



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica
Programa de Projeto de Estruturas

Pedro Henrique de Castro Albuquerque Machado

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE ABORDAGENS COMPUTACIONAIS PARA
DIMENSIONAMENTOS DE SISTEMAS DE FUNDEIO

Rio de Janeiro

2025

Pedro Henrique de Castro Albuquerque Machado

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE ABORDAGENS COMPUTACIONAIS PARA
DIMENSIONAMENTOS DE SISTEMAS DE FUNDEIO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Projeto de Estruturas.

Orientador:

Manoel Rodrigues Justino Filho

Rio de Janeiro

2025

Machado, Pedro Henrique de Castro Albuquerque

Análise da Viabilidade de Abordagens Computacionais para Dimensionamento de Sistemas de Fundeio / Pedro Henrique de Castro Albuquerque Machado – 2025.

133: 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Projeto de Estruturas) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Projeto de Estruturas, Rio de Janeiro, 2025.

Orientador: Manoel Rodrigues Justino Filho

1. Píer flutuante, 2. CFD no Ansys Fluent, 3. Sistema de fundeio. I. Justino Filho, Manoel Rodrigues II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica.

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE ABORDAGENS COMPUTACIONAIS PARA
DIMENSIONAMENTOS DE SISTEMAS DE FUNDEIO

Pedro Henrique de Castro Albuquerque Machado

Orientador:

Manoel Rodrigues Justino Filho

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Projeto de Estruturas.

Aprovada pela Banca:

Prof. Manoel Rodrigues Justino Filho, D. Sc., UFRJ

Prof. Sérgio Hampshire de Carvalho Santos, D. Sc., UFRJ

Prof. Gilberto Olympio Mota Fialho, D. Sc., UFRJ

Prof. Pedro Henrique Cerento de Lyra, D. Sc., Poli- USP

Rio de Janeiro
2025

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar minha mais profunda gratidão à minha família pelo apoio incondicional e incentivo contínuo durante meu curso de mestrado. Em especial, dedico esta menção à minha mãe, cuja confiança em meu potencial foi crucial, mesmo nos momentos de incertezas. Seu apoio e determinação foram essenciais para que eu alcançasse este marco. Agradeço ao querido companheiro de quatro patas, Ryan, que nos deixou ao longo do curso, mas que sempre esteve presente supervisionando os meus estudos e trabalhos.

Gostaria de expressar minha gratidão ao meu orientador, Prof. Manoel Rodrigues Justino Filho, cuja dedicação, orientação e suporte foram fundamentais para a realização deste estudo. Ao professor Paulo de Tarso Themistocles Esperança, por ter nos recebido e orientado sobre as abordagens computacionais e as diretrizes a serem seguidas para uma aplicação prática do modelo computacional de CFD. Agradeço igualmente à Universidade Federal do Rio de Janeiro, que não apenas me proporcionou a formação no curso de graduação em Engenharia Civil, e agora também me confere o título de Mestre em Projeto de Estruturas. Este título é o resultado de anos de dedicação e aprendizado adquiridos por meio desta estimada instituição de ensino público federal.

Gostaria de expressar igualmente minha gratidão ao meu grande amigo de longa data, desde a nossa graduação, Eng. Naval Glauter Moreira, cujo convite para avaliar um estudo de caso local na cidade de Itacoatiara, no coração da floresta amazônica, inspirou o tema da minha dissertação. Agradeço também por todo o auxílio prestado e pelo esclarecimento de dúvidas fundamentais à execução deste estudo, o que foi de imensa importância.

Por fim, expresso minha gratidão aos amigos Paula Canedo, Daniel Schmitz e Mariane Gonzalez pelo suporte e apoio contínuos, que, desde a graduação, estiveram presentes incentivando a continuidade da minha carreira acadêmica e que, hoje, almejo como exemplos de pessoas e profissionais a serem seguidos.

Para todos vocês, expresso o meu mais sincero e profundo agradecimento!

“Tocar uma nota errada é insignificante. Tocar sem paixão é imperdoável.”

Ludwig van Beethoven

RESUMO

MACHADO, Pedro Henrique de Castro Albuquerque. **Análise da Viabilidade de Abordagens Computacionais para Dimensionamento de Sistemas de Fundeio**. Rio de Janeiro. 2025. Dissertação (Mestrado) – Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2025.

Resumo

Os píeres têm como propósito possibilitar o acesso a embarcações com calados um pouco maiores ou que não conseguem atracar diretamente na costa. Geralmente, os píeres fixos são construídos de forma a ficarem engastados no leito do rio ou do mar. No entanto, devido à escassez de recursos e dificuldade de acesso em algumas regiões, a implementação de píeres flutuantes pode facilitar e melhorar o acesso das comunidades isoladas a itens básicos e serviços. Essa implementação é mais fácil e requer menos licenças ambientais para a construção de estruturas nas margens dos rios. Com o objetivo de demonstrar que os píeres flutuantes podem ser uma solução viável para atender à população local no acesso aos serviços e itens básicos, realiza-se um estudo de caso em uma região próxima a Itacoatiara-AM, utilizando-se de abordagens computacionais para as análises dos esforços provenientes das ações de corrente e vento locais, para então poder ser dimensionado o seu sistema de fundeio. O software escolhido para a realização de uma análise CFD é o *Ansys Fluent* na versão 2024 R1, o qual possibilita modelar diversos cenários e compreender a dinâmica das forças atuantes sobre a estrutura. Também se utiliza a norma espanhola ROM 2.0-11 para comparar os resultados encontrados por meio das simulações computacionais, gerando como tema de discussão, o esclarecimento dos resultados obtidos a partir das duas abordagens citadas. Por fim, apresenta-se o sistema de fundeio para a aplicação do píer com base nos resultados de esforços encontrados e os critérios de dimensionamento estabelecidos e justificados.

Palavras-chave: Píer flutuante; CFD no Ansys Fluent; Sistema de fundeio.

ABSTRACT

MACHADO, Pedro Henrique de Castro Albuquerque. **Analysis of Computational Approaches for Mooring Systems Design**. Rio de Janeiro. 2025. Dissertação (Mestrado) – Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2025.

Abstract

The piers are intended to provide access to vessels with slightly larger drafts or those unable to dock directly on the coast. Generally, fixed piers are constructed to be embedded in the river or seabed. However, due to resource scarcity and access difficulties in some regions, implementing floating piers can facilitate and improve access for isolated communities to basic items and services. This implementation is easier and requires fewer environmental permits for the construction of structures on riverbanks. To demonstrate that floating piers can be a viable solution for serving the local population in accessing services and basic items, a case study was conducted in a region near Itacoatiara-AM, using computational approaches to analyze the forces resulting from local currents and winds, in order to design the mooring system. The software chosen for a CFD analysis was Ansys Fluent version 2024 R1, which allowed for the modeling of various scenarios and understanding the dynamics of the forces acting on the structure. The Spanish standard ROM 2.0-11 was also used to compare the results obtained through computational simulations, generating a discussion topic on clarifying the results obtained from the two methods. Finally, the mooring system for the pier application is presented based on the identified force results and the established and justified design criteria.

Keywords: Floating pier, CFD in Ansys Fluent, Mooring system.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1. Problema de pesquisa e motivação para a realização do estudo	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo geral	2
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Conteúdo do Estudo	4
2. Revisão Bibliográfica	6
2.1. Panorama geral da Cidade de Itacoatiara e dos seus portos	6
2.1.1. Porto federal Antônio Nelson de Oliveira Neto	7
2.1.2. Porto de Itacoatiara	7
2.1.3. Terminal graneleiro flutuante Hermasa	8
2.1.4. Terminal de armazenamento de combustível	9
2.2. Bacia Amazônica	9
2.2.1. Importância do Rio Amazonas	10
2.2.2. Formação do Rio Amazonas	10
2.2.3. Variação do nível d'água	10
2.2.4. Particularidade do rio na região de Manaus e Itacoatiara	11
2.3. Tipos de materiais empregados na construção de píeres	12
2.3.1. Madeira	12
2.3.2. Material compósito e polímero	13
2.3.3. Alumínio	13
2.3.4. Aço	14
2.3.5. Concreto	15
2.4. Siglas e termologias para embarcações	16
2.5. Movimentos básicos das estruturas flutuantes	17
2.6. Estabilidade do píer ou <i>pontoon</i>	18
2.7. Estruturas flutuantes portuárias	19
2.7.1. Componentes flutuantes	20
2.7.2. Componentes de acesso	21
2.7.3. Sistema de fundeio	22
2.8. Elementos do sistema de fundeio	22
2.8.1. Estruturas flutuantes	22

2.8.2.	Amarras	23
2.8.3.	Elos de conexão das amarras	24
2.8.4.	Cabos	25
2.8.5.	Componentes de ligação ou conexão.....	25
2.8.6.	Âncoras.....	27
2.8.7.	Tipos de solos	29
2.9.	Configurações de sistemas de fundeio	31
2.9.1.	Ancoragem de Ponto Único (Single Point)	31
2.9.2.	Ancoragem pela Proa e pela Popa (Dois Pontos).....	31
2.9.3.	Ancoragem Spread mooring.....	32
2.10.	Projetos de píer de concreto flutuantes já existentes	32
2.10.1.	Marinetek.....	32
2.10.2.	Píer Brasil	33
2.10.3.	Píerglass do Brasil	34
2.11.	Normas e referências para determinação dos esforços de atracação de embarcações	34
2.12.	Modelagem CFD	35
2.12.1.	Modelo matemático	36
2.12.2.	Métodos numéricos	37
2.13.	Softwares de modelagem CFD.....	39
2.13.1.	Solid Works Flow Simulation	39
2.13.2.	Ansys Fluent.....	40
2.13.3.	Simcenter Star ccm+ ou Simcenter SPH Flow.....	40
3.	Metodologia.....	42
3.1.	Visita técnica	43
3.1.1.	Estudo e caracterização da região Itacoatiara.....	44
3.1.2.	Obtenção de dados técnicos da região de Itacoatiara	44
3.1.3.	Caracterização da estrutura do píer flutuante	44
3.2.	Cenários de combinações de esforços	44
3.3.	Propriedades físicas da estrutura do píer flutuante.....	45
3.4.	Verificação da estabilidade estática do píer flutuante	46
3.5.	Escolha da norma ou referência a ser utilizada para balizar os resultados.....	46
3.5.1.	Cargas de vento	47
3.5.2.	Cargas de corrente	50
3.5.3.	Cargas de atrito.....	52

3.6.	Análise dos softwares disponíveis para modelagem CFD	55
3.7.	Modelagem CFD por meio do <i>Ansys Fluent</i>	55
3.7.1.	Geometria e domínio computacional.....	55
3.7.2.	Geração da malha	56
3.7.3.	Modelo numérico.....	57
3.7.4.	Condições de contorno	57
3.7.5.	CrITÉrios de convergência dos resÍduos do modelo	58
3.7.6.	Modelagem e resultados	58
3.8.	Análise e verificação dos resultados obtidos à partir da modelagem CFD	59
3.9.	Análise comparativa e discussão dos resultados	60
3.10.	Dimensionamento do sistema de fundeio.....	60
4.	Estudo de Caso.....	62
4.1.	Caracterização da região da cidade de Itacoatiara.....	62
4.2.	Dados técnicos a serem utilizados na aplicação do estudo	64
4.3.	Caracterização da estrutura do píer flutuante	65
4.4.	Cenários de combinação de ações ambientais atuantes na estrutura do píer.....	67
4.4.1.	Cenário 1 de ações ambientais.....	69
4.4.2.	Cenário 2 de ações ambientais.....	70
4.4.3.	Cenário 3 de ações ambientais.....	71
4.4.4.	Cenário 4 de ações ambientais.....	71
5.	Aplicação e Análise de Resultados	73
5.1.	Propriedades físicas e geométricas do píer flutuante de concreto.....	73
5.1.1.	Peso próprio do píer flutuante de concreto	74
5.1.2.	Determinação do calado para o píer flutuante de concreto	80
5.2.	Verificação da estabilidade estática da estrutura do píer flutuante	82
5.2.1.	Condição de peso leve do píer	83
5.2.2.	Condição de peso total do píer	84
5.3.	Aplicação do <i>Ansys Fluent</i>	86
5.3.1.	Escolha da utilização Ansys Fluent no estudo	86
5.3.2.	Aplicação do Ansys Fluent na modelagem CFD.....	87
5.3.3.	Verificação dos resultados da modelagem CFD.....	94
5.4.	Resultados obtidos.....	95
5.5.	Análise e discussão dos valores entre a modelagem CFD e a ROM.....	97
5.6.	Dimensionamento do sistema de fundeio.....	100

6. Conclusões	108
Referências Bibliográficas.....	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1- A esquerda o porto federal Antônio Nelson de Oliveira Neto e a direita o porto após o colapso.	7
Figura 2-2- Porto público municipal de Itacoatiara.	8
Figura 2-3- Terminal graneleiro Hermasa.	8
Figura 2-4- Terminal de armazenamento de combustíveis em Itacoatiara.	9
Figura 2-5- Pérola do Piquiar em Itacoatiara, Amazonas.	12
Figura 2-6- Píer fabricado de materiais poliméricos.	13
Figura 2-7- Píer de alumínio da Eagle Aluminum.	14
Figura 2-8- Modelo de píer de aço.	15
Figura 2-9- Modelo de píer flutuante de concreto.	16
Figura 2-10- Principais dimensões da geometria de uma embarcação, sendo: longitudinal (A) e transversal (B).	16
Figura 2-11- Movimentos dos navios e embarcações.	18
Figura 2-12- Estabilidade de uma embarcação quando na vertical (A) e inclinada (B).	19
Figura 2-13- Tipos de posicionamento do componente flutuante com a margem.	20
Figura 2-14- Tipos de componentes flutuantes.	21
Figura 2-15- Tipos de componentes de acesso: Rampa fixa (A) e Rampa móvel (B).	22
Figura 2-16- Exemplo de boias utilizadas em um sistema de fundeio.	23
Figura 2-17- A esquerda, um elo de amarra com malhete e a direita um sem malhete.	24
Figura 2-18- Exemplo de um elo alongado.	24
Figura 2-19- Exemplo de um elo <i>Kenter</i>	25
Figura 2-20- Exemplo de uma manilha à esquerda.	26
Figura 2-21- Exemplo de um Destorcedor.	26
Figura 2-22- Exemplo de um anel de ligação.	27
Figura 2-23- Exemplo de âncora de arrasto.	28
Figura 2-24- Exemplo de uma âncora de peso morto ou poita.	29
Figura 2-25- Exemplo de píer de concreto armado da Marinetek e suas propriedades.	33
Figura 2-26- Exemplos de píeres da empresa Píer Brasil.	34
Figura 2-27- Exemplos de píeres da empresa Píerglass do Brasil.	34
Figura 3-1- Fluxograma de trabalho do estudo.	43
Figura 3-2- Esforços atuantes na embarcação causados pelo vento.	48
Figura 3-3- Esforços atuantes na embarcação devido à pressão da corrente.	51

Figura 3-4-Esforços atuantes na embarcação devido ao atrito.	54
Figura 4-1-Exemplos de trombas registradas no Rio Amazonas.	63
Figura 4-2- Carta de navegação da marinha para a região de Itacoatiara.....	64
Figura 4-3- Exemplo de modelo de um píer flutuante de concreto sendo utilizado.....	67
Figura 4-4- Exemplo de <i>Spread Mooring</i> da Marinha dos Estados Unidos.....	68
Figura 4-5- Orientação adotada para incidência das ações ambientais sobre o píer.	69
Figura 4-6- Cenário 1 de ações ambientais atuantes (A) e suas ações resultantes com vento a 45° e corrente a 90° (B).	70
Figura 4-7- Cenário 2 de ações ambientais atuantes (A) e suas ações resultantes com vento a 45° e corrente a 135° (B).	70
Figura 4-8- Cenário 3 de ações ambientais atuantes (A) e forças resultantes com vento a 90° e corrente a 225° (B).	71
Figura 4-9- Cenário 4 de ações ambientais atuantes (A) e forças resultantes com vento a 90° e corrente a 90° (B).	72
Figura 5-1- Corte transversal na seção central da viga caixão que forma píer flutuante de concreto.	74
Figura 5-2- Solicitações e momentos atuantes na viga caixão do píer flutuante em kN·m/m..	77
Figura 5-3- Dimensões da estrutura do píer flutuante de concreto em metros.....	82
Figura 5-4- Gráfico da Curva GZ de estabilidade do píer para condição de peso leve.....	83
Figura 5-5- Gráfico da Curva GZ de estabilidade do píer para condição de peso total.	85
Figura 5-6- Nomenclatura e orientação de aplicação no <i>Ansys Fluent</i>	87
Figura 5-7- Exemplo do emprego da geometria para o cenário 4 em condição leve de carregamento.	89
Figura 5-8- Geometria no <i>Meshing</i> antes da geração da malha (A) e malha (B).	91
Figura 5-9- Malha poliédrica no <i>Fluent</i> : aberta com o píer, <i>inlet e outlet</i> (A) e malha fechada com <i>inlet, outlet</i> e as paredes do domínio (B).	91
Figura 5-10- Escolha do método numérico (A) e Definição de cada fase ou fluido (B).....	92
Figura 5-11- Valores dos resíduos atrelados aos critérios de convergência do modelo.....	93
Figura 5-12- O píer no <i>Ansys CFD Post</i> após sua modelagem partir do cenário 4 com esforços de corrente atuando sobre o píer estando carregado.....	94
Figura 5-13- Gráfico para acompanhamento dos resíduos da modelagem.	94
Figura 5-14- Gradiente do ar ao interagir com o píer com paletes em seu convés no modelo de corpo duplo.....	100
Figura 5-15- Vista superior do <i>layout</i> do sistema de fundeio proposto.....	103

Figura 5-16- Corte transversal do <i>layout</i> do sistema de fundeio proposto em período de seca.	104
Figura 5-17- Embarcação do modelo Modular Ferry 2412.	104
Figura 5-18- <i>Layout</i> do sistema de fundeio proposto.	105
Figura 5-19- Adaptação do catálogo de cabos de ação para aplicações marítimas Classe 6x19.	107

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 – Resumo das aplicações por tipo de âncoras em diferentes tipos de solos.....	31
Tabela 3-1 – Valores para o coeficiente adimensional de excentricidade.....	49
Tabela 3-2 – Fator de correção do coeficiente de arrasto transversal CDC, T de acordo com a relação profundidade/calado.....	51
Tabela 3-3 – Valores do coeficiente adimensional de excentricidade (KC, e).....	51
Tabela 5-1 – Massas para as condições de peso leve e peso total do píer flutuante de concreto armado.	80
Tabela 5-2 – Curva hidrostática do píer flutuante de concreto.....	81
Tabela 5-3 – Entrada de dados no <i>Maxsurf Stability</i> para a condição de peso leve.....	83
Tabela 5-4 – Verificação dos critérios de estabilidade do píer no <i>Maxsurf Stability</i> para a condição de peso leve.	84
Tabela 5-5 – Entrada de dados no <i>Maxsurf Stability</i> para a condição de peso total.	84
Tabela 5-6 – Verificação dos critérios de estabilidade do píer no <i>Maxsurf Stability</i> para a condição de peso total.....	85
Tabela 5-7 – Verificação dos critérios de convergência da malha.	95
Tabela 5-8 – Orientações adotadas para a incidência das ações ambientais atuantes sobre o píer.	96
Tabela 5-9 – Resultados da ROM 2.0-11 e do <i>Ansys</i> para o píer em peso leve.	96
Tabela 5-10 – Resultados da ROM 2.0-11 e do <i>Ansys</i> para o píer em peso total.....	97
Tabela 5-11 – Variação percentual absoluta entre a ROM 2.0-11 e o <i>Ansys</i> , para o píer em ambas as condições de peso para o carregamento.	97
Tabela 5-12 – Comparação dos esforços atuantes totais entre a ROM 2.0-11 e o <i>Ansys</i> , para o píer em ambas as condições de carregamento.	99
Tabela 5-13 – Valores máximos dos esforços solicitantes encontrados entre a ROM 2.0-11 e o <i>Ansys</i> atuantes sobre o píer flutuante.....	101
Tabela 5-14 – Especificação dos componentes do sistema de fundeio.	107

LISTA DE SIGLAS

ACDP --	Perfilador Acústico de Correntes por Efeito Doppler (<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>)
ACT -----	Ferramentas de aplicação customizadas (<i>Application Costomization Toolkit</i>)
ANTAQ -	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
C -----	Centro de Carena
CAD ----	Desenho Assistido por Computador (<i>Computer-Aided Design</i>)
CEDEX -	Centro de Estudos e Experimentação de Obras Públicas
CFAOC -	Capitania Fluvial da Amazônia Ocidental
CFD -----	Dinâmica dos Fluidos Computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
CM -----	Braço de Alavanca
DDS-----	Ficha técnica do Projeto (<i>Design Data Sheet</i>)
DNIT ----	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNS ----	Simulação Numérica Direta (<i>Direct Numerical Simulation</i>)
G -----	Centro de Gravidade
GFRC --	Concreto Reforçado com Fibra de Vidro (<i>Glass Fiber Reinforced Concrete</i>)
GVI -----	Grupo de Vistorias e Inspeções
GZ -----	Comprimento Horizontal Relacionado ao Ângulo de Inclinação da Embarcação
IBGE ---	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LBP -----	Comprimento Longitudinal entre Perpendiculares (<i>Length Between Perpendiculars</i>)
LES -----	Simulação de Grandes Vórtices (<i>Large Eddy Simulation</i>)
LOA ----	Comprimento Longitudinal Total do Navio (<i>Length Overall</i>)
LWL ----	Comprimento Longitudinal do Navio Medido no Nível d'Água em Determinado Calado (<i>Length at Waterline</i>)
M -----	Metacentro
NBR -----	Norma Brasileira de Regulamentação
PEAD ---	Polietileno de Alta Densidade
PIB -----	Produto Interno Bruto
RANS --	Equações de Navier-Stokes Médias de Reynolds (<i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i>)
ROM ----	Recomendações para Obras Marítimas (<i>Recomendaciones para Obras Marítimas</i>)
SPH -----	Método de Hidrodinâmica de Partículas Suavizadas (<i>Smoothed Particle Hydrodynamics</i>)
TFB -----	Terminais Fluviais do Brasil
UDFs ----	Rotinas Personalizadas do Usuário (<i>Fluent User-Defined Functions</i>)
UKC ----	Distância Livre Entre a Quilha do Navio e o Leito (<i>Underkeel Clearance</i>)

W ----- Força de Empuxo da Água

Z ----- Ângulo de Inclinação Longitudinal da Embarcação

1. INTRODUÇÃO

A vasta e diversificada geografia do Brasil é caracterizada, dentre outros, por um extenso sistema de rios, que desempenha um papel fundamental na conectividade do país. Com uma rede fluvial que se divide em 12 bacias hidrográficas e que se estende por uma malha com mais de 42 mil quilômetros de extensão, dos quais 21 mil quilômetros são vias navegáveis e outros 15 mil quilômetros apresentam potencial de navegação (DNIT, 2021). Os rios brasileiros representam uma parte essencial da infraestrutura de transporte e logística do país e, portanto, a infraestrutura portuária ao longo desses rios desempenha também um importante papel no suporte à economia e ao comércio nacional, possibilitando o escoamento de produtos e matérias-primas (Adapta Brasil, 2019).

Embora o Brasil possua grandes portos espalhados ao longo do seu território, o acesso a infraestruturas portuárias de pequeno e médio porte é precário para a população em geral, o que dificulta o transporte de pessoas e cargas por meio de rios, bacias, lagoas ou áreas abrigadas. Nessas regiões, o deslocamento de mercadorias e equipamentos é realizado principalmente por meio de estiva manual, isto é, dependem exclusivamente da força de trabalho humana.

Essa realidade está diretamente ligada à infraestrutura precária presente em locais mais afastados dos grandes centros urbanos. A falta de estrutura adequada dificulta ou até mesmo impede a operação de embarcações como balsas ou *Ferry Boats* (embarcações projetadas para transportar carros, caminhões e carretas), que facilitam o desembarque de veículos e equipamentos necessários para a realização de obras civis. Tais obras são essenciais para melhorar a infraestrutura básica e, conseqüentemente, viabilizar o transporte eficiente de mercadorias nessas áreas.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA E MOTIVAÇÃO PARA A REALIZAÇÃO DO ESTUDO

Pode-se observar, na região de Itacoatiara - AM, a falta de infraestrutura adequada para carga e descarga nas margens do rio, impactando diretamente no desenvolvimento das regiões ribeirinhas. Isto posto, há dificuldades de acesso a materiais de construção, comida e mercadorias em região que não possui acesso por estradas, somente por embarcações.

A utilização de píeres flutuantes facilita a atracação de uma embarcação em um píer, pois o píer acompanha o nível do rio, mantendo sempre a distância entre o convés da embarcação e o convés do píer constante. Esse comportamento, gera um aumento da segurança do processo

de embarque e desembarque de pessoas e mercadorias, dentro das condições climáticas de operação. Com isso, o trabalho de estiva pode ser facilitado e agilizado.

Além disso, a infraestrutura aprimorada de um píer flutuante pode auxiliar, ainda, no abastecimento de água via bombonas em zonas mais remotas, bem como na drenagem de esgoto das embarcações para tratamento em terra ou de regiões afastadas para tratamento, a retirada de lixo das regiões ribeirinhas e das próprias embarcações, e o acesso a mercadorias em áreas sem estradas.

Ao se utilizar uma estrutura de concreto, o píer flutuante apresenta maior resistência a impactos em comparação com estruturas metálicas. Assim, em casos de colisões durante o processo de atracação, a probabilidade de danos à estrutura é reduzida, diminuindo os custos de operação e manutenção em relação aos píeres flutuantes de aço.

Outra vantagem do píer flutuante é a ausência da necessidade de obras civis no leito e nas margens dos rios, resultando em um menor impacto ambiental em comparação aos modelos de píer convencionais. Além disso, sua versatilidade permite que seja deslocado para novas áreas de interesse, reduzindo os custos de implementação de infraestruturas e minimizando os impactos ambientais dentro de uma mesma região.

1.2. OBJETIVOS

Nesta seção, apresentam-se os objetivos gerais e específicos que orientam a linha de pesquisa deste estudo, uma vez que o objetivo geral define a meta principal do estudo e os objetivos específicos detalham as etapas necessárias para atingir essa meta estabelecida. Esta estrutura permite uma compreensão clara e aprofundada dos propósitos da pesquisa, facilitando a análise e discussão dos resultados obtidos.

1.2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste estudo consiste em desenvolver uma solução de engenharia que permita dimensionar a geometria de um píer modular flutuante e o seu respectivo sistema de fundeio, em que se possa atracar balsas ou navios de pequeno e médio porte, sobretudo em áreas de difícil acesso, tendo por base o conceito dos píeres flutuantes com estrutura de concreto. Esses píeres têm como propósito de serem utilizados para o acesso de pessoas e mercadorias, por meio de embarcações de médio porte em regiões remotas.

A solução proposta nesta pesquisa envolve a concepção e utilização de um píer fluvial flutuante, modular e versátil. O píer deve ser capaz de suportar as cargas provenientes das

demandas operacionais e logísticas associadas ao transporte de máquinas para a execução de obras civis em regiões remotas. Além disso, deve permitir o acesso da população de regiões remotas e de difícil acesso às mercadorias, garantindo a operação eficiente do píer e o fornecimento necessário. Com a demanda de carga definida, as dimensões do píer são estabelecidas e, ao final, um sistema de fundeio é projetado, para que o píer cumpra com os objetivos de utilização descritos.

A avaliação de desempenho dessa estrutura, a ser implementada ao sistema de fundeio, considera as resistências aos esforços de projeto, visando o seu funcionamento ou operação, a durabilidade e a capacidade de operar em diversas condições climáticas e de correntes em águas fluviais.

Portanto, este projeto tem o potencial de explorar novas possibilidades de desenvolvimento econômico e de infraestrutura em áreas anteriormente inacessíveis ou de difícil acesso. Ao fornecer uma solução robusta e eficiente para o transporte de mercadorias e a realização de obras civis nessas regiões, pode-se promover o crescimento e o progresso em comunidades remotas. A implementação de um píer flutuante facilita a logística e o transporte, contribuindo, também, para a melhoria da qualidade de vida, proporcionando acesso a bens essenciais e de serviço, aumentando o potencial econômico dessas regiões, incentivando investimentos e estimulando o desenvolvimento de forma sustentável. Além disso, ao minimizar o impacto ambiental e reduzir os custos operacionais, a adoção de píeres flutuantes de concreto pode se apresentar como uma solução vantajosa e inovadora para o futuro do transporte fluvial no Brasil.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do estudo consistem em realizar análises hidrostáticas e de esforços solicitantes decorrentes dos fenômenos naturais, visando garantir a capacidade de fluviabilidade da estrutura em diversos cenários de carregamento. Mais especificamente, os objetivos deste estudo são:

- Determinar os esforços atuantes sobre a estrutura, permitindo o dimensionamento do sistema de fundeio;
- Realizar um pré-dimensionamento do módulo do píer flutuante de concreto com base no conceito de viga caixão, para se obter uma geometria e peso próprio aderentes à realidade e próximos às capacidades de utilização estabelecidas;

- Avaliar a estabilidade hidrostática do módulo do píer flutuante, a fim de garantir a sua capacidade de flutuabilidade;
- Avaliar os resultados obtidos para os esforços atuantes na estrutura do píer flutuante;
- Dimensionar o sistema de ancoragem ou de fundeio para o píer flutuante;
- Identificar as limitações do estudo e propor novos passos ou melhorias para estudos futuros.

1.3. CONTEÚDO DO ESTUDO

Além desta introdução, o estudo está dividido em mais cinco capítulos. O capítulo 2 consiste na revisão bibliográfica, em que são abordados conceitos relacionados aos tipos de píeres, portos no Brasil, rios e hidrovias, bem como a modelagem CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e materiais de construção usualmente empregados. Este capítulo compõe-se de uma revisão da literatura relacionada ao tema apresentado na introdução, expondo os aspectos teóricos considerados para a realização do estudo.

O capítulo 3 apresenta a metodologia para a realização do estudo proposto. Nesse capítulo, detalham-se as etapas de pesquisa, desenvolvimento e análise, incluindo os métodos empregados na elaboração do estudo. Discute-se a visita técnica realizada na região de Itacoatiara - AM, a escolha de uma norma técnica para a realização de uma análise comparativa com a modelagem computacional, escolha e metodologia para o embasamento da análise comparativa entre a aplicação da modelagem computacional e a norma escolhida, e por fim, a metodologia para o cálculo do sistema de fundeio. No início, apresenta-se um fluxograma de todo o capítulo para um entendimento mais claro de todo o processo.

O capítulo 4 é dedicado à apresentação do estudo de caso, focando na implementação do píer flutuante de concreto modular em um cenário real. Para isso, discutem-se os aspectos práticos do projeto, como a caracterização da região de implementação do estudo, os dados técnicos a serem utilizados na aplicação, na caracterização do píer flutuante e da sua estrutura escolhida e os cenários de solicitação de esforços.

Em seguida, apresenta-se, no capítulo 5, a aplicação de parte da metodologia apresentada no capítulo 3, assim como, a discussão dos resultados obtidos por meio das análises realizadas, oferecendo uma visão crítica e comparativa dos dados. Neste capítulo, analisam-se os esforços que atuam sobre a estrutura, a estabilidade hidrostática do módulo do píer flutuante, o dimensionamento do sistema de ancoragem ou de fundeio, e a avaliação dos resultados obtidos.

Finalmente, o capítulo 6 apresenta as conclusões finais do estudo, destacando os principais pontos em relação aos resultados encontrados e propondo sugestões para pesquisas

futuras. Neste capítulo, as informações apresentadas nos capítulos anteriores são sintetizadas, oferecendo uma visão geral dos resultados e contribuições da pesquisa. As limitações do estudo e as possibilidades de aplicação dos resultados em outros contextos e projetos são discutidas. Também contempla propostas e recomendações para futuras pesquisas e desenvolvimentos na área de sistemas de fundeio e píeres flutuantes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é composto pela revisão da literatura relacionada ao tema apresentado na introdução, expondo os aspectos teóricos considerados para a realização do estudo. Preliminarmente, apresentam-se alguns tópicos relacionados à região de aplicação do estudo, materiais comumente utilizados na construção de píeres, características sobre embarcações em geral, os elementos que compõem um sistema de fundeio e o que é a modelagem CFD, com um panorama geral sobre alguns dos softwares comumente utilizados para essa aplicação.

2.1. PANORAMA GERAL DA CIDADE DE ITACOATIARA E DOS SEUS PORTOS

Localizada às margens do rio Amazonas, a cidade de Itacoatiara é carinhosamente apelidada de "Velha Serpa". Seu nome, de origem Tupi, é derivado de "*Ita*", que significa pedra, e "*coatiara*", que se refere a algo pintado, gravado, escrito ou esculpido (Souza, 2021). Itacoatiara é um município brasileiro localizado dentro da região metropolitana de Manaus (271 km da capital, Manaus), no estado do Amazonas. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no ano de 2022 a cidade possui uma população de 103.598 pessoas e uma densidade populacional de 11,65 habitantes por km², em uma área territorial municipal de 8.891,906 km². O município também possui o segundo maior produto interno bruto (PIB) do estado do Amazonas, com R\$ 2,34 bilhões no ano de 2021 de acordo com dados do IBGE de 2022.

A localização de Itacoatiara junto à bacia hidrográfica amazônica é de grande relevância, sendo atravessada pelo Rio Amazonas. Além desses grandes rios, a cidade é cortada por diversos igarapés e lagoas, havendo também um considerável número de afluentes em suas proximidades, que contribuem para a complexidade e riqueza de seu ecossistema hídrico. Devido a essas características, o município de Itacoatiara destaca-se como um dos maiores polos agropecuários do Brasil, contando com um significativo porto fluvial, que desempenha um papel crucial no escoamento de cargas. Este porto é o segundo maior porto fluvial do país, recebendo diariamente mercadorias provenientes de importantes cidades como Belém, Cuiabá, Manaus e Santarém (Portal Amazônia, 2015).

A seguir, apresentam-se as principais infraestruturas portuárias presentes no município de Itacoatiara, assim como suas respectivas funções e algumas de suas características e dados técnicos encontrados.

2.1.1. PORTO FEDERAL ANTÔNIO NELSON DE OLIVEIRA NETO

Inaugurado em junho de 2018, o porto federal Antônio Nelson de Oliveira Neto, era para ser o porto principal da cidade. E sua estrutura dispunha de uma rampa de concreto armado com 128 metros de comprimento capaz de atracar simultaneamente duas balsas de médio a grande porte, além de um pátio de cargas de 13.950 m² para 5 mil contêineres e estacionamento para veículos, caminhões, carretas e bitrens. Em 2023 o porto colapsou e teve parte do seu pátio e ponto de acesso destruídos no período de seca da região. A Figura 2-1 apresenta porto federal Antônio Nelson de Oliveira Neto quando em funcionamento e posteriormente, após o seu colapso.



Figura 2-1- A esquerda o porto federal Antônio Nelson de Oliveira Neto e a direita o porto após o colapso.

Fonte: BNC Amazonas (2018) e Eliena Monteiro (2023).

2.1.2. PORTO DE ITACOATIARA

A cidade de Itacoatiara possui um porto público municipal para carga geral e passageiros, mas infelizmente não foram encontradas informações sobre a movimentação de passageiros e cargas no mesmo. Em março de 2019, engenheiros do Grupo de Vistorias e Inspeções (GVI) da Capitania Fluvial da Amazônia Ocidental (CFAOC) interditaram o porto por questões de segurança, destacando como principais justificativas para tal medida, como sendo o sistema de fundeio, que se encontrava comprometido e partes móveis com problemas estruturais. O porto foi reaberto novamente em 2020, meses após sua interdição e continua atendendo a cidade de Itacoatiara e sua população. A Figura 2-2 apresenta o porto municipal de Itacoatiara.

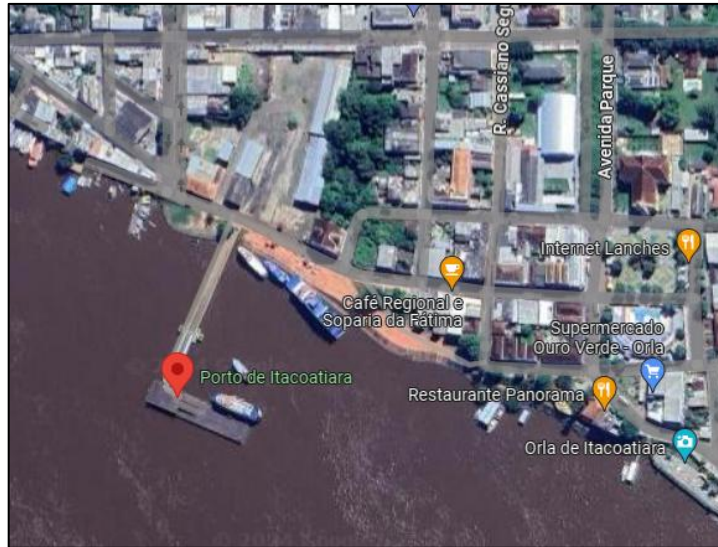


Figura 2-2- Porto público municipal de Itacoatiara.

Fonte: Google (2024).

2.1.3. *TERMINAL GRANELEIRO FLUTUANTE HERMASA*

Por se tratar de um terminal privado, não há informações suficientes disponíveis ao público. No entanto, é de domínio público a informação de que a empresa Hermasa pertence ao Grupo AMAGGI. O terminal possui a capacidade de carregar navios Panamax por meio de um carregador de navios fixo, assim como, carregar ou descarregar navios através de um sistema de transporte por esteiras que se conectam aos armazéns no local. Atualmente, figura como um dos principais pontos de escoamento de soja, milho e óleo de soja do Brasil. Apesar da seca histórica que afetou a região em 2023, o Terminal Graneleiro Hermasa movimentou 11,4 milhões de toneladas do total de 32 milhões de toneladas movimentadas em todos os portos do Amazonas no ano de 2023 (ANTAQ, 2023). O terminal graneleiro pode ser observado na Figura 2-3.



Figura 2-3- Terminal graneleiro Hermasa.

Fonte: BNC Amazonas (2024).

2.1.4. *TERMINAL DE ARMAZENAMENTO DE COMBUSTÍVEL*

Inaugurado em março de 2013 pelo Grupo Dislub Equador, a empresa Terminais Fluviais do Brasil (TFB) é a operadora do terminal de combustíveis e busca superar as dificuldades de abastecimento no estado do Amazonas, Acre, Rondônia, Pará e Mato Grosso. Para isso, o complexo foi construído, o qual possui uma área total de 107 mil metros quadrados e uma capacidade de armazenamento de derivados de petróleo e biocombustíveis de 103.000 metros cúbicos (Grupo Dislub Equador, 2022).

Segundo a TFB, o terminal fica localizado ao lado do porto federal da cidade, na margem esquerda da cidade de Itacoatiara e é composto por um cais flutuante e sua estrutura de acesso. O cais é fundeado por meio de 20 poitas de amarração e 14 unidades de defensas *Yokohama*, alinhadas ao longo de sua estrutura e tem a capacidade de receber, simultaneamente, um navio da classe Panamax e duas balsas petroleiras ou quatro balsas sem a presença do navio. O terminal também conta com uma plataforma de carregamento rodoviário para fazer a transferência do combustível para outras regiões por terra. A Figura 2-4 apresenta o terminal de combustível do Grupo Dislub Equador.



Figura 2-4- Terminal de armazenamento de combustíveis em Itacoatiara.

Fonte: CGST (2022).

2.2. **BACIA AMAZÔNICA**

Nesta seção apresentam-se algumas das características da bacia amazônica, assim como particularidades das regiões no entorno da cidade de Manaus e sua região metropolitana.

2.2.1. *IMPORTÂNCIA DO RIO AMAZONAS*

O rio Amazonas é conhecido por percorrer uma das regiões mais biodiversas do planeta, a Floresta Amazônica, que abriga milhares de espécies de animais e plantas. As águas do Amazonas são o lar de pelo menos 1.800 espécies de peixes continentais, sem mencionar aquelas ainda não identificadas, além de uma variedade impressionante de anfíbios, mamíferos, répteis, crustáceos e outros animais. Dentre as espécies encontradas na região estão os botos-cor-de-rosa, piranhas, peixes-boi, enguias-elétricas, tartarugas-da-Amazônia, ariranhas, lontras, jacarés e muitos outros (Guitarrara, 2021).

Ele desempenha um papel crucial no abastecimento de água para os ecossistemas locais e na regulação do clima da região. O rio Amazonas representa uma parcela significativa da água doce do mundo, contribuindo com 20% do total que flui em direção aos oceanos. Devido ao seu relevo plano, o Amazonas é navegável e suas hidrovias são essenciais para o transporte interno de pessoas e mercadorias, especialmente em áreas sem acesso por estradas. Destaca-se a Hidrovia do Solimões-Amazonas, com 1.630 km de extensão. Além de ser uma fonte vital de água para comunidades ribeirinhas e indígenas, o rio Amazonas sustenta atividades agrícolas, pecuárias e pesqueiras, sendo essencial para a subsistência e economia local. Ademais, suas águas atraem o turismo em cidades como Manaus, contribuindo para a economia regional (Guitarrara, 2021).

2.2.2. *FORMAÇÃO DO RIO AMAZONAS*

Segundo Franzinelli (2011), a convergência dos rios Negro e Solimões, culminando na formação do Rio Amazonas, localiza-se na faixa de neotectônica transcorrente, que se estende no eixo Leste-Oeste, centralmente situada na Bacia do Amazonas. Nessa região, os depósitos clásticos da Formação Alter do Chão, datados do Cretáceo, constituem a base dos sedimentos fluviais recentes. Na referida confluência, o Rio Negro, cuja largura atinge 3 km e profundidade alcança 90 m, define seu trecho final pela influência neotectônica, escavando-se nos depósitos da Formação Alter do Chão que formam sua margem norte, estendendo-se a leste na margem norte do Rio Amazonas. Por outro lado, o Rio Solimões, ao chegar a essa confluência, possui uma largura de 2 km e uma profundidade de 35 m.

2.2.3. *VARIAÇÃO DO NÍVEL D'ÁGUA*

Segundo o Ministério Público do Estado do Amapá, a variação do nível da água no Rio Amazonas é um fenômeno natural significativo, influenciado principalmente pelo regime de chuvas na bacia amazônica. Durante o período de cheias, que ocorre entre dezembro e maio, o

nível do rio pode subir consideravelmente, inundando vastas áreas da planície ao seu redor. Essa elevação do nível da água pode chegar a dezenas de metros, alterando drasticamente a paisagem e as condições de navegação. As cheias sazonais proporcionam um enriquecimento dos solos com nutrientes trazidos pelas águas, beneficiando a agricultura local, mas também exigem uma gestão cuidadosa para mitigar os riscos de inundações.

Em contrapartida, o período de seca, que vai de junho a novembro, é marcado por uma diminuição significativa no volume de água, expondo áreas normalmente submersas e revelando bancos de areia e ilhas temporárias. Esta variação anual é essencial para a dinâmica ecológica da região, influenciando os ciclos de vida de muitas espécies aquáticas e terrestres.

2.2.4. PARTICULARIDADE DO RIO NA REGIÃO DE MANAUS E ITACOATIARA

A bacia Amazônica representa uma potência energética significativa para o Brasil, contribuindo com mais de 40% do potencial de geração de energia hidrelétrica do país. Nesta região, destacam-se importantes usinas hidrelétricas, como as usinas de Belo Monte e Tucuruí, que se beneficiam da robustez dos rios Xingu e Tocantins, respectivamente. A usina de Belo Monte possui uma capacidade instalada de 11.233 MW e quantidade média de garantia física de 4.571 MW (Norte Energia, 2020), enquanto a usina de Tucuruí possui uma capacidade instalada de 8.370 MW (Eletrobras, 2024).

Essas usinas contam com uma capacidade de produção gigantesca e são apenas dois exemplos do vasto conjunto de empreendimentos hidrelétricos presentes na Amazônia, que incluem desde grandes unidades até pequenas centrais hidrelétricas (Bourscheit, 2018).

Ainda, segundo Bourscheit (2018), a potencialidade energética da região amazônica tem despertado interesse em investimentos, com planos ambiciosos para a instalação de novas usinas nos próximos anos. Esses projetos visam explorar ao máximo o potencial hidrelétrico ainda não aproveitado, especialmente nas áreas próximas ao litoral do Pará, onde as condições topográficas podem ser mais favoráveis.

Apesar desse vasto potencial, o próprio rio Amazonas apresenta limitações para a geração hidrelétrica em grande escala. Seu relevo plano e a ausência de quedas d'água significativas dificultam a criação de represas capazes de gerar energia de forma eficiente. Como resultado, a região tem visto um aumento na instalação de usinas termelétricas, que utilizam combustíveis fósseis para gerar eletricidade.

Assim, enquanto a Amazônia permanece como um dos principais polos de geração energética do Brasil, a diversificação das fontes de energia se torna cada vez mais importante para atender à crescente demanda por eletricidade no país.

2.3. TIPOS DE MATERIAIS EMPREGADOS NA CONSTRUÇÃO DE PÍERES

Nesta seção, abordam-se os tipos de materiais mais comumente empregados nas construções de píeres. A seguir, apresentam-se os exemplos de píeres, assim como algumas de suas características de aplicação.

2.3.1. MADEIRA

Conforme observado na visita de campo do autor em Manaus e Itacoatiara, os píeres de madeira são amplamente utilizados, feitos em sua maioria por toras de açacu ligadas por cabos de aço ou ripas de madeiras transversais, servindo assim, como uma base flutuante para um platô, caracterizando-se um píer. Suas principais características são a versatilidade de construção, pois necessita apenas de carpintaria básica para a execução, possuir resistência à umidade e submersão superior ao aço, não necessitar de tratamento superficial de proteção do meio ambiente e ser facilmente substituível após a vida útil. Como ponto negativo, apresenta um impacto ambiental devido a retirada de árvores nativas de grande porte, as quais demoram décadas para serem substituídas por novas árvores (Burns, 1999). Um exemplo da fluviabilidade e utilização de madeiras para a concepção de estruturas flutuantes pode ser vista na Figura 2-5.

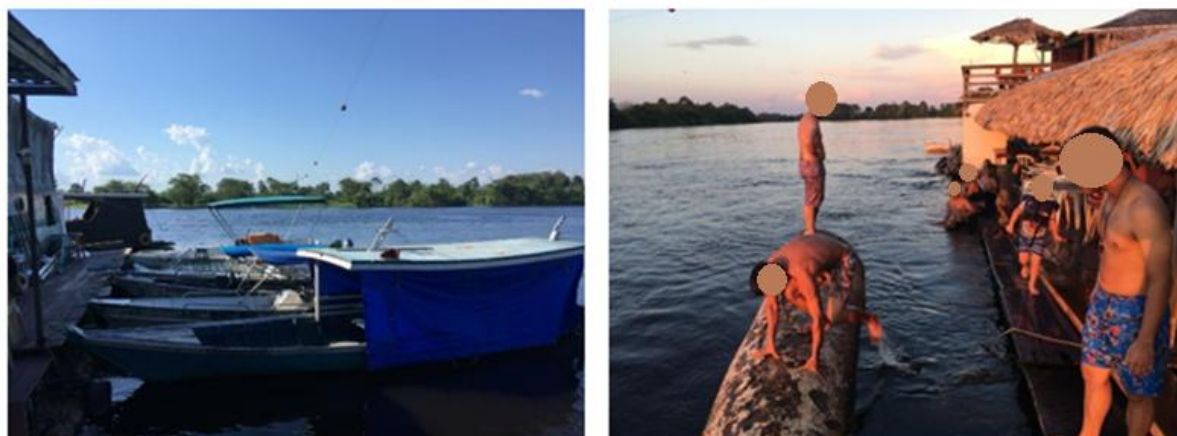


Figura 2-5- Pérola do Piquiar em Itacoatiara, Amazonas.
Fonte: Autoria própria

2.3.2. MATERIAL COMPÓSITO E POLÍMERO

Os materiais poliméricos são normalmente utilizados como flutuantes pré-fabricados, compostos de polímero chamado de Polietileno de Alta Densidade (PEAD). Um exemplo dessa aplicação são os tambores que são estruturados com estrutura de madeira ou de fibras de vidro, conforme a Figura 2-6. Esse tipo de estrutura é normalmente utilizado em obras residenciais mais simples e de fácil execução.

A fibra de vidro é atualmente empregada no traço do concreto, complementando as armaduras de aço, contribuindo para a resistência mecânica necessária para a aplicação da estrutura e a redução do peso próprio da mesma, tornando a estrutura mais eficiente.

A empresa Construquímica fornece para o mercado brasileiro a fibra de vidro para concreto *AR ANTI-CRACK HD 12 mm*, que é uma fibra de vidro álcali resistente e de alta dispersão para reforço de concreto, desenvolvida para o controle de fissuração do concreto e de compósitos a base de Cimento Portland como: argamassas cimentícias de fachadas prediais, concretos de pisos industriais, pavimentos rodoviários, *Glass Fiber Reinforcement Concrete* (GFRC) ou concreto reforçado com fibras de vidro, concreto projetado e peças pré-fabricadas de concreto em geral.



Figura 2-6- Píer fabricado de materiais poliméricos.

Fonte: Autoria própria.

2.3.3. ALUMÍNIO

O emprego do alumínio é normalmente utilizado na fixação das partes flutuante do píer. A utilização desse material tem como vantagem o baixo peso específico em relação ao aço, reduzindo assim o peso da estrutura. Também possui baixa oxidação em contato com a água, o

que dispensa uma pintura de proteção contra oxidação, reduzindo o custo de manutenção ao longo da vida útil da estrutura.

Segundo Burns (1999), como desvantagens da utilização desse tipo de material em píeres, é que ele possui um custo mais elevado de aquisição em relação ao aço, inviabilizando o seu emprego em massa por projetos que tenham um orçamento mais limitado. Além do custo de aquisição elevado, a mão de obra qualificada para a sua construção é muito mais restrita, sendo difícil de achar, por apresentar um custo por hora de trabalho mais elevado. Um exemplo de um píer fabricado em alumínio pode ser visto na Figura 2-7



Figura 2-7- Píer de alumínio da Eagle Aluminum.

Fonte: Eagle Aluminum (2024).

2.3.4. AÇO

O aço é o material mais utilizado no meio naval, tanto no emprego da construção de embarcações, balsas, plataformas de perfuração e exploração e elementos de portos, cais e píeres. Esse material tem como vantagens, um conhecimento mais abrangente de projeto e uma qualificação de mão de obra para a execução mais presente no mercado, em relação a materiais como alumínio e materiais compósitos. Em relação às propriedades físicas, possui maior resistência mecânica em relação a madeira, alumínio, polímeros e a alguns materiais compósitos. O aço, além de prover uma agilidade durante a construção, reduzindo custos iniciais de execução, também pode ser facilmente reciclado para emprego em outras utilizações, após o fim da vida útil da estrutura.

Possui como desvantagens um maior risco a corrosão, principalmente em zonas de contato com a água e oxigênio, requerendo assim um tratamento periódico de pintura, o qual eleva o custo de manutenção em geral. O custo de construção do aço é mais elevado quando comparado a materiais como madeira e concreto, demandando uma mão de obra altamente qualificada, o que pode ser um desafio em áreas menos desenvolvidas. Além disso, sua

manipulação exige o uso de maquinários, e a execução de obras em aço tende a ser mais cara em relação a outros materiais, com exceção do alumínio. Um modelo de píer de aço pode ser visto na Figura 2-8.



Figura 2-8- Modelo de píer de aço.

Fonte: Pierglass (2024).

2.3.5. CONCRETO

As estruturas de concreto são amplamente utilizadas na construção de portos, cais e píeres. O concreto oferece uma alta resistência mecânica. As estruturas, que empregam esse material em sua concepção, possuem uma baixa manutenção, possuem uma vida útil de utilização longa e possuem uma execução mais simples do que estruturas de aço ou alumínio.

Como desvantagens, suas estruturas possuem um peso elevado, precisam de proteção adicional nas armaduras para empregos em áreas portuárias e navais. Requer um tempo de execução de obras maior, devido ao tempo de cura do concreto e uma verificação em relação ao surgimento de fissuras na estrutura ao longo do tempo ou em caso de impactos. Apesar de possuir uma tendência menor de manutenção em relação as estruturas de aço, quando for constatada a necessidade de intervenções, estas costumam ser mais difíceis e trabalhosas de serem executadas. Um modelo de um píer de concreto pode ser visto na Figura 2-9.

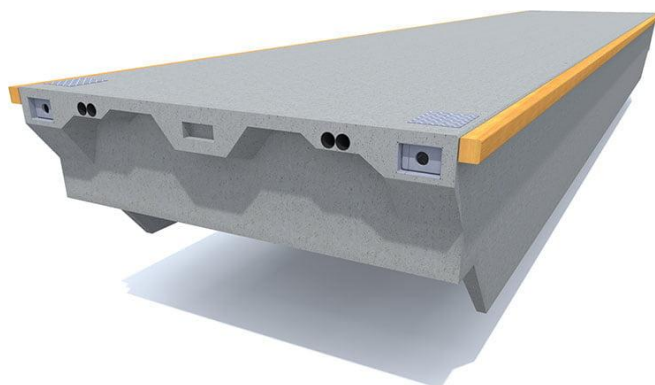


Figura 2-9- Modelo de píer flutuante de concreto.
Fonte: Marinetek (2024).

2.4. SIGLAS E TERMOLOGIAS PARA EMBARCAÇÕES

Para um entendimento melhor ao longo do estudo, esta seção tem como objetivo mostrar as principais medidas e suas abreviações, como ilustrado na Figura 2-10. Algumas das definições estarão apresentadas com a terminologia na língua inglesa, uma vez que na literatura pesquisada e na aplicabilidade prática é a mais utilizada (Fonseca, 2002).

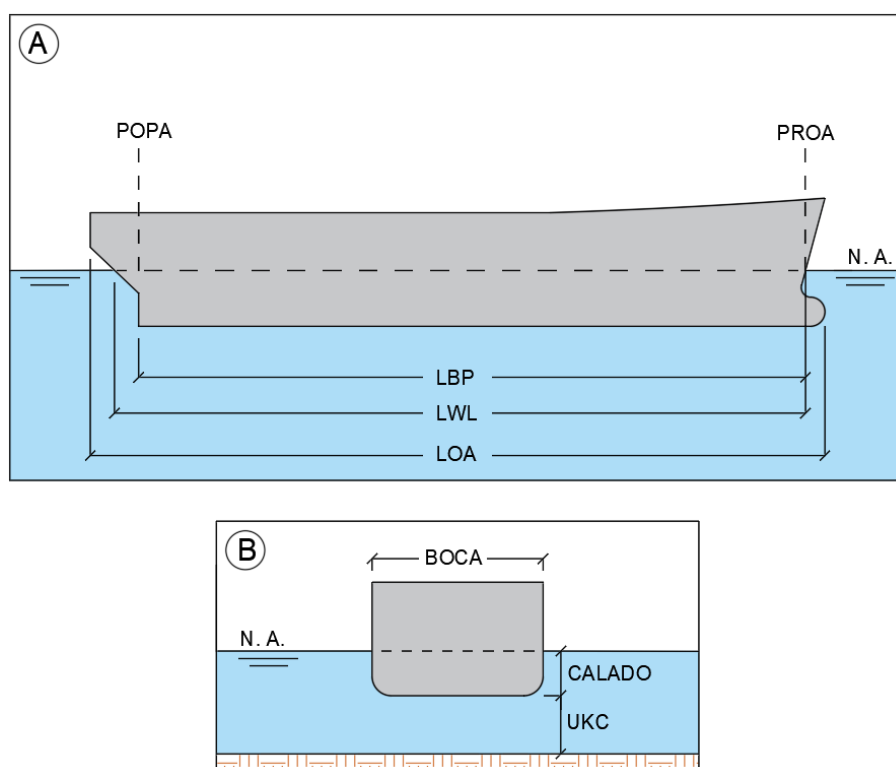


Figura 2-10- Principais dimensões da geometria de uma embarcação, sendo: longitudinal (A) e transversal (B).

Fonte: Adaptado de Fonseca (2002).

A Boca é a dimensão máxima transversal do navio; o Calado é a dimensão entre a quilha e a linha de água; o Pontal (ou *Depth*) corresponde à altura total do navio, ou seja, entre sua quilha e a linha do convés a meia nau; o LBP (*Length Between Perpendiculars*) é o comprimento longitudinal entre perpendiculares do navio; o LOA (*Length Overall*) é o comprimento longitudinal total do navio; o LWL (*Length at Waterline*) é o comprimento longitudinal do navio medido no nível d'água em determinado calado; o NA Nível da Água refere-se à elevação da linha de água, referenciada ao nível de maré mínimo; o UKC (*Underkeel Clearance*) é a distância livre entre a quilha do navio e o leito; a Popa é a região traseira do navio; a Proa é a região frontal do navio; a Meia-nau é a região entre a proa e a popa do navio; a Ré é a região da meia-nau para trás do navio; e a Vante é a região da meia-nau para frente do navio.

2.5. MOVIMENTOS BÁSICOS DAS ESTRUTURAS FLUTUANTES

Segundo Mason (1982), durante a elaboração do projeto é importante ter pelo menos uma compreensão geral da magnitude desses movimentos presentes nos corpos flutuantes como: navios, embarcações ou outras estruturas flutuantes. Isso tem como intuito determinar parâmetros fundamentais como a profundidade abaixo da linha d'água, o calado do corpo flutuante e a altura dos equipamentos portuários. Além disso, certos movimentos têm implicações significativas nos dispositivos de fixação dos navios.

Conforme ainda descrito por Mason (1982), um corpo flutuante é um sólido com seis graus de liberdade, compreendendo três translações e três rotações. A adoção de um sistema de eixos ortogonais padrão (X, Y e Z) permite observar os seguintes movimentos atuantes em cada eixo:

- Eixo X: Atua ao longo do eixo longitudinal da estrutura, ou seja, atua ao longo do comprimento do navio (*LWL*). A translação nesse eixo é denominada de Deslocamento (*Surge*) enquanto a rotação em torno desse mesmo eixo é denominada de Balanço (*Roll*);
- Eixo Y: Atua ao longo do eixo transversal da estrutura, ou seja, atua ao longo da boca (B) do navio em um plano horizontal e transversal ao eixo X. A translação no eixo Y é denominada de Abatimento (*Sway*) e a rotação em torno desse eixo é denominada de Caturro (*Pitch*);
- Eixo Z: Atua no plano vertical da estrutura. A sua translação é denominada de Arfagem (*Heave*) e sua rotação de Cabeceio (*Yaw*).

Para um melhor entendimento, a Figura 2-11 apresenta os movimentos e eixos citados acima.

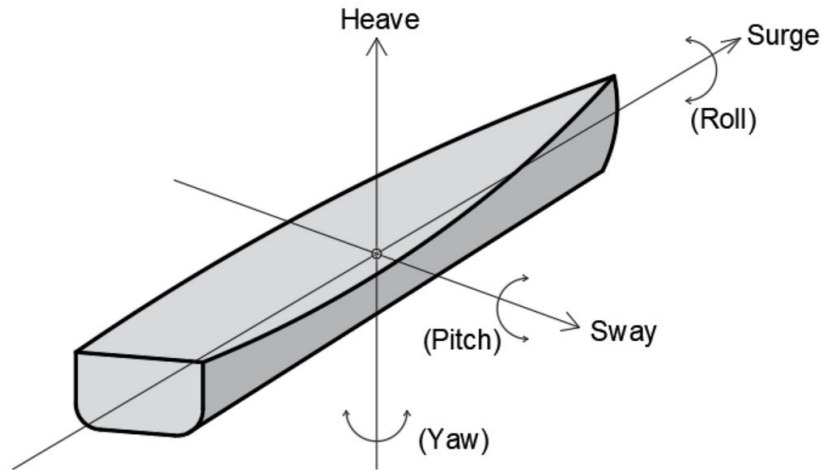


Figura 2-11- Movimentos dos navios e embarcações.

Fonte: Adaptado de Mason (1982).

2.6. ESTABILIDADE DO PÍER OU PONTOON

Segundo Fonseca (2002), a estabilidade de uma balsa quadrada se refere a sua capacidade de manter o seu equilíbrio e resistir a forças externas, sem tombar ou capotar. Em engenharia naval e arquitetura naval, a estabilidade é uma consideração crucial para garantir a segurança e o desempenho adequado de uma embarcação.

Para se entender a estabilidade de uma balsa quadrada, é importante considerar alguns conceitos básicos como: Centro de Carena (C); Centro de Gravidade (G); Metacentro (M); Centro de gravidade deslocado quando a embarcação inclina em determinado ângulo (Z); Braço de alavanca (CM); e GZ é o comprimento horizontal relacionado ao ângulo de inclinação da embarcação (θ). A seguir esses itens citados estão sendo explicados mais detalhadamente.

O Centro de Empuxo ou Centro de Carena é o ponto onde a força de empuxo da água atua. Este ponto varia com a inclinação da balsa na água. Já o Centro de Gravidade, é o ponto onde todo o peso da balsa parece estar concentrado. O Metacentro é o ponto onde a linha vertical a partir do novo Centro de Empuxo cruza a linha vertical do Centro de Empuxo original, quando a balsa está na sua posição direita, ou seja, embarcação sem inclinação (M). Por fim, o Centro de gravidade deve estar localizado abaixo do Metacentro, para que a embarcação tenha uma

estabilidade positiva. A Figura 2-12 apresenta um esquema com o posicionamento desses pontos citados.

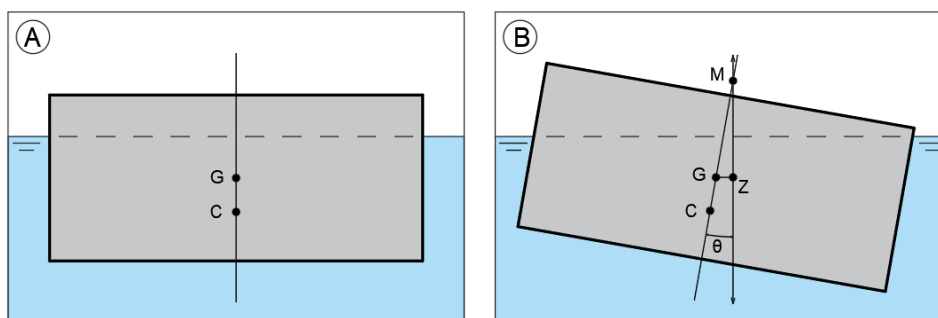


Figura 2-12- Estabilidade de uma embarcação quando na vertical (A) e inclinada (B).

Fonte: Adaptado de Fonseca (2002).

Explicando melhor o funcionamento das forças atuantes na Figura 2-12, tem-se o surgimento do momento de restauração, também conhecido como momento restaurador, que é um conceito importante no contexto da estabilidade de uma embarcação, como uma balsa. Ele se refere à tendência da embarcação em retornar à posição vertical após ter sido inclinada ou deslocada por forças externas, como ondas, vento ou mudanças na distribuição de carga. Quando uma balsa é inclinada, há um deslocamento do centro de gravidade (G) em relação ao centro de empuxo (C). O momento de restauração $W \cdot \overline{GZ}$ é o resultado da tendência da força de empuxo da água (W) em restaurar a embarcação à sua posição vertical original. Este momento restaurador é gerado pela diferença entre a posição do G e do C em relação à linha de flutuação. Em termos simples, se o centro de gravidade (G) estiver localizado acima do centro de empuxo (C), ocorre um momento restaurador que tende a endireitar a embarcação. Esse momento é crucial para garantir a estabilidade da balsa, pois impede que ela permaneça inclinada de maneira perigosa. Os projetos navais consideram cuidadosamente o momento restaurador ao projetar e avaliar a estabilidade de balsas e outras embarcações, para garantir que elas possam lidar com diversas condições operacionais e permanecer seguras em diferentes situações.

2.7. ESTRUTURAS FLUTUANTES PORTUÁRIAS

Segundo Tsinker (2004), uma estrutura portuária deve ser composta pelos seguintes componentes estruturais: os componentes flutuantes, os componentes de acesso e por fim, o sistema de fundeio. Existem três posições relativas a qual o componente flutuante está em relação a margem e a ponte de acesso, sendo essas: transversal em T, transversal em L e

longitudinal. A Figura 2-13 mostra o esquema de posicionamento de cada uma das posições apresentadas.

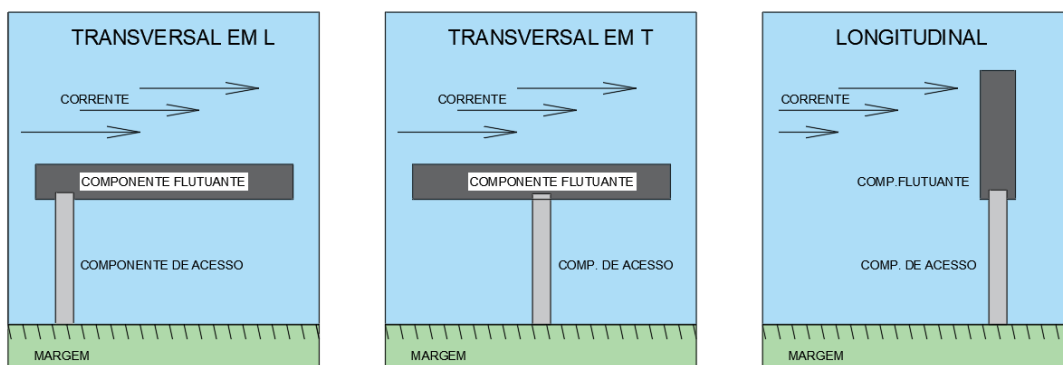


Figura 2-13- Tipos de posicionamento do componente flutuante com a margem.

Fonte: Adaptado de Tsinker (2004).

2.7.1. COMPONENTES FLUTUANTES

De acordo com Tsinker (2004), os componentes flutuantes podem ser compostos por estruturas denominadas de píer ou cais flutuantes, sendo o píer a estrutura normalmente projetada de forma perpendicular à margem, isto é, entrando pelo corpo de água. Já o cais é uma estrutura paralela à linha da margem, logo, atua como a área portuária em si no caso de estar situada na margem ou no caso do cais flutuante, atua como uma extensão da própria margem dentro do corpo d'água, permitindo o acesso ao píer e à área portuária na margem.

Tanto o píer como o cais podem ser utilizados para atracar as embarcações e têm como função criar uma ligação física entre a embarcação e a área portuária, proporcionando as condições adequadas para o embarque e desembarque de passageiros e cargas, em áreas que a embarcação não consegue se aproximar, por não ter calado suficiente ou, seja, a embarcação encostaria o seu fundo no leito do rio.

Como as estruturas abordadas nesse tópico são flutuantes, elas devem ter a sua flutuabilidade garantida por meios próprios, isto é, possuem um peso equivalente ao volume de água deslocado superior ao peso próprio de operação ou, em casos em que não se consiga isso, as estruturas devem ter auxílio de flutuadores na parte inferior ou em suas laterais.

As aplicações de esquemas estruturais dos componentes flutuantes podem ser vistas na Figura 2-14 a seguir, onde esses, possuem um único módulo ou um conjunto de módulos acoplados entre si podendo ter flutuadores ou não conforme mencionado anteriormente.

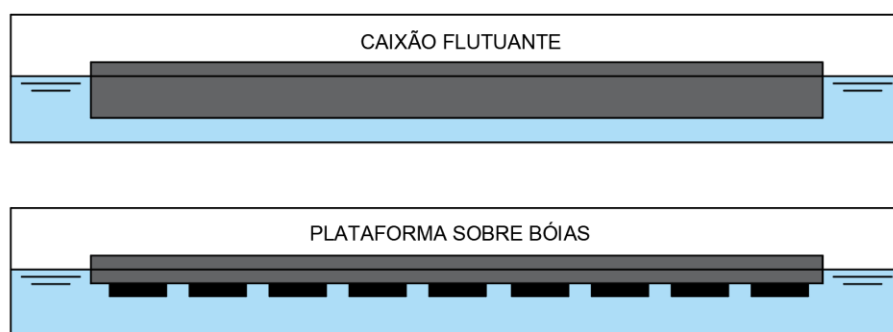


Figura 2-14- Tipos de componentes flutuantes.

Fonte: Adaptado de Tsinker (2004).

2.7.2. COMPONENTES DE ACESSO

Os componentes de acesso podem ser compostos por rampas fixas ou ponte móvel. Nos casos em que a área portuária tenha um nível d'água constante ou baixa variação dele, pode-se utilizar as rampas fixas para acesso aos componentes flutuantes. Essas rampas podem ser feitas de madeira, concreto ou aço e embora tenham um menor custo de construção face às rampas móveis equivalentes, os custos de manutenção podem ser mais elevados em casos que haja desgaste ou avaria entre a rampa e o componente flutuante, uma vez que não haja um grau de liberdade para a estrutura se adaptar ao nível do rio, o que pode gerar esforços adicionais ou fadigas na estrutura das rampas fixas (Tsinker, 2004).

Já nos casos em que a área portuária sofra com variações significativas no nível da água, recomenda-se a utilização das pontes móveis, o que permite uma ligação pivotante entre a margem e o componente flutuante, adequando-se ao regime do nível d'água local, sendo o aço o material mais adequado na sua construção. A Figura 2-15 mostra os principais tipos de componentes de acesso.

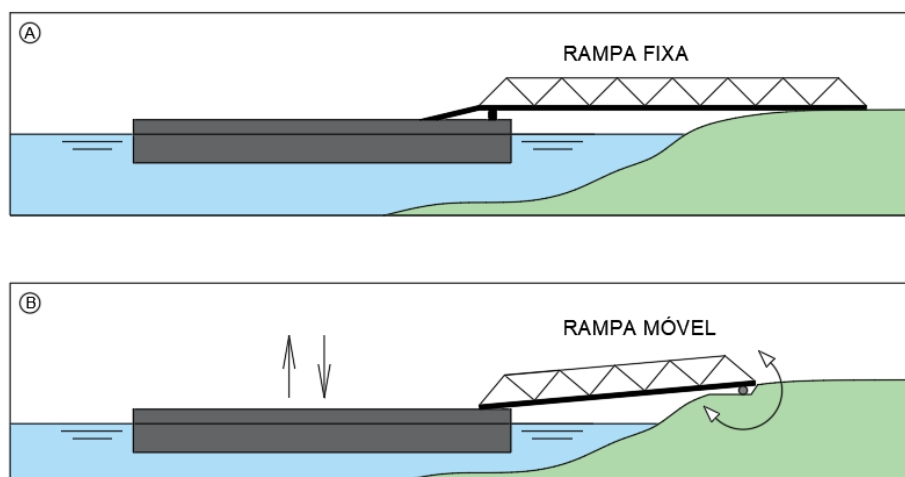


Figura 2-15- Tipos de componentes de acesso: Rampa fixa (A) e Rampa móvel (B).

Fonte: Adaptado de Tsinker (2004).

2.7.3. SISTEMA DE FUNDEIO

Um sistema de fundeio refere-se a um conjunto de componentes e equipamentos utilizados para ancorar ou fundear uma embarcação ou uma estrutura flutuante. Sendo assim, o sistema tem por objetivo principal manter a embarcação ou estrutura flutuante em uma desejada posição, seja para evitar que ela derive devido às correntes ou ventos, ou para mantê-la estável durante a sua utilização e operação (Tsinker, 2004).

Esse componente é mais bem explorado na seção 2.8, em que são detalhados os seus elementos e algumas configurações de arranjos para sua utilização.

2.8. ELEMENTOS DO SISTEMA DE FUNDEIO

Nesta seção, apresentam-se os componentes de um sistema de fundeio generalista, assim como as suas características e utilizações. Os componentes que formam o sistema de fundeio são: Estruturas flutuantes; Amarras, Elos de conexão, Cabos, Componentes de ligação ou conexão, Âncoras e Tipos de solos. Esses componentes são mais detalhados nas seções a seguir.

2.8.1. ESTRUTURAS FLUTUANTES

As estruturas flutuantes como: boias, plataformas, píeres flutuantes, entre outros, têm como função permitir conectar o cabo do fundeio ao solo, realizando a conexão do sistema de fundeio à estrutura flutuante. As estruturas flutuantes, que realizam a ligação da embarcação no

fundeio, devem ser dimensionadas para suportar os mesmos esforços que os dos demais componentes, uma vez que elas transmitem os esforços entre eles (Fleet Moorings, 1985). Um exemplo desse tipo de componente é apresentado na Figura 2-16 a seguir.

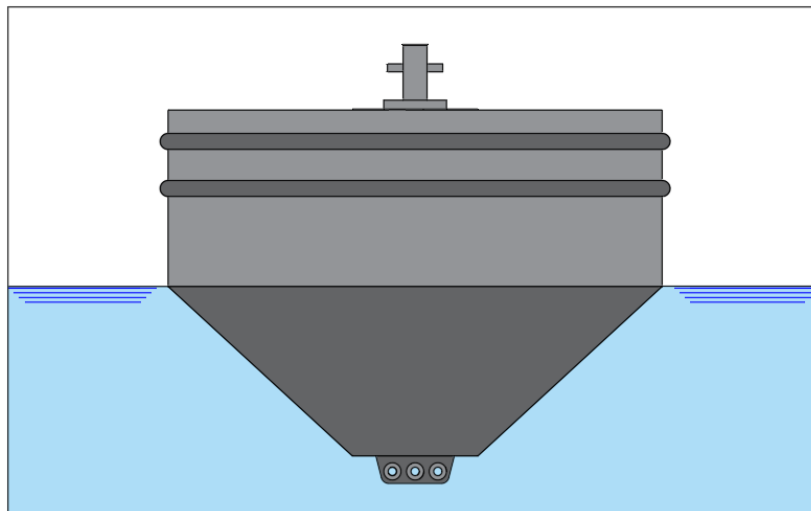


Figura 2-16- Exemplo de boias utilizadas em um sistema de fundeio.

Fonte: Autoria própria.

2.8.2. AMARRAS

As amarras, são uma composição de elos interligados, conhecidos popularmente como correntes, que desempenham um papel fundamental na segurança e em operações náuticas, tendo como objetivo prender e estabilizar embarcações, ou qualquer outra estrutura flutuante em relação a pontos fixos, como cais, boias ou outras embarcações. Também são responsáveis por garantir a segurança durante períodos de ancoragem, atracação ou operações portuárias, prevenindo movimentos indesejados causados pelo efeito de correntes, ventos e ondas (Fleet Moorings, 1985).

Existem dois tipos de elos que são os mais comuns para formar as amarras, com e sem malhetes. A diferença entre eles pode ser vista na Figura 2-17 e consiste na parte adicional de aço intermediária no elo. O uso dos malhetes dá a amarra uma proteção maior em relação ao risco de emaranhar, porém, haverá uma zona de atrito maior, o que ocasionará uma redução da vida útil da amarra. Para a utilização de um tipo ou outro, deve ser verificada se há a necessidade ou não do malhete para o projeto a ser executado.

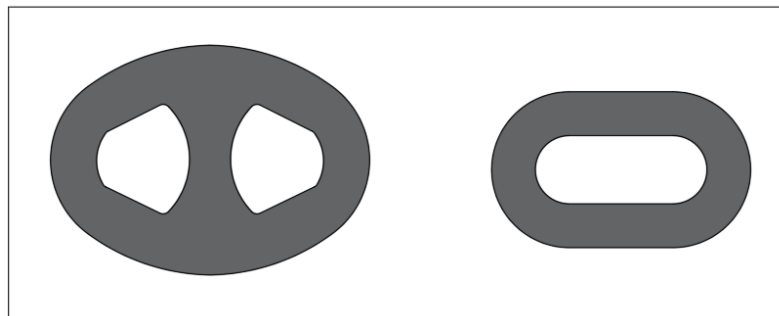


Figura 2-17- A esquerda, um elo de amarra com malhete e a direita um sem malhete.

Fonte: Autoria própria.

2.8.3. ELOS DE CONEXÃO DAS AMARRAS

Os elos de conexão são os responsáveis por permitir a ligação dos trechos ou pernas das amarras entre si, assim como em outros componentes do sistema de fundeio. Nas seções 2.8.3.1 e 2.8.3.2 são apresentados os dois tipos mais usuais de elos de conexão utilizados atualmente.

2.8.3.1. Elo alongado

O elo alongado tem como função permitir uma conexão entre o último elo da amarra com as manilhas e destorcedores. Utiliza-se isso porque o espaço interno dos elos da amarra não permite a conexão adequada de componentes, devido ao diâmetro dos pinos de fixação do destorcedor e da manilha, para suportarem a mesma carga nominal entre a amarra e o último elo. A Figura 2-18 a seguir, apresenta um exemplo de um elo alongado.

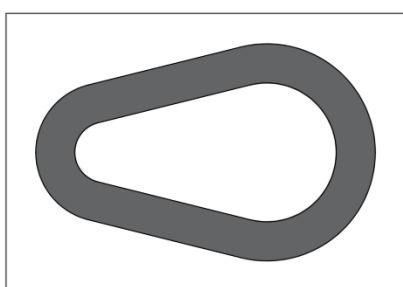


Figura 2-18- Exemplo de um elo alongado.

Fonte: Autoria própria.

2.8.3.2. Elo Kenter

O elo *Kenter* ou elo desmontável, pode ser visto na Figura 2-19. Esse elo tem como função, permitir o acoplamento e desacoplamento entre duas pernas de amarra. Com isso, essas duas pernas de amarras passam a funcionar como uma única perna de comprimento maior.

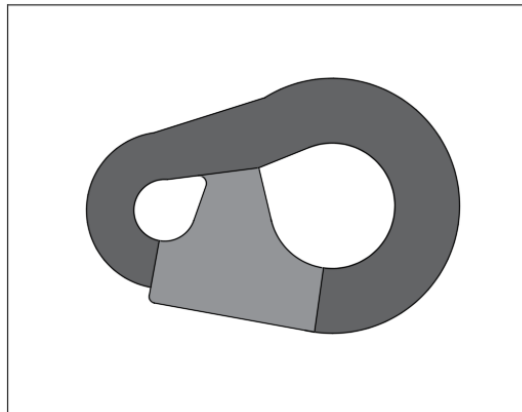


Figura 2-19- Exemplo de um elo *Kenter*.

Fonte: Autoria própria.

2.8.4. CABOS

Os cabos têm a mesma função das amarras, porém possuem um peso e um custo de aquisição significativamente menor em relação aos elos das amarras para uma mesma capacidade de carga, tornando-os uma opção mais viável quanto mais extensões são necessários. Apesar de serem mais flexíveis, apresentam resistência ao atrito lateral muito inferior aos elos de aço das amarras, por isso são usados em conjunto com as amarras, porém, ficando sempre no trecho suspenso, evitando o contato com o leito e com a poita (Fleet Moorings, 1985).

Esses cabos podem ser de aço ou de materiais poliméricos como nylon, sendo determinado o material a ser utilizado em função de cada utilização. Nos cabos de aço, em suas duas extremidades são instalados os soquetes pelo fabricante, permitindo os cabos serem acoplados aos demais componentes do sistema de fundeio.

Os cabos de nylon, apesar de serem mais leves, sofrem deterioração quando expostos a raios ultravioleta, que são irradiados pelo sol e em contato com organismos vivos, logo, são utilizadas em trechos com mais de 300m abaixo do nível d'água, onde a luz do sol já não está mais presente. Já nas suas extremidades, são trançados laços que permitem a sua conexão com os demais componentes do sistema de fundeio.

2.8.5. COMPONENTES DE LIGAÇÃO OU CONEXÃO

Nesta seção, apresentam-se os componentes de ligação ou conexão que permitem a conexão dos demais componentes do fundeio entre si.

2.8.5.1. Manilhas

As manilhas para fundeio são peças utilizadas para fazer a ligação entre os componentes de fundeio, isto é, servem para acoplar as poitas, boias, anel de ligação e ancoras nas amarras ou cabos etc. Sua geometria é definida de acordo com o tipo de componente de acoplamento (Fleet Moorings, 1985). A Figura 2-20 apresenta um exemplo de manilha e sua utilização.

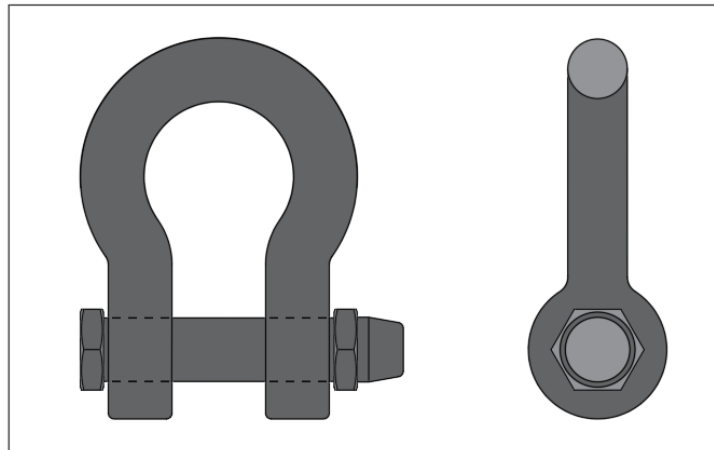


Figura 2-20- Exemplo de uma manilha à esquerda.

Fonte: Autoria própria.

2.8.5.2. Destorcedores

Os destorcedores são componentes do sistema de ancoragem, que consistem na união de duas peças pivotantes entre si, ao longo de um eixo. Essas peças têm como função realizar a ligação de trechos de amarras, permitindo um giro livre entre as pernas, aliviando a torção nas pernas das amarras. Na Figura 2-21 tem-se um exemplo desse tipo de componente de ligação.

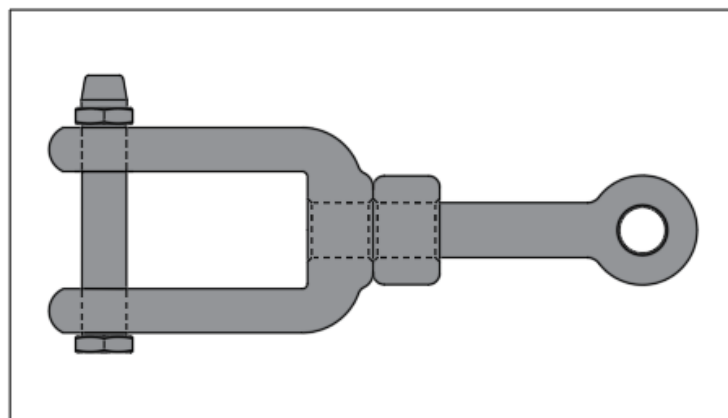


Figura 2-21- Exemplo de um Destorcedor.

Fonte: Autoria própria.

2.8.5.3. *Anel de ligação*

O anel de ligação tem como função permitir o acoplamento de outras pernas de amarras em uma linha para uma conexão única, permitindo assim, que esse ponto de ligação possa receber cargas de diferentes direções, conforme está apresentado na Figura 2-22.

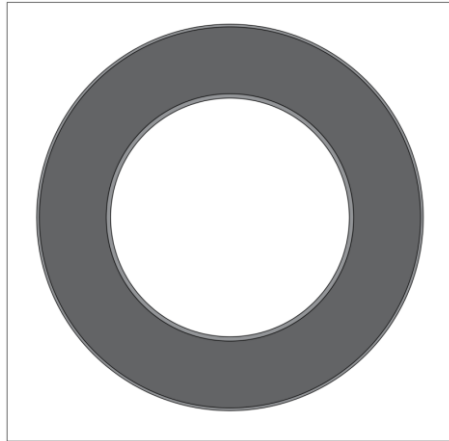


Figura 2-22- Exemplo de um anel de ligação.

Fonte: Autoria própria.

2.8.6. ÂNCORAS

Segundo o Fleet Mooring (1985), as âncoras têm como função principal realizar a fixação da embarcação ao leito do rio, evitando a deriva da embarcação. Alguns tipos de âncoras podem ser utilizados para a ancoragem de estruturas flutuantes, porém, os dois tipos mais convencionais de âncoras para águas fluviais são as âncoras de arrasto (*drag embedment*) e a ancoragem por poita (*dead weight anchor*). Suas respectivas características podem ser observadas nas seções 2.8.6.1 e 2.8.6.2

2.8.6.1. *Âncora de Arrasto*

Ancoragens por arraste, ou ancoragem por cravamento, é o tipo convencionalmente usado por navios e, por isso, são amplamente utilizadas em ancoradouros de Marinha. Esta ancoragem transfere a carga da linha de ancoragem para suas patas, braços ou orelhas, que possuem amplas superfícies de contato, com o intuito de mobilizar a resistência do solo para a sua fixação. Um exemplo de uma âncora de arrasto pode ser visto na Figura 2-23 abaixo.

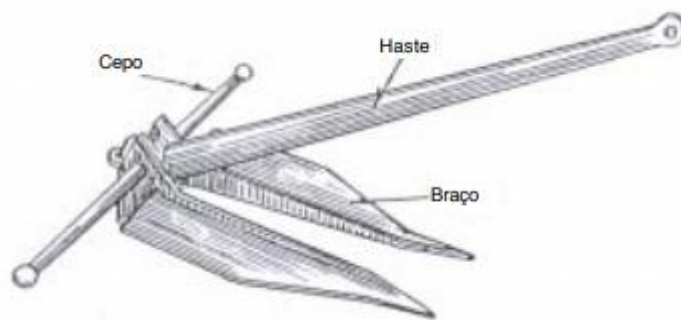


Figura 2-23- Exemplo de âncora de arrasto.

Fonte: Fonseca (2002)

O desempenho dessas ancoragens é sensível ao tipo de solo do leito em que se encontram e são projetadas para resistir a cargas horizontais, sendo crucial manter um ângulo próximo de zero entre a haste da âncora e o leito do rio para assegurar uma carga horizontal eficaz. O escopo adequado na linha de ancoragem é essencial para manter esse ângulo próximo de zero, devido ao peso próprio da própria amarra e da haste da âncora e, quando esse peso não for suficiente para as solicitações atuantes na amarra, faz-se necessário a utilização de poitas.

As ancoragens por arraste e cravamento podem sofrer um deslocamento ou arraste significativo, antes de atingir a máxima capacidade de retenção, sendo esse arraste dependente do tipo de âncora e características do leito do mar ou rio. Por fim, o ângulo da pá da âncora é o fator que afeta sua capacidade de penetração no leito abaixo, devendo variar conforme o tipo de solo.

2.8.6.2. Ancoragem de peso morto (poitas)

As ancoragens por peso morto, também conhecidas como âncoras fixas, *dead weight anchor* ou poitas, utilizam seu próprio peso para resistir a cargas laterais e de elevação. Elas variam de blocos simples de concreto, a estruturas mais complexas de concreto armado ou outros materiais e requerem equipamentos pesados para a sua instalação. As poitas são projetadas para suportar cargas laterais, de elevação e momentos de tombamento. Essas ancoragens mobilizam a resistência do solo pelo seu peso próprio, isto é, a capacidade lateral está diretamente relacionada ao peso da ancoragem e às forças de desprendimento.

O dimensionamento correto do peso da poita é tão importante quando o seu posicionamento no leito de repouso, para que possa absorver a energia do sistema de fundeio, para que tenha um funcionamento adequado ou em casos de solicitações menores, ela é a própria âncora. Contudo, um dimensionamento errado do peso, ou da posição da poita, pode ter

o efeito contrário no sistema de fundeio, podendo ocasionar uma diminuição da energia absorvida, levando a uma carga não desejada para a âncora, o que pode levar a uma perda de posicionamento do fundeio. Já para casos em que a poita serve como a ancora, uma vez dimensionada de forma errada, também pode levar à perda da posição do fundeio.

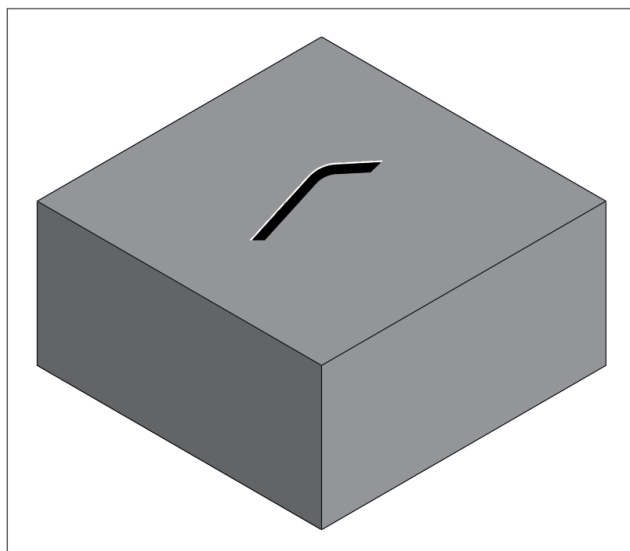


Figura 2-24- Exemplo de uma âncora de peso morto ou poita.

Fonte: Autoria própria.

2.8.7. TIPOS DE SOLOS

Segundo Thompson (2012), o tipo do solo no leito do local onde se espera realizar a ancoragem é crucial para a escolha da âncora. A escolha da âncora adequada depende das propriedades do solo no fundo do mar ou rio, por isso, apresenta-se a descrição dos tipos de solos e as âncoras mais apropriadas para cada tipo, a fim de garantir a maior segurança e estabilidade à embarcação. Ainda a partir de Thompson (2012), apresentam-se os tipos de solos mais comuns nas seções a seguir.

2.8.7.1. Argila mole e lama

Solos caracterizados por baixa coesão e resistência, esses solos são comuns em áreas costeiras. Âncoras de peso morto, e de arrasto são eficazes, pois conseguem a resistência necessária para uma fixação firme.

2.8.7.2. Camada de argila mole sobre camada dura

Esta condição de solo envolve uma camada mole sobre uma camada de solo mais resistente. Âncoras de peso morto são recomendadas, pois podem penetrar a camada mole e se

fixar na camada dura. Âncoras de arrasto também são viáveis, enquanto âncoras de embutimento direto podem não ser tão eficazes devido à variação de resistência.

2.8.7.3. Argila Rígida

Solo com maior resistência e coesão, solos de argila rígida acomodam todos os tipos de âncoras como peso morto e arrasto e a sua capacidade de se ancorar firmemente deve-se à estabilidade proporcionada pelo solo.

2.8.7.4. Areia

Solos arenosos possuem resistência variável, pois dependem do nível de compactação em que se encontram, e permitem o uso de âncoras de peso morto e arrasto, todas capazes de se estabilizar nesse tipo de solo.

2.8.7.5. Pedregulhos

É um tipo de solo desafiador devido às grandes pedras. Esses solos são ideais para âncoras de peso morto e arrasto.

2.8.7.6. Rocha macia ou coral

Solo que proporciona boa resistência, sendo adequados para âncoras de peso morto e arrasto, que conseguem se fixar fortemente.

2.8.7.7. Rocha monolítica dura

Um dos solos mais resistentes, adequado para âncoras de peso morto e estaca, oferecendo uma fixação robusta. As âncoras de arrasto também são utilizáveis nesse tipo de solo.

A Tabela 2-1 mostra um resumo dos diferentes tipos de âncoras empregadas em cada um dos tipos de solos, classificando a interação entre cada um dos seus respectivos tipos.

Tabela 2-1 – Resumo das aplicações por tipo de âncoras em diferentes tipos de solos.

Tipo de solos	Peso Morto	Estaca	Embutimento Direto	Arrasto
Argila mole, lama	++	+	++	++
Camada de argila mole (0-20 pés de espessura), sobre camada dura	++	++	o	+
Argila rígida	++	++	++	++
Areia	++	++	++	++
Till glacial duro	++	++	++	+
Pedregulhos	++	o	o	o
Rocha mole ou coral	++	++	++	o
Rocha monolítica dura	++	+	+	o
LEGENDA: ++ = boa funcionalidade; + = normalmente não é a escolha mais adequada; o = não possui boa funcionalidade				

Fonte: Adaptado de Thompson (2012).

2.9. CONFIGURAÇÕES DE SISTEMAS DE FUNDEIO

De acordo com Thompson (2012), os sistemas de fundeio possuem diferentes configurações de utilização, são elas: (1) Ancoragem de ponto único; (2) Ancoragem pela Proa e pela Popa; e (3) Ancoragem *Spread mooring*. Nas seções 2.9.1, 2.9.2 e 2.9.3 detalham-se cada uma dessas configurações de sistemas de fundeio.

2.9.1. ANCORAGEM DE PONTO ÚNICO (SINGLE POINT)

Essa configuração é a mais simples, utilizando apenas uma âncora para manter a embarcação no lugar. A capacidade de posicionamento é limitada, pois o barco pode oscilar livremente em torno do ponto de ancoragem, conforme mudam a direção do vento ou a corrente. Isso permite que a embarcação se alinhe naturalmente com a combinação de vento e corrente, o que pode ser benéfico em condições de mau tempo ou em situações de ancoragem temporária. No entanto, essa liberdade de movimento resulta em grandes deslocamentos, pois o barco pode se mover consideravelmente de sua posição original.

2.9.2. ANCORAGEM PELA PROA E PELA POPA (DOIS PONTOS)

Essa configuração utiliza duas âncoras, uma posicionada na proa e outra na popa, para restringir o movimento da embarcação. Embora ofereça maior controle sobre a rotação do navio em comparação com a ancoragem livre, ainda permite grandes deslocamentos se as forças não estiverem perfeitamente alinhadas com o eixo central do navio. Embora não seja a ideal para

posicionamento preciso, é adequada para ancoragem temporária, onde o espaço na água é limitado.

2.9.3. *ANCORAGEM SPREAD MOORING*

A ancoragem dispersa utiliza múltiplas âncoras para garantir uma excelente capacidade de posicionamento, independentemente da direção das forças atuantes. Esse arranjo é particularmente vantajoso em situações em que as direções do vento e da corrente podem variar, sendo essencial manter a precisão no posicionamento. A distribuição das âncoras ajuda a estabilizar a embarcação e a manter sua posição, mesmo em condições adversas.

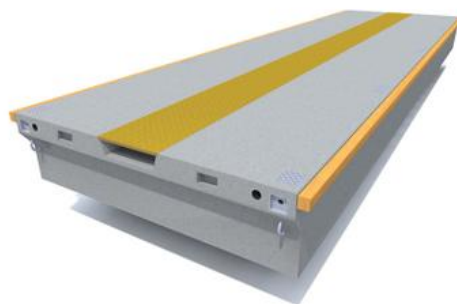
2.10. PROJETOS DE PÍER DE CONCRETO FLUTUANTES JÁ EXISTENTES

Nesta seção, são apresentados projetos já existentes de empresas que fabricam píeres flutuantes de concreto armado, de empresas estrangeiras e de empresas nacionais, assim como algumas de suas características quando disponíveis.

2.10.1. *MARINETEK*

A Marinetek é uma empresa finlandesa com uma presença global em mais de 45 países, conhecida por oferecer soluções de alta qualidade e avançadas para marinas e estruturas flutuantes. A empresa possui uma ampla gama de produtos e serviços e atende a demandas variadas do setor marítimo, desde a concepção até a implementação e manutenção das marinas. Seu portfólio abrangente inclui pontões de concreto, quebra-mares e uma variedade de equipamentos marítimos essenciais sob medida, que atendam às expectativas e requisitos necessários.

A empresa oferta no mercado mundial píeres flutuantes de concreto para diversas aplicações, como atracagem de barcos de pequeno porte até *Super Yachts*, com conceitos similares ao proposto no presente estudo. Alguns dos modelos oferecidos pela empresa são vistos a seguir na Figura 2-25. Observa-se que existem modelos de diversos tamanhos, larguras e capacidades de carga, podendo variar de 4,7 a 10,4 kN/m² para diversos tipos de aplicação e operação.



COMMERCIAL PONTOONS	M4312CM	M4316CM	M4320CM	M5312CM	M5316CM	M5320CM
Length (m)	12.20	16.05	19.90	12.20	16.05	19.90
Concrete width (m)	4.0	4.0	4.0	5.0	5.0	5.0
Height (m)	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
Weight (t)	35.5	47.0	58.5	44.0	58.5	73.0
Net capacity (kN/m ²)	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4
Freeboard (m)	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04
Strength of joint (kN)	2×812	2×812	2×812	2×812	2×812	2×812
Joint gap (mm)	90	90	90	90	90	90

Figura 2-25- Exemplo de píer de concreto armado da Marinetek e suas propriedades.

Fonte: Marinetek (2024).

2.10.2. PÍER BRASIL

A Píer Brasil é uma empresa brasileira, localizada na cidade de São Paulo, cujos produtos ofertados no mercado nacional são os flutuantes pré-moldados de concreto/EPS. A empresa fabrica píeres, cais, trapiche, pontão, embarcadouro, plataforma flutuante, marina, iate clubes, passarelas flutuantes e atualmente conta com mais de 7.500 m² de flutuantes instalados, sendo alguns deles capazes de suportar até 3,5 kN/m², porém os modelos disponíveis possuem larguras que variam de 2,4 a 3,0 m, o que não é adequado para movimentação de maquinários de obras civis em geral.

Suas peças pré-fabricadas têm incorporadas a tecnologia de fibras plásticas protendidas, para garantir a alta durabilidade dos flutuantes, as quais são pré-fabricadas e enviadas para instalação em todo o território brasileiro. Alguns dos modelos oferecidos pela empresa são vistos na Figura 2-26.



Figura 2-26-Exemplos de píeres da empresa Píer Brasil.

Fonte: Píer Brasil (2024).

2.10.3. PÍERGLASS DO BRASIL

A Pierglass do Brasil é uma empresa especializada no desenvolvimento de projetos personalizados, fabricação e execução de produtos feitos de fibra de vidro, madeira, metal e concreto armado, para píer ancoradouros e marinas, sejam eles flutuantes ou fixos. Alguns dos projetos da empresa são vistos a seguir na Figura 2-27.



Figura 2-27-Exemplos de píeres da empresa Píerglass do Brasil.

Fonte: Píerglass do Brasil (2024).

2.11. NORMAS E REFERÊNCIAS PARA DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS DE ATRACAÇÃO DE EMBARCAÇÕES

Atualmente, há algumas normas portuárias para o cálculo do dimensionamento de sistemas de fundeio. A principal norma brasileira nessa área é a NBR 19782:2024 (Norma Brasileira Regulamentadora), publicada pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Essa norma define os procedimentos e requisitos para o projeto de estruturas portuárias marítimas, fluviais e lacustres, incluindo as estruturas de atracação e amarração no Brasil. Contudo, é importante ressaltar que a NBR 19782:2024 não possui em seu escopo as metodologias para o dimensionamento de sistemas de fundeio, porém apresenta uma

metodologia para calcular os esforços de atracação de embarcações. Esses esforços então são empregados em metodologias a parte para se dimensionar os componentes do sistema de ancoragem para a embarcação analisada.

A ROM 2.0-11 (*Recomendações para Obras Marítimas*) de 2012, é uma recomendação ou um conjunto de diretrizes técnicas utilizadas para a concepção, construção e manutenção de estruturas marítimas, desenvolvida na Espanha pelo Centro de Estudos e Experimentação de Obras Públicas (CEDEX). A ROM possui uma aplicação prática em projetos de engenharia costeira e portuária, abrangendo uma variedade de tópicos, e principalmente para o estudo. Ela inclui a análise de esforços em estruturas fundeadas, como píers, oferecendo metodologias para o cálculo de esforços atuantes.

Um manual técnico para o dimensionamento de sistemas de ancoragem amplamente utilizado é o DDS 582-1 (*Design Data sheet 582-1*), *Calculations For Mooring Systems* (1987) do Departamento da Marinha Americana, atrelado aos Fuzileiros Navais, cuja distinção é a utilização de ábacos para estimar com maior precisão os coeficientes de arrasto e outros fatores de contribuição, sem estar limitado a duas opções de valores, como no caso da ROM 2.0-11 (2012).

Outro manual técnico, que vale ser ressaltado, é o *Fleet Mooring* (1985) da Marinha Americana, que mostra as diretrizes para o projeto e seleção de sistemas de fundeio em portos protegidos, abordando os tipos de sistema de fundeio, componentes do sistema de fundeio e procedimentos para determinação de forças estáticas atuantes sobre os navios.

2.12. MODELAGEM CFD

A modelagem computacional de fluidos (CFD - *Computational Fluid Dynamics*) é uma área da dinâmica dos fluidos, que utiliza métodos computacionais para resolver e analisar problemas que envolvem o comportamento e dispersão de líquidos e gases em um meio. Essa ferramenta é aplicada em diversas áreas da engenharia, como a aeronáutica, automotiva, civil, naval, entre outras. A modelagem CFD permite simular condições reais de operação, possibilitando otimizar projetos, muitas das vezes, eliminando a necessidade de construir protótipos ou ensaios em escala. Além disso, por meio dessa ferramenta é possível entender melhor fenômenos complexos como a turbulência, transferência de calor e massa, e escoamentos multifásicos (Menter, 2021).

2.12.1. MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático é o que descreve o comportamento ou gradiente dos fluidos, através das equações de *Navier-Stokes*, que são associadas à equação de conservação de massa, que formam um conjunto de equações diferenciais parciais não lineares de segunda ordem, conforme a Equação (2-1).

Contudo, esse sistema apresenta limitações em sua empregabilidade, podendo ser usado apenas para modelos simplificados, em que a resolução de problema se baseia em um escoamento laminar, em um regime permanente, entre placas paralelas (Munson, 2004).

$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right) = -\nabla p + \rho g + \mu \nabla^2 V \quad (2-1)$$

$$\nabla V = 0 \quad (2-2)$$

Com a expansão do termo convectivo, na forma não conservativa, a equação de quantidade de movimento pode ser dada da seguinte forma, apresentada pela Equação (2-3):

$$\frac{\partial \mu_0}{\partial t} + \mu_0 \cdot \nabla \mu_0 = -\nabla \left(\frac{p}{\rho} \right) + \nu \nabla \cdot \nabla \mu_0 \quad (2-3)$$

Em que: $\frac{\partial \mu_0}{\partial t}$ são os termos de variação temporal de μ_0 ; $\mu_0 \cdot \nabla \mu_0$ são os termos convectivos; $-\nabla \left(\frac{p}{\rho} \right)$ são os termos de gradiente de pressão dividido pela densidade; e $\nu \nabla \cdot \nabla \mu_0$ são os termos de difusão viscosa, onde ν é a viscosidade cinemática.

Apesar do CFD ser uma ferramenta importante para otimizar e melhorar projetos, a modelagem de turbulências é uma das principais fontes de incerteza nas simulações de CFD em geral. Isso se deve ao fato de o fenômeno de turbulência ser o fenômeno mais complexo na física clássica, uma vez que esses fluxos turbulentos representam um problema de múltiplas escalas, em que a dimensão do objeto a ser analisado é frequentemente da ordem de dezenas ou centenas de metros, como no caso de aviões e navios, enquanto os menores vórtices de turbulência são da ordem de décimos de milímetros para fluxos, em que o número de Reynolds é mais elevado. Com isso, a Simulação Numérica Direta (DNS) da turbulência está restrita a domínios de fluxo muito pequenos e números de Reynolds mais baixos. E mesmo com o emprego da redução de escalas por meio da Simulação de Grandes Vórtices (LES), não é

possível obter respostas satisfatórias, especialmente em casos em que as camadas de limite da parede são importantes.

Uma solução prática para este dilema é oferecida por meio do conceito das equações de *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS), que ao invés de resolver as seções turbulentas no tempo e espaço e depois fazer a média da solução, para obter as quantidades médias desejadas do fluxo dos fluidos, primeiramente calcula a média das equações e as resolve diretamente para as variáveis médias no tempo, isto é, a média do conjunto. Apesar desse processo deixar o modelo muito mais econômico em termos de processamento de cálculo, apresenta um efeito colateral grave, uma vez que esse processo elimina a física relacionada à turbulência das equações, criando assim a demanda por modelos de turbulência.

Os modelos de turbulência são modelos necessários para reintegrar essas informações perdidas, permitindo simulações fisicamente corretas, uma vez que passem a considerar novamente os efeitos de turbulência em seus cálculos. Existem diversos tipos de modelos de turbulência RANS, cada um mais refinado para cada tipo de aplicação, uma vez que esses modelos têm a tarefa de abranger muitas ordens de magnitude, envolvendo as componentes do sistema modelado (Menter, 2021).

2.12.2. MÉTODOS NUMÉRICOS

Os métodos numéricos são ferramentas computacionais essenciais para a resolução de problemas matemáticos de alta complexidade, que muitas das vezes estão relacionados ao escoamento de fluidos e que por sua vez, não podem ser resolvidos de forma analítica. Esses métodos aplicam algoritmos e operações aritméticas para obter soluções aproximadas de equações e sistemas intrincados, sendo amplamente utilizados em estudos científicos e aplicações de engenharia para simulações, otimizações e análises de dados. Em particular, a mecânica dos fluidos computacional (CFD) é uma área que se beneficia enormemente dessas técnicas, permitindo a simulação numérica dos escoamentos.

Dada a complexidade das equações de *Navier-Stokes*, que descrevem o movimento dos fluidos newtonianos, as soluções analíticas são raras e com o avanço dos computadores de alta velocidade, torna-se possível obter soluções numéricas aproximadas dessas equações, facilitando a simulação de escoamentos por meio computacionais. Os três principais métodos utilizados para a solução numérica das equações de escoamento são: o método das diferenças finitas, o método dos elementos finitos e volumes finitos, e o método dos elementos de contorno. Essas técnicas transformam os campos de escoamento contínuos em conjuntos de

valores discretos, permitindo que as equações diferenciais sejam substituídas por sistemas de equações algébricas, podendo assim, serem resolvidas por computadores (Munson, 2016).

2.12.2.1. Método das diferenças finitas

O método das diferenças finitas é frequentemente utilizado devido à sua simplicidade e eficácia (Munson, 2016). Neste método, o campo de escoamento é substituído por uma malha de pontos, em que as funções contínuas de velocidade e pressão etc., são aproximadas pelos valores dessas funções em cada ponto da malha. Com isso, faz-se a derivada dessas funções, que são aproximadas pelas diferenças entre os valores do ponto analisado e dos pontos vizinhos, divididas pela distância entre eles. Essa técnica permite transformar equações diferenciais complexas em sistemas de equações algébricas mais simples, tornando possível a resolução numérica do problema. Quanto maior for o número de pontos, maior o conjunto de equações a ser resolvido (Munson, 2016).

2.12.2.2. Método dos elementos ou volumes finitos

Já o método dos elementos ou volumes finitos, por outro lado, é um método mais sofisticado e mais aplicado em casos em que há a necessidade de estudar escoamentos complexos. Neste método, o campo de escoamento é dividido em pequenos elementos fluidos, como triângulos em casos de escoamentos bidimensionais ou em volumes nos casos de escoamentos tridimensionais. As equações de conservação, como as de massa, quantidade de movimento e energia, são escritas para cada elemento e o conjunto de equações resultantes é resolvido numericamente para determinar o campo de escoamento discretizado.

Esse método é especialmente útil em casos em que há geometrias e condições de escoamento mais complexas. A dimensão, quantidade de pontos e a configuração dos elementos são determinados, em parte, pela geometria e pelas condições do escoamento aplicadas. Como um ponto de atenção, é possível observar que o número de equações algébricas simultâneas a serem resolvidas aumenta significativamente com o incremento do número de elementos utilizados para a simulação do escoamento. E como é necessário empregar uma quantidade substancial de elementos finitos na análise de escoamentos complexos, o custo computacional para o seu emprego também é elevado (Munson, 2016).

2.12.2.3. Método dos elementos de contorno

O método dos elementos de contorno foca apenas na fronteira do campo de escoamento, a qual é substituída por um conjunto de segmentos discretos, em que são distribuídas singularidades apropriadas nos elementos de fronteira. A intensidade e o tipo de singularidades

são determinados para que condições de contorno adequadas sejam obtidas nos elementos de fronteira. Já o escoamento nos pontos internos do campo é calculado pela soma das contribuições das diversas singularidades localizadas na fronteira. Este método é eficiente em termos de tempo de execução, e embora seja sofisticado em sua implementação, ele apresenta um tempo de execução menor face aos programas que utilizam métodos de elementos finitos, o que pode ser vantajoso em algumas aplicações (Munson, 2016).

2.13. SOFTWARES DE MODELAGEM CFD

Nesta seção, são apresentados alguns dos softwares disponíveis para análises CFD para aplicações multifásicas, isto é, quando há mais de um fluido presente atuando na estrutura. Para isso, foram utilizados os manuais de cada software e assistidos diversos vídeos de aplicação e utilização das opções apresentadas, visando assim estabelecer características e a forma de manuseio de cada uma das opções. As constatações realizadas permitem realizar a escolha do programa a ser utilizado neste estudo.

2.13.1. SOLID WORKS FLOW SIMULATION

O *Flow Simulation* (Dassault, 2010) é uma ferramenta de análise CFD integrada ao software de design 3D Solidworks, pertencente a empresa *SolidWorks*. Segundo o seu manual de utilização, o programa possui em sua biblioteca opções de modelos numéricos para a realização de análises de dinâmica dos fluidos e gerenciamento térmico, apresentando como vantagens de sua utilização: capacidade de realizar simulações de fluxos de fluidos dentro do ambiente de design 3D do *Solidworks*, o que facilita a criação e modificação da geometria da estrutura a ser analisada; oferece ferramentas para calcular a transferência de calor por condução, convecção e radiação; permite a parametrização de dados, para a realização de análises com diferentes variáveis e condições aplicadas; possui um banco de dados extenso de materiais e fluidos, o que facilita o seu processo de modelagem.

Para as desvantagens em relação ao seu emprego, tem-se que: pode ser menos eficiente para simulações extremamente complexas (malhas muito detalhadas), exigindo recursos computacionais significativos e em alguns casos, a precisão das simulações pode ser mais limitada em comparação com softwares mais avançados e especializados para modelagem CFD.

2.13.2. ANSYS FLUENT

O *Ansys Fluent* (Ansys, 2018) é uma ferramenta de análise CFD integrada ao software *Ansys*, que pertencente a empresa *Ansys*, a qual é representada no Brasil pela empresa ESSS. De acordo com a empresa desenvolvedora, o *Fluent* tem como seus pontos fortes as suas capacidades avançadas de modelagem mais complexas, oriunda de uma vasta gama de formulações matemáticas e numéricas disponíveis para utilização. Essa característica faz com que o software tenha uma representação mais fidedigna e precisa dos fenômenos físicos em uma variedade de aplicações como: aerodinâmica; hidrodinâmica; transferência de calor; combustão; escoamentos multifásicos; turbulência; reações químicas entre outras aplicações. A ferramenta oferece uma interface gráfica amigável e personalizável compatível com o sistema *Ansys Application Customization Toolkit* (ACT) e *Fluent User-Defined Functions* (UDFs), permitindo assim, uma utilização com compatibilidade entre modelos para simplificar sua utilização em diversas áreas de atuação das engenharias. Além dos fatores apresentados, outros pontos favoráveis à sua utilização são o fato de se ter uma licença estudantil (mesmo que limitada), possuir um suporte técnico oferecido pela empresa ou sua representante, assim como haver uma ampla comunidade de usuários que compartilham conhecimento, soluções e dificuldades encontradas durante a utilização da ferramenta.

No entanto, mesmo apresentando uma interface amigável, a complexidade das funcionalidades exige um tempo significativo de aprendizado por parte dos usuários. Além disso, a necessidade de recursos computacionais significativos para a sua utilização limita a sua ampla implementação, além da configuração ou modelagem das simulações de análises mais complexas poderem ser demoradas, devido ao nível de detalhamento incorporado à ferramenta.

2.13.3. SIMCENTER STAR CCM+ OU SIMCENTER SPH FLOW

Simcenter Star ccm+ (ou *Simcenter SPH Flow*) (Siemens, 2024), é um software pertencente a empresa Siemens, podendo ser utilizado para análises de dinâmica de fluidos computacional (CFD). O software utiliza o método de hidrodinâmica de partículas suavizadas (SPH), que foi desenvolvido para superar as limitações relacionadas a utilizações de malhas pelos métodos mais tradicionais, por meio do refinamento adaptativo das partículas. Contudo, apesar da não utilização das malhas, ele continua tendo como base as equações de Navier-Stokes para sua formulação.

Dessa forma, tem-se como vantagem não só a redução no tempo de processamentos das análises, mas também a capacidade de analisar geometrias mais complexas e a sua interação

com os fluidos em cenários multifásicos, oferecendo assim, uma análise mais refinada nas áreas de interesse por meio do refinamento adaptativo das partículas. Contudo, sua utilização pode ser limitada devido ao alto custo de aquisição; a necessidade de um *hardware* de alta capacidade para executar simulações mais complexas, fazendo o custo de utilização aumentar significativamente; e a complexidade e curva de aprendizado das suas funcionalidades, que podem exigir um tempo significativo de aprendizado para os usuários.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo, aborda-se a metodologia empregada para a realização deste estudo, detalhando as etapas e os procedimentos adotados para a realização do estudo, visando assim, alcançar os objetivos estabelecidos anteriormente. Para isso, deve ser empregada uma abordagem quantitativa no estudo, uma vez que, essa é mais adequada para compreender os cenários de esforços atuantes em um píer flutuante, do que quando abordado por meio de formulações empíricas, face à modelagem de fluido computacional. Essa abordagem também permite uma análise mais precisa e mensurável das diferentes forças atuantes que influenciam no comportamento da estrutura a ser analisada. Com isso, a partir dos métodos quantitativos, possibilita-se aplicar formulações e cálculos matemáticos, para determinar esses esforços em cada um dos cenários de solicitações propostos, garantindo assim uma comparação objetiva e detalhada entre os dois métodos (formulação empírica e método computacional). Além disso, essa abordagem facilita a utilização de softwares de simulação e modelagem, que são fundamentais para prever o comportamento de qualquer estrutura sob diferentes condições de esforços. Essa abordagem também permite uma avaliação dos dados coletados “*in loco*”, para validar se são confiáveis ou não, para serem empregados em um dimensionamento de um sistema de fundeio para o píer flutuante de concreto armado.

Para proporcionar uma visão clara e estruturada do processo metodológico adotado neste estudo, elabora-se um fluxograma detalhado. O fluxograma, apresentado na Figura 3-1, ilustra as etapas do método de pesquisa descrito acima, de forma sequencial, facilitando a compreensão do fluxo de trabalho do estudo e dos procedimentos envolvidos, garantindo que todas as fases da pesquisa sejam claramente delineadas e seguidas de maneira sistemática.

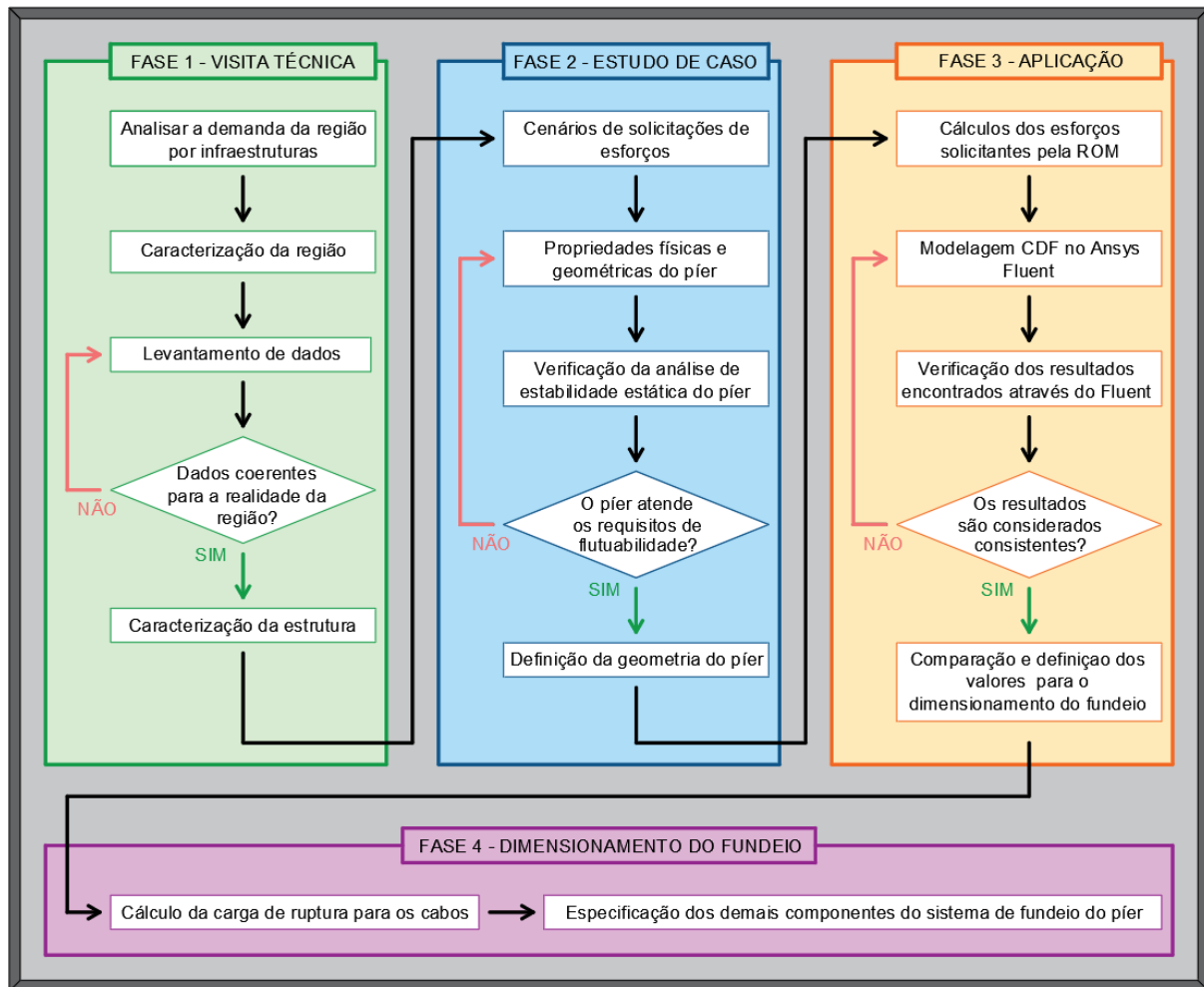


Figura 3-1- Fluxograma de trabalho do estudo.

Fonte: Elaboração própria.

3.1. VISITA TÉCNICA

Para o desenvolvimento do estudo, uma visita técnica foi realizada à região de implementação, onde se pôde levantar as demandas específicas para a implementação do projeto do píer flutuante. Esta análise considera fatores como o fluxo de carga, o tipo e volume de passageiros, e a necessidade de tratamento de dejetos. Essas visitas são essenciais para compreender as particularidades locais e adaptar as soluções às necessidades específicas da região, buscando não apenas alcançar os objetivos estabelecidos, mas também promover soluções sustentáveis, que contribuam com as comunidades locais e respeitem as legislações ambientais. Os principais tópicos que foram compreendidos e observados, durante a realização da visita técnica à cidade de Itacoatiara, são apresentados nas seções 3.1.1, 3.1.2 e 3.1.3.

3.1.1. ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO ITACOATIARA

Para a caracterização da região da cidade de Itacoatiara e por consequência, a de Ponta Catarro, a metodologia inclui os estudos geofísicos e geoclimáticos da região, fundamentais para entender as condições específicas do local. Esses estudos possibilitam a elaboração de um projeto, que tenha como base os dados de vento, correntes, nível de rio, variação de maré (caso se esteja perto da região de desagüe do rio) e o regime de águas (caso se tenha represas perto).

Sendo assim, também deve-se considerar o tipo de solo e leito do rio, a movimentação de sedimentos e a qualidade da água, levando em conta a concentração de matéria orgânica presente. Esses dados podem ser obtidos por meio de critérios normativos e/ou localmente fornecidos por empresas que operam na região, visando assim, uma obtenção de dados realista e fidedigna.

A partir dessas análises, pode-se considerar alternativas como a construção de estruturas flutuantes, que oferecem vantagens em termos de execução e redução de custos, além de minimizar o uso de maquinário pesado e a necessidade de licenças ambientais.

3.1.2. OBTENÇÃO DE DADOS TÉCNICOS DA REGIÃO DE ITACOATIARA

Para o levantamento de dados, uma visita às instalações da Hermasa Navegações LTDA foi realizada, empresa local do Grupo Amaggi, que figura como a maior operadora de embarcações fluviais da Região. Na empresa, coletaram-se os dados referentes às séries históricas dos ventos característicos da região, da corrente do rio, assim como a variação do nível d'água na região de Itacoatiara.

3.1.3. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA DO PÍER FLUTUANTE

Para a caracterização da estrutura do píer flutuante, foi realizada a identificação das necessidades da área escolhida para a implementação do projeto, incluindo a demanda por tipos de carga, fluxo de carga, o volume de passageiros e o tratamento de dejetos. Com base nessas observações e constatações, pode-se determinar a tipologia da estrutura a ser proposta, considerando opções de materiais empregados para a sua construção e a geometria da estrutura, para que essas demandas sejam atendidas.

3.2. CENÁRIOS DE COMBINAÇÕES DE ESFORÇOS

A análise de cenários de combinações de esforços que atuam em uma estrutura é essencial para garantir a sua segurança e seu correto funcionamento. Essas combinações envolvem diferentes tipos de cargas, sejam elas permanentes ou não, atuando de forma distinta sobre a

estrutura, gerando assim combinações de esforços que, para cada cenário de aplicação, resultarão em diferentes cenários de resultante de esforços.

A importância de considerar essas combinações está na capacidade de prever e mitigar possíveis falhas na estrutura ou em seu funcionamento. Ao modelar esses cenários, é possível dimensionar a estrutura para resistir a condições extremas de carregamento, garantindo assim que possam suportar as forças aplicadas sem comprometer a integridade da estrutura, garantindo um funcionamento seguro e eficiente.

A partir dessas considerações, devem ser criados cenários com base nos dados obtidos “*in loco*”, para determinar as forças atuantes sob o píer flutuante em diferentes condições de uso, para as resultantes do cenário mais desfavorável, que possam ser usadas no dimensionamento do sistema de fundeio do píer ou de qualquer outra embarcação.

3.3. PROPRIEDADES FÍSICAS DA ESTRUTURA DO PÍER FLUTUANTE

A partir da caracterização da estrutura, é possível ter uma área de utilização de convés, determinando assim duas das três medidas necessárias, uma vez que a estrutura do píer flutuante é um paralelepípedo. Realiza-se um pré-dimensionamento da estrutura para determinar uma espessura da laje da viga caixão, que compõe a estrutura do píer flutuante.

Isso permite o cálculo do peso próprio da estrutura e, consequentemente, do calado necessário para garantir uma flutuação e estabilidade segura para o píer flutuante, a partir de uma geometria retangular em um plano horizontal. Somando-se o calado necessário para a utilização do píer a borda livre estabelecida, que atenda a NORMAM 202 (Marinha, 2024) da Marinha do Brasil, é possível estabelecer o pontal do píer flutuante. Dessa forma, as dimensões principais do píer são estabelecidas, como comprimento, largura (boca), altura (pontal) e a altura da linha d'água em relação ao fundo da estrutura (calado).

O calado pode ser calculado de forma manual, por se tratar de uma estrutura com um volume linearmente proporcional ao longo de sua altura, mas em casos mais gerais e para a aplicação neste estudo, pode-se usar o software *MaxSurf Stability* (Bentley, 2018) para calcular o deslocamento do volume de água da estrutura, para que se possa determinar a altura mínima do píer acima do calado, para garantir a flutuabilidade e assim, determinar o pontal do píer flutuante.

3.4. VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE ESTÁTICA DO PÍER FLUTUANTE

Após a definição das dimensões do píer flutuante, deve ser verificada a estabilidade estática da estrutura do píer. Para isso, inclina-se de forma estática a embarcação entre 0° e 90° para calcular o maior valor do comprimento do segmento $\overline{GZ}$ (GZ máximo), conforme a Figura 2-12, que não poderá ser inferior a 0,2 m, garantido assim, que a embarcação não perderá o seu momento restaurador. Já o ângulo máximo de $\overline{GZ}$, não deve ser inferior a 25° , a fim de garantir que até 25° de inclinação lateral da embarcação, haja o momento restaurador. Por fim, outro critério a ser verificado, é o $\overline{GM}_t$ (segmento de reta entre os pontos G e M transversalmente a embarcação, de acordo com a seção 2.6), que não deve ser inferior a 0,35 m. Com isso, através desses critérios, espera-se atender aos requisitos da NORMAM 202 (Marinha, 2024), garantido a estabilidade da embarcação.

Esse processo é realizado com a utilização do software *MaxSurf Stability* (Bentley, 2018), fornecendo como dados de entrada o casco modelado no *MaxSurf Modeler* (Bentley, 2018), as condições de carregamento, as coordenadas do centro de gravidade das cargas, assim como, os critérios de estabilidade a serem atendidos, para que seja feita a verificação de estabilidade do píer.

3.5. ESCOLHA DA NORMA OU REFERÊNCIA A SER UTILIZADA PARA BALIZAR OS RESULTADOS

A ROM 2.0-11 (2012), é um conjunto de diretrizes técnicas utilizadas para a concepção, construção e manutenção de estruturas marítimas e sua aplicação, como visto na seção 2.11, e sua abordagem e procedimentos de cálculos são mostrados nas seções 3.5.1 a 3.5.3.

Para a avaliação dos esforços atuantes em embarcações e estruturas flutuantes, a ROM 2.0-11 (2012) fornece fórmulas e coeficientes baseados em dados empíricos e modelos de escala real, permitindo uma abordagem para estimar esforços atuantes no píer, para fins de comparação com os valores encontrados por meio da modelagem CFD, como descrito na seção 3.7. Os cálculos incluem considerações sobre condições climáticas, como ventos fortes e correntes marítimas, fundamentais para o dimensionamento adequado das fixações e sistemas de fundeio.

A aplicação da ROM 2.0-11 (2012) no presente estudo se deu por ela apresentar uma abordagem mais completa do que a norma brasileira de obras portuárias, a NBR 19782:2024, uma vez que a ROM 2.0-11 (2012) considera adicionalmente o efeito das forças resultantes oriundas do atrito lateral das embarcações ou estrutura com a água. Assim, a ROM 2.0-11

(2012) considera em seus cálculos os esforços do vento, corrente, atrito e por consequência, esforços resultantes totais, tendo cada um desses itens uma seção separada para o seu cálculo.

3.5.1. CARGAS DE VENTO

Para determinação das cargas de vento por meio da utilização da ROM 2.0-11 (2012), devem ser considerados os seguintes dados de entrada: área de obstrução às componentes transversal e longitudinal do vento na parte emersa da embarcação; a velocidade do vento sustentada de um minuto; a direção de incidência do vento; a densidade do ar; o coeficiente de arrasto nas componentes transversal e longitudinal do vento; coeficiente adimensional de excentricidade; e o comprimento médio da parte imersa na embarcação. Com isso, para cada um dos fatores citados acima, apresentam-se as definições de forma detalhada:

- Área de obstrução à componente transversal do vento ($A_{V,L}$): É a área na parte emersa da embarcação incluindo superestrutura e, em casos de porta-contêineres ou outros objetos, a área de obstrução dos contêineres, etc. Logo, esta componente é a área da projeção longitudinal da parte emersa da embarcação.
- Área de obstrução à componente longitudinal do vento ($A_{V,T}$): É parte emersa da embarcação, incluindo superestrutura e, em caso de porta-contêineres, a área de obstrução dos contêineres (área da projeção transversal da parte emersa da embarcação).
- Velocidade do vento sustentado de um minuto (V_k): Vento determinado incidindo na altura média da parte emersa da embarcação.
- Direção de incidência do vento (α): Ângulo de incidência do vento V_k em radianos.
- Densidade do ar (ρ_{ar}): Relação entre a massa do ar e o volume por ele ocupado.
- Coeficiente de arrasto à componente longitudinal do vento ($C_{DV,L}(\alpha)$): Para embarcações a plena carga, adotar 0,9. Embarcações em lastro, adotar 1,2.
- Coeficiente de arrasto à componente transversal do vento ($C_{DV,T}(\alpha)$): Para embarcações pesqueiras, de apoio, desportivas e de lazer e rebocadores, adotar 1,2. Demais embarcações, adotar 1,0.
- Coeficiente adimensional de excentricidade ($K_{V,e}$): Pode-se adotar os valores conforme a Tabela 3-1.
- Comprimento médio da parte emersa da embarcação (L): Refere-se ao comprimento médio da parte da embarcação que está acima da linha d'água.

Um dado importante a ser considerado é que a influência da altura da embarcação já está computada por meio da área transversal e longitudinal nos esforços de vento, porém quanto

mais alta for a estrutura ou o objeto acima dela, isso poderá influenciar no momento de tombamento do píer. Porém, essa consideração é feita durante a análise hidrostática da estrutura na seção 5.2.

Com isso, pode-se observar na Figura 3-2 os esforços atuantes na embarcação e posteriormente as fórmulas aplicadas para a determinação dos esforços causados pelo vento.

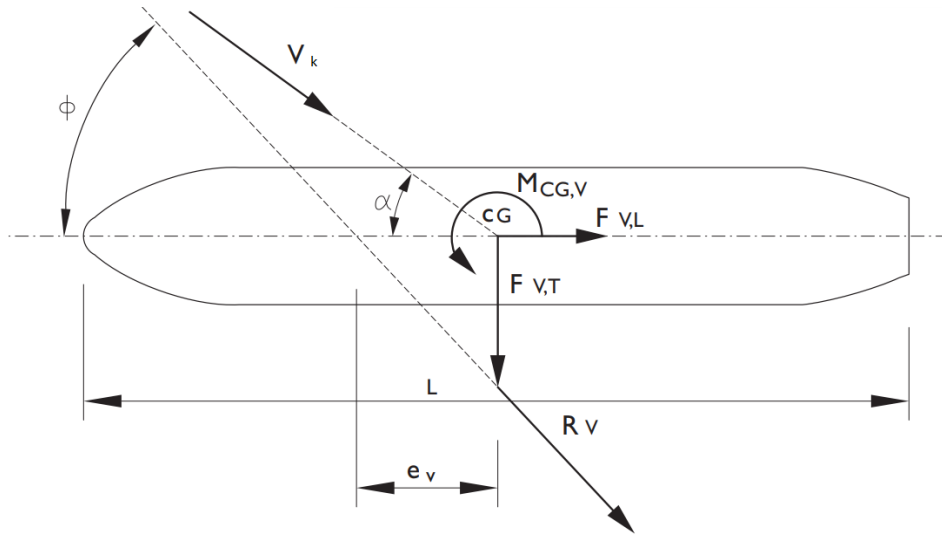


Figura 3-2-Esforços atuantes na embarcação causados pelo vento.

Fonte: ROM 2.0-11 (2012).

O cálculo da força resultante $R_V(\alpha)$ na embarcação causada pelo vento pode ser obtido a partir das Equações (3-1) e (3-2), apresentadas a seguir:

$$\phi(\alpha) = \arctg[(A_{V,L}/A_{V,T}) \cdot \tg \alpha] \quad (3-1)$$

$$R_V(\alpha) = \frac{\rho_{ar}}{2} \cdot V_k^2 \cdot \frac{C_{DV,L}(\alpha) \cdot A_{V,T} \cdot \cos^2 \alpha + C_{DV,T}(\alpha) \cdot A_{V,L} \cdot \sin^2 \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (3-2)$$

O cálculo das componentes longitudinal e transversal da força da embarcação causada pelo vento podem ser calculadas pelas Equações (3-3) e (3-4).

$$F_{V,L}(\alpha) = R_V(\alpha) \cdot \cos \phi \quad (3-3)$$

$$F_{V,T}(\alpha) = R_V(\alpha) \cdot \sin \phi \quad (3-4)$$

Já a fórmula para o cálculo do momento da embarcação, no seu centro de gravidade, causado pelo vento é dado pela Equação (3-5).

$$M_{CG,V}(\phi) = F_{V,T}(\alpha) \cdot e_V(\alpha) = F_{V,T}(\alpha) \cdot K_{V,e}(\alpha) \cdot L \quad (3-5)$$

Por fim, tem-se a Tabela 3-1 para determinação dos valores para o coeficiente adimensional de excentricidade.

Tabela 3-1 – Valores para o coeficiente adimensional de excentricidade.

α (em graus)	$K_{V,e}$					
	Embarcações com superestrutura centrada		Embarcações com superestrutura à proa		Embarcações com superestrutura à popa	
	Em lastro	Carregada	Em lastro	Carregada	Em lastro	Carregada
0	0	0	0	0	0	0
30	0,15	0,1	0,33	0,4	0,16	-0,1
60	0,05	0,003	0,18	0,3	0,05	-0,12
90	-0,02	0,02	-0,04	0,2	-0,04	-0,16
120	-0,1	0,1	-0,05	0,1	-0,18	-0,27
150	-0,2	0,1	-0,16	0,1	-0,33	-0,37
180	0	0	0	0	0	0

Fonte: ROM 2.0-11 (2012).

Com base nas formulações apresentadas acima, podem ser determinados: o ângulo de direção da força resultante $R_V(\phi(\alpha))$; a força resultante na embarcação causada pelo vento ($R_V(\alpha)$); componente longitudinal da força da embarcação causada pelo vento ($F_{V,L}(\alpha)$); a componente transversal da força da embarcação causada pelo vento ($F_{V,T}(\alpha)$); a excentricidade da carga em relação centro de gravidade, causada pelo vento ($e_V(\alpha)$); e o momento da embarcação, no seu centro de gravidade, causado pelo vento ($M_{CG,V}(\phi)$).

3.5.2. CARGAS DE CORRENTE

Para determinação das cargas oriundas dos esforços causados por corrente, por meio da utilização da ROM 2.0-11 (2012), os seguintes dados de entrada são considerados: área de obstrução à componente transversal e longitudinal da corrente na parte imersa da embarcação; velocidade horizontal da corrente; direção de incidência da corrente V_c ; densidade da água no local da estrutura; relação entre profundidade da água e calado da embarcação; coeficiente de arrasto às componentes transversal e longitudinal da corrente; coeficiente adimensional de excentricidade; profundidade do berço de atracação; calado (parte submersa) da embarcação; boca moldada da embarcação; e o comprimento médio da parte emersa da embarcação. Com isso, para cada um dos fatores citados acima, apresentam-se as definições de forma mais detalhada:

- Profundidade do berço de atracação (h): É a distância da linha d'água até o leito do rio;
- Calado (D): É a altura submersa da embarcação;
- Boca molhada da embarcação (B_{if}): É a largura máxima da embarcação;
- Comprimento médio da parte emersa da embarcação (L_{if}): Refere-se ao comprimento médio da parte da embarcação que está abaixo da linha d'água;
- Área de obstrução à componente transversal da corrente ($A_{C,L}$): É a parte imersa da embarcação (área da projeção longitudinal da parte imersa da embarcação), onde: $A_{C,L} = L_{if} \cdot D$;
- Área de obstrução à componente longitudinal da corrente ($A_{C,T}$): É a parte imersa da embarcação (área da projeção transversal da parte imersa da embarcação), onde: $A_{C,T} = B_{if} \cdot D$;
- Velocidade horizontal da corrente ($V_{c,t}$): É a velocidade horizontal da corrente para um período de 10 min, na profundidade equivalente à metade do calado da embarcação;
- Direção de incidência da corrente (α): Ângulo de incidência da corrente $V_{c,t}$ em radianos;
- Densidade da água no local da estrutura (ρ_a): Relação entre a massa da água (a densidade entre a água doce e salgada possuem valores diferentes, devido a presença de sais) e o volume por ele ocupado;
- Relação entre profundidade da água e calado da embarcação (h/D): É a relação entre a profundidade e o calado da embarcação, até o leito do rio na posição em que se encontra;
- Coeficiente de arrasto à componente longitudinal da corrente ($C_{DC,L}(\alpha)$): Quando $h/D < 2$, $C_{DC,L}(\alpha) = 0,9$ e quando $h/D \geq 2$, $C_{DC,L}(\alpha) = 0,6$;

- Coeficiente de arrasto à componente transversal da corrente ($C_{DC,T}(\alpha)$): Pode-se adotar os valores conforme a Tabela 3-2;
- Coeficiente adimensional de excentricidade ($K_{C,e}$): Pode-se adotar os valores conforme a Tabela 3-3.

Tabela 3-2 – Fator de correção do coeficiente de arrasto transversal $C_{DC,T}$ de acordo com a relação profundidade/calado.

Relação h/D	1	2	3	4	5	6	7
Fator de correção	7	3	2	1,3	1,2	1,1	1,0

Nota: Permite-se interpolação para valores intermediários de h/D.

Fonte: ROM 2.0-11 (2012).

Tabela 3-3 – Valores do coeficiente adimensional de excentricidade ($K_{C,e}$)

α (em graus)	$K_{C,e}$
0	0
30	0,17
60	0,09
90	0
120	-0,09
150	-0,17
180	0

Fonte: ROM 2.0-11 (2012).

Com isso, pode-se observar na Figura 3-3 os esforços atuantes na embarcação e, posteriormente, as fórmulas aplicadas para a determinação da força resultante R_C da embarcação causada pela corrente.

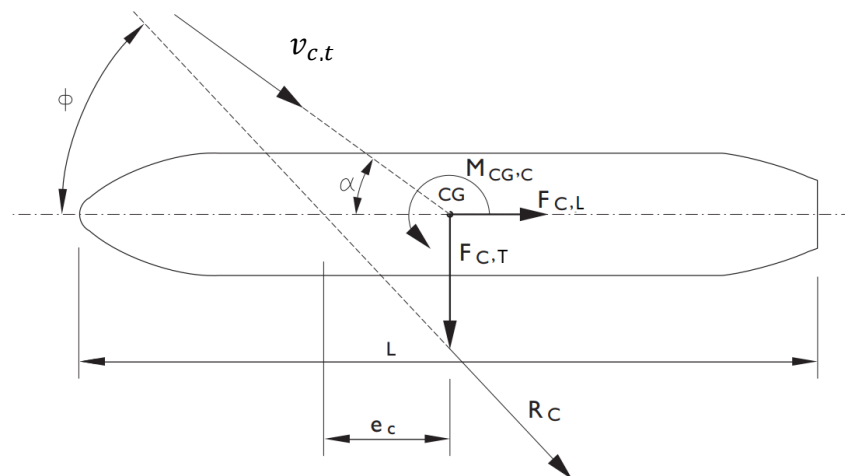


Figura 3-3-Esforços atuantes na embarcação devido à pressão da corrente.

Fonte: ROM 2.0-11 (2012).

Para o cálculo da força resultante R_C da embarcação causada pela corrente, tem-se as Equações (3-6) e (3-7) a seguir:

$$\phi(\alpha) = \arctg[(A_{C,L}/A_{C,T}) \cdot \tg \alpha] \quad (3-6)$$

$$R_C(\alpha) = \frac{\rho_a}{2} \cdot V_{C,t}^2 \cdot \frac{C_{DC,L}(\alpha) \cdot A_{C,T} \cdot \cos^2 \alpha + C_{DC,T}(\alpha) \cdot A_{C,L} \cdot \sin^2 \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (3-7)$$

Os cálculos das componentes longitudinal e transversal da força da embarcação, causada pela pressão da corrente, são expressos pelas Equações (3-8) e (3-9):

$$F_{C,L}(\alpha) = R_C(\alpha) \cdot \cos \phi \quad (3-8)$$

$$F_{C,T}(\alpha) = R_C(\alpha) \cdot \sin \phi \quad (3-9)$$

Por fim, o cálculo do momento da embarcação, no seu centro de gravidade, causado pela pressão da corrente, conforme a Equação (3-10).

$$M_{CG,V}(\phi) = F_{C,T}(\alpha) \cdot e_C(\alpha) = F_{C,T}(\alpha) \cdot K_{C,e}(\alpha) \cdot L \quad (3-10)$$

Com base nas formulações apresentadas acima, determinam-se: o ângulo de direção da força resultante ($\phi_C(\alpha)$); a força resultante na embarcação causada pela corrente ($R_C(\alpha)$); componente longitudinal da força da embarcação causada pela corrente ($F_{C,L}(\alpha)$); componente transversal da força da embarcação causada pela corrente ($F_{C,T}(\alpha)$); a excentricidade da carga em relação centro de gravidade, causado pela corrente ($e_C(\alpha)$); e o momento da embarcação no seu centro de gravidade, causado pela corrente ($M_{CG,C}(\phi)$).

3.5.3. CARGAS DE ATRITO

Para a determinação das cargas do atrito oriundas da passagem de corrente d'água pela estrutura por meio da utilização da ROM 2.0-11 (2012), consideram-se os seguintes dados de entrada: área de obstrução às componentes transversal e longitudinal da corrente na parte imersa da embarcação; velocidade horizontal da corrente; direção de incidência da corrente $V_{C,t}$; densidade da água no local da estrutura; viscosidade cinemática da água; relação entre profundidade da água e calado da embarcação; coeficiente de arrasto às componentes transversal e longitudinal da corrente; coeficiente adimensional de excentricidade;

profundidade do berço de atracação; calado (parte submersa) da embarcação; boca moldada da embarcação; e o comprimento médio da parte emersa da embarcação.

Com isso, para cada um dos fatores citados acima, apresentam-se as definições de forma mais detalhada:

- Profundidade do berço de atracação (h): É a distância da linha d'água até o leito do rio;
- Calado (D): É a altura submersa da embarcação;
- Boca molhada da embarcação (B): É a largura máxima da embarcação;
- Comprimento médio da parte imersa da embarcação (L_{pp}): Refere-se ao comprimento médio da parte da embarcação que está abaixo da linha d'água;
- Área de obstrução à componente transversal da corrente ($A_{fc,L}$): É a parte imersa da embarcação (área da projeção longitudinal da parte imersa da embarcação), onde: $A_{fc,L} = (B + 2 \cdot D) \cdot L_{pp}$;
- Área de obstrução à componente longitudinal da corrente ($A_{fc,T}$): É a parte imersa da embarcação (área da projeção transversal da parte imersa da embarcação), onde: $A_{fc,T} = (L_{pp} + 2 \cdot D) \cdot B$;
- Velocidade horizontal da corrente ($V_{c,t}$): É a velocidade horizontal da corrente para um período de 10 min, na profundidade equivalente à metade do calado da embarcação;
- Direção de incidência da corrente (α): Ângulo de incidência da corrente $V_{c,t}$ em radianos;
- Densidade da água no local da estrutura (ρ_w): Relação entre a massa da água (a densidade entre a água doce e salgada possuem valores diferentes, devido a presença de sais) e o volume por ele ocupado;
- Viscosidade cinemática da água (ν): É a propriedade física que caracteriza a resistência de um fluido ao escoamento;
- Relação entre profundidade da água e calado da embarcação (h/D): É a relação entre o calado da embarcação e a profundidade até o leito do rio, na posição em que se encontra;
- Coeficiente de arrasto à componente longitudinal da corrente ($C_{DC,L}(\alpha)$): Quando $h/D < 2$, $C_{DC,L}(\alpha) = 0,9$ e quando $h/D \geq 2$, $C_{DC,L}(\alpha) = 0,6$;
- Coeficiente de arrasto à componente transversal da corrente ($C_{DC,T}(\alpha)$): Pode-se adotar os valores conforme a Tabela 3-2; e
- Coeficiente adimensional de excentricidade ($K_{C,e}$): Pode-se adotar os valores conforme a Tabela 3-3.

Com isso, pode-se observar na Figura 3-4 os esforços atuantes na embarcação e posteriormente as fórmulas aplicadas para a determinação dos esforços resistivos para os esforços de atrito solicitantes descritos acima.

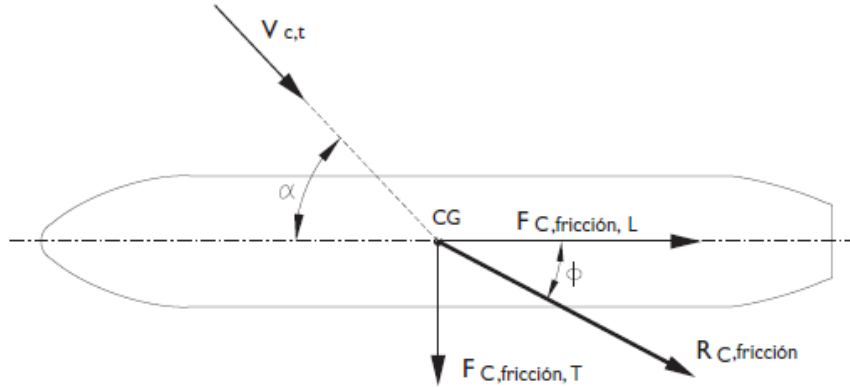


Figura 3-4-Esforços atuantes na embarcação devido ao atrito.

Fonte: ROM 2.0-11 (2012).

Para os cálculos dos esforços solicitantes oriundos do atrito, onde R_e é o número de Reynolds e C_{fc} é o fator de atrito ou coeficiente de fricção, tem-se as Equações (3-11) e (3-12), respectivamente, assim como as formulações para o cálculos das forças atuantes nas Equações (3-13) e (3-14).

$$R_e = \frac{V_{c,t} \cdot L_{pp} \cdot |\cos(\alpha)|}{\nu} \quad (3-11)$$

$$C_{fc} = \frac{0,075}{(\log_{10}(Re) - 2)^2} \quad (3-12)$$

$$F_{C \text{ fricção},L}(\alpha) = \frac{\rho_w}{2} \cdot V_{c,t}^2 \cdot C_{fc} \cdot A_{fc,L} \cdot \cos^2(\alpha) \quad (3-13)$$

$$F_{C \text{ fricção},T}(\alpha) = \frac{\rho_w}{2} \cdot V_{c,t}^2 \cdot C_{fc} \cdot A_{fc,T} \cdot \sin^2(\alpha) \quad (3-14)$$

Com base nas formulações apresentadas acima, determinam-se: Número de Reynolds (R_e); Coeficiente adimensional de atrito para a corrente (C_{fc}); componente longitudinal da força da embarcação causada pelo atrito lateral ($F_{Cf,L}(\alpha)$); componente transversal da força da embarcação causada pelo atrito lateral ($F_{Cf,T}(\alpha)$);

3.6. ANÁLISE DOS SOFTWARES DISPONÍVEIS PARA MODELAGEM CFD

Conforme apresentado na seção 2.13, existem algumas opções de softwares para a realização da modelagem CFD no mercado, cada um com suas próprias vantagens e limitações. A escolha do software deve ser baseada em critérios de análise específicos, como a capacidade de resolução de malhas complexas e com um nível de detalhamento tolerável. Outro fator que deve ser observado, são os modelos de turbulência disponíveis para análise, pois a precisão na simulação está atrelada aos fenômenos de turbulência e a eficiência do modelo computacional.

Outro fator a se atentar é se o software disponibiliza uma versão estudantil para realização de estudos acadêmicos, o que deve ser considerado para a decisão de qual opção disponível deve ser utilizada.

3.7. MODELAGEM CFD POR MEIO DO ANSYS FLUENT

Nesta seção, apresenta-se a metodologia a ser seguida para a modelagem de uma estrutura no *Ansys Fluent* (Ansys, 2018). Para isso, os procedimentos são separados em seis passos, sendo esses: Geometria de domínio computacional; Geração da malha; Modelo computacional; Condições de contorno; Critérios de convergência dos resíduos do modelo; e Rodada do modelo. Cada um desses processos pode ser visto de forma mais detalhada a seguir.

3.7.1. GEOMETRIA E DOMÍNIO COMPUTACIONAL

Para a elaboração da geometria aplica-se o modelo sem superfície livre, o qual é denominado de *Double Body*. Segundo Jiang (2022), esse modelo consiste na aplicação de uma condição de contorno de simetria na linha de flutuação da embarcação, ou seja, na interação entre os fluidos ar e água, modelando de forma independente as partes das estruturas e submersas por completo em seus respectivos fluidos. A premissa de que a interação entre os dois fluidos é desprezível é válida se o corpo modelado é espelhado, para que não haja um escoamento de fluido na altura da estrutura que, na prática, seja uma continuação física dela. Com isso, o resultado está mais próximo da realidade, pois, apesar da estrutura estar separada e com a sua área duplicada, o escoamento está mais bem representado do que em um cenário em que não é aplicado esse conceito. Sendo assim, a superfície da estrutura é dobrada ao se aplicar o espelhamento, duplicando-se também a área de contribuição utilizada no cálculo e, por isso, ao final da modelagem o resultado buscado equivale à metade do valor encontrado na modelagem, pois apenas metade da estrutura modelada representa a realidade.

Para a elaboração do domínio computacional, com base nos conceitos apresentados por Huang (2023), são adaptados e considerados valores múltiplos das dimensões do píer em suas respectivas direções, para que não haja um estrangulamento do fluido e se evitem efeitos de borda durante a modelagem. Para isso, adota-se um fator multiplicador de 6 para a altura do píer e 8 para a lateral do píer. Já para o fator multiplicador em relação ao eixo de incidência do fluido no modelo foram considerados 5 vezes a dimensão para a entrada e 14 vezes para saída. Outro aspecto importante consiste na realização dessa modelagem já nos eixos em que se pretende aplicar o gradiente de deslocamento do fluido. Para este estudo, em todos os cenários o fluido sempre está escoando no sentido negativo do eixo Z. Ainda no tocante à modelagem da geometria, um sólido deve ser um pouco maior do que o domínio computacional na largura e comprimento empregado. Esse sólido tem unicamente a função de refinar a região de interesse da malha, reduzindo o processamento global da modelagem ao priorizar apenas algumas regiões do modelo. A altura desse sólido depende diretamente da altura da estrutura a ser analisada, uma vez que a projeção de sua altura deve ser maior, para contemplar uma área de influência que englobe toda a estrutura a ser analisada no processo.

Por fim, devido à maior complexidade geométrica e à limitação numérica da malha por parte do software, considera-se que o píer esteja em uma região onde o leito do rio fique abaixo do domínio computacional. Logo, o leito do rio não é considerado na modelagem dos esforços do píer. Essa abordagem se faz necessária pela limitação dos pontos da malha, que são limitados nessa versão estudantil do programa.

3.7.2. GERAÇÃO DA MALHA

Para um modelo numérico, a geração de sua malha é um dos passos mais críticos e importantes, pois é por meio dela que se consegue representar o comportamento de interação do fluido com a estrutura. Quanto mais detalhada e bem representada for a malha, mais o resultado tende a se aproximar de um comportamento real.

Para esse estudo, que busca determinar os esforços de resistência ao avanço do fluido em um píer flutuante, as áreas mais críticas são: a superfície de entrada, denominada *Inlet*; a superfície de saída, denominada *Outlet*; as faces do domínio; a geometria do píer em si; e a chamada região de interesse.

Para a região de interesse, que é a região de interação do fluido com a estrutura, é especialmente importante que seja uma área da malha mais refinada. Essa área de interesse pode ser obtida utilizando o sólido mencionado acima, durante a parte de modelagem para ser

usado como um referencial geométrico dessa área, porém sem contribuir no tocante a área de obstrução de avanço dos fluidos. Com isso, torna-se possível gerar uma região de interesse, onde o resultado é mais preciso devido ao detalhamento da malha, sem sobrecarregar o modelo com diversos outros pontos de análise, cuja influência não é tão considerável.

Além dos fatores apresentados acima, para alcançar um resultado mais preciso e mais fidedigno, essa malha deve ser convertida em uma malha poliédrica ao invés da tradicional malha triangular comumente utilizada. Essa malha poliédrica otimiza o processamento numérico, acelerando a etapa de rodada do modelo, uma vez que a escolha dessa estrutura de malha permite uma melhor representação das superfícies curvas e dos cantos, além de minimizar os erros associados à discretização do domínio.

Por fim, vale ressaltar que as malhas de cada modelo são otimizadas para que sejam aplicadas a diferentes superfícies e geometrias, conforme visto mais à frente, respeitando a limitação do número de pontos disponível para a versão estudantil do programa. Quanto mais refinada for a malha, mais fácil é atingir a convergência estabelecida para análise do modelo, acelerando o processo e fazendo com que o resultado encontrado represente um cenário mais próximo da realidade.

3.7.3. *MODELO NUMÉRICO*

Para a realização da modelagem do píer utilizando o *Ansys Fluent* (Menter, 2021), adota-se o Método dos Volumes Finitos (VOF), já detalhado anteriormente na seção 2.12.2. Com isso, aplica-se esse modelo e realiza-se a inserção das fases ou fluidos, que devem estar presentes na modelagem, respeitando uma ordem por peso específico, onde a primeira fase é sempre a de menor peso específico. Assim, procede-se à inserção de todos os dados requeridos sobre as propriedades de cada fase.

Também deve-se selecionar o modelo de turbulência a ser adotado. Para aplicação neste estudo, adota-se o modelo *k- ω* . Esse modelo é particularmente eficaz em capturar o comportamento da turbulência perto das paredes, e ao contrário do modelo *k- ϵ* , o modelo *k- ω* é menos sensível às propriedades de turbulência na entrada do fluxo (Menter, 2021).

3.7.4. *CONDIÇÕES DE CONTORNO*

As condições de contorno têm como função representar as condições enfrentadas pela embarcação, no meio em que se encontra e que esteja submetida a análise. Isso inclui a condição de entrada e saída dos fluidos, as paredes e limites do domínio computacional, a velocidade em

que o fluido se encontra escoando dentro do domínio, assim como sua direção e altura em relação ao fundo do domínio ou em relação à origem dos eixos.

Dessa forma, estabelecem-se as seguintes condições de contorno:

- *Inlet*: Superfície de entrada do fluido, onde se define a velocidade do fluxo e sua direção;
- *Outlet*: Superfície de saída do fluido, onde se considera a pressão ambiente, permitindo o escoamento livre do fluido;
- Paredes: Limites laterais, inferior e superior do domínio, onde são aplicadas condições de não deslizamento, garantindo que a velocidade do fluido seja zero na interface com a estrutura. Nesse caso é importante ressaltar que, caso essas paredes estejam muito próximas da estrutura sinalizada, pode ocasionar um estreitamento do fluxo gerando turbulência excessiva, o que pode gerar resultados não fidedignos;
- Estrutura, sólido ou píer: Representa a geometria da estrutura a ser analisada dentro do domínio computacional, que tem um comportamento de uma estrutura sólida e no caso dessa aplicação, estática;
- Fluidos: definição da região de interação dos fluidos definidos para o modelo numérico adotado.

Com essas definições, é possível simular de forma adequada a interação do fluido com a estrutura, o que permite realizar a análise dos esforços gerados pela correnteza e pelo vento sobre o píer flutuante.

3.7.5. CRITÉRIOS DE CONVERGÊNCIA DOS RESÍDUOS DO MODELO

Para a aplicação do presente estudo, onde o píer a ser analisado possui uma dimensão máxima de 10 m em umas de suas direções, ou seja, não é uma estrutura de porte comparável a grandes navios ou estruturas, o critério de convergência está na ordem de 1×10^{-3} . Os resíduos a serem analisados e com esse critério de convergência estabelecidos são: Continuidade; velocidade no eixo X; velocidade no eixo Y; velocidade no eixo Z; k ; Ω ; e V_f -água.

3.7.6. MODELAGEM E RESULTADOS

Para rodar o modelo, deve-se realizar uma verificação de todos os passos anteriores, visando detectar algum erro de entrada de dados e caso esteja tudo certo, deve ser inserido um número de 1000 interações para o modelo poder começar a rodar. Conforme for passando os números de interações e for verificado que o número de 1000 interações seja insuficiente para o modelo ter um resultado convergente, deverá ser revista a malha ou condições de contorno

adotadas, assim como um aumento no número de interações do modelo, a fim de buscar a convergência dos valores apresentados. Caso a convergência seja alcançada antes das mil interações, o modelo finaliza o cálculo nesse instante.

Já para os resultados, inicia-se o *Ansys CFD Post*, que é o programa de interface gráfica para análise e extração dos resultados obtidos por meio da modelagem no *Ansys Fluent* (Menter, 2021). A partir das abas e dados fornecidos, devem ser coletados os dados de interesse dos esforços atuantes sobre a estrutura do píer flutuante para análise e verificação dos resultados.

3.8. ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS À PARTIR DA MODELAGEM CFD

A convergência dos resíduos é um fator importante, quando se aplica qualquer modelagem CFD, seja ela uma convergência dos resíduos encontrados durante a modelagem de um cenário de solicitações atuando sobre uma estrutura ou a convergência da malha empregada.

A convergência dos resíduos refere-se ao processo pelo qual as soluções das equações de *Navier-Stokes* se estabilizam em valores considerados constantes, à medida que o processo iterativo de solução avança, isto é, já não apresentam uma variação grande entre si. Ao final da rodada de cada modelo, deve ser verificado se o valor estabelecido para convergência foi alcançado ou se a modelagem não atende a tais condições.

Já a convergência da malha, é fundamental para garantir a precisão e confiabilidade dos resultados encontrados por meio da modelagem. Quando uma malha é convergente, isso significa que o refinamento da malha foi o suficiente para que as variáveis de interesse, como velocidade, pressão e temperatura, não mudem significativamente com o refinamento adicional. Essa análise é importante, pois uma malha que não apresente tais características, ou seja, uma malha não convergente, pode levar a resultados imprecisos e conclusões errôneas com base no comportamento do fluido, que não represente a realidade na aplicação a ser analisada.

A análise ou verificação da convergência da malha também tem como característica fundamental validar os gradientes de campo e regiões de turbulência, que são essenciais para entender os fenômenos complexos de vórtices e arrastos gerados sobre a estrutura. Uma malha não convergente, ou seja, pouco refinada pode apresentar informações erradas ou não entregar todas as informações necessárias, para que se tenha uma real noção do comportamento do que está acontecendo na estrutura sendo analisada.

Para isso, devem ser realizados alguns testes nos modelos alterando o tamanho dos elementos da malha, de modo a verificar se essa alteração na dimensão das faces da malha vai levar a valores muito diferentes, quando comparados a valores já encontrados previamente, visando assim, garantir que as forças e os esforços estimados sejam representativos das condições reais de operação estabelecidas para o estudo. Para que essa variação seja considerada aceitável, toleram-se variações de até 5% do valor das forças resultantes, para uma variação da dimensão do elemento gerador da malha de 0,01 m (intervalo mínimo aceito pelo software para inserção de dados).

3.9. ANÁLISE COMPARATIVA E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para a análise comparativa dos dados encontrados, devem ser montadas tabelas com os esforços atuantes nas direções longitudinal e transversal do píer, para cada cenário de combinação de solicitações, assim como para as situações de carregamentos citadas anteriormente. Com isso, a avaliação e análise crítica dos esforços encontrados por meio da ROM 2.0-11 (2012) e do *Ansys Fluent* devem permitir determinar o esforço principal atuante na estrutura, o qual deve ser o esforço utilizado para o cálculo do sistema de fundeio do píer flutuante.

3.10. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE FUNDEIO

Após a obtenção dos esforços atuantes na estrutura, conforme visto na seção 3.9, determina-se a maior força resultante em módulo atuante sobre o píer flutuante de concreto. Essa força é adotada como principal e como ponto de partida para a determinação da amarra ou cabo.

Segundo Tsinker (1997), o cálculo de resistência a ruptura de uma amarra ou de qualquer componente do sistema de fundeio deve respeitar a Equação (3-15).

$$T_{Projeto} = T_{Ruptura} \cdot 0,35 \quad (3-15)$$

Como a resistência de sistema de fundeio como um todo é equivalente a resistência do seu elo mais fraco, o conjunto desse sistema deverá ser composto por componentes que possuam resistência mecânica igual ou superior à resistência da amarra especificada para o projeto, visando assim garantir a segurança e o pleno funcionamento do sistema para ancoragem do píer flutuante. Ainda, para o dimensionamento do fundeio, as poitas de concreto possuem uma resistência de arrasto de cerca de 50% do seu peso fora d'água, ou seja, as poitas devem

ser capazes de suportar ou comumente chamado no meio náutico, *unhar-se* ao solo com resistência a esforços de tração equivalentes a metade de seu peso próprio (Myers, 1969).

Após a definição dos pontos citados acima, determinam-se os componentes a serem utilizados com base na configuração que se desejar usar para fundear o píer e, com base em catálogos técnicos de fabricantes desses materiais, dimensionar os componentes que formam o sistema para fundear o píer flutuante proposto para esse estudo.

4. ESTUDO DE CASO

O capítulo Estudo de Caso tem como um dos seus objetivos, apresentar a aplicação de parte da metodologia apresentada no capítulo anterior, implementada em um cenário com potencial de aplicação prática real. Para isso, as subdivisões a seguir demonstram parte dessa aplicação nas etapas contidas nas seções.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DA CIDADE DE ITACOATIARA

A cidade de Itacoatiara localiza-se em uma região de planície, caracterizada pela presença do Rio Amazonas, com centenas de metros de largura. Esta configuração geográfica cria uma área aberta, sem obstruções significativas aos ventos incidentes, o que influencia diretamente nos fenômenos climáticos locais. Além disso, a altura média das edificações na cidade é baixa, variando entre três e quatro pavimentos, com algumas raras exceções de galpões industriais. Esta topografia urbana contribui para a livre circulação dos ventos, intensificando os seus efeitos sobre a região.

Mesmo com normas específicas sobre esforços ocasionados pelo vento, como a NBR 6123 (2023), essa norma não abrange os conhecimentos dos eventos locais. A falta de dados regionais deve-se à ausência de uma instituição que realize medições diretas e sistemáticas. Nesses casos, o conhecimento dos habitantes ou empresas locais, que observam e coletam informações ao longo do tempo, torna-se valioso.

Por exemplo, na região de Itacoatiara, uma empresa presente há 23 anos tem coletado dados sobre os fenômenos locais, retirados de um anemômetro de uma embarcação que presenciou essa rajada de vento. Portanto, entrevistas com pescadores e outros usuários da costa são essenciais para compreender a dinâmica local. Essas informações ajudam a entender a interação entre o relevo do leito do rio, a variação do nível d'água ao longo do ano, e os eventos de vento, correnteza e mudanças de bancos de areia.

Além disso, a análise dos dados coletados possibilita identificar padrões sazonais e eventuais extremos climáticos, que podem influenciar a operação segura do píer. Esta abordagem integrada, que alia a sabedoria empírica dos moradores locais com medições sistemáticas, assegura que o projeto do píer flutuante seja robusto e resiliente, frente às variáveis ambientais da região. Um exemplo de um evento desse tipo, é a presença de trombas d'água na região, como observado na Figura 4-1, em que um tornado se forma sobre a água. Esses eventos não são citados em nenhuma literatura ou estudo, mas ocorrem frequentemente. Além disso, há

relatos de rajadas de vento violentas, capazes de arrancar conjuntos de tampas de coberturas de balsas de transporte de soja, com 500 kg por seção.



Figura 4-1-Exemplos de trombas registradas no Rio Amazonas.

Fonte: Expresso AM (2015).

Segundo a Transpetro (2022), a velocidade de correntes medidas para o terminal de Manaus, uma região relativamente próxima à de Itacoatiara são de 5 nós ou 2,7 m/s. A princípio seria aceitável utilizar esses dados para supor os valores de corrente em torno ou próximo da região de aferição. Porém, ao se observar que na área de Itacoatiara ocorre um estreitamento do rio, o que pode levar a um acréscimo de velocidade no período de cheia. Diante disso, pode-se partir de uma premissa errada constatar a velocidade do rio nesta região, tendo como base Manaus, e por isso os esforços adotados para os cálculos do sistema de fundeio são obtidos a partir de medições de embarcações atracadas na região de Itacoatiara.

O leito do rio Amazonas, em que a cidade de Itacoatiara e a região de Ponta Catarro margeiam, possui, nessa região, um leito predominante formado por solos predominantemente argiloso com sedimentos finos. A profundidade do leito do rio na região, de acordo com a análise realizadas às informações da carta náutica da marinha para região de Ponta do Catarro, é de, em média, 19,4 m (Marinha do Brasil 4029, 2024), conforme apresentado na Figura 4-2. Porém, o nível do rio pode sofrer variações de até 16 m, entre o período de seca e o período de cheia ao longo do ano na região.

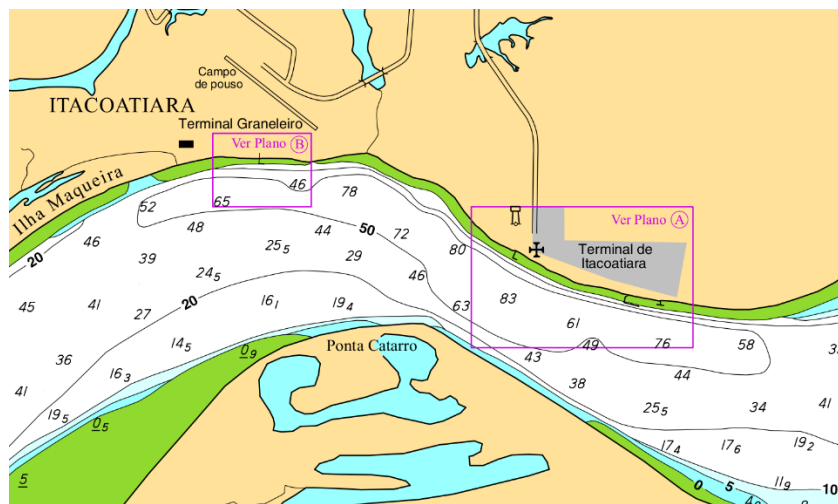


Figura 4-2- Carta de navegação da marinha para a região de Itacoatiara.

Fonte: Marinha do Brasil (2024).

4.2. DADOS TÉCNICOS A SEREM UTILIZADOS NA APLICAÇÃO DO ESTUDO

Durante a visita técnica realizada no local, analisaram-se os dados sobre a velocidade dos ventos locais medidos a partir de um anemômetro localizado a 15 m de altura. Essas medições proporcionam uma compreensão mais precisa e realista da força dinâmica oriunda dos ventos locais, que atuam na estrutura do píer em relação aos valores indicados na NBR 6123 (2023), permitindo assim, um dimensionamento mais adequado e econômico das ancoragens e amarras para o sistema de fundeio do píer flutuante.

Já em relação aos esforços oriundos do efeito da corrente, adotam-se valores captados por meio da utilização do aparelho ACDP (Perfilador Acústico de Correntes por Efeito Doppler) das embarcações presentes no porto da empresa Hermasa Navegação. As medições de corrente vêm sendo levantadas ao longo dos anos, respeitando a cheia do rio e a vazante. Estes dados são essenciais para compreender as flutuações de correnteza que a estrutura enfrenta, possibilitando um dimensionamento adaptado às condições reais do local.

Após a análise dos dados fornecidos pela empresa, os valores a título de cálculo adotados para o projeto são: velocidade máxima de operação para o vento de 18,52 m/s; velocidade de máxima de operação para corrente de 3,09 m/s; e para a profundidade do leito é adotado um valor de 7 m, uma vez que a ROM 2.0-11 (2012) considera valores médios de profundidade e não pequenas variações de profundidade em áreas coladas às margens dos rios. Outro fator para essa definição dessa profundidade, é a limitação da versão utilizada pelo software de CFD, que é melhor detalhada mais à frente no presente estudo.

Em síntese, os valores adotados para o vento e corrente atuantes sobre o píer flutuante de concreto, assim como a profundidade do leito na região de Itacoatiara ou Ponta Catarro são:

$$V_{Vento} = 18,52 \text{ m/s}$$

$$V_{Corrente} = 3,09 \text{ m/s}$$

$$h_{Leito} = 7,00 \text{ m}$$

4.3. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA DO PÍER FLUTUANTE

A Amazônia, com sua vasta rede hidrográfica, é uma região onde os acessos às comunidades são predominantemente realizados por rios. No entanto, a variação sazonal dos níveis de água, com períodos de cheia e vazante, apresenta desafios significativos para a construção e operação de portos tradicionais. Diante desse cenário, a utilização de píeres flutuantes surge como uma solução eficiente e versátil, para facilitar o carregamento e descarregamento de mercadorias.

Uma das principais vantagens dos píeres flutuantes é a capacidade de ajuste automático ao nível da água. Como o píer flutua na superfície do rio, adapta-se naturalmente às flutuações sazonais de cheia e vazante. Isso garante que o ponto de carregamento e descarregamento esteja sempre acessível, independentemente das variações do nível do rio. A flexibilidade é outra característica crucial dos píeres flutuantes. Em caso de obras, mudanças nos bancos de areia ou necessidade de reparo, o píer pode ser facilmente manobrado e reposicionado. Se necessário, o píer pode ser levado para uma área de manutenção e substituído por outro, garantindo a continuidade das operações portuárias.

A construção de um píer flutuante tem um impacto ambiental significativamente menor em comparação com um porto tradicional. Enquanto os portos tradicionais exigem a escavação e cravação de estacas no leito do rio, os píeres flutuantes são simplesmente ancorados, preservando o ambiente aquático e reduzindo a perturbação dos ecossistemas locais. Por ser uma estrutura fundeada, a sua implementação dispensa autorização e estudos ambientais, pois não é uma estrutura fixa assentada no leito do rio, necessitando apenas autorização da marinha para o fundeio da estrutura do píer no local desejado.

A escolha dos materiais para a construção de píeres flutuantes é um aspecto crucial, que influencia diretamente sua durabilidade, manutenção e custo. No caso específico do projeto em Itacoatiara, opta-se por uma estrutura de concreto, uma alternativa mais econômica em comparação ao aço. O investimento é amplamente compensado pela durabilidade superior do

concreto, que resiste melhor à corrosão e aos efeitos da oxidação, especialmente em ambientes fluviais.

Além da durabilidade, a robustez do concreto oferece vantagens significativas em termos de resistência a impactos. Em situações em que embarcações possam colidir com o píer, a estrutura de concreto tende a sofrer menos danos, proporcionando assim maior segurança e longevidade à instalação. Outro ponto positivo é a simplicidade da mão de obra necessária para a construção de píeres de concreto. Diferentemente das estruturas metálicas, que requerem soldadores qualificados e equipamentos específicos, a construção em concreto pode ser realizada por profissionais com menor especialização, utilizando moldes para volumes do concreto, o que torna o processo mais acessível, especialmente em regiões remotas.

Dessa forma, a escolha do concreto como material principal não só assegura uma maior vida útil e menor necessidade de manutenção, mas também facilita a implementação do projeto, garantindo um equilíbrio entre custo, durabilidade e praticidade operacional. Além disso, é possível adicionar aditivos impermeabilizantes ao concreto, que preenchem os poros e reduzam a permeabilidade da estrutura. Isso significa que o concreto absorve menos água ao longo do tempo, prolongando sua durabilidade. Outra medida para mitigar os efeitos da corrosão, especialmente em ambientes onde a água pode ser salobra, é o uso de armaduras galvanizadas, que oferecem uma camada protetora contra a oxidação.

Pensando na versatilidade e na necessidade de mobilidade em regiões remotas, a dimensão do píer adotada foi projetada para uma construção média de infraestrutura. Para viabilizar uma pequena obra civil em tais locais, é essencial planejar a logística de transporte e instalação de equipamentos. Por exemplo, um caminhão leve, uma retroescavadeira de pequeno porte podem ser fundamentais para a terraplenagem e preparação do terreno. Além disso, a chegada de materiais de construção por meio de veículos leves torna-se viável.

Construir um grande porto é, sem dúvida, uma obra que demanda muitos recursos e investimentos. No entanto, a construção de um píer flutuante de pequena escala, que permita a passagem de uma retroescavadeira, paletes e empilhadeiras, facilita o desenvolvimento de pequenas regiões de difícil acesso. Essa abordagem possibilita a movimentação de equipamentos e o transporte de materiais, promovendo um desenvolvimento mais rápido e acessível.

Diante dos fatos apresentados, a largura definida para a estrutura foi de 4,5 m, o que permite uma faixa de rolagem larga o suficiente para passagem de alguns modelos de alguns

modelos de retroescavadeiras, veículos, equipamentos de obras civis, a locação e movimentação de pallets e suas empilhadeiras, assim como, para as operações de embarque e desembarque de passageiros.

Já o comprimento do píer flutuante, foi definido em 10 m, para facilitar os propósitos já descritos acima, vencendo assim a variação de profundidade do calado de maior para a menor profundidade, permitindo um acesso mais eficiente da embarcação até a costa. A modularidade dessa estrutura é uma vantagem significativa, pois se for necessário, pode ser acoplado a outro módulo de 10 m. Outro motivo para a escolha desse comprimento, é a maior facilidade de movimentação e logística do reboque do píer de um lugar para outro, permitindo que cada módulo seja transportado para reparos ou reposicionamento, uma vez que, uma unidade com 10 m atende diversas necessidades, que uma com 6 ou 7 metros pode não atender, necessitando de duas composições ao invés de uma só unidade. Por fim, para o cálculo da altura mínima requerida pelo píer, e a determinação do seu pontal, apresentam-se os cálculos e considerações no capítulo de aplicação do presente estudo. A Figura 4-3 ilustra o modelo de píer flutuante de concreto em uma situação de carga ou descarga de pallets.

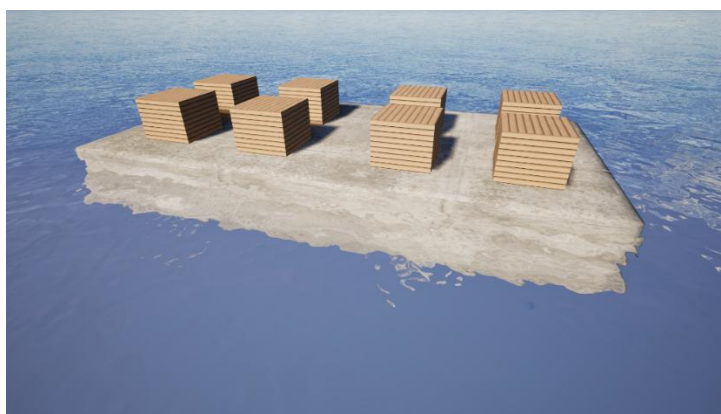


Figura 4-3- Exemplo de modelo de um píer flutuante de concreto sendo utilizado.

Fonte: Autoria própria.

4.4. CENÁRIOS DE COMBINAÇÃO DE AÇÕES AMBIENTAIS ATUANTES NA ESTRUTURA DO PÍER

Nesta seção, apresentam-se as combinações de ações ambientais atuantes na estrutura flutuante e no sistema de fundeio, oriundas dos esforços de vento e correntes presentes no local de implementação do projeto, isto é, na região de Ponta Catarro, próximo à cidade de Itacoatiara, localizada no Estado do Amazonas.

Para a concepção do fundeio, deve ser avaliada a condição climática mais severa da região. Para a determinação dos esforços máximos atuantes sobre a estrutura, consideram-se os eventos climáticos mais severos da região, sendo ventos de 36 nós e correnteza na cheia de 6 nós, ou seja, 18,52 m/s e 3,09 m/s, respectivamente.

A região é conhecida como região de remanso e eventos hidrodinâmicos específicos, que são comuns na região. Observam-se no local sumidouros e vórtex rotacionais em direção oposta à corrente do rio. Esse tipo de fenômeno ocorre pelo tipo de fundo do rio, combinado com a velocidade da corrente.

Devido ao movimento errático da correnteza nessa região, deve-se idealizar um sistema de fundeio que suporte as solicitações, por exemplo, *spread mooring*, que tem um funcionamento satisfatório em qualquer solicitação, independentemente da direção da carga. Um exemplo desse tipo de fundeio pode ser observado na Figura 4-4, que ilustra como o *spread mooring*, que ancora o sistema com uma folga mínima de comprimento de amarra, uma vez que o sistema é fixado pela ancoragem e não pelo peso da amarra.

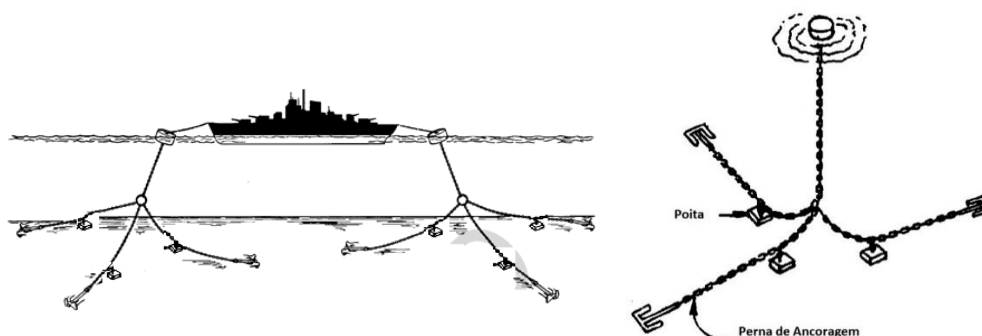


Figura 4-4- Exemplo de *Spread Mooring* da Marinha dos Estados Unidos.

Fonte: DDS 582-1.

Como a região não apresenta fatores dinâmicos mais complexos como ondas, adotam-se cálculos estacionários. Utilizam-se forças estacionárias de corrente e vento incidindo sobre a estrutura fundeada. Para tais cálculos, utilizam-se formulações admitindo carga estacionária composta por coeficientes tabulados para projetos de atracação, retirados de modelos de escala real, ou seja, dados empíricos.

De acordo com os eventos observados no local, adotam-se quatro condições com diferentes ângulos de incidência das ações oriundas do vento e corrente sobre a estrutura fundeada.

Apresentam-se as combinações de ações atuantes em formas de cenários de solicitação, em que cada cenários apresenta uma particularidade que os difere dos demais. Com isso, visa-se abranger todos os cenários possíveis de solicitações para definir o mais crítico, o qual deve ser utilizado para o comparativo de dados com os esforços obtidos via software nas etapas futuras do estudo, assim como, no dimensionamento do sistema de fundeio. Outro fato importante é que para uma orientação padronizada, utiliza-se a mesma adotada pela ROM 2.0-11 (2012), apresentada na seção 3.5, ou seja, a proa do píer é considerada com o ângulo de incidência de 0° , conforme apresentado na Figura 4-5.

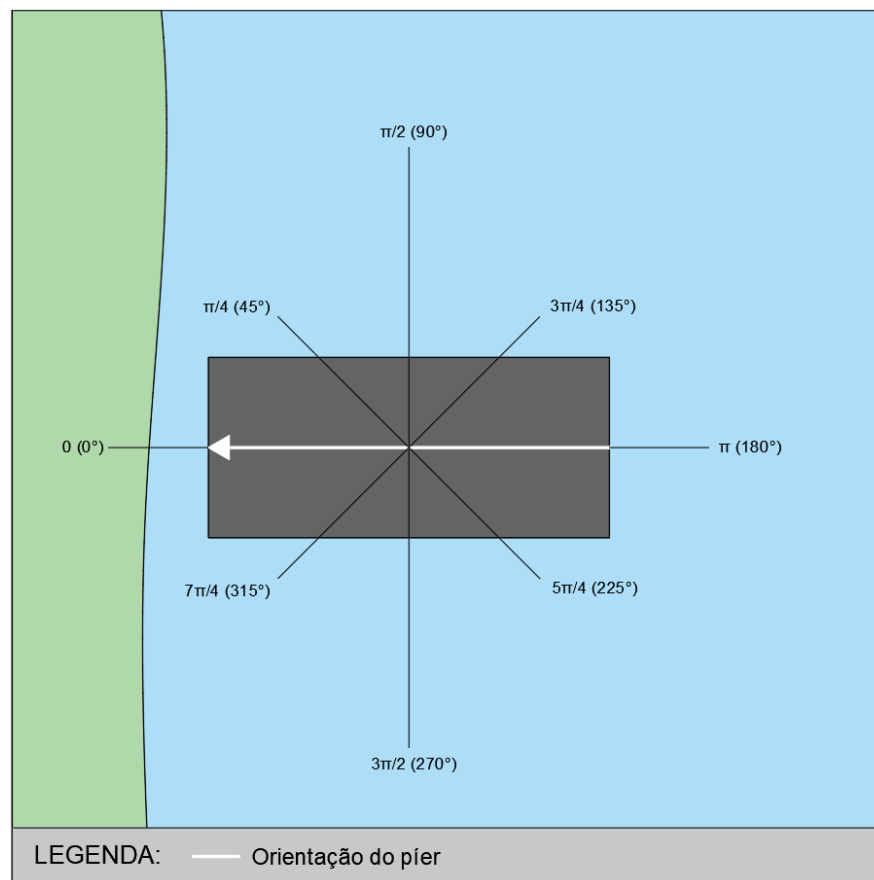


Figura 4-5- Orientação adotada para incidência das ações ambientais sobre o píer.
Fonte: Autoria própria.

4.4.1. CENÁRIO 1 DE AÇÕES AMBIENTAIS

O cenário 1 consiste em um caso em que há a incidência de vento a 45° e uma corrente incidindo a 90° . Esse cenário simula condições específicas onde o vento e a corrente incidem em ângulos distintos, o que resulta em uma situação em que o sistema de fundeio deve resistir a esforços transversais e longitudinais. A Figura 4-6 a seguir ilustra com mais clareza o cenário

1, permitindo uma compreensão visual das ações ambientais atuantes na estrutura a ser fundeada.

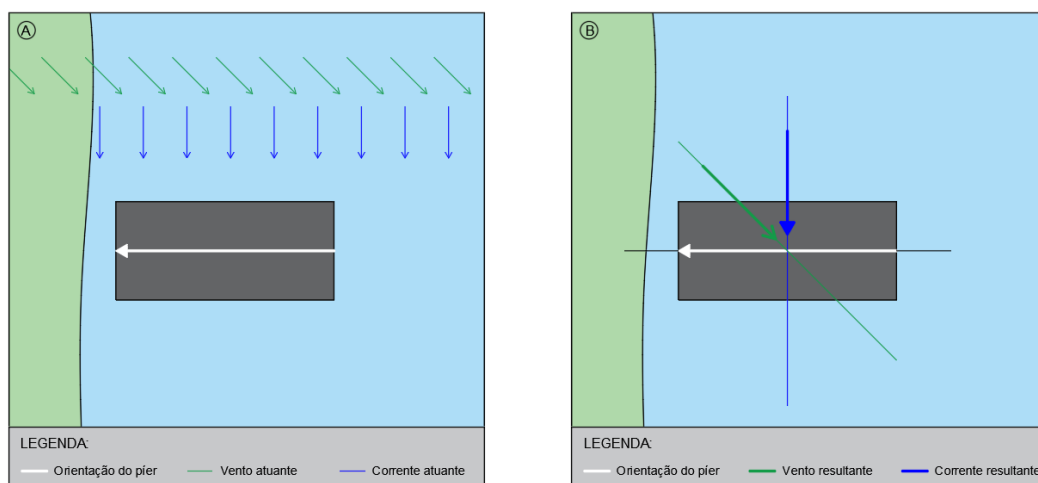


Figura 4-6- Cenário 1 de ações ambientais atuantes (A) e suas ações resultantes com vento a 45° e corrente a 90° (B).

Fonte: Autoria própria.

4.4.2. CENÁRIO 2 DE AÇÕES AMBIENTAIS

O cenário 2 consiste em um caso em que há a incidência de vento a 45° e uma corrente incidindo a 135°. Esse cenário também simula condições específicas onde o vento e a corrente incidem em ângulos distintos, que gera uma situação em que o sistema de fundeio deve resistir a esforços tanto transversais quanto longitudinais. A Figura 4-7 ilustra o cenário 2, permitindo uma compreensão visual das ações ambientais atuantes na estrutura a ser fundeada.

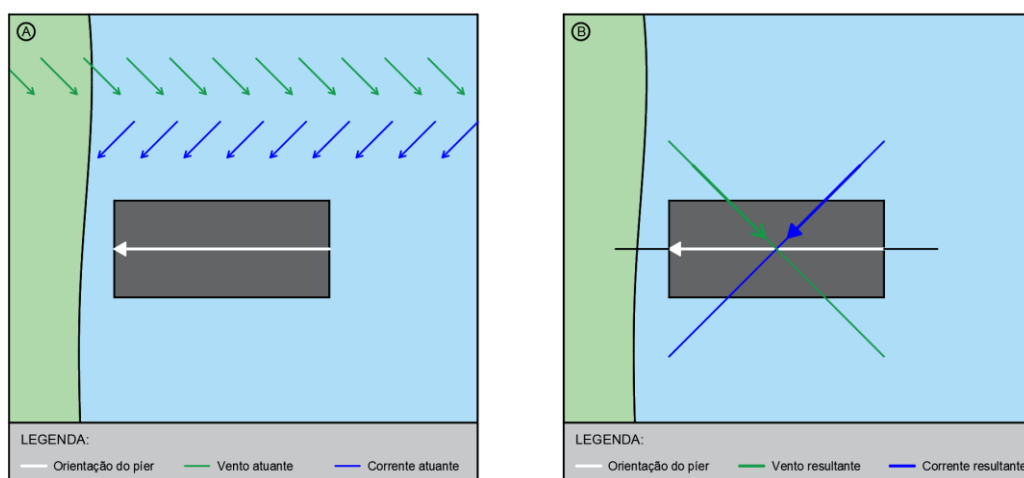


Figura 4-7- Cenário 2 de ações ambientais atuantes (A) e suas ações resultantes com vento a 45° e corrente a 135° (B).

Fonte: Autoria própria.

4.4.3. CENÁRIO 3 DE AÇÕES AMBIENTAIS

O cenário 3 consiste em um caso em que há a incidência de vento a 90° e uma corrente incidindo a 225° , simulando assim, a presença de remanso (vórtice rotacional). Esse cenário simula condições específicas onde o vento e a corrente incidem em ângulos distintos e com sentidos opostos, que ocasiona uma situação em que o sistema de fundeio deve resistir a esforços tanto transversais, quanto longitudinais em condições diferentes das anteriormente apresentadas. A Figura 4-8 ilustra o cenário 3, permitindo uma compreensão melhor das ações ambientais atuantes na estrutura a ser fundeada.

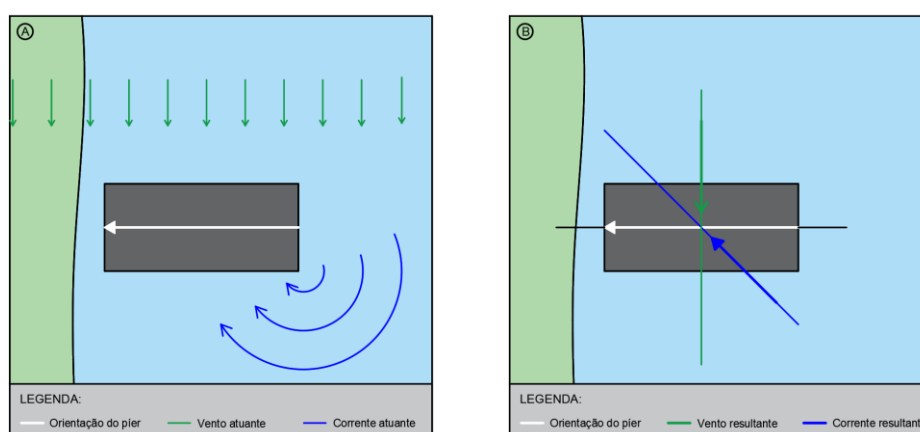


Figura 4-8- Cenário 3 de ações ambientais atuantes (A) e forças resultantes com vento a 90° e corrente a 225° (B).

Fonte: Autoria própria.

4.4.4. CENÁRIO 4 DE AÇÕES AMBIENTAIS

O cenário 4 consiste em um caso em que há a incidência de vento a 90° e uma corrente incidindo a 90° . Esse cenário simula condições específicas, o que resultam em uma situação em que o sistema de fundeio resiste a esforços transversais acentuados. A Figura 4-9 a seguir ilustra com mais clareza o cenário 4, permitindo uma melhor compreensão das ações ambientais atuantes na estrutura a ser fundeada.

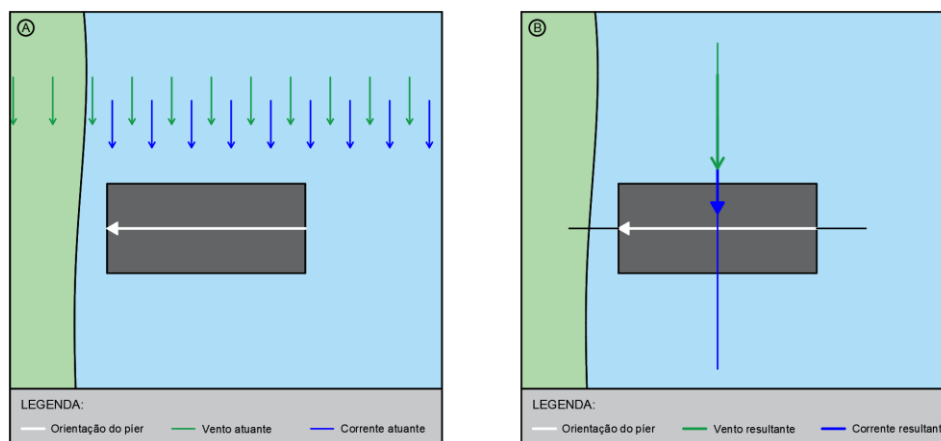


Figura 4-9- Cenário 4 de ações ambientais atuantes (A) e forças resultantes com vento a 90° e corrente a 90° (B).

Fonte: Autoria própria

5. APLICAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Este capítulo tem como objetivo mostrar a aplicação da metodologia apresentada no Capítulo 3 ao estudo de caso delineado no Capítulo 4. Apresentam-se os passos seguidos e suas respectivas implementações, assim como os resultados obtidos a partir dessa aplicação, acompanhados de uma discussão dos dados, com o intuito de destacar os pontos mais relevantes e as conclusões observadas. Finalmente, apresenta-se o dimensionamento do sistema de fundeio proposto para o píer flutuante de concreto.

5.1. PROPRIEDADES FÍSICAS E GEOMÉTRICAS DO PÍER FLUTUANTE DE CONCRETO

Diante das dimensões atribuídas à área de convés do píer e apresentadas na seção 4.3, pode-se calcular a altura mínima para assegurar a flutuabilidade, bem como determinar e justificar o pontal adotado para a estrutura do píer flutuante.

Para fins de obtenção da flutuabilidade, a estrutura do píer flutuante é idealizada conforme estabelecido na seção 3.3, apresentando a geometria de uma viga caixão com as seções frontal e traseira fechadas, formando uma caixa vazada de concreto. A concepção da estrutura por meio da utilização de uma viga caixão tem duas funcionalidades importantes, que são destacadas em relação à flutuabilidade para aplicação em um píer flutuante de concreto, sendo elas: (1) Diminuir o peso próprio da estrutura, uma vez que pode ser otimizada para ter uma espessura mínima de parede necessária para resistir aos esforços externos e internos atuantes ao mesmo tempo, e que se desloque o máximo de volume de água possível, para atingir aos requisitos mínimos de flutuabilidade estabelecidos pelas autoridades navais; e (2) Gerar uma área interna oca que pode ser preenchida com um ou mais blocos de isopor de alta densidade.

A utilização de blocos únicos, preferencialmente, ou mais blocos de isopor de alta densidade no interior de estruturas flutuantes, é importante para garantir a flutuabilidade do píer. Ao contrário do que se possa imaginar, o isopor sozinho não deve ser considerado um elemento com alta contribuição para a flutuabilidade de um píer, concebido a partir de uma viga caixão com as extremidades fechadas, pois este já possui flutuabilidade própria, ao contrário de uma estrutura de plataforma sobre boias, conforme apresentado na seção 2.7.1.

Isso deve ao fato de que a estrutura adotada ser estanque, isto é, não permite o contato do isopor com o fluido presente no lado de fora da estrutura, em condições ideais de conservação e, conseqüentemente, a sua presença no interior da estrutura promove o aumento do peso próprio do conjunto. Porém, ao visar a segurança de estruturas com flutuabilidade própria

(caixão flutuante), as quais tem o seu interior vazio, em caso de avarias e fissuras, evita-se que a água ocupe o mesmo espaço interno preenchido pelo isopor, auxiliando, a partir desse ponto, na manutenção das características de flutuabilidade do píer. Dessa forma, evita-se que o píer venha a pique (afunde), e assegurando que as suas características projetadas iniciais de flutuabilidade, por parte da estrutura de concreto, sejam comprometidas.

Sendo assim, a utilização de isopor no interior do píer de concreto com flutuabilidade própria (caixão flutuante) garante a segurança na flutuabilidade da estrutura em caso de avarias. Para uma visualização mais clara da tipologia estrutural proposta para o píer flutuante de concreto, a Figura 5-1 ilustra um corte transversal na seção central do píer.

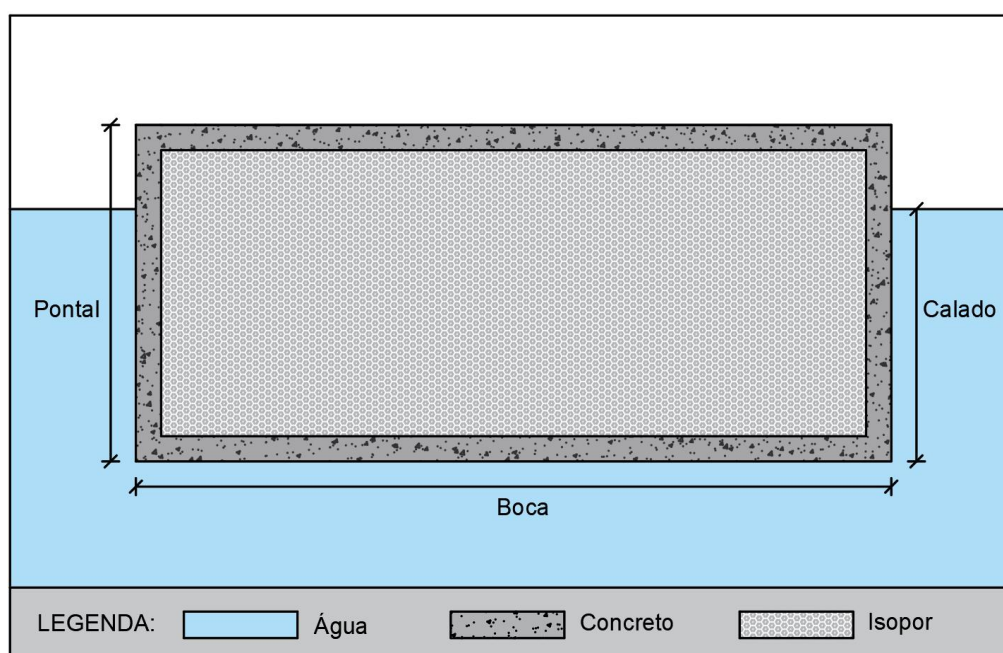


Figura 5-1- Corte transversal na seção central da viga caixão que forma píer flutuante de concreto.

Fonte: Autoria própria.

5.1.1. PESO PRÓPRIO DO PÍER FLUTUANTE DE CONCRETO

Para se estabelecer o peso próprio do píer flutuante de concreto, a estrutura será abordada como uma viga caixão. Logo seu comportamento e dimensionamento se dá por meio de conceitos aplicados a lajes, como explicado nessa seção.

Quando a relação entre o vão de maior dimensão e o de menor dimensão em uma laje (λ) é maior do que dois, conforme mostrado pela Equação 5-1, pode-se considerar a laje como armada somente em uma direção (NBR 6118, 2023). Para estes tipos de lajes, considera-se que as curvaturas na direção do vão de menor dimensão são preponderantes com relação às do maior

vão. Esta configuração estrutural faz com que somente os esforços internos na direção do vão menor sejam significativos para o dimensionamento da estrutura (NBR 6118, 2023).

$$\lambda = \frac{l_y}{l_x} > 2,0 \quad (5-1)$$

Com isso, é possível realizar um pré-dimensionamento da estrutura para definir a espessura da parede de concreto e, conseqüentemente, o seu peso. Com base nesse dimensionamento, estima-se uma espessura de 0,15 m para as paredes de concreto que formam as paredes da viga caixão, isto é, a estrutura do píer flutuante. A partir dessa espessura, determina-se o peso próprio da estrutura do píer que a ser utilizado posteriormente e o cálculo para gerar a tabela de pesos, definindo, assim, o peso leve da estrutura e o peso total, considerando as cargas mostradas a seguir. Para a estrutura do píer flutuante, com as dimensões em cada direção, serão consideradas as seguintes dimensões dos vãos entre eixo de paredes:

$$\text{Maior vão} = l_y = L_{pp} = 9,85 \text{ m}$$

$$\text{Menor vão} = l_x = \text{Boca} = 4,35 \text{ m}$$

Ao se aplicar as dimensões de cada direção na Equação (5-1), é possível determinar o valor de λ .

$$\lambda = \frac{9,85}{4,35} = 2,264 > 2,0$$

As lajes da estrutura do píer estão armadas somente em uma direção, com um arranjo estrutural de uma viga caixão. A estrutura do píer flutuante encontra-se exposta à Classe IV de agressividade, uma vez que a estrutura pode ser fundeada em regiões de água doce ou salobra (Tabela 6.1 NBR 6118:2023). Para essa classificação, tem-se que o cobrimento para a laje, segundo a NBR 6118:2023 deve ser de 4,5 cm (Tabela 7.2 NBR 6118:2023) e o f_{ck} adotado deve ser de 40 MPa (Tabela 7.1 NBR 6118:2023).

Com isso, a laje apresenta as seguintes características para seu dimensionamento:

$$h = 0,15 \text{ m}$$

$$b = 1,00 \text{ m}$$

$$c = 0,045 \text{ m}$$

$$\emptyset = 10 \text{ mm} = 0,01 \text{ m}$$

$$d = h - d' = h - c - \frac{\emptyset}{2} = 0,15 - 0,045 - \frac{0,01}{2} = 0,10 \text{ m}$$

$$l = 4,35 \text{ m}$$

Já para o carregamento atuante sobre as lajes, são consideradas duas hipóteses: (1) Laje superior submetida aos esforços do peso próprio do concreto e da sobrecarga de utilização de $6,83 \text{ kN/m}^2$ (valor justificado com base na curva hidrostática para uma condição de submersão do píer conforme a Tabela 5-2); (2) Laje inferior, submetida aos esforços de peso próprio do concreto e do empuxo da água da parte submersa do píer; (3) Lajes laterais submetidas aos esforços do empuxo lateral da água. Com isso, avalia-se quais desses esforços solicitam mais a estrutura. Para o pré-dimensionamento considera-se a hipótese mais desfavorável. Para isso, consideram-se os seguintes esforços atuantes:

$$q_{p.p \text{ concreto}} = 1\text{m} \cdot h \cdot \gamma_{\text{concreto}} = 1\text{m} \cdot 0,15\text{m} \cdot 25\text{kN/m}^3 = 3,75 \text{ kN/m}$$

$$q_{\text{sobrecarga}} = 1\text{m} \cdot \text{sobrecarga} = 1\text{m} \cdot 6,83\text{kN/m}^2 = 6,83 \text{ kN/m}$$

$$q_{\text{empuxo}} = 1\text{m} \cdot H \cdot \gamma_{\text{água}} = 1\text{m} \cdot 2,00\text{m} \cdot \frac{10\text{kN}}{\text{m}^3} = 20 \text{ kN/m}$$

Em que: (q) são as cargas distribuídas por metro; (h) a altura da laje; (γ) peso específico do material considerado; e (H) a altura estimada para o dimensionamento prévio da parte inferior da viga caixão até linha d'água (calado arbitrário para um pré-dimensionamento).

Para o cálculo do carregamento distribuído em cada uma das lajes horizontais analisadas (as lajes mais críticas), adotam-se as seguintes sobrecargas:

$$q_{\text{laje superior}} = q_{p.p \text{ concreto}} + q_{\text{sobrecarga}}$$

$$q_{\text{laje superior}} = 3,75 + 6,83 = 10,58 \text{ kN/m}$$

$$q_{\text{laje inferior}} = q_{p.p \text{ concreto}} - q_{\text{empuxo}}$$

$$q_{\text{laje inferior}} = 3,75 - 20,00 = -16,25 \text{ kN/m}$$

$$q_{\text{laje lateral superior}} = 0,75 \text{ kN/m}$$

$$q_{\text{laje lateral inferior}} = 19,25 \text{ kN/m}$$

Para o pré-dimensionamento das lajes que compõem a viga caixão do píer flutuante, consideram-se as extremidades com um vão livre horizontal e vertical de 4,35 m e 1,85 m entre eixo de paredes do píer. Ao se aplicar os carregamentos e as dimensões da estrutura no modelo

de viga caixão, os momentos atuantes nas lajes da viga são mostrados na Figura 5-2. Como o maior momento solicitante deve ser calculado para o cenário da laje inferior, cujo esforço de sollicitação é superior ao da laje superior e laterais, portanto, considerado o mais desfavorável.

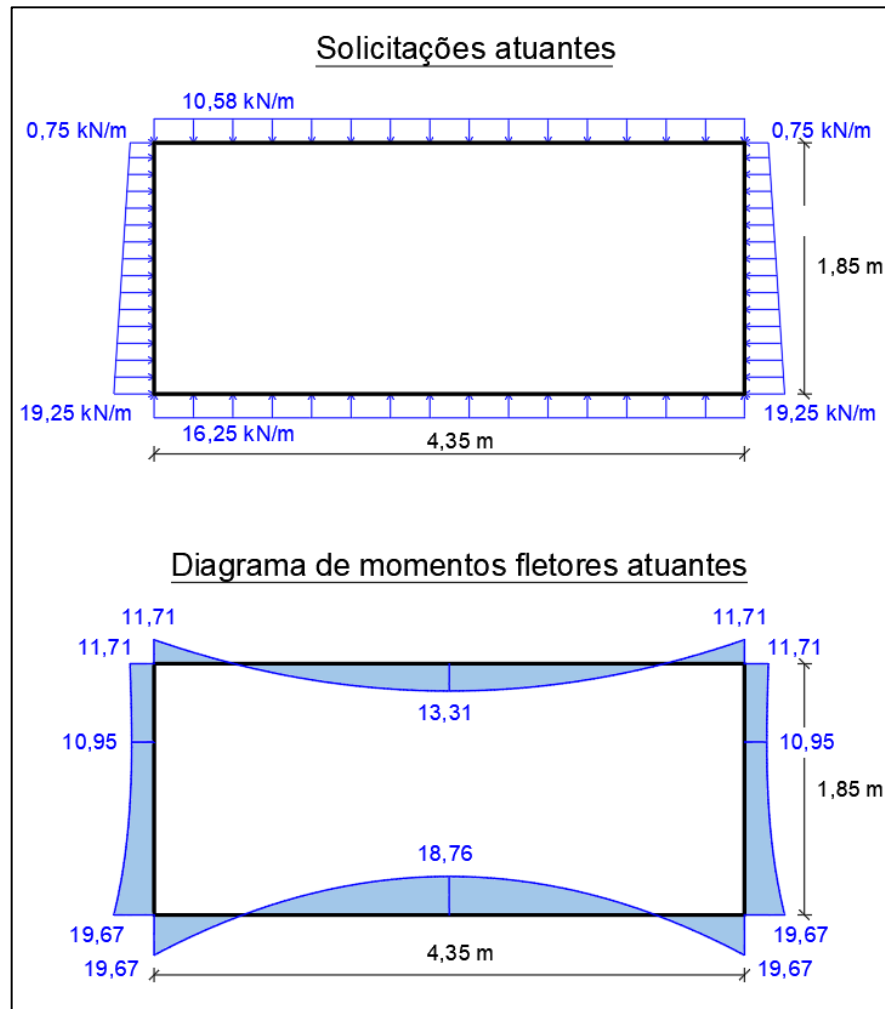


Figura 5-2- Solicitações e momentos atuantes na viga caixão do píer flutuante em kN·m/m.

Fonte: Autoria própria.

Momentos máximos observados na estrutura:

$$M_{f \text{ laje superior}} = 13,31 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$$

$$M_{f \text{ laje inferior}} = 19,67 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$$

$$M_{f \text{ parede lateral}} = 19,67 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$$

O momento adotado será o com maior valor, logo:

$$M_f = 19,67 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$$

A partir desses valores, podem ser calculados os valores majorados a fim de se realizar o dimensionamento da laje conforme as Equações (5-2), (5-3) e (5-4).

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4} \quad (5-2)$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1,15} \quad (5-3)$$

$$M_d = M_f \cdot 1,4 \quad (5-4)$$

Com isso, pode-se obter os seguintes valores majorados:

$$f_{ck} = 40 \text{ MPa}$$

$$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4} = \frac{40.000}{1,4} = 28.570 \text{ kPa}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1,15} = \frac{500}{1,15} = 434,78 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$M_d = M_f \cdot 1,4 = 27,538 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$$

Com isso, a partir da aplicação da fórmula para determinar o valor do K_{md} e sucessivamente para o valor de K_z , calcula-se também a área de aço necessária (A_s), como mostrado a seguir.

$$K_{md} = \frac{M_d}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad (5-5)$$

$$K_z = 0,5 + \sqrt{0,25 - \frac{K_{md}}{1,7}} \quad (5-6)$$

$$A_s = \frac{M_d}{f_{yd} \cdot K_z \cdot d} \quad (5-7)$$

Com isso, se obtém os valores calculados para as Equações (5-5), (5-6) e (5-7).

$$K_{md} = \frac{M_d}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{27,538}{1,0 \cdot 0,10^2 \cdot 28570} = 0,0960$$

$$K_Z = 0,5 + \sqrt{0,25 - \frac{K_{md}}{1,7}} = 0,5 + \sqrt{0,25 - \frac{0,0960}{1,7}} = 0,94$$

$$A_s = \frac{M_d}{f_{yd} \cdot K_Z \cdot d} = \frac{27,538}{43,478 \cdot 0,94 \cdot 0,1} = 6,740 \text{ cm}^2/\text{m}$$

A armadura para a laje deve atender aos requisitos de percentual mínimo e máximo de área de concreto para o f_{ck} adotado, conforme mostrado nas Equações (5-8) e (5-10), respectivamente.

$$\%_{\text{mínimo}} \text{ para concreto } f_{ck} = 40 \text{ MPa} = 0,179\%$$

$$A_{s,\text{mínimo}} = 0,00179 \cdot b \cdot h \quad (5-8)$$

$$A_{s,\text{mínimo}} = 0,00179 \cdot 100 \cdot 15 = 2,685 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$A_s \geq A_{s,\text{mínimo}}$$

$$A_{s,\text{máximo}} = 4\% A_c = 0,04 \cdot b \cdot h = 0,04 \cdot 100 \cdot 15 = 60 \text{ cm}^2/\text{m} \quad (5-9)$$

Com isso, a área de aço calculada (A_s) é utilizada para determinar o número de barras necessárias e seus espaçamentos, conforme demonstrado a seguir.

$$A_{\emptyset 10} = 0,785 \text{ cm}^2$$

$$N_{\text{barras}} = \frac{A_s}{A_{\emptyset 10}} = \frac{6,740}{0,785} = 8,587$$

Devem ser adotadas, portanto, nove barras de aço de 10 mm de diâmetro, e o espaçamento entre elas deve ser calculado de acordo com a Equação (5-10).

$$e = \frac{100}{N_{\text{barras}}} \quad (5-10)$$

Com isso, obtém-se o seguinte valor para o espaçamento:

$$e = \frac{100}{N_{\text{barras}}} = \frac{100}{9} = 11,11 \text{ cm}$$

Com isso, a armadura necessária para suportar os esforços oriundos do empuxo d'água sobre a estrutura do píer flutuante de concreto pode ser adotada como:

$$\emptyset_{10} \text{ c/ } 10,0 \text{ cm}$$

Com base nos cálculos da armadura, verifica-se que é possível utilizar a armadura dimensionada, atendendo às áreas de armadura mínima e máxima da NBR 6118:2023. Portanto, a estrutura é considerada aceitável.

Uma vez que se tenha definido a espessura da laje que compõem a viga caixão que forma o píer, calcula-se o peso próprio da estrutura a partir do volume conhecido de concreto. O valor do peso próprio será abordado de duas formas: (1) leve, que se refere ao peso próprio da estrutura de concreto armado somado ao peso próprio do isopor em seu interior e o *outfit* (cabos, ganchões etc.); e (2) Peso Massa total, que se refere ao peso leve acrescido da carga de equipamentos, tais como empilhadeiras, pessoas e seus equipamentos, e a carga aplicada no convés do píer. A fim de deixar clara a composição de cada um desses pesos, a Tabela 5-1 apresenta a composição de cada um e os seus respectivos valores.

Tabela 5-1 – Massas para as condições de peso leve e peso total do píer flutuante de concreto armado.

Componentes	Massa
Concreto Armado:	51,855 t
Isopor de alta densidade:	1,415 t
Outfit (cabos, ganchos, cabeços):	6,000 t
Massa para a condição de peso leve do píer flutuante:	59,270 t
Pessoas e seus equipamentos:	0,500 t
Empilhadeira semielétrica (x 2):	0,800 t
Paletes (8 paletes de 1t cada):	8,000 t
Massa para a condição de peso total do píer flutuante:	68,570 t

Fonte: Autoria própria.

A separação em dois valores de peso próprio é necessária para os cálculos dos esforços solicitantes, pois os efeitos de vento e corrente variam conforme o calado da embarcação for variando devido ao carregamento de seu convés, uma vez que apenas o peso leve é constante ao longo do tempo sobre a estrutura do píer.

5.1.2. DETERMINAÇÃO DO CALADO PARA O PÍER FLUTUANTE DE CONCRETO

Com o peso total estabelecido, conforme apresentado na seção 5.1.1, define-se o peso próprio de todo conjunto em capacidade máxima de operação de carga do píer flutuante. Esse peso da estrutura desloca um certo volume de água pelo princípio do empuxo de Arquimedes. Com isso, deve-se analisar quanto de altura (pontal) fica submerso para deslocar um determinado volume de água, que corresponde ao peso total definido para o píer carregado, garantindo, assim, a altura mínima para se atingir a flutuabilidade.

Conforme estabelecido na seção 3.3, para tornar o processo de determinação do calado mínimo mais abrangente para outras estruturas (que podem possuir geometrias mais complexas) utiliza-se o software *MaxSurf Modeler* (Bentley, 2018) para modelar a geometria do píer com o comprimento de 10 m e largura de 4,5 m e uma estimativa preliminar de 2 m de pontal (altura). A partir disso, gera-se no *MaxSurf Stability* (Bentley, 2018) a tabela da curva hidrostática do volume do píer. A curva hidrostática que caracteriza a embarcação ou, neste caso, o píer flutuante, é apresentada na Tabela 5-2.

Para a determinação do calado mínimo necessário para garantir a flutuação, deve-se consultar a Tabela 5-2, que descreve, a partir da geometria ou curva hidrostática, o calado medido à meia nau de 0,05 em 0,05 m, isto é, em cada fatia de 0,05 m são computadas as características geométricas da embarcação.

Tabela 5-2 – Curva hidrostática do píer flutuante de concreto.

Calado à meia-nau (m)	Deslocamento (t)	Calado à meia-nau (m)	Deslocamento (t)	Calado à meia-nau (m)	Deslocamento (t)
0,00	0,000	0,70	31,500	1,40	63,000
0,05	2,250	0,75	33,750	1,45	65,250
0,10	4,500	0,80	36,000	1,50	67,500
0,15	6,750	0,85	38,250	1,55	69,750
0,20	9,000	0,90	40,500	1,60	72,000
0,25	11,250	0,95	42,750	1,65	74,250
0,30	13,500	1,00	45,000	1,70	76,500
0,35	15,750	1,05	47,250	1,75	78,750
0,40	18,000	1,10	49,500	1,80	81,000
0,45	20,250	1,15	51,750	1,85	83,250
0,50	22,500	1,20	54,000	1,90	85,500
0,55	24,750	1,25	56,250	1,95	87,750
0,60	27,000	1,30	58,500	2,00	90,000
0,65	29,250	1,35	60,750	-	-

Fonte: Autoria própria.

Para fins de flutuabilidade, o calado mínimo deve ser aquele que atenda a estrutura quando totalmente carregada, logo o peso a ser consultado na tabela deverá ser o peso referente ao peso total da estrutura. Conforme visto na seção 5.1.1, a massa para a condição de peso total do píer flutuando com carregamento é de 68,570 t, porém esse valor não existe na tabela, por isso deve-se fazer a interpolação para determinar o valor de calado ou utilizar um valor imediatamente maior. Ao se fazer a interpolação, determina-se um calado máximo para o píer de 1,524 m e uma sobrecarga de operação de 2,07 kN/m².

A partir do valor mínimo do calado para garantir a flutuação do píer flutuante, faz-se o acréscimo de 0,45 m de borda livre ao mesmo e arredonda-se para o valor múltiplo de 0,10

acima, visando, assim, determinar o pontal do píer que seja de fácil execução. Com isso, o pontal do píer é determinado pela Equação (5-11).

$$Pontal = Calado + Borda Livre \quad (5-11)$$

Ao aplicar-se o valor encontrado para o calado mínimo e o valor estabelecido para a borda livre mínima na Equação (5-11), tem-se que:

$$Pontal = 1,524 + 0,450 = 1,974 \text{ m}$$

$$Pontal_{adotado} = 2,00 \text{ m}$$

Por fim, a Figura 5-3 ilustra o píer flutuante de concreto com as suas respectivas dimensões finais para verificação da estabilidade estática e para os cálculos de solicitações de esforços atuantes sobre a estrutura.

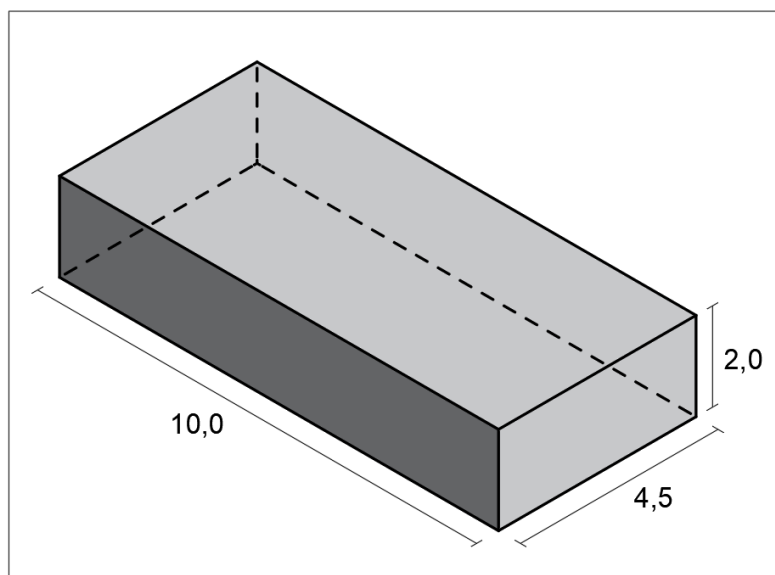


Figura 5-3- Dimensões da estrutura do píer flutuante de concreto em metros.

Fonte: Autoria própria.

5.2. VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE ESTÁTICA DA ESTRUTURA DO PÍER FLUTUANTE

Nesta seção, será apresentada a aplicação da metodologia contida na seção 3.4 do estudo. Para isso, serão realizadas duas análises com o software *MaxSurf Stability* (Bentley, 2018). A primeira análise será de estabilidade estática para a condição leve e, a segunda análise, para a condição carregada do píer flutuante. Ao se obter os parâmetros desejados para cada uma dessas condições, verifica-se se elas estão de acordo com os critérios estabelecidos pela NORMAM Nº 202 de 2024 (Marinha, 2024) para garantir uma operação segura.

5.2.1. CONDIÇÃO DE PESO LEVE DO PÍER

Para a condição de peso leve, os dados são obtidos a partir da Tabela 5-1 e aplicados no programa com suas respectivas coordenadas com origem na ré do píer a meio calado, conforme ilustrado na Tabela 5-3.

Tabela 5-3 – Entrada de dados no *Maxsurf Stability* para a condição de peso leve.

Item	Quant.	Massa (t)	Massa total (t)	Alavanca longitudinal (m)	Alavanca transversal (m)	Alavanca vertical (m)
Concreto armado	1,00	51,855	51,855	5,000	0,000	1,000
Isopor de alta densidade	1,00	1,415	1,415	5,000	0,000	1,000
Outfit	1,00	6,000	6,000	5,000	0,000	1,000
Peso leve	-	-	59,270	5,000	0,000	1,000
Fluido (água doce)	-	-	-	-	-	1,000

Fonte: Autoria própria.

Com isso, o programa pode rodar e fornecer o gráfico da curva de estabilidade estática do píer flutuante de concreto para a condição de peso leve, conforme ilustrado na Figura 5-4.

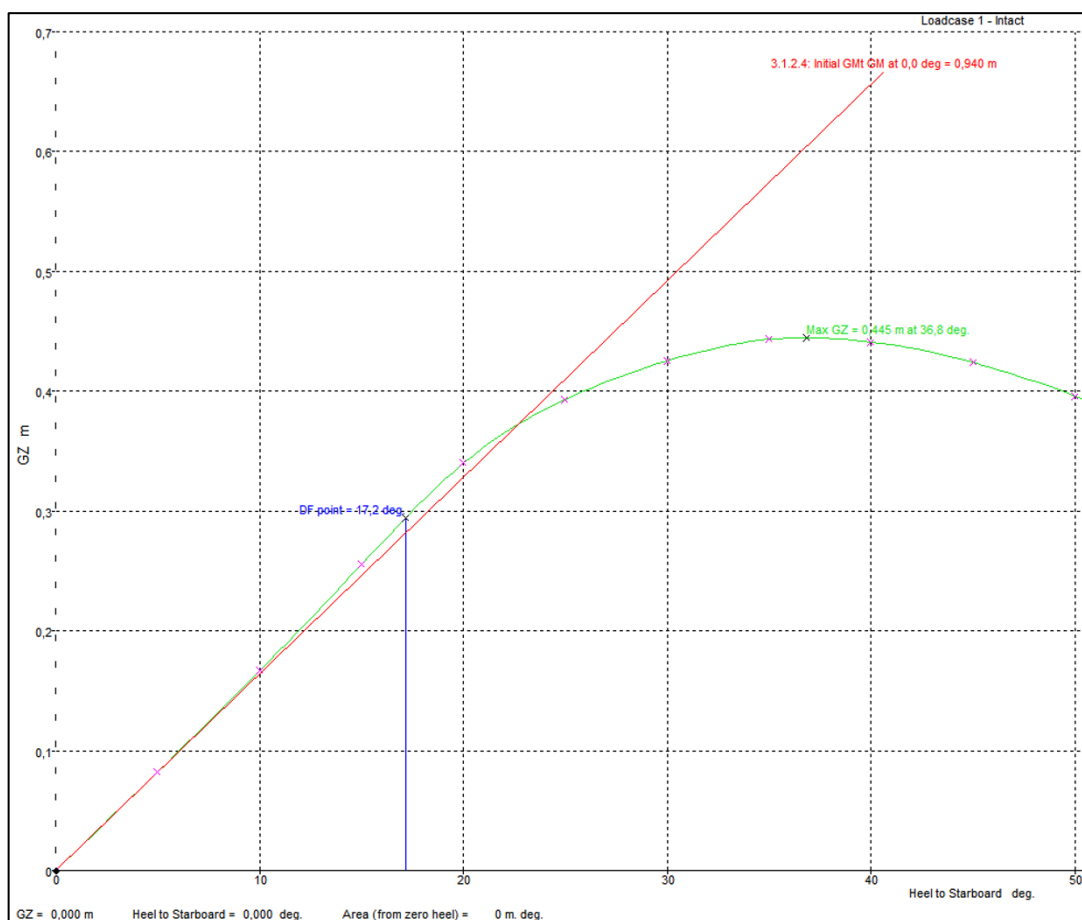


Figura 5-4- Gráfico da Curva GZ de estabilidade do píer para condição de peso leve.

Fonte: Autoria própria.

A partir do gráfico da curva de estabilidade estática apresentado na Figura 5-4, pode-se estabelecer os valores por meio da utilização do programa para a estrutura e as suas margens ou folgas, entre o valor calculado para o valor mínimo estabelecido para os seus respectivos critérios, como apresentado na Tabela 5-4, que apresenta os critérios a serem atingidos conforme estabelecidos na seção 3.40.

Tabela 5-4 – Verificação dos critérios de estabilidade do píer no *Maxsurf Stability* para a condição de peso leve.

Critério	Valor mínimo (critério)	un.	Valor calculado	Condição	Margem (%)
GZ máximo entre 0° e 90°	0,20	m	0,45	Atende	122,50
Ângulo máximo de GZ	25,00	deg (°)	36,80	Atende	47,20
GMt inicial	0,35	m	0,94	Atende	168,57

Fonte: Autoria própria.

5.2.2. CONDIÇÃO DE PESO TOTAL DO PÍER

Já para a condição de peso total, tem-se os dados obtidos a partir da Tabela 5-1, isto é, o peso leve acrescido das sobrecargas (Cargas e empilhadeiras). Com isso, esses dados são aplicados no programa com suas respectivas coordenadas do ponto de aplicação, centro de massa de cada componente, isto é, o peso leve acrescido as sobrecargas (Cargas e empilhadeiras) com origem na ré do píer a meio calado. Com isso, esses dados são aplicados no programa com suas coordenadas do ponto de aplicação do centro de massa de cada componente, conforme ilustrado na Tabela 5-5.

Tabela 5-5 – Entrada de dados no *Maxsurf Stability* para a condição de peso total.

Item	Quantidade	Massa (t)	Massa total (t)	Alavanca horizontal (m)	Alavanca transversal (m)	Alavanca vertical (m)
Peso leve	1,00	59,270	59,270	5,000	0,000	1,000
Carga (paletes + pessoas)	1,00	8,500	8,500	5,500	0,350	1,000
Empilhadeiras	1,00	0,800	0,800	8,000	2,000	0,700
Peso total	-	-	68,570	5,081	0,056	0,998
Fluido (água doce)	-	-	-	-	-	0,998

Fonte: Autoria própria.

Como realizado para a condição de peso leve, roda-se o programa para condição do píer carregado, a fim de fornecer o gráfico da curva de estabilidade estática do píer flutuante de concreto, para a nova condição de peso total conforme ilustrado na Figura 5-5.

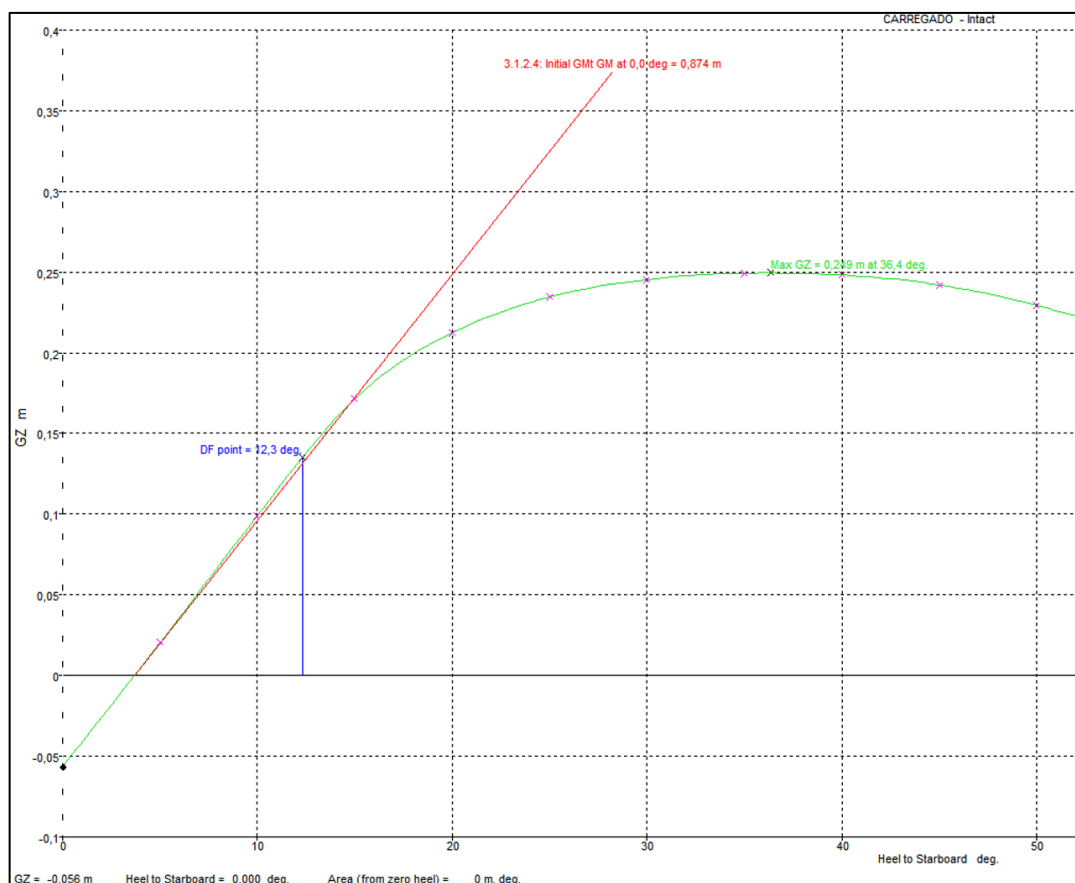


Figura 5-5- Gráfico da Curva GZ de estabilidade do píer para condição de peso total.

Fonte: Autoria própria.

Por fim, a partir do gráfico da curva de estabilidade estática apresentado na Figura 5-5, pode-se montar a Tabela 5-6, que mostra novamente os critérios a serem atingidos conforme a seção 3.4, assim como os valores calculados pelo programa para a estrutura e a suas respectivas margens, ou folgas entre o valor calculado para o valor mínimo estabelecido com os seus respectivos critérios.

Tabela 5-6 – Verificação dos critérios de estabilidade do píer no *Maxsurf Stability* para a condição de peso total.

Critério	Valor mínimo (critério)	un.	Valor calculado	Condição	Margem (%)
GZ máximo entre 0° e 90°	0,20	m	0,25	Atende	24,50
Ângulo máximo de GZ	25,00	deg (°)	36,4	Atende	45,46
GMt inicial	0,35	m	0,87	Atende	149,71

Fonte: Autoria própria.

5.3. APLICAÇÃO DO ANSYS FLUENT

Nesta seção do estudo apresentam-se os motivos pelos quais se escolhe o software *Ansys Fluent* para a realização da modelagem CFD do presente estudo e mostrar a aplicação da metodologia para a utilização do software, assim como a verificação e análise crítica dos resultados encontrados na modelagem CFD.

5.3.1. ESCOLHA DA UTILIZAÇÃO ANSYS FLUENT NO ESTUDO

Após a realização de pesquisas e leituras sobre diversas opções de softwares para aplicação de modelagem CFD, como está apresentado anteriormente no capítulo de revisão bibliográfica, a decisão de se utilizar o *Ansys Fluent* baseia-se em diversos fatores que contribuem para a sua utilização e implementação. Primeiramente, o *Ansys Fluent* fornece uma versão estudantil gratuita, o que facilita o acesso à ferramenta, possibilitando a sua utilização para fins acadêmicos. Entretanto, por ser uma versão estudantil, ela possui limitações em relação à versão padrão, sendo o limite de pontos permitidos para a geração da malha a mais significativa, o que pode influenciar diretamente na capacidade de refinamento de modelagem em alguns casos. O software também permite a utilização de modelos CAD para a modelagem da geometria da estrutura e da envoltória de análise ou domínio computacional, o que facilita muito a integração entre uma geometria modelada em um outro software de modelagem 3D ser exportada para a área de trabalho do *Ansys*, permitindo, assim, a utilização de superfícies já existentes ou mais refinadas e mais complexas.

Outro ponto significativo que contribui para a escolha deste software é a extensa comunidade de usuários na internet, por meio de fóruns, sites e algumas videoaulas sobre sua utilização e emprego, o que facilita o acesso, entendimento e domínio dos recursos disponíveis. A versatilidade do programa também permite a utilização de refinamentos adaptativos e o mapeamento detalhado de áreas de interesse da malha dentro do domínio computacional, o que é um dos aspectos importantes para alcançar a precisão das simulações realizadas.

Diante das considerações apresentadas nessa seção, escolhe-se o *Ansys Fluent* como a ferramenta para ser utilizada na realização da modelagem CFD, visando, assim, alcançar os objetivos estabelecidos no início do estudo.

5.3.2. APLICAÇÃO DO ANSYS FLUENT NA MODELAGEM CFD

Nesta seção, apresenta-se a aplicação das metodologias descritas na seção 3.7 para cada um dos passos realizados, assim como a implementação no programa, visando estabelecer todo o processo de sua utilização e implementação de forma clara.

O píer flutuante proposto segue as nomenclaturas utilizadas no meio naval ao tratar de suas dimensões e comportamento, por isso, para as dimensões do domínio computacional adota-se uma nomenclatura compatível para evitar confusões em relação às dimensões do píer flutuante e do domínio computacional, conforme ilustrado na Figura 5-6.

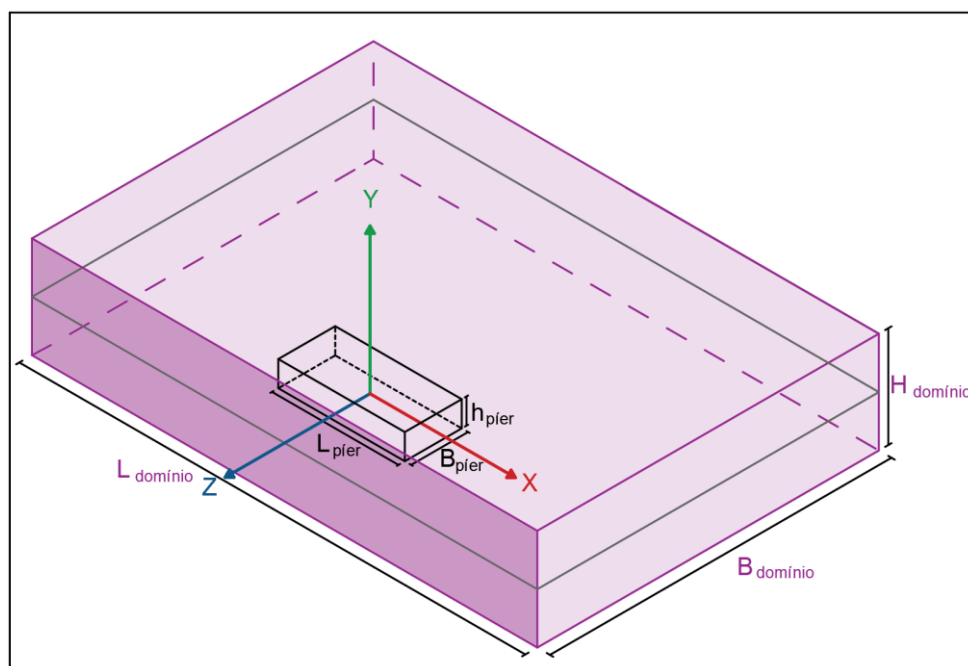


Figura 5-6- Nomenclatura e orientação de aplicação no *Ansys Fluent*.

Fonte: Autoria própria.

Ao se analisar a Figura 5-6, percebe-se que as dimensões longitudinais (X) e transversais (Z) do píer seguem a nomenclatura conforme a seção 2.4, com exceção da dimensão referente ao pontal (altura) do píer, fato esse, que está melhor explicado na seção 5.3.2.1. Outro fato a ser observado é a origem do modelo, isto é, o ponto (0,0) corresponde sempre ao centro de massa (G_{Pier}) do píer flutuante.

5.3.2.1. Geometria e domínio computacional

Ao seguir o que está estabelecido na seção 3.7.1, modela-se a geometria para cada um dos cenários para a seção do píer exposta aos efeitos de vento e corrente separadamente, visando aplicar o conceito de *Double Body* (corpo duplo) na análise. Por conta da utilização desse

conceito, a altura do píer fica dobrada para a geometria de análise (seção 3.7.1) e, por isso, sua nomenclatura foi adotada como $h_{píer}$, isto é, uma altura variável de acordo com condições de carregamento estabelecidas na seção 5.2. Em resumo, estas dimensões são referentes ao calado, que corresponde à altura de interface entre os dois fluidos (ar e água) no píer, para cada uma das condições de peso consideradas.

Para ilustrar de forma clara a geometria, adota-se como exemplo o Cenário 4 para a análise dos esforços oriundos dos efeitos de corrente, conforme a seção 4.4.4. Para isso, adotam-se as dimensões para o píer, de acordo a orientação apresentada na Figura 5-6 e ilustradas na Figura 5-7, a qual para fins de melhor visualização, não foi captada do *Ansys Fluent* devido à falta de resolução que impede determinar cada um dos componentes, sendo substituída por uma ilustração representativa.

Para a simulação do píer aplicada ao Cenário 4 em condição de peso leve, tem-se o peso para a condição leve (Tabela 5-3) e a curva de hidrostática do píer flutuante (Tabela 5-1). Com isso, o calado do píer pode ser determinado, assim como a borda livre (utilizada para calcular apenas os esforços oriundos do vento). Ao consultar a Tabela 5-1, pode-se observar que não há um valor para o calado referente a um deslocamento de 59,207 t, porém, como a geometria varia linearmente apenas com a variação no eixo vertical, realiza-se uma interpolação para definir o valor exato do calado. Caso a geometria não possua essa característica de linearidade, deve ser adotado o calado de valor imediatamente acima. Com isso, o calado do píer para o cenário 4 de solicitação de esforços oriundo de correntes para uma condição de peso leve é:

$$Calado_{peso\ leve} = 1,317\ m$$

$$h_{píer} = 2 \cdot Calado_{peso\ leve} = 2 \cdot 1,317 = 2,634\ m$$

$$L_{píer} = 10,0\ m$$

$$B_{píer} = 4,5\ m$$

Para o domínio computacional e para o sólido de refinamento da malha, adotam-se as dimensões conforme com os critérios apresentados na seção 3.7.1. Para a altura do domínio computacional, adota-se uma altura constante com base no pontal de 2,0 m do píer, conforme está mostrado a seguir.

$$H_{domínio} = 6 \cdot P_{píer} + P_{píer} = 6 \cdot 2 + 2 = 14,0\ m$$

$$L_{domínio} = 8 \cdot L_{píer} + L_{píer} = 8 \cdot 10 + 10 = 90,0\ m$$

$$B_{inlet} = 5 \cdot B_{pier} = 5 \cdot 4,5 = 22,5 \text{ m}$$

$$B_{outlet} = 14 \cdot B_{pier} = 14 \cdot 4,5 = 63,0 \text{ m}$$

$$B_{domímio} = B_{inlet} + B_{outlet} + B_{pier} = 22,5 + 63 + 4,5 = 90,0 \text{ m}$$

Já para o sólido utilizado para o refinamento da malha, sua altura pode variar, conforme se tenha os paletes acima do convés nos casos de análise de esforço de vento, mas como um valor generalista aplicado a quase todos os cenários, ou seja, sua altura é estabelecida deixando 1 m de folga para o eixo X em ambas as direções com base na medida do pontal (2 m) do píer, garantido que a estrutura do píer esteja totalmente envolta e com uma folga para um refinamento da malha à volta da estrutura, que corresponde a região de maior interesse para a análise.

$$H_{sup. \text{ refinamento}} = P_{pier} + 2 = 2 + 2 = 4,0 \text{ m}$$

$$L_{sup. \text{ refinamento}} = L_{domímio} + 10 = 90 + 10 = 100,0 \text{ m}$$

$$B_{sup. \text{ refinamento}} = B_{domímio} + 10 = 90 + 10 = 100,0 \text{ m}$$

A geometria do píer aplicada com o conceito de corpo duplo, da envoltória de análise e do sólido de refinamento é visualizada segundo a Figura 5-7 para sua respectiva aplicação.

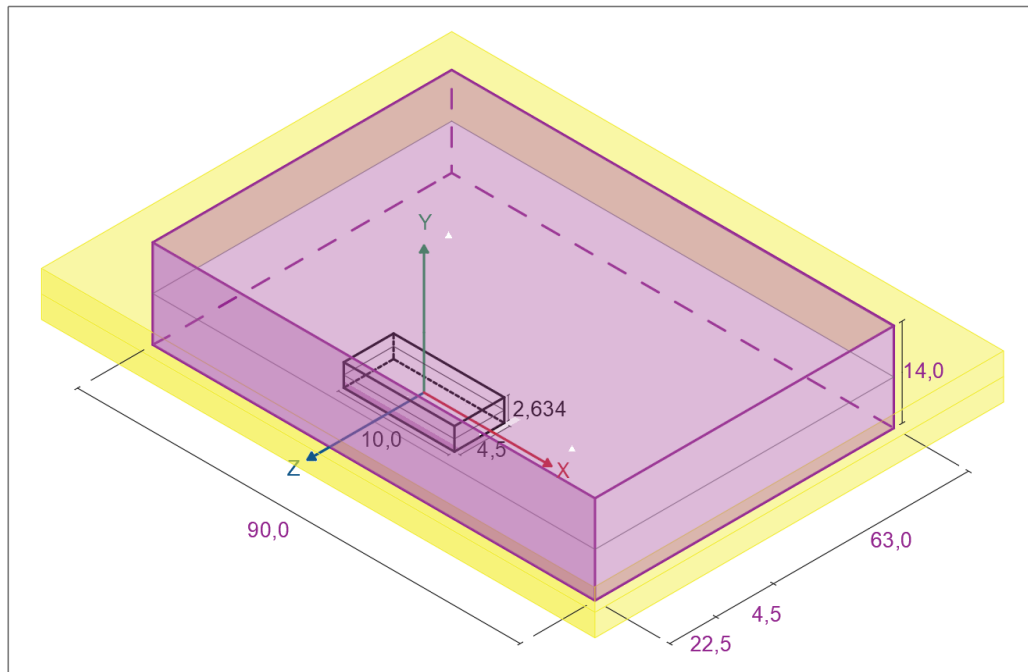


Figura 5-7- Exemplo do emprego da geometria para o cenário 4 em condição leve de carregamento.

Fonte: Autoria própria.

Vale ressaltar que, para a análise de esforços incidentes a 45° ou qualquer outro ângulo desejado, a estrutura do píer permanece na orientação estabelecida, enquanto a envoltória de análise é rotacionada, fazendo com que o vetor de incidência do fluido esteja rotacionado em relação aos eixos principais. Isso se faz necessário para facilitar a extração de dados futuramente, pois eles são obtidos a partir dos eixos principais. Caso o píer fosse rotacionado, as forças indicadas pelo programa teriam que ser decompostas para definir as forças resultantes nos eixos principais.

5.3.2.2. Geração da malha

Um dos pontos críticos de qualquer modelagem CFD recai sobre a malha utilizada para calcular os esforços desejados de forma precisa, isto é, uma malha capaz de simular a realidade da forma mais realista possível.

Para a aplicação neste estudo, deve-se levar em consideração que a versão utilizada do *Ansys Fluent* é limitada (versão estudantil) para o número de elementos ou pontos da malha (máximo de 1.048.576 elementos ou células). Diante disso, para este estudo as malhas são geradas sempre com o mesmo tamanho mínimo para cada um dos elementos que a compõem, visando resultados condizentes, uma vez que as geometrias analisadas para cada caso possuem dimensões equiparáveis. O valor para o tamanho mínimo de cada elemento que compõem a malha é de 0,85 m, pois com esse valor verifica-se que a malha gerada para cada cenário tenha um número de elementos similares, que fossem próximos e inferiores ao número máximo permitindo de elementos, visando um resultado com o mesmo nível de refinamento para todas as condições e cenários.

Após a geração da malha, especificam-se os nomes de cada uma das faces da geometria, para que na etapa de condição de contorno (seção 5.3.2.4) possam ser atribuídas condições de contorno para cada uma. Os componentes nomeados nessa etapa são: *Inlet*; *Outlet*; *Píer*; e *Wall* ou Parede. A Figura 5-8 ilustra a geometria recebida no *Ansys Meshing* (interface de geração de malhas do *Ansys*) dos componentes separadamente citados na seção 5.3.2.1, assim como o corpo único já com a malha gerada e aplicada sobre a geometria.

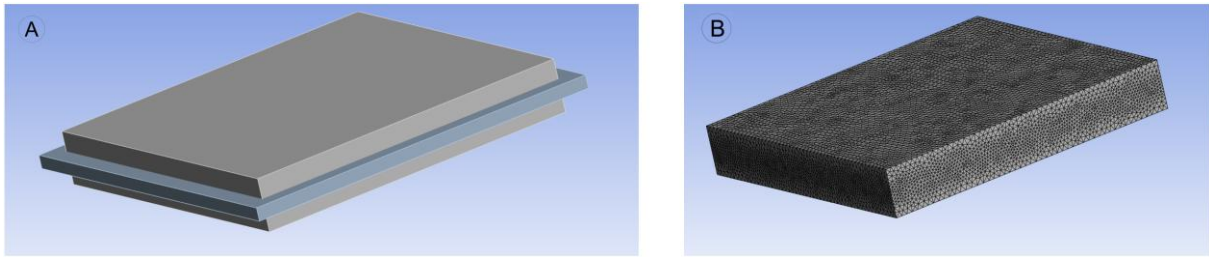


Figura 5-8- Geometria no *Meshing* antes da geração da malha (A) e malha (B).

Fonte: Autoria própria.

Após a geração da malha no *Ansys Meshing*, a malha deve ser carregada para o *Ansys Fluent*, onde é convertida para uma malha poliédrica, tornando-a mais favorável para a aplicação do VOF nas superfícies de controle, conforme ilustrado na Figura 5-9 com os seguintes componentes: *Inlet* (azul); *Outlet* (vermelho); Píer (cinza) e Wall ou Parede (cinza).

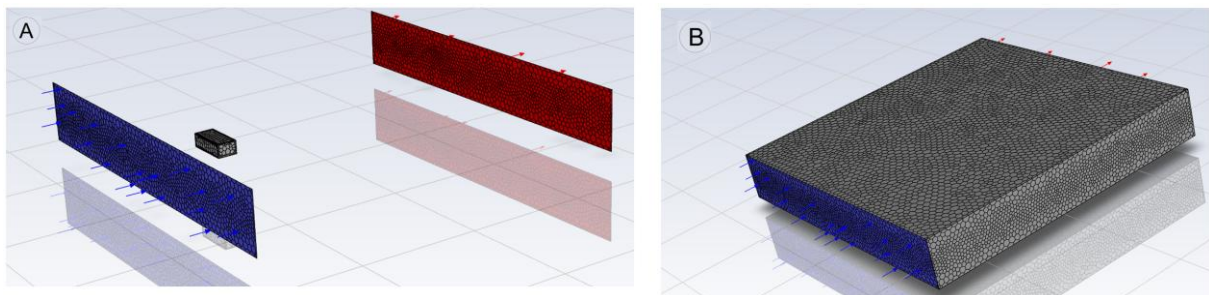


Figura 5-9- Malha poliédrica no *Fluent*: aberta com o píer, *inlet* e *outlet* (A) e malha fechada com *inlet*, *outlet* e as paredes do domínio (B).

Fonte: Autoria própria.

5.3.2.3. Modelo numérico

Para esta etapa da modelagem do píer flutuante no *Ansys Fluent*, adota-se o Método dos Volumes Finitos conforme a metodologia da seção 3.7.3. Com isso, seleciona-se esse modelo no programa, assim como a inserção das fases (fluidos), que são utilizadas durante a modelagem. De acordo com o estabelecido na seção 3.7.3, ser deve-se utilizar o modelo de turbulência *k- ω* , uma vez que este modelo é particularmente eficaz em capturar o comportamento da turbulência para a aplicação nesse estudo de caso. A Figura 5-10 ilustra a seleção desses modelos existentes para a modelagem assim como as fases adicionadas ao modelo.

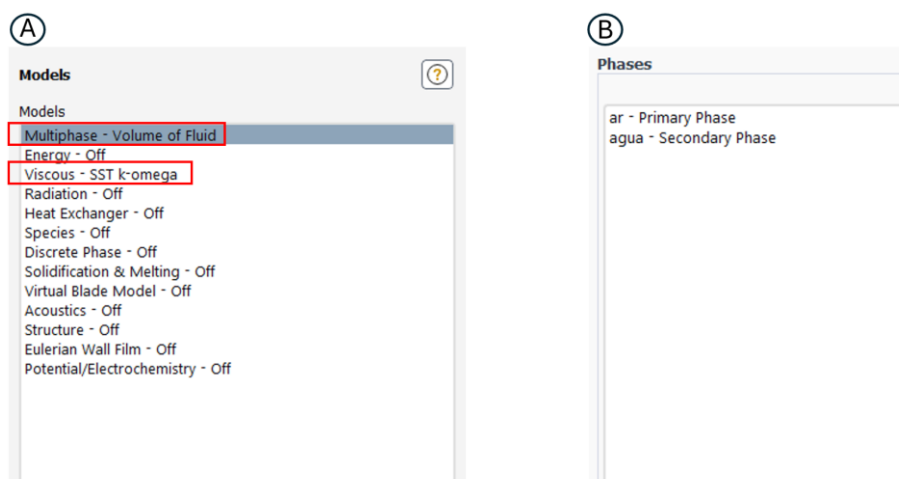


Figura 5-10- Escolha do método numérico (A) e Definição de cada fase ou fluido (B).

Fonte: Autoria própria.

5.3.2.4. Condições de contorno

Nesta etapa, inserem-se as condições de contorno para cada uma das superfícies geradas na seção 5.3.2.2 e características geométricas dos fluidos da seção 5.3.2.3, conforme a metodologia apresentada na seção 3.7.4. Dessa forma, estabelecem-se as seguintes condições de contorno:

- *Inlet*: Definido como a superfície de entrada do fluido, com a velocidade de vento ou corrente (ver qual esforço está sendo considerado), assim como sua direção e altura entre a base do domínio computacional e a superfície livre (linha d'água). Neste caso do estudo, como estão sendo analisados os esforços de água e ar separados, coloca-se a linha d'água na camada superior do domínio, garantido que o volume de análise esteja preenchido por um fluido.
- *Outlet*: Definido como a superfície de saída do fluido, em que se considera a pressão ambiente (101.325 Pa), permitindo o escoamento livre do fluido. Também se inserem os mesmos dados de alturas de interfaces do *inlet* com exceção da velocidade.
- *Paredes (Wall)*: São os limites laterais, inferior e superior do domínio, em que são aplicadas condições de não deslizamento, garantindo que a velocidade do fluido seja zero na sua interface com os fluidos. Neste contexto, é importante ressaltar que caso essas paredes estejam muito próximas da estrutura sinalizada, pode ocasionar um estreitamento do fluxo gerando turbulência excessiva, gerando resultados não fidedignos;
- *Estrutura, sólido ou píer*: Representa a geometria da estrutura do píer dentro do domínio computacional, a qual recebe uma condição de parede interna, similar ao da parede do

domínio, apresentando um comportamento de uma estrutura sólida estática na aplicação deste modelo.

- Fluidos: Estabelece-se a região de interação dos fluidos definidos e suas características são inseridas dentro das condições *Inlet e Outlet*, já descritas.

5.3.2.5. Critérios de convergência dos resíduos do modelo

Segundo a seção 3.7.5 do estudo, o critério de convergência adotado será de 1×10^{-3} para os seguintes resíduos: continuidade; velocidade no eixo X; velocidade no eixo Y; velocidade no eixo Z; k; Ω mega; e Vf-água. A Figura 5-11 demonstra a inserção do valor numérico estabelecido para cada um dos critérios de convergência mencionados.

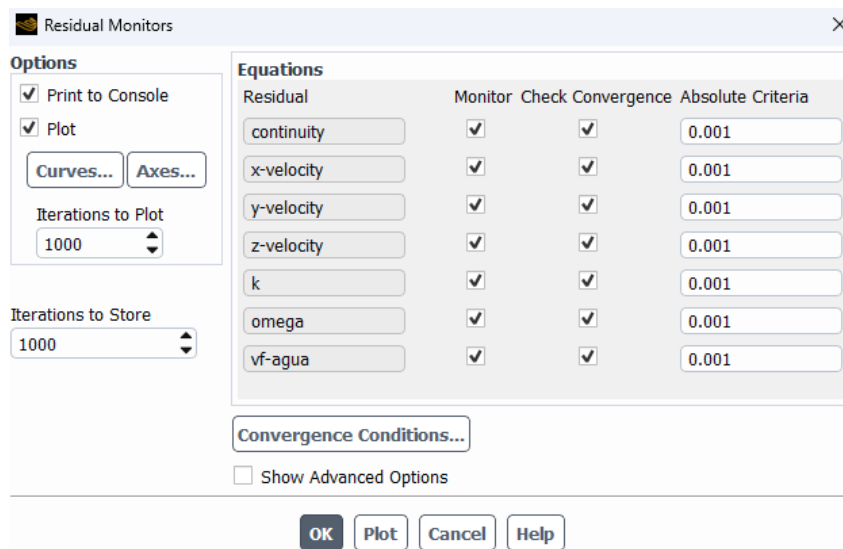


Figura 5-11- Valores dos resíduos atrelados aos critérios de convergência do modelo.

Fonte: Autoria própria.

5.3.2.6. Modelagem e resultados

Para enfim rodar o modelo, verificam-se todos os passos anteriores, visando detectar algum erro de entrada de dados conforme a seção 3.7.6. Com isso, insere-se um número de 1000 interações para iniciar o modelo. Após o término da simulação, extraem-se os dados a partir do *Ansys CFD Post*, em relação aos esforços transversais e longitudinais atuantes sobre a estrutura do píer, para cada cenário, e monta-se uma tabela para a verificação se os dados estão dentro dos requisitos esperados, para que sejam utilizados. A Figura 5-12 ilustra a interface gráfica do *Ansys CFD Post* com alguns dos resultados de comportamento hidrodinâmico da estrutura do píer flutuante.

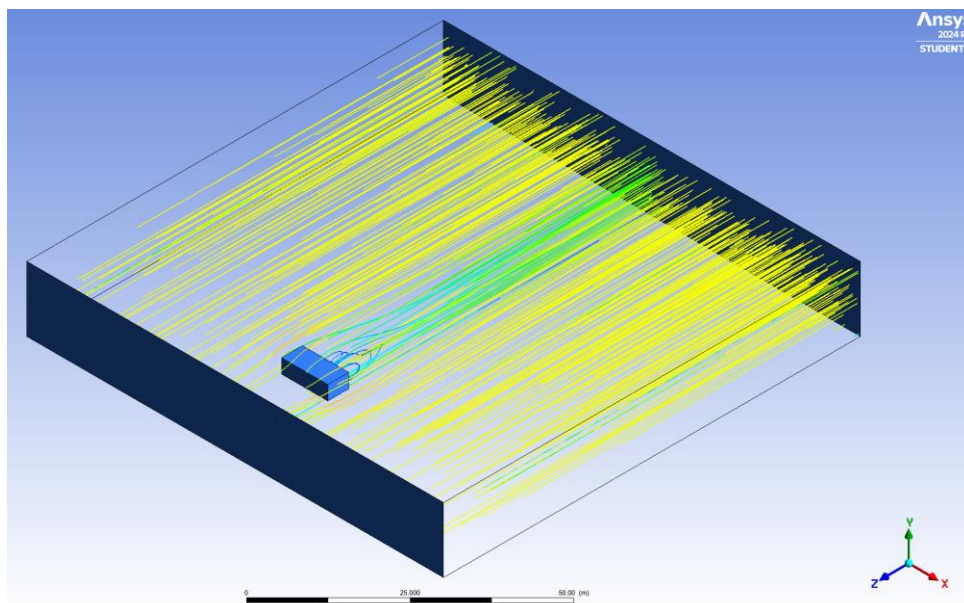


Figura 5-12- O píer no Ansys CFD Post após sua modelagem partir do cenário 4 com esforços de corrente atuando sobre o píer estando carregado.

Fonte: Autoria própria.

5.3.3. VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS DA MODELAGEM CFD

Para a análise da convergência dos resíduos do modelo, conforme apresentado na seção 3.8, deve-se verificar o número de iterações realizadas, pois se o modelo convergir antes do número total de interações inserido, o programa encerra a análise e apresenta os resultados. Verifica-se isso durante a realização da simulação, acompanhado os gráficos de resíduos, como ilustrado na Figura 5-13.

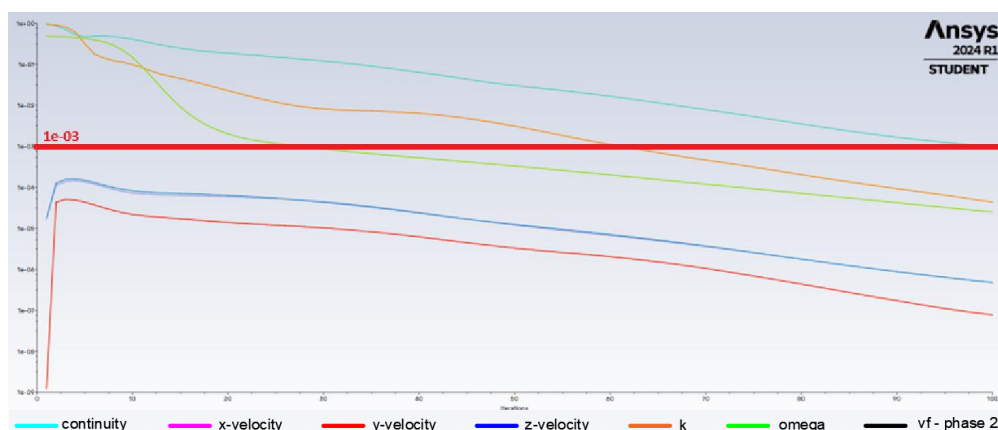


Figura 5-13- Gráfico para acompanhamento dos resíduos da modelagem.

Fonte: Autoria própria.

Já para a verificação da convergência das malhas entre os diferentes cenários de aplicação, visando simplificar o volume de verificações, selecionam-se os dois cenários mais críticos, pelo ponto de vista da geração e aplicação da malha em cada cenário. Com isso, a verificação ou análise de sensibilidade dos valores encontrados nesses cenários mais críticos são aqueles em que as dimensões do píer formam a maior área de superfície possível, pois quanto maior a área de superfície, mais pontos devem ser gerados para o modelo. Para isso, consideram-se os cenários com a maior área de superfície submersa e o outro com a maior área de superfície emersa, isto é, quando há o maior calado submetido aos esforços de corrente e quando houver paletes presentes no convés do píer que sofrem os esforços de vento. Os cenários que representam esses critérios estão, ambos, dentro da condição de peso total do píer. A Tabela 5-7 apresenta os resultados encontrados para o Cenário 2, uma vez que apresenta esforços nos eixos X e Z, isto é, esforços de vento e corrente para os eixos longitudinais e transversais.

Tabela 5-7 – Verificação dos critérios de convergência da malha.

Cenários		Tamanho do elemento (m)	Nº de elementos da malha	Nº de nós da malha	Esforços Longitudinais (N)	Esforços Transversais (N)	Condição (variação $\leq 5\%$)
2	Vento	0,85	1.036.711	179.736,00	1.947,51	3.055,12	-
		0,86	1.006.745	174.617,00	1.940,73	3.011,75	-
	Variação	1,18%	2,89%	2,85%	0,35%	1,42%	Atende
2	Corrente	0,85	872595	151227	-22851,8	68838,5	-
		0,86	844617	146473	-22390,8	68630	-
	Variação	1,18%	3,21%	3,14%	2,02%	0,30%	Atende

Fonte: Autoria própria.

Com isso, o cenário 2 deve ser o escolhido como o cenário que melhor representa os critérios mencionados para a realização da análise descrita, seguindo os critérios apresentados na seção 3.8.

Observa-se que os valores das diferenças residuais dos cenários para os esforços longitudinal e transversal dos cenários avaliados são inferiores a 5%, logo os resultados encontrados por parte da malha são considerados satisfatórios e podem ser aplicados para a comparação com os valores calculados pela ROM 2.0-11 (2012).

5.4. RESULTADOS OBTIDOS

Para a obtenção dos resultados a partir do emprego da ROM 2.0-11 (2012) e os resultados encontrados pelo *Ansys Fluent*, aplicam-se as metodologias contidas nas seções 3.5 e 3.7, isto é, as metodologias para os cálculos dos esforços oriundos da ROM 2.0-11 (2012) e a metodologia de aplicação do *Ansys Fluent*, respectivamente. Para facilitar a visualização dos

cenários de incidência de ações ambientais atuantes sobre o píer flutuante de concreto, a Tabela 5-8 indica os ângulos de incidência de cada ação ambiental sobre a estrutura do píer, conforme a categorização apresentada na seção 4.4 do estudo.

Tabela 5-8 – Orientações adotadas para a incidência das ações ambientais atuantes sobre o píer.

Cenários	Orientações adotadas	
	VENTO	CORRENTE
1	45°	90°
2	45°	135°
3	90°	225°
4	90°	90°

Fonte: Autoria própria.

Os resultados oriundos das aplicações das metodologias para os resultados encontrados por meio da ROM 2.0-11 (2012) e do *Ansys Fluent*, estão mostrados nas Tabela 5-9 e Tabela 5-10, que representam os esforços para os cenários onde o píer flutuante se encontra em condições de carregamento de peso leve e de peso total, respectivamente.

Tabela 5-9 – Resultados da ROM 2.0-11 e do *Ansys* para o píer em peso leve.

Cenários Peso Leve	Solicitações	VENTO		CORRENTE		ATRITO	
	Componentes	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
1	Forças calculadas ROM (N)	486,89	1081,97	0	73562,86	0	18,21
	Forças calculadas Ansys (N)	525,35	1221,98	-455,34	61107,5	-	-
2	Forças calculadas ROM (N)	486,89	1081,97	-19868,48	44152,19	-85,09	38,31
	Forças calculadas Ansys (N)	525,35	1221,98	-19596,25	57768,5	-	-
3	Forças calculadas ROM (N)	0	1440,71	-19868,48	-44152,1	-85,09	-38,31
	Forças calculadas Ansys (N)	0,3	1572,14	-19596,25	-57768,5	-	-
4	Forças calculadas ROM (N)	0	1440,71	0	73562,86	0	18,21
	Forças calculadas Ansys (N)	0,3	1572,14	-455,34	61107,5	-	-

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5-10 – Resultados da ROM 2.0-11 e do Ansys para o píer em peso total.

Cenários Peso total	Solicitações	VENTO		CORRENTE		ATRITO	
	Componentes	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
1	Forças calculadas ROM (N)	772,86	1799,76	0	91673,22	0	21,06
	Forças calculadas Ansys (N)	1947,51	3055,12	-34,36	73684,5	-	-
2	Forças calculadas ROM (N)	772,86	1799,76	-24428,28	54285,06	-98,47	44,31
	Forças calculadas Ansys (N)	1947,51	3055,12	-22851,75	68838,5	-	-
3	Forças calculadas ROM (N)	0	2624,08	-24428,28	-54285,06	-98,47	-44,31
	Forças calculadas Ansys (N)	-8,12	3170,96	-22851,75	-68838,5	-	-
4	Forças calculadas ROM (N)	0	2624,08	0	91673,22	0	21,06
	Forças calculadas Ansys (N)	-8,12	3170,96	-34,36	73684,5	-	-

Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, apresentam-se os resultados do estudo de maneira clara e organizada, permitindo a continuidade da pesquisa, com a avaliação, comparação e análise crítica dos resultados obtidos.

5.5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS VALORES ENTRE A MODELAGEM CFD E A ROM

Para o início da análise dos resultados obtidos por meio das duas metodologias empregadas, deve-se consultar a Tabela 5-11, que apresenta as variações percentuais absolutas entre as metodologias da ROM 2.0-11 (2012) e do *Ansys Fluent* para os cálculos dos esforços longitudinais e transversais para cada cenário proposto com base nas Tabela 5-9 e Tabela 5-10.

Tabela 5-11 – Variação percentual absoluta entre a ROM 2.0-11 e o Ansys, para o píer em ambas as condições de peso para o carregamento.

Cenários	Solicitações	VENTO		CORRENTE	
	Componentes	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
1	Peso leve	7%	11%	100%*	20%
2		7%	11%	1%	24%
3		100%*	8%	1%	24%
4		100%*	8%	100%*	20%
1	Peso total	60%	41%	100%	24%
2		60%	41%	7%	21%
3		100%*	17%	7%	21%
4		100%*	17%	100%*	24%

* Variação de 100% devido aos valores residuais serem comparados com um valor nulo.

Fonte: Autoria própria.

Ao considerar a condição de carregamento de peso leve do píer aplicada aos cenários de solicitação conforme a Tabela 5-11, observa-se que para os esforços incidentes de vento a 45° nos cenários 1 e 2, ambas as metodologias apresentam intensidades de força similares com variações em valores absolutos de 7% para a transversal e 11% para a longitudinal. Já para os esforços incidentes oriundos das correntes nos cenários 2 e 3, incidentes a 135° e 225° respectivamente, constata-se que há uma variação de 24% para os esforços transversais e uma variação de 1% para os longitudinais em valores absolutos.

Para os cenários de vento incidentes a 90°, observa-se que os resultados, para os cenários 1 e 2, apresentam variações absolutas de no máximo 8% para os esforços transversais. Contudo, para os esforços longitudinais, observa-se uma variação de 100% entre os resultados encontrados a partir das duas metodologias. Ao se observar os esforços oriundos das correntes nos cenários 1 e 4, ambos incidentes a 90°, constata-se que há uma variação de 20% para os esforços transversais e uma variação de 100% para os longitudinais.

Já para o caso de se considerar a condição de carregamento de peso total para o píer, aplicada aos cenários de solicitação de acordo com a Tabela 5-11, observa-se que para as ações incidentes de vento a 45° nos cenários 1 e 2, as metodologias apresentam desta vez, intensidades de força muito distintas. A discrepância em valores absolutos entre os resultados é de 60% para a transversal e 41% para a longitudinal. Contudo, para as ações incidentes oriundas das correntes nos cenários 2 e 3, incidentes a 135° e 225° respectivamente, constata-se que há uma variação de 21% para os esforços transversais e uma variação de 7% para os longitudinais.

Para os cenários de vento incidente a 90°, as metodologias demonstram resultados destoantes para os cenários 1 e 2, com variações de 17% para os esforços transversais e 100% para os esforços longitudinais. Ao se observar os esforços oriundos das correntes nos cenários 1 e 4, ambos incidentes a 90°, constata-se que há uma variação de 24% para os esforços transversais e novamente de 100% para os longitudinais.

Uma consideração em relação aos resultados apresentados é que embora nos cenários 3 e 4 para o vento e 1 e 4, para corrente, independentemente da condição de carregamento aplicada ao píer, indica-se uma variação de 100% para os seus respectivos esforços longitudinais ao comparar o resultado com a ROM 2.0-11 (2012), trata-se na verdade de um valor residual, isto é, um valor irrisório que pode ser desconsiderado. Isso se deve pela magnitude de seus valores, que não são representativas em termos absolutos, uma vez que 0,3 tende a zero quando aplicado a um cenário de intensidade de força na ordem superior a 10^3 , assim como, quanto à ordem de

grandeza face à intensidade de força longitudinal, quando comparada à intensidade encontrada para os esforços transversais.

A análise individual da variação de cada esforço permite identificar inconsistências nos resultados que, ao serem contemplados, mascaram os dados da realidade. Aplicada as devidas considerações aos resultados, é possível gerar a tabela de esforços atuantes totais sobre o píer, conforme a Tabela 5-12.

Tabela 5-12 – Comparação dos esforços atuantes totais entre a ROM 2.0-11 e o Ansys, para o píer em ambas as condições de carregamento.

Cenários	Condição	PESO LEVE		PESO TOTAL	
	Componentes	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
1	Forças totais ROM (N)	486,89	74663,04	772,86	93494,04
	Forças totais Ansys (N)	525,35	62329,48	1947,51	76739,62
	Variação	7%	20%	60%	22%
2	Forças totais ROM (N)	-19466,68	45272,47	-23753,89	56129,13
	Forças totais Ansys (N)	-19070,90	58990,48	-20904,25	71893,62
	Variação	2%	23%	14%	22%
3	Forças totais ROM (N)	-19953,57	-42749,70	-24526,75	-51705,29
	Forças totais Ansys (N)	-19596,25	-56196,37	-22851,75	-65667,54
	Variação	2%	24%	7%	21%
4	Forças totais ROM (N)	0,00	75021,78	0,00	94318,36
	Forças totais Ansys (N)	0,00	62679,64	0,00	76855,46
	Variação	-	20%	-	23%

Fonte: Autoria própria.

Diante da consideração realizada, pode-se chegar a algumas conclusões sobre os resultados obtidos. Para cenários onde a geometria da estrutura a ser analisada possua superfícies simples, sem sobreposição de estruturas e independentemente do ângulo em que incidam os esforços sobre a estrutura ser ortogonal ou não, isto é, os cenários aplicados sob o esforço de corrente e vento sem considerar a área de contribuição do paletes (carregamento leve), a discrepância varia entre 20 e 24%. enquanto para os cenários de vento com a presença do paletes (condição de carregamento total), a ROM 2.0-11 (2012) não contempla a área real dos paletes devido à utilização da sua projeção do plano. Com isso, apenas metade da área de influência do vento foi contemplada para o esforço transversal (4 paletes ao invés de 8) e um quarto da área de contribuição longitudinal (2 paletes de 8).

Outra constatação observada é a de que a metodologia da ROM 2.0-11 (2012) possui valores prefixados por meio de tabelas provenientes de ensaios de laboratório aplicados em certas condições e a geometrias majoritariamente com certas curvaturas (parte inferior do casco

de navios, a proa etc.). A metodologia da ROM 2.0-11 (2012), não permite que a estrutura seja considerada em sua totalidade, apenas a projeção da sua seção longitudinal ou transversal em seus respectivos planos. Isso pode gerar alterações na geometria real da estrutura, levando a resultados que se aproximam da realidade até certo grau, mas não representam de fato a condição real de solicitação.

Por fim, percebe-se que o *Ansys Fluent* considera efeitos hidrodinâmicos, como zonas de alta e baixa pressão, o que leva a esforços adicionais de arrasto que a ROM 2.0-11 (2012) não contempla e, por consequência, isso gera um aumento dos esforços de resistência ao avanço. Em casos de fluidos mais densos, esse efeito é significativamente maior em comparação a líquidos menos densos, o que faz com que a discrepância entre as duas metodologias na presença da água seja maior. Para visualizar esse efeito, ilustra-se o gradiente do ar ao interagir com a estrutura do paletes no *CFD-POST* do *Ansys* na Figura 5-14. Esse exemplo é mais adequado para visualizar o efeito devido a geometria mais complexa dos paletes face a estrutura de um paralelepípedo submerso na água. Contudo os efeitos sempre são mais significativos quando a água é empregada para a mesma estrutura face ao ar.

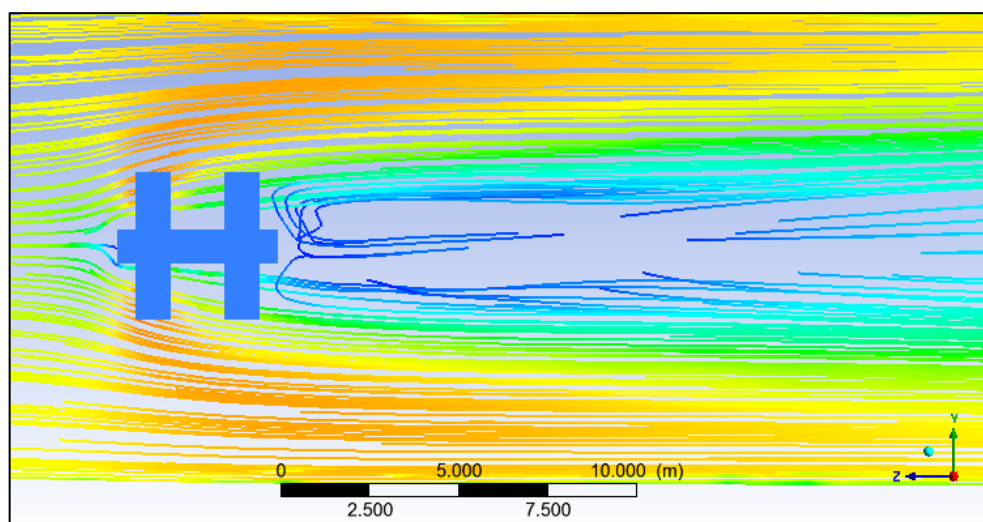


Figura 5-14- Gradiente do ar ao interagir com o píer com paletes em seu convés no modelo de corpo duplo.

Fonte: Autoria própria.

5.6. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE FUNDEIO

Para o dimensionamento do sistema de fundeio do píer flutuante de concreto, deve-se adotar a maior força ou carga atuante na estrutura em seus eixos transversais e longitudinais, independentemente dos cenários aos quais esteja vinculada, visando, assim, utilizar a

solicitação mais desfavorável para todos os esforços e direções no píer. Para determinar o valor máximo atuante nos eixos do píer flutuante, a Tabela 5-13 apresenta os valores atuantes máximos transversais e longitudinais para as condições de carregamento de peso leve e peso total, resultantes da ROM 2.0-11 (2012) e do *Ansys Fluent*. Outra informação contida na Tabela 5-13 são as forças máximas em módulo, uma vez que o sentido de atuação das forças, em seus respectivos eixos, é um fator relevante para a análise da intensidade da força atuante sobre a estrutura.

Tabela 5-13 – Valores máximos dos esforços solicitantes encontrados entre a ROM 2.0-11 e o *Ansys* atuantes sobre o píer flutuante.

Forças	Condição	PESO LEVE		PESO TOTAL	
	Componentes	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
Forças máximas ROM (N)		-19953,57	75021,78	-24526,75	94318,36
Forças máximas Ansys (N)		-19596,25	62679,64	-22851,75	76855,46
Forças máximas em módulo (N)		19953,57	75021,78	24526,75	94318,36

Fonte: Autoria própria.

Ao se observar a Tabela 5-13, pode-se determinar que o maior esforço atuante em qualquer eixo nas combinações dos diferentes cenários de solicitação para a Força de Tração de Projeto ($T_{Projeto}$) é de 94.318,36 N. Para fins de compatibilização de unidades comumente utilizadas em catálogos técnicos de equipamentos submarinos para emprego *offshore*, as forças são dadas em kN e, por isso, a Força de Tração de Projeto do sistema é:

$$T_{Projeto} = 94.318,36 \text{ N} = 94,318 \text{ kN}$$

Em relação às poitas, quatro poitas devem ser empregadas, pois, durante o período de seca, o fenômeno do remanso é recorrente, que se caracteriza por um vórtice rotacional, trazendo uma carga a jusante da embarcação. Por isso, a necessidade de empregar quatro poitas, sendo duas na frente e duas a ré, garantindo que o píer flutuante permaneça estável e seguro em todas as condições de solicitações de esforços ambientais atuantes. Esse fenômeno tem seus efeitos contemplados no Cenário 3 de solicitações na seção 4.4.3.

Ao se utilizar quatro poitas ao invés de duas, a área de passeio do píer é restringida, uma vez que os cabos ficam intertravados em cruz, em ambas as extremidades, ao longo do eixo longitudinal. Contudo, para o cálculo dos cabos ou amarras, consideram-se apenas duas poitas, visando a segurança do sistema, visto que são duas poitas solicitadas simultaneamente, uma vez que duas estão sendo tracionadas e duas tem seus cabos sem força de tração atuantes, deixando os cabos aliviados (sem esforços).

Ao consultar a seção 4.1, caracteriza-se que o rio na região de estudo apresenta uma variação no seu nível d'água entre os períodos de seca e de cheia anuais de 16 m. Com isso, considera-se que o píer funciona com quatro guinchos manuais, fixados cada um a 60 cm das bordas das faces longitudinais do píer.

Os guinchos são equipamentos pertencentes à embarcação, isto é, não são atrelados ao sistema de fundeio. O emprego desse equipamento permite recolher ou liberar trechos dos cabos de amarração, o que torna o comprimento da perna do fundeio variável. Essa característica permite ao píer flutuante se adaptar a diferentes níveis d'água de forma prática ao longo do ano, além de permitir um posicionamento mais preciso. Contudo, a utilização desses guinchos requer uma especificidade, uma vez que o soquete do cabo de aço deve estar presente em apenas uma das pontas do cabo, deixando a segunda ponta livre para ser instalada no tonel do guincho.

Para fins práticos, a fim de evitar desgastes prematuros ou efeitos de fadiga nos cabos e nos demais componentes, o *layout* proposto para o sistema de fundeio deve ser composto por 4 pernas de cabos de aço com travamento cruzado com suas quatro poitas a distância de, no mínimo, uma vez o comprimento longitudinal LWL da estrutura flutuante a ser ancorada. Também deve-se instalar as poitas de modo que os olhais (elos de conexão das poitas) das poitas, não ultrapassem a projeção longitudinal da embarcação, a fim de evitar que embarcações que estejam se aproximando possam danificar os cabos do sistema de ancoragem, como ilustrado nas Figura 5-15 e Figura 5-16.

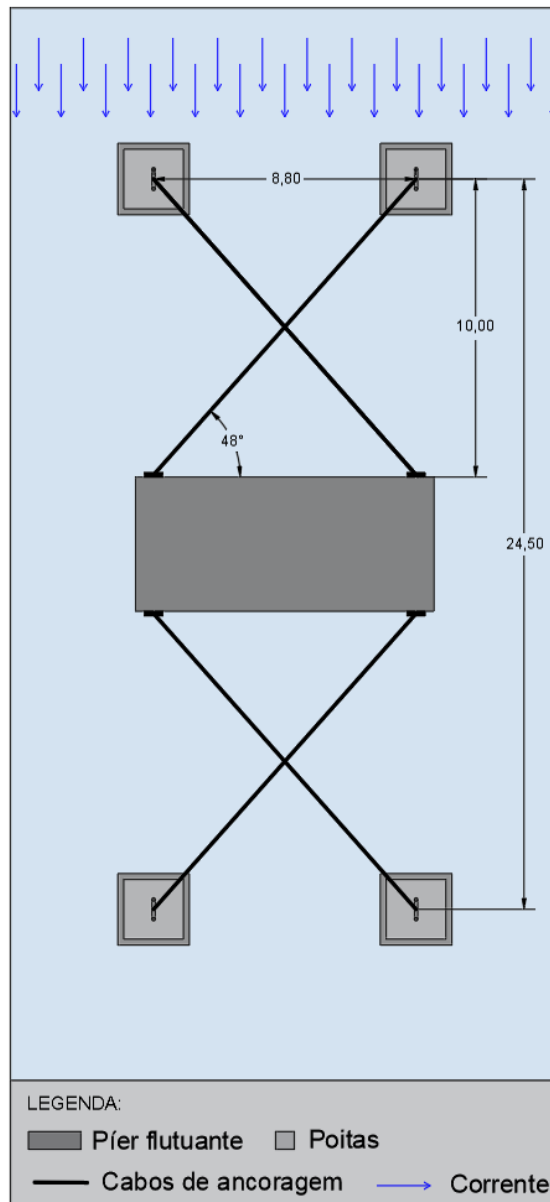


Figura 5-15- Vista superior do *layout* do sistema de fundeio proposto.

Fonte: Autoria Própria.

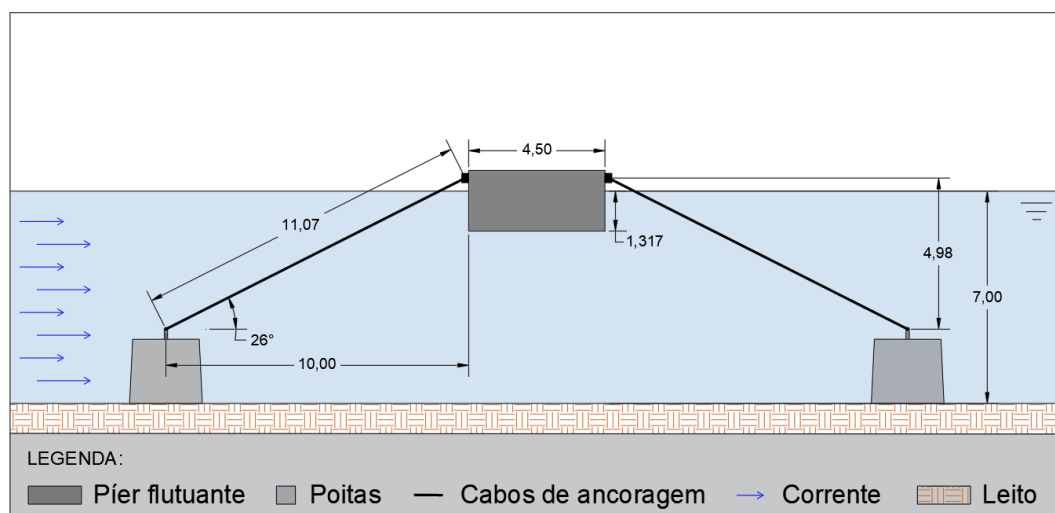


Figura 5-16- Corte transversal do *layout* do sistema de fundeio proposto em período de seca.

Fonte: Autoria Própria.

O *layout* apresentado para o sistema de sistema de fundeio pode ser concebido com base em duas premissas: (1) O sistema de ancoragem proposto é de uso exclusivo do píer flutuante de concreto, sendo vetada a atracagem de embarcações no píer. As demais embarcações devem ter um sistema exclusivo e totalmente independente para operação no píer flutuante. (2) O modelo de *Ferry Boat* adotado para exemplificar a utilização e operação do píer flutuante é o *Modular Ferry 2412* (Damen, 2024), ilustrado na Figura 5-17. Essa embarcação possui rampas para auxiliar o processo de carga e descarga e apresenta um calado máximo de 1,8 m quando totalmente carregada. Contudo, as demais características relacionadas à atracação, manobrabilidade e operação da embarcação, devem ser desprezadas.



Figura 5-17- Embarcação do modelo Modular Ferry 2412.

Fonte: Damen (2024).

Com base nas premissas apresentadas em relação ao emprego e utilização do sistema de fundeio, assim como, em relação à embarcação apresentada, a Figura 5-18 ilustra a operação do píer quando operado em conjunto com o *Ferry 2412* e uma embarcação local para o translado final para a margem. O píer flutuante deve ficar fundeado afastado da margem para evitar efeitos hidrodinâmicos presentes nas margens dos rios, assim como evitar que o *Ferry Boat* chegue perto das margens, onde há detritos e árvores que possam danificá-lo. Conforme o nível do rio se eleve, ele vai avançando e submergindo estruturas fixas, arvores, matérias orgânicas etc. que são uma fonte potencial para danificar embarcações que naveguem sobre esses objetos.

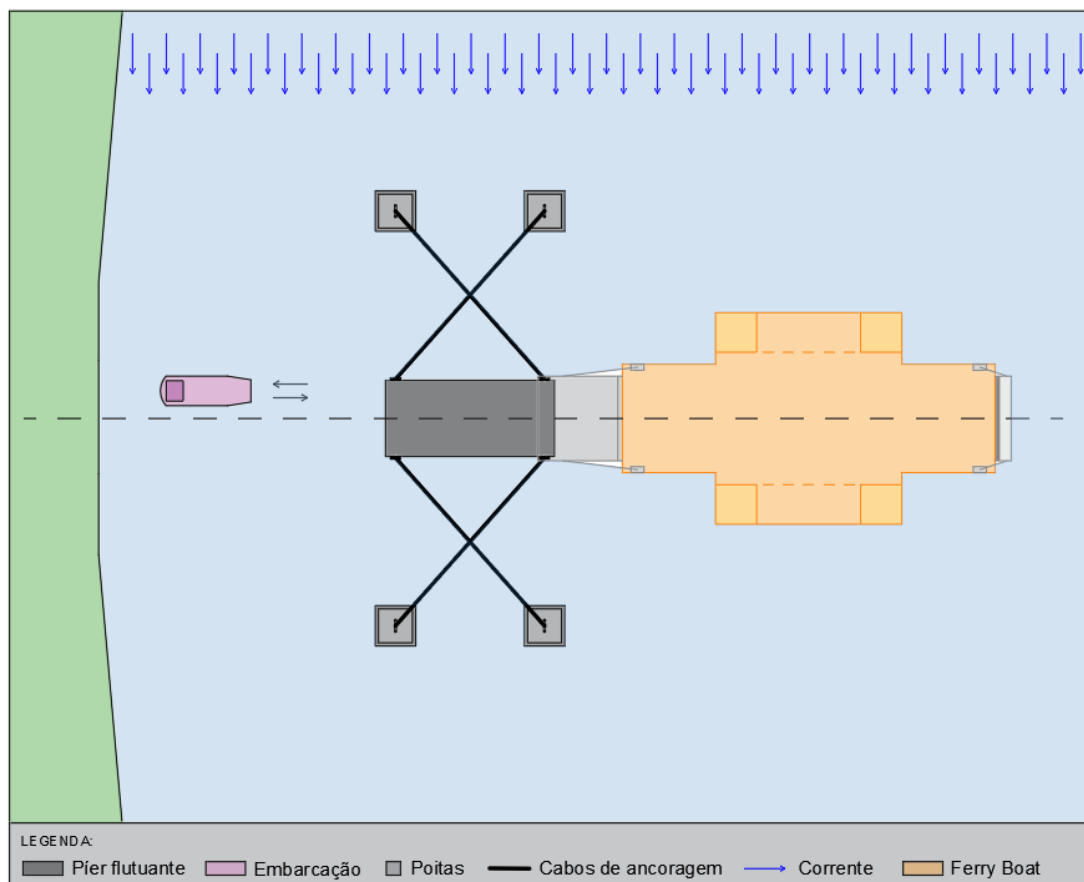


Figura 5-18- Layout do sistema de fundeio proposto.

Fonte: Autoria Própria.

Para Tsinker (2004) e conforme a metodologia apresentada na seção 3.10, a força de ruptura para os componentes, que compõem o sistema de fundeio, devem seguir a Equação (3-15), que ao ser manipulada algebricamente, fornece a Força de Ruptura ($T_{Ruptura}$) a ser atendida por todos os componentes, como se segue:

$$T_{Projeto} = T_{Ruptura} \cdot 0,35$$

$$T_{Ruptura} = \frac{T_{Projeto}}{0,35}$$

$$T_{Ruptura} = \frac{T_{Projeto}}{0,35} = \frac{94,318}{0,35} = 269,48 \text{ kN}$$

Um aspecto a ser considerado é o peso dos cabos, que não é considerado neste dimensionamento, pois já foi computado na Tabela 5-1 como parte do conjunto do píer, e considerando aspectos de segurança, seu peso não é considerado ao conjunto das poitas, tornando o sistema mais conservador, uma vez que, no caso de ser computado, está contribuindo para o acréscimo do peso próprio do conjunto das poitas.

Para o *layout* proposto na Figura 5-15, observa-se que os cabos se encontram inclinados a 48° em relação a face do píer onde são fixados no plano horizontal. A decomposição das forças no plano vertical não deve ser considerada, pois além da variação do nível do rio fazer a sua intensidade variar ao longo do ano e no caso de ruptura de um dos cabos, para não se considerar a sua decomposição, então o cabo remanescente deve ter a capacidade de suportar esforços maiores, a fim de manter a capacidade do sistema em fundear o píer em casos extremos. Diante das contatações apresentadas, pode-se aplicar a decomposição apenas no plano horizontal para encontrar a força de tração atuante, considerando situações em que haja apenas um dos cabos em condição de operação, a favor da segurança, conforme mostrado a seguir:

$$T_{cabo} = T_{Ruptura} \cdot \sin 48 = 269,48 \cdot 0,743 = 200,22 \text{ kN}$$

Por fim, ao implementar a metodologia para dimensionamento das poitas (seção 3.10), Myers, (1969) considera que as poitas de concreto possuem uma resistência ao arrasto de cerca de 50% do seu peso próprio fora da água. Como devem ser consideradas duas poitas para manter o píer fundeado, as duas poitas juntas deverão ter, no mínimo, o peso equivalente ao T_{cabo} , isto é, um peso de 200,22 kN para cada poita. Para fins de simplificação, deve-se considerar 210 kN para a aplicação do critério de dimensionamento de poitas, o que faz com que cada poita tenha uma massa de no mínimo 42 t, a fim de garantir que o píer flutuante de concreto tenha uma ancoragem adequada ao leito do rio e uma área de passeio mais limitada, o que proporciona uma operação mais segura e estável para os usuários.

Uma vez que se tenha o *layout* especificado, conforme ilustrado na Figura 5-18, deve-se enumerar e especificar os demais componentes que compõem o sistema para o fundeio do píer

flutuante, que são: manilhas, destorcedores, cabos de aço com seus respectivos soquetes (em uma ponta apenas) e os guinchos manuais.

Para o sistema de amarração do píer devem ser utilizados cabos de alta resistência projetados para aplicações marítimas Classe 6x19, cuja resistência vinculada ao seu diâmetro seja igual ou superior ao valor da Força da Ruptura. Ao consultar o catálogo da fornecedora Portella Cabos de Aço, conforme ilustrado na Figura 5-19, o valor a ser adotado para o diâmetro do cabo de aço é de 3/4”.

REF	Diâmetro		Massa aprox. em kg/m	Ruptura min. (kN)	
	mm	pol		IPS (1770 N/mm ²)	EIPS (1960 N/mm ²)
galv-CA500064-619AACI-1-1-1-4	16,0	5/8"	1,058	-	187,0
galv-CA500064-619AACI-1-1-1-5	19,0	3/4"	1,496	-	268,0
galv-CA500064-619AACI-1-1-1-6	22,0	7/8"	2,036	-	361,0
galv-CA500064-619AACI-1-1-1-7	26,0	1"	2,746	-	470,0
galv-CA500064-619AACI-1-1-1-8	29,0	1.1/8"	3,447	-	590,0

Figura 5-19- Adaptação do catálogo de cabos de ação para aplicações marítimas Classe 6x19.

Fonte: Portella (2024).

Consultando o *Design manual* 26.6, tem-se que a amarra com carga de ruptura equivalente ou superior ao cabo de 3/4” é a de 7/8” que suporta 208,65 kN. A partir disso, todos os componentes deverão ser adotados para o tamanho de 7/8”, conforme a Tabela 5-14.

Tabela 5-14 – Especificação dos componentes do sistema de fundeio.

Lista de Material			
Item	Descrição	Quant.	Unidade
1	Poita 42 t	4	-
2	Manilha 7/8”	8	-
3	Destorcedor 7/8”	4	-
4	Cabo de aço Classe 6x19 de 3/4” c/ soquete em uma extremidade	120	m
5	Guincho WW2000A para cabo de 3/4”	4	-
6	Cabeço de amarração JIS F 2001 – SWL 29kN	4	-

Fonte: Autoria própria.

Pode-se concluir com base nos critérios de dimensionamento apresentados e nos cálculos dos esforços para a ancoragem do píer flutuante, que o conjunto das quatro poitas do fundeio do píer possui a capacidade de fixação em qualquer direção de uma massa de 42 t.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho de dissertação teve como objetivo geral propor uma abordagem computacional para um píer modular flutuante e o dimensionamento do seu sistema de fundeio, para que possa ser aplicada e comparada com as metodologias tradicionais contidas em normas e manuais técnicos. A solução proposta envolveu a concepção de um píer fluvial flutuante, modular e versátil, capaz de suportar as cargas ambientais atuantes sobre a estrutura e transmiti-las para o fundeio, formando um conjunto capaz atender à crescente demanda de acesso de pessoas, serviços e mercadorias em regiões remotas de forma eficiente e segura.

A avaliação de desempenho da estrutura considerou as resistências aos esforços de projeto, visando o funcionamento adequado, a capacidade de operar em diversas condições climáticas e de correntes em águas fluviais. Assim, este trabalho explorou algumas possibilidades de desenvolvimento econômico e de infraestrutura em áreas anteriormente inacessíveis, promovendo crescimento e progresso em comunidades remotas de forma sustentável, além de minimizar o impacto ambiental e reduzir custos operacionais.

Para esse fim, realizou-se uma revisão bibliográfica abrangente para entender o panorama geral da área de estudo. Apresentaram-se as terminologias utilizadas na área naval, assim como o comportamento da movimentação das embarcações durante a sua operação. A revisão também incluiu uma análise dos sistemas de fundeio, abordando individualmente seus componentes e discutindo suas funções específicas e conceitos em relação às suas respectivas aplicações. Por fim, foram abordados conceitos de modelagem CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e uma análise dos principais softwares atualmente disponíveis, destacando suas funcionalidades e aplicações no campo da dinâmica dos fluidos computacional.

Além disso, por meio da revisão de literatura, compreendeu-se melhor a região de estudo e o funcionamento dos sistemas de fundeio, bem como as normas e programas computacionais que abrangem o dimensionamento desses sistemas. Especificamente, a revisão bibliográfica incluiu análises detalhadas de sistemas de fundeio, destacando os componentes e suas funcionalidades nas operações marítimas e fluviais. Ainda, apresentaram-se os programas que poderiam ser utilizados para realizar a análise comparativa com as metodologias convencionais. Em síntese, por meio deste processo, desenvolveu-se a metodologia proposta para alcançar os objetivos estabelecidos no início do trabalho.

Assim, o método desenvolvido baseou-se em uma abordagem quantitativa para o dimensionamento de píeres flutuantes modulares e seu sistema de amarração. Esse método

abrangeu desde a coleta de dados em campo, passando pela definição do software adequado para a realização da modelagem CFD, até os cálculos consagrados na literatura abordada.

Para a coleta de dados, utilizaram-se sensores e equipamentos de medição específicos já presentes no local para a obtenção de dados técnicos precisos sobre as condições ambientais atuantes na região de estudo. São esses dados que possibilitaram um dimensionamento adequado para estruturas flutuantes, garantindo que o fundeio do píer seja capaz de suportar as cargas ambientais atuantes, como ventos e correntes.

A análise incluiu a avaliação da estabilidade e esforços ao avanço (arrasto) do píer flutuante, considerando diferentes condições climáticas e de operação para determinação dos esforços externos atuantes sobre a estrutura e consequentemente os esforços solicitantes para o sistema de fundeio.

Essa abordagem numérica possibilitou o desenvolvimento de um sistema de fundeio que pode ser facilmente adaptado a outras embarcações, localidades e cenários de solicitações, tornando seu uso versátil e eficiente. Além disso, a metodologia permitiu ajustes e otimizações para atender às especificidades de cada projeto, assegurando a aplicação do método desenvolvido em diversos contextos práticos.

Os resultados obtidos por meio da aplicação da metodologia proposta permitiram alcançar duas vertentes de resultados. Uma foi baseada na ROM 2.0-11 (2012), uma das metodologias apresentadas durante a revisão bibliográfica e que foi selecionada para aplicação e comparação no estudo. A outra vertente é a metodologia empregada para a aplicação do software escolhido para a modelagem CFD, o *Ansys Fluent*.

A metodologia baseada na ROM 2.0-11(2012) forneceu uma linha de base sólida para o dimensionamento dos esforços ambientais atuantes sobre píeres flutuantes, utilizando parâmetros estabelecidos e bem documentados, garantindo a conformidade com normas técnicas conhecidas.

Por outro lado, a aplicação do *Ansys Fluent* proporcionou uma análise mais detalhada e precisa das interações entre o píer flutuante e os fluidos circundantes. Utilizando técnicas de métodos matemáticos e numéricos para o emprego da modelagem CFD, foi possível simular diferentes cenários climáticos para a operação do píer flutuante, identificando as principais cargas atuantes sobre a estrutura do píer, que são transmitidas para o sistema de fundeio. A modelagem CFD permitiu refinar o cálculo e a determinação das forças atuantes, a partir de

dados coletados “*in loco*” e devidamente validados, que são difíceis de obter apenas com metodologias tradicionais mais abrangentes.

Os resultados numéricos para os esforços transversais apresentaram uma discrepância no entorno de 24% entre a abordagem da ROM 2.0-11(2012) e do *Ansys Fluent*, o que foi considerado um resultado satisfatório, principalmente ao se considerar que devido à capacidade do *Ansys* de simular geometrias de formas mais complexas, superfícies mais refinadas e não atribuir valores tabelados para coeficientes. Já para as solicitações longitudinais, houve variações elevadas entre as duas metodologias, mas que puderam ser compreendidos e ajustadas para um cálculo percentual mais justo.

Também foram identificadas algumas discrepâncias devido à forma com que cada metodologia entende a geometria e processa os resultados a partir da entrada de dados, o que levou a variações de até 60 % em um dos cenários abordados. Concluiu-se, contudo que, apesar das variações entre os resultados das duas metodologias, o valor absoluto, tanto para os cálculos dos esforços de forma individual, quanto para o total, esteve na mesma ordem de grandeza e com resultados coerentes.

Em suma, a proximidade dos valores encontrados para os esforços atuantes totais entre as duas metodologias permitiu concluir que a combinação dessas duas abordagens complementares reforçou a validade dos resultados obtidos, proporcionando uma visão holística e detalhada do desempenho do píer flutuante. A metodologia tradicional forneceu a segurança de conformidade com normas estabelecidas, enquanto a modelagem CFD ofereceu um nível adicional de precisão e adaptabilidade, essencial para aplicações em ambientes complexos e cambiantes.

Os objetivos específicos estabelecidos no estudo foram alcançados, dado que as análises realizadas permitiram determinar os esforços de vento e corrente atuantes, fundamentais para o dimensionamento adequado do sistema de fundeio.

Foi realizado o pré-dimensionamento do módulo do píer flutuante de concreto, baseado no conceito de viga caixão, que resultou em uma geometria e peso próprios aderentes à realidade prática e às capacidades de utilização estipuladas. Outro objetivo alcançado foi o atendimento dos critérios estabelecidos para a avaliação da estabilidade hidrostática do módulo do píer, os quais confirmaram a sua capacidade de flutuabilidade, comprovando que este pode suportar as condições de carregamento estipulados sobre seu convés durante a operação.

Já a análise e comparação dos esforços atuantes na estrutura do píer flutuante, possibilitou determinar a força crítica atuante, para então ser realizado o dimensionamento do sistema de ancoragem, essencial para a segurança e eficiência operacional do módulo do píer.

Mesmo que os objetivos almejados tenham sido atingidos, foram identificadas algumas limitações neste estudo, sendo a mais relevante a utilização de uma versão estudantil do *Ansys Fluent*. Esta versão permitiu o emprego de uma malha de no máximo 1.048.576 elementos, o que limitou a capacidade de simular com maior precisão a estrutura do píer juntamente com o leito e a margem do rio para situações em que uma de suas faces tangenciava a margem. Outro fator limitante atrelado à malha foi a consideração de uma estrutura estática frente ao escoamento dos fluidos presentes no modelo, interagindo com a estrutura. Com a utilização de malhas dinâmicas, espera-se alcançar resultados mais precisos que contemplem comportamentos oriundos da flutuabilidade da estrutura na camada superior da fase de maior densidade.

Adicionalmente, observou-se a limitação computacional disponível para a realização do estudo, a qual restringiu os processos de simulação CFD devido ao *hardware* disponível. Uma análise mais robusta pode ser alcançada com o emprego de recursos computacionais de alto desempenho e versões comerciais do *Ansys Fluent*. Dessa forma, será possível realizar a modelagem de ambos os fluidos simultaneamente, eliminando a necessidade de adaptação para o emprego do método de corpos duplos (*Double Body*). Diante das limitações identificadas e apresentadas, a modelagem foi, portanto, ajustada dentro dessas restrições, visando minimizar os impactos nas conclusões do estudo.

Por fim, recomenda-se que estudos futuros utilizem malhas mais refinadas em versões comerciais do software empregado. Foi essencial empregar diferentes métodos para simular os esforços, considerando as interações entre as fases de ar e água durante a modelagem. Além disso, aconselha-se realizar análises com malhas dinâmicas para simular o comportamento da estrutura em relação à sua flutuabilidade dinâmica. Isso tende a aprimorar a confiabilidade do modelo para um uso prático mais preciso, comparado aos métodos convencionais abordados pelas normas técnicas. Estas melhorias devem permitir uma simulação mais fiel e detalhada dos fenômenos físicos envolvidos, proporcionando resultados mais viáveis e aplicáveis em cenários reais.

Em suma, ao adotar essas recomendações e superar as limitações atuais, espera-se que os estudos futuros possam oferecer uma compreensão mais aprofundada e mais precisa das

interações complexas entre estruturas portuárias flutuantes e os fluidos atuantes em diferentes condições ambientais, utilizando softwares de CFD.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAPTA BRASIL, **Infraestrutura Portuária**, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2019. Disponível em: <https://adaptabrasil.mcti.gov.br/detalhes-portos>. Acesso em 11/03/2024.

AGÊNCIA NACIONAL de TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS, **Estatístico Aquaviário**, Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), 2023. Disponível em: <https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/index.html#pt>. Acesso em 13/03/2024.

ANSYS, **Ansys Fluent Tutorial Guide**, Ansys Inc., 2018. Disponível em: <https://users.abo.fi/rzevenho/ansys%20fluent%2018%20tutorial%20guide.pdf>. Acesso em 17/08/2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 6118. Projeto de Estruturas de Concreto**, 2023.

_____. **ABNT NBR 6123. Forças devidas ao vento em edificações**, 2023.

_____. **ABNT NBR 19782. Projeto de Estruturas Portuárias - Requisitos**, 2024.

BENTLEY, **MaxSurf User Manual**, Bentley Systems, 2018. Disponível em: <https://www.bentley.com/software/maxsurf/#data-sheet>. Acesso em 10/08/2024.

BOUIRSCHIEIT, A., **"Amazônia livre das grandes hidrelétricas?"**, RAISG, 2018. Disponível em: <https://www.raisg.org/es/radar/amazonia-livre-das-grandes-hidreletricas/>. Acesso em 11/04/2024.

BURNS, M., **The Dock Manual designing, building, maintaining**, Hederson Marine Supply, INC., 1999.

DAMEN, **Modular Ferry 2412**, Modular Vessels Damen, 2024. Disponível em: <https://www.damen.com/vessels/ferries/modular-ferries/modular-ferry-2412>. Acesso em 03/10/2024.

DASSAULT, **An Introduction to Flow Analysis Applications with SolidWorks Flow Simulation**, Student Guide, Dassault Systèmes - SolidWorks Corporation, 2010. Disponível em: https://www.solidworks.com/sw/docs/flow_sim_studentwb_2011_eng.pdf. Acesso em 17/08/2024.

DDS 582-1, **Calculations for Mooring Systems (DDS 582-1)**, Department of The Navy, Naval Sea Systems Command, Washington, DC, 1987.

DEPARTAMENTO NACIONAL de INFRAESTRUTURA de TRANSPORTES, **Hidroviias Brasileiras**, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/intervencao-em-hidroviias/hidroviias-1#:~:text=O%20Brasil%20possui%20um%20sistema%20extenso%20de%20rios,e%2015%20mil%20km%20de%20trechos%20potencialmente%20naveg%C3%A1veis>. Acesso em 12/03/2024.

DESIGN MANUAL 26.6, **Mooring Design Physical & Empirical Data**, Naval Facilities Engineering Command, 200 Stovall Street Alexandria, Virginia, 1986.

ELETROBRAS, **Nossas Usinas**, Geração de Energia, Eletrobras, 2024. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Usinas.aspx>. Acesso em: 13/03/2024.

FLEET MOORINGS, **Fleet Moorings Basis Criteria and Planning Guidelines Design Manual 26.5**, Naval Facilities Engineering Command, Alexandria, Virginia, 1985.

FONSECA, M. M., **Arte Naval**, 6ª edição, 2002.

FRANZINELLI, E., **Características morfológicas da confluência dos rios Negro e Solimões (Amazonas, Brasil)**, Revista brasileira de geociências, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbgeo/a/DvfLtHBbWgQLPFxYhsvW98R/>. Acesso em 15/03/2024.

GRUPO DISLUB EQUADOR, **Condições Gerais de Serviço do Terminal (CGST)**, Grupo Dislub Equador, 2022.

GUITARRARA, P., **"Rio Amazonas"**, Brasil Escola, 2021. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/brasil/rio-amazonas.htm#:~:text=O%20Amazonas%20%C3%A9%20uma%20importante,assim%20como%20a%20atividade%20pesqueira>. Acesso em 14/03/2024

HUANG, L.; PENA, B; THOMAS, G., **Towards a full-scale CFD guideline for simulating a ship advancing in open water**, Ship Technology Research, 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, **Cidades e Estados, Portal da Informação**, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/am/itacoatiara.html>. Acesso em 13/03/2024.

JIANG, L.; YAO, J.; LIU, Z., **Comparison between the RANS Simulations of Double-Body Flow and Water–Air Flow around a Ship in Static Drift and Circle Motions**, Marine Science and Engineering, 2022.

MARINHA, **NORMAM 202**, Diretoria de Portos e Costas, Marinha do Brasil, 2024. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/dpc/content/normam-202>. Acesso em 05/09/2024.

MARINHA DO BRASIL, Brasil - **Rio Amazonas, da Ilha Panumã a Itacoatiara**, Centro de Hidrografia da Marinha, 2024. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav/cartas-raster>. Acesso em 6/09/2024.

MASON, J., **Obras Portuárias**, Editora Campus LTDA.-PORTOBRAS, 2ª edição, 1982.

MENTER, F. R.; LECHER, R., **Best Practice: RANS Turbulence Modeling in Ansys CFD**, Ansys INC., Germany, 2001. Disponível em: <https://www.ansys.com/content/dam/amp/2022/march/quick-request/Best%20Practice%20RANS%20Turbulence%20Modeling%20in%20Ansys%20CFD.pdf>. Acesso em 25/08/2024.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DO AMAPÁ, **Para MP-AP, lama fluida tem que ser solução para o desenvolvimento da navegação sem prejuízos ambientais**, Ministério Público Estado do Amapá, 2019. Disponível em: <https://www.mpap.mp.br/noticias/gerais/para-mp-ap-lama-fluida-tem-que-ser-solucao-para-o-desenvolvimento-da-navegacao-sem-prejuizos-ambientais>. Acesso em 12/04/2024.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKISHI T. H., **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos**, Editora Edgard Blücher, tradução 4ª edição americana, 2004.

MYERS, J., **Handbook of Ocean and Underwater Engineering**, North American Rockwell Corporation, 1969.

NORTE ENERGIA, **A maior usina hidrelétrica 100% brasileira**, Norte Energia, Usina Hidrelétrica Belo Monte, 2022. Disponível em: <https://www.norteenergiasa.com.br/uhe-belo-monte/a-usina>, Acesso em 13/03/2024

PORTAL AMAZÔNIA, Itacoatiara é uma das pequenas cidades mais desenvolvidas no Brasil, Portal Amazônia, 2015. Disponível em: <https://portalamazonia.com/cidades/itacoatiara-e-uma-das-pequenas-cidades-mais-desenvolvidas-no-brasil/>, Acesso em 13/03/2024

RECOMENDACIONES PARA OBRAS MARÍTIMAS: ROM 2.0-11, **Recomendaciones para el proyecto y ejecución en Obras de Atraque y Amarre**. Tomos I e II. Ministerio de Fomento Puertos del Estado, España, 2012.

SIEMENS, **Simcenter STAR-CCM+ User Guide and Tutorials**, Siemens Community, 2024. Disponível em: <https://community.sw.siemens.com/s/question/0D5KZ000006pFuh0AE/simcenter-starccm-user-guide-and-tutorials>. Acesso em 18/08/2024.

SOUZA, G., **Amazônia 360: Conheça Itacoatiara, a cidade da pedra pintada**, Portal Amazônia, 2021. Disponível em: <https://portalamazonia.com/amazonia/amazonia-360-conheca-itacoatiara-a-cidade-da-pedra-pintada/>, Acesso em 11/03/2024

THOMPSON, D.; BEASLEY, D. J., **Handbook for Marine Geotechnical Engineering**, Naval Facilities Engineering Command, Port Hueneme, California, 2012.

TRANSPETRO, **Port Information, Manus Terminal**, Fifth edition, 2022.

TSINKER, G. P., **Marine Structures Engineering Specialized Applications**, Springer-Science+Business Media, B.V., 1995.