica a vista em perspectiva de uma formação 3x2 de barcaças do tipo *Box* em condição de flutuação totalmente carregadas na interface do software *ANSYS AQWA*. Os pontos verdes representam a posição dos centros de gravidade de cada barcaça empregada nesse estudo, já os pontos escuros presentes nas bordas dos cascos das embarcações são necessários para alocação dos elementos de defesa – *fenders* – e dos cabos de amarração.

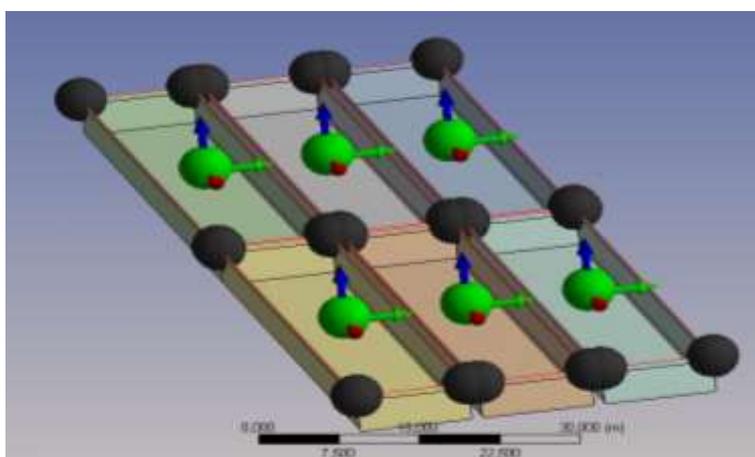


Figura 5.15 – Vista em Perspectiva dos Pontos da Formação de Barcaças Utilizada no Software ANSYS AQWA. Fonte: ANSYS (2017).

O sistema global único (x,y,z) é posicionado na superfície livre, onde x e y estão contidos no plano horizontal e z é perpendicular ao plano formado pelos dois primeiros parâmetros, onde o sentido positivo é de baixo para cima.

A Figura 5.16 ilustra a posição da origem do sistema de coordenadas proposto para a formação de barcaças indicada. Esta formação ilustrada apresenta espaçamento de 1 metro entre cada barcaça. Isso deve ao fato do modelo do *ANSYS AQWA Diffraction* não interpretar o contato de uma superfície de casco com outra superfície adjacente, sem um mecanismo discreto de identificação de impacto. Nesse caso, torna-se necessária a

inserção de um elemento de defesa (*fender*). Caso este elemento não seja inserido, o cálculo computacional dos impactos atuantes na estrutura não é realizado completamente.

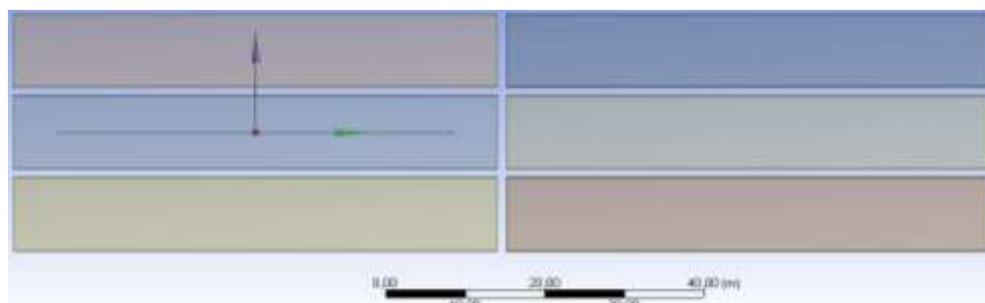


Figura 5.16 – Posição da Origem do Sistema de Barcaças Delimitado no *Design Modeler* do Ansys.
Fonte: ANSYS (2017).

A Figura 5.17 indica o formato da estrutura de subdivisão das seções de trabalho disponíveis no ANSYS AQWA Diffraction e pelo *Hydrodynamic Response*.

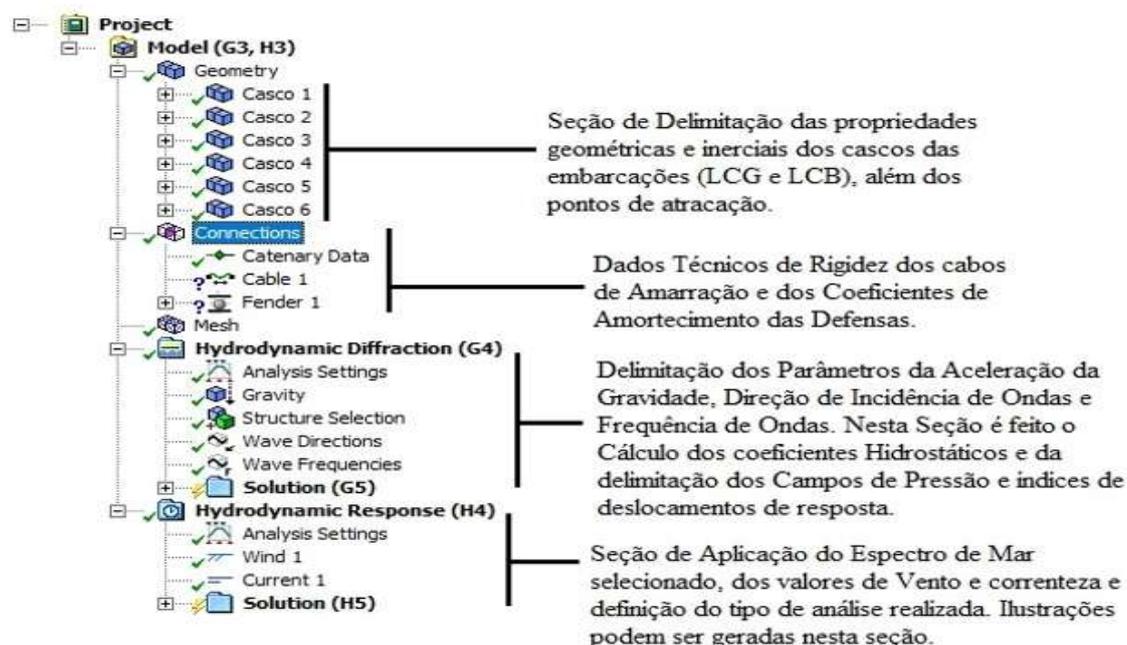


Figura 5.17 – Estrutura em Árvore de subdivisão da Rotina de Trabalho Empregado pelo ANSYS AQWA nos modelos *Hydrodynamic Diffraction* e *Hydrodynamic Response*.
Fonte: ANSYS (2017).

Os elementos que compõem a malha dos cascos das barcas são modelados na seção de *meshing*. Dentro da seção das conexões que podem ser inseridas no cenário computacional, como está indicado na Figura 5.17. É importante frisar que o programa possui um limite para a quantidade de elementos de painéis que descrevem a geometria dos cascos das barcas (cerca de 40.000 elementos para todos os cascos dos corpos flutuantes envolvidos).

A Tabela 5-5 indica a posição do centro de gravidade de cada barça. A posição vertical (eixo Z) foi retirada do memorial de cálculo de projeto de barças com este padrão de dimensões.

Tabela 5-5 – Delimitação da Posição do Centro de Gravidade das Barças presentes no ANSYS AQWA. Fonte: ANSYS (2017).

Embarcações da Formação 3x2	Deslocamento Toneladas	Posição do Centro de Gravidade (m)		
		x (m)	y (m)	z (m)
Barça 1/Central 1ª Coluna	2363	0,00	0,00	0,50
Barça 2/ Bombordo 1ª Coluna	2363	0,00	11,67	0,50
Barça 3/ Boreste 1ª Coluna	2363	0,00	-11,67	0,50
Barça 4 / Central 2ª Coluna	2363	61,96	0,00	0,50
Barça 5/ Bombordo 2ª Coluna	2363	61,96	11,67	0,50
Barça 6/ Boreste 2ª Coluna	2363	61,96	-11,67	0,50

A Tabela 5-6 indica os raios de giração para os eixos x, y e z de cada barça que constitui a formação de comboio presente no ANSYS AQWA como mostrado na Figura 5.15. Esses valores são calculados pelo *Rhinoceros 4.0* utilizando uma ferramenta de análise volumétrica para determinação das propriedades geométricas de vários tipos de modelos.

Tabela 5-6 – Indicação dos Raios de Giração e dos Momentos de Inércia para os eixos locais de cada barça. Fonte: *Rhinoceros 4.0*.

Embarcações da Formação 3x2	Raios de Giração		
	Rxx (m)	Ryy (m)	Rzz (m)
Barça 1/Central 1ª Coluna	3,44	17,248	17,404
Barça 2/ Bombordo 1ª Coluna	3,44	17,248	17,404
Barça 3/ Boreste 1ª Coluna	3,44	17,248	17,404
Barça 4 / Central 2ª Coluna	3,44	17,248	17,404
Barça 5/ Bombordo 2ª Coluna	3,44	17,248	17,404
Barça 6/ Boreste 2ª Coluna	3,44	17,248	17,404

Os valores dos momentos de inércia em relação à origem do sistema de eixos coordenados são apresentados na Tabela 5-7. Esses valores são encontrados a partir da multiplicação do deslocamento de cada barça pelos seus respectivos raios de giração elevados ao quadrado, para cada direção do sistema de coordenadas adotado.

Tabela 5-7 – Momentos de Inércia Calculados com base no deslocamento carregado e nos raios de giração. Fonte: ANSYS (2017).

Embarcações da Formação 3x2	Momentos de Inércia		
	Ixx (ton.m ²)	Iyy (ton.m ²)	Izz (ton.m ²)
Barcaça 1/Central 1ª Coluna	27.962,678	702.974,175	715.747,818
Barcaça 2/ Bombordo 1ª Coluna	27.962,678	702.974,175	715.747,818
Barcaça 3/ Boreste 1ª Coluna	27.962,678	702.974,175	715.747,818
Barcaça 4 / Central 2ª Coluna	27.962,678	702.974,175	715.747,818
Barcaça 5/ Bombordo 2ª Coluna	27.962,678	702.974,175	715.747,818
Barcaça 6/ Boreste 2ª Coluna	27.962,678	702.974,175	715.747,818

A malha de elementos finitos para este tipo de formação pode ser identificada na Figura 5.18. O que se sabe é que o processo de refinamento pode ser aplicado, onerando o tempo de cálculo computacional demandado para solucionar o problema, entretanto, o modelo do problema é altamente versátil, podendo receber *inputs* dos dados de correnteza, vento, bem como em cima da relação dos espectros de mar com os parâmetros de resposta.

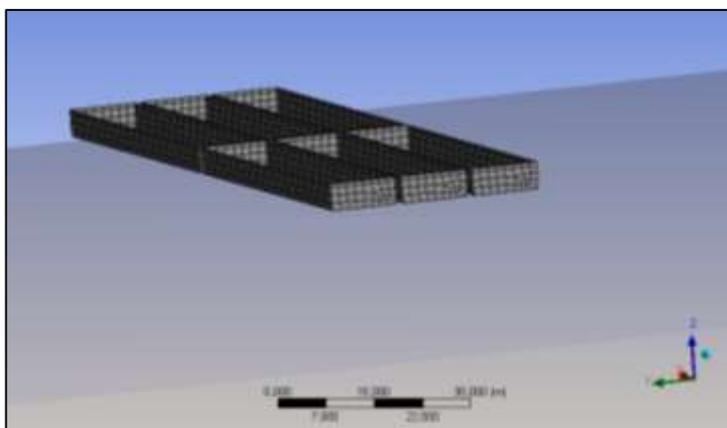


Figura 5.18 – Identificação da Malha de Elementos de Delimitação para os Cascos das Barcaças. Fonte: ANSYS (2017).

Com base nos valores dos índices empregados para descrever a precisão da malha de elementos planos, podemos identificar que o campo de respostas para as variáveis de pressão e de deslocamento apresentam um padrão inicial conservador. A figura 5.19 ilustra o modelo de resposta do comboio fluvial com um trem de onda de popa.

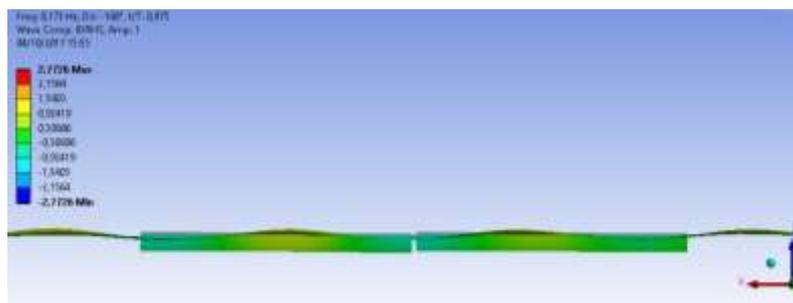


Figura 5.19 – Vista de perfil Longitudinal do Campo de Pressão atuante nos Cascos das Barcaças.
Fonte: ANSYS (2017).

Do ponto de vista de desperdício computacional, as análises acopladas apresentam maior gasto de recursos, salientando-se que com softwares interligados entre si é possível subdividir as rotinas de trabalho para determinação dos parâmetros hidrostáticos, de amortecimento e de inércia. Como se trata de um processo onde a proximidade entre as embarcações é muito elevada os limites da operação tendem a ser mais restritivos, nesse caso, a escolha do processo hidrodinâmico é fundamental nas conclusões das análises.

Nesta análise, o software computacional calculou um volume total deslocado de 2373,5 m³, divergindo em 3 m³ do deslocamento carregado devido às alterações geométricas na região do bojo, feitas através de ferramentas de alocação da malha de elementos finitos.

5.4.3 Análise de Barcaças de Minério de Ferro

Com base nas informações providas do plano de arranjo geral de barcaças de minério de ferro, foi possível edificar o casco no *Rhinoceros 4.0* e exportá-lo para o *ANSYS AQWA 2017*.

Deve-se atentar para o fato do centro de gravidade das barcaças de minério de ferro ter sido posicionado a 65% do pontal das embarcações na condição totalmente carregada. O item 0316 da NORMAM 02/DPC/2005, fala da dispensa da realização de prova de inclinação para embarcações não propulsadas, desde que a posição do centro de gravidade da embarcação, em sua condição leve de carregamento, não seja inferior a 65% da altura do seu pontal.

Nesse caso, optou-se por alocar o centro de gravidade para a condição totalmente carregada nessa posição (65% da altura do pontal) por ser um parâmetro extremamente importante de descrição do comportamento de resposta de movimento das barcaças, além de garantir uma janela de segurança para a análise. A falta de documentos de constatação

do valor do centro de gravidade desse modelo de barçaça acaba levando à necessidade de tomadas de decisões objetivas para o término desta análise.

Essa posição virtual do centro de gravidade pode levar a valores mais acentuados de esforços. Logo abaixo, a Figura 5.20 mostra a vista em perspectiva de dois cascos atracados com a posição do centro de gravidade delimitada pelos pontos verdes.

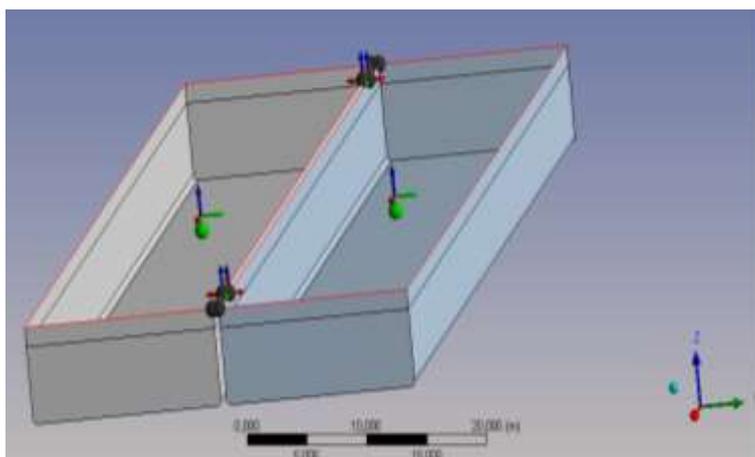


Figura 5.20 – Vista em Perspectiva do modelo tridimensional de duas barçaças de minério de ferro acopladas. Fonte: ANSYS (2017).

Para o elemento da defesa foi aplicado um modelo de defesa Omnidirecional, com capacidade de responder a esforços nas três direções cartesianas, levando em consideração a componente de fricção e o amortecimento normal à superfície da defesa. A Figura 5.21 indica o modelo representativo de defesa omnidirecional utilizada na modelagem.

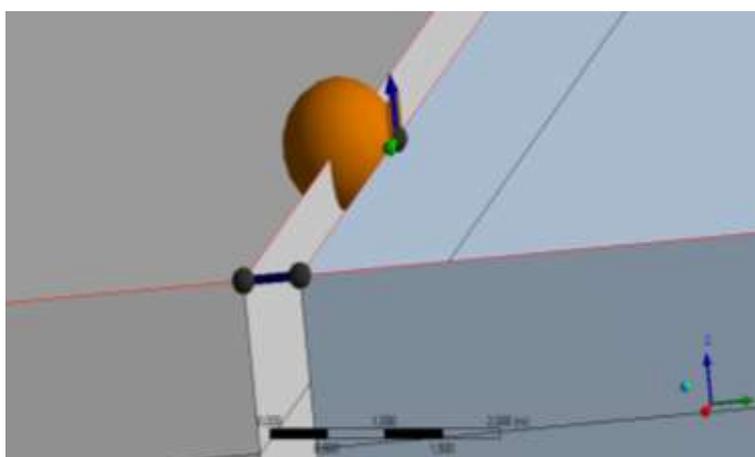


Figura 5.21 – Vista do Elemento Representativo do Cabo de Amarração e do Elemento de Defesa. Fonte: ANSYS (2017).

A quantidade de elementos de painéis planos utilizados para representar a superfície dos cascos das barçaças é da ordem de 8592 painéis. Utilizou-se um tamanho

máximo de elementos de 1,3 m obtendo-se assim uma frequência máxima de cálculo da ordem de 0,535 Hz, limitada pelo número de elementos presentes na malha.

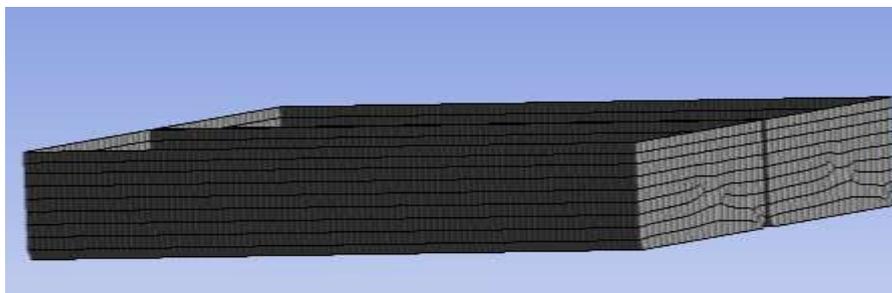


Figura 5.22 – Malha de Elementos Finitos Utilizada para Representar a Superfície do Casco das Barcaças de Minério de Ferro. Fonte: ANSYS (2017).

Para esse modelo de análise a velocidade do vento foi reduzida de 22 m/s para 16 m/s, devido ao fato dos efeitos de deriva acabarem deslocando os dois corpos flutuantes para uma posição maior que 75% em relação a posição inicial das barcaças, resultando assim em um erro de análise dentro do próprio software. O padrão de resposta para um trem de ondas de 0° pode ser vislumbrado na Figura 5.23

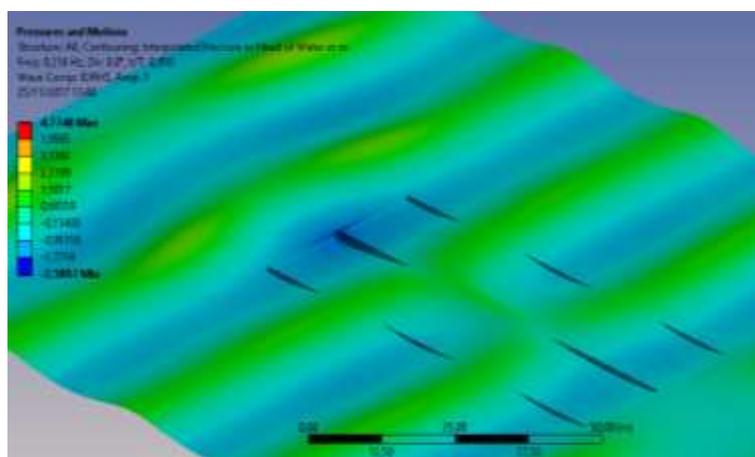


Figura 5.23 – Modelo de Resposta dos Campos de Pressão e Movimento para Direção de onda a 0° . Fonte: ANSYS (2017).

As informações da posição do centro de gravidade das embarcações podem ser identificadas na Tabela 5-8. Devemos atentar para o fato da posição vertical do centro de gravidade das barcaças ter sido estimada a 65% do pontal da embarcação, devido à ausência do plano de perfil estrutural desse modelo de embarcação.

Tabela 5-8 – Indicação da Posição do Centro de Gravidade das Barcaças de Minério de Ferro.
Fonte: AQWA (2017).

Barcaças de Minério de Ferro	Deslocamento	Posição do Centro de Gravidade (m)		
	Toneladas	x (m)	y (m)	z (m)
Barcaça 1	6637,573	0,00	0,00	-0,975
Barcaça 2	6637,573	0,00	16,50	-0,975

Com a posição do centro de gravidade e o deslocamento delimitados na Tabela 5-8 foi possível calcular os raios de giração e os momentos de inércia apresentados na Tabela 5-9.

Tabela 5-9 – Raios de Giração e Momentos de Inércia Calculados.
Fonte: AQWA (2017).

Barcaças de Minério de Ferro	Raios de Giração			Momentos de Inércia		
	Rxx (m)	Ryy (m)	Rzz (m)	Ixx (ton.m ²)	Iyy (ton.m ²)	Izz (ton.m ²)
Barcaça 1	4,982	23,17	23,55	164.746,71	3.563.373,76	3.681.214,58
Barcaça 2	4,982	23,17	23,55	164.746,71	3.563.373,76	3.681.214,58

Dentro do *AQWA Hydrodynamic Response* é possível inserir os valores de passo de tempo (*timestep*), o intervalo de tempo total da análise (para uma avaliação no domínio do tempo). Ademais, é possível inserir os dados de amplitude de onda, frequência de incidência de onda do espectro de onda, os dados da velocidade de correnteza e os valores de velocidade de vento.

As respostas do comportamento dos esforços atuantes nos elementos de amarração e dos elementos de defesa em função do tempo podem ser identificadas no capítulo 7. O espectro de onda utilizado neste trabalho corresponde ao modelo de *JONSWAP*, delimitado no tópico 2.6.2.2 da fundamentação teórica. Foram empregados valores para um estado de mar 4 com altura relativa de onda de 1,524 m, $\gamma = 3,3$ e uma frequência de 0,27207 Hz retirado de Guha et al. (2013).

5.4.4 Propriedades dos Cabos de Amarração

O método utilizado para calcular a rigidez dos cabos de aço está relacionado com a Lei de *Hooke*, onde para um elemento linear e elástico a força suportada pelo cabo é proporcional ao seu alongamento. A rigidez linear do cabo é dada pela Equação 5.2 que é igualada a Lei de *Hooke* (tensão x deformação).

$$k = \frac{F}{\Delta L} = \frac{E \cdot A}{L_0} \quad \text{Eq. 5.2}$$

Para esta análise, optou-se por utilizar um modelo de cabo de aço com bitola de 7/8", com rigidez linear calculada da ordem de $9,6 * 10^7$ N/m através da Eq. 5.2.

Utilizando o módulo de elasticidade E para o aço igual a 210.000 N/mm², a área de seção transversal circular do cabo de aço A é calculada em função do seu diâmetro, L_0 corresponde ao comprimento inicial do cabo, ou seja, não existe a presença de alongamento ΔL . Assim, a força F é relacionada com o alongamento calculado pelo ANSYS AQWA, sendo determinada a partir da rigidez do elemento.

O Ansys Hydrodynamic Response consegue trabalhar ainda com modelos de cabos de aço não lineares (*Non-Linear Steel Wire ropes*), que acaba utilizando um modelo de rigidez assintótica (*Asymptotic Stiffness*).

5.4.5 Propriedades das Defensas

Dentro do modelo de defensas proposto nesta dissertação é necessária a aferição dos coeficientes de amortecimento propostos para modelar o comportamento do mecanismo de amortecimento.

As defensas utilizadas na análise preliminar das barcaças de minério de ferro apresentam um carregamento total de 31,06 Tf para um valor de 60% de deflexão, este valor de deflexão é utilizado como padrão máximo para se adequar às análises realizadas no ANSYS AQWA por Oever, Muilwijk e Muttray (2014) no trabalho de aferição dos níveis de esforços nas defensas e trações nos cabos de aço de um navio gaseiro (*LNG*) ancorado em águas rasas. A tabela 5-10 informa os dados indicados para as defensas.

Tabela 5-10 – Dados das Defensas Utilizados para Formação do Polinômio de resposta de Esforços.
Fonte: O Autor.

Dimensão Longitudinal	0,50 m
Coefficiente A (K₁)	1.000.000,00 N/m
Coefficiente B (K₂)	50.000,00 N/m ²
Coefficiente C (K₃)	3.000,00 N/m ³
Coefficiente D (K₄)	350,00 N/m ⁴
Coefficiente E (K₅)	500,00 N/m ⁵
Coefficiente de Amortecimento	150,00 s
Coefficiente de Fricção	0,3

Com o padrão dos coeficientes apresentados na Tabela 5-10 verificamos que o comportamento de resposta da defesa é do tipo linear, como pode ser visto na Figura 5.24. A princípio os valores foram tomados com base no trabalho de Oever, Muilwijk e Muttray (2014), para o nível de deflexão percentual de 60% com um valor aproximado de força de compressão da ordem de 4000 kN. O coeficiente de fricção de 0,3 foi adotado como padrão médio de cálculo no AQWA, tomando-se como valor máximo de 0,5 o coeficiente de fricção máximo que o AQWA é capaz de ler.

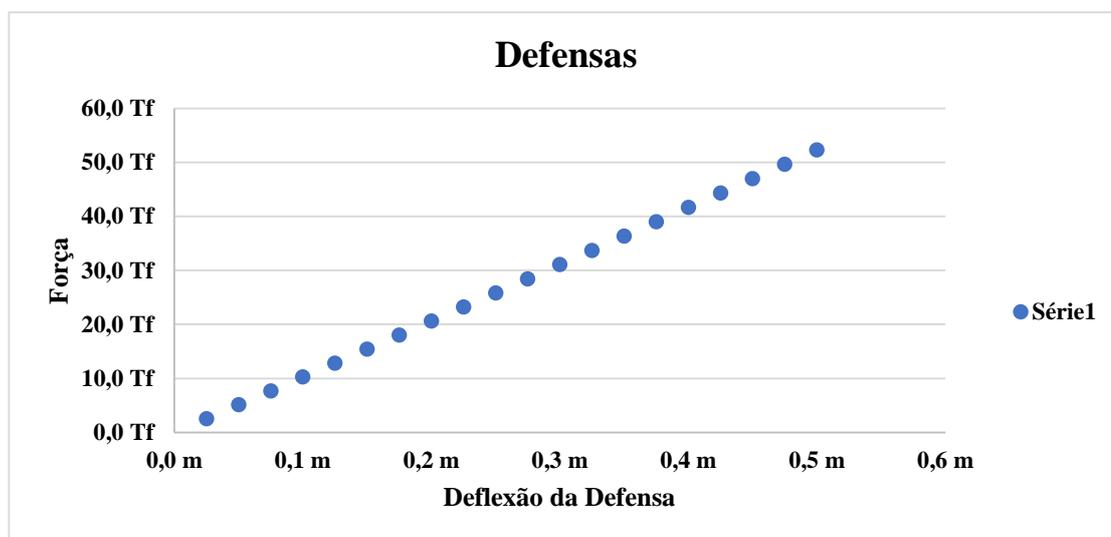


Figura 5.24 – Níveis de Forças de Compressão nas Defensas Acopladas para Análise das Barcaças de Minério de Ferro. Fonte: ANSYS AQWA 2017.

A partir da alteração dos coeficientes e da dimensão da defesa é possível inferir que a resistência de amortecimento da defesa está intimamente ligada com a relação entre os coeficientes E, D, C e B com o coeficiente A. A Tabela 5-11 ilustra os valores com alteração dos coeficientes de amortecimento, sendo necessário atentar-se para a relação entre os coeficientes E, D, C e B relacionados com o coeficiente A.

Tabela 5-11 – Dados das Defensas Empregados na Adequação dos Coeficientes de Amortecimento aos Coeficientes Polinomiais que Regem a Função de Tração nas Defensas. Fonte: O Autor.

Dimensão Longitudinal	0,50 m
Coefficiente A	1.000.000,00 N/m
Coefficiente B	500.000,00 N/m ²
Coefficiente C	300.000,00 N/m ³
Coefficiente D	30.000,00 N/m ⁴
Coefficiente E	50.000,00 N/m ⁵
Coefficiente de Amortecimento	150,00 s
Coefficiente de Fricção	0,3

O valor das forças de resposta de deformação de um modelo de defesa com esses novo coeficientes estão indicadas na Figura 5.25. O padrão de dispersão dos valores apresenta comportamento polinomial de quinta ordem.

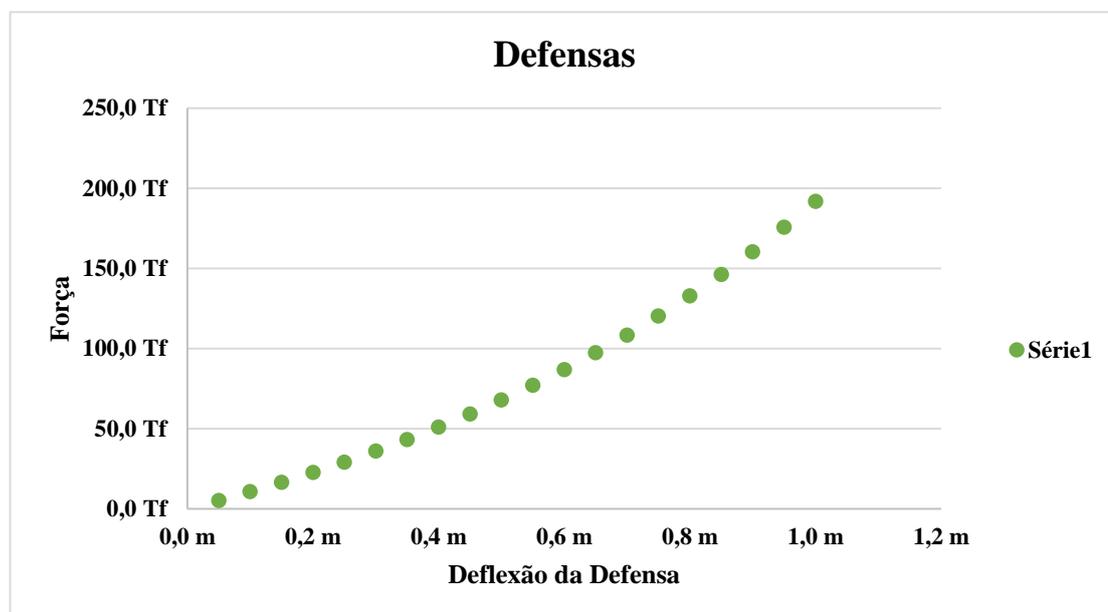


Figura 5.25 – Níveis virtuais de Esforços de Compressão nas Defensas Acopladas para Análise das Barcaças de Minério de Ferro. Fonte: ANSYS AQWA 2017.

Os valores inseridos na formação dos gráficos presentes nas Figuras 5.24 e 5.25 foram determinados a partir do estudo do comportamento de resposta das defensas, relacionando o seu comprimento com sua capacidade máxima de amortecimento a impactos externos. Com base na dimensão longitudinal da defesa, foi possível quantificar os níveis de esforços capazes de serem captados pelos elementos.

Quanto maior o coeficiente k_1 , maior é a tendência do comportamento linear do elemento de amortecimento, já os coeficientes k_2 , k_3 , k_4 e k_5 conferem comportamento não linear para as respostas das defensas.

6 METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DE DEFENSA PARA EMBARCAÇÕES ATRACADAS

6.1 Aspectos Básicos e Delimitação do Comportamento Histerético

Com base em Menezes (2013), a principal função das defensas é proteger as embarcações e os terminais de atracação de eventuais impactos. Basicamente, as defensas trabalham através do princípio de absorção de energia e reagem à aproximação da embarcação com uma determinada força em sentido contrário. Assume-se que a maior parte da energia do sistema é absorvida pelo sistema de defensas.

Com base no que Menezes (2013), o comportamento dinâmico das embarcações, incluindo seu acoplamento hidrodinâmico, influencia diretamente nos níveis de tração das linhas de amarração entre duas embarcações ou mais atracadas, bem como sobre os índices de deformações impostas às defensas. Diante disto, a análise hidrodinâmica completa é obrigatória para problemas deste gênero

Uma parte da energia absorvida pela defesa é dissipada com comportamento histerético, ao passo que a outra parte energética é devolvida à embarcação como força de reação. Tal comportamento da defesa é representado através da curva que a é identificada na Figura 6.1.

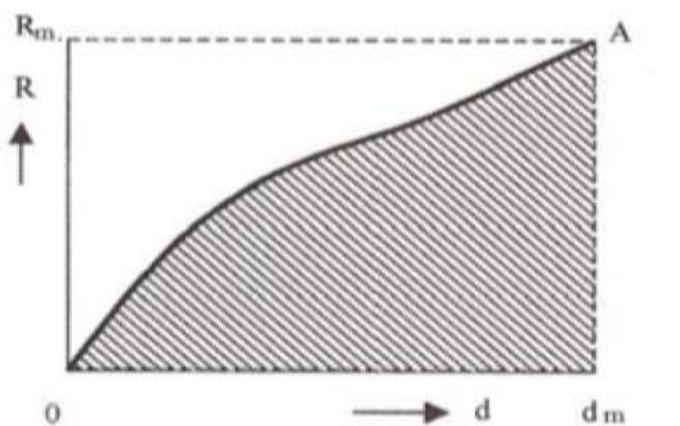


Figura 6.1 – Curva de Reação x Deflexão de Defensas.
Fonte: PIANC (2002).

A Figura 6.2 indica o fenômeno da histerese mencionado anteriormente. Nela é mostrado o caminho percorrido quando a carga é aplicada na defesa (1) e aquele caminho na qual a carga aliviada (2), sendo este último diferente do primeiro. A energia dissipada corresponde à diferença entre as áreas sob as curvas de carregamento e de alívio.

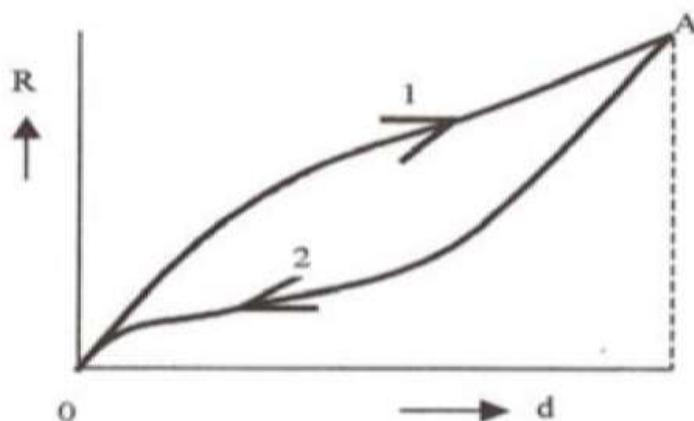


Figura 6.2 – Comportamento de histerese do material constituinte da defesa.
Fonte: PIANC (2002)

Segundo Menezes (2013), as defensas são importantes para garantir a manutenção da operacionalidade do sistema, sendo parte fundamental dentro de sua análise de disponibilidade.

Por definição, as defensas só possuem comportamento de trabalho de dissipação de energia ativa quando a distância entre os flutuantes, ou entre as embarcações for menor que a dimensão transversal da defesa. Caso contrário, as forças de atuação perpendiculares e tangenciais ao casco do navio são consideradas nulas. O modelo de contato geométrico entre as defensas deve ser capaz de identificar o toque entre as embarcações e os elementos de amortecimento. Ademais, o sistema deve ser capaz de descrever o modelo físico, para que em um estágio posterior ao contato, o cálculo das forças de reação e de atrito do sistema de defensas possa ser efetuado (MENEZES, 2013).

6.2 Modelo de Atracação Navio com Navio (*Ship-to-Ship*)

Para modelarmos um conjunto de defensas nas barcaças é necessário analisar a teoria de atracação de embarcação com embarcação. As principais considerações a serem feitas para essa análise são indicadas por PIANC (2002) consideram a distância de separação das defensas, o modelo de absorção de energia e o tipo de defesa a ser utilizada.

6.2.1 Distância de separação da Defesa

O Distanciamento entre as embarcações deve apresentar valor suficiente para manter a ausência de impactos entre as embarcações adjacentes, provenientes dos movimentos irregulares descritos no Tópico 2.7 deste trabalho. Nesse caso, a forma do casco, a altura da superestrutura e os ângulos de jogo devem ser considerados.

A Tabela 6-1 retirada de PIANC (2002) indica os valores utilizados no projeto de defensas para a determinação da distância de separação, em função do deslocamento das embarcações calculado pela Equação 6.1.

Tabela 6-1 – Distância de separação entre embarcações em função do deslocamento de embarcações. Fonte: PIANC (2002).

Deslocamento	Distância de Separação
500,00 ton	0,9 - 1,0 m
1.000,00 ton	0,9 - 1,4 m
3.000,00 ton	1,2 - 1,7 m
6.000,00 ton	1,2 - 2,0 m
10.000,00 ton	1,5 - 2,2 m
25.000,00 ton	1,5 - 2,2 m
50.000,00 ton	1,8 - 2,5 m
100.000,00 ton	2,4 - 3,3 m
200.000,00 ton	2,4 - 3,7 m
330.000,00 ton	3,3 - 4,0 m
470.000,00 ton	4,0 - 4,5 m

Deve ser salientado que a determinação do deslocamento presente na tabela 6-1 é feita a partir da seguinte relação, para duas embarcações atracadas juntas, com deslocamento A e B respectivamente. Um novo deslocamento C deve ser determinado a partir dos dois deslocamentos presentes, conforme a Equação 6.1.

$$C = \frac{2AB}{A+B} \quad \text{Eq. 6.1}$$

Salienta-se que os principais parâmetros a serem utilizados no dimensionamento de defensas correspondem justamente aos dois deslocamentos A e B dados e a velocidade de atracação (PIANC, 2002).

6.2.2 Absorção de energia

Conforme PIANC (2002), a energia que deve ser absorvida pela defesa pode ser calculada com base na Equação 2.4. Porém o valor do deslocamento W deve ser determinado conforme indicado na Equação 6.2.

$$W = \frac{W_1 * W_2}{W_1 + W_2} \quad \text{Eq. 6.2}$$

Onde:

W_1 : Soma da Massa adicional e do deslocamento do casco da embarcação 1;

W_2 : Soma da Massa adicional e do deslocamento do casco da embarcação 2.

Muitas operações de atracação de embarcações utilizam defensas pneumáticas como equipamento de atracação. Segundo PIANC (2002), as defensas podem ser posicionadas ao longo do corpo paralelo da embarcação, garantindo assim a máxima proteção possível. Ademais, um grupo secundário pode ser colocado nos espelhos de popa e proa, garantindo assim proteção para contatos de proa-popa. A tabela 6-2 ilustra os valores de dimensionamento e quantidade de defensas a serem utilizadas com base no porte das embarcações que estão atracadas.

Tabela 6-2 – Guia referencial de cálculo de dimensões de defensas em função do deslocamento relativo e da velocidade de atracação entre embarcações. Fonte: PIANC (2002).

Deslocamento da Embarcação	Velocidade Relativa de Atracação	Energia	Quantidade de Defensas Pneumáticas Sugeridas	Defensa Típica
1.000,00 ton	0,3 m/s	24 kn.m	3 ou mais	1 m x 2 m
3.000,00 ton	0,3 m/s	74 kn.m	3	1,5 m x 3 m
6.000,00 ton	0,3 m/s	140 kn.m	3	2,5 m x 5,5 m
10.000,00 ton	0,25 m/s	170 kn.m	3	2,5 m x 5,5 m
30.000,00 ton	0,25 m/s	400 kn.m	4	3,3 m x 6,5 m
50.000,00 ton	0,2 m/s	480 kn.m	4	3,3 m x 6,5 m
100.000,00 ton	0,15 m/s	540 kn.m	4	3,3 m x 6,5 m
150.000,00 ton	0,15 m/s	710 kn.m	5	3,3 m x 6,5 m
200.000,00 ton	0,15 m/s	930 kn.m	5	3,3 m x 6,5 m
330.000,00 ton	0,15 m/s	1550 kn.m	4	4,5 m x 9,0 m

6.2.3 Considerações Operacionais da Embarcação

Em PIANC (2002) são delimitadas condições de carregamento leve, nesse caso a área vélica das embarcações se torna bastante proeminente. Com isso, os esforços provindos do vento e das ondas geram movimentos de resposta mais elevados, sendo necessário considerar níveis de velocidades maiores para o estudo em questão.

Os esforços de pressão exercidos contra o casco também devem ser levados em consideração, entretanto, muitas defensas modernas possuem pressões de reação bem menores quando comparamos com as que oferecem riscos elevados à estrutura da embarcação (PIANC, 2002).

Sabe-se que para um conjunto de duas embarcações atracadas bordo a bordo, o deslocamento resultante da média calculada pela Equação 6.2 será igual ao da própria barça. Assim, a dimensão geométrica das defensas, bem como a quantidade de defensas utilizadas poderão ser determinados com relativa facilidade pelo operador.

7 RESULTADOS ALCANÇADOS

Dentro desta análise esperam-se encontrar as funções de resposta dos níveis de esforços presentes nos cabos de amarração e nas defensas ao longo de uma determinada faixa de tempo. O cálculo das defensas para um conjunto com vários corpos amarrados em condição de mar adversa utilizou como metodologia base o cálculo energético proposto no item 2.4.3 da fundamentação teórica.

Sabe-se que o emprego das dimensões das defensas calculadas foi realizado no *ANSYS AQWA* 2017 por intermédio de elementos *fenders*, que apresentam forma definida para receber o parâmetro relacionado com a dissipação de energia do sistema, calculando assim os níveis de pressão nos cascos. Salienta-se que os efeitos de correnteza, vento e dos esforços providos de amarras acabam não sendo contabilizados para este problema, caso os coeficientes de resposta relativos ao formato do casco não sejam inseridos como *inputs* no programa. Esses dados devem ser obtidos de maneira experimental.

Dentro da revisão de dados e da verificação da qualidade, devemos utilizar a unificação matemática do modelo geométrico, eliminando o grau de subjetividade do autor deste trabalho em busca de eficiência computacional para a validação dos resultados alcançados.

7.1 Análise de Barcaças de Minério de Ferro

7.1.1 Gráficos de Massa Adicional ($A(\omega)$).

A seguir na Figura 7.1 podemos encontrar os gráficos com os coeficientes de massa adicional em função da frequência de incidência de ondas determinados pelo *AQWA*. Foi desenvolvido um modelo de comparação do comportamento da massa adicional de fluido para um casco de uma barcaça solitária, com um conjunto de duas barcaças atracadas entre si por elementos de amarração lineares.

Para os movimentos relativos ao avanço (X-X), a arfagem (Z-Z), o jogo (R_x - R_x) e caturro (R_y - R_y), não houve significativa alteração na dinâmica de comportamento da função da massa adicional, entretanto para o movimento de deriva (Y-Y) e de guinada (R_z - R_z) os valores calculados apresentam significativa divergência.

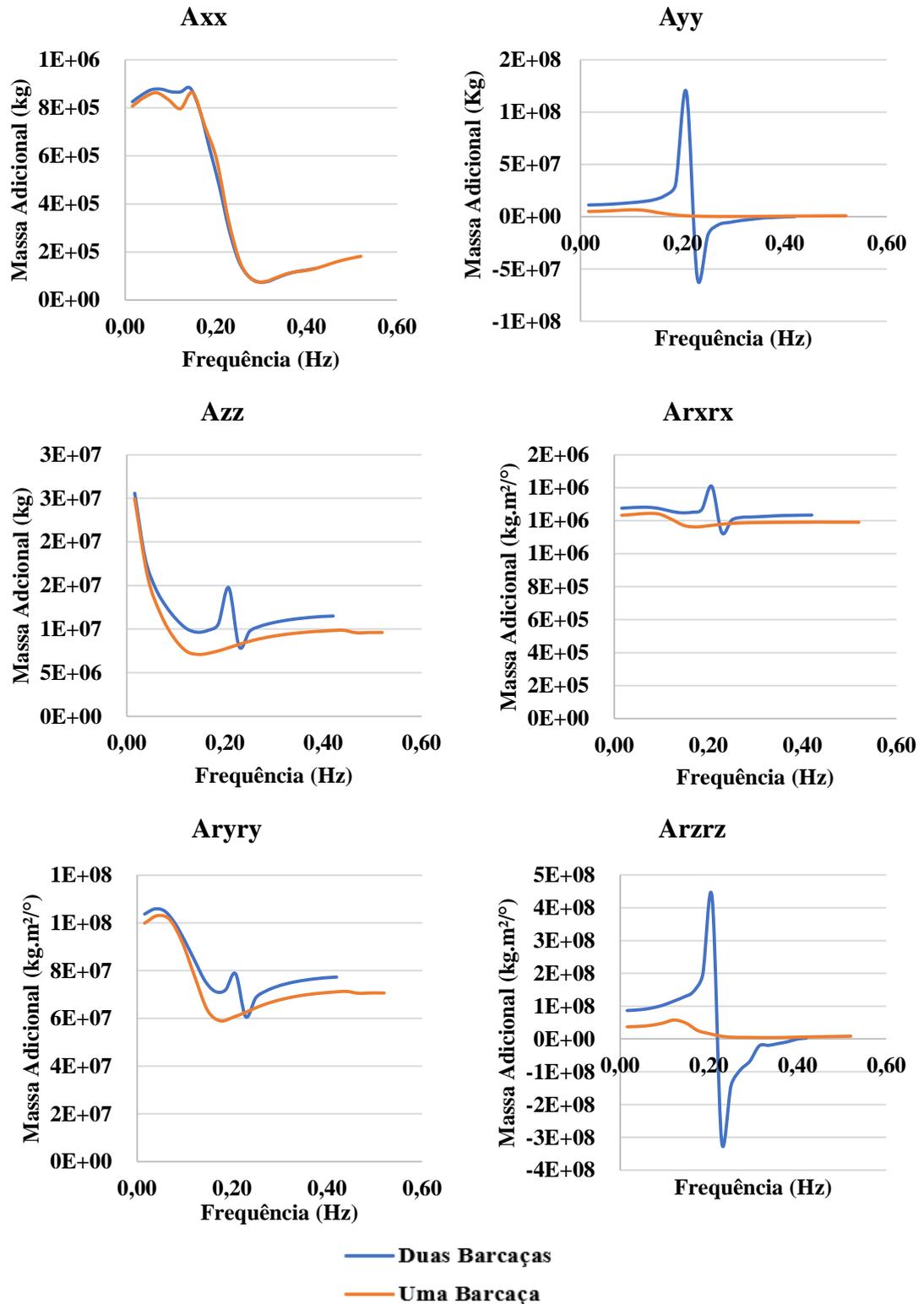


Figura 7.1 – Coeficientes de Massa Adicional em Função da Frequência de Incidência de Ondas.
 Fonte: AQWA (2017).

Esses coeficientes de massa adicional são computados pelo programa e correspondem ao segundo termo da matriz de inércia da Equação 2.58 $A_{j,k}(\omega)$.

7.1.2 Gráficos de Amortecimento Potencial ($B(\omega)$)

Os gráficos de amortecimento potencial em função do intervalo de frequências de ondas, limitado pelo software, também foram determinados. Esses dados foram encontrados logo na primeira análise do *Ansys hydrodynamic Diffraction* e podem ser identificados de acordo com a Figura 7.2.

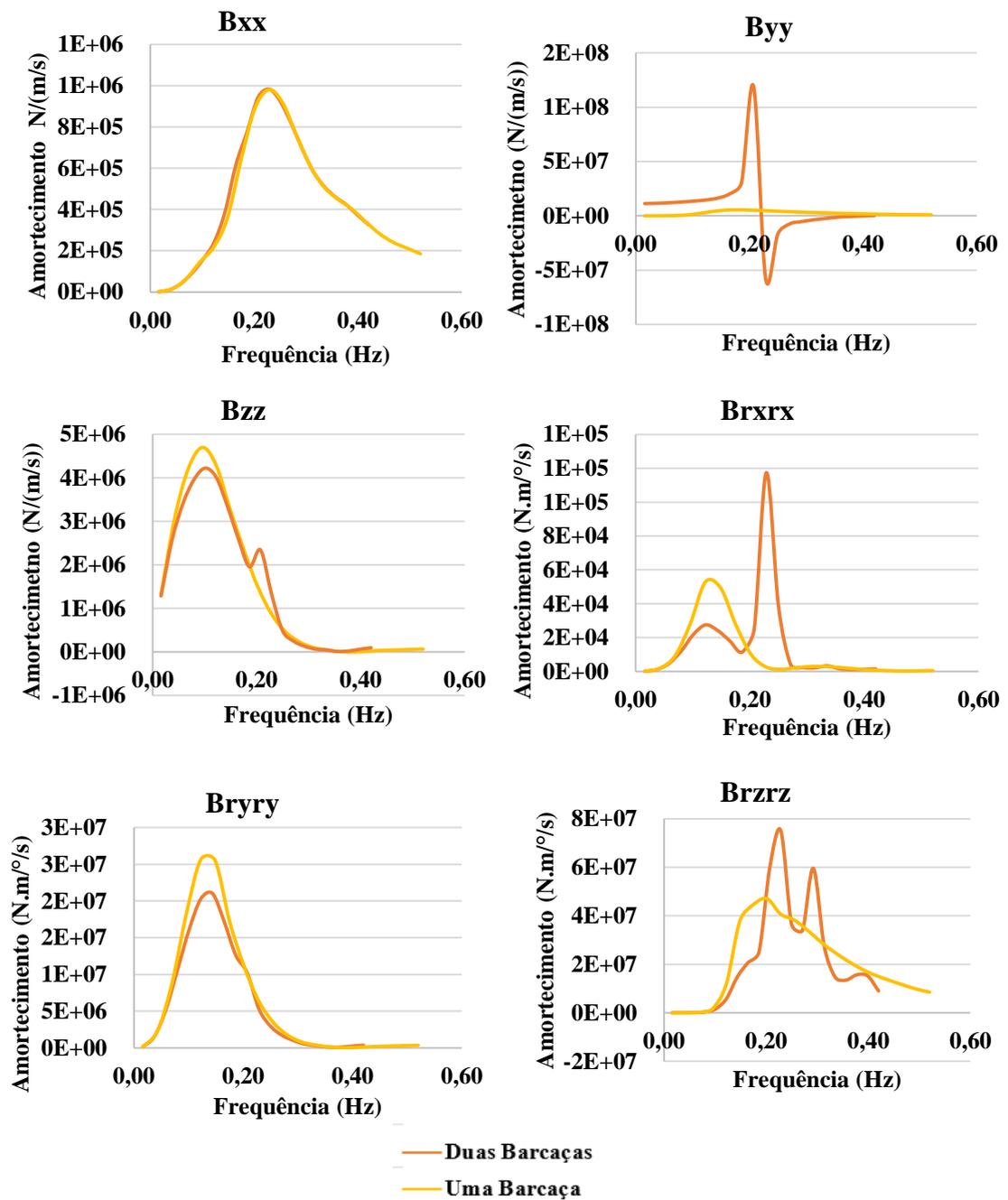


Figura 7.2 – Coeficientes de Amortecimento Potencial em Função da Frequência de Incidência de Ondas. Fonte: AQWA (2017).

De acordo com o referencial teórico presente no capítulo 2, o amortecimento potencial está ligado aos efeitos de dissipação de energia através da movimentação do volume de fluido presente ao redor do casco. Os padrões presentes nos gráficos indicados na Figura 7.2 informam alterações significativas de amortecimento para os movimentos de deriva (Y-Y), jogo (R_x-R_x) e guinada (R_z-R_z).

Esses termos de amortecimento são acoplados na Equação 2.58 dentro da matriz de amortecimento identificada por $B_{j,k}(\omega)$. Já $B_{exj,k}$ não é computado, tendo em vista que leva em consideração as componentes viscosas que necessitam de ensaios experimentais para serem inseridas.

7.1.3 RAOs (Response Amplitude Operators)

Os operadores de amplitude de resposta para os movimentos translacionais e rotacionais das barcas de minério de ferro são encontrados através da análise no domínio da frequência no campo do *Ansys hydrodynamic Diffraction*. Nas Figuras 7.3 e 7.4 encontram-se os RAOs dos movimentos translacionais (avanço, deriva e arfagem) e rotacionais (jogo, caturro e guinada), respectivamente. Deve-se atentar para a direção de propagação de onda de 0° .

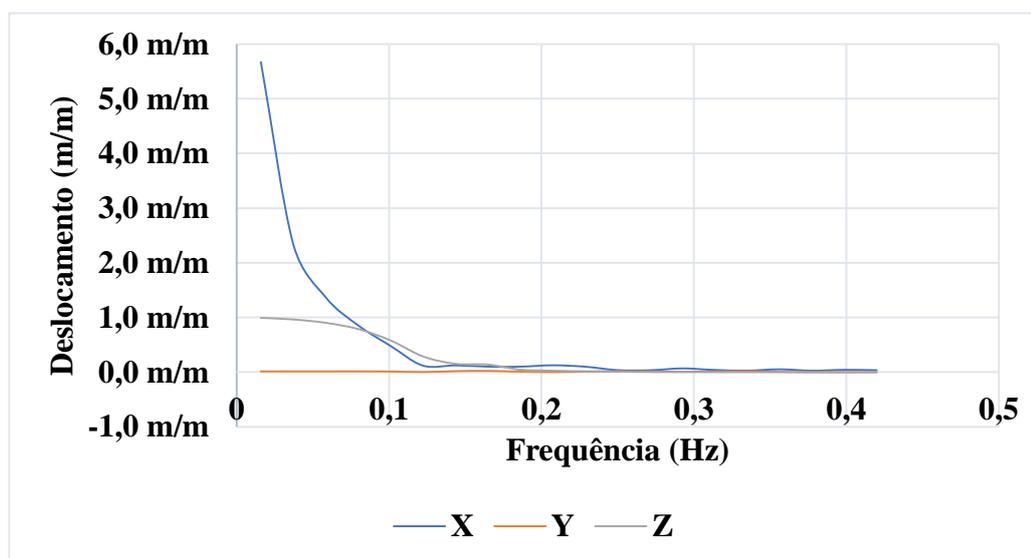


Figura 7.3 – Operadores de Amplitude de Resposta para os Movimentos Translacionais. Direção de Onda Incidente: 0° . Fonte: ANSYS AQWA (2017).

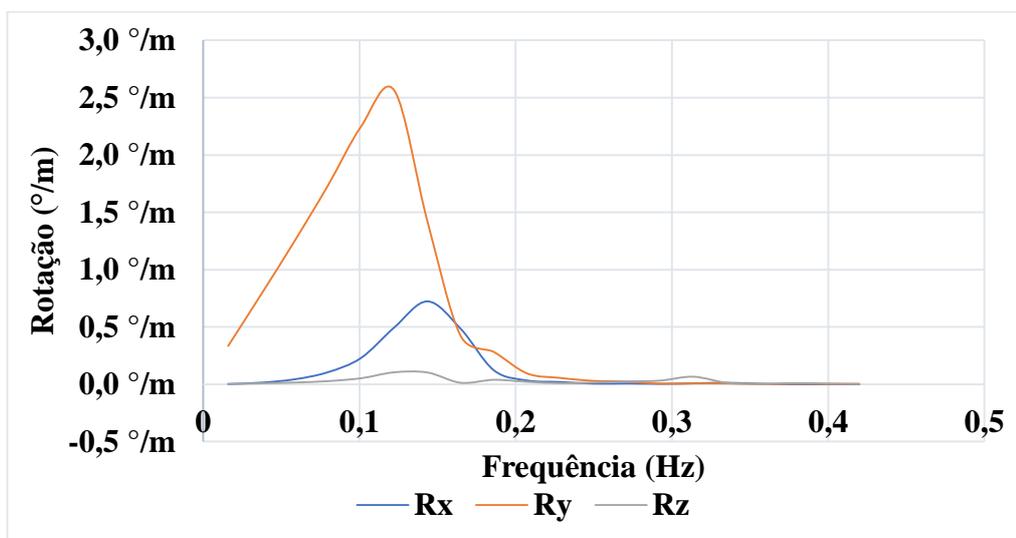


Figura 7.4 – Operadores de Amplitude de Resposta para os Movimentos Rotacionais. Direção de Onda incidente: 0° . Fonte: ANSYS AQWA (2017).

Essas funções delimitam o grau de resposta em movimento translacional e rotacional de determinado corpo flutuante sobre incidência de um trem de onda específico. Nas Figuras 7.5 e 7.6 encontram-se os RAOs dos movimentos translacionais (avanço, deriva e arfagem) e rotacionais (jogo, caturro e guinada), respectivamente. Os gráficos são relativos a direção de propagação de onda de 30° .

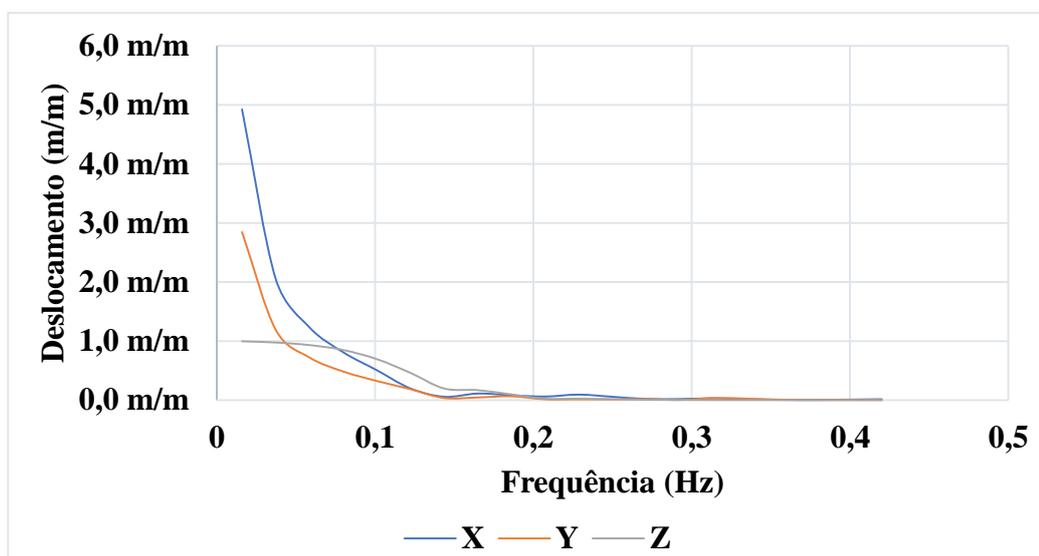


Figura 7.5 – Operadores de Amplitude de Resposta para os Movimentos Translacionais. Direção de Onda incidente: 30° . Fonte: ANSYS AQWA (2017).

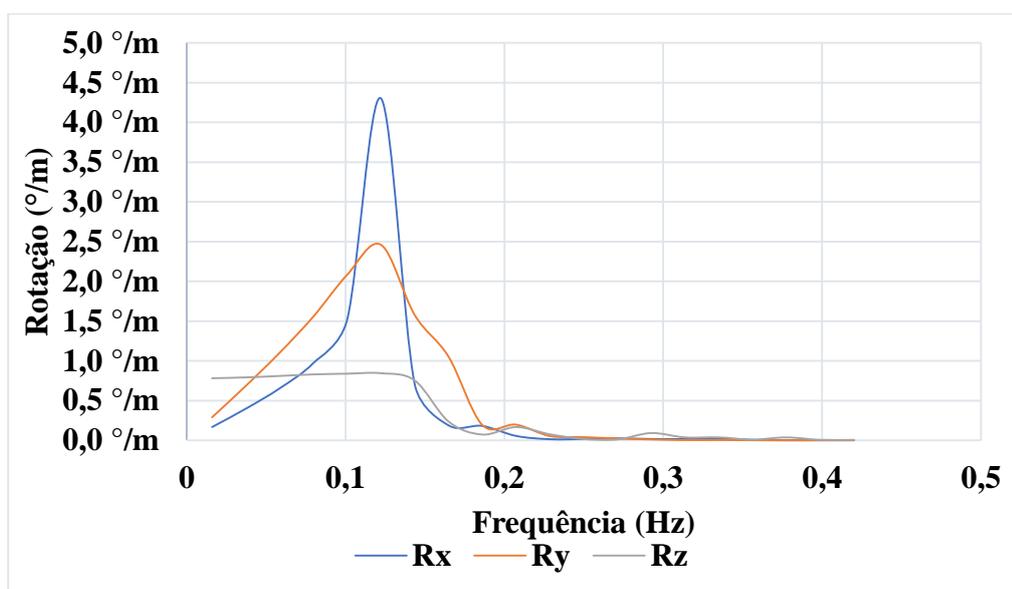


Figura 7.6 – Operadores de Amplitude de Resposta para os Movimentos Rotacionais. Direção de Onda incidente: 30°. Fonte: ANSYS AQWA (2017).

Nas Figuras 7.7 e 7.8 encontram-se os RAOs dos movimentos translacionais (avanço, deriva e arfagem) e rotacionais (jogo, caturro e guinada), respectivamente. Para estes operadores de amplitude de resposta de movimento a direção de incidência de onda é de 60°. Esses valores relacionam a movimentação da embarcação por unidade de altura de onda em metros para os movimentos translacionais e em graus para os movimentos rotacionais.

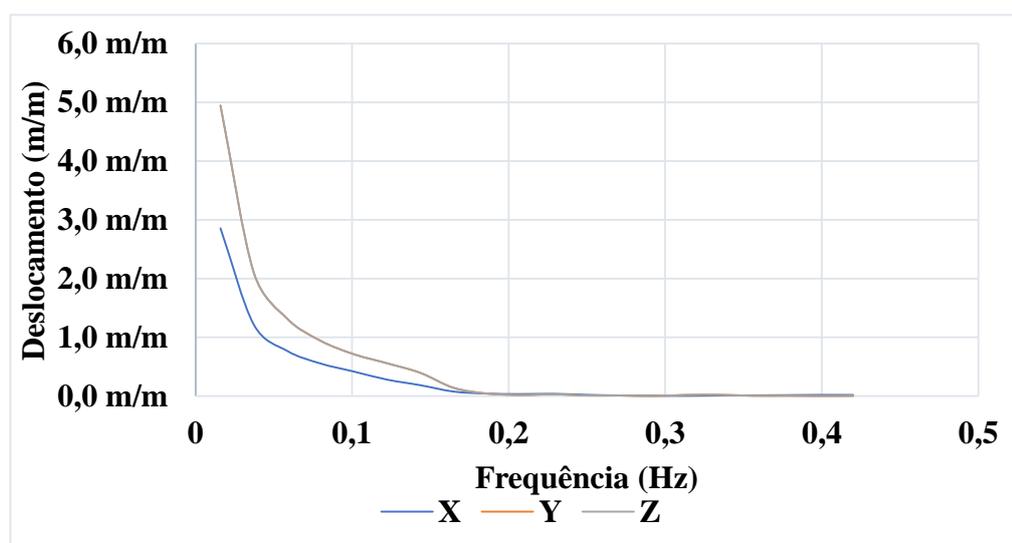


Figura 7.7 – Operadores de Amplitude de Resposta para os Movimentos Translacionais. Direção de Onda incidente: 60°. Fonte: ANSYS AQWA (2017).

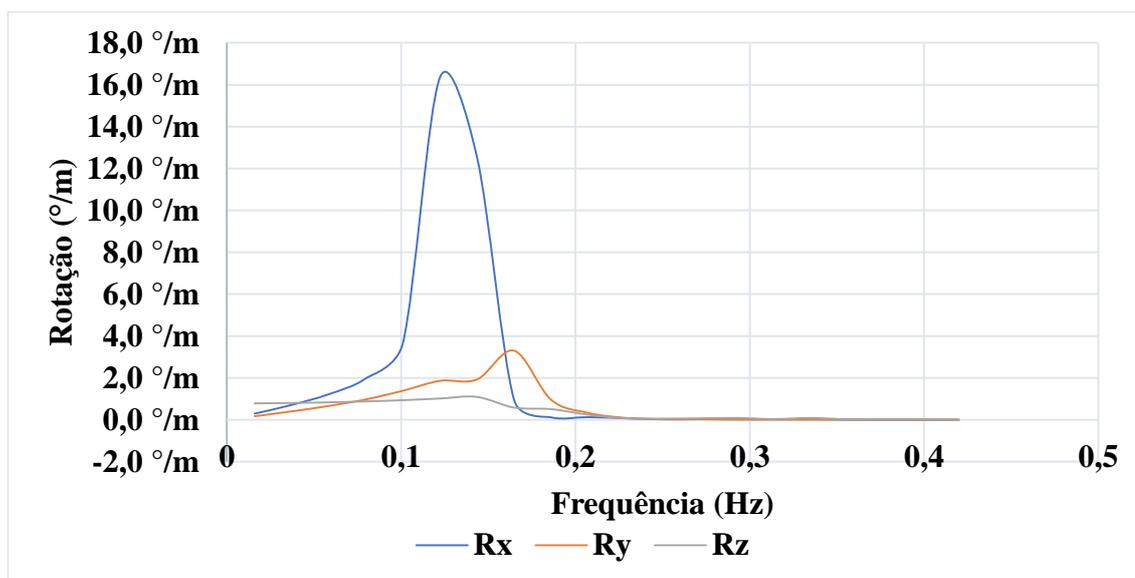


Figura 7.8 – Operadores de Amplitude de Resposta para os Movimentos Rotacionais. Direção de Onda incidente: 60°. Fonte: ANSYS AQWA (2017).

Nas Figuras 7.9 e 7.10 encontram-se os RAOs dos movimentos translacionais (avanço, deriva e arfagem) e rotacionais (jogo, caturro e guinada), respectivamente. Para estes operadores de resposta de movimento a direção de incidência de onda é de 90° (través). Para esta situação ocorreram diversos problemas dentro da análise de esforços de tração nos cabos de amarração dos corpos flutuantes, sendo encontrados valores de tração nos cabos muito significativos.

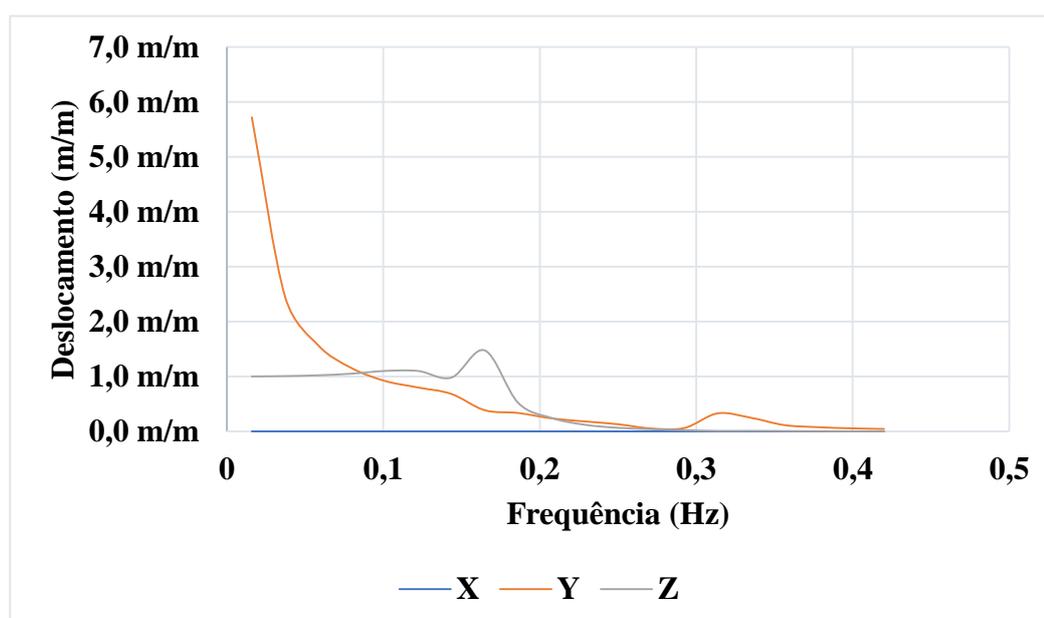


Figura 7.9 – Operadores de Amplitude de Resposta para os Movimentos translacionais. Direção de Onda incidente: 90°. Fonte: ANSYS AQWA (2017).

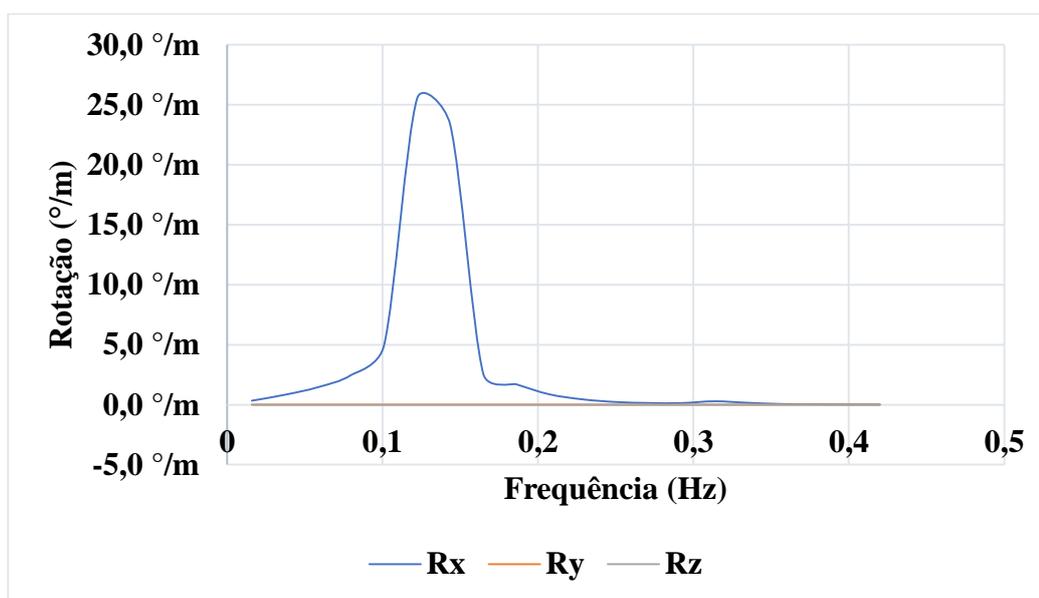


Figura 7.10 – Operadores de Amplitude de Resposta para os Movimentos Rotacionais. Direção de Onda incidente: 90°. Fonte: ANSYS AQWA (2017).

Esses gráficos de amplitude de resposta são importantes para análises no domínio da frequência. Análises no domínio do tempo não utilizam os RAOs (*Response Amplitude Operators*), para esse caso, uma quantidade específica de espectros de onda é assumida e a embarcação é alocada no mar resultante dessa superposição. As forças e os momentos são calculados e as mudanças de comportamento dinâmico são deduzidas.

O volume submerso do casco varia com o tempo para a análise no domínio do tempo e os efeitos de acoplamento devido a essas alterações são construídos após o término dessa análise. Para este tipo de análise é necessário um intervalo de tempo longo para se alcançar bons resultados.

7.1.4 Análise no Domínio do Tempo

7.1.4.1 Esforços nas Defensas

Neste tópico da dissertação são ilustrados os gráficos obtidos a partir da análise no domínio do tempo dentro do *Ansys Hydrodynamic Response*. Para o modelo com barcaças de minério de ferro a análise no domínio da frequência apresentou incongruências no que se refere a convergência dos dados, não sendo informados valores para os níveis de amortecimento, tanto para os esforços nos cabos de amarração quanto para os valores de deformação das próprias defensas.

Os níveis de forças presentes nas duas defensas que constituem o sistema de contato do modelo são indicados na Figura 7.11. Salientando que estes esforços atuam na direção longitudinal da defesa.

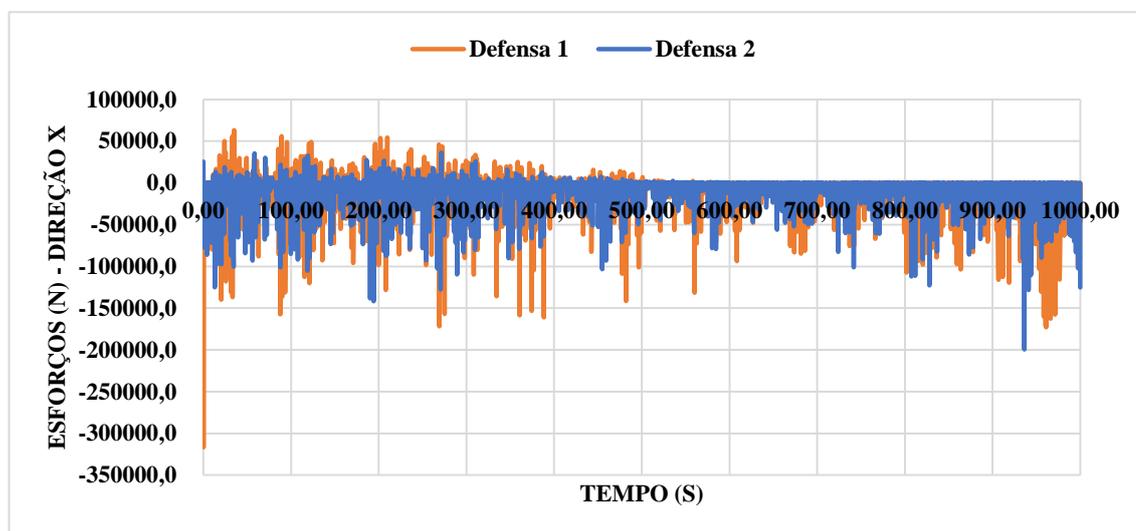


Figura 7.11 – Padrão de Esforços na Direção Longitudinal da Defesa (*Timestep* = 0,1s; *T* = 1000 s).
Fonte: ANSYS Hydrodynamic Response.

Com base na interpretação dos resultados acima, devemos identificar o padrão de resposta através dos picos dos esforços atuantes nas defensas. Os esforços na direção transversal (direção Y) das defensas são indicados na Figura 7.12.

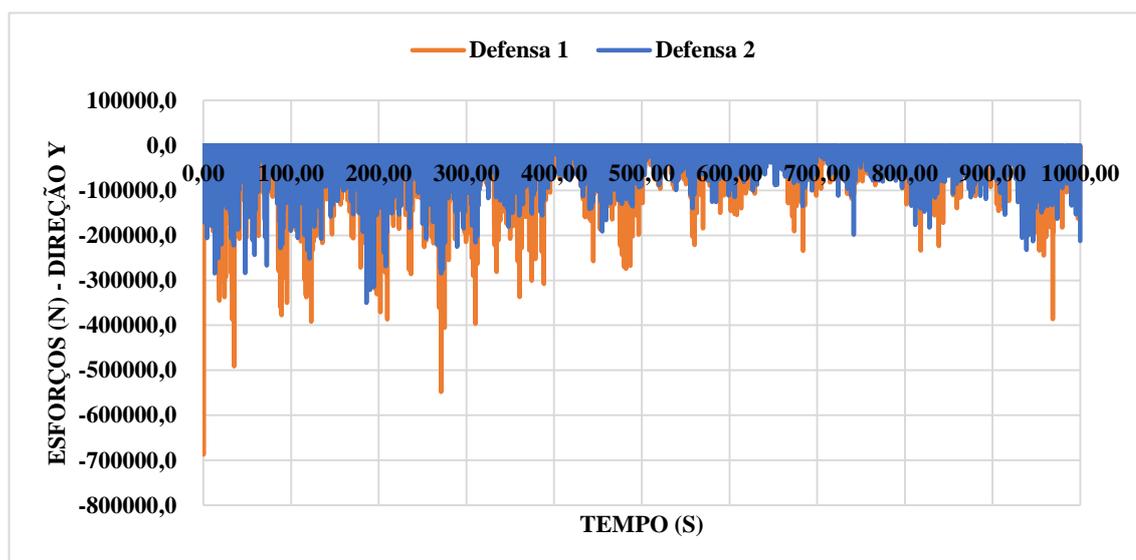


Figura 7.12 – Padrão de Esforços na Direção Transversal da Defesa (*Timestep* = 0,1s; *T* = 1000 s).
Fonte: ANSYS Hydrodynamic Response.

Por fim, os esforços na direção vertical das defensas são indicados na Figura 7.13. Os níveis de esforços nas três direções foram calculados com base na seleção de um

modelo de defesa omnidirecional. É possível identificar na Figura abaixo o comportamento dos esforços atuantes na direção vertical (direção Z) das defensas. Com a variação dos picos de esforços, podemos captar o valor máximo para um determinado intervalo de tempo.

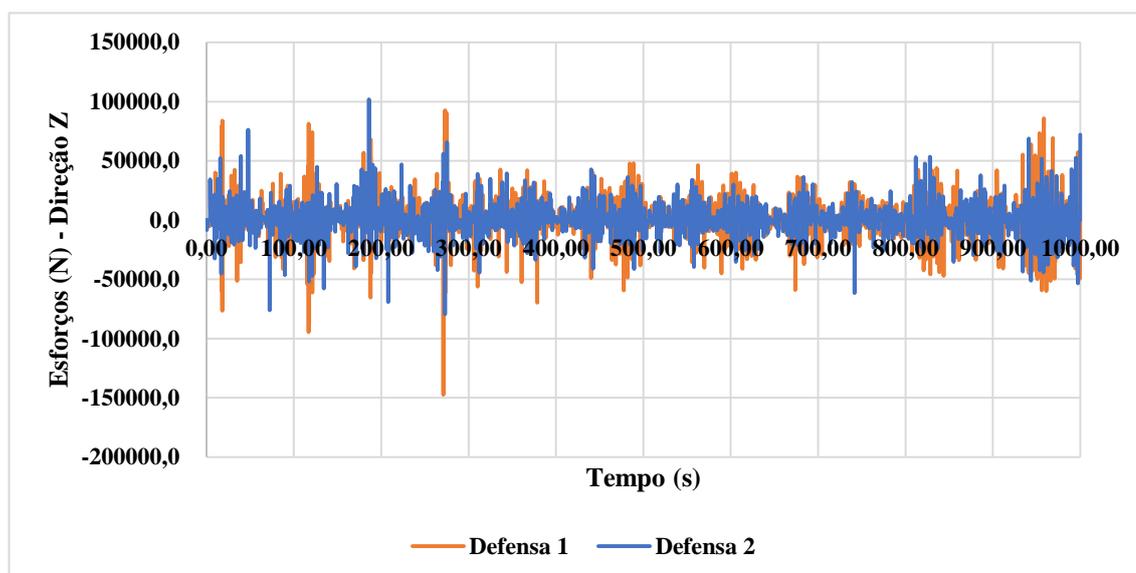


Figura 7.13 – Padrão de Esforços na Direção Vertical da Defesa (*Timestep* = 0,1s; T = 1000 s).
Fonte: ANSYS *Hydrodynamic Response*.

Nesse caso, os valores máximos de forças de compressão atuantes nas defensas para a condição de uma barcaça, atracada costado a costado com outra, estão indicados na Tabela 7-1. Os valores negativos representam esforços de compressão.

Tabela 7-1 – Componentes de Esforços nas Três Direções para as Defensas Omnidimensionais de 0,5 m de Comprimento. Fonte: ANSYS *AQWA*.

Elemento	Direção X	Direção Y	Direção Z
Defensa 1 (Proa)	-32,295 tf	-70,109 tf	-15,029 tf
Defensa 2 (Popa)	-20,341 tf	-35,700 tf	-8,096 tf

7.1.4.2 Esforços nos Cabos de Aço

Os valores máximos dos dados relacionados com as forças atuantes no cabo de aço 1 na direção transversal Y foram da ordem de 57,48 tonelada-força, para um estado de mar com direção de propagação de ondas na direção de 0°, dentro de um intervalo de análise de 1000 s, com um passo de tempo de 0,1 s.

A Figura 7.14 informa o gráfico relativo ao padrão de resposta de trações atuantes no cabo 1 ao longo de 1000 s, sendo este tempo limitado pela memória computacional

disponível no computador e pelos próprios índices de movimentação relativa dos corpos flutuantes com relação à sua posição inicial.

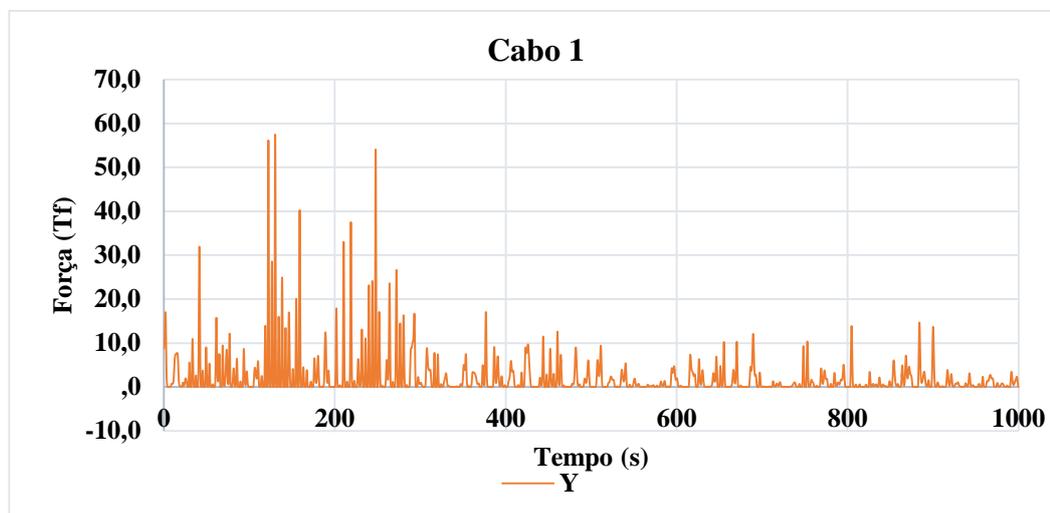


Figura 7.14 – Padrão de Resposta de Esforços Atuantes no Cabo 1.
Fonte: ANSYS Hydrodynamic Response.

Os valores máximos das forças atuantes no cabo de aço 2 na direção transversal Y foram da ordem de 19,3 tonelada-força, com ondas em direção de propagação a 0° , com o mesmo intervalo de análise e passo de tempo identificado na Figura 7.14. A Figura 7.15 ilustra o espectro de resposta de trações para o cabo 2, este cabo fica localizado no perfil da popa das barças.

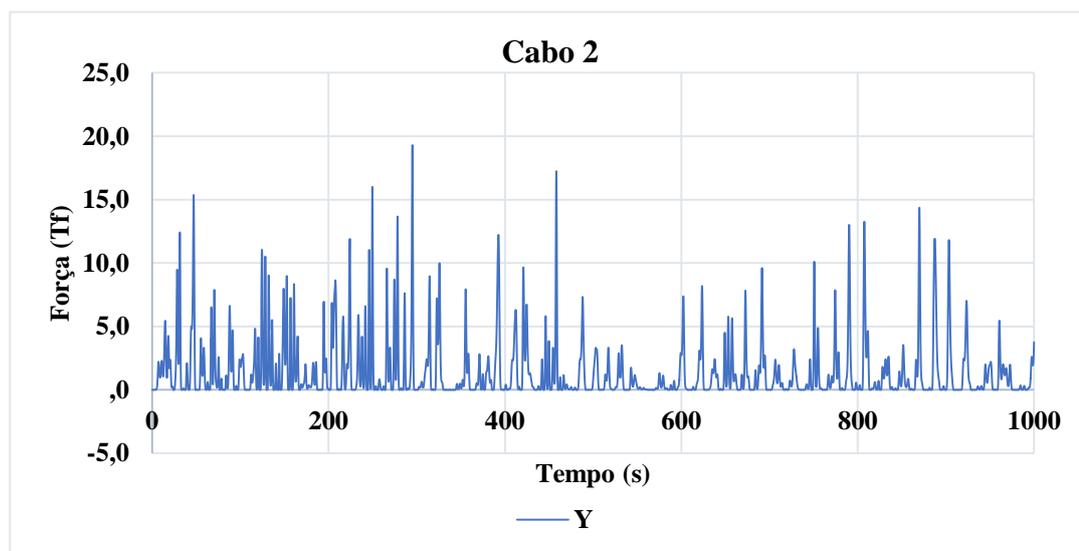


Figura 7.15 – Padrão de Espectro de Resposta de Esforços Atuantes no Cabo 2.
Fonte: ANSYS Hydrodynamic Response.

Entretanto, foi identificado que para direções de propagação de través (90°) os níveis de respostas presentes nos cabos de aço assumem valores muito mais elevados, chegando a ordem de 213 tonelada-força na direção transversal (Y).

A Tabela 7-2 informa esses valores de esforços atuantes nos cabos de amarração. Salienta-se que a análise não apresenta sonda de indicação de rompimento de cabo, o modelo calcula o limite máximo de suporte de deformações incidentes em cada elemento de atracação.

Tabela 7-2 – Forças atuantes nos cabos de amarração. Estado de Mar 90° - JONSWAP.

Fonte: ANSYS AQWA (2017).

Cabo 1	Mínimo X	Máximo X	Mínimo Y	Máximo Y	Mínimo Z	Máximo Z
	-49.052,18 N	611,92 N	-18,74 N	1.767.312,75 N	-34.352,90 N	224.685,27 N
	-5002,01 kgf	62,40 kgf	-1,91 kgf	180218,50 kgf	-3503,07 kgf	22911,87 kgf
	-5,00 tf	0,06 tf	0,00 tf	180,22 tf	-3,50 tf	22,91 tf
Cabo 2	Mínimo X	Máximo X	Mínimo Y	Máximo Y	Mínimo Z	Máximo Z
	-61.229,90 N	966,21 N	-19,76 N	2.096.299,13 N	-34.490,84 N	175.233,17 N
	-6243,81 kgf	98,53 kgf	-2,02 kgf	213766,29 kgf	-3517,14 kgf	17869,08 kgf
	-6,24 tf	0,10 tf	0,00 tf	213,77 tf	-3,52 tf	17,87 tf

7.1.5 Análise para uma Formação de Comboio maior (3x2)

Para a análise mais precisa de um comboio fluvial foi modelado um conjunto de barcaças computacionalmente, para se aferir o grau de influência dos níveis de esforços para uma quantidade maior de corpos flutuantes interagindo entre si. O modelo apresentado na Figura 7.16 indica um total de 6 barcaças.

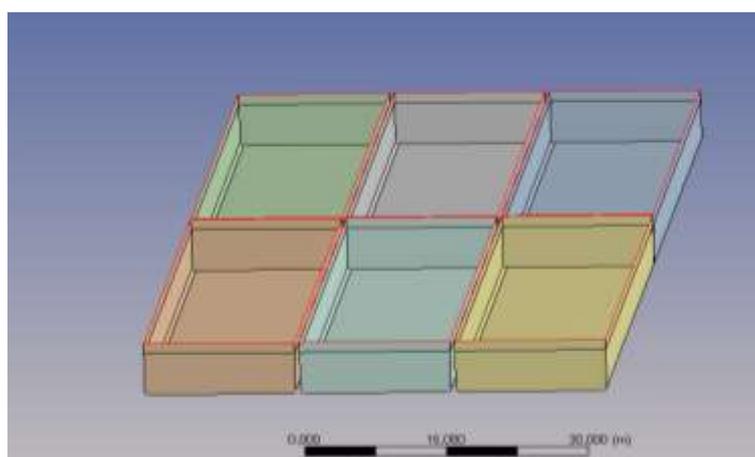


Figura 7.16 – Modelo Computacional das Barcaças de Minério de Ferro em formação 3x2.

Fonte: ANSYS AQWA (2017).

O modelo apresentado na Figura 7.16 possui como elementos de amarração cabos de aço com comportamento não linear. A Figura 7.17 indica o padrão de amarração utilizado para simular todos os esforços de tração que a formação de barcaças está sujeita.

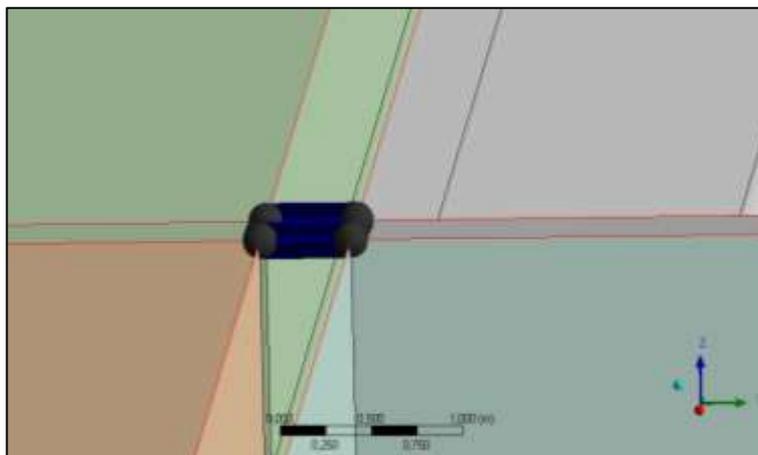


Figura 7.17 – Modelo representativo dos cabos de amarração utilizados na análise. Fonte: ANSYS AQWA (2017).

Para a modelagem dos elementos de defesa, foram empregados elementos omnidirecionais com capacidade de absorção de impactos em três direções. O modelo apresentado na Figura 7.18 indica o posicionamento dos pontos de acoplamento e na Figura 7.19 está representado o modelo de defesa computacional esférica (Omnidirecional) utilizado na análise.

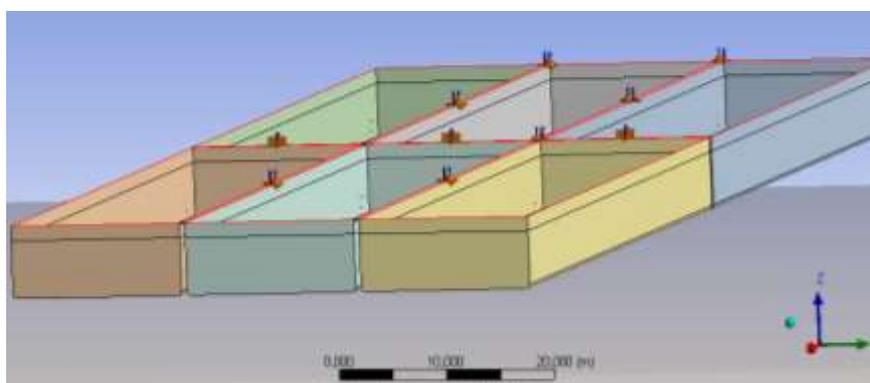


Figura 7.18 – Representação dos pontos selecionados para posicionamento dos elementos de defesa utilizados na medição dos impactos entre cascos. Fonte: ANSYS AQWA (2017).

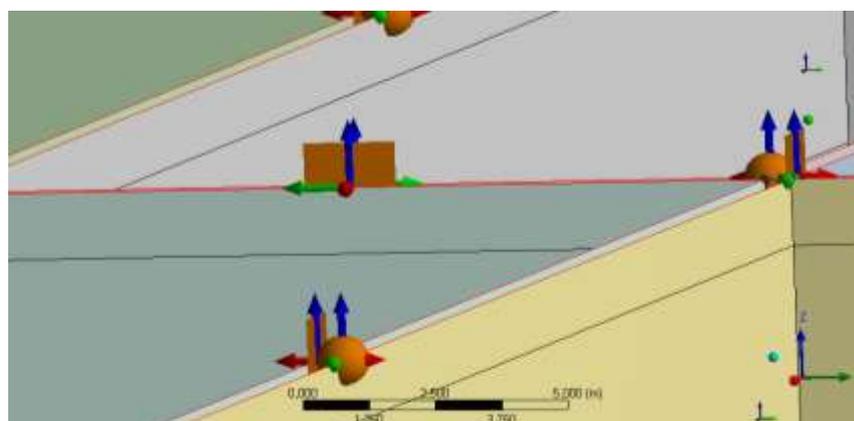


Figura 7.19 – Modelo de defesa omnidirecional (formato esférico virtual) utilizado para medir os impactos entre embarcações. Fonte: ANSYS AQWA (2017).

Como critério de validação foi selecionado um novo padrão de formação de barcaças de minério de ferro de 3 linhas e 2 colunas (3x2), totalizando assim 6 barcaças. Dessa forma, os valores dos esforços atuantes nos cabos de amarração e nas defensas foram recalculados e organizados ao ponto de serem comparados aos níveis de tração encontrados experimentalmente.

A identificação da enumeração das defensas omnidirecionais empregadas nessa análise pode ser vislumbrada na Figura 7.20, com o modelo satisfazendo as dimensões mínimas necessárias para captação dos impactos solicitantes advindos de movimentações irregulares.

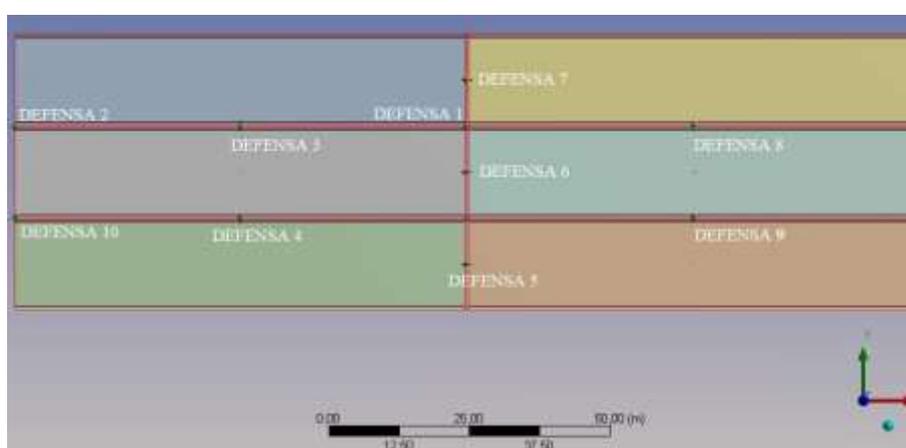


Figura 7.20 – Identificação das defensas utilizadas na análise.
Fonte: ANSYS AQWA (2017).

A enumeração de cada barcaça é indicada na Figura 7.21, sendo necessária para realizarmos a identificação dos níveis de esforços calculados para cada cabo presente em um ponto específico de cada barcaça.

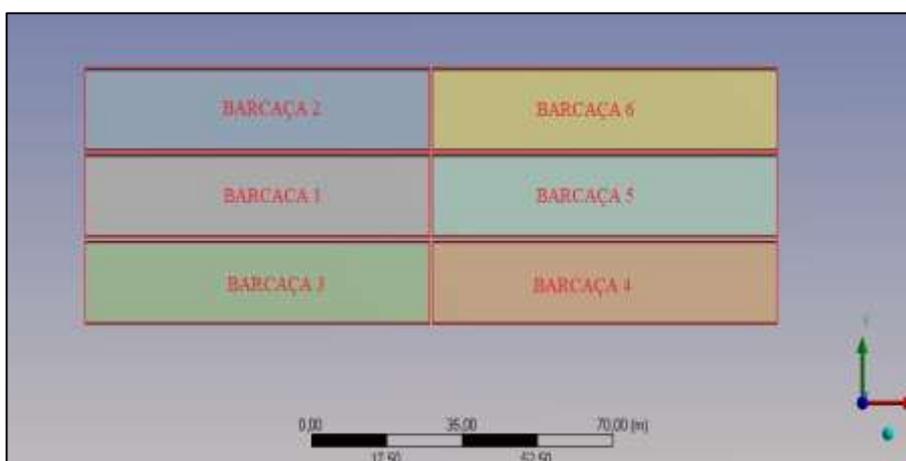


Figura 7.21 – Indicação da enumeração das barcaças. Fonte: ANSYS AQWA (2017).

Na Figura 7.22 é possível identificar a enumeração sequencial dos cabos de aço empregados para atracar as barcaças de minério de ferro.

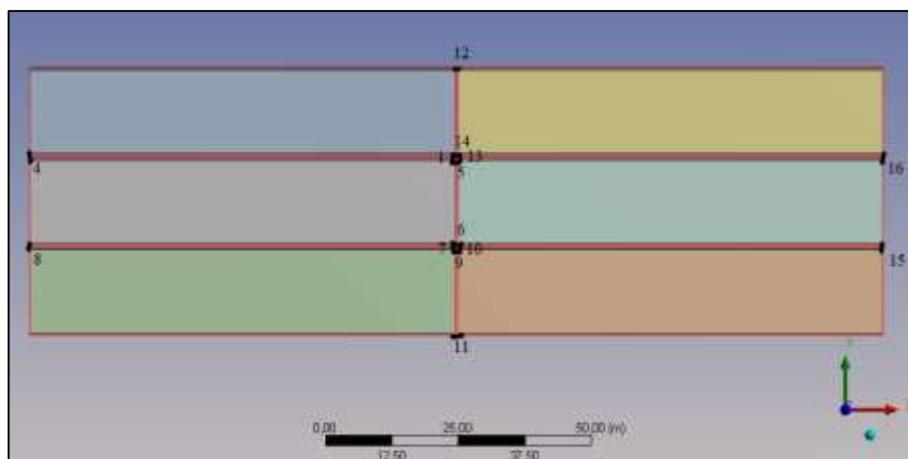


Figura 7.22 – Indicação dos cabos de amarração alocados no comboio de barcaças de minério de ferro. Fonte: ANSYS AQWA (2017).

A faixa de esforços atuantes nas defensas presentes na barcaça 1 de minério de ferro da formação é indicada pela Tabela 7-3.

Tabela 7-3 – Níveis de esforços captados para a barcaça de Minério de Ferro 1.
Fonte: ANSYS AQWA (2017).

Barcaça 1	Mecanismo	Força X máxima	Força Y máxima	Força Z máxima
	Defensa 1	12,49 Tf	-41,73 Tf	0,62 Tf
	Defensa 2	3,97 Tf	-13,28 Tf	0,37 Tf
	Defensa 3	0,09 Tf	-1,84 Tf	0,08 Tf
	Defensa 4	16,34 Tf	63,92 Tf	3,61 Tf
	Defensa 6	-436,37 Tf	13,32 Tf	130,29 Tf
	Defensa 10	35,87 Tf	118,19 Tf	2,10 Tf

Os níveis de esforços atuantes nas defensas presentes na barcaça 2 de minério de ferro da formação são indicados na Tabela 7-4.

Tabela 7-4 – Níveis de Esforços captados para a Barcaça de Minério de Ferro 2.
Fonte: ANSYS AQWA (2017).

Barcaça 2	Mecanismo	Força X máxima	Força Y máxima	Força Z máxima
	Defensa 1	-12,49 Tf	41,73 Tf	-0,62 Tf
	Defensa 2	-3,97 Tf	13,28 Tf	-0,37 Tf
	Defensa 3	-0,09 Tf	1,84 Tf	-0,08 Tf
Defensa 7	0,00 Tf	0,00 Tf	0,00 Tf	

A faixa de esforços atuantes nas defensas presentes na barcaça 3 da formação é indicada pela Tabela 7-5.

Tabela 7-5 – Níveis de Esforços captados para a Barcaça de Minério de Ferro 3.

Fonte: ANSYS AQWA (2017).

Barcaça 3	Mecanismo	Força X máxima	Força Y máxima	Força Z máxima
	Defensa 4	-16,34 Tf	-63,92 Tf	-3,61 Tf
	Defensa 5	959,23 Tf	-72,86 Tf	-287,85 Tf
	Defensa 10	35,87 Tf	118,19 Tf	2,10 Tf

Os valores dos esforços atuantes nas defensas presentes na barcaça 4 de minério de ferro é indicada pela Tabela 7-6.

Tabela 7-6 – Níveis de Esforços captados para a Barcaça de Minério de Ferro 4.

Fonte: ANSYS AQWA (2017).

Barcaça 4	Mecanismo	Força X máxima	Força Y máxima	Força Z máxima
	Defensa 5	-959,23 Tf	72,86 Tf	287,85 Tf
	Defensa 9	8,61 Tf	-28,77 Tf	-0,62 Tf

A faixa de esforços atuantes nas defensas presentes na barcaça 5 de minério de ferro da formação é indicada pela Tabela 7-7.

Tabela 7-7 – Níveis de Esforços captados para a Barcaça de Minério de Ferro 5.

Fonte: ANSYS AQWA (2017).

Barcaça 5	Mecanismo	Força X máxima	Força Y máxima	Força Z máxima
	Defensa 6	436,37 Tf	-13,32 Tf	130,29 Tf
	Defensa 8	-0,47 Tf	-7,27 Tf	0,60 Tf
	Defensa 9	-8,61 Tf	28,77 Tf	0,62 Tf

A faixa de esforços atuantes nas defensas presentes na barcaça 6 de minério de ferro é indicada da Tabela 7-8.

Tabela 7-8 – Níveis de Esforços captados para a Barcaça de Minério de Ferro 6.

Fonte: ANSYS AQWA (2017).

Barcaça 6	Mecanismo	Força X máxima	Força Y máxima	Força Z máxima
	Defensa 7	394,16 Tf	-0,66 Tf	93,41 Tf
	Defensa 8	0,47 Tf	7,27 Tf	-0,60 Tf

Os níveis de esforços de tração presente nos cabos de aço que constituem a amarração do comboio podem ser avaliados na Tabela 7-9. Esses valores foram captados de acordo com a análise computacional realizada no ANSYS AQWA (2017).

Tabela 7-9 – Níveis de esforços presentes nos cabos de aço que amarram as barcaças de minério de ferro. Fonte: ANSYS AQWA (2017).

	Força X	Força Y	Força Z
	(Valores Máximos)		
Cabo 1	0,000 Tf	0,000 Tf	0,000 Tf
Cabo 2	0,000 Tf	0,000 Tf	0,000 Tf
Cabo 3	1,7662 Tf	0,0108 Tf	0,0095 Tf
Cabo 4	1,9252 Tf	0,0117 Tf	0,0096 Tf
Cabo 5	0,000 Tf	0,000 Tf	0,000 Tf
Cabo 6	0,000 Tf	0,000 Tf	0,000 Tf
Cabo 7	5,2593 Tf	0,7942 Tf	0,0102 Tf
Cabo 8	0,0638 Tf	0,5916 Tf	-0,0003 Tf
Cabo 9	5,4906 Tf	-0,6958 Tf	0,0179 Tf
Cabo 10	3,3319 Tf	0,1018 Tf	0,0093 Tf
Cabo 11	0,000 Tf	0,000 Tf	0,000 Tf
Cabo 12	2,9513 Tf	0,0904 Tf	0,0069 Tf
Cabo 13	0,000 Tf	0,000 Tf	0,000 Tf
Cabo 14	0,000 Tf	0,000 Tf	0,000 Tf

A interação com as defensas pode ter diminuído significativamente o trabalho dos cabos de amarração dentro da formação utilizada computacionalmente. Os níveis de esforços nos cabos com componente nula apresentaram problemas de leitura devido ao padrão de comportamento de resposta das barcaças e o modelo computacional empregado na modelagem exceder o limite de 75% de movimentação com relação à posição inicial da análise (movimentação de deriva irregular do sistema).

As deformações nos cabos de aço são nulas, nesse caso, não computam nenhum valor de esforço. Deve-se atentar que os níveis de rigidez e de comprimento inicial de cabo de aço foram os mesmos para cada elemento de amarração utilizado. Foi verificado que para esta análise com várias barcaças os níveis de esforços medidos reduziram significativamente.

Cada cálculo com o auxílio do programa é realizado em duas etapas, primeiramente, o cálculo de séries temporais é realizado para descrição dos movimentos das embarcações e dos esforços nas amarras, posteriormente, o procedimento de identificação dos pontos de máximo e mínimo no modelo são computados pelo próprio *software*.

7.1.5.1 Modelo de comparação

Como estudo prático dentro dessa área de condição de operação de comboios fluviais elucidamos o trabalho de Nagado, Lukine e Mendonça (2012), onde estes autores analisaram uma maneira mais eficiente de se amarrar um conjunto de barcaças para transporte de minério de ferro na Baía de Marajó, no Estado do Pará. Nesse estudo, um comboio de nove barcaças navegou pela rota delimitada entre o porto da *Lubrific* em Belém-PA até o a região do Farol Simão Grande (Limite da Área 2 – Águas Interiores).

Foram considerados os esforços devido a correntes, esforços providos de manobras, ventos, da variação da velocidade operacional do comboio e dos movimentos verticais relativos entre cada barcaça, delimitando o nível de tensões nos cabos e nas manilhas dos cabeços. As condições estudadas correspondem a:

- Comboio atracando e desatracando do cais;
- Navegando com leme em direção de zero graus (leme a meio);
- Condição de parada brusca⁷;
- Teste de manobra de Zig-Zag (10° BB/10° BE)⁸.

Para esta análise prática apresentada por Nagado, Lukine e Mendonça (2012) foi utilizado um comboio para transporte de minério de ferro, que totalmente carregado apresenta um valor de Tonelada de Porte Bruto (TPB) da ordem de 50.617,50 toneladas. As dimensões das barcaças utilizadas correspondem a 80 m de comprimento, 16 m de boca e 6,50 m de pontal. As dimensões totais do comboio são apresentadas na Figura 7.23.

⁷ Conforme o teste realizado por NAGADO, LUKINE e MENDONÇA (2012), o comboio de barcaças em trajetória retilínea e com velocidade máxima é submetido a uma parada total de emergência.

⁸ Teste realizado para se avaliar as habilidades de giro inicial e de guinada de uma embarcação. O leme é acionado com a embarcação em determinada velocidade para 10° a bombordo (BB). A partir deste momento a embarcação muda seu aproamento para bombordo. Quando o aproamento atinge 10°, o leme é acionado e passa para a posição de 10° boreste (BE). Por inércia, o aproamento continua a aumentar até atingir um valor máximo para bombordo, e assim começa o movimento de retorno para boreste. Quando o aproamento atinge 10° boreste, o leme é modificado para bombordo e assim o ciclo se repete. Nesse momento anota-se a diferença entre os 10° da posição desejada e o aproamento máximo para boreste, denominando este valor de 2° ângulo de sobretiro ou 2° *overshoot angle* (JUNIOR, 2014, p - 18).

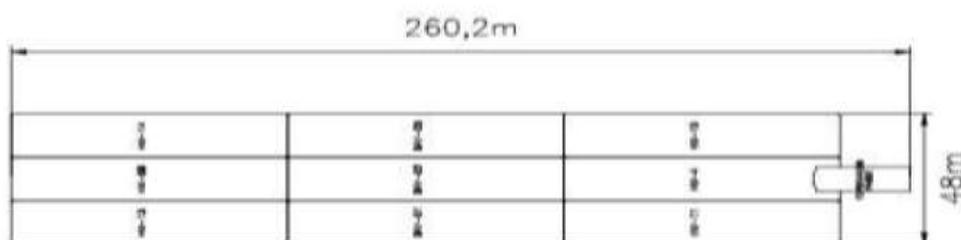


Figura 7.23 – Formação do comboio de transporte de minério de Ferro com 9 barcaças e um empurrador. Fonte: NAGADO, LUKINE e MENDONÇA (2012).

É importante citar que o comboio utilizado apresenta características de atracação por cabos de aço, porém, na região de atracação do empurrador com a barcaça da linha intermediária da formação, o sistema de atracação é feito por pinos de acoplamento, acionados por intermédio de um sistema pneumático, conforme indicado pela Figura 7.24.

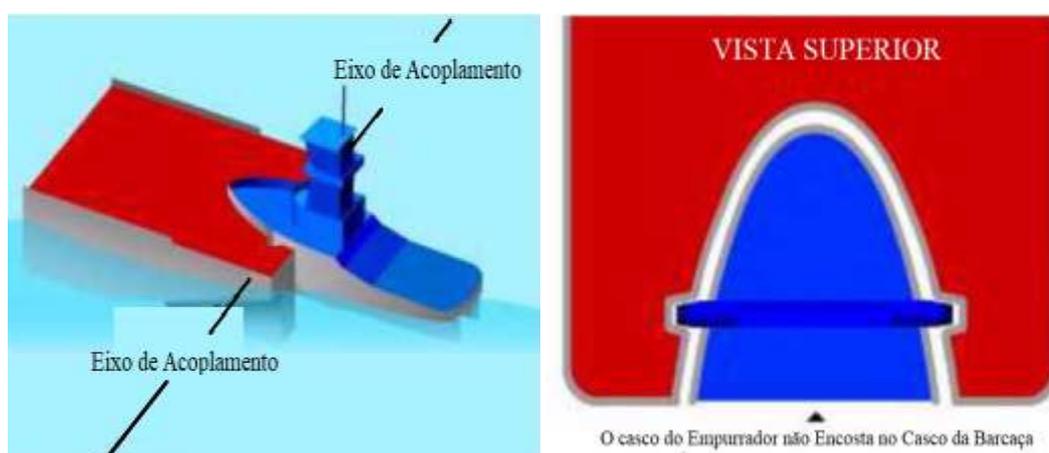


Figura 7.24 – Esquema do acoplamento feito pelo empurrador e pela barcaça de atracação. Fonte: INTERCON.

A Figura 7.25 mostra a visão das barcaças do comboio a partir do passadiço do empurrador.

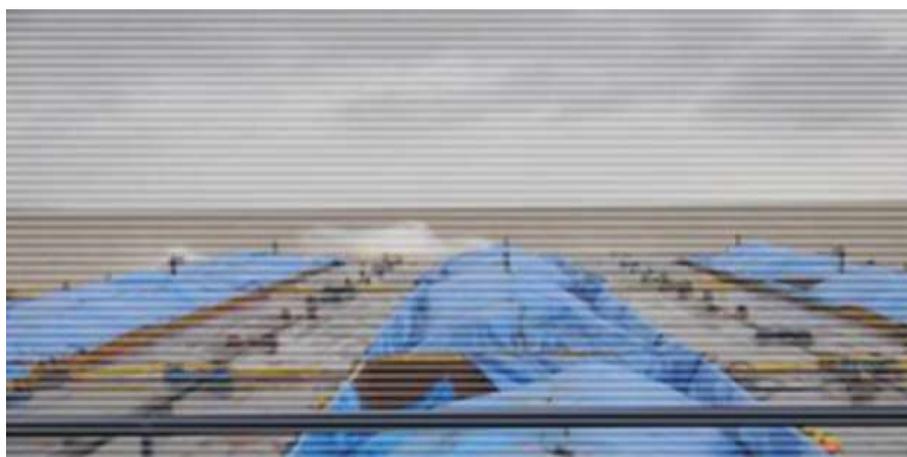


Figura 7.25 – Vista do passadiço do empurrador com navegação em plena carga.
Fonte: NAGADO, LUKINE e MENDONÇA (2012).

A Figura 7.26 mostra o comboio com calado totalmente carregado de 5,2 m para as barçaças *Box* e 5,14 m para as barçaças do tipo *Raked*.



Figura 7.26 – Vista geral do comboio de 9 barçaças para transporte de minério vazias (esquerda) e totalmente carregadas (direita). Fonte: NAGADO, LUKINE e MENDONÇA (2012).

As amarrações foram feitas com cabos de aço de 7/8” para atracar as barçaças. Na Figura 7.27 os cabeços e os cabos de amarração são ilustrados. Este modelo de amarração foi utilizado no teste de navegação na Baía de Marajó.



**Figura 7.27 – Modelo de cabeços e de amarração utilizados para o estudo prático.
Fonte: NAGADO, LUKINE e MENDONÇA (2012).**

Um acelerômetro foi utilizado como mecanismo de medição de movimento relativo entre as barças posicionado no convés das embarcações. Este dispositivo está ilustrado na Figura 7.28.



Figura 7.28 – Modelo de acelerômetro posicionado no convés da barça de nº 6 para medição dos movimentos das barças durante o teste. Fonte: NAGADO, LUKINE e MENDONÇA (2012).

Segundo Nagado, Lukine e Mendonça (2012), para medir os esforços nos cabos de aço foram utilizadas células de carga KRATOS para 100 toneladas como é mostrado na Figura 7.29.



Figura 7.29 – Modelo de célula de carga utilizada para medir os índices de tensões presentes nos cabos de amarração das barcaças. Fonte: NAGADO, LUKINE e MENDONÇA (2012).

Na figura 7.30 é possível identificar os cabos de propileno utilizados em conjunto com cabos de aço para atracar o empurrador às barcaças. Este tipo de amarração foi proposto pelos autores do trabalho como medida auxiliar e mais flexível em comparação aos cabos de aço utilizados convencionalmente.



Figura 7.30 – Amarração do comboio utilizando cabos de propileno (cor Amarela) de 4 polegadas. Fonte: NAGADO, LUKINE e MENDONÇA (2012).

Os índices de carregamentos máximos medidos pelas células de carga nos cabos foram da ordem de 50 toneladas. A Tabela 7-10 mostra os valores médios determinados nesse estudo prático.

Tabela 7-10 – Leitura dos Esforços nas amarras dos cabos das barcaças de Bombordo do Comboio.
Fonte: NAGADO, LUKINE e MENDONÇA (2012).

Comboio Atracado	Esforço
Média (t)	2,87 ton
Pico Máximo (t)	4,01 ton
Comboio Desatracado	X
Média (t)	5,99 ton
Pico Máximo (t)	8,30 ton
Comboio de Leme a Zero e Maré Vazando	X
Média (t)	9,61 ton
Pico Máximo (t)	18,08 ton
Condição de Parada Brusca	X
Média (t)	5,72 ton
Pico Máximo (t)	15,48 ton
Condição de Leme a Zero e Maré Virando	X
Média (t)	6,27 ton
Pico Máximo (t)	16,30 ton
Condição de Leme a zero e maré contra o comboio	X
Média (t)	3,50 ton
Pico Máximo (t)	10,62 ton
Condição Zig-Zag, leme 10° a BB	X
Média (t)	2,68 ton
Pico Máximo (t)	14,50 ton
Condição Zig-Zag leme 10° BE	X
Média (t)	35,64 ton
Pico Máximo (t)	Cabo Rompido

Na Figura 7.31 é possível identificar o conjunto de amarração das barcaças na região de contato entre a proa e a popa na seção intermediária do comboio.

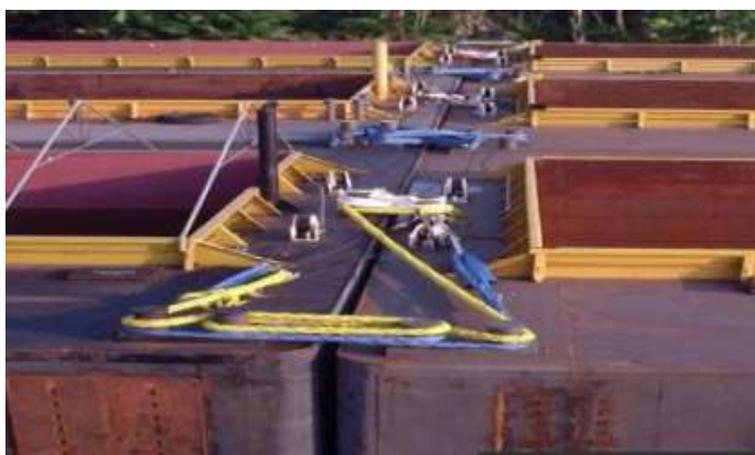


Figura 7.31 – Visualização do aspecto de amarração das barcaças.
Fonte: NAGADO, LUKINE e MENDONÇA (2012).

Nesse caso, apresentamos um trabalho capaz de servir de modelo comparativo para os resultados computacionais apresentados pelo *software*.

7.2 Análise das Barcaças de Soja

Utilizando o mesmo modelo computacional empregado para o comboio de barcaças de minério de ferro, depreende-se que as barcaças de soja apresentam comportamento semelhante, porém com movimentação mais acentuada, devido ao seu nível de deslocamento ser bastante inferior ao deslocamento das barcaças de minério de ferro.

A Figura 7.32 ilustra o modelo de barcaças de soja empregado na análise de aferição do comportamento de resposta a ondas.

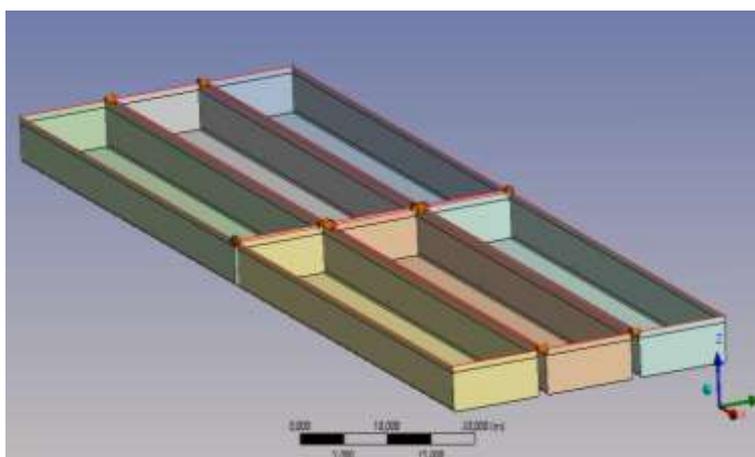


Figura 7.32 – Modelo de formação de barcaças de soja de 60,96 m de comprimento.
Fonte: ANSYS AQWA (2017).

Para a análise do comboio de soja foi indicada uma avaliação no domínio da frequência, relacionando os esforços lidos nos cabos de aço com os níveis de frequência de incidência de onda, aumentando a faixa de dados relacionados com as frequências de ondas.

A análise no domínio do tempo, que é capaz de gerar o espectro de resposta de forças no domínio do tempo não convergiu para este modelo de comboio, isso se deve ao fato dos níveis de esforços atuantes não apresentarem consistência, devido ao comboio apresentar movimentação acima de 75% do permitido para a solução da análise no domínio do tempo dentro do próprio ANSYS AQWA (2017).

Os esforços nulos nos cabos de número 9 e 10 indicam deformação nula para esses dois elementos de atracação. Os níveis desses esforços são apresentados na Figura 7.33.

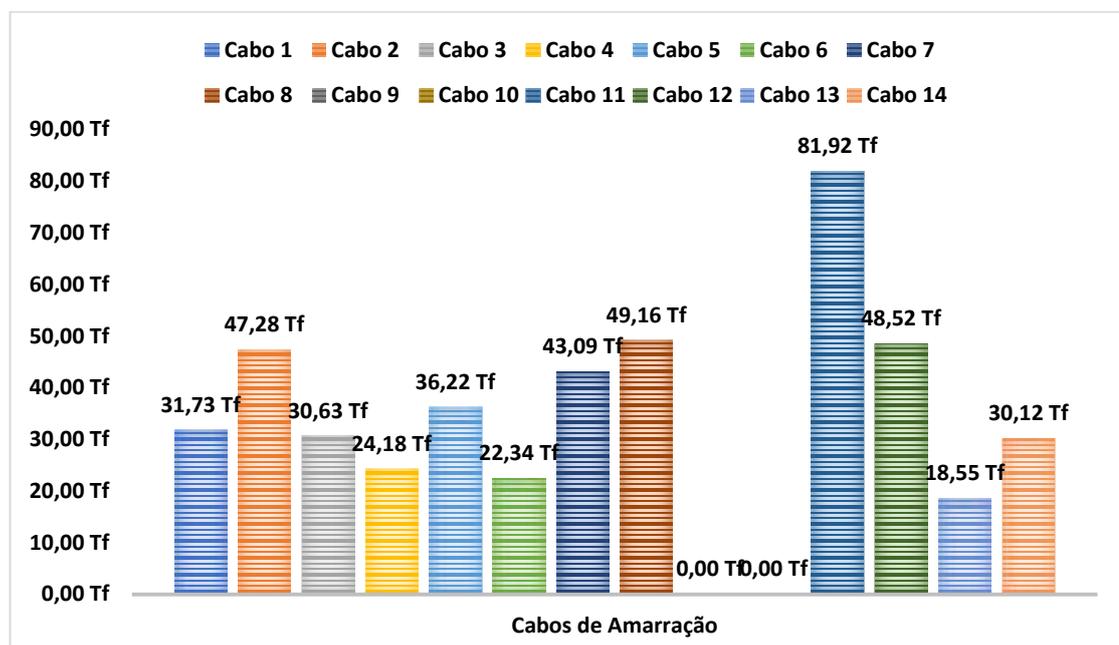


Figura 7.33 – Níveis de esforços de tração medidos nos cabos de aço da formação 3x2 de barças de soja. Fonte: ANSYS AQWA (2017).

O valor máximo de esforços de tração nos cabos foi da ordem de 81,92 Tf. As barças que estão atracadas pelos cabos enumerados na Figura 7.33 são indicadas na Figura 7.34, sendo identificada a enumeração de cada barça de soja com base na vista superior do comboio, facilitando assim o entendimento da organização dos elementos de atracação e de defensas.

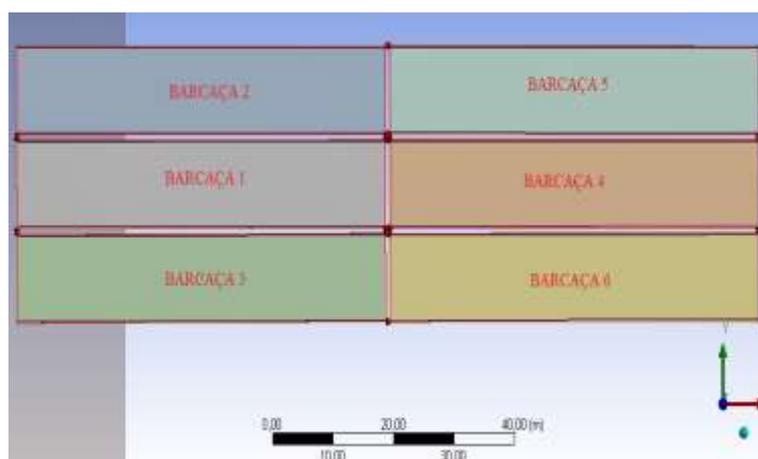


Figura 7.34 – Enumeração do comboio de barça de soja. Fonte: ANSYS AQWA (2017).

Na Figura 7.35 é possível identificar a enumeração sequencial dos cabos de aço utilizados para atracar as barças.

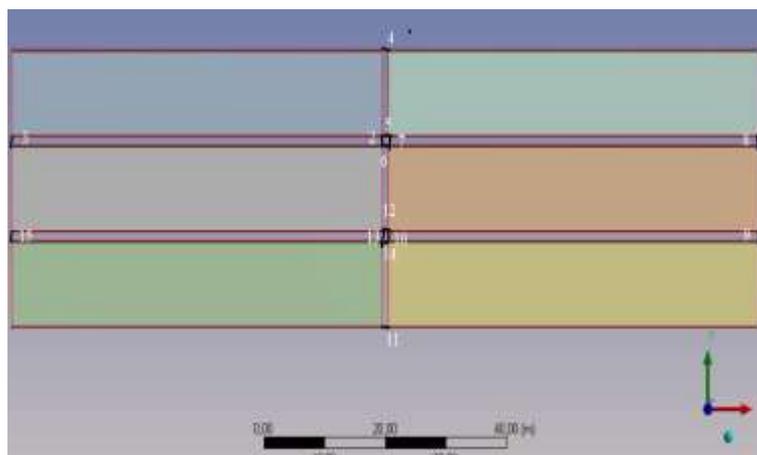


Figura 7.35 – Identificação dos cabos de amarração empregados no comboio de barcaças de soja.
Fonte: ANSYS AQWA (2017).

Na Figura 7.36 é possível identificar as defensas empregadas para captar os contatos entre as barcaças de soja presentes na simulação.

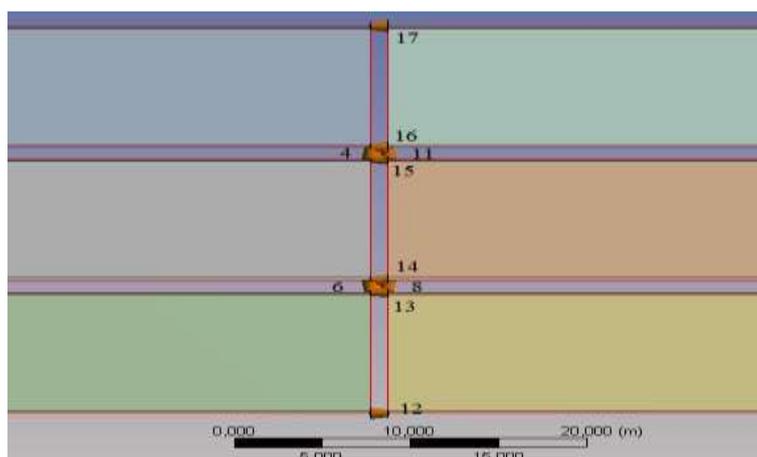


Figura 7.36 – Enumeração das defensas longitudinais empregadas na análise de barcaças de soja.
Fonte: ANSYS AQWA (2017).

As defensas 9 e 10 alocadas na proa das barcaças da segunda coluna da formação são enumeradas conforme a Figura 7.37. Dando destaque para o modelo de superposição das defensas empregado pelo programa indicado na Figura 7.36.

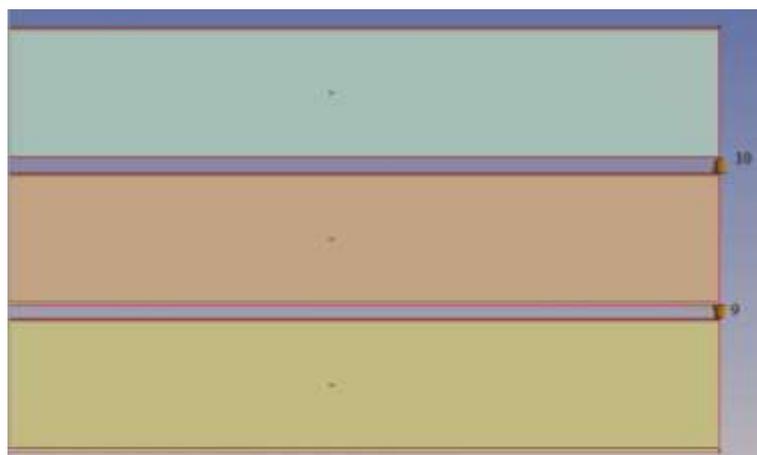


Figura 7.37 – Identificação das defensas de proa empregadas na análise das barcaças de soja.
Fonte: ANSYS AQWA (2017).

A Figura 7.38 mostra a posição das defensas alocadas na popa das barcaças da formação do comboio.

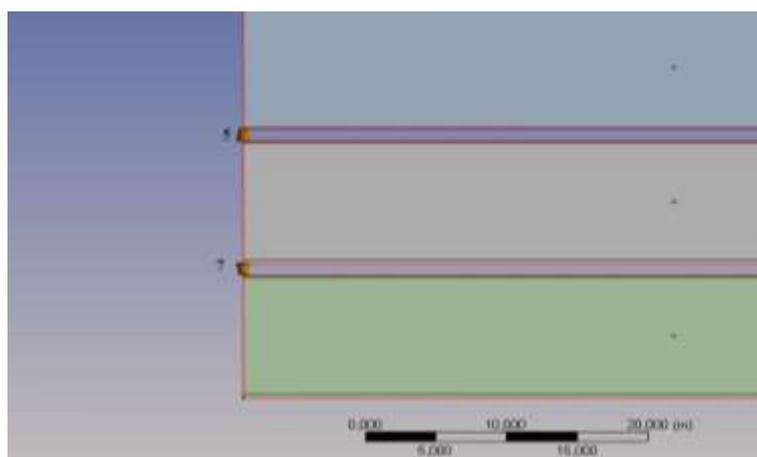


Figura 7.38 – Identificação do número das defensas alocadas na popa das barcaças.
Fonte: ANSYS AQWA (2017).

Os níveis de esforços nas defensas podem ser identificados na Figura 7.39, com o valor máximo passando de 114 tf (tonelada-força). O modelo apresenta pontos de contato com ausência de deformações. É possível acoplar um modelo de fundeio para o comboio, fazendo com que o comportamento dinâmico do sistema seja significativamente reduzido, mantendo o sistema fixo na posição inicial do domínio fluido.

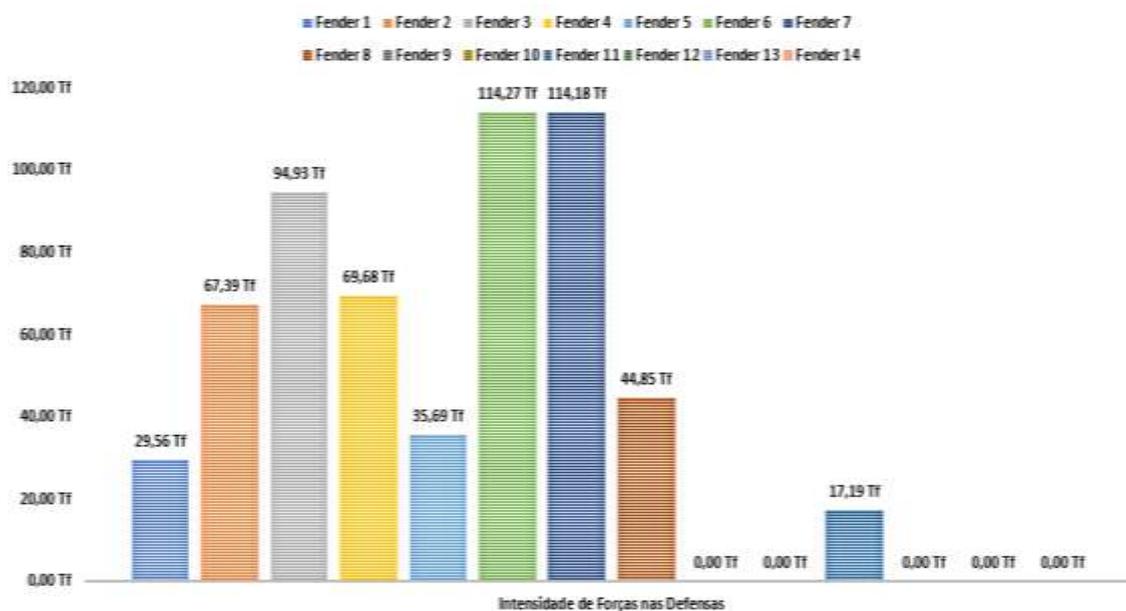


Figura 7.39 – Níveis de forças captadas pelas defensas (*fenders*) que atuam na formação de barcaças de soja. Fonte: ANSYS AQWA (2017).

Com base na Figura 7.39 é possível verificar que as defensas 9, 10, 12, 13 e 14 não possuem indicadores de esforços solicitantes. Este tipo de problema pode ser explicado pela ausência de deformação nas defensas desses pontos específicos. Assim, a resposta das defensas aos esforços está intimamente ligada com o posicionamento das mesmas ao longo do casco das barcaças.

Para reproduzir um problema específico da área de comboios fluviais, englobando uma área extremamente técnica, a partir da inserção dos parâmetros estruturais de uma formação de barcaças, somando-se às condições ambientais consideradas, foi necessário um estudo significativo de modelos de trabalhos semelhantes. Entretanto, para uma análise mais completa, resultados experimentais são necessários para captação dos coeficientes de resposta dos efeitos de correnteza e de vento de cada modelo de barcaça (Soja e de Minério de ferro).

7.3 Modelo de Defesa Proposto

Partindo do princípio que este problema apresenta particularidades no que diz respeito ao comportamento das embarcações, o padrão de resposta dos movimentos das barcaças acaba se tornando bastante importante para a modelagem do elemento de amortecimento adequado, haja vista que os índices de deformações estão intimamente ligados ao nível de deslocamento das embarcações.

O AQWA trabalha com uma ferramenta de defesa esférica, nesse caso, o design apropriado para modelagem de um amortecedor base é definido através de formato esférico ou cilíndrico. Com a metodologia apresentada no Capítulo 6 foi possível determinar o número de defensas alocadas no costado das embarcações, tomando como base o seu deslocamento carregado, que neste caso corresponde a três estruturas de amortecimento posicionadas no costado das embarcações – verificar a Tabela 6-1. A Figura 7.40 indica a vista do modelo de defesa elaborado pelo autor.

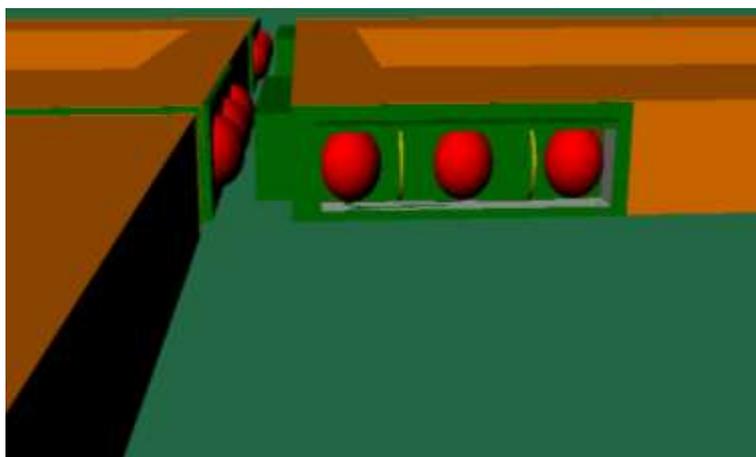


Figura 7.40 – Modelo de defensas em modelo computacional formado por elementos amortecedores esféricos. Fonte: *Rhinoceros 4.0*.

A apresentação desse modelo computacional é vista como uma proposta conceitual de um modelo de defesa atenuadora de impactos, entretanto, a estrutura de fixação ao costado apresenta um problema no que diz respeito ao interligamento do amortecedor com a estrutura da embarcação.

Primeiramente não foi utilizado nenhum modelo de dimensionamento da parte de amortecimento, devido à ausência de dados experimentais suficientes para manter o modelo em escala computacional compatível com a realidade. O arranjo esquemático é idealizado com o propósito de se atestar a disposição dos elementos de defensas em função das características operacionais das barcaças e das próprias condições ambientais.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Destacamos a relevância dessa análise técnica para a comunidade científica, abrindo um leque de linhas de pesquisa dentro da área de problemas de navegação encontrados em sistemas com embarcações conectadas entre si. Sabendo-se que foi encontrado um princípio teórico base capaz de prover as ferramentas necessárias para o desenvolvimento da metodologia computacional aplicada dentro desta dissertação. Foi identificada a necessidade de desenvolver um modelo teórico para realização da análise preliminar deste problema, atestando suas capacidades de resposta dentro dessa área pouco explorada.

No que concerne ao modelo teórico principal, verificamos que o cenário computacional apresenta respaldo dentro da teoria encontrada, entretanto, aferições experimentais são necessárias para o embasamento dos resultados alcançados. Foram apresentados os principais efeitos relativos ao comportamento de vários corpos flutuantes atracados sobre a influência de ondas dentro da teoria multi-corpos. Assim, um caminho foi traçado para a determinação dos esforços presentes entre os cascos das barcas e do sistema de amarração.

Conforme os resultados encontrados com a metodologia computacional aplicada, foi identificado, dentro da área de comportamento de resposta de embarcações em regiões perigosas de navegação, as principais variáveis que governam o problema, sendo destacado o deslocamento carregado das embarcações, a rigidez do conjunto de amarração, a velocidade de incidência do vento, além da altura das ondas. Isso acaba sendo importante para balisar e caracterizar o problema de maneira global, estando englobado no objetivo geral deste trabalho.

A análise de esforços de tração nas amarrações de comboios fluviais e dos esforços de contato entre as embarcações foi desenvolvida com alguns problemas computacionais no momento da aquisição dos dados para as análises no domínio do tempo. Com a ausência de coeficientes experimentais para descrever o comportamento dos elementos de amortecimento, ficou bem claro que o problema de aferição de impactos entre cascos, realizado computacionalmente, não pode ser calibrado de maneira completa. Dentro desse assunto, o dimensionamento dos equipamentos de amortecimento entre cascos não apresenta total condições de ser realizado. Esse é o principal entrave que acaba

reduzindo a velocidade da metodologia de projeto para um amortecedor efetivo aplicado entre as barcaças.

Sendo assim, esse sistema de resposta deve atender aos requisitos necessários para descrever o comportamento do comboio de barcaças de maneira global. As solicitações internas dos elementos de amortecimento estão intimamente relacionadas aos parâmetros experimentais, que devem ser calculados em ambiente controlado e com auxílio de equipamento adequado.

Foram aplicadas simulações utilizando o Método de Elementos Finitos para quantificar os carregamentos sofridos pelas barcaças, para a condição de carregamento totalmente carregada, além da determinação das forças nos cabos de amarração para as barcaças de soja e para as barcaças de minério de ferro, constando-se que os índices de esforços de tração nos cabos de amarração são mais elevados em comboios de barcaças com deslocamento carregado mais elevado. Essa conclusão é importante para balizar os principais parâmetros que interferem na elevação das solicitações externas.

Ademais, o valor de forças atuantes nas barcaças de minério de ferro apresenta um nível mais elevado que o valor de força encontrado para as barcaças de soja, isto pode estar relacionado ao deslocamento carregado das barcaças, tomando-se como base o comportamento de resposta independente de cada modelo de embarcação.

Sabemos que para as embarcações de maior porte bruto (barcaças de minério de ferro) foi realizada uma análise no domínio do tempo, já para as barcaças de soja, foi elaborada uma análise no domínio da frequência, muito devido ao programa computacional não ter elaborado os gráficos de tração em função do tempo para as barcaças de soja. Os valores de forças no domínio do tempo não foram determinados devido aos problemas computacionais encontrados no momento da captação do comportamento dos esforços ao longo do tempo por parte dos elementos de amarração e de contato.

O modelo apresentado não está aplicado aos parâmetros práticos do problema, os elementos *fenders* utilizados são pontos de contato extremamente importantes para a captação das forças de contato entre as superfícies dos cascos. Nesse caso, sem esses elementos não seria possível aferir a intensidade dos esforços na superfície dos cascos das barcaças.

Com isso, é necessária a utilização de coeficientes experimentais para que o modelo computacional esteja em conformidade com a realidade, descrevendo o

comportamento dos pontos de contato entre os cascos das embarcações de maneira consistente e bem embasada.

As componentes de rigidezes dos cabos de aço empregados nas barcaças de minério de ferro não foram aceitas para a análise das barcaças de soja, sendo necessário um passo de tempo reduzido para a conclusão da análise. Neste ponto, foi definido o comportamento de resposta do sistema de amarração a partir de um coeficiente numérico. Foi identificado ainda um aumento significativo no tempo computacional demandado para a realização do estudo, apresentando um aumento de gasto de tempo computacional de 1h30min para cerca de 5h.

O modelo de geração de ondas utilizado neste trabalho possui um elevado nível de representação no que diz respeito aos parâmetros de frequências de incidência e de amplitude de onda. Ainda apresenta capacidade de geração de uma grande faixa de direções de propagação dos perfis de ondas incidentes sobre o comboio de barcaças.

Desta forma, este trabalho possui significativa importância no contexto geral de trabalhos relacionados com a escassez de material teórico. Apresenta condições para embasar futuros trabalhos dentro da área de projeto e análise do comportamento de comboios fluviais em situações desfavoráveis de navegação, constituindo assim um bom modelo de aquisição de modelo teórico promissor e com possibilidades de futuros aprimoramentos.

9 PROPOSIÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como propostas para trabalhos futuros nesta linha de pesquisa identificamos a utilização de um novo modelo de barcaças, com formato hidrodinâmico modificado para aferir a relação da forma do casco no grau de movimentação das embarcações quando solicitadas por ondas, ventos e correntes em diferentes direções.

É possível trabalhar com uma metodologia de cálculo alternativa, utilizando um mecanismo de integração para cada seção transversal das barcaças, adquirindo assim os coeficientes das matrizes de inércia e de amortecimento das barcaças. Esse método abre outro caminho dentro dessa análise, podendo servir de base comparativa para os valores encontrados pelo software computacional utilizado nesta dissertação.

Pode ser utilizado uma ferramenta computacional *ANSYS AQWA 2017* no cálculo dos esforços resultantes das amarrações para uma formação com um maior número de barcaças. Neste caso, o tempo de gasto computacional será significativamente mais elevado, regido pela função tempo, indicada pela Equação 5.1, sendo atribuído à memória do computador o comportamento de variável independente.

Ademais, pode ser estudado um modelo de projeto de defensas baseado em resultados experimentais, para desenvolver assim um elemento real de amortecedor que possa ser alocado entre os cascos das embarcações. É extremamente importante a continuação do desenvolvimento metodológico empregado neste trabalho aplicado na parte de defensas.

Nesse caso, é possível utilizar uma nova linha de modelagem no software *WAMIT*, para elevar assim o leque de resultados, tornando mais consistente o procedimento de comparação de dados. Os coeficientes de resposta às excitações por ventos e correntezas são necessários para consolidar o grau de resposta da forma das barcaças no que tange aos esforços

Como opção adicional podemos citar o software *Shipmoorings* (programa da empresa *ALKYON*). Sendo um modelo que permite simular os sistemas de atracação e o comportamento de embarcações atracadas, em função dos efeitos de agitação devido à onda, ventos variáveis, esforços hidrodinâmicos devido às correntes, forças hidrostáticas e hidrodinâmicas, além de características não-lineares das amarras.

Podemos aplicar a metodologia utilizada dentro da simulação com ondas para aferir os níveis de esforços em modelos de embarcações atracadas em trapiches e pontes

(estruturas rígidas estáticas). A limitação computacional está atrelada a um número máximo de oito corpos flutuantes dentro do modelo computacional, apresentando sérias limitações para efetuar os cálculos dos efeitos de deriva de segunda ordem, que influenciam diretamente nos níveis de esforços presentes nas amarrações e nas defensas.

Um novo modelo de cálculo de rigidez de cabos de aço pode ser proposto, apresentando comportamento não-linear, podendo ser atrelado a metodologia de modelagem de catenárias. A rigidez e o comprimento inicial do cabo devem ser levados em consideração. Ademais, os valores das propriedades inerciais da seção transversal dos cabos poderiam ser computados e inseridos como *inputs*.

Os efeitos de viscosidade não foram computados neste trabalho, como efeito prático de simplificação e otimização computacional. Nesse caso, estes efeitos podem ser considerados dentro da matriz de amortecimento potencial com o acréscimo das componentes de viscosidade.

REFERÊNCIAS

ALBUINO, Murilo; LYRA, Pedro H. C. **Análise Comparativa Para Obtenção de Energia e Força de Atracação**. IX Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro. 2016. 10 p.

AMERICAN BARGES. LLC. Disponível em: http://americanbarges.com/index_files/Page442.html. Acesso em: 24.05.2017.

ANSYS (2017). *AQWA USER MANUAL*.

ASEKA, Edson H. **Projeto, Construção e Determinação de Propriedades de Amortecedor Viscoelástico para Uso em Estruturas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre 2002. 112 p.

CONSOLAZIO, Gary R.; WALTERS, Robert A.; HARPER, Zachary S. *Development of Finite Element Models for Studying Multi-Barge Flotilla Impacts*. Departamento de Engenharia Civil e Costeira, Universidade da Florida. 2012. 55 p.

CLARK, Ian C. BSc. *Mooring and Anchoring Ships Vol 1 Principles and Practice*. 1. e. The Nautical Institute. Londres. Inglaterra. 2009. 268 p.

DE DECKER, B. *Ship-ship Interaction During Lightering Operations*. Dissertação de Mestrado. *Ghent University, Gent, Belgium*, 2006.

EDA, Haruzo. *Course Stability, Turning Performance, and Connection Force of Barge Systems in Coastal Seaways*. SNAME, New York. 1972. 30 p.

EL-ROBRINI, Maâmar; SILVA, Marcelo A. M. A.; FILHO, Pedro W. M. e eS.; EL-ROBRINI, Maria H. S.; JÚNIOR, Osmar G. S.; FRANÇA, Carmena F. **Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro**. Pará. (2006). 86f.

FLATINSEN, O. M. *Sea Load on Ships and Offshore Structures*. 1 ed. Cambridge, Cambridge University Press. 1990. 328 p.

FILGUEIRAS, S. J. R. **Análise Estrutural de Cabeços de Amarração Via Método de Elementos Finitos de um Comboio Fluvial para escoamento de Grãos via Arco Norte**. Universidade Federal do Pará. 2017. 93 p.

FILHO, Avelino A. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE/Análise Dinâmica**. São Paulo: Érica. 2. ed. 2008.

FISH, Jacob.; BELYTCHKO, Ted. **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos**. Tradução Ricardo Nicolau Nassar Koury, Luiz Machado. *A first Course on finite elements*. Rio de Janeiro LTC. 2009. 240 p.

GUHA, A.; SOMAYAJULA, A.; FALZARANO, J. *Analysis of Causeway Ferry Dynamics for Safe Operation of Improved Navy Lighterage System*. In: *International Ship Stability Workshop*. 13. Brest. 2013. 8 p.

HUGHES, Owen F.; PAIK, Jeom K. *Ship Structural Analysis and Design*. SNAME, 601 Pavonia Avenue. Jersey City, New Jersey. 2010.

Intercontinental Engineering-Manufacturing Corporation. www.Intercon.com. Acesso em: 10.10.2017.

JUNIOR, Ernesto S. C. **Modelação Hidrodinâmica de um Navio em um Simulador Através de um Modelo Empírico**. Universidade Federal do Rio de Janeiro – Escola Politécnica. Rio de Janeiro. 2014. 63 p.

KIM, Nam-Ho.; SANKAR, Bhavani V. **Introdução à Análise e ao Projeto em Elementos Finitos**. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos. 2011.

LEAL, Miguel M. G. G. **Dimensionamento de Defensas Marítimas: Aplicação ao caso do Terminal portuário Tecondi do Porto de Santos, Brasil**. 2011.151 p.

LEHETA, H. W.; ELHEWY, A. M.; MOHAMED W. EI S. *Finite Element Simulation of Barge Impact into a Rigid Wall*. *Alexandria Engineering Journal*. 2013 .11 p.

LUPERI, Francisco J.; PINTO, Federico. *Determination of Impact Force History During Multicolumn Barge Flotilla Collisions Against Bridge Piers*. Universidade Politécnica de Valencia. 2014. 8 p.

MARK E. CAPRON. The United States of America. *Barge Conector System*. Int CI^{B63B} 21/04. U.S. 4938163. 29 dez. 1989, 3 Jul. 1990. United States Patent, 9 p.

MARINHA DO BRASIL. **Normas da Autoridade Marítima para Embarcações Empregadas na Navegação Interior**. Diretoria de Portos e Costas. Rio de Janeiro. 2005.

MIRANDA e SILVA, Emilio L. M. **O Que é IGES**. Disponível em: http://emiliomiranda.eng.br/papeis/iges.xml_saida.html. 2005. Acesso em 10.09.2017.

MENEZES, Fábio G. T. **Acoplamento Hidrodinâmico e Estrutural de Sistemas Flutuantes Multicorpos para Produção e Escoamento de Petróleo e Gás**. Tese de Doutorado. COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2013.

NAGADO, Celso M.; LUKINE, Sergio; MENDONÇA, Evandro T. **Estudo das Amarrações entre Barcaças de Comboio de Minério de Ferro na Baía do Marajó.** Faculdade de Tecnologia de Jahu – CEETEPS. 24º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore. Rio de Janeiro. 2012.

OEVER, Erik T.; MUILWIJK, Michiel; MUTTRAY, Markus. *A Practical Approach to Shallow Water Mooring With Varying Seabed.* *Coastal Engineering.* 2014. 12p.

PADOVEZI, Carlos D. **Conceito de Embarcações Adaptadas à Via Aplicado à Navegação Fluvial no Brasil.**ed.rev.2003. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. Departamento de Engenharia Naval. 215 p.

PATEV, Robert C.; BARKER, Bruce C.; KOESTLER III, Leo V. *Full-Scale Barge Impact Experiments, Robert C. Byrd Lock and Diam, Gallipolis Ferry, West Virginia.* *U.S. Army Engineer District, New England. 696 Virginia Road.* 2003. 137-p.

PATRÍCIO, J. C. S. **O Transporte Fluvial Misto na Amazônia: Aspectos Sócio-Econômicos do Trecho Belém - Acará.** Tese de Mestrado em Economia - Universidade da Amazônia, Belém. 2007.

PIANC. *Guidelines for the Design of Fenders Systems.* *International Navigation Association, Report of WG 33.* 2002.

PINHEIRO, Liliana V. **Modelação Numérica da Propagação de Ondas e do Comportamento de Navios Amarrados no Interior de Portos.** Tese de Doutorado. Universidade de Lisboa – Instituto Superior Técnico. 2015. 466 p.

PINHEIRO, Roberto V. L.; JUNIOR, Luis E. C. F. **Estudo Hidrodinâmico e Sedimentológico do Estuário Guajará – Belém (PA).** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 1987. 164 f.

PINTO, Luis A. F.; LEE, Jun M.; JONQUA, Julien P. C. B. **A Importância do Transporte Fluvial para a Unidade Operacional da Amazônia. Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual: Desafios de Engenharia de Produção na Consolidação do Brasil no Cenário Econômico Mundial.** Belo Horizonte. MG. 2011.

RODRIGUES, Charles R. *Determination of Barge Flotilla Impact Loads on Pile Founded Concrete Guide Walls with Rock Filled Timber Cribbing.* Universidade da Flórida. 2014. 110 p.

SILVA, Carlos E. S. *Modeling And Analysis of Two Alternatives for Underway Ship-to-Ship Transfer of Oil in Open Sea*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo -USP. São Paulo. 2012. 149 p.

SILVA, João L. M. **Barcaças Oceânicas**. Centro Paula Souza, São Paulo. Monografia - Faculdade de Tecnologia da Zona Leste. 2006. 76 p.

SKANDALI, D. *Identification of response amplitude operators for ships based on full scale measurements*. Master of Science Thesis. Delft University of Technology. Heerema Marine Contractors. Offshore & Dredging Engineering. Setembro, 2015. 180 p.

SOBRINHO, Antonio S. C. **Introdução ao Método dos Elementos Finitos**. Rio de Janeiro. Editora Ciência Moderna Ltda. 2006.

Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME). *Principles of Naval Architecture. Volume III – Motions in Waves and Controllability*. United States of America. 1989. 432 p.

SOGREAH GROUPE ARTELIA. Terminal de Minério de Vila do Conde Estudos de correntologia, navegação, comportamento em berços. Relatório 1712685 – Versão 3 2011.

VANTORRE, M.; VERZHBITSKAYA, E.; LAFORCE, E. *Model Test Based Formulations of ship-ship Interaction Forces*. *Ship Technology Research*, p. 124-141, 2002.

WANG, L. e MOAN, T. "*Probabilistic Analysis of Nonlinear Wave Loads on Ships Using Weibull, Generalized Gamma, and Pareto Distributions*." *Journal of ship research* 48(3): 202-217. 2004.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; ZHU, J. Z. *The Finite Element Method its Basis & Fundamentals*. The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford. Elsevier Ltd. 7ª edição. 2013. 695-p.

10 ANEXOS

10.1 Matrizes de Massa

Para um sistema de coordenadas arbitrário com origem em (X^0, Y^0, Z^0) , e sendo o ponto da qual pretende-se obter a série temporal da posição do centro de gravidade da embarcação (x_c, y_c, z_c) , a matriz M é simétrica e dada pela Equação 10.1.

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & m(z_c - Z^0) & -m(y_c - Y^0) \\ & m & 0 & -m(z_c - Z^0) & 0 & m(x_c - X^0) \\ & & m & m(y_c - Y^0) & -m(x_c - X^0) & 0 \\ & & & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ & & & & I_{yy} & -I_{yz} \\ & & & & & I_{zz} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 10.1}$$

Sendo m a massa da embarcação, I_{kj} indica o produto de inércia do corpo com relação aos eixos baricêntricos k e j , enquanto I_{kk} indica o momento de inércia do corpo em relação ao eixo k .

A partir do momento que referencial da origem do sistema é movimentado para o centro de gravidade da embarcação obtêm-se a relação dada pela Equação 10.2.

$$\begin{aligned} x_c - X^0 &= 0 \\ y_c - Y^0 &= 0 \\ z_c - Z^0 &= 0 \end{aligned} \quad \text{Eq. 10.2}$$

Para o caso particular de navios, os eixos são normalmente simétricos em relação ao plano XoZ (simetria estibordo-bombordo), nesse caso, todos os produtos de inércia que envolvem a coordenada y são anulados, conforme Equação 10.3.

$$\begin{aligned} I_{xy} &= 0 \\ I_{yz} &= 0 \end{aligned} \quad \text{Eq. 10.3}$$

Conforme Pinheiro (2015), caso exista simetria do casco em relação ao eixo YoZ (simetria popa-proa) também se anulam os produtos de inércia que envolvam a coordenada x . A matriz de massa de um navio é dada então, em relação a um referencial baricêntrico pela Equação 10.4.

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & m & 0 & 0 & 0 \\ & & & I_{xx} & 0 & -I_{xz} \\ & & & & I_{yy} & 0 \\ & & & & & I_{zz} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 10.4}$$

Sabendo-se que os momentos de inércia podem ser escritos pela Equação 10.5 em função dos raios de giração para os três eixos coordenados.

$$\begin{aligned} I_{xx} &= m i_x^2 \\ I_{yy} &= m i_y^2 \\ I_{zz} &= m i_z^2 \end{aligned} \quad \text{Eq. 10.5}$$

Onde i_x , i_y , i_z são os raios de giração da embarcação. Consequentemente, a matriz de massa é simplificada para a forma da Equação 10.6 conforme indicado por Pinheiro (2015).

$$M = m \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & i_x^2 & 0 & -I_{xz}/m \\ & & & & i_y^2 & 0 \\ & & & & & i_z^2 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 10.6}$$

10.2 Coeficientes Hidrodinâmicos

Segundo Pinheiro (2015) os coeficientes hidrodinâmicos representam as forças e os momentos que surgem do movimento da massa de fluido deslocado pelo movimento do navio. Os movimentos do navio geram um escoamento de massa de água e de ondas que se propagam a partir da embarcação em todas as direções, e por isso, considera-se uma componente proporcional à aceleração do navio e outra proporcional à sua velocidade.

10.2.1 Matrizes de Massa Adicional

A massa adicional tem essa designação porque é equivalente a um esforço de inércia para os movimentos de translação e a um momento de inércia para os movimentos de rotação. Do ponto de vista físico, corresponde a uma força adicional necessária para acelerar a massa de fluido que se acopla ao casco do navio, o que equivale a considerar que o mesmo possui uma massa adicional com a mesma aceleração (PINHEIRO, 2015). A Equação 10.7 é composta pelos termos de massa adicional presentes no problema

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 10.7}$$

Onde a_{kj} corresponde a massa adicional segundo a coordenada k devido a uma aceleração unitária da embarcação segundo a coordenada j para águas paradas. Essa matriz de massa adicional é simétrica e pode ter termos não nulos em qualquer posição. Os seus coeficientes têm unidade (kg) , $(kg.m)$ ou $(kg.m^2)$. Para embarcações com simetria estibordo-bombordo, a matriz massa adicionada simplifica-se da forma como é indicado pela Equação 10.8.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} & 0 & a_{15} & 0 \\ & a_{22} & 0 & a_{24} & 0 & a_{26} \\ & & a_{33} & 0 & a_{35} & 0 \\ & & & a_{44} & 0 & a_{46} \\ & & & & a_{55} & 0 \\ & & & & & a_{66} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 10.8}$$

10.2.2 Amortecimento

Para os valores de amortecimento, as perdas de energia que ocorrem na geração e radiação de ondas como consequência do movimento do navio são correlacionadas. O amortecimento está em fase com a velocidade do navio e representa uma força de amortecimento proporcional à velocidade (PINHEIRO, 2015).

A Equação 10.9 informa as componentes presentes na matriz de amortecimento genérica do problema.

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} \\ & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} & b_{26} \\ & & b_{33} & b_{34} & b_{35} & b_{36} \\ & & & b_{44} & b_{45} & b_{46} \\ & & & & b_{55} & b_{56} \\ & & & & & b_{66} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 10.9}$$

Os seus coeficientes têm como unidade $(kg.s/m)$, $(kg.s)$, $(kg.s.m)$ e são obtidos através da resolução do problema de radiação. Os coeficientes $b_{k,j}$ são dados pela força que é necessária ser aplicada para a coordenada k para se obter uma oscilação do navio com velocidade unitária segundo a coordenada j em águas paradas.

10.2.3 Restituição Hidrostática

No que se refere as forças de restituição hidrostática, verifica-se uma tendência de reposição do navio para sua posição inicial de equilíbrio após ter sido desviado por uma força externa, conforme indicado por Pinheiro (2015). Em uma embarcação não atracada, as forças atuantes correspondem ao peso e ao empuxo hidrostático.

Ao variarmos a posição do navio ou a sua rotação, a sua superfície molhada é modificada assim como o valor da pressão hidrostática exercida em cada ponto desta superfície, bem como a posição do seu centro de empuxo. É gerado dessa forma um desequilíbrio de forças do qual resulta uma força e/ou um momento que tendem a colocar o navio em sua posição de equilíbrio (Pinheiro, 2015).

Para movimentos de translação no plano horizontal (avanço e deriva) não existem alterações na superfície molhada do navio e, conseqüentemente, a matriz de restituição hidrostática tem valores nulos nas duas primeiras linhas e colunas. A matriz de restituição hidrostática é simétrica e os seus coeficientes, C_{jk} são a força segundo a coordenada j devida a uma variação unitária da posição do navio segundo a coordenada k em água parada. Abaixo a Equação 10.10, retirada de Pinheiro (2015), mostra a matriz dos coeficientes hidrostáticos.

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \rho g S_f & \rho g I_y^{Sf} & -\rho g I_x^{Sf} & 0 & 0 & 0 \\ \rho g (I_{yy}^{Sf} + I_z^V) - mg(z_c - Z^0) & -\rho g I_{xy}^{Sf} & \rho g (I_{yy}^{Sf} + I_z^V) - mg(z_c - Z^0) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Eq. 10.10

Onde S_f é a área do plano de flutuação, I_x^{Sf} é o momento de inércia de S_f e I_z^V é o momento estático do volume submerso.

10.3 Análise no Domínio do Tempo

A seguir são indicadas as Matrizes dos termos que compõem a Equação 2.38. A matriz de massa acrescida com os coeficientes de massa adicional é dada pelas Equações 10.11 e 10.12.

$$A'_{11} = \begin{bmatrix} A'_{11} + m & 0 & 0 & 0 & A'_{15} + mz_g A'_{16} + my_g \\ 0 & A'_{22} + m & 0 & A'_{24} - mz_g & 0 & A'_{26} + mx_g \\ 0 & 0 & A'_{33} + m & A'_{34} + my_g & A'_{35} - mx_g & 0 \\ 0 & A'_{42} - mz_g A'_{43} + my_g & A'_{44} + I_{xx} & A'_{45} - I_{xy} & A'_{46} - I_{xz} \\ A'_{51} + mz_g & 0 & A'_{53} + mx_g & A'_{54} - I_{xy} & A'_{55} + I_{yy} & A'_{56} - I_{yz} \\ A'_{61} - my_g A'_{62} + mx_g & 0 & A'_{64} - I_{xz} & A'_{65} - I_{yz} & A'_{66} + I_{zz} \end{bmatrix}_{11} \quad \text{Eq. 10.11}$$

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & A_{36} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{56} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 10.12}$$

Alocando-se as Equações 10.11 e 10.12 na Equação 10.13, podemos obter o fator que caracteriza o parâmetro de inércia do modelo do problema.

$$[A'_{ij} + M_{ij}] = \begin{pmatrix} [A'_{11}] & \cdots & [A]_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ [A]_{N1} & \cdots & [A'_{NN}] \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 10.13}$$

As integrais de convolução com as funções de memória são dadas pela Equação 10.14. Nesse caso, conforme Menezes (2013), em análises no domínio do tempo para determinação dos esforços que variam arbitrariamente, podemos utilizar os princípios de integrais de convolução.

$$\int_0^t K_{ij}(t - \tau) \dot{x}_j d\tau = \begin{pmatrix} \left[\int_0^t K_{11}(t - \tau) \dot{x}_1 d\tau \quad \cdots \quad \int_0^t K_{16}(t - \tau) \dot{x}_6 d\tau \right]_{11} & \cdots & \left[\int_0^t K_{11}(t - \tau) \dot{x}_1 d\tau \quad \cdots \quad \int_0^t K_{16}(t - \tau) \dot{x}_6 d\tau \right]_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left[\int_0^t K_{61}(t - \tau) \dot{x}_1 d\tau \quad \cdots \quad \int_0^t K_{66}(t - \tau) \dot{x}_6 d\tau \right]_{11} & \cdots & \left[\int_0^t K_{61}(t - \tau) \dot{x}_1 d\tau \quad \cdots \quad \int_0^t K_{66}(t - \tau) \dot{x}_6 d\tau \right]_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left[\int_0^t K_{11}(t - \tau) \dot{x}_1 d\tau \quad \cdots \quad \int_0^t K_{16}(t - \tau) \dot{x}_6 d\tau \right]_{N1} & \cdots & \left[\int_0^t K_{11}(t - \tau) \dot{x}_1 d\tau \quad \cdots \quad \int_0^t K_{16}(t - \tau) \dot{x}_6 d\tau \right]_{NN} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left[\int_0^t K_{61}(t - \tau) \dot{x}_1 d\tau \quad \cdots \quad \int_0^t K_{66}(t - \tau) \dot{x}_6 d\tau \right]_{N1} & \cdots & \left[\int_0^t K_{61}(t - \tau) \dot{x}_1 d\tau \quad \cdots \quad \int_0^t K_{66}(t - \tau) \dot{x}_6 d\tau \right]_{NN} \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 10.14}$$

A matriz com os coeficientes de restituição hidrostática é dada pela Equação 10.15, que é alocada dentro do formato da Equação matricial 10.16. Os termos

representados pelos fatores [0] representam matrizes de ordem 6 como todos os seus elementos nulos.

$$[c'] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho g A_{wl} & \rho g A_{wl} y_f & -\rho g A_{wl} x_f & 0 \\ 0 & 0 & \rho g A_{wl} y_f & \rho g V(z_b - z_g) + \rho g A_{yy} & -\rho g A_{xy} & 0 \\ 0 & 0 & -\rho g A_{wl} x_f & -\rho g A_{xy} & \rho g(z_b - z_g) + \rho g A_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{11} \quad \text{Eq. 10.15}$$

$$[c] = \begin{pmatrix} [c']_{11} & \cdots & [0]_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ [0]_{N1} & \cdots & [c']_{NN} \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 10.16}$$