UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

RAFAEL ESFERRA

Avaliação crítica do emprego de métodos analítico e de modelagem física para estimar esforços nos cabos de amarração de embarcações atracadas sob a ação de correntes.

São Paulo
2019

RAFAEL ESFERRA

Avaliação crítica do emprego de métodos analítico e de modelagem física para estimar esforços nos cabos de amarração de embarcações atracadas sob a ação de correntes.

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia Hidráulica

Orientador: Prof. Dr. Paolo Alfredini

São Paulo

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

CATALOGAÇÃO DA PUBLICAÇÃO

Esferra, Rafael

Avaliação crítica do emprego de métodos analítico e de modelagem física para estimar esforços nos cabos de amarração de embarcações atracadas sob a ação de correntes. / R. Esferra -- versão corr. -- São Paulo, 2019.
141p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental.

1.Hidráulica Marítima 2.Amarração 3.Portos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental II.t.

Nome: ESFERRA, Rafael

Título: Avaliação crítica do emprego de métodos analítico e de modelagem física para estimar esforços nos cabos de amarração de embarcações atracadas sob a ação de correntes

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Dedico este trabalho a

Minha esposa Adriana

Meus pais Mauro e Vera

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela grande oportunidade de cursar este mestrado e por tornar possível a realização deste sonho.

Agradeço a minha esposa e minha família, por toda compreensão, companheirismo e paciência dedicados constantemente durante todo o período de estudos para que pudesse concluir da melhor forma o curso de mestrado.

Agradeço em especial a minha Tia Elvira pelo carinho, incentivo e por me aconselhar desde o início a percorrer este caminho de desafios e sucessos que me proporcionaram esta conquista.

Ao meu amigo e orientador Prof. Dr. Paolo Alfredini dedico meu especial e sincero agradecimento por todo incentivo, ensinamento e encorajamento e por toda a ajuda que só um verdadeiro amigo poderia fornecer ao acreditar no meu projeto para o curso de Mestrado.

Agradeço, também, ao Prof. Dr. José Carlos de Melo Bernardino, pelo ensinamento, dedicação, orientação, conhecimento e amizade que foram indispensáveis para a execução deste curso de Mestrado, contribuindo para meu crescimento profissional.

Agradeço aos membros da banca, Eng. Dr. Pedro Cardozo de Mello e ao Prof. Jésse Rebello de Souza Junior, pelo apoio e esclarecimento de dúvidas e questões que foram surgindo ao longo da elaboração do mestrado.

Por fim, agradeço a todos colegas de trabalho da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica – FCTH, principalmente aos técnicos Adriano e Anderson que me auxiliaram nesta jornada. Agradeço também aos colegas da Vale que contribuíram de muitas maneiras para o desenvolvimento deste projeto.

RESUMO

ESFERRA, R. Avaliação crítica de métodos analítico e de modelagem física para estimar esforços nos cabos de amarração de embarcações atracadas sob a ação de correntes. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

As embarcações projetadas na atualidade possuem dimensões muito superiores às empregadas no passado recente do transporte marítimo, tanto para os navios de carga, quanto para os navios de cruzeiro. Esta realidade tem suas vantagens, permitindo o transporte de maior volume de cargas e passageiros, reduzindo os custos agregados às mercadorias e pessoas transportadas, mas, em contrapartida, traz desvantagens, pois essas embarcações possuem maior área exposta às ações ambientais, como ventos e correntes. Além disso, existe a demanda de amplos espaços náuticos, particularmente lâminas d'água, e auxílio de rebocadores para acesso e atracação destas embarcações. Para reduzir os custos com as operações de dragagem, mais terminais portuários são construídos em áreas expostas a condições ambientais mais severas.

Todas estas condições implicam diretamente no comportamento das embarcações atracadas, pois estas poderão estar sujeitas a movimentos de grande amplitude, suscetíveis de reduzir a eficiência e a segurança com que as operações de movimentação de carga são realizadas, podendo obrigar a sua interrupção e, nos casos mais críticos, provocar a ruptura das linhas de amarração e/ou danos nas defensas, podendo causar danos na estrutura de acostagem e na própria embarcação eventualmente, ocasionando vítimas.

Levando em conta todos estes fatores, existem métodos pelos quais é possível o desenvolvimento de planos de amarração para conter os movimentos da embarcação durante a movimentação da carga e passageiros, buscando sempre obter o máximo de segurança nas operações no cais. Ainda para a verificação da eficácia e otimização dos planos de amarração, antes da sua implantação no terminal, existem métodos de análise, em que é possível estimar as forças exercidas nos cabos das linhas de amarração.

Desta forma, este trabalho propôs-se a realizar uma pesquisa comparativa do emprego dos métodos analítico e de modelagem física. Assim, obteve-se uma avaliação crítica quanto à estimativa de esforços nos cabos das linhas de amarração de embarcações atracadas sob a ação de correntes.

Palavras-chave: Correntes; Amarração; Portos; Modelagem física em Hidráulica; Método analítico em Hidráulica

ABSTRACT

ESFERRA, R. Critical evaluation of analytical methods and physical modeling to estimate efforts in the mooring lines of vessels moored under the action of currents. Thesis (Master degree) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

Currently designed vessels have dimensions much higher than those used in the recent past of shipping, both for cargo ships and for cruise ships. This reality has its advantages, allowing the transportation of a larger volume of cargo and passengers, reducing the aggregate costs to the goods and people transported, but, on the other hand, it has disadvantages, since these vessels have greater area exposed to environmental actions, such as winds and currents. In addition, there is a demand for large nautical spaces, particularly water slides, and assistance of tugs for access and mooring of these vessels. To reduce costs with dredging operations, more port terminals are built in areas exposed to more severe environmental conditions.

All these conditions directly imply the behavior of moored vessels, as these may be subject to large-scale movements, which may reduce the efficiency and safety with which the cargo handling operations are carried out, and may cause them to be interrupted and in the worst-case scenario,, damage the fenders and the berthing structure the vessel itself possibly causing casualties.

Taking into account all these factors, there are methods by which it is possible to develop mooring plans to contain the movements of the vessel during the movement of the cargo and passengers, always seeking to obtain maximum safety on the dockside operations. In order to verify the efficacy and optimization of the mooring plans, prior to their implementation in the terminal, there are methods of analysis, in which it is possible to estimate the forces exerted on the ropes of the mooring lines.

In this way, this work proposes to carry out a comparative research of the use of analytical and physical modeling methods. Thus, a critical evaluation was

obtained regarding the estimation of efforts in the cables of the mooring lines of vessels moored under the action of currents.

Key words: Currents; Mooring; Ports; Physical modeling in Hydraulics; Analytical method in Hydraulics

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 – Denominação dos movimentos nos seis graus de liberdade de embarcação. 8

Figura 2-2 - Típico plano de amarração em terminais portuários em píer. ... 10

Figura 2-3 – Layout genérico de um plano de amarração. 13

Figura 2-4 – Curvas características de carregamento x extensão de espias de arames de aço e fibras sintéticas. 14

Figura 2-5 - Tipo de construção de espias de aço. 15

Figura 2-6 – Construção de espias sintéticas convencionais e de HMPE. ... 17

Figura 2-7 – Curva genérica de força de reação x deformação de uma defensa. 21

Figura 2-8 – Curvas genéricas de desempenho de três tipos de defensa, (1) Buckling, (2) Duque d'Alba (Dólfim) flexível, (3) Pneumática. . 21

Figura 2-9 – Características de defensas de borracha. 23

Figura 2-10 – Representação simplificada do efeito de "*Stand-Off*". 29

Figura 2-11 – Representação da influência da folga sob a quilha nas forças laterais produzidas por corrente de maré. 30

Figura 2-12 – Sinais convencionais e sistema de coordenadas. 32

Figura 2-13 – Variação da configuração de proa. 32

Figura 3-1 – Localização dos Berços Terminal Ponta da Madeira. 46

Figura 3-2 - Plano de amarração do navio do tipo VLOC no Píer I. 49

Figura 3-3 - Plano de amarração do navio do tipo VLOC no Píer III berço Sul. 51

Figura 3-4 - Plano de amarração do navio do tipo VLOC no Píer IV berço Norte. 53

Figura 3-5 – Agrupamento do plano de amarração do navio do tipo VLOC no Píer I. 54

Figura 3-6 – Agrupamento do plano de amarração do navio do tipo VLOC no Píer III berço Sul 55

Figura 3-7 – Agrupamento do plano de amarração do navio do tipo VLOC no Píer IV berço Norte. 56

Figura 3-8 – Carta náutica Nº 413 da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil com destaque para a área de reprodução do modelo físico. 61

Figura 3-9 – Plano de linha de navio VLOC, da parte superior direita: vista de planta, lateral e vistas anguladas. 62

Figura 3-10 – Exemplo de um arranjo geral do sistema de amarração na proa de um navio. 63

Figura 3-11 – Visão geral da grade do modelo hidrodinâmico da Baía de São Marcos. 64
Figura 3-12 – Pontos empregados para calibração do modelo físico..... 65
Figura 3-13 - Monitoramento dos esforços em tempo real. 78
Figura 5-1 – Campo de corrente de enchente na região o TPPM. 95
Figura 5-2 - Campo de corrente de vazante na região o TPPM. 96

LISTA DE FOTOS

Foto 2-1 – Comparação maleabilidade do cabo de HMPE (laranja) x aço (prata fosco), para o diâmetro aproximado. 19

Foto 3-1 - Vista do navio real VLOC de 300.000 tpb (à esquerda) e de seu modelo em escala reduzida de 1:170 (à direita). 63

Foto 3-2 – MicroADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) empregado para medir a velocidade e direção da corrente de maré no modelo físico. 66

Foto 3-3 – Distribuidores de vazão (tipo colmeia, que são módulos com tubos de PVC), sistema de tranquilização (estrutura gradeada de madeira) e placas direcionadoras de fluxo. 67

Foto 3-4 - Placas utilizadas para redução ou aumento da secção, logo aumentando ou diminuindo as velocidades na seção de interesse. 68

Foto 3-5 – Comporta basculante instalada nas extremidades do modelo para controle do nível d'água e inversão do sentido do escoamento. 68

Foto 3-6 – Ponta limnimétricas utilizadas para medição do nível d'água no modelo físico. 69

Foto 3-7 - Vista geral do modelo físico reduzido do TPPM. ....**Erro! Indicador não definido.**

Foto 3-8 - Sistema de reprodução e medição dos esforços nos cabos de amarração em modelo físico reduzido. 74

Foto 3-9 - Sistema de medição por análise de imagens da movimentação da embarcação em escala reduzida. 75

Foto 3-10 – Representação de defensa. 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1- Recomendação de limites para movimentos de embarcação atracada. Fonte: PIANC (1995). 7

Tabela 2-2 – Características gerais das espias sintéticas. 18

Tabela 2-3 – Característica HMPE x Aço. 19

Tabela 2-4 – Características principais dos três tipos de defensa. 22

Tabela 3-1 – Composição plano de amarração no Píer I. 48

Tabela 3-2 - Composição plano de amarração no Píer III Berço Sul. 50

Tabela 3-3 - Composição plano de amarração no Píer IV Berço Norte. 52

Tabela 3-4 – Características do navio e berço. 57

Tabela 3-5 – Características da corrente de maré utilizada no método analítico para cada píer na condição de enchente e vazante no instante de ½ maré. 58

Tabela 3-6 – Características do plano de amarração do navio VLOC no Píer I. 58

Tabela 3-7 – Características do plano de amarração do navio VLOC no Píer III Berço Sul. 59

Tabela 3-8 – Características do plano de amarração do navio VLOC no Píer IV Berço Norte. 59

Tabela 3-9 – Classificação da qualidade dos resultados do modelo, pelos valores de RMEA. 71

Tabela 3-10 – Velocidade da corrente na condição de enchente e vazante para amplitude de maré de 5,0 m. 71

Tabela 3-11 – Direção da corrente na condição de enchente e vazante para amplitude de maré de 5,0 m. 72

Tabela 4-1 – Cálculo de esforços nos cabos de amarração do navio de 300.000 DWT atracado no Píer I na condição de maré de enchente. 80

Tabela 4-2 - Cálculo de esforços nos cabos de amarração do navio de 300.000 DWT atracado no Píer I na condição de maré de vazante. 81

Tabela 4-3 - Cálculo de esforços nos cabos de amarração do navio de 300.000 DWT atracado no Píer III Berço Sul na condição de maré de enchente. 82

Tabela 4-4 - Cálculo de esforços nos cabos de amarração do navio de 300.000 DWT atracado no Píer III Berço Sul na condição de maré de vazante. 83

Tabela 4-5 - Cálculo de esforços nos cabos de amarração do navio de 300.000 DWT atracado no Píer IV Berço Norte na condição de maré de enchente. 84

Tabela 4-6 - Cálculo de esforços nos cabos de amarração do navio de 300.000 DWT atracado no Píer IV Berço Norte na condição de maré de Vazante. 85

Tabela 4-7 – Resultado dos esforços nos cabos de amarração a vante do navio 300.000 DWT atracado no Píer I, na condição de enchente e vazante. 88

Tabela 4-8 - Resultado dos esforços nos cabos de amarração a ré do navio 300.000 DWT atracado no Píer I, na condição de enchente e vazante. 88

Tabela 4-9 - Resultado dos movimentos do navio 300.000 DWT atracado no Píer I, na condição de enchente e vazante. 89

Tabela 4-10 – Resultado dos esforços nos cabos de amarração a vante do navio 300.000 DWT atracado no Píer III Berço Sul, na condição de enchente e vazante. 89

Tabela 4-11 – Resultado dos esforços nos cabos de amarração a ré do navio 300.000 DWT atracado no Píer III Berço Sul, na condição de enchente e vazante. 90

Tabela 4-12 - Resultado dos movimentos do navio 300.000 DWT atracado no Píer III Sul, na condição de enchente e vazante. 90

Tabela 4-13 – Resultado dos esforços nos cabos de amarração a vante do navio 300.000 DWT atracado no Píer IV Berço Norte, na condição de enchente e vazante. 91

Tabela 4-14 – Resultado dos esforços nos cabos de amarração a ré do navio 300.000 DWT atracado no Píer IV Berço Norte, na condição de enchente e vazante. 91

Tabela 4-15 - Resultado dos movimentos do navio 300.000 DWT atracado no Píer IV norte, na condição de enchente e vazante. 92

Tabela 8-1 - Coeficiente de força de arrasto para vento longitudinal (CXw) 109

Tabela 8-2 - Coeficiente de força de arrasto para vento lateral (CYw) 110

Tabela 8-3 - Coeficiente de força de arrasto para corrente longitudinal (WD/T=1.1)..... 111

Tabela 8-4 - Coeficiente de força de arrasto para corrente longitudinal (WD/T=1.2)..... 112

Tabela 8-5 - Coeficiente de força de arrasto para corrente longitudinal (WD/T=1.5)..... 113

Tabela 8-6 - Coeficiente de força de arrasto para corrente longitudinal (WD/T=3.0)..... 114

Tabela 8-7 - Coeficiente de força de arrasto para corrente longitudinal (WD/T=4.4)..... 115

Tabela 8-8 - Coeficiente de força de arrasto para corrente lateral. 116

Tabela 8-9 – Resultados método físico e analítico para Píer I. 117

Tabela 8-10 - Resultados método físico e analítico para Píer III Berço Sul. 118
Tabela 8-11 - Resultados método físico e analítico para Píer IV Berço Norte. 119

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADV	Acoustic Doppler Velocimeter
ASCE	American Society of Civil Engineers
CSL	Cordoaria São Leopoldo
DWT	Deadweight Tonnage
FCTH	Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica
HMPE	High Modulus Poly Ethylene
IWRC	Independent Wire Rope Core
LHEPUSP	Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da USP
LVDT	Linear Variable Differencial Transformer
MBL	Minimum Breaking Load
NBR	Norma Brasileira
OCIMF	Oil Companies International Marine Forum
PIANC	Permanent International Association of Navigation Congresses
RMEA	Relative Mean Absolute Error
SWL	Service Working Load
TPB	Toneladas de porte bruto
TPPM	Terminal Portuário Ponta da Madeira
USACE	United States Army Corps of Engineers
VLOC	Very Large Ore Carrier
WSC	Wire Strand Core

LISTA DE SÍMBOLOS

A_L área vélica longitudinal (m²)

A_T área vélica transversal (m²)

B boca da embarcação

C coeficiente de arrasto em função do ângulo de ataque do vento ou corrente de maré

c velocidade de propagação de som no meio fluido

C_{XYc} coeficiente de momento da corrente

C_{XYw} coeficiente de momento do vento

C_{Xc} coeficiente de força longitudinal da corrente

C_{Xw} coeficiente de força longitudinal do vento

C_{Yc} coeficiente de força lateral da corrente

C_{Yw} coeficiente de força lateral do vento

D dimensão linear característica que intervém no fenômeno a ser representado (m)

g aceleração da gravidade (m/s²)

h Altura acima da superfície da água ou do chão

L_{OA} Length overall

L_{bp} comprimento entre as perpendiculares (m)

m modelo.

P pontal

p protótipo (real)

T calado (m)

u, v, w componentes de velocidade nas direções x, y e z, respectivamente

V velocidade média do escoamento (m/s)

V_c velocidade média do perfil vertical da corrente do nível d'água à quilha em (nós)

V_W Velocidade do vento a 10 metros de altura (m/s)

V_w velocidade do vento (nós)

V_W Velocidade do vento medida na altura h (m/s)

WD Water Depth em (m)

y profundidade média do escoamento à superfície livre

λL fator de escala geométrica;

λV fator de escala cinemática;

ν viscosidade cinemática do fluido (m^2/s)

ρ_c 104,5 $kgfs^2/m^4$, massa específica da água salgada a 20°C;

ρ_w 0,1248 kgfs²/m⁴, massa específica do ar a 20°C

ρ massa específica do fluido (kg/m^3)

σ coeficiente de tensão superficial do fluido (N/m)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. Contextualização 1
1.2. Objetivo 3
1.3. Justificativa 4
1.4. Estrutura do texto 4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 6
2.1. Considerações gerais 6
2.2. Boas práticas para definição de um plano de amarração 10
2.3. Características e tipos de espias 13
2.4. Características e tipos de defensas 20
2.5. Análise de sistema de amarração 25
2.6. Conceito de força de arrasto 27
2.6.1. Vento 28
2.6.2. Corrente 28
2.7. Abordagem analítica 30
2.7.1. OCIMF-Oil Companies International Marine Forum 30
2.7.2. Distribuição dos esforços nas espias 35
2.8. Modelagem física 38
3. MATERIAIS E MÉTODOS 45
3.1. Planos de amarração 47
3.2. Método analítico. 57
3.3. Modelo físico reduzido do Terminal Portuário de Ponta da Madeira. 59
3.3.1. Calibração da corrente de maré no modelo físico. 64
3.3.2. Sistema de aquisição. 73
3.3.3. Procedimento de ensaio de esforços nos cabos 76
4. RESULTADOS 79
4.1. Método analítico. 79
4.1.1. Píer I 80
4.1.2. Píer III Berço Sul 82
4.1.3. Píer IV Norte 84
4.2. Método de modelagem física. 87
4.2.1. Píer I 88

4.2.2. Píer III Berço Sul 89
4.2.3. Píer IV Berço Norte 91
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS ANALÍTICO x FÍSICO 94
6. CONCLUSÃO 102
7. REFERÊNCIAS 105
8. APÊNDICE 109

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Para garantir a movimentação de carga e/ou passageiros de forma segura e eficiente, os terminais portuários devem proporcionar boas condições para receber as embarcações e mantê-las atracadas.

Por suas peculiaridades, esta pesquisa não abordou as embarcações de passageiros, entretanto muito do que será tratado é extensível às embarcações de passageiros.

Entre algumas condições, as principiais são acesso ao terminal, profundidade e abrigo.

Entende-se como bom acesso ao terminal, quando as dimensões náuticas do canal de acesso e da bacia de evolução são compatíveis com as dimensões do navio tipo, além disto o terminal deverá dispor das principais informações das condições ambientais da região.

Outra condição é a profundidade, que deve também ser compatível com as dimensões da embarcação tipo. Desta forma, a profundidade deve ser compatível por toda área de trânsito e ocupação da embarcação, que inclui canal de acesso, bacia de evolução e berços.

O terminal também deverá proporcionar abrigo de condições ambientais, como correntes, ventos e ondas, proporcionando proteção para as embarcações em manobra e/ou para as embarcações atracadas, pois são estas forçantes ambientais que poderão movimentar a embarcação.

Atualmente, porém, é muito difícil encontrar regiões onde o terminal consiga satisfazer todas as condições descritas acima, uma vez que regiões para a implantação de terminais portuários com condições de abrigo ou profundidade

natural encontram-se já ocupadas por outros terminais ou não atendem às dimensões das embarcações em operação.

Deste modo, cada vez mais terminais portuários tendem a ser construídos em áreas não abrigadas das condições ambientais, deixando as embarcações suscetíveis a condições mais severas, o que aumenta a probabilidade da ocorrência de movimentos excessivos, que levem à interrupção da movimentação da carga, ou mesmo, nos casos mais críticos, à ruptura das linhas de amarração, podendo causar danos na estrutura do terminal, no navio e, eventualmente, vítimas.

Ao mesmo tempo, nas operações dos portos contemporâneos, busca-se reduzir o tempo de permanência do navio atracado no porto, otimizando-se as operações de movimentação de carga, aumentando a eficiência dos terminais e, consequentemente, sua produtividade, sempre obedecendo as questões segurança.

Assim, o terminal deverá dispor de um sistema de amarração eficaz, eficiente em manter a embarcação atracada e estabilizada, sem grandes movimentos. Para isso deve-se definir o melhor sistema de amarração, considerando as características do terminal e as condições ambientais, estabelecendo a localização de pontos de amarração, tipo de equipamentos de amarração e tipo de espias.

Para obter um plano de amarração adequado e que possa ser aplicado a um terminal, o sistema de amarração precisa ser definido e dimensionado através de um método bem criterioso e consagrado. A não utilização destes métodos, poderá acarretar elevados gastos para o terminal, com relação a acidentes com rompimento de espias, o que pode resultar em redução de carga movimentada, danos à embarcação, danos à estrutura do berço e, no pior caso, vítimas.

Portanto, neste trabalho serão apresentados dois destes métodos que auxiliam na definição, verificação e otimização de sistemas de amarração. São eles a abordagem analítica e a abordagem empregando a modelagem física reduzida.

A abordagem analítica é realizada através de equações que podem ser resolvidas com auxílio de uma calculadora, já que se trata de um método simples que calcula as forças de forma estática, sem considerar a movimentação da embarcação e a elasticidade do sistema. Nestas equações são calculados os esforços gerados na embarcação devido à corrente, ondas e ventos, e, em seguida, estes resultados serão dados de entrada para outras equações, que, por seu turno, distribuirão os esforços dentre as espias. No caso, se necessário considerar o sistema elástico e a movimentação da embarcação, devem-se utilizar ferramentas computacionais, nas quais, são realizadas várias interações considerando novas posições da embarcação sendo corrigidas pelo sistema elástico, assim, até que a precisão desejada das forças de linha calculadas seja obtida.

A modelagem física reduzida consiste em um modelo hidrodinâmico, no qual, são reproduzidos em escala, respeitando os critérios de semelhança de Froude, fisicamente as condições ambientais da região (batimetria, correntes, ondas e ventos), as embarcações, as estruturas portuárias, bem como as defensas e as espias de amarração. Nesta abordagem, todas estas reproduções são realizadas respeitando os projetos reais.

1.2. Objetivo

O objetivo deste estudo é efetuar uma análise do impacto das simplificações do método analítico apresentado na OCIMF (Oil Companies International Marine Forum, 2013) e de modelagem física para estimativa de esforços nas linhas de amarração de embarcações atracadas, discutindo suas aplicações, vantagens e limitações quando empregados na avaliação de um problema prático de engenharia portuária. Como estudo de caso para aplicação, elaboração e verificação de planos de amarração, empregou-se o Terminal Portuário de Ponta da Madeira (TPPM).

1.3. Justificativa

Conforme descrito em ALFREDINI (1992), nos projetos de obras portuárias é muito importante ter o conhecimento das forças referentes às ações da embarcação transmitida para a estrutura e a amarração. Deste modo, é possível dimensionar adequadamente sistemas de absorção dos esforços, mantendo-se dentro do limite de segurança.

O sistema de amarração exerce um papel importante nas operações portuárias, mantendo as embarcações estáveis no carregamento e descarregamento das cargas. Entretanto, como já descrito, para obter um plano de amarração adequado e que possa ser aplicado a um terminal, o sistema de amarração precisa ser desenvolvido e dimensionado através de um processo bem criterioso e, segundo a American Society of Civil Engineers (ASCE 2014), avaliado através de um método de análise consagrado.

Assim, este trabalho apresenta ferramentas que podem ser empregadas para avaliar planos de amarração e direcionar/indicar como aplicá-las para análise de projeto. Porém, espera-se que a maior contribuição seja na orientação de como aplicar cada ferramenta, já que é cada vez mais frequente observar profissionais da área portuária utilizarem ferramentas inadequadas sem notar a complexidade do projeto. Um exemplo são os profissionais que já possuem ferramenta consagrada, mas por questões de prazo ou suposição, acabam aplicando ferramentas com maiores limitações e não percebem o risco que pode ocorrer ao desenvolver um sistema de amarração com uma ferramenta não confiável que pode não estar representando corretamente os fenômenos envolvidos.

1.4. Estrutura do texto

Este texto foi estruturado da seguinte forma:

- O capítulo 2 de Revisão Bibliográfica;

- O capítulo 3 de Materiais e Métodos;
- O capítulo 4 de resultados;
- O capítulo 5 de análise dos resultados obtidos nos métodos analítico e de modelagem física;
- O capítulo 6 com a conclusão do trabalho;
- O capítulo 7 referências;
- O capítulo 8 com os apêndices.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Considerações gerais

A amarração tem a função primordial de manter a embarcação atracada e estabilizada para a realização de movimentação de cargas em segurança e de forma eficiente. As principais forças que podem induzir movimentos na embarcação atracada são as ambientais, como correntes, ondas, ventos e variação do nível causado pela maré, e as condições associadas ao terminal, como variação do calado, que na verdade altera a geometria náutica emersa e submersa sobre as quais agem as forças de arrasto de ventos e correntes, respectivamente, e perturbações de embarcações passantes (efeito de passing-ship). Portanto, o sistema de amarração deve ser dimensionado para resistir a diversas condições que poderão movimentar a embarcação.

Para o dimensionamento do sistema de amarração existem critérios de boas práticas que devem ser seguidos criteriosamente. Para cada tipo de carga a ser movimentada, portanto para cada tipo de equipamento de movimentação de carga, existem limites de movimentos para a embarcação, o que influencia diretamente as considerações de escolha de tipo de espia e defensa.

Desta forma, sendo as espias e as defensas as componentes mais elásticas do sistema de amarração, são os elementos que condicionam a resposta da embarcação atracada, principalmente no plano horizontal. As defensas são consideradas como a interface entre a estrutura de acostagem e a embarcação atracada, com a função de absorver a energia cinética quando a embarcação se movimentar, trabalhando em conjunto com as espias.

As espias têm a função de amarrar a embarcação na estrutura de acostagem, mantendo-a em segurança, no entanto não significa que a embarcação ficará imóvel, mas, sim, que haverá restrição do movimento para que fique dentro dos

limites operacionais, conforme definido na Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC 1995) (Tabela 2-1).

Tabela 2-1- Recomendação de limites para movimentos de embarcação atracada. Fonte: PIANC (1995).

TIPO DE NAVIO	EQUIPAMENTO DE CARGA	SURGE (m)	SWAY (m)	HEAVE (m)	YAW (°)	PITCH (°)	ROLL (°)
Pesqueiro	Guindaste monta-cargas	0,2	0,2	-	-	-	-
	(Des)carga vertical	1,0	1,0	0,4	3,0	3,0	3,0
	Bomba de sucção	2,0	1,0	-	-	-	-
Cabotagem, navio carregado	Guindaste do navio	1,0	1,2	0,6	1,0	1,0	2,0
	Guindaste de cais	1,0	1,2	0,8	2,0	1,0	3,0
Ferries, Ro-Ro	Rampa lateral	0,6	0,6	0,6	1,0	1,0	2,0
	Rampa de tempestade	0,8	0,6	0,8	1,0	1,0	4,0
	passarela	0,4	0,6	0,8	3,0	2,0	4,0
	Rampa ferroviária	0,1	0,1	0,4	-	1,0	1,0
Carga geral	-	2,0	1,5	1,0	3,0	2,0	5,0
Conteineiro	100% de rendimento	1,0	0,6	0,8	1,0	1,0	3,0
	50% de rendimento	2,0	1,2	1,2	1,5	2,0	6,0
Graneleiros	Guindastes	7,0	1,0	1,0	2,0	2,0	6,0
	Descarregador de roda de caçambas	1,0	0,5	1,0	2,0	2,0	2,0
	Carregador de esteira	5,0	2,5	-	3,0	-	-
Petroleiros	Braço de carga	3[3]	3,0	-	-	-	-
Metaneiros	Braço de carga	2,0	2,0	-	2,0	2,0	2,0

Observações: 1) Valores de movimento pico a pico (exceto Sway: zero-pico)

2) Rampas equipadas com roletes

3) Para locais expostos 5,0 m (os braços de carga permitem normalmente grandes movimentos)

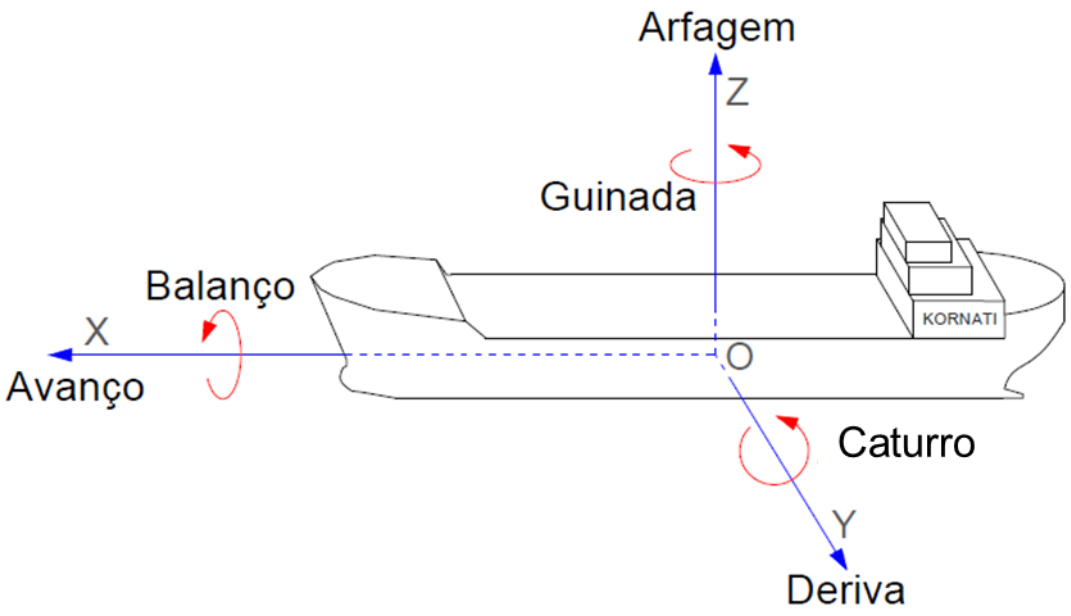
Fonte: PIANC (1995).

A Tabela 2-1 apresentou a recomendação de limites dos movimentos de embarcação nos seis graus de liberdade, sendo três movimentos de translação e três de rotação, que podem ser descritos, também, como três graus de movimentação no plano vertical e três no plano horizontal. Os movimentos da

embarcação são esquematizados na Figura 2-1, e possuem na linguagem portuária as seguintes denominações:

- Avanço (Surge) – movimento longitudinal de translação no plano horizontal, no eixo x;
- Deriva (Sway) – movimento lateral de translação no plano horizontal, no eixo y;
- Guinada (Yaw) – movimento de rotação em torno de um eixo vertical que passa pelo centro de gravidade da embarcação, no eixo z;
- Balanço (Roll) – movimento de rotação em torno do eixo longitudinal central da embarcação, eixo x;
- Caturro (Pitch) – movimento de rotação em torno do eixo transversal central da embarcação, eixo y;
- Arfagem (Heave) – movimento de translação vertical, eixo z.

Figura 2-1 – Denominação dos movimentos nos seis graus de liberdade de embarcação.



Fonte: Santos (2010).

Para conter os movimentos e manter a embarcação em segurança durante o processo de carregamento ou descarregamento, são criados planos de amarração, nos quais são posicionadas as espias com seus comprimentos e ângulos, sendo identificados por grupos de espias que irão conter os principais movimentos horizontais (avanço, deriva e guinada). Estes grupos são:

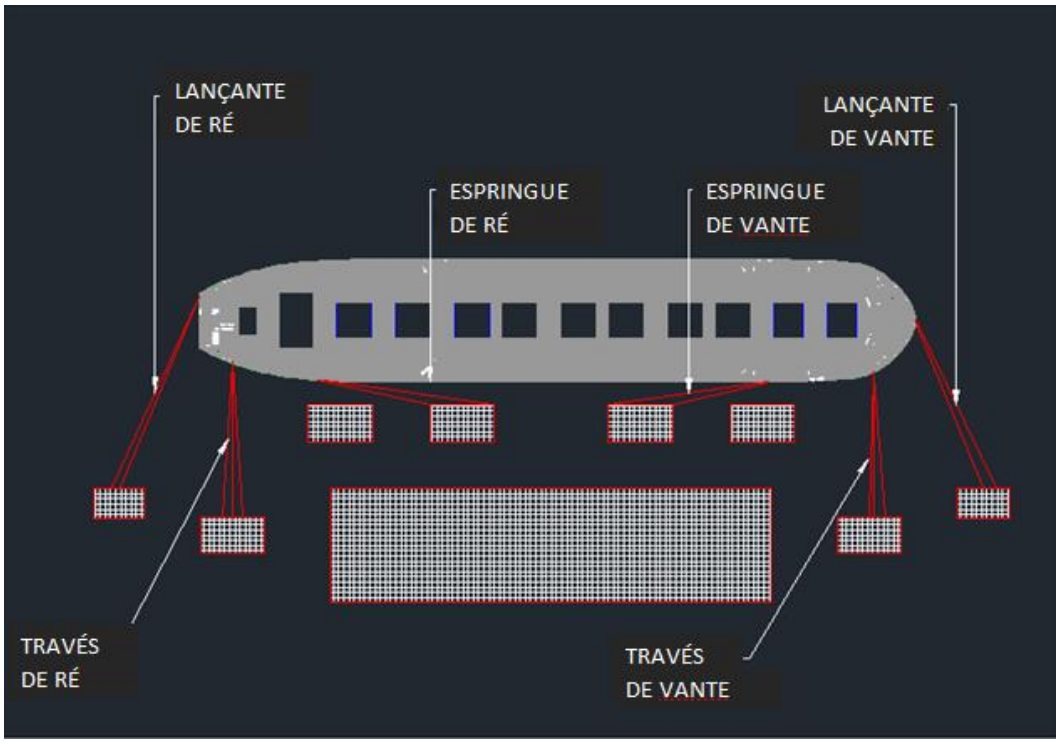
- Lançantes: São os cabos lançados para a estrutura de acostagem, ou seja, das extremidades da embarcação. Os lançantes de proa saem da proa para a vante e os lançantes de popa saem da popa para a ré. Normalmente, estas espias formam um ângulo de 45° com a longitudinal do navio, sendo parcialmente (e minoritariamente em relação ao espringue) empregadas para conter o movimento de surge (avanço);

- Traveses: São as espias lançadas da embarcação e formam em média ângulo reto (90°), com o plano longitudinal do navio. Estas são de extrema importância para a amarração segura por conter o movimento de Sway que tende a afastar o navio do atrito com as defensas;

- Espringues: São espias lançadas para a estrutura de acostagem, com a embarcação, formando ângulos bem reduzidos com a linha de atracação e com sentido contrário ao de onde são lançados (espringues de proa saem da proa para ré e espringues de ré saem da popa para vante). Estas espias trabalham juntamente com as espias de lançante, contendo majoritariamente o movimento de surge.

A Figura 2-2, apresenta um típico plano de amarração com a locação de cada grupo de espias, que são divididas entre vante e ré.

Figura 2-2 - Típico plano de amarração em terminais portuários em píer.



Fonte: Esferra (2018).

Nos itens a seguir, foram apresentados os critérios para a definição de um plano de amarração e características do sistema elástico.

2.2. Boas práticas para definição de um plano de amarração

Neste item, foi apresentado o conjunto de princípios e critérios a seguir para desenvolver um plano de amarração, conforme descrito em recomendações internacionais PIANC (1995) e OCIMF (2013), que são fundamentais para obter dos planos de amarração a máxima eficácia:

1) Os cabos de amarração devem ser distribuídos simetricamente em relação ao centro de gravidade do navio, de modo a obter uma repartição de forças uniforme entre os vários elementos do sistema de amarração e minorar as forças máximas que lhes são aplicadas.

Em outras palavras, o plano de amarração deverá trabalhar de forma solidária, no qual não haverá cabos com esforços exageradamente desproporcionais. (PIANC, 1995; OCIMF, 2013);

2) Regra geral: os cabos de amarração devem ser todos do mesmo material, construção, diâmetro e, se possível, do mesmo comprimento, OCIMF (2013). Se tal não for possível, pelo menos os cabos de amarração pertencentes ao mesmo grupo devem obedecer aos requisitos referidos. O objetivo é obter uma repartição de forças uniforme entre os cabos pertencentes ao mesmo grupo de amarração (PIANC, 1995; OCIMF, 2013). As diferenças de rigidez entre cabos do mesmo grupo condicionam a repartição dos esforços entre eles, potencializando primeiro a ruptura dos mais rígidos, e em seguida, dos mais elásticos. Os comprimentos mínimos das espias usadas na amarração de navios de grande porte deveriam ser da ordem dos 35 a 50 m, PIANC (1995).

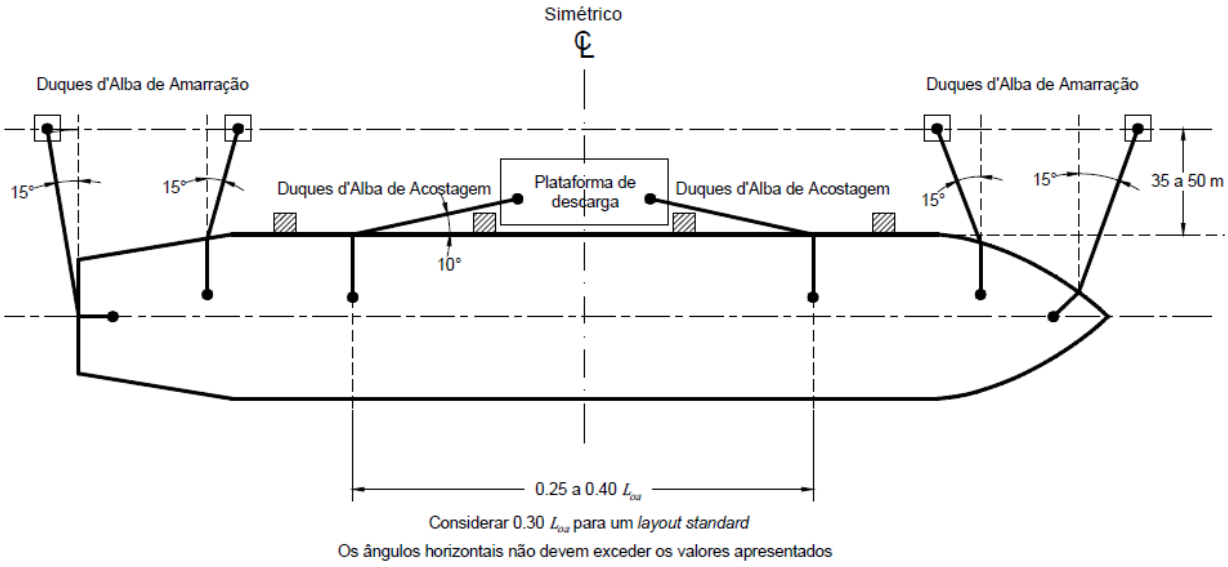
Outra importante consideração é a verificação do módulo de elasticidade do cabo a ser empregado. Este módulo um parâmetro mecânico intrínseco no material que determina sua rigidez, sendo obtida através da razão tensão/deformação. Assim, no desenvolvimento do plano de amarração deve-se dar atenção ao tipo de cabo que será escolhido, pois, por mais que as características elásticas de cabos de fibras sintéticas com módulo de elasticidade elevado se aproximem dos cabos de aço, o uso de

cabos de materiais distintos no mesmo grupo de amarração deve ser evitado, OCIMF (2013);

3) Os dispositivos instalados nos terminais deverão apresentar resistência (service working load - SWL) mínima superior ao de ruptura das espias utilizadas pelas embarcações (OCIMF 2013);
4) O ângulo dos cabos de amarração com o plano horizontal deve ser o menor possível, de forma a aumentar a sua eficácia na redução da amplitude dos movimentos horizontais. Recomendam-se ângulos máximos de 25º a 30º (PIANC, 1995; OCIMF, 2013);
5) Os cabos de amarração devem ser mantidos permanentemente em tensão (aplicação de pré-tensão), com o intuito de potencializar o desenvolvimento de forças de atrito adequadas na interface das defensas com o casco do navio e, simultaneamente, evitar que a embarcação inicie algum movimento que possa exigir um esforço elevado nos cabos (PIANC, 1995);
6) Os traveses devem ser puros, ou seja, orientados o mais perpendicularmente possível ao eixo longitudinal central do navio, e ser lançados o mais próximo possível da proa e da popa (OCIMF, 2013);
7) As espringues devem ter, tanto quanto possível, uma direção paralela ao eixo longitudinal central do navio (OCIMF, 2013);

A Figura 2-3 apresenta um layout genérico de um plano de amarração.

Figura 2-3 – Layout genérico de um plano de amarração.

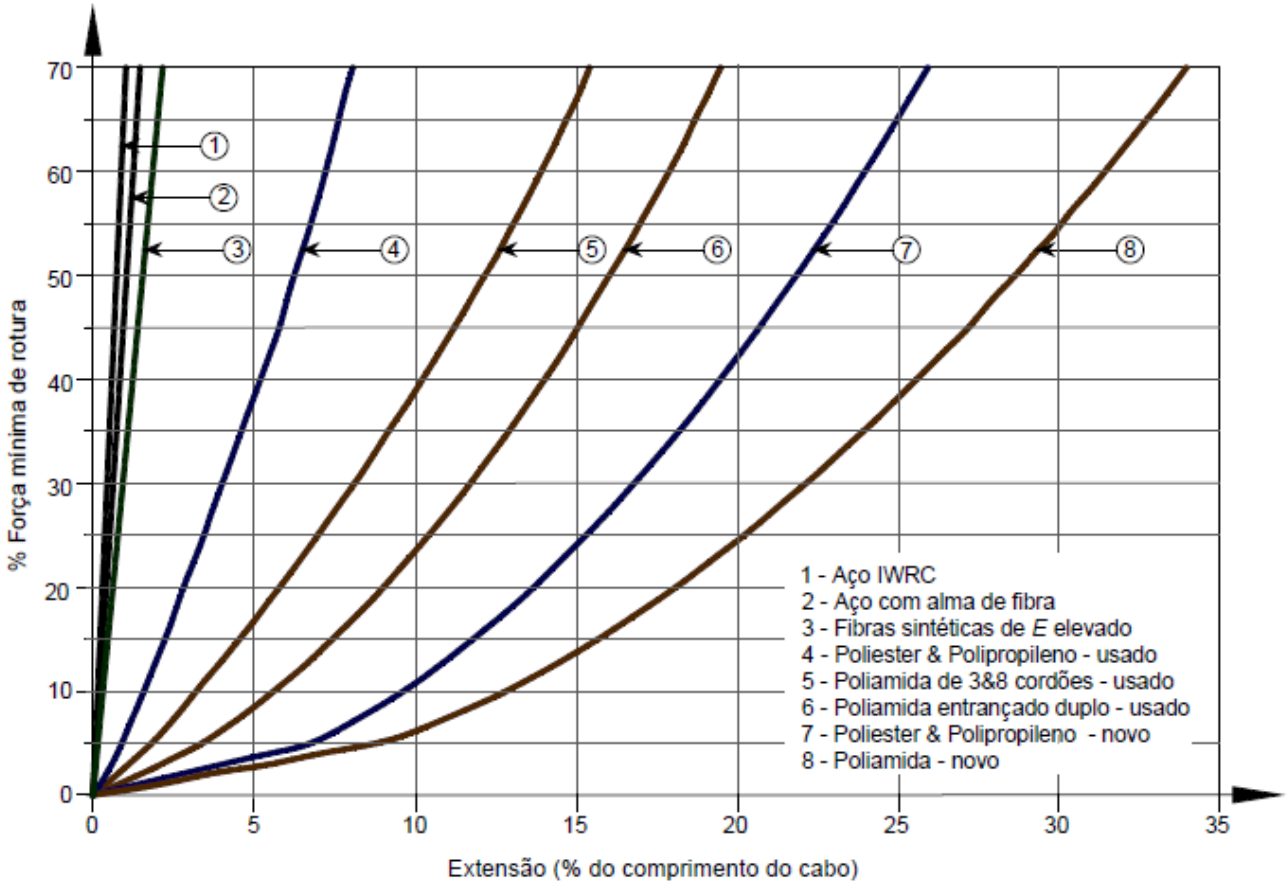


Fonte: Santos (2010).

2.3. Características e tipos de espias

Como descrito em Alfredini (2014), as principais características das espias são elasticidade, que é a tendência de a espia retornar ao seu comprimento original, a extensibilidade, que é a elongação devido à solicitação, representada pela curva tensão x deformação (Figura 2-4), a rigidez, que é o quociente da tensão e a elongação da espia, carga de ruptura, que é a carga máxima que a espia resiste, e a carga máxima de trabalho, que são limites orientados pelas recomendações internacionais, como PIANC e OCIMF.

Figura 2-4 – Curvas características de carregamento x extensão de espias de arames de aço e fibras sintéticas.



Fonte: Santos (2010).

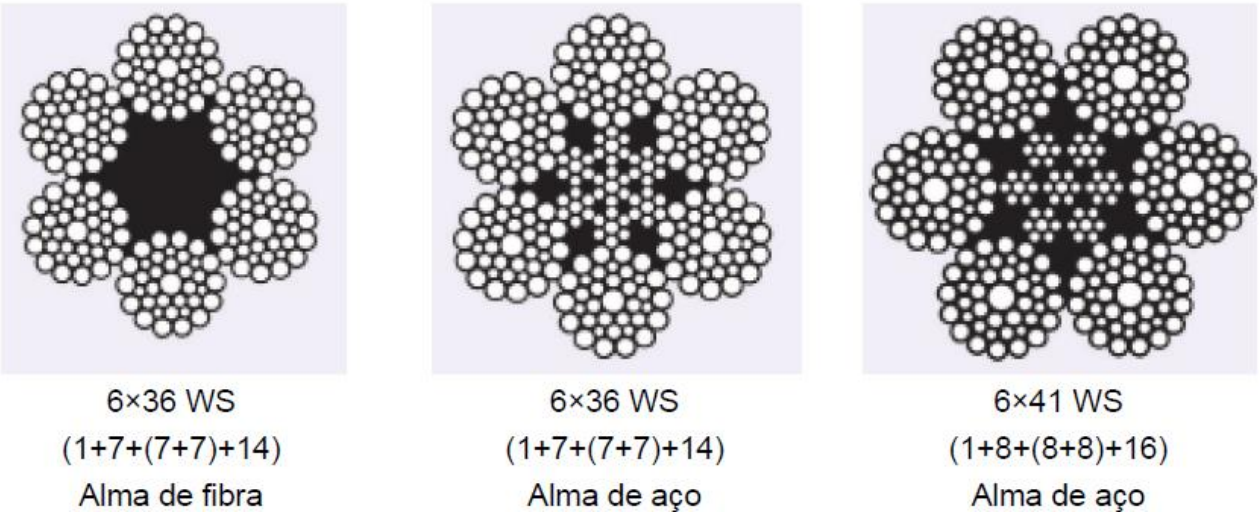
Atualmente, os materiais de que as espias são construídas podem ser divididos em dois grupos: arame de aço e de fibra sintética.

As espias confeccionadas a partir de arame de aço são de baixa elasticidade e alta razão capacidade/diâmetro, superior à maioria das espias sintéticas (com exceção das fibras de HMPE – High Modulus Polyethylene). São espias com longo período de vida útil, e que necessitam de maiores cuidados em realizar periodicamente limpeza e lubrificação, para assim não apresentarem corrosão, o que pode reduzir a sua vida útil. Estas espias são muito utilizadas em terminais que não apresentam solicitações dinâmicas, já que pequenos movimentos da embarcação poderiam gerar elevadas solicitações.

No entanto, as espias de aço compostas com núcleo de fibra sintética apresentam maior flexibilidade e menor fricção interna. Já as espias com núcleo de aço podem ser divididas em dois subgrupos, as espias de IWRC (Independent Wire Rope Core), que são com a alma independentemente feita com uma espia de aço, e a WSC (Wire Strand Core), que são com alma de cordão de aço.

As principais características de uma espia de aço estão relacionadas com a sua construção, o número de cordões que a constituem e o número de arames em cada cordão, na Figura 2-5 são apresentadas algumas formas de construção:

Figura 2-5 - Tipo de construção de espias de aço.



Fonte: Santos (2010).

A OCIMF recomenda a utilização de espias construídas de forma 6x36 e 6x41, em que os arames são entrelaçados e não cruzados, sendo fabricados por torção regular direta.

As espias de fibra sintética são confeccionadas com materiais de alta resistência e módulo e devido ao alinhamento de suas moléculas ou de sua estrutura química, são mais leves e, consequentemente, de melhor manuseio. Os materiais empregados para a confecção podem ser:

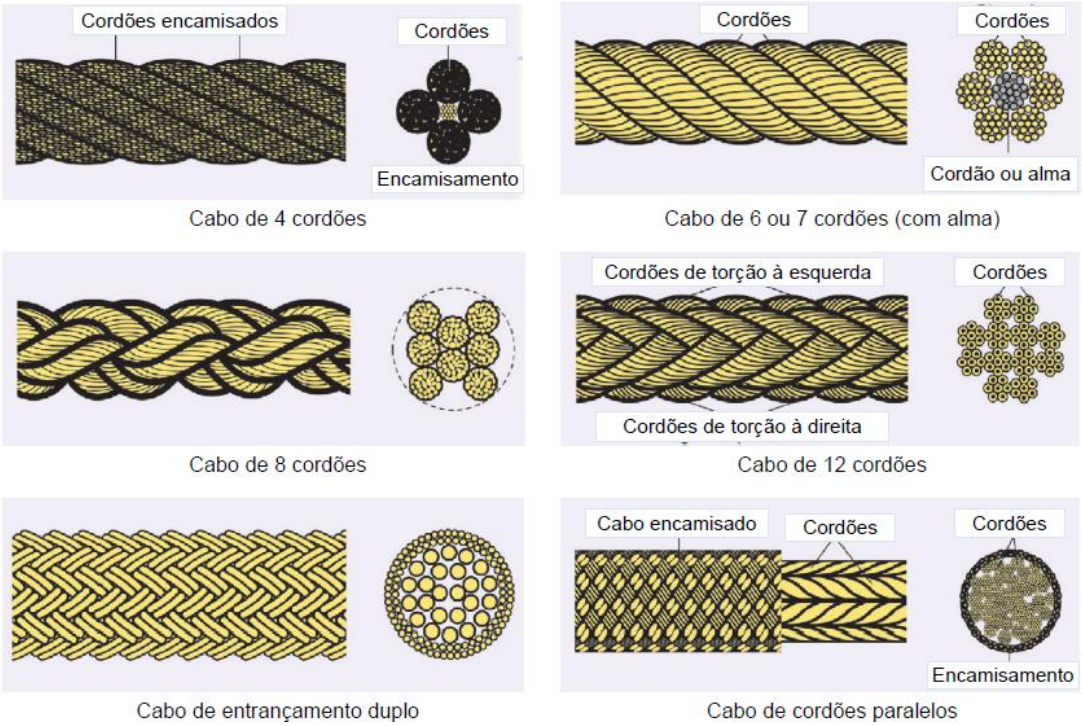
- Fibras convencionais:

- Polietileno,
- Polipropileno,
- Polyblend (Blenda de PP e PEAD),
- Poliamida (Nylon)
- Poliéster,
- Composite (fibras de PE/PP)

- Fibras de alto módulo:
  - Fibras de aramida,
  - HMPE

Para a construção de espias de fibras sintéticas, a forma mais comum é a de espias compostas de 8 e 12 cordões, sendo a sua confecção entrelaçada de forma antirrotacional, para não ocorrer rotação quando solicitadas. A Figura 2-6 apresenta exemplos de construção destas espias.

Figura 2-6 – Construção de espias sintéticas convencionais e de HMPE.



Fonte: Santos (2010).

As espias conhecidas como HMPE possuem resistência à tração muito maior, quando comparadas com outros tipos de espias sintéticas. Estas espias são leves, mais fáceis de manusear e possuem a mesma ordem de grandeza de resistência e diâmetro das espias de aço.

No entanto, espias de HMPE possuem o menor ponto de fusão dentre as espias sintéticas, conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.**Tabela 2-2, a qual apresenta algumas características das espias de fibra sintética.

Tabela 2-2 – Características gerais das espias sintéticas.

CARACTERÍSTICAS								
MP	POLIPROPILENO	POLIAMIDA	POLIÉSTER	POLIETILENO	POLYBLEND	COMPOSITE	ARAMIDA	HMPE
Peso Específico	0,91 g/cm³	1,14 g/cm³	1,38 g/cm³	0,96 g/cm³	0,93 g/cm³	1,14 g/cm³	1,44 g/cm³	0,97 g/cm³
Ponto de Fusão	165°C	240°C	256°C	138°C	165°C	207°C	450°C (queima)	140°C
Temperatura Crítica	148°C	177°C	177°C	121°C	135°C	140°C	204°C	65°C
Absorção de água	Zero	Até 9% da massa do cabo	Menos de 1% da massa do cabo	Zero	Zero	Menos de 1% da massa do cabo	Menos de 1% da massa do cabo	Zero
Flutuabilidade	Positiva	Negativa	Negativa	Positiva	Positiva	Negativa	Negativa	Positiva
Resistência a Solventes/Ácidos	Muito Bom	Muito Bom	Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Excelente	Muito Bom
Resistência a Raios Ultravioletas	Bom	Muito Bom	Excelente	Bom	Excelente	Muito Bom	Razoável	Bom
Resistência à Abrasão	Bom	Muito Bom	Excelente	Bom	Muito Bom	Excelente	Razoável	Excelente
Absorção de Choque	Muito Bom	Excelente	Bom	Razoável	Muito Bom	Muito Bom	Razoável	Razoável
Alongamento em carga constante	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Ruim
Alongamento à ruptura	Médio	Alto	Baixo	Alto	Médio	Médio	Muito Baixo	Médio
Tenacidade (mínima) kgf/DE	6,0	7,5	7,5	5,5	9,4	7	27	30

Fonte: CSL (1995).

Atualmente, empresas que produzem o HMPE obtiveram sucesso ao desenvolver uma fibra com maior resistência contra abrasão. Porém, o seu valor de mercado ainda é inviável economicamente para os terminais portuários, desta forma, em alguns casos, a deficiência de abrasão pode ser solucionada com uso de jaquetas, que envolvem totalmente a espia protegendo-a nos pontos de maior atrito.

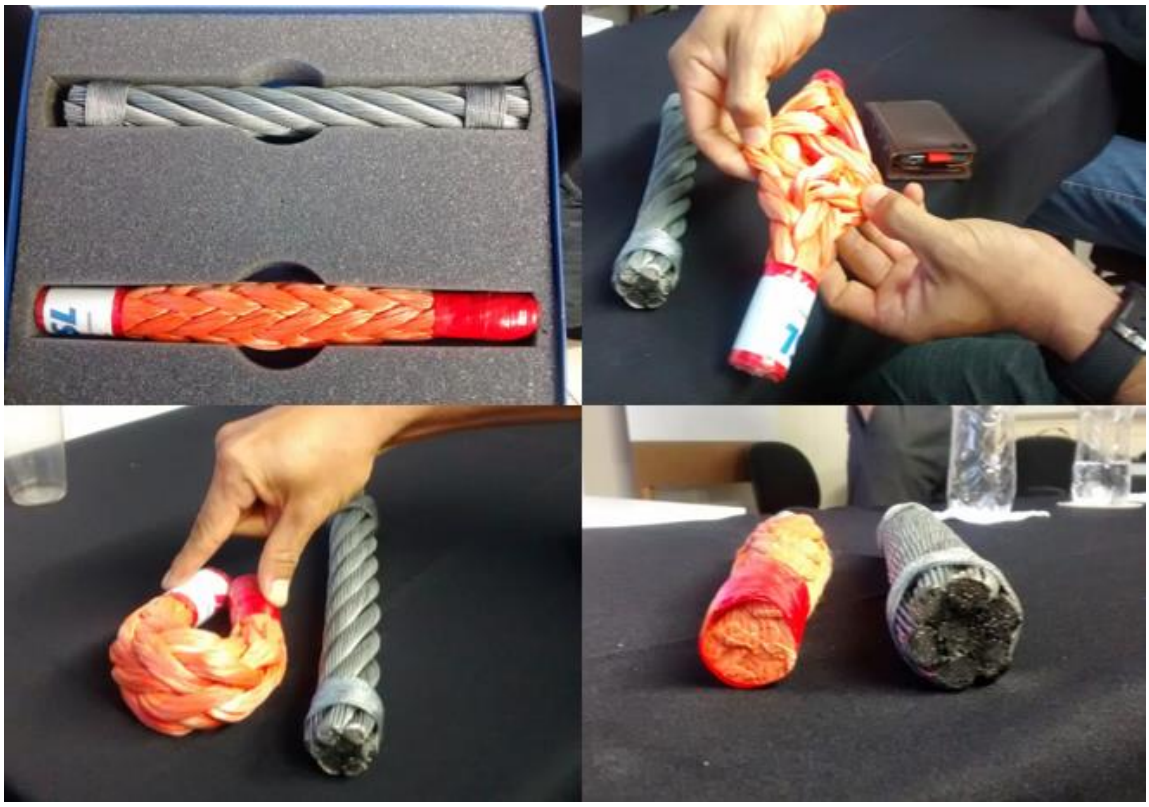
Assim, atualmente existe uma tendência de as frotas mundiais utilizarem espias de HMPE. Hoje, as maiores embarcações graneleiras já estão realizando a troca de suas espias de aço para HMPE, e os terminais que possuem guinchos de terra estão efetuando, ou estudando, a troca destes cabos também. Isto ocorre devido à similaridade entre as espias de aço e HMPE, em que a razão capacidade/diâmetro apresentam-se muito próximas, porém o HMPE tem maior facilidade de manuseio. Abaixo, na Tabela 2-3, são apresentadas algumas características do cabo HMPE e do aço e, na Foto 2-1, é possível observar, para os cabos de diâmetro aproximados, a maleabilidade do HMPE (MBL de 118 tf) em relação ao aço (MBL 95 tf).

Tabela 2-3 – Característica HMPE x Aço.

Aço	HMPE
Alta resistência	Alta resistência
Baixo alongamento	Baixo alongamento
Afunda	Flutua
Não tem resistência a solventes químicos.	Tem resistência a solventes químicos.
Alta temperatura de fusão.	Baixa temperatura de fusão.
Resistência: 124 toneladas	Resistência: 128 toneladas
Diâmetro de 40 mm	Diâmetro de 40 mm
Peso 771 kg/100m	Peso 97 kg/100m

Fonte: CSL (1995).

Foto 2-1 – Comparação maleabilidade do cabo de HMPE (laranja) x aço (prata fosco), para o diâmetro aproximado.



2.4. Características e tipos de defensas

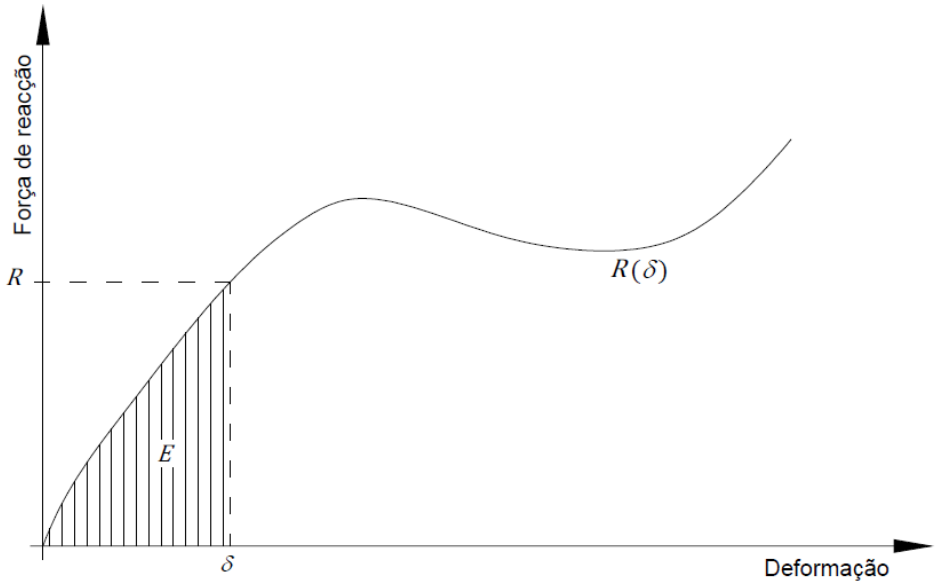
As defensas são empregadas na interface da estrutura de acostagem com a embarcação. Têm a função essencial de absorver a energia cinética do impacto de embarcações em manobra, e quando a embarcação estiver atracada tem a função de absorver a energia se houver movimento.

Em Alfredini (2014), são descritos alguns requisitos de um sistema de defensa:

- Capacidade de absorção de energia transmitida pela embarcação mantendo-a abaixo do limite de resistência da estrutura;
- Não causar danos à embarcação;
- Não permitir o contato direto com partes desprotegidas da obra;
- Boa absorção de esforços em pequeno número de elementos.

Para cada tipo de defensa há uma curva de força de reação x deformação, no entanto, comumente, as defensas empregadas nos terminais portuários apresentam o comportamento muito similar ao da curva apresentada na Figura 2-7, de forma genérica, na qual pode-se observar o desempenho de uma defensa.

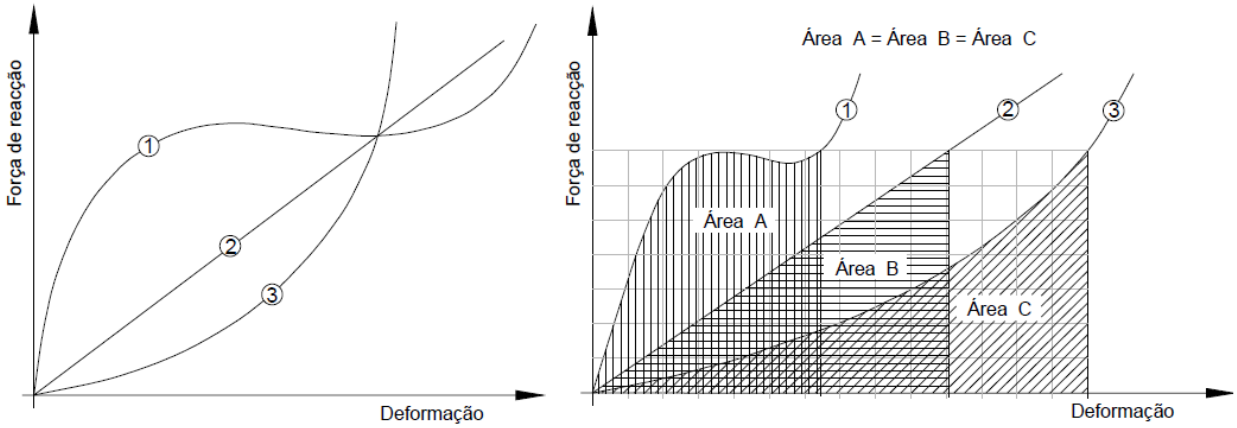
Figura 2-7 – Curva genérica de força de reação x deformação de uma defensa.



Fonte: Santos (2010).

Existem, portanto, vários tipos de defensas. Em Santos (2010), são apresentadas três categorias de defensas, a Figura 2-8 mostra o desempenho de cada uma. A curva (1) representa uma defensa rígida, a curva (2) uma defensa intermediária e a curva (3) uma defensa flexível. A principal diferença entre as defensas apresentadas é a deformação, pois a força de reação e capacidade de absorção são iguais.

Figura 2-8 – Curvas genéricas de desempenho de três tipos de defensa, (1) Buckling, (2) Duque d'Alba (Dólfim) flexível, (3) Pneumática.



Fonte: Santos (2010).

O tipo (1) não é recomendado para terminais que recebem embarcações com várias energias de acostagem, já os tipos (2) e (3) podem ser associadas para aumentar a absorção da energia, aceitando maior variabilidade de energia de atracação.

Na Tabela 2-4, referida em Santos (2010), é possível observar as principais vantagens e desvantagens de três categorias de defensas de borracha mais empregadas.

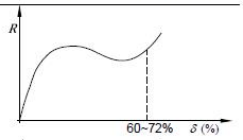
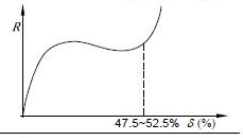
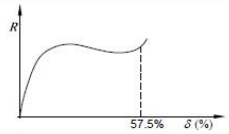
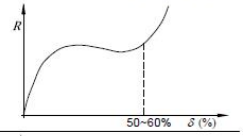
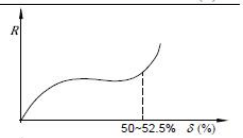
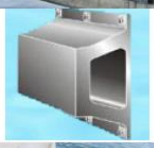
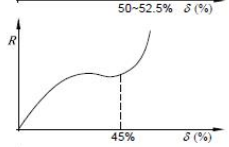
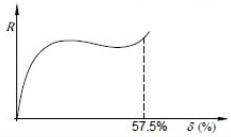
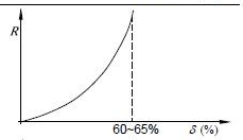
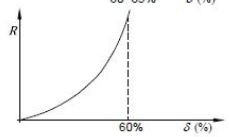
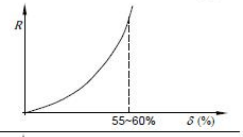
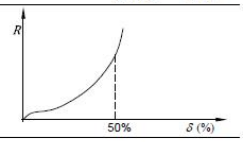
Tabela 2-4 – Características principais dos três tipos de defensa.

Tipo	Principais características
Buckling	A energia de acostagem é absorvida através do trabalho desenvolvido na deformação do material constituinte da defensa (compressão, flexão, tensões de corte e torção). + Elevada capacidade de absorção de energia; - A força de reacção máxima da defensa (aplicada no cais e no navio) é atingida em quase todas as manobras de acostagem; - Necessidade de utilizar um painel frontal para reduzir a pressão aplicada no casco do navio; - Perda de eficácia em acostagens angulares (compressão oblíqua da defensa); - Devido à sensibilidade aos esforços tangenciais é, por vezes, necessário utilizar painéis frontais de baixo atrito (possível influência negativa no comportamento do navio amarrado). Nota: melhoramentos recentemente introduzidos em algumas defensas deste tipo permitem minorar as consequências de alguns dos seus pontos fracos, em particular a fraca resistência ao corte e a perda de eficiência em acostagens angulares.
Pneumáticas (Fixas e flutuantes, incluindo as defensas com enchimento de espuma)	A energia de acostagem é absorvida através do trabalho desenvolvido na compressão do ar interior (ou do material de enchimento), com o consequente aumento da pressão desse ar até valores muito superiores aos de repouso. + Forças de reacção baixas que se traduzem em baixas pressões superficiais; + Elevada absorção de energia e baixas forças de reacção (factor de defensa baixo); + Bom desempenho em compressões oblíquas; + Facilidade de ajuste à variação do nível de água (maré); + Adequadas para instalações permanentes ou semi-permanentes; ± As defensas de maior diâmetro mantêm o navio relativamente afastado do cais, o que pode ter implicações no alcance do sistema de movimentação de cargas; + Para dimensões idênticas, as defensas com enchimento de espuma apresentam melhores características de desempenho do que as pneumáticas; - As defensas com enchimento de espuma têm um risco mais elevado de, com a utilização, perderem a capacidade de recuperar a sua forma inicial; + A interface com o navio apresenta um coeficiente de atrito elevado, o que pode traduzir-se num melhor comportamento deste quando amarrado.
Cilíndricas (comprimidas lateralmente)	A energia de acostagem é absorvida através do trabalho desenvolvido na deformação do material constituinte da defensa (compressão, flexão, tensões de corte e torção). + Solução económica; + A força de reacção aumenta, progressivamente, com a deformação, tornando este tipo de defensa adequado para cais destinados a uma gama alargada de navios.

Fonte: Santos (2010).

A maioria das defensas empregam elementos de borracha tratada para resistir à ação de intempéries. A Figura 2-9, retirada de Santos (2010), apresenta uma caracterização das defensas de borracha de vários fabricantes.

Figura 2-9 – Características de defensas de borracha.

Tipo	Forma	Dimensões (mm)	Reacção (kN)	Energia (kN.m)	Curva de desempenho
Buckling (configuração circular com painel frontal)		$d/D/H$ 295/500/300 ↓ 1765/2880/1800	60 ↓ 3775	9 ↓ 3530	
		D/H 400/550 ↓ 3000/3250	52 ↓ 5800	8 ↓ 6700	
Buckling (configuração alongada com painel frontal)	▼)	H/L_V 300/600 ↓ 1800/2000	66 ↓ 1708	9 ↓ 1260	
		H/L_V 400/500 ↓ 2500/4000	140 ↓ 6900	22 ↓ 7000	
Buckling (tipo "V" com contacto directo)		H/L_H 250/1000 ↓ 1000/2000	150 ↓ 2290	15 ↓ 940	
		H/L_H 200/1000 ↓ 1300/3500	150 ↓ 3400	10 ↓ 1500	
	▼)	H/L_H 300/600 ↓ 1800/2000	66 ↓ 1708	9 ↓ 1260	
Bloco de ar (*Airblock*)		D/H 600/450 ↓ 3200/3200	138 ↓ 6210	15 ↓ 4990	
Flutuante Pneumática		D/L_H 500/1000 ↓ 4500/12000	50 ↓ 10570	4 ↓ 9080	
Flutuante (com enchimento de espuma)		D/L_H 1000/1500 ↓ 3500/8000	200 ↓ 4050	41 ↓ 3000	
Cilíndrica (compressão lateral)		D/L_H 150/1000 ↓ 2800/5800	80 ↓ 6600	3 ↓ 5000	

Dimensões: d - diâmetro menor, D - diâmetro principal; H - altura; L_V - comprimento (vertical); L_H - comprimento (horizontal);
Nota: ▼) defensa de borracha constiuída por dois elementos individuais ligados.

Fonte: Santos (2010).

Outro aspecto importante para que a defensa consiga exercer sua função com máxima eficiência é a fricção. O atrito elevado causado pelo painel da defensa auxilia a manutenção da embarcação em sua posição e reduz os seus movimentos.

Assim, existem vários aspectos a serem respeitados para se obter o melhor desempenho do sistema de defensa. Em Santos (2010) são descritos alguns parâmetros que podem auxiliar na caracterização do desempenho do sistema de defensa, de forma direta ou indireta, com base em catálogos de fabricantes. Dentre todos os parâmetros, alguns serão abordados neste trabalho:

- Deformação de cedência – deformação em que se esgota a capacidade de absorção de energia para o qual foi projetada a defensa. É o ponto onde a força de reação apresenta-se elevada sem aumento da energia absorvida. Esta condição põe em risco a integridade da defensa, do costado e da estrutura de acostagem. Com este parâmetro é possível determinar a distância entre a placa da defensa e a estrutura do píer;

- Capacidade de absorção de energia – quantidade de energia absorvida até a cedência;

- Força de reação – força transferida para a estrutura de acostagem no momento em que se atinge a deformação de cedência;

- Coeficiente de eficiência – quociente entre a capacidade de absorção de energia e o produto da reação pela deformação de cedência. O valor varia entre zero e a unidade, sendo que o valor unitário significa que a força reação é transmitida para a estrutura de forma constante na fase de compressão;

- Deformação de cedência relativa – quociente entre a deformação de cedência e uma dimensão característica da defensa. Parâmetro que oscila entre 0,5 e 0,65.

2.5. Análise de sistema de amarração

A análise de um sistema de amarração não é trivial, já que as forças de excitação geradas pelas condições ambientais (corrente, onda e vento) e a resposta da embarcação atracada, são totalmente dinâmicas e não lineares.

Em Alfredini (1992), são descritas algumas características do sistema de amarração, que sob as forçantes ambientais apresentam um comportamento não linear. Uma das principais características é que, na maioria dos casos, a rigidez das espias não são semelhantes a das defensas, o que torna o processo mais complexo, já que estas duas deveriam trabalhar juntas para manter a embarcação estável. Outra questão é a ação das forças ambientais, que variam no tempo, exemplo da corrente de maré, que varia sua velocidade, direção concomitantemente com o nível d'água em períodos de aproximadamente seis horas. Também deve-se levar em consideração, dependendo do layout, se o terminal está em região abrigada, o que poderá influenciar na geração de recirculações, fazendo com que a embarcação apresente movimento de forma aleatória.

Desta forma, como descrito anteriormente, devido à complexidade para se definir um plano de amarração adequado e que possa ser aplicado a um terminal, o sistema de amarração precisa ser concebido e dimensionado através de um processo bem criterioso e consagrado. Neste contexto, atualmente existem diversos métodos para o desenvolvimento de plano de amarração, no entanto, este trabalho irá abranger somente o método analítico, apresentado pela OCIMF, e o de modelagem física reduzida.

No método analítico, a verificação do sistema de amarração é realizada de forma estática, com a aplicação da força de corrente de maré representada por um vetor, e a força exercida pelo vento sendo representada por outro vetor, sem levar em conta a movimentação da embarcação. Assim, o vetor do vento é aplicado sobre a área vélica e o vetor de corrente sobre a área de obras vivas da embarcação.

Segundo ASCE (2014), as equações aplicadas no método analítico podem ser empregadas para otimização de planos de amarração, disposição dos elementos de amarração no terminal e permitem, dependendo do caso, verificar se é possível manter uma embarcação atracada com uma condição ambiental prevista.

As desvantagens desta análise, conforme descrito em Alfredini (1992), são que para soluções das equações analíticas têm que ser impostas diversas simplificações, entre elas a redução dos números de graus de liberdade e a linearização das características elásticas das espias e defensas.

Por fim, a análise utilizando este método consiste em equilibrar as forças e os momentos aplicados na embarcação, por forças ambientais e outros fatores, contra a reação das espias e defensas. As forças transversais são representadas por Fy, forças longitudinais por Fx e os momentos por Mxy, sendo as linhas de lançante e espringue aplicadas contra as forças longitudinais e as de través contra as forças transversais.

Já os modelos físicos são a representação em escala reduzida da obra de engenharia, com a interação fluido/estruturas avaliada diretamente pela ação da água sobre as estruturas portuárias e o casco do navio, reproduzidos em condições de semelhança geométrica com relação às estruturas reais. Porém, para a correta representação dos fenômenos envolvidos, o modelo físico deve respeitar algumas condicionantes físicas, que possibilitarão obter a semelhança mecânica com o protótipo (real). No caso de estudos em modelos reduzidos que envolvam fenômenos hidráulicos de correntes, devem ser respeitados os critérios de semelhança de Froude, conforme descrito em Hughes (2005). Este

critério estabelece as relações de extrapolação para o protótipo das diversas grandezas medidas no modelo hidráulico. A definição do modelo que deve ser empregado para verificação, validação ou otimização de um projeto, dependerá das características da região e do que se pretenda estudar.

2.6. Conceito de força de arrasto

O escoamento de fluido (líquido ou gás) em torno de um corpo origina uma interação entre ambos denominado de fluido-corpo, que dependem da tensão de cisalhamento (viscosa) e da distribuição de pressões. Esta força age em direção paralela à superfície do corpo e contra o seu movimento, causando uma resistência ao seu movimento, ou no caso de um objeto em repouso pode originar movimento.

Por fim, a força de arrasto depende da propriedade do fluido e da velocidade do corpo em relação ao fluido, pois o arrasto tende a aumentar quanto maior for esta velocidade. No caso de pequenas velocidades, o arrasto é quase proporcional à velocidade do corpo, no entanto, em velocidades elevadas o arrasto pode atingir aproximadamente o proporcional ao quadrado da velocidade.

Assim, no estudo de uma embarcação atracada, para avaliar o sistema de amarração, dentre outras forçantes, o arrasto gerado pela corrente de maré e pelo vento são de suma importância. Como descrito em Alfredini (1992) e em OCIMF (2013), são estas forças que tentarão movimentar a embarcação, podendo afastá-la da linha de atracação ou até mesmo empurrá-la contra as defensas.

No item 2.6.1 e 2.6.2, foram descritas a ação do arrasto do vento e da corrente de maré sob um navio.

2.6.1. Vento

A força do vento pode afastar uma embarcação ou pressioná-la contra a linha de atracação, dependendo de sua direção/sentido. No caso de o vento afastar a embarcação, esta perde o contato com a defensa, que em conjunto com os efeitos de corrente pode potencializar a movimentação da embarcação.

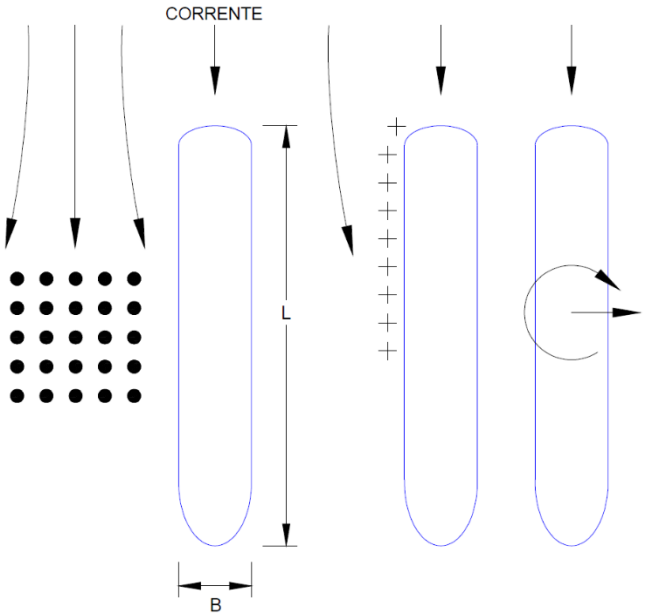
A ação do arrasto do vento é causada na superfície da embarcação que está fora da água, denominada área vélica ou obras mortas, neste caso o arrasto é mais expressivo quando a embarcação está em condição de lastro (calado leve), onde se tem maior área vélica. Assim, vento com incidência lateral da embarcação (Boreste ou Bombordo), produz força muito maior que a incidência frontal (Proa ou Popa), devido ao tamanho da área de aplicação.

2.6.2. Corrente

A movimentação que a corrente gera nas embarcações atracadas depende do ângulo (direção /sentido) e velocidade que incide. Além destas condições, o tipo de estrutura do píer também irá influenciar diretamente a movimentação da embarcação, já que em píeres com paramento fechado a corrente tende a passar entre o píer e a embarcação, causando o seu afastamento.

Em píeres com estacas também é possível, em alguns casos no qual a corrente é alinhada com o píer, com alta velocidade e grande espaçamento entre as estacas, é possível a ocorrência de um efeito denominado de "*Stand-off*". Este fenômeno exerce forças laterais devido a passagem da corrente entre a embarcação e a estrutura do píer. Nesta passagem resulta a redução da velocidade da corrente gerando um aumento no nível d'água, que logo é desviado contra a embarcação atracada, gerando uma força transversal (Figura 2-10).

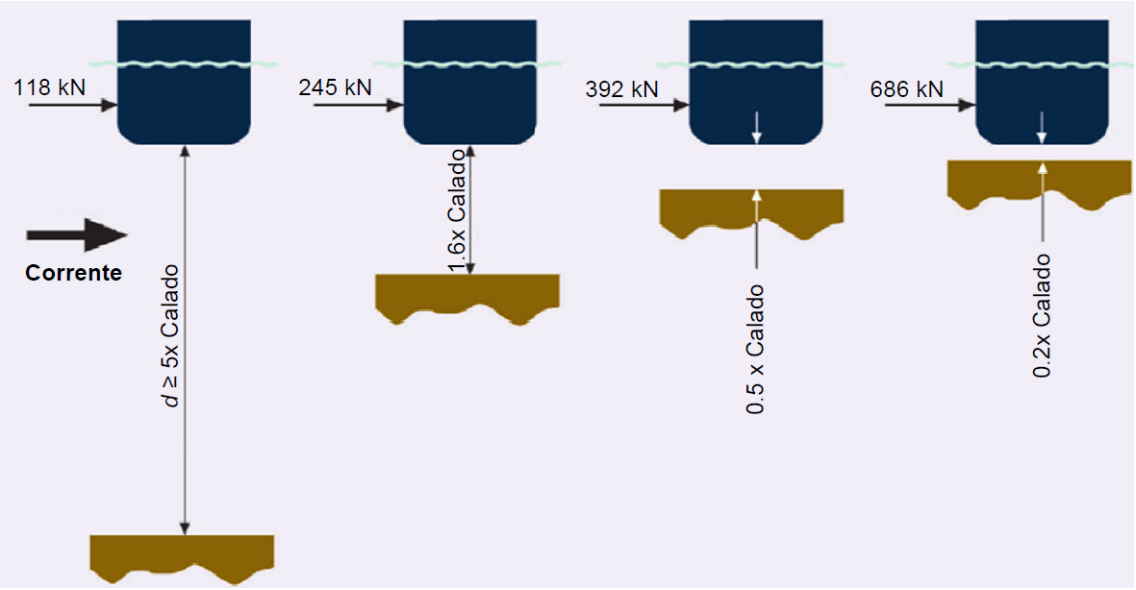
Figura 2-10 – Representação simplificada do efeito de "*Stand-Off*".



Fonte: Santos (2010).

O efeito de arrasto da corrente é exercido com maiores forças quando a embarcação está carregada (calado máximo), possuindo maior área de contato, denominada de obras vivas. Além destas condições, a força de arrasto da corrente depende primordialmente da folga sob a quilha (distância entre o fundo da bacia portuária e a quilha do navio), que devido ao carregamento da embarcação e a variação do nível da água pode ser reduzida, gerando bloqueio da passagem da corrente, que por sua vez, faz com que o escoamento passe em torno e não sob a quilha . Em casos que esta folga seja muito pequena (Figura 2-11), a força exercida pode ser, aproximadamente, seis vezes maior quando considerado água profunda (PIANC 1995).

Figura 2-11 – Representação da influência da folga sob a quilha nas forças laterais produzida por corrente de maré.



Fonte: Santos (2010) adaptado da OCIMF (2008).

2.7. Abordagem analítica

2.7.1. OCIMF-Oil Companies International Marine Forum

A recomendação feita pela OCIMF (2013) divide em dois grupos a análise dos esforços na embarcação, sendo um para o vento e um para a corrente. Algumas características devem ser levadas em conta, como as relacionadas a condições ambientais, carena da embarcação, se está carregada ou em lastro, e a relação profundidade/calado todas estas considerações entram como dado de entrada nas equações.

A primeira recomendação que a OCIMF faz ao entrar no assunto de cálculo do arrasto devido às forças ambientais é que se sigam as recomendações de boas práticas para o desenvolvimento do plano de amarração, conforme comentado no item 2.2 deste trabalho.

As recomendações ambientais feitas pela OCIMF (2013), são indicações de velocidade e direção para vento e corrente marítima, para serem empregadas no caso de não haver dados de campo ou os dados de campo apresentarem valores inferiores aos indicados abaixo:

- Vento com 60 nós de velocidade vindo de qualquer direção, simultaneamente, com qualquer condição de corrente a seguir:
    - Corrente com 3 nós de velocidade com direção de 0° ou 180° (alinhada com a linha de atracação), ou,
    - Corrente com 2 nós de velocidade com direção de 10° ou 170° (com referência na linha de atracação), ou,
    - Corrente 0,75 nós transversalmente à linha de atracação.

No caso do vento, os dados de campo devem ser registrados a uma altura de 10 m acima da superfície da água ou do chão, com tempo de coleta de 30 segundos. A seleção deste período é baseada na variação de velocidade e direção. No caso de a velocidade ser levantada em uma altura diferente, indica-se a equação abaixo para conversão do vento a 10 m de altura.

$$V_W = v_W \left(\frac{10}{h}\right)^{\frac{1}{7}} \quad (1)$$

Em que:

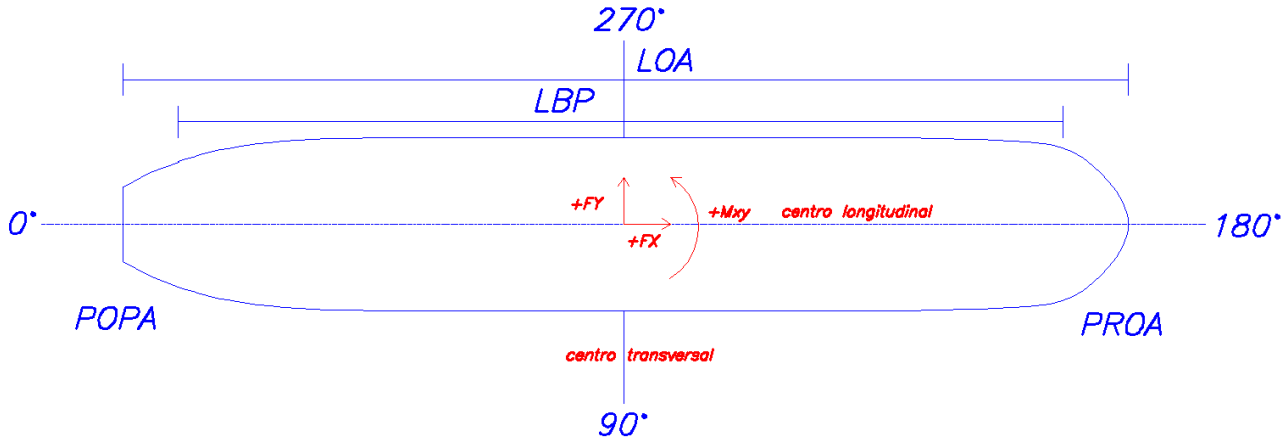
V_W: Velocidade a 10 metros de altura (m/s);

v_W: Velocidade do vento medida na altura h (m/s);

h: Altura acima da superfície da água ou do chão.

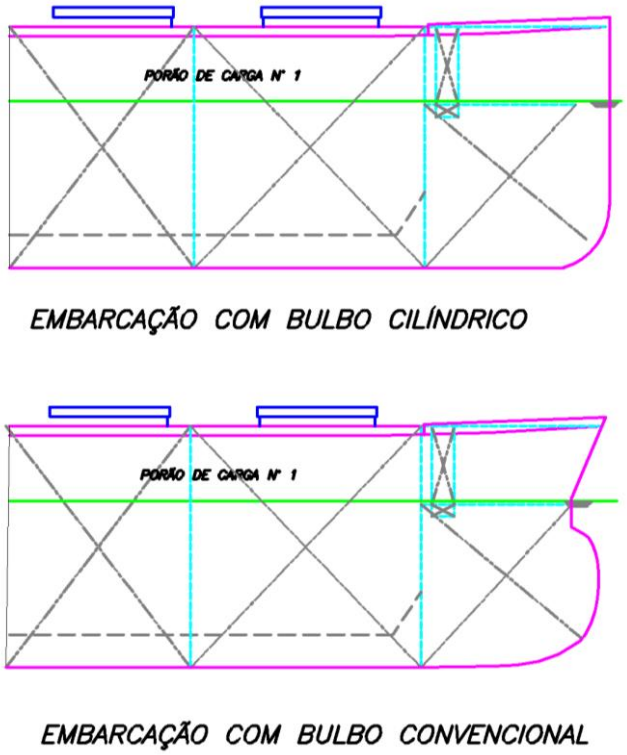
A Figura 2-12 apresenta para melhor identificação e entendimento, os sinais empregados e o sistema de coordenadas.

Figura 2-12 – Sinais convencionais e sistema de coordenadas.



Para inserir o coeficiente considerando a carena da embarcação, a OCIMF disponibiliza duas configurações de proa (bow), um com proa convencional e outra com a proa cilíndrica, conforme Figura 2-13.

Figura 2-13 – Variação da configuração de proa.



Os cálculos das forças de arrasto ocasionadas pelo vento, podem ser obtidos através das formulações abaixo:

Fórmulas para as forças de arrasto de vento:

i. $F_{Xw} = \frac{1}{2}.C_{Xw}.\rho_w.V_w{}^2.A_T$ (2)

ii. $F_{Yw} = \frac{1}{2}.C_{Yw}.\rho_w.V_w{}^2.A_L$ (3)

Onde:

ρ_w=0,1248 kgfs²/m⁴, massa específica do ar a 20°C;

C=coeficiente de arrasto em função do ângulo de ataque do vento;

V_w=velocidade do vento em nós;

A_T=área vélica transversal em m²;

A_L=área longitudinal em m²

Os dados de A_T, A_L e L_{BP}, podem ser obtidos através do projeto da embarcação. No entanto, se não for possível obter estas informações, as áreas A_T e A_L podem ser estimadas através das equações abaixo:

1. Embarcação carregada:

$$A_L = 1{,}96L_{OA}(P - T_{máx}) \quad (4)$$

$$A_T = 2{,}89B(P - T_{máx}) \quad (5)$$

2. Embarcação em lastro:

$$A_L = 1{,}96L_{OA}(P - T_{máx}) + 0{,}64L_{OA}T_{máx} \quad (6)$$

$$A_T = 2{,}89B(P - T_{máx}) + 0{,}62BT_{máx} \quad (7)$$

Nestas equações, P é o pontal da embarcação e B sua boca.

Os coeficientes C_{Xw}(forças longitudinais), C_{Yw}(forças laterais) e C_{XYw}(momento), para embarcação carregada podem ser obtidos nas Tabela 8-1 a Tabela 8-2, que estão no apêndice deste trabalho. Estes coeficientes são baseados em testes de túnel de vento realizados na Universidade de Michigan na década de 1960.

Para calcular as forças de arrasto gerado pela corrente, utiliza-se as equações abaixo:

iii. $$F_{Xc} = \frac{1}{2}.C_{Xc}.\rho_c.V_c{}^2.L_{BP}.T \quad (8)$$

iv. $$F_{Yc} = \frac{1}{2}.C_{Yc}.\rho_c.V_c{}^2.L_{BP}.T \quad (9)$$

Em que:

ρ_c=104,5 kgfs²/m⁴, massa específica da água salgada a 20°C;

C=coeficiente de arrasto em função do ângulo de ataque da corrente e a relação profundidade/calado;

V_c=velocidade média do perfil vertical da corrente do nível d'água a quilha em nós;

WD = Lâmina d'água em m;

T=calado em m;

L_{BP}=comprimento entre as perpendiculares em m.

Os coeficientes C_{Xc}(forças longitudinais), C_{Yc}(força lateral) e C_{XYc}(momento), podem ser obtidos nas Tabela 8-3 a Tabela 8-8, que se encontram no apêndice deste trabalho. Os valores destes coeficientes, para embarcação carregada, são baseados em teste realizados pela *Maritime Research Institute Netherlands* (1975-1991) para profundidade de (WD/T).

2.7.2. *Distribuição dos esforços nas espias*

Foram pesquisadas diversas teses e livros, porém não foi possível encontrar um grande número de equações para a distribuição dos esforços gerados na embarcação para as linhas de amarração. Assim, optou-se por utilizar as equações presentes em Alfredini (2014), fundamentadas em equações trigonométricas e de elasticidade para cenário de forças estáticas atuando. Este método é baseado nos princípios da hiperestática, levando em conta a geometria da amarração e, de forma simples, a elasticidade dos cabos.

Assim, estas expressões se aplicam a cabos da mesma bitola e material. As reações em cabos de diferentes materiais são proporcionais à área do cabo e ao seu módulo de elasticidade. Caso contrário, devem ser considerados comprimentos equivalentes.

Abaixo são apresentadas as fórmulas de distribuição de esforços em cada cabo nas direções longitudinal (x) e transversal (y):

$$F_{Xcabo} = R.\frac{\frac{sen\,\alpha}{L_{total}}}{\sum\frac{\mathrm{sen}^2\,\alpha}{L_{total}}} \tag{10}$$

$$F_{Ycabo} = R.\frac{\frac{cos\,\alpha}{L_{total}}}{\sum\frac{\cos^2\alpha}{L_{total}}} \tag{11}$$

Em que:

F = esforços de cada cabo;

R = força de arrasto de corrente e vento;

L_{total} = comprimento do cabo (guincho até o cabeço);

α = ângulo que o cabo forma com a direção da força;

$cos\,\alpha\,/l$ = força gerada em cada cabo;

$\cos^2 \alpha / l$ = força efetiva.

Em Alfredini (2014) são estabelecidos alguns princípios para a avaliação de um plano de amarração:

As linhas de amarração não devem ser consideradas isoladamente, devem ser consideradas interagindo com as linhas de mesma função.

Exemplos:

1. Quando houver uma espia que esteja trabalhando no mesmo sentido, porém com elasticidade diferente, deve-se considerar o comprimento equivalente do mais elástico. Exemplo, espias de nylon têm elasticidade em torno de 10 vezes maior que uma espia de aço, logo o comprimento da espia de nylon é multiplicado por 10;

2. Para retirar brando da linha de amarração é aplicada uma porcentagem de pré-tensão com referência no MBL (Minimum Breaking Load) da espia;

3. Para a restrição de través, a força reativa em cada espia é proporcional - ao $cos\alpha/l$, onde α é o ângulo horizontal formado entre a espia e a longitudinal da embarcação. A componente desta força efetiva para resistir a uma carga lateral é proporcional $(cos\alpha/l)^2/l$.. E para restrição longitudinal utiliza-se $sen\alpha/l$ e $(sen\alpha/l)^2/l$;

4. Devem-se considerar as recomendações de boas práticas para o desenvolvimento de plano de amarração, respeitando questões de ângulos e simetria;

5. As condições de trabalho das espias do plano de amarração são subdivididas em quatro situações: longitudinal (ré e vante) e transversal (ré e vante).

Para efetuar o cálculo da distribuição dos esforços, inicialmente deve-se encontrar as espias que irão trabalhar de forma solidária. A seguir, são

verificados os ângulos de cada espia. Na sequência, define-se o comprimento da espia (com referência na elasticidade). Assim, são calculados os termos $cos\alpha/l$ ou $sen\alpha/l$ e os termos $(cos\alpha/l)^2/l$ ou $(sen\alpha/l)^2/l$. Por fim, com os dados obtidos, aplica-se a equação F_{cabo}, resultando as forças solicitantes nas espias.

2.8. Modelagem física

Todo projeto de engenharia necessita de previsão do comportamento de uma estrutura ou de um meio que sofrerá alteração pela implantação ou alteração de obra. Para isto, existem métodos de previsão em que é possível inserir uma obra da qual se deseja prever o comportamento e verificar sua viabilidade técnica.

Um dos métodos descritos em Motta (1972), é o modelo físico, que é considerado um sistema no qual é possível realizar observações de um comportamento semelhante com o real, só que em menores dimensões. No modelo físico é possível realizar modificações no sistema e controlar as grandezas que devem ser consideradas, assim é possível sujeitar o projeto a condições críticas para avaliar o seu comportamento, o que muitas vezes é inviável e inseguro de se realizar no real.

Novak e Cabelka (1981), também descrevem a modelagem física como sendo um método em que é possível realizar simulações de um projeto real em menores dimensões, respeitando suas principais características, para prever o comportamento de um projeto, produzindo otimização técnica e financeira de problemas de engenharia.

No entanto, para se conseguir a representação de um fenômeno em modelo com dimensões reduzidas, torna-se necessário aplicar a teoria de semelhança, que é um conjunto de princípios que devem ser respeitados para se obter a representação de fenômenos físicos semelhante ao real.

Sharp (1981), descreve que quando se tem, no estudo a ser realizado, fenômenos físicos muito complexos, no qual não é possível obter a solução através de equações matemáticas convencionais, pode-se aplicar técnicas de análise parcial. A análise parcial não fornece uma resposta completa para a solução do problema, mas dá indicações importantes sobre o caminho correto, sendo possível através de experiências obter coeficientes e constantes, que

podem ajudar a alcançar uma definição das leis físicas que governam o fenômeno em estudo.

No entanto, para não se executar um número demasiado de experimentos, em busca das variáveis do fenômeno físico, pode-se aplicar uma técnica de análise parcial que é bem disseminada e consagrada, conhecida como análise dimensional. Esta é empregada para se obter combinações dos parâmetros envolvidos, de modo a reduzir o número de variáveis a incluir nas equações que descrevem um processo físico. Motta (1972) descreve que a análise dimensional se presta para: classificar as equações que regem um fenômeno físico; transformar o sistema de unidade; prever as relações entre as grandezas que influenciam em um fenômeno físico; e estabelecer condições de semelhança para concepção, construção, operação e interpretação de modelos físicos.

Desta forma, a partir desta teoria, para modelos hidráulicos, dois escoamentos são mecanicamente semelhantes se, em pontos homólogos, apresentarem semelhança geométrica, cinemática e dinâmica.

Em Kobus (1980), são descritas as três principais modalidades de semelhanças:

- <u>Semelhança geométrica</u>: Existe quando entre dois objetos ou sistemas a taxa que corresponde à dimensão linear for igual, respeitando a seguinte relação:

$$\lambda_L = \frac{L_p}{L_m} = \qquad (12)$$

Onde:

λ_L: fator de escala geométrica;

Subscrito “p”: refere-se às grandezas em escala real;

Subscrito “m”: refere-se às grandezas de modelo.

- <u>Semelhança cinemática</u>: É a similaridade de movimento das partículas entre o real e o modelo. Esta similaridade é alcançada quando a relação entre a componente de movimento vetorial do real e modelo estão na mesma taxa, seguindo a seguinte relação:

$$\lambda_V = \frac{\vec{u}_p}{\vec{u}_m} = \frac{\vec{v}_p}{\vec{v}_m} = \frac{\vec{w}_p}{\vec{w}_m} \tag{13}$$

Onde:

λ_V: fator de escala cinemático;

u, v, w: componentes de velocidade nas direções *x*, *y* e *z*, respectivamente.

- <u>Semelhança dinâmica</u>: É alcançada quando as componentes de forças correspondentes do real e do modelo tenham relação constante. Em Bernardino (2015) são apresentadas as equações da semelhança dinâmica. Em caso de escoamentos de fluidos reais, é possível negligenciar os efeitos de tensão superficial e compressão, sendo as principais forças agindo: força devido à pressão (*FP*), força devido à viscosidade (*FV*) e força devido à gravidade (*G*). O autor descreve a partícula fluida, segundo a lei de Newton assim:

$$\overrightarrow{FP} + \overrightarrow{FV} + \vec{G} = m \cdot \vec{a} \tag{14}$$

Ou

$$\overrightarrow{FP} + \overrightarrow{FV} + \vec{G} + \overrightarrow{FI} = 0 \tag{15}$$

Onde FI é a força de inércia.

Desta forma, garante-se a semelhança dinâmica quando:

$$\frac{\left(\overrightarrow{FP}\right)_p}{\left(\overrightarrow{FP}\right)_m} = \frac{\left(\overrightarrow{FV}\right)_p}{\left(\overrightarrow{FV}\right)_m} = \frac{\left(\vec{G}\right)_p}{\left(\vec{G}\right)_m} = \frac{\left(\overrightarrow{FI}\right)_p}{\left(\overrightarrow{FI}\right)_m} = \lambda_F \tag{16}$$

Em que:

λ_F: é o fator de escala dinâmico

No entanto, para se obter a semelhança completa seria necessário obter igualdade entre o modelo e o real em todos os números adimensionais, em outras palavras, seria necessário construir o modelo em escala 1:1, ou seja, em tamanho real. Porém, para a utilização prática de modelos físicos reduzidos, utiliza-se o princípio da semelhança incompleta, ou seja, prioriza-se a igualdade do adimensional mais importante na representação do fenômeno. Neste caso, a semelhança hidráulica seria garantida com:

Número de Froude:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \tag{17}$$

Número de Reynolds:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} \tag{18}$$

Número de Euler:

$$Eu = \frac{p}{\rho \cdot V^2} \tag{19}$$

Número de Weber:

$$\mathrm{W} = \frac{\rho v^2 D}{\sigma} \tag{20}$$

Onde:

V = velocidade média do escoamento (m/s);

D = dimensão característica que intervém no fenômeno a ser representado (m);

ρ = massa específica do fluido (kg/m^3);

σ = coeficiente de tensão superficial do fluido (N/m);

ν = viscosidade cinemática do fluido (m^2/s);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

y = profundidade média do escoamento de superfície livre;

c = velocidade de propagação de som no meio fluido.

Sendo:

- O número de Froude é a relação entre a velocidade e a força gravitacional;
- O número de Reynolds é a relação entre as forças de inércia, representadas pela velocidade e as forças viscosas, representadas pelo coeficiente de viscosidade cinemática do fluido;
- O número de Euler é a relação entre as forças de inércia com as forças de pressão;
- O número de Weber é a relação entre as forças de inércia com as forças de tensão superficial;

No caso do escoamento livre, a igualdade entre os números de Froude de modelo e protótipo garante uma adequada reprodução das condições de fluxo, e permite a determinação de importantes grandezas físicas por meio dos ensaios no modelo físico. Hughes (2005) corrobora afirmando que praticamente em todos os problemas envolvendo correntes hidráulicas, as forças regentes são a gravitacional e de viscosidade. Assim, os números de Froude e Reynolds são

importantes, porque a semelhança de um destes números combinados com a semelhança geométrica fornece as condições necessárias para semelhança hidrodinâmica na maioria dos modelos de correntes hidráulicas.

Desta forma, é estabelecida a igualdade entre os números de Froude do modelo e do protótipo:

$$\frac{V_m}{\sqrt{g.y_m}} = \frac{V_p}{\sqrt{g.y_p}} \qquad (21)$$

Sendo λ a escala geométrica:

$$\lambda = \frac{L_p}{L_m} \qquad (22)$$

Resultam as seguintes escalas:

- Escala de velocidades: $\frac{V_p}{V_m} = \lambda^{1/2}$ (23)

- Escala de pressões: $\frac{p_p}{p_m} = \lambda$ (24)

- Escala de tempos: $\frac{T_p}{T_m} = \lambda^{1/2}$ (25)

- Escala de vazões (volume): $\frac{Q_p}{Q_m} = \lambda^{5/2}$ (26)

- Escala de força: $\frac{F_p}{F_m} = \lambda^3$ (27)

Onde referem-se:

p – protótipo (real);

m – modelo.

Quando não é possível representar todas as características do escoamento, ou seja, quando as forças representadas no modelo atuam de forma diferente do real apresentando discrepância entre os parâmetros adimensionais, ocorre o chamado efeito de escala, que em outras palavras, é o efeito das forças que atuarão de forma diferente no real e no modelo.

Motta (1972), descreve que o efeito de escala nada mais é que o erro contido nas previsões do modelo, em virtude de não ser possível ao mesmo tempo a semelhança entre as diversas forças que agem no fenômeno.

No caso de modelo com escoamento de superfície livre, fundado nos critérios de Froude, a ação da viscosidade e da tensão superficial são os principais causadores do efeito de escala. No caso, a ação da força de viscosidade pode ser definida através do número de Reynolds que estabelece o tipo de regime do escoamento, tanto no real como no modelo, sendo estes: regime laminar, turbulento e de transição. Para o efeito de tensão superficial, pode ser estabelecido pelo número de Weber.

Assim, como descrito em Bernardino (2015), para mitigar o efeito de escala em modelos reduzidos, ou seja, para que a ação da viscosidade e da tensão superficial possam ser desprezadas, é recomendado que o regime do escoamento seja do tipo turbulento rugoso, e que, para modelos em que haja fenômenos de ondas, o número de Weber esteja acima de 500.

Por fim, Gerent (2010) indica que, do ponto de vista técnico, é recomendado que a escala geométrica seja a maior possível, para assim evitar o aparecimento de efeito de escala na representação do fenômeno. No entanto, do ponto de vista econômico, nos estudos em modelos físicos reduzidos procura-se reproduzir o projeto real na menor escala possível, utilizando menores áreas e o mínimo de gasto com material para sua construção. Desta forma, é necessário que se encontre um equilibro entre os principais fenômenos que serão representados e o que se pretende medir.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a elaboração deste trabalho, utilizou-se o estudo de caso (TPPM), localizado na Baía de São Marcos - MA, em que o regime da maré é semidiurna, com amplitudes de maior ocorrência entre 5,0 m e 5,5 m, podendo alcançar até 7,0 m em sizígias equinociais. Por conta desta variação periódica do nível do mar, as correntes marítimas próximas ao terminal podem atingir velocidades elevadas, da ordem de 6 nós, o que torna este projeto portuário muito singular no mundo. Com relação a outras condicionantes ambientais, esta região é bem abrigada da ação de ondas, e os ventos somente têm alguma influência sobre os navios atracados quando mais leves (no início do carregamento), mas muito menor do que as correntes. Assim, para fins práticos, as correntes podem ser consideradas como única forçante para avaliação de planos de amarração de navios no TPPM (Figura 3-1).

Além disso, o campo de correntes próximo aos berços de atracação do TPPM é extremamente complexo, pois além das mudanças provocadas pela variação dos níveis d’água em decorrência das marés, o escoamento local tem a formação de grandes zonas de recirculação, além de intensos vórtices próximos às estruturas portuárias. Com relação à ação de ondas, o TPPM está localizado em trecho de baía bem abrigada, e na qual a ação dos ventos é de importância secundária. Neste ambiente, as embarcações atracadas, que podem chegar a comprimentos superiores a 360 m, com capacidade para carregar até 400 mil toneladas de minério, solicitam um sistema de amarração mais reforçado do que o usual.

Figura 3-1 – Localização dos Berços Terminal Ponta da Madeira.

Assim, para o estudo de caso foram desenvolvidos três planos de amarração, um para cada berço, localizados no Terminal Ponta da Madeira, Píer I, Píer III Berço Sul e PIV Norte, com as características e necessidades reais do terminal. Em seguida, foram avaliados nos dois métodos de análise apresentados a estimativa de esforços nas linhas de amarração de navios atracados sob o efeito de corrente de maré com amplitude de 5,0 m.

Para o método analítico, foram empregados os critérios apresentados na publicação da OCIMF, em que será possível determinar os esforços na espia realizando os cálculos com auxílio de uma planilha de Excel. Para distribuir os esforços de arrasto de corrente e vento nos cabos, foi empregado o método apresentado em ALFREDINI (2014).

No segundo caso, a ferramenta a ser utilizada foi a do modelo físico reduzido de Ponta da Madeira existente no Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

3.1. Planos de amarração

Inicialmente, foi definido um plano de amarração para cada um dos três berços diferentes, localizados no Terminal Ponta da Madeira, respeitando todas as características do berço e do navio empregado.

Para a verificação dos esforços nos cabos de amarração, foi empregado o navio graneleiro da classe VLOC (Very Large Ore Carrier), com capacidade máxima de carregamento de 300.000 DWT (Deadweight Tonnage) e com calado máximo de 21,5 m. Para todos os planos foi considerado o calado máximo, ou seja, totalmente carregado, utilizando cabos de bordo de HMPE com MBL de 100 tf e embarcação atracada por Boreste.

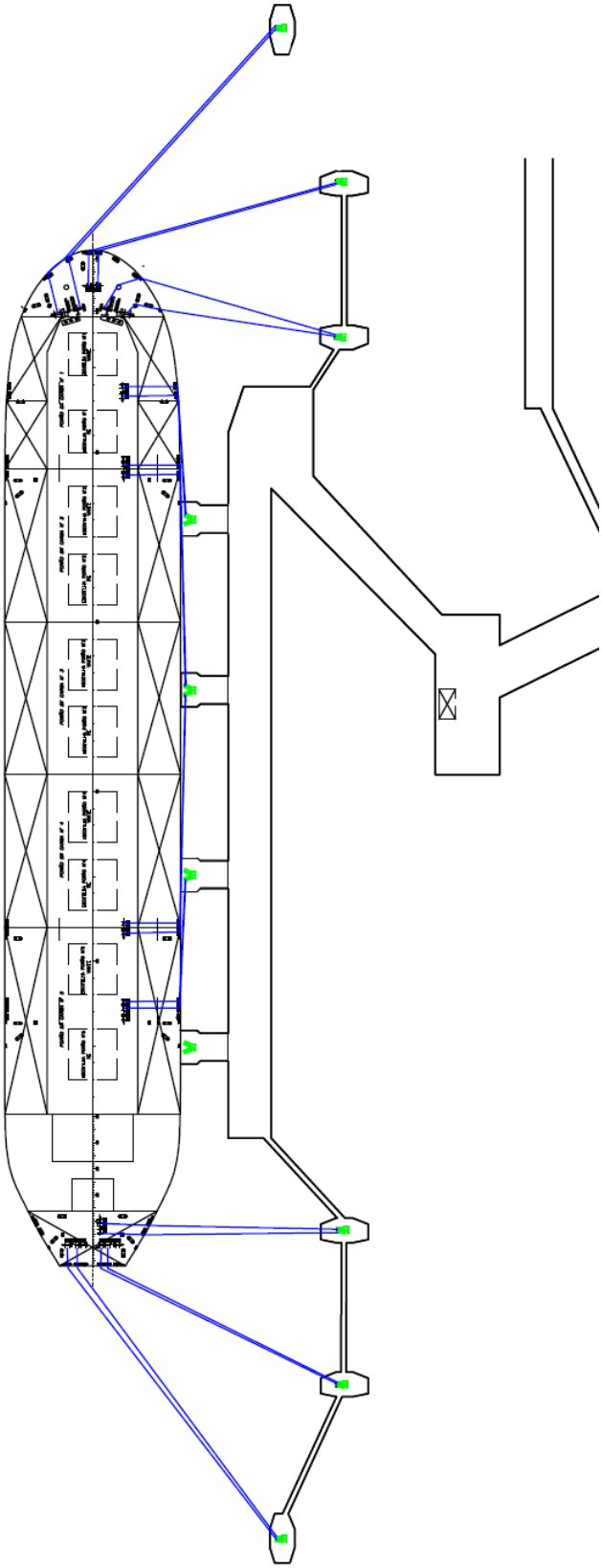
Para os dois métodos indicados, os cabos dos planos de amarração foram separados em grupos e denominados conforme o sentido de trabalho. O grupo é composto pelos cabos que possuem o mesmo sentido de trabalho, material e comprimento relativamente iguais. Ou seja, se um navio possui quatro cabos de lançante de vante, sendo dois de aço e dois de HMPE, estes serão separados em dois grupos, um com somente os cabos de aço e outro com somente os cabos de HMPE, e assim aplica-se para os demais cabos por setor do plano de amarração.

O plano de amarração para o Píer I, foi desenvolvido utilizando somente os cabos de bordo, sendo 4 lançantes de ré, 2 traveses de ré, 4 espringues de ré, 4 espringues de vante, 2 través de vante e 4 lançantes de vante, conforme Tabela 3-1 e a Figura 3-2 que apresentam a composição do plano.

Tabela 3-1 – Composição plano de amarração no Píer I.

Píer I - 300.000 DWT			
Cabo	Grupo	Quantidade	Material (MBL)
Lançante de Ré 1	LR1	2	HMPE (100tf)
Lançante de Ré 2	LR2	2	HMPE (100tf)
Través de Ré 1	TR1	2	HMPE (100tf)
Espringue de Ré 1	SR1	2	HMPE (100tf)
Espringue de Ré 2	SR2	2	HMPE (100tf)
Espringue de Vante 1	SV1	2	HMPE (100tf)
Espringue de Vante 2	SV2	2	HMPE (100tf)
Través de Vante 1	TV1	2	HMPE (100tf)
Lançante de Vante 1	LV1	2	HMPE (100tf)
Lançante de Vante 2	LV2	2	HMPE (100tf)

Figura 3-2 - Plano de amarração do navio do tipo VLOC no Píer I.

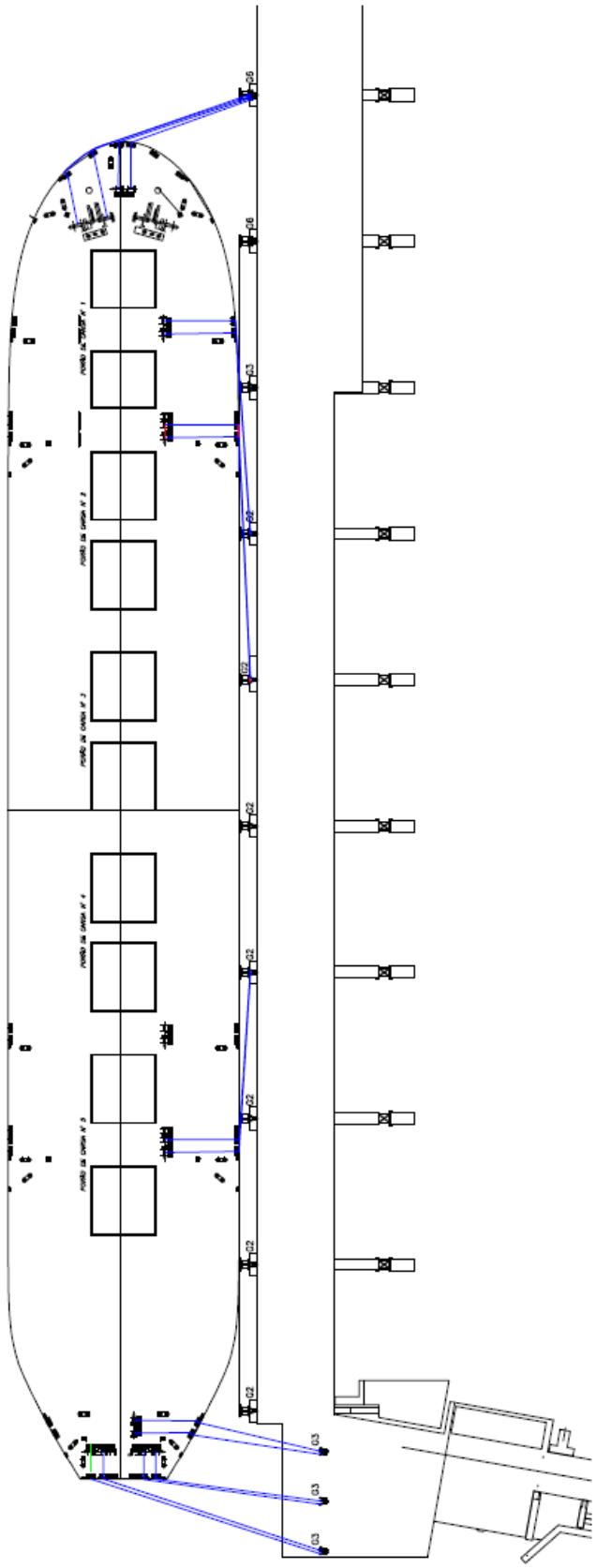


Para o VLOC atracado no Píer III no berço Sul, o plano de amarração foi desenvolvido utilizando somente os cabos de bordo, sendo 4 lançantes de ré, 2 traveses de ré, 2 espringues de ré, 4 espringues de vante e 4 lançante de vante, conforme Tabela 3-2 e a Figura 3-3, que apresentam a composição do plano.

Tabela 3-2 - Composição plano de amarração no Píer III Berço Sul.

Píer III - Berço Sul - 300.000 DWT			
Cabo	Grupo	Quantidade	Material (MBL)
Lançante de Ré 1	LR1	2	HMPE (100tf)
Lançante de Ré 2	LR2	2	HMPE (100tf)
Través de Ré 1	TR1	2	HMPE (100tf)
Espringue de Ré 1	SR1	2	HMPE (100tf)
Espringue de Vante 1	SV1	2	HMPE (100tf)
Espringue de Vante 2	SV2	2	HMPE (100tf)
Lançante de Vante 1	LV1	2	HMPE (100tf)
Lançante de Vante	LV2	2	HMPE (100tf)

Figura 3-3 - Plano de amarração do navio do tipo VLOC no Píer III berço Sul.

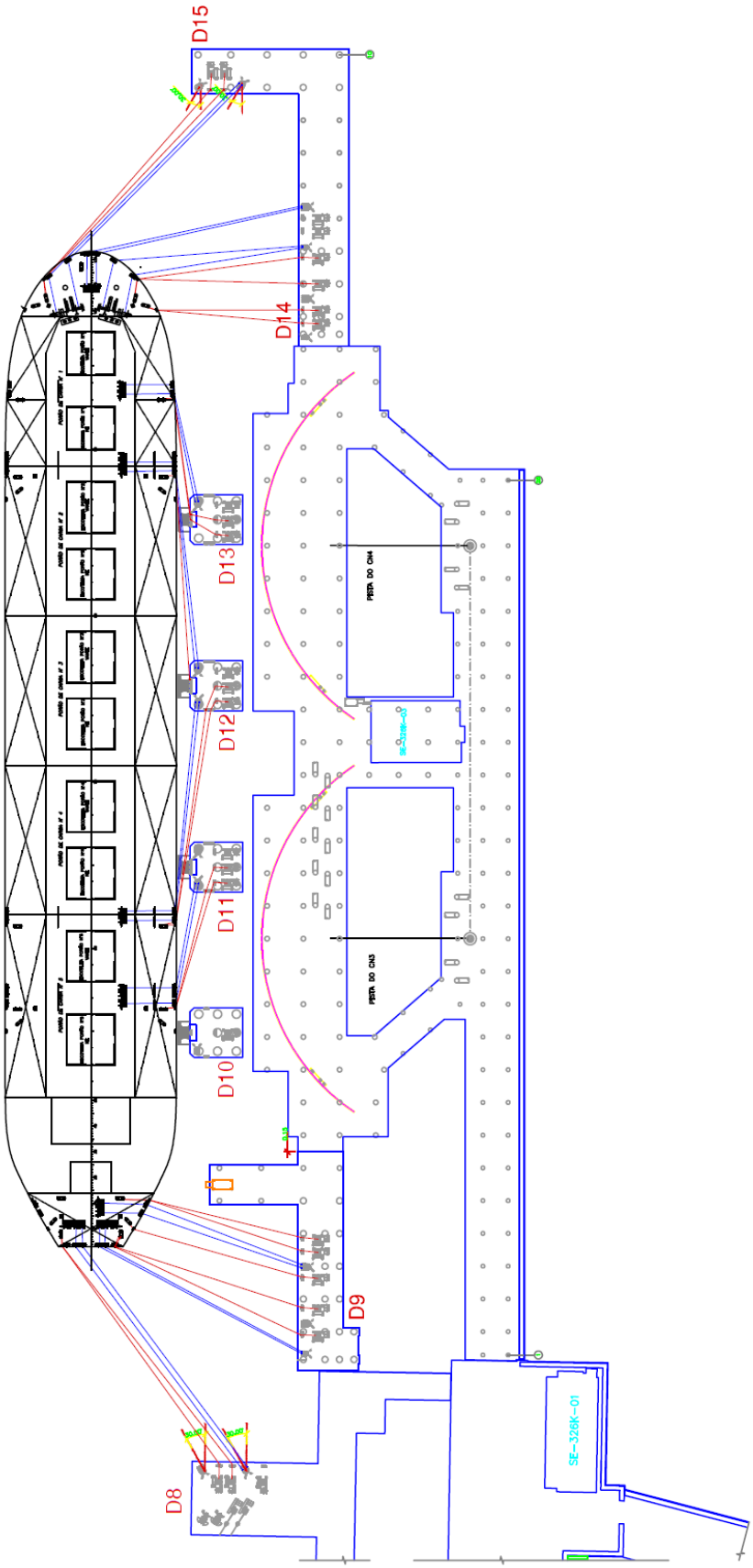


Diferentemente dos dois berços anteriores, o Píer IV Norte possui cabos auxiliares para complementar a amarração, os chamados guinchos de terra. Nestes guinchos foram considerados cabos de HMPE com MBL de 180 tf. Assim, o plano de amarração foi desenvolvido com 4 lançantes de ré (2 de bordo e 2 de terra), 9 traveses de ré (4 de bordo e 5 de terra), 7 espringues de ré (4 de bordo e 3 de terra), 7 espringues de vante (4 de bordo e 3 de terra), 8 traveses de vante (4 de bordo e 4 de terra) e 4 lançantes de vante (2 de bordo e 2 de terra), conforme Tabela 3-3 e a Figura 3-4 apresentam a composição do plano.

Tabela 3-3 - Composição plano de amarração no Píer IV Berço Norte.

Píer IV - Berço Norte - 300.000 DWT			
Cabo	Grupo	Quantidade	Material (MBL)
Lançante de Ré 1	LR1	2	HMPE (180tf)
Lançante de Ré 2	LR2	2	HMPE (100tf)
Través de Ré 1	TR1	4	HMPE (100tf)
Través de Ré 2	TR2	5	HMPE (180tf)
Espringue de Ré 1	SR1	2	HMPE (180tf)
Espringue de Ré 2	SR2	2	HMPE (100tf)
Espringue de Ré 3	SR3	2	HMPE (180tf)
Espringue de Ré 4	SR4	2	HMPE (100tf)
Espringue de Vante 1	SV1	2	HMPE (100tf)
Espringue de Vante 2	SV2	2	HMPE (180tf)
Espringue de Vante 3	SV3	2	HMPE (100tf)
Través de Vante 1	TV1	4	HMPE (180tf)
Través de Vante 2	TV2	4	HMPE (100tf)
Lançante de Vante 1	LV1	2	HMPE (100tf)
Lançante de Vante 2	LV2	2	HMPE (180tf)

Figura 3-4 - Plano de amarração do navio do tipo VLOC no Píer IV berço Norte.



Conforme descrito anteriormente, os cabos de amarração foram agrupados para a realização das estimativas de esforços, assim a Figura 3-5, apresenta o agrupamento do plano de amarração do navio de 300.000 DWT atracado no píer I, a Figura 3-6 apresenta para o mesmo navio o agrupamento do plano de amarração no Píer III Berço Sul e na Figura 3-7 é apresentado o agrupamento para o plano de amarração empregado no Píer IV Berço Norte.

Figura 3-5 – Agrupamento do plano de amarração do navio do tipo VLOC no Píer I.

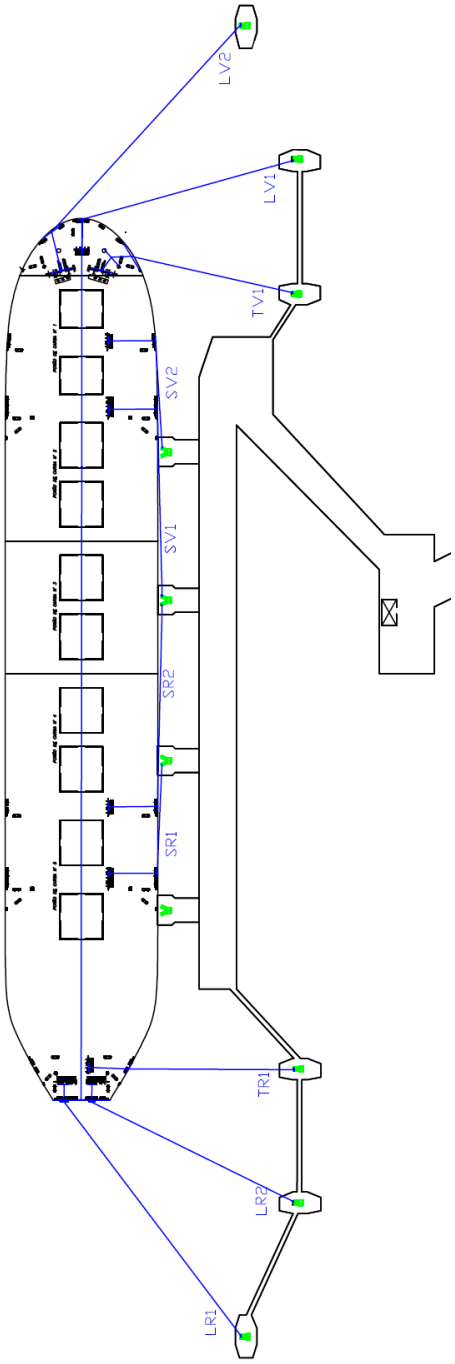


Figura 3-6 – Agrupamento do plano de amarração do navio do tipo VLOC no Píer III berço Sul

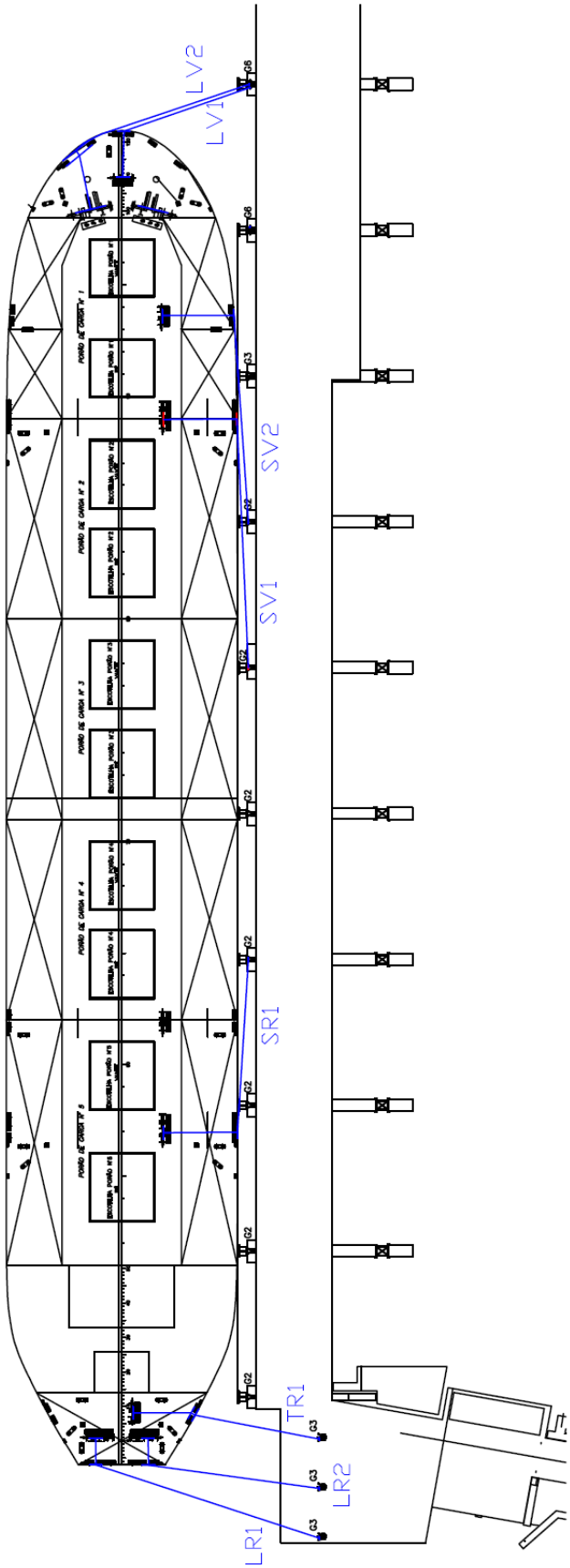
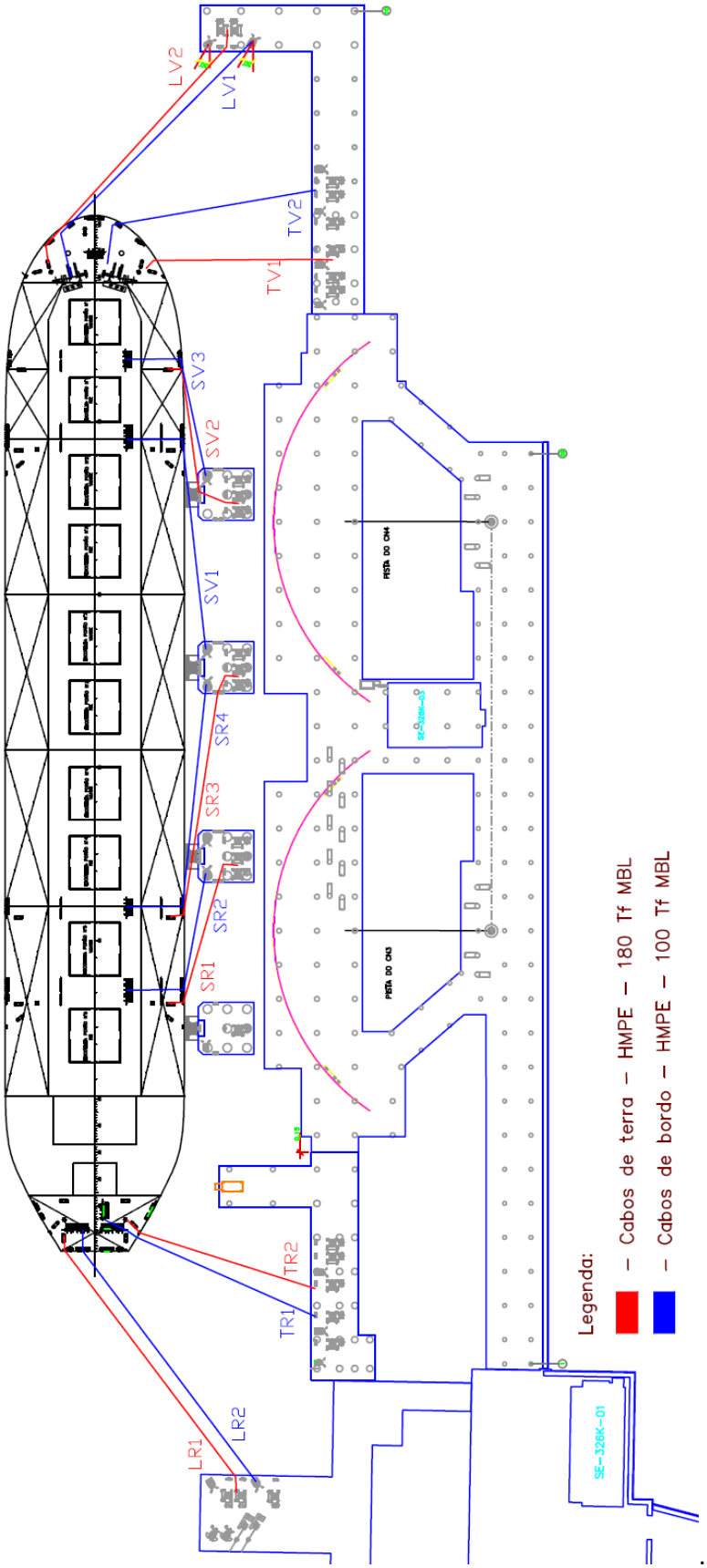


Figura 3-7 – Agrupamento do plano de amarração do navio do tipo VLOC no Píer IV berço Norte



3.2. Método analítico.

Para o método analítico, com auxílio do software AutoCad, foram identificados os cabos que estão trabalhando no mesmo sentido, ou seja, de forma solidária, e, assim, extraído o comprimento e ângulo de cada cabo.

Em uma primeira planilha, desenvolvida no Excel, foram inseridas as características do navio empregado: Calado (m), Tipo de Proa, Comprimento entre Perpendiculares (m), Boca (m), Área vélica longitudinal (m²), Área Vélica Transversal (m²), bem como as características do berço: Profundidade (m) e Relação Profundidade/Calado (Tabela 3-4). Por fim, foram inseridas as características da corrente de maré: Velocidade (m/s), Ângulo de Ataque e Massa Específica (kg/m³). Essas informações foram obtidas através do levantamento da corrente incidente no navio no modelo computacional e físico (Tabela 3-5). Assim, desta planilha, após inserir estas informações, foram fornecidos os coeficientes de arrasto, as forças e as resultantes, devido a incidência da corrente de maré no navio.

Tabela 3-4 – Características do navio e berço.

Calado (T)	21,5 (m)
Tipo de Proa (Tipo)	Convencional
Distância entre Perpendiculares (L_{BP})	320 (m)
Boca (B)	57 (m)
Área vélica longitudinal (A_L)	2560 (m²)
Área Vélica Transversal (A_T)	1065,9 (m²)
Profundidade (WD)	25 (m)
Relação Profundidade/Calado (WD/T)	1,2

Tabela 3-5 – Características da corrente de maré utilizada no método analítico para cada píer na condição de enchente e vazante no instante de ½ maré.

Corrente de maré para a amplitude de 5,0 m.			
Píer	Condição da maré	Velocidade (m/s)	Rumo (°)
I	Enchente	0,74	177
I	Vazante	1,02	2
III – S	Enchente	0,47	173
III – S	Vazante	0,84	5
IV – N	Enchente	1,20	218
IV – N	Vazante	1,34	18

Com todos os dados coletados, esses foram empregados de entrada em outra planilha (Excel), desenvolvida para realizar os calculados de distribuição dos esforços nos cabos de amarração, e depois inseridos sob o resultado a pré-tensão de 10% do MBL do cabo, conforme apresentado em ALFREDINI (2014) e OCIMF (1978). Nas Tabela 3-6 a Tabela 3-8 é possível observar os dados extraídos para cada plano de amarração.

Tabela 3-6 – Características do plano de amarração do navio VLOC no Píer I.

Píer I - 300.000 DWT					
Cabo	Grupo	Ângulo (°)	Comprimento (m)	Quantidade	Material (MBL)
Lançante de Ré 1	LR1	-53	116	2	HMPE (100tf)
Lançante de Ré 2	LR2	-26	91	2	HMPE (100tf)
Través de Ré 1	TR1	0	76	2	HMPE (100tf)
Espringue de Ré 1	SR1	-87	58	2	HMPE (100tf)
Espringue de Ré 2	SR2	-89	93	2	HMPE (100tf)
Espringue de Vante 1	SV1	89	88	2	HMPE (100tf)
Espringue de Vante 2	SV2	86	58	2	HMPE (100tf)
Través de Vante 1	TV1	-13	75	2	HMPE (100tf)
Lançante de Vante 1	LV1	16	93	2	HMPE (100tf)
Lançante de Vante 2	LV2	48	119	2	HMPE (100tf)

Tabela 3-7 – Características do plano de amarração do navio VLOC no Píer III Berço Sul.

Píer III - Berço Sul - 300.000 DWT					
Cabo	Grupo	Ângulo (°)	Comprimento (m)	Quantidade	Material (MBL)
Lançante de Ré 1	LR1	-18	64	2	HMPE (100tf)
Lançante de Ré 2	LR2	-8	49	2	HMPE (100tf)
Través Ré 1	TR1	-11	46	2	HMPE (100tf)
Espringue de Ré 1	SR1	-86	61	2	HMPE (100tf)
Espringue de Vante 1	SV1	87	79	2	HMPE (100tf)
Espringue de Vante 2	SV2	86	69	2	HMPE (100tf)
Lançante de Vante 1	LV1	19	44	2	HMPE (100tf)
Lançante de Vante	LV2	19	61	2	HMPE (100tf)

Tabela 3-8 – Características do plano de amarração do navio VLOC no Píer IV Berço Norte.

Píer IV - Berço Norte - 300.000 DWT					
Cabo	Grupo	Ângulo (°)	Coprimento (m)	Quantidade	Material (MBL)
Lançante de Ré 1	LR1	-53	99	2	HMPE (180tf)
Lançante de Ré 2	LR2	-53	98	2	HMPE (100tf)
Través de Ré 1	TR1	-24	73	4	HMPE (100tf)
Través de Ré 2	TR2	-18	64	5	HMPE (180tf)
Espringue de Ré 1	SR1	-74	55	2	HMPE (180tf)
Espringue de Ré 2	SR2	-79	55	2	HMPE (100tf)
Espringue de Ré 3	SR3	-81	85	2	HMPE (180tf)
Espringue de Ré 4	SR4	-84	88	2	HMPE (100tf)
Espringue de Vante 1	SV1	84	84	2	HMPE (100tf)
Espringue de Vante 2	SV2	82	57	2	HMPE (180tf)
Espringue de Vante 3	SV3	78	55	2	HMPE (100tf)
Través de Vante 1	TV1	0	60	4	HMPE (180tf)
Través de Vante 2	TV2	10	77	4	HMPE (100tf)
Lançante de Vante 1	LV1	45	100	2	HMPE (100tf)
Lançante de Vante 2	LV2	48	97	2	HMPE (180tf)

3.3. Modelo físico reduzido do Terminal Portuário de Ponta da Madeira.

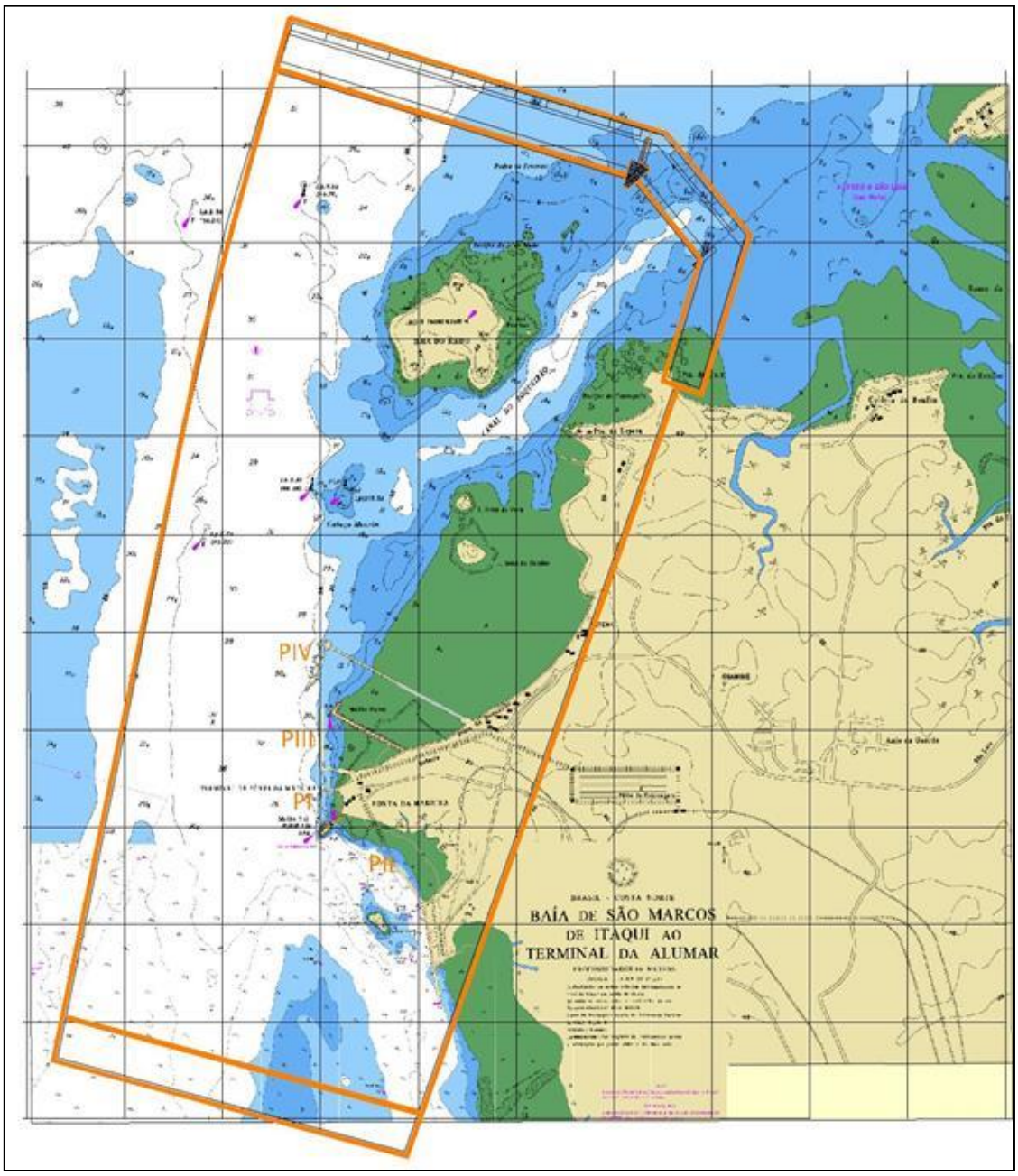
O modelo físico reduzido do Terminal Portuário de Ponta da Madeira foi projetado com base nos critérios de semelhança de Froude para escoamentos

de superfície livre. Esta condição, por si só, estabelece as relações de extrapolação para o real, das diversas grandezas medidas no modelo. Este modelo foi construído geometricamente de forma não distorcida, obedecendo aos critérios de semelhança de Froude e suas escalas principais são:

- Geométrica linear: 1:170
- Velocidade do escoamento: 1:13,04
- Tempos: 1:13,04
- Forças: 1:4.913.000

Este modelo representa aproximadamente 42 km² das proximidades do Terminal, abrangendo desde a região ao norte da Ilha do Medo até o sul do Porto de Itaqui. Os limites do modelo físico estão representados sobre a Carta Náutica nº 413 da Marinha do Brasil ilustrada na Figura 3-8.

Figura 3-8 – Carta náutica Nº 413 da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil com destaque para a área de reprodução do modelo físico.

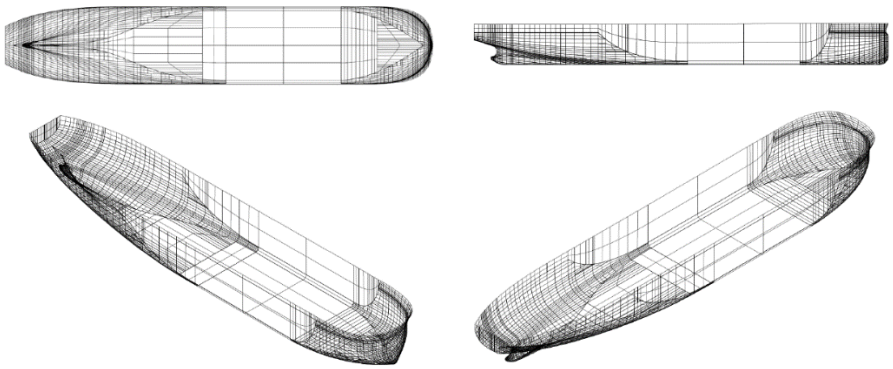


Para simulação das condições hidrodinâmicas, o galpão onde está construído o modelo possui 4 (quatro) conjuntos de moto-bomba com autonomia de vazão de até 1,0 m³/s. Possui, também, sistemas de alimentação e restituição através de circuito fechado de tubulações que garantem escoamento em regime permanente. Além disto, dispõe de um reservatório subterrâneo com capacidade

de 1000 m³, sendo este volume armazenado superior à necessidade para os ensaios.

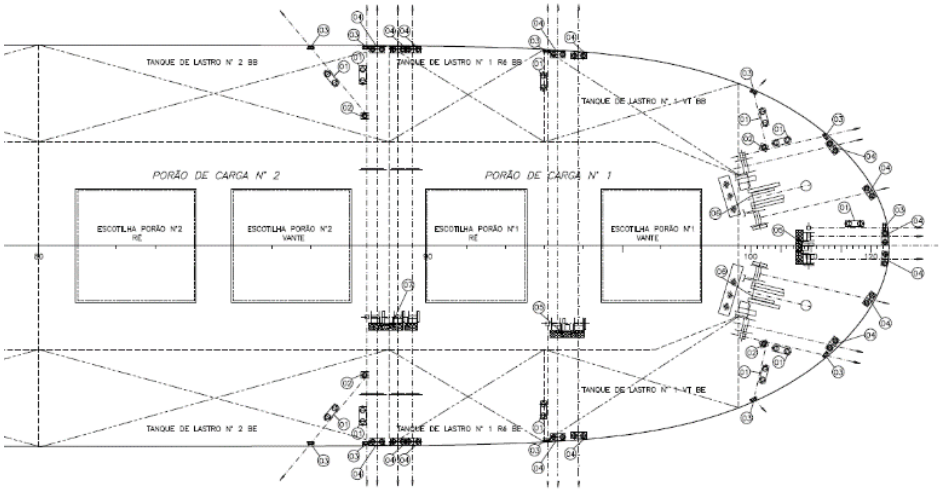
O modelo físico reduzido do Terminal Ponta da Madeira representa as características topográficas e batimétricas da região. Além disto, também são reproduzidas em escala reduzida as embarcações que atracam nestes terminais. Para isto, com base no projeto estrutural (plano de linhas e cavernas, Figura 3-9) e no arranjo geral do navio real (projeto do convés do navio com a locação dos elementos de amarração com: guinchos, cabeços, roletes e buzinas, Figura 3-10), o modelo do casco e os elementos de amarração são confeccionados respeitando-se a semelhança geométrica (Foto 3-1).

Figura 3-9 – Plano de linha de navio VLOC, da parte superior direita: vista de planta, lateral e vistas anguladas.



Fonte: acervo do CTH-USP.

Figura 3-10 – Exemplo de um arranjo geral do sistema de amarração na proa de um navio.



Fonte: acervo do CTH-USP.

Foto 3-1 - Vista do navio real VLOC de 300.000 tpb (à esquerda) e de seu modelo em escala reduzida de 1:170 (à direita).

Fonte: acervo do CTH-USP.

Ademais, o modelo da embarcação é calibrado com referência aos dados de construção do navio real, utilizando-se principalmente as caraterísticas de centro de gravidade, raio de giração e a distribuição da carga nos porões. Deste modo, garante-se que os movimentos, acelerações e outras variáveis do fenômeno em estudo estarão representados em condições de semelhança com o real. No modelo reduzido do navio também é possível representar qualquer condição de calado, sendo estes: carregado, meia carga ou lastro.

3.3.1. Calibração da corrente de maré no modelo físico.

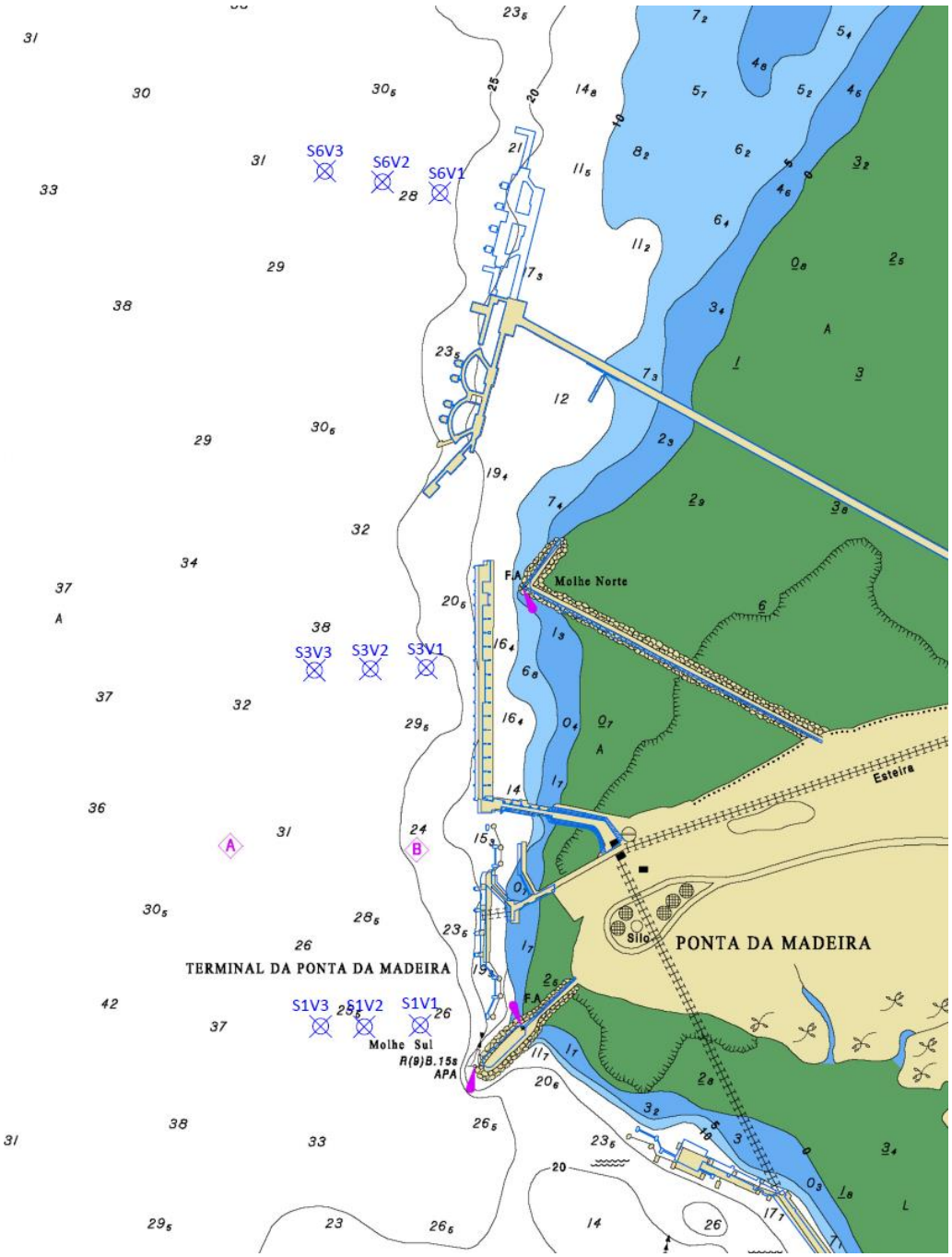
Para a verificação da calibração da corrente de maré com amplitude de 5,0 m para condição de enchente e vazante, no modelo físico, foram empregados pontos georreferenciados de velocidade, rumo e nível d'água, obtidos a partir de dados de levantamento extraído do modelo computacional da modelagem hidrodinâmica na Baía de São Marcos. Este modelo foi desenvolvido pela equipe técnica do Laboratório de Hidráulica para o projeto da Vale, com aplicação do software Delft3D®. Este modelo possui resolução de grade variável, com área das células entre aproximadamente 4000 m X 4000 m nas áreas mais distantes do terminal e aproximadamente 20 m x 20 m nas proximidades dos Píeres de Ponta da Madeira.

Figura 3-11 – Visão geral da grade do modelo hidrodinâmico da Baía de São Marcos.

Fonte: LHEPUSP (2018).

O modelo computacional está calibrado e validado com os dados de levantamentos batimétricos realizados no ano de 2012, complementados com dados do acervo do Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para a principal forçante do padrão de circulação na Baía de São Marcos que é a maré.

Figura 3-12 – Pontos empregados para calibração do modelo físico.



Assim, definidos pontos no modelo físico (Figura 3-12), homólogos com o modelo computacional para a calibração da velocidade e direção da corrente de maré. Foram utilizados MicroADV, que é um velocímetro acústico, que imerso na água emite uma frequência pelo sensor central, e ao encontrar partículas em suspensão, retorna para as três hastes laterais (Foto 3-2) obtendo a velocidade e direção da corrente.

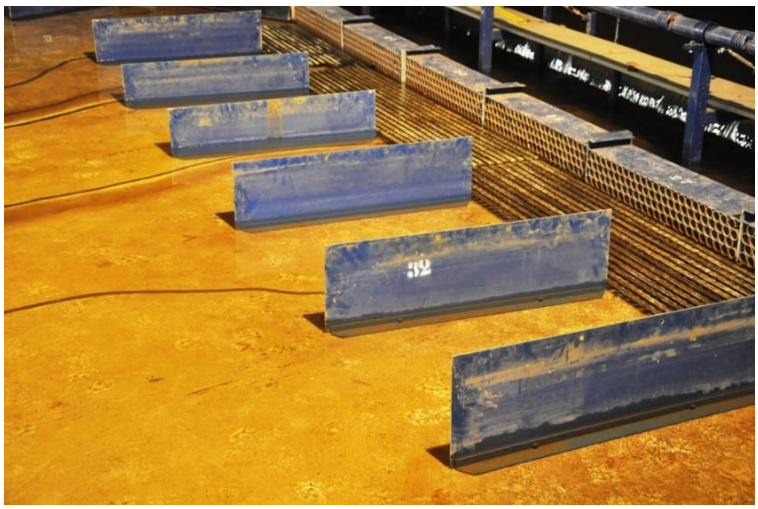
Foto 3-2 – MicroADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) empregado para medir a velocidade e direção da corrente de maré no modelo físico.

Fonte: acervo do CTH-USP.

Para o ajuste da velocidade no modelo, além da verificação das características de contorno, são impostas vazões que são controladas por registros instalados nas tubulações de alimentação. Para a medição da vazão é empregado um medidor de vazão do tipo deprimogêneo, que com auxílio de um disco de orifício concêntrico, realiza a medição pela diferença de pressão na tubulação

Além disto, para uniformização do fluxo de entrada d'água no modelo, foram empregados módulos distribuidores de vazão e painéis tranquilizadores, como apresentado na Foto 3-3.

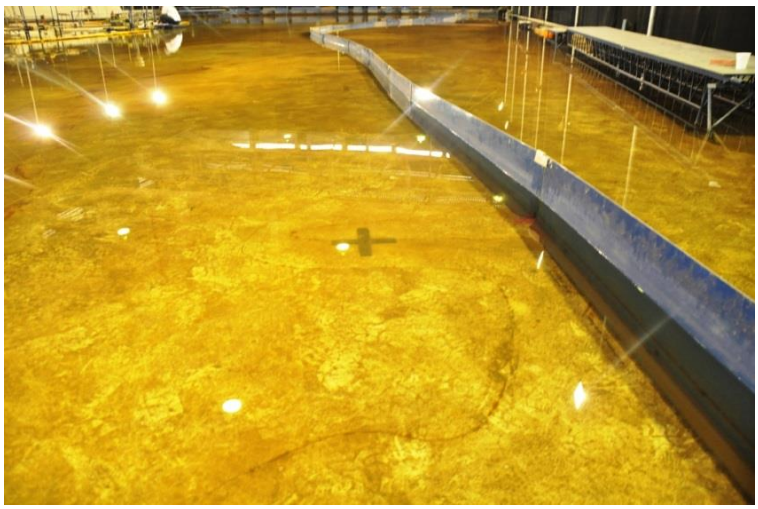
Foto 3-3 – Distribuidores de vazão (tipo colmeia, que são módulos com tubos de PVC), sistema de tranquilização (estrutura gradeada de madeira) e placas direcionadoras de fluxo.



Fonte: Bernardino (2015) (Acervo do LHEPUSP).

Além do ajuste de entrada da vazão no modelo, para ajuste de velocidade em um determinado ponto, dentro do modelo, são posicionadas placas metálicas de restrição de secção transversal ao longo do modelo, que, conforme são posicionadas, podem reduzir uma secção (aumentando a velocidade) ou aumentar a secção (diminuindo a velocidade).

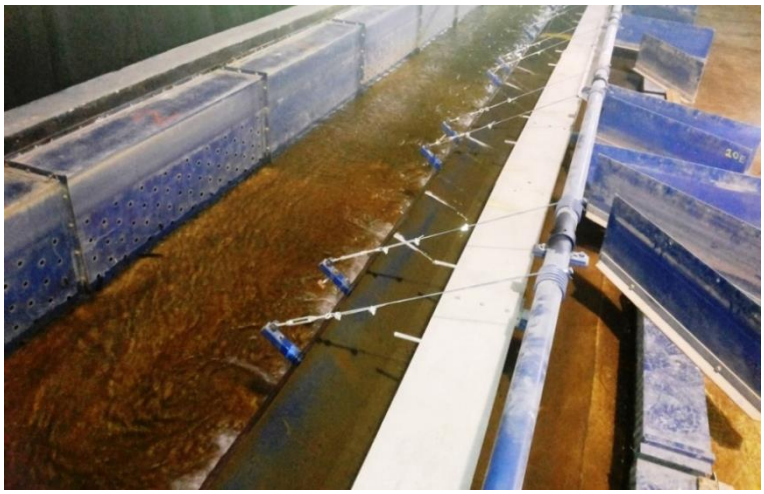
Foto 3-4 - Placas utilizadas para redução ou aumento da secção, logo aumentando ou diminuindo as velocidades na seção de interesse.



Fonte: Bernardino (2015) (Acervo do LHEPUSP).

Ademais, para controle do nível d'água e para realizar a inversão do sentido do escoamento, permitindo a representação da condição de maré de enchente e vazante, o modelo possui nas suas extremidades comportas basculantes (Foto 3-5), e em pontos homólogos do marégrafo do Terminal, são instaladas pontas limnimétricas que são empregadas para medição do nível d'água no modelo (Foto 3-6).

Foto 3-5 – Comporta basculante instalada nas extremidades do modelo para controle do nível d'água e inversão do sentido do escoamento.



Fonte: Bernardino (2015) (Acervo do LHEPUSP).

Foto 3-6 – Ponta limnimétricas utilizadas para medição do nível d'água no modelo físico.

Fonte: Bernardino (2015) (Acervo do LHEPUSP).

Assim o modelo físico do TPPM (Foto 3-7), encontra-se calibrado e validado para as condições de corrente de enchente e vazante, com representatividade de amplitudes de maré de 3,0 a 7,0 m, podendo ainda variar a amplitude a cada 0,5 m. Como o modelo já encontra-se calibrado desde 2015, para este trabalho foi realizado somente uma verificação da amplitude de maré utilizada para os ensaios de estimativa dos esforços, conforme apresentado no Gráfico 3-1 e Gráfico 3-2. Além disto, abaixo são apresentados os resultados de velocidade da corrente de maré, obtidos através de verificação da calibração da amplitude de maré de 5,0 m.

Foto 3-7 - Vista geral do modelo físico reduzido do TPPM.

Para verificar a acurácia da calibração do instante estudado, além da comparação dos resultados entre o modelo computacional e físico, também é apresentado o erro em porcentagem, o erro absoluto e RMEA (*Relative Mean Absolute Error*) para cada seção de medição de velocidade. O RMEA é o erro absoluto médio relativo, no qual, para se verificar a aderência dos resultados do modelo físico em relação aos dados do modelo computacional, esta é avaliada conforme o parâmetro estatístico, calculado de acordo com a expressão abaixo. Quanto mais o valor do RMAE se aproxima de zero, melhor o resultado do modelo (

Tabela 3-9).

$$RMAE = \frac{<|C-F|>}{<|C|>} \quad (28)$$

Onde:

- C – valor modelo computacional;
- F – valor modelo físico.

Tabela 3-9 – Classificação da qualidade dos resultados do modelo, pelos valores de RMEA.

RMEA	Classificação
0,00 - 0,10	Execelente
0,10 - 0,30	Bom
0,30 - 0,50	Razoável
0,50 - 0,70	Pobre
0,70 - 100,0	Ruim

Tabela 3-10 – Velocidade da corrente na condição de enchente e vazante para amplitude de maré de 5,0 m.

Ponto	Velocidade (m/s) Enchente		ERRO (%)	ERRO ABSOLUTO	RMEA
	Modelo Computacional	Modelo Físico			
S1V2	1,28	1,35	6%	0,07	0,06
S1V3	1,47	1,56	6%	0,09	
S3V1	0,65	0,80	24%	0,15	0,20
S3V2	1,10	1,30	18%	0,20	
S3V3	1,46	1,74	20%	0,29	
S6V1	0,74	1,37	86%	0,63	0,40
S6V2	0,87	1,25	44%	0,38	
S6V3	1,52	1,77	16%	0,25	

Ponto	Velocidade (m/s) Vazante		ERRO (%)	ERRO ABSOLUTO	RMEA
	Modelo Computacional	Modelo Físico			
S1V2	1,87	1,22	35%	0,65	0,24
S1V3	1,69	1,50	11%	0,19	
S3V1	1,01	1,00	1%	0,01	0,17
S3V2	2,00	1,46	27%	0,54	
S3V3	2,01	1,70	16%	0,31	
S6V1	1,35	0,93	31%	0,42	0,19
S6V2	1,85	1,39	25%	0,46	
S6V3	1,91	1,80	6%	0,11	

Gráfico 3-1 – Comparação velocidade do modelo computacional x físicos para meia maré de 5,0 m, na condição de enchente.

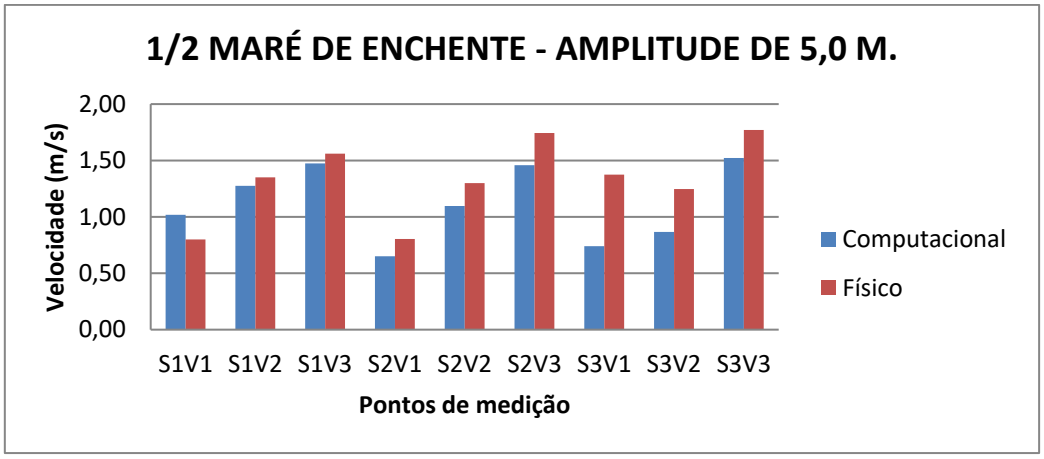
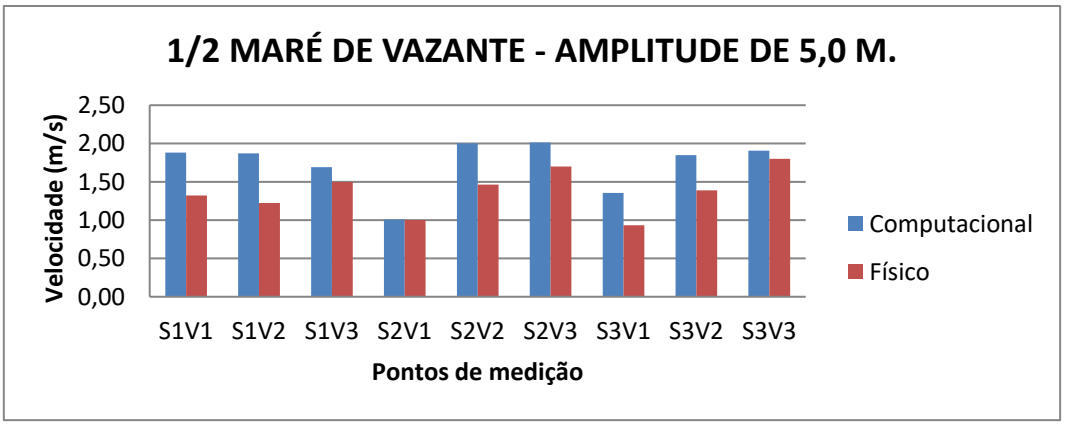


Gráfico 3-2 - Comparação velocidade do modelo computacional x físicos para meia maré de 5,0 m, na condição de vazante.



Também, para a direção da corrente são apresentados os resultados obtidos na verificação da calibração do modelo físico, e também, a comparação dos resultados entre os modelos, o erro em porcentagem, erro absoluto e o RMEA.

Tabela 3-11 – Direção da corrente na condição de enchente e vazante para amplitude de maré de 5,0 m.

Ponto	Direção (°) Enchente		ERRO (%)	ERRO ABSOLUTO	RMEA
	Modelo Computacional	Modelo Físico			
S1V1	166	170	3%	4	0,01
S1V2	169	163	3%	6	
S1V3	170	169	1%	1	
S3V1	176	179	2%	3	0,01
S3V2	173	167	4%	6	
S3V3	180	178	1%	1	
S6V1	194	205	6%	11	0,03
S6V2	188	187	0%	0	
S6V3	183	189	3%	5	

Ponto	Direção (°) Vazante		ERRO (%)	ERRO ABSOLUTO	RMEA
	Modelo Computacional	Modelo Físico			
S1V1	334	335	0%	1	0,00
S1V2	343	345	1%	2	
S1V3	347	348	0%	1	
S3V1	360	350	3%	10	0,02
S3V2	356	350	2%	6	
S3V3	360	351	3%	9	
S6V1	16	15	8%	1	0,02
S6V2	12	11	7%	1	
S6V3	8	9	19%	1	

Com base nos resultados apresentados, é notável que a maioria das seções de velocidade estejam com o RMEA entre excelente e bom, com exceção da seção 6 que está com índice de razoável. No entanto, como esta seção está localizada em uma região que apresenta maior oscilação da velocidade, esta diferença de magnitude já era esperada. Além disto, os valores do modelo físico ficaram acima dos valores do computacional, podendo assim ser considerados valores conservadores, em outras palavras, acima da segurança. Já para a direção, um elemento importante para verificação de um sistema de amarração, encontra-se com o RMEA, para todas seções, no índice de excelente apresentando erro absoluto de no máximo 10°.

Assim, com base nos resultados apresentados para verificação do instante de meia maré para amplitude 5,0m, foi considerada adequada para verificação de sistema de amarração.

3.3.2. Sistema de aquisição.

Para a verificação do sistema de amarração de navios no TPPM, os testes de modelo físico são realizados com a medição de dois parâmetros principais: os esforços nos cabos de amarração e a movimentação da embarcação registrados durante 90 min no modelo. O período de ensaio foi definido em estudos anteriores, visando contemplar de forma estatisticamente representativa a atuação das correntes sobre o navio. Este período pode ser associado, aproximadamente, à duração contínua das mais desfavoráveis condições hidrodinâmicas de maré, vazante ou enchente, por aproximadamente 20 horas em escala real. Com estes dados, é possível avaliar a eficácia do sistema de amarração, conforme critérios apresentados por recomendações internacionais.

A representação em modelo físico do sistema de amarração é obtida através de conjuntos de cabos ligados a molas helicoidais (Foto 3-8). As molas são calibradas em bancada específica para reproduzir em escala reduzida o módulo de elasticidade linear do cabo real, utilizando-se para isto as curvas de carga x deformação de cada cabo a ser representado. A determinação dos esforços em

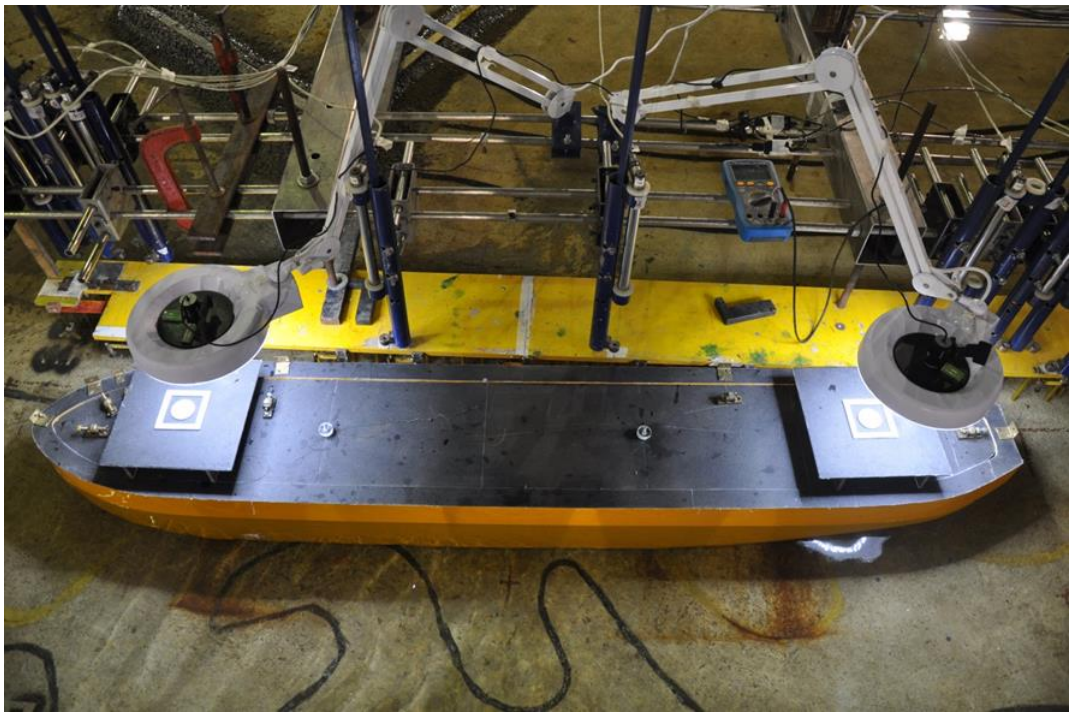
cada cabo é feita medindo-se a elongação da respectiva mola durante o ensaio, sendo a relação entre o deslocamento e força dada pela Lei de Hooke. Os sensores que medem os deslocamentos das molas no modelo físico são do tipo LVDT (Linear Variable Differential Transformer), e os valores obtidos são registrados a cada segundo em um banco de dados computacional, o que permite a posterior análise da variação dos esforços sobre os cabos durante todo o ensaio. As referências de posição e cotas dos pontos de amarração do navio e do píer são respeitadas, garantindo a representação dos ângulos gerados pelos cabos em relação à vertical e horizontal obtidos em escala real. Antes do início do ensaio propriamente dito, com a embarcação fixa na linha de atracação e centrada no berço, são aplicadas pré-tensões nos cabos de 10% do MBL, como referência da carga nominal mínima de ruptura de um cabo, de modo similar ao que acontece na amarração de um navio real. Esta pré-tensão é aferida utilizando-se o mesmo sistema de medição de deformação da mola.

Foto 3-8 - Sistema de reprodução e medição dos esforços nos cabos de amarração em modelo físico reduzido.

Fonte: acervo do CTH-USP.

Para registrar os movimentos da embarcação, emprega-se um sistema composto por duas câmaras equidistantes do centro instantâneo de rotação da embarcação e dois alvos fixos no convés (Foto 3-9). Este sistema é capaz de medir durante o ensaio, a partir de sua posição inicial, os movimentos em 3 graus de liberdade (*Yaw*, *Surge* e *Sway*), o que é suficiente para representar os deslocamentos de navios amarrados em locais protegidos de ações de ondas.

Foto 3-9 - Sistema de medição por análise de imagens da movimentação da embarcação em escala reduzida.

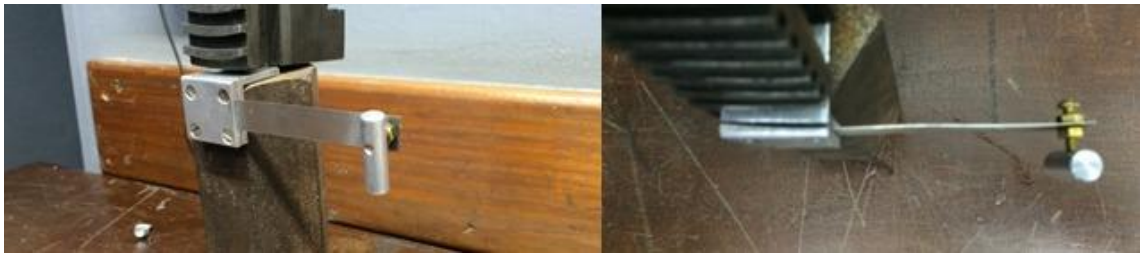


Fonte: acervo do CTH-USP.

A fim de representar o efeito elástico das defensas na linha de atracação, são utilizadas lâminas de aço-mola em balanço, com curva de rigidez e energia de absorção calibrada e fixada respectivamente nos locais característicos aos

parâmetros dos píeres ou dólfins para reprodução dos conjuntos reais de atracação (Foto 3-10).

Foto 3-10 – Representação de defensa.



Fonte: acervo do CTH-USP.

3.3.3. Procedimento de ensaio de esforços nos cabos

Após a definição do plano de amarração, com auxílio de uma escala graduada e do desenho com as medidas de locação das unidades de amarração, inicia-se a locação dos elementos que representam os guinchos de bordo. Estes são posicionados respeitando a locação das buzinas e do centro de gravidade do agrupamento dos cabos. Da mesma forma, são locadas as estruturas de suporte dos sensores de medição de esforços no píer que irão representar os elementos de amarração de terra, como cabeços, gatos e guinchos de terra

Com o navio colocado na água, o calado é ajustado posicionando massas metálicas (ferro, aço ou aço inox) com dimensões e peso conhecidos no interior da embarcação. Tal posicionamento é feito de forma que o navio fique nivelado com a linha d'água demarcada previamente da referência do calado desejado.

A linha que representa o cabo é amarrada na mola, passando pelo guincho de terra localizado no píer, seguindo para a posição da buzina do navio e, finalmente, sendo fixada no guincho localizado no convés do navio. Desta forma, a força de amarração é transmitida pela linha até a mola, a partir do qual é possível se obterem os esforços nas linhas de amarração durante o ensaio, por meio do deslocamento de seu núcleo.

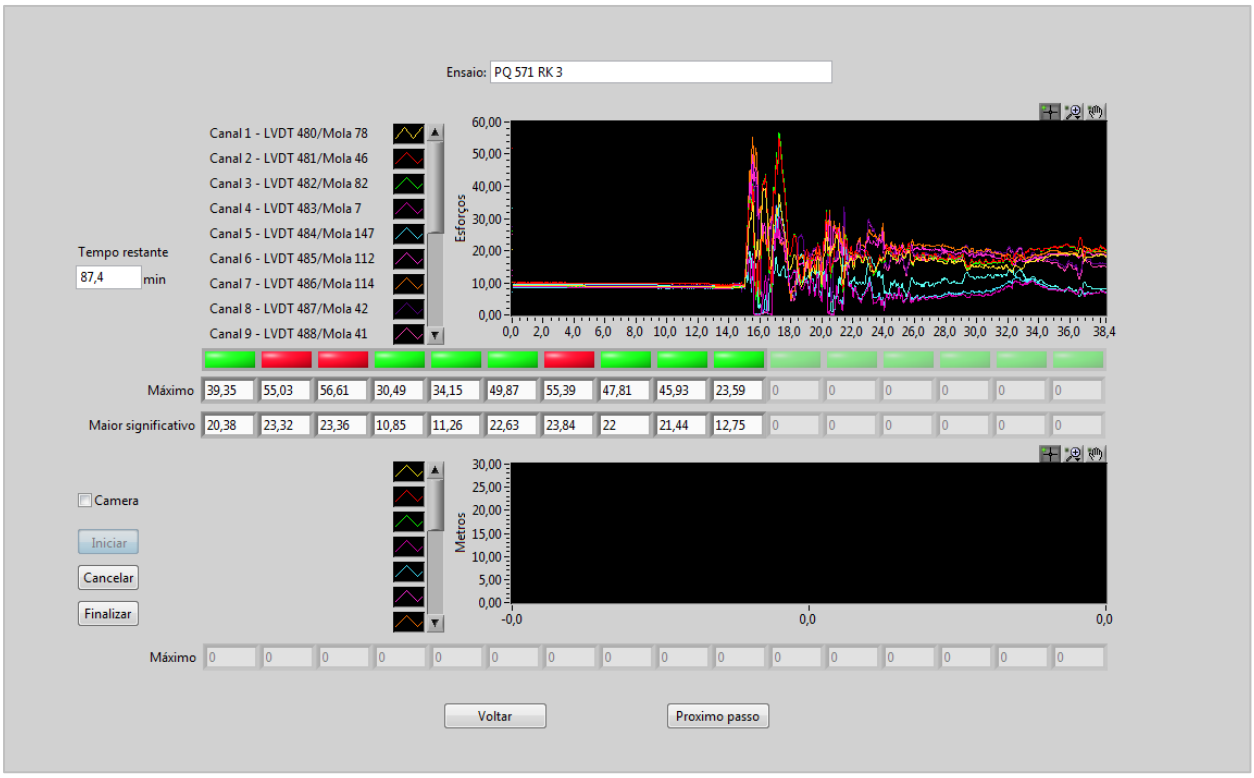
Com o navio posicionado no berço, são introduzidas no software as caraterísticas do plano de amarração e a instrumentação que será utilizada para monitorar os esforços nas amarras. Este software, desenvolvido pelo Laboratório, possui bibliotecas com as características de diversos cabos de amarração que são utilizados no desenvolvimento das molas helicoidais e, também, um banco de dados com as informações de calibração dos instrumentos de medição.

O navio permanece calçado durante a execução da pré-tensão, ou seja, alinhado com o píer na posição inicial de atracação. Ao término, confere-se se todos os cabos estão com a pré-tensão correta. Após a imposição das pré-tensões nos cabos, os calços são retirados e o navio fica livre para movimentar-se, estando preso apenas pelas linhas de amarração. Em função das perturbações geradas na água do tanque do modelo durante as etapas anteriores de ajuste, antes do início efetivo do ensaio, aguarda-se cerca de 20 minutos para garantir total estabilidade das condições hidráulicas.

Uma vez que o modelo esteja estabilizado, ou seja, que não haja perturbações externas indesejáveis, e que o navio esteja em condições adequadas para o ensaio, é iniciada a medição dos esforços. Os valores são registrados em tempo real, gerando um gráfico de força para cada canal ou setor de amarração em função do tempo. Se durante o ensaio houver esforços nas linhas com valores

acima dos limites preconizados, o software sinaliza com a cor vermelha o setor de amarração onde ocorreu o esforço (Figura 3-13). Nos canais são apresentados os valores unitários já decompostos para cada linha de amarração de protótipo na unidade tonelada-força (tf).

Figura 3-13 - Monitoramento dos esforços em tempo real.



Fonte: acervo do CTH-USP

4. RESULTADOS

A seguir, foram apresentados os resultados dos esforços nos cabos de amarração, encontrados no método analítico e de modelagem física, do navio de 300.000 DWT, atracado por boreste com calado de 21,5 m (carregado) no Píer I, Píer III Berço Sul e Píer IV Berço Norte, sob efeito da corrente de maré com amplitude de 5,0 m, no instante de meia-maré nas condições de enchente e vazante.

Conforme descrito anteriormente, os resultados foram apresentados em tf (tonelada-força) por cabo separado por agrupamento. Além disto, os resultados foram separados entre o método analítico e de modelagem física.

4.1. Método analítico.

As tabelas de 4-1 a 4-6 estão separadas por Píer e apresentam os cálculos realizados para a estimativa dos esforços nos cabos de amarração. As tabelas contêm: nomenclatura do agrupamento, número de cabos, ângulo do cabo, comprimento do cabo, força de arrasto gerado pela corrente de maré (Fx e Fy proa e popa), cálculo da distribuição da força nos cabos e, por fim, os esforços solicitados em cada cabo do agrupamento.

Vale ressaltar que o método analítico aplicado para distribuição dos esforços nas espias, não é aplicável às forças provenientes do momento. Por este motivo, os resultados são apresentados somente com as forças de arrasto de vante e ré.

4.1.1. Píer I

Tabela 4-1 – Cálculo de esforços nos cabos de amarração do navio de 300.000 DWT atracado no Píer I na condição de maré de enchente.

Píer I - 300.000 DWT (Enchente)									
Identificação cabos	**Nº de cabos**	**α (°)**	**L ext**	**L total**	**100*cosα/L**	**100*cos²α/L**	**∑ 100*cos²α/L**	**Força de arrasto**	**F cabo (t)**
			RESTRIÇÃO Fyf PROA					19,4	
Lançante de Vante 1º	2	16		93	1,03361	0,99357	1,9871	19,4	4,44
Través Vante 1°	2	-13		75	1,29916	1,26586	2,5317	19,4	5,58
						∑	4,5189		
Identificação cabos	**Nº de cabos**	**α (°)**	**L ext**	**L total**	**100*cosα/L**	**100*cos²α/L**	**∑ 100*cos²α/L**	**Força de arrasto**	**F cabo (t)**
			RESTRIÇÃO Fyf POPA					19,4	
Lançante Ré 2º	2	-26		91	0,98769	0,88773	1,7755	19,4	4,35
Través Ré 1°	2	0		76	1,31579	1,31579	2,6316	19,4	5,79
						∑	4,4070		
Identificação cabos	**Nº de cabos**	**α (°)**	**L ext**	**L total**	**100*cosα/L**	**100*cos²α/L**	**∑ 100*cos²α/L**	**Força de arrasto**	**F cabo (t)**
			RESTRIÇÃO Fxf PROA					-3,8	
Lançante de Vante 2°	2	48		119	0,62449	0,46409	0,9282	-3,8	-0,36
Spring de Ré 1	2	-87		58	-1,72178	1,71942	3,4388	-3,8	1,00
Spring de Ré 2	2	-89		93	-1,07511	1,07494	2,1499	-3,8	0,63
						∑	6,5169		
Identificação cabos	**Nº de cabos**	**α (°)**	**L ext**	**L total**	**100*cosα/L**	**100*cos²α/L**	**∑ 100*cos²α/L**	**Força de arrasto**	**F cabo (t)**
			RESTRIÇÃO Fxf POPA					-3,8	
Lançante de Ré 1º	2	-53		116	-0,68848	0,54984	1,0997	-3,8	0,76
Spring de Vante 1	2	-8		49	-0,28403	0,03953	0,0791	-3,8	0,31
Spring de Vante 2	2	89		88	1,13619	1,13602	2,2720	-3,8	-1,25
						∑	3,4508		

Tabela 4-2 - Cálculo de esforços nos cabos de amarração do navio de 300.000 DWT atracado no Píer I na condição de maré de vazante.

Píer I - 300.000 DWT (Vazante)									
Identificação cabos	***Nº de cabos***	***α (°)***	***L ext***	***L total***	***100*cosα/L***	***100*cos²α/L***	***∑ 100*cos²α/L***	***Força de arrasto***	***F cabo (t)***
			RESTRIÇÃO Fyf PROA					23,7	
Lançante de Vante 1º	2	16		93	1,03361	0,99357	1,9871	23,7	5,42
Través Vante 1°	2	-13		75	1,29916	1,26586	2,5317	23,7	6,81
						∑	4,5189		
Identificação cabos	***Nº de cabos***	***α (°)***	***L ext***	***L total***	***100*cosα/L***	***100*cos²α/L***	***∑ 100*cos²α/L***	***Força de arrasto***	***F cabo (t)***
			RESTRIÇÃO Fyf POPA					23,7	
Lançante Ré 2º	2	-26		91	0,98769	0,88773	1,7755	23,7	5,31
Través Ré 1°	2	0		76	1,31579	1,31579	2,6316	23,7	7,08
						∑	4,4070		
Identificação cabos	***Nº de cabos***	***α (°)***	***L ext***	***L total***	***100*cosα/L***	***100*cos²α/L***	***∑ 100*cos²α/L***	***Força de arrasto***	***F cabo (t)***
			RESTRIÇÃO Fxf PROA					13,2	
Lançante de Vante 2°	2	48		119	0,62449	0,46409	0,9282	13,2	1,26
Spring de Ré 1	2	-87		58	-1,72178	1,71942	3,4388	13,2	-3,49
Spring de Ré 2	2	-89		93	-1,07511	1,07494	2,1499	13,2	-2,18
						∑	6,5169		
Identificação cabos	***Nº de cabos***	***α (°)***	***L ext***	***L total***	***100*cosα/L***	***100*cos²α/L***	***∑ 100*cos²α/L***	***Força de arrasto***	***F cabo (t)***
			RESTRIÇÃO Fxf POPA					13,2	
Lançante de Ré 1º	2	-53		116	-0,68848	0,54984	1,0997	13,2	-2,63
Spring de Vante 1	2	-8		49	-0,28403	0,03953	0,0791	13,2	-1,09
Spring de Vante 2	2	89		88	1,13619	1,13602	2,2720	13,2	4,35
						∑	3,4508		

4.1.2. Píer III Berço Sul

Tabela 4-3 - Cálculo de esforços nos cabos de amarração do navio de 300.000 DWT atracado no Píer III Berço Sul na condição de maré de enchente.

Píer III - Berço Sul - 300.000 DWT (Enchente)									
Identificação cabos	**Nº de cabos**	**α (°)**	**L ext**	**L total**	**100*cosα/L**	**100*cos²α/L**	**∑ 100*cos²α/L**	**Força de arrasto**	**F cabo (t)**
			RESTRIÇÃO Fyf PROA					24,7	
Lançante de Vante 1º	2	19		44	2,14891	2,03183	4,0637	24,7	7,59
Lançante de Vante 2°	2	19		61	1,55003	1,46558	2,9312	24,7	5,47
						∑	6,9948		
Identificação cabos	**Nº de cabos**	**α (°)**	**L ext**	**L total**	**100*cosα/L**	**100*cos²α/L**	**∑ 100*cos²α/L**	**Força de arrasto**	**F cabo (t)**
			RESTRIÇÃO Fyf POPA					24,7	
Lançante de Ré 1º	2	-18		64	1,48603	1,41329	2,8266	24,7	3,33
Lançante Ré 2º	2	-8		49	2,02096	2,00129	4,0026	24,7	4,53
Través Ré 1°	2	-11		46	2,13397	2,09477	4,1895	24,7	4,78
						∑	11,0187		
Identificação cabos	**Nº de cabos**	**α (°)**	**L ext**	**L total**	**100*cosα/L**	**100*cos²α/L**	**∑ 100*cos²α/L**	**Força de arrasto**	**F cabo (t)**
			RESTRIÇÃO Fxf PROA					0,8	
Lançante de Vante 1º	2	19		44	0,73993	0,24090	0,4818	0,8	0,71
Lançante de Vante 2°	2	19		61	0,53372	0,17376	0,3475	0,8	0,51
Spring de Ré 1	2	-86		61	-1,63535	1,63137	3,2627	0,8	-1,58
						∑	0,8293		
Identificação cabos	**Nº de cabos**	**α (°)**	**L ext**	**L total**	**100*cosα/L**	**100*cos²α/L**	**∑ 100*cos²α/L**	**Força de arrasto**	**F cabo (t)**
			RESTRIÇÃO Fxf POPA					0,8	
Lançante de Ré 1º	2	-18		64	-0,48284	0,14921	0,2984	0,8	-0,07
Lançante Ré 2º	2	-8		49	-0,28403	0,03953	0,0791	0,8	-0,04
Spring de Vante 1	2	87		79	1,26409	1,26236	2,5247	0,8	0,17
Spring de Vante 2	2	86		69	1,44575	1,44222	2,8844	0,8	0,20
						∑	5,7866		

Tabela 4-4 - Cálculo de esforços nos cabos de amarração do navio de 300.000 DWT atracado no Píer III Berço Sul na condição de maré de vazante.

Píer III - Berço Sul - 300.000 DWT (Vazante)									
Identificação cabos	***Nº de cabos***	***α (°)***	***L ext***	***L total***	***100*cosα/L***	***100*cos²α/L***	***∑ 100*cos²α/L***	***Força de arrasto***	***F cabo (t)***
			RESTRIÇÃO Fyf PROA					52,7	
Lançante de Vante 1º	2	19		44	2,14891	2,03183	4,0637	52,7	16,19
Lançante de Vante 2°	2	19		61	1,55003	1,46558	2,9312	52,7	11,68
						∑	6,9948		
Identificação cabos	***Nº de cabos***	***α (°)***	***L ext***	***L total***	***100*cosα/L***	***100*cos²α/L***	***∑ 100*cos²α/L***	***Força de arrasto***	***F cabo (t)***
			RESTRIÇÃO Fyf POPA					52,7	
Lançante de Ré 1º	2	-18		64	1,48603	1,41329	2,8266	52,7	7,11
Lançante Ré 2º	2	-8		49	2,02096	2,00129	4,0026	52,7	9,67
Través Ré 1°	2	-11		46	2,13397	2,09477	4,1895	52,7	10,21
						∑	11,0187		
Identificação cabos	***Nº de cabos***	***α (°)***	***L ext***	***L total***	***100*cosα/L***	***100*cos²α/L***	***∑ 100*cos²α/L***	***Força de arrasto***	***F cabo (t)***
			RESTRIÇÃO Fxf PROA					7,4	
Lançante de Vante 1º	2	19		44	0,73993	0,24090	0,4818	7,4	6,60
Lançante de Vante 2°	2	19		61	0,53372	0,17376	0,3475	7,4	4,76
Spring de Ré 1	2	-86		61	-1,63535	1,63137	3,2627	7,4	-14,59
						∑	0,8293		
Identificação cabos	***Nº de cabos***	***α (°)***	***L ext***	***L total***	***100*cosα/L***	***100*cos²α/L***	***∑ 100*cos²α/L***	***Força de arrasto***	***F cabo (t)***
			RESTRIÇÃO Fxf POPA					7,4	
Lançante de Ré 1º	2	-18		64	-0,48284	0,14921	0,2984	7,4	-0,62
Lançante Ré 2º	2	-8		49	-0,28403	0,03953	0,0791	7,4	-0,36
Spring de Vante 1	2	87		79	1,26409	1,26236	2,5247	7,4	1,62
Spring de Vante 2	2	86		69	1,44575	1,44222	2,8844	7,4	1,85
						∑	5,7866		

4.1.3. Píer IV Norte

Tabela 4-5 - Cálculo de esforços nos cabos de amarração do navio de 300.000 DWT atracado no Píer IV Berço Norte na condição de maré de enchente.

Píer IV - Berço Norte - 300.000 DWT (Enchente)									
Identificação cabos	**Nº de cabos**	**α (°)**	**L ext**	**L total**	**100*cosα/L**	**100*cos²α/L**	**∑ 100*cos²α/L**	**Força de arrasto**	**F cabo (t)**
			RESTRIÇÃO Fyf PROA					31,8	
Través Vante 1°	4	1		60	1,66641	1,66616	6,6646	31,8	4,53
Través Vante 2°	4	10		77	1,27897	1,25954	5,0382	31,8	3,48
						∑	11,7028		
Identificação cabos	**Nº de cabos**	**α (°)**	**L ext**	**L total**	**100*cosα/L**	**100*cos²α/L**	**∑ 100*cos²α/L**	**Força de arrasto**	**F cabo (t)**
			RESTRIÇÃO Fyf POPA					31,8	
Través Ré 1°	4	-24		73	1,25143	1,14324	4,5730	31,8	3,42
Través Ré 2°	5	-18		64	1,48603	1,41329	7,0665	31,8	4,06
						∑	11,6394		
Identificação cabos	**Nº de cabos**	**α (°)**	**L ext**	**L total**	**100*cosα/L**	**100*cos²α/L**	**∑ 100*cos²α/L**	**Força de arrasto**	**F cabo (t)**
			RESTRIÇÃO Fxf PROA					-47,6	
Lançante de Vante 1º	2	45		100	0,70711	0,50000	1,0000	-47,6	-2,48
Lançante de Vante 2°	2	48		97	0,76613	0,56934	1,1387	-47,6	-2,69
Spring de Ré 1	2	-74		55	-1,74775	1,68004	3,3601	-47,6	6,14
Spring de Ré 2	2	-79		55	-1,78478	1,75199	3,5040	-47,6	6,27
Spring de Ré 3	2	-81		85	-1,16199	1,14768	2,2954	-47,6	4,08
Spring de Ré 4	2	-84		88	-1,13014	1,12395	2,2479	-47,6	3,97
						∑	13,5460		
Identificação cabos	**Nº de cabos**	**α (°)**	**L ext**	**L total**	**100*cosα/L**	**100*cos²α/L**	**∑ 100*cos²α/L**	**Força de arrasto**	**F cabo (t)**
			RESTRIÇÃO Fxf POPA					-47,6	
Lançante de Ré 1º	2	-53		99	-0,80670	0,64426	1,2885	-47,6	3,24
Lançante Ré 2º	2	-53		98	-0,81493	0,65084	1,3017	-47,6	3,27
Spring de Vante 1	2	84		84	1,18395	1,17747	2,3549	-47,6	-4,75
Spring de Vante 2	2	82		57	1,73731	1,72040	3,4408	-47,6	-6,97
Spring de Vante 3	2	78		55	1,77845	1,73959	3,4792	-47,6	-7,13
						∑	11,8651		

Tabela 4-6 - Cálculo de esforços nos cabos de amarração do navio de 300.000 DWT atracado no Píer IV Berço Norte, na condição de maré de Vazante.

Píer IV - Berço Norte - 300.000 DWT (Vazante)									
Identificação cabos	***Nº de cabos***	***α (°)***	***L ext***	***L total***	***100*cosα/L***	***100*cos²α/L***	***∑ 100*cos²α/L***	***Força de arrasto***	***F cabo (t)***
			RESTRIÇÃO Fyf PROA					559,8	
Través Vante 1°	4	1		60	1,66641	1,66616	6,6646	559,8	79,71
Través Vante 2°	4	10		77	1,27897	1,25954	5,0382	559,8	61,18
						∑	11,7028		
Identificação cabos	***Nº de cabos***	***α (°)***	***L ext***	***L total***	***100*cosα/L***	***100*cos²α/L***	***∑ 100*cos²α/L***	***Força de arrasto***	***F cabo (t)***
			RESTRIÇÃO Fyf POPA					559,8	
Través Ré 1°	4	-24		73	1,25143	1,14324	4,5730	559,8	60,19
Través Ré 2°	5	-18		64	1,48603	1,41329	7,0665	559,8	71,47
						∑	11,6394		
Identificação cabos	***Nº de cabos***	***α (°)***	***L ext***	***L total***	***100*cosα/L***	***100*cos²α/L***	***∑ 100*cos²α/L***	***Força de arrasto***	***F cabo (t)***
			RESTRIÇÃO Fxf PROA					-16,9	
Lançante de Vante 1º	2	45		100	0,70711	0,50000	1,0000	-16,9	-0,88
Lançante de Vante 2°	2	48		97	0,76613	0,56934	1,1387	-16,9	-0,96
Spring de Ré 1	2	-74		55	-1,74775	1,68004	3,3601	-16,9	2,18
Spring de Ré 2	2	-79		55	-1,78478	1,75199	3,5040	-16,9	2,23
Spring de Ré 3	2	-81		85	-1,16199	1,14768	2,2954	-16,9	1,45
Spring de Ré 4	2	-84		88	-1,13014	1,12395	2,2479	-16,9	1,41
						∑	13,5460		
Identificação cabos	***Nº de cabos***	***α (°)***	***L ext***	***L total***	***100*cosα/L***	***100*cos²α/L***	***∑ 100*cos²α/L***	***Força de arrasto***	***F cabo (t)***
			RESTRIÇÃO Fxf POPA					-16,9	
Lançante de Ré 1º	2	-53		99	-0,80670	0,64426	1,2885	-16,9	1,15
Lançante Ré 2º	2	-53		98	-0,81493	0,65084	1,3017	-16,9	1,16
Spring de Vante 1	2	84		84	1,18395	1,17747	2,3549	-16,9	-1,69
Spring de Vante 2	2	82		57	1,73731	1,72040	3,4408	-16,9	-2,47
Spring de Vante 3	2	78		55	1,77845	1,73959	3,4792	-16,9	-2,53
						∑	11,8651		

Na Tabela 4-1, que possui os dados de esforços nos cabos de amarração do navio 300.000 DWT, atracado no Píer I na condição de maré de enchente, é possível observar que os esforços ficaram bem abaixo dos limites recomendados pela OCIMF (2013) de 55% do MBL. Os cabos mais solicitados LR 2, TR 1, LV 1 e o TV 1. Já para a condição de vazante (Tabela 4-2), os esforços se apresentaram com um leve aumento, mas também não superando o recomendo de 55% MBL, nesta condição os cabos mais solicitados continuam sendo LR 2, TR 1, LV 1 e o TV 1.

A Tabela 4-3, apresenta os resultados de esforços nos cabos do mesmo navio atracado no Píer III Berço Sul, na condição de enchente. É possível observar que os esforços nos cabos não superaram os limites recomendados, os cabos mais solicitados foram LV 1 e LV 2. Na Tabela 4-4 é possível observar que os esforços também não superaram o limite recomendado, apresentando maiores solicitações nos cabos LV 1,TR1, SR 1 e LV2.

Os esforços nos cabos de amarração da mesma embarcação atracada no Píer IV Berço Norte, na condição de enchente estão na Tabela 4-5, na qual é possível observar que não ficaram acima do recomendado. Além disto, é possível observar também que os cabos de bordo e de terra trabalharam de forma solidária. Na Tabela 4-6 neste mesmo berço, em razão da alta velocidade e o ângulo de ataque, os esforços de alguns cabos ficaram acima do recomendado (55% do MBL), os cabos de Través 1 e 2 tanto de vante quanto os de ré, praticamente absorvendo totalmente os esforços, no entanto também é possível observar que os cabos de través de bordo e de terra estão trabalhando de forma solidária.

4.2. Método de modelagem física.

Nas Tabelas 4.7 a 4.15, separadas por píer e, para melhor visualização, separadas também por trechos do navio (Vante e Ré), estão os resultados de esforços encontrados nos ensaios realizados em modelo físico, apresentando-se os resultados máximos (máximo esforço no período do ensaio), esforços significativos (média do terço maior de todo o período de ensaio) e o esforço médio (média dos esforços nos cabos de amarração no período de ensaio). Juntamente, estão os resultados de deslocamento do navio em três graus de liberdade sway, yaw e surge. Desta forma, os esforços nos cabos de amarração estão tabelados e apresentados em tonelada força (tf), seguido da porcentagem atingida do MBL para cada cabo dentro de um grupo. As tabelas apresentam células de cor vermelha quando os esforços superarem o recomendado. Além disto, na lateral esquerda estão indicadas a condição de maré: amplitude, instante e se é a condição de enchente ou vazante. Na parte superior, para melhor identificação, estão a nomenclatura de cada agrupamento, seguido do número de cabos que compõe o agrupamento e na parte inferior está o tipo do material do cabo.

4.2.1. Píer I

Tabela 4-7 – Resultado dos esforços nos cabos de amarração a vante do navio 300.000 DWT atracado no Píer I, na condição de enchente e vazante.

Píer I	**Grupo / Nº cabos**	LR1	2	LR2	2	TR1	2	SR1	2	SR2	2
	Esforços / MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL
1/2 E 5.0 m	F Máxima	8	8%	8	8%	9	9%	13	13%	15	15%
	F Significativa	7	7%	7	7%	7	7%	12	12%	10	10%
	F Med	7	7%	7	7%	7	7%	11	11%	8	8%
1/2 V 5.0 m	F Máxima	9	9%	10	10%	12	12%	17	17%	13	13%
	F Significativa	7	7%	7	7%	8	8%	11	11%	10	10%
	F Med	6	6%	6	6%	6	6%	9	9%	8	8%
Material Cabo		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)	

Tabela 4-8 - Resultado dos esforços nos cabos de amarração a ré do navio 300.000 DWT atracado no Píer I, na condição de enchente e vazante.

Píer I	**Grupo / Nº cabos**	SV1	2	SV2	2	TV1	2	LV1	2	LV2	2
	Esforços / MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL
1/2 E 5.0 m	F Máxima	8	8%	6	6%	8	8%	8	8%	9	9%
	F Significativa	7	7%	5	5%	7	7%	8	8%	8	8%
	F Med	7	7%	5	5%	6	6%	7	7%	8	8%
1/2 V 5.0 m	F Máxima	11	11%	11	11%	11	11%	11	11%	10	10%
	F Significativa	9	9%	7	7%	8	8%	8	8%	8	8%
	F Med	7	7%	5	5%	7	7%	8	8%	8	8%
Material Cabo		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)	

Tabela 4-9 - Resultado dos movimentos do navio 300.000 DWT atracado no Píer I, na condição de enchente e vazante.

	Sway Aft (+) (m)	Sway Fore (+) (m)	Yaw (°)	Surge Vante	Surge Ré	Surge (peak-peak)
Enchente	-0,08	-0,04	0,05	-0,09	-0,11	0,11
Vazante	-0,17	0,11	0,12	0,12	-0,29	0,41

4.2.2. Píer III Berço Sul

Tabela 4-10 – Resultado dos esforços nos cabos de amarração a vante do navio 300.000 DWT atracado no Píer III Berço Sul, na condição de enchente e vazante.

Píer III - Sul	Grupo / Nº cabos	LR1	2	LR2	2	TR1	2	SR1	2
	Esforços / MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL
1/2 E 5.0 m	F Máxima	11	11%	15	15%	16	16%	16	16%
	F Significativa	10	10%	13	13%	15	15%	12	12%
	F Med	10	10%	13	13%	15	15%	11	11%
1/2 V 5.0 m	F Máxima	15	15%	20	20%	21	21%	17	17%
	F Significativa	11	11%	14	14%	15	15%	8	8%
	F Med	9	9%	11	11%	13	13%	5	5%
Material Cabo		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)	

Tabela 4-11 – Resultado dos esforços nos cabos de amarração a ré do navio 300.000 DWT atracado no Píer III Berço Sul, na condição de enchente e vazante.

Píer III - Sul	Grupo / Nº cabos	SV1	2	SV2	2	LV1	2	LV2	2
	Esforços / MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL
1/2 E 5.0 m	F Máxima	7	7%	9	9%	26	26%	21	21%
	F Significativa	7	7%	9	9%	23	23%	19	19%
	F Med	7	7%	8	8%	21	21%	18	18%
1/2 V 5.0 m	F Máxima	22	22%	25	25%	28	28%	23	23%
	F Significativa	14	14%	16	16%	17	17%	16	16%
	F Med	11	11%	13	13%	15	15%	15	15%
Material Cabo		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)	

Tabela 4-12 - Resultado dos movimentos do navio 300.000 DWT atracado no Píer III Sul, na condição de enchente e vazante.

	Sway Aft	Sway Fore	Yaw	Surge	Surge	Surge
	(+) (m)	(+) (m)	(°)	Vante	Ré	(peak-peak)
Enchente	0,26	0,41	0,13	-0,04	-0,22	0,22
Vazante	0,51	0,72	0,23	0,64	-0,21	0,85

4.2.3. Píer IV Berço Norte

Tabela 4-13 – Resultado dos esforços nos cabos de amarração a vante do navio 300.000 DWT atracado no Píer IV Berço Norte, na condição de enchente e vazante.

Píer IV - NORTE	**Grupo / Nº cabos**	LR1	2	LR2	2	TR1	4	TR2	5	SR1	2	SR2	2	SR3	2	SR4	2
	Esforços / MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL
1/2 E 5.0 m	F Máxima	19	11%	11	11%	17	17%	30	17%	36	20%	18	18%	25	14%	14	14%
	F Significativa	18	10%	10	10%	17	17%	30	17%	35	19%	17	17%	25	14%	14	14%
	F Med	18	10%	10	10%	16	16%	29	16%	35	19%	17	17%	25	14%	14	14%
1/2 V 5.0 m	F Máxima	33	18%	19	19%	31	31%	54	30%	31	17%	11	11%	21	12%	10	10%
	F Significativa	28	16%	16	16%	23	23%	40	22%	24	13%	9	9%	18	10%	9	9%
	F Med	27	15%	15	15%	22	22%	37	21%	22	12%	9	9%	18	10%	9	9%
Material Cabo		HMPE (180tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (180tf)		HMPE (180tf)		HMPE (100tf)		HMPE (180tf)		HMPE (100tf)	

Tabela 4-14 – Resultado dos esforços nos cabos de amarração a ré do navio 300.000 DWT atracado no Píer IV Berço Norte, na condição de enchente e vazante.

Píer IV - NORTE	Grupo / Nº cabos	SV1	2	SV2	2	SV3	2	TV1	4	TV2	4	LV1	2	LV2	2
	Esforços / MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL
1/2 E 5.0 m	F Máxima	5	5%	7	4%	6	6%	32	18%	17	17%	17	17%	31	17%
	F Significativa	5	5%	6	3%	5	5%	27	15%	15	15%	16	16%	29	16%
	F Med	4	4%	6	3%	4	4%	26	14%	14	14%	15	15%	28	16%
1/2 V 5.0 m	F Máxima	11	11%	20	11%	14	14%	36	20%	17	17%	14	14%	26	14%
	F Significativa	10	10%	19	11%	12	12%	27	15%	13	13%	12	12%	22	12%
	F Med	9	9%	18	10%	12	12%	24	13%	12	12%	11	11%	22	12%
Material Cabo		HMPE (100tf)		HMPE (180tf)		HMPE (100tf)		HMPE (180tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (180tf)	

Tabela 4-15 - Resultado dos movimentos do navio 300.000 DWT atracado no Píer IV norte, na condição de enchente e vazante.

	Sway Aft (+) (m)	Sway Fore (+) (m)	Yaw (°)	Surge Vante	Surge Ré	Surge (peak-peak)
Enchente	-0,12	0,18	0,20	-0,18	-0,19	-0,37
Vazante	-0,34	0,35	0,74	0,08	0,00	0,08

Nas Tabela 4-7 e Tabela 4-8, que apresentam os resultados do navio 300.000 DWT atracado no Píer I, é possível observar que, tanto na condição de enchente como na de vazante, os esforços nos cabos não superam o limite recomendável, além disto é possível observar também que o plano trabalhou de forma solidária, não apresentando esforços exagerados em poucos cabos. Além disto, não houve movimentação excessiva (Tabela 4-9), corroborando os valores de esforço e mostrando que o sistema de amarração resistiu à solicitação gerada pela corrente.

Nas Tabela 4-10 e Tabela 4-11, que possuem os resultados do plano de amarração empregado no Píer III Berço Sul, é possível observar que na condição de enchente não foram constatados esforços acima do recomendado. Já para a condição de vazante, houve um aumento dos esforços nos cabos de amarração, no entanto não ultrapassando os 55% do MBL. Neste plano também foi observada a solidariedade dos cabos de amarração, pois somente os cabos de LR 1 e SR1 ficaram com solicitação abaixo de 20 tf. Logo, também não foi observada movimentação excessiva (Tabela 4-12).

No Píer IV Berço Norte, Tabela 4-13 e Tabela 4-14, os esforços, na condição de enchente, se apresentaram maiores do que os píeres anteriores, porém não acima do recomendado. Desta forma, é possível notar que o plano de amarração trabalhou de forma uniforme, sendo os mais solicitados somente os cabos de TR 2, SR 1 e TV 1 os quais, são todos de terra (180 tf), e que devido a sua alta resistência, com relação aos cabos de bordo, se torna-se um pouco mais rígidos, e absorvem maiores esforços. Na condição de vazante, como entre todos os píeres estudados, também foi o que apresentou maiores esforços, sobrecarregando principalmente o cabo de TR 2. No entanto, a movimentação se manteve abaixo do recomendado (Tabela 4-15).

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS ANALÍTICO x FÍSICO

Incialmente, com base nos resultados encontrados em ambos os métodos, foi efetuada uma análise entre os píeres, e em seguida, uma análise entre os métodos aplicados. Para auxiliar no entendimento da análise dos píeres é possível observar nas Figura 5-1 e Figura 5-2, a localização dos berços e o campo de corrente para condição de enchente e vazante, respectivamente. E para realizar a análise dos resultados, foram criadas tabelas resumo que estão no apêndice deste trabalho (Tabela 8-9 a Tabela 8-11).

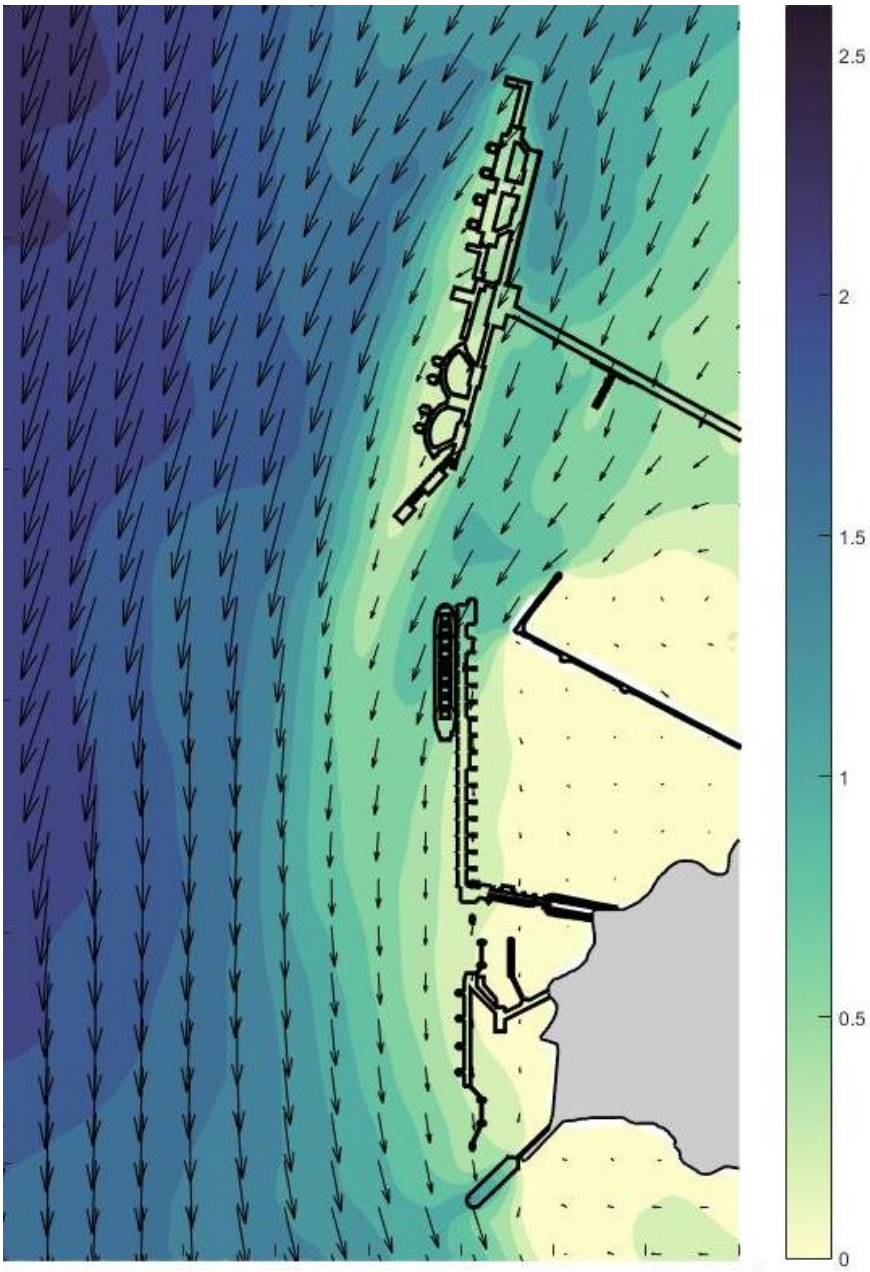
De forma geral, no âmbito dos berços, o Píer I apresenta melhor comportamento para a movimentação de carga, mantendo os esforços abaixo do recomendo e sendo também o que apresentou menores esforços nos cabos de amarração entre os píeres estudados. Este comportamento é possível devido ao abrigo gerado pela presença do espigão sul e do espigão norte, que afastam as correntes de maré de vazante e enchente, respectivamente, da linha de atracação. Além disto, o design do Píer é um ponto importante a ressaltar, pois devido ao seu projeto, é possível distribuir de forma simétrica a amarração do navio, sem que os cabos fiquem com comprimentos curtos ou com ângulos acima do recomendado pela OCIMF (2013).

No Píer III Berço Sul, ainda pode-se observar um comportamento razoável dos esforços nos cabos de amarração, no entanto um pouco acima do apresentado no Píer I. Esta elevação dos esforços existe devido à localização do píer, que por mais que esteja também na área abrigada pelos espigões Norte e Sul, está localizado em uma zona de recirculação que influencia diretamente na movimentação da embarcação, e elevando os esforços nos cabos. Outro fator é o design do píer, que obriga a posicionar os elementos de amarração muito próximos da linha de atracação, deixando os cabos curtos e com ângulos fora do recomendável.

No Píer IV Norte, os esforços se apresentaram bem mais altos que nos dois píeres anteriores, isto devido à velocidade que ocorre na linha de atração. Tanto

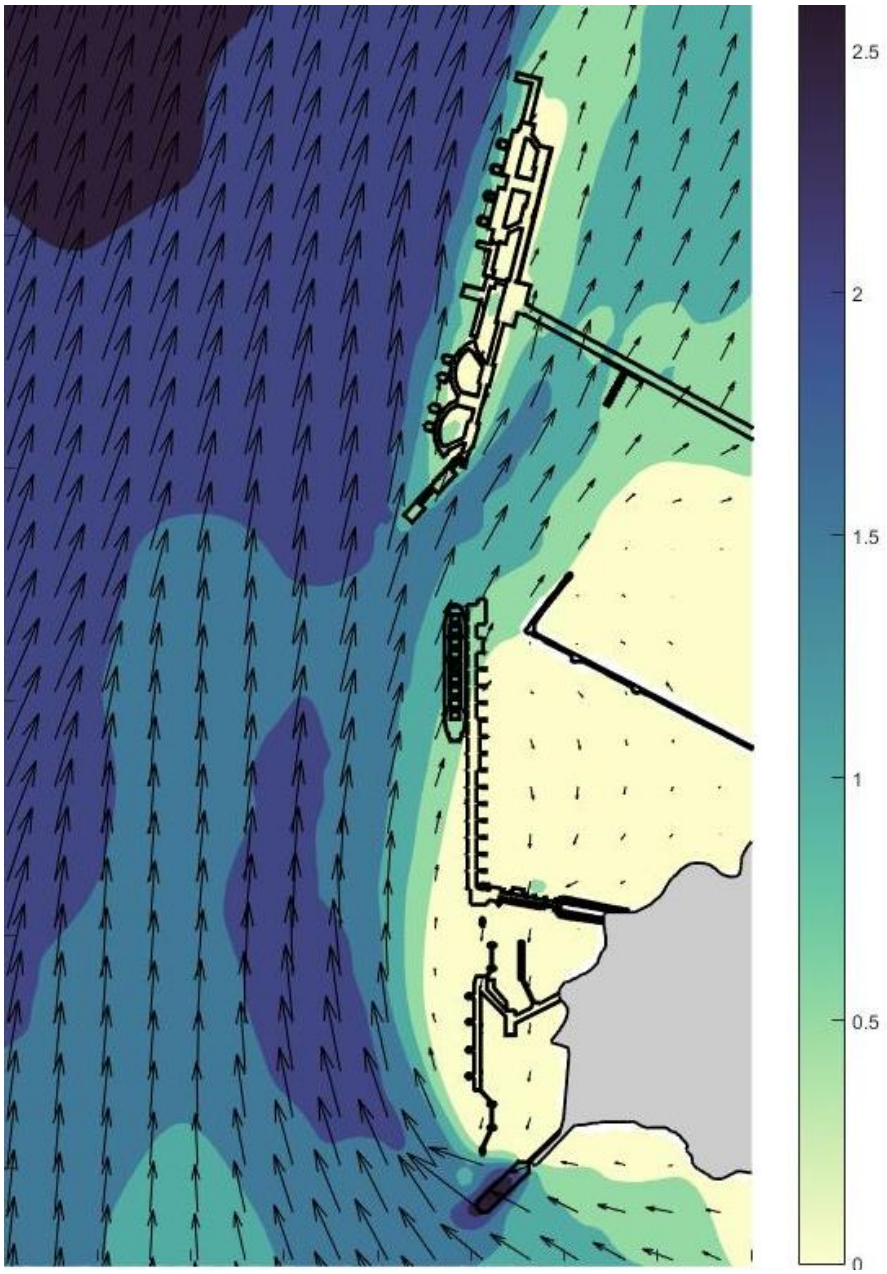
que, devido à corrente que incide na linha de atracação possuir alta velocidade, exige, para maior segurança dos navios atracados, o emprego de cabos de terra (lançados do píer para o navio) que supram a amarração de bordo. No entanto, este píer possui um design muito parecido com o Píer I, sendo possível distribuir de forma simétrica os cabos de amarração e manter comprimento e ângulo de forma a proporcionar maior eficiência ao plano.

Figura 5-1 – Campo de corrente de enchente na região o TPPM.



Fonte: CTH-USP

Figura 5-2 - Campo de corrente de vazante na região o TPPM.



Fonte: CTH-USP

No âmbito dos resultados encontrados em cada método aplicado ao estudo de caso, serão analisados com o auxílio de gráficos dos esforços máximos encontrados para cada Píer, considerando uma pré-tensão de 10% do MBL, separados para condição de enchente e vazante (Gráfico 5-1 ao Gráfico 5-6)

Gráfico 5-1- Esforços Píer I condição de enchente.

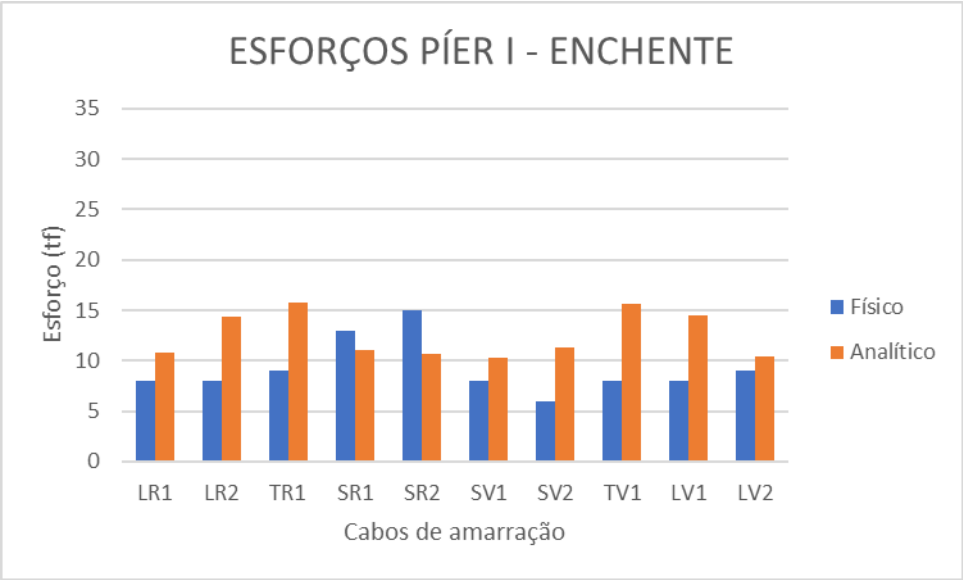
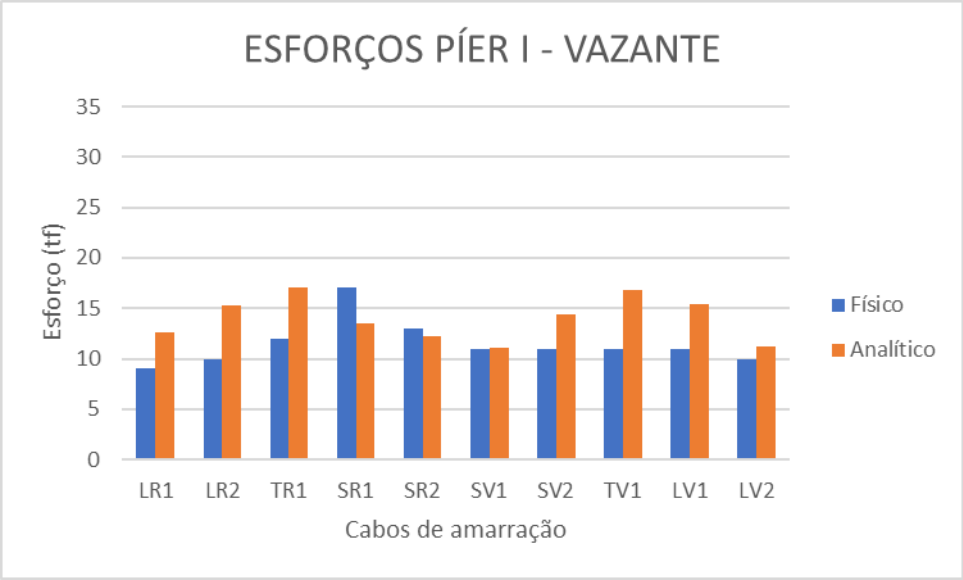


Gráfico 5-2 - Esforços Píer I condição de vazante.



Como os resultados apresentados no Gráfico 5-1 e Gráfico 5-2, é possível observar que os resultados do método analítico foram acima dos resultados do modelo físico para todos os grupos de cabos. No entanto, é notável que os valores de esforços com maiores diferenças foram obtidos na condição de enchente, exemplo de grupos como os de LR2, TR1, SV2, TV1 e LV1 que

apresentaram, no método analítico, esforços com quase o dobro do valor obtido no modelo físico. Já, para a condição de vazante, os valores ficaram mais próximos, apresentando diferença em alguns grupos de cabos em torno de 50%. Contudo, é possível observar que em ambos os métodos o sistema trabalhou de forma solidária, distribuindo os esforços entre os cabos de amarração.

Gráfico 5-3 - Esforços Píer III Berço Sul condição de enchente.

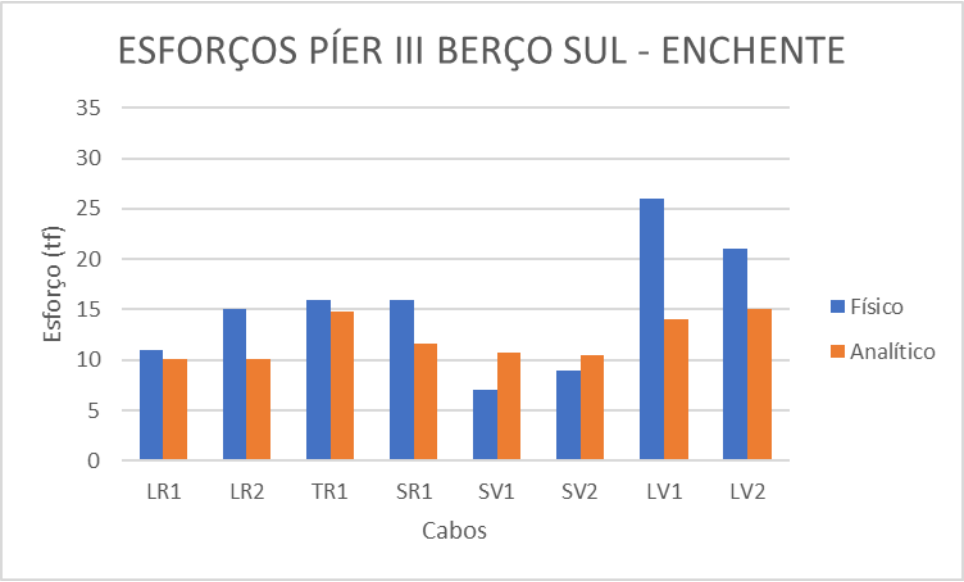
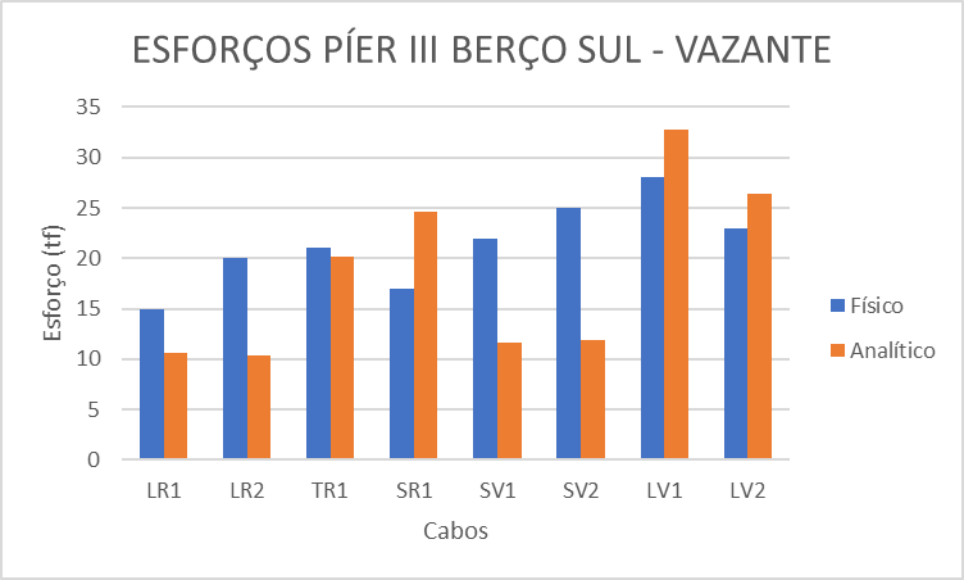


Gráfico 5-4 - Esforços Píer III Berço Sul condição de vazante.



No Píer III Sul, é possível observar que houve uma diferença nos valores em ter os métodos aplicados, pincipalmente, para condição de enchente, nos cabos de LV1 e LV2, e para condição de vazante nos cabos LR1, LR2 SV1 e SV2. Para estes, os valores do modelo físico superaram os dos obtidos no método analítico. Levando em conta estas diferenças, os resultados obtidos na condição de enchente apresentaram menores oscilações quando comparados com os valores obtidos na condição de vazante.

Gráfico 5-5 - Esforços Píer IV Berço Norte condição de enchente.

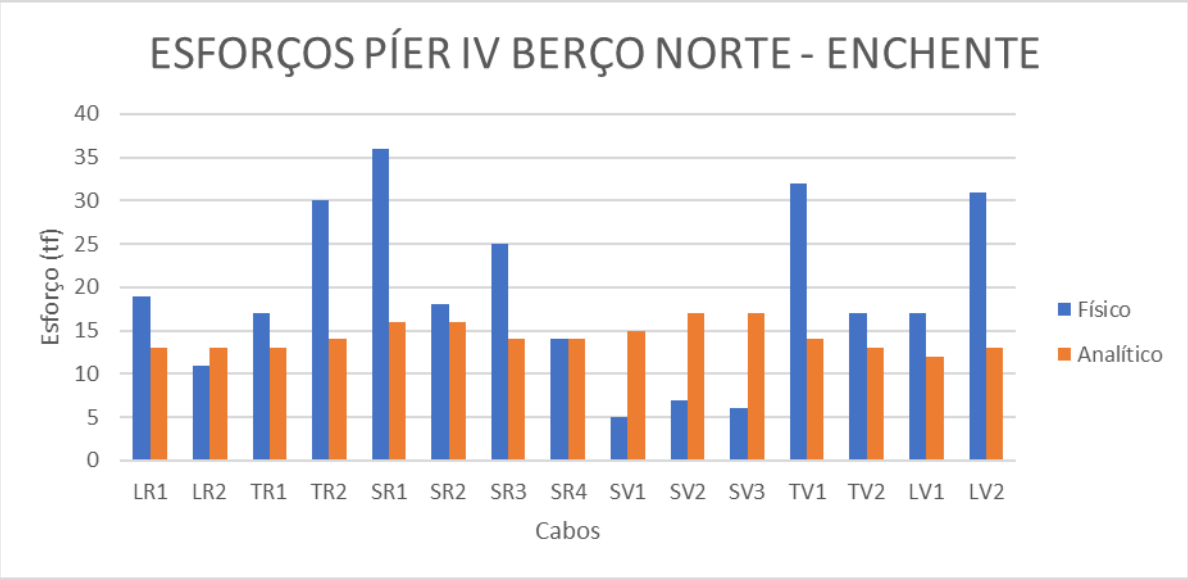
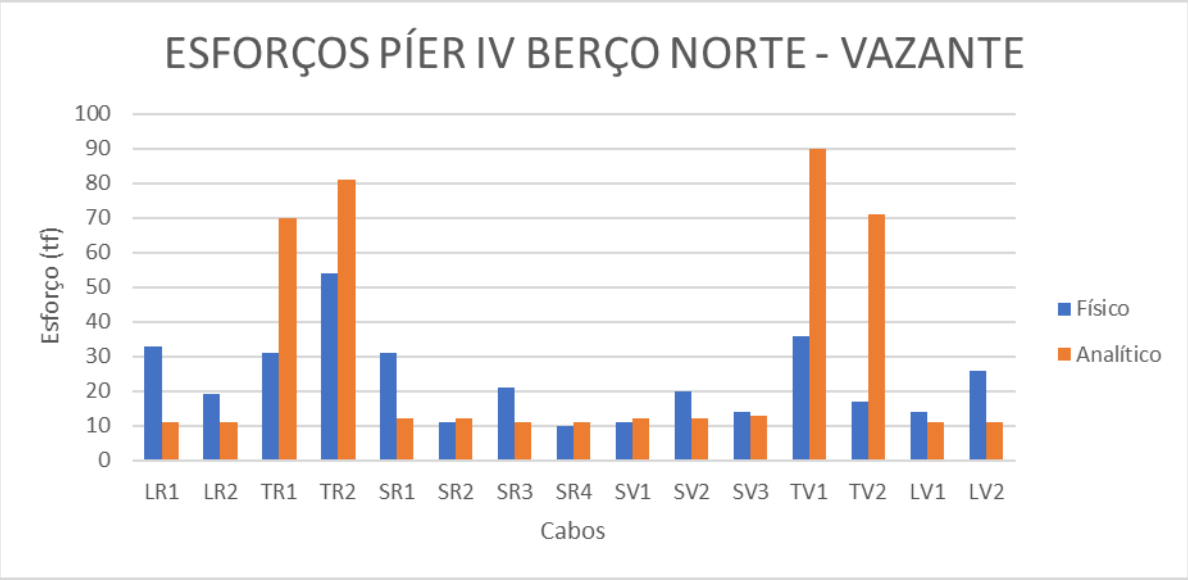


Gráfico 5-6 - Esforços Píer IV Berço Norte condição de Vazante.



Com os resultados do Píer IV Norte, apresentados nos Gráfico 5-5 e Gráfico 5-6, é possível observar maior discrepância entre eles, sendo notável que na condição de enchente quase nenhum grupo apresente valores de esforços próximos em ambos os métodos, com exceção dos cabos de LR2 e SR4. Além disso os esforços no método analítico se apresentam mais uniformes. Na condição de vazante, também é notável a similar situação da enchente, no entanto, com resultados sobrecarregando somente quatro grupos de cabos, TR1, TR2, TV1 e TV2, e com resultados menos uniformes.

Através dos resultados apresentados, é possível certificar-se que conforme o berço estudado é menos abrigado, ou seja, com presença de fenômenos complexos (exemplo: recirculação e/ou corrente multidirecional) os resultados entre os métodos apresentam maiores discrepâncias entre si. Como é possível observar através dos resultados o Píer I (abrigado) que possuem maior aderência dos resultados, Píer III Sul (menos abrigado), por outro lado, possui uma redução da aderência dos resultados e o Píer IV Norte (desabrigado) apresenta uma grande discrepância dos resultados entre os métodos aplicados.

Assim, a diferença apresentada nos resultados pode ocorrer pelas diversas simplificações aplicadas em cada método empregado, como, por exemplo, enquanto o método analítico utiliza somente um vetor para representar a incidência da corrente de maré no navio, o modelo físico utiliza a interação hidrodinâmica (em outras palavras, utiliza-se água). Assim, pode-se dizer que no modelo físico o casco do navio é atingido por milhares de vetores ao mesmo tempo. Além disto, no método analítico são empregados coeficientes de forma das embarcações, ou seja, aproximações do casco da embarcação, já no físico para cada ensaio de uma determinada embarcação é empregado o casco em escala reduzida com base no projeto real do navio, como descrito anteriormente.

Por outro lado, no modelo físico é empregado um sistema dinâmico de amarração, o qual exerce um efeito similar ao real, quando o navio se afasta da linha de atracação as molas trabalham de forma similar aos cabos, trazendo-o novamente para a posição de atracação. No método analítico, o sistema é totalmente estático. Com relação aos efeitos de segunda ordem, no modelo físico

é possível observar a interação com a estrutura de acostagem-navio-corrente de maré, como, por exemplo, o efeito da corrente ao atingir as estacas e ser desviada para o costado do navio (*stand-off*), ou o efeito causado pela folga sob a quilha (distância entre o fundo da bacia portuária e a quilha do navio), que pode elevar ou reduzir os esforços nos cabos de amarração. No método analítico estes efeitos não são considerados diretamente no cálculo dos esforços.

Desta forma, através da metodologia apresentada para cada método e através dos resultados obtidos, é notável que ambos apresentem simplificações perante o real. No entanto, entre os dois métodos, o modelo físico é o que apresenta menores simplificações, gerando maior confiabilidade dos resultados encontrados.

6. CONCLUSÃO

Com base na pesquisa realizada neste trabalho, foi possível identificar o quanto ambos os métodos são consagrados e disseminados no âmbito de projetos portuários. O método analítico emprega ferramentas e informações mais simples, que, com auxílio de uma calculadora ou planilha de Excel, permite estimar os esforços nos cabos de amarração de forma rápida. Por outro lado, a modelagem física é uma ferramenta poderosa, a qual representa de forma fidedigna as condições ambientais, formato das embarcações e estruturas portuárias, e o mais importante, a ótima representação da interação fluido/estrutura um resultado mais completo para análise de um sistema de amarração.

No entanto, com base no estudo de caso, no qual foram aplicados ambos os métodos apresentados, em três diferentes berços, para estimar os esforços nos cabos de amarração sob a influência de corrente de maré, deve-se ponderar em quais projetos, ou até mesmo em qual fase do projeto, pode ser aplicado cada um dos métodos, devido às suas simplificações e limitações.

É perceptível que o método analítico será de maior utilidade em projetos na quais a corrente de maré existente na região não apresente variações em sua direção (corrente unidirecional) e, também, onde a movimentação do navio não seja um fator primordial a ser considerado para viabilidade do projeto, já que o estudo é realizado totalmente de forma estática. Além disto, para a realização dos cálculos de arrasto e distribuição nos cabos de amarração através das equações apresentadas neste trabalho, o calculista deve ter em mãos as informações necessárias das características do navio e dos dados ambientais. Deve-se também conhecer a região, se possível consultando estudos realizados no local, e ter noções sobre o comportamento de navios atracados. Assim, pode-se garantir que ao obter todos os dados para a realização da estimativa dos esforços saberá empregá-los da melhor forma possível, processá-los e analisá-los com maior confiabilidade.

No caso da modelagem física, esta pode ser aplicada em diversas condições ambientais que se deseja estudar. No entanto, também é necessário seguir algumas premissas, pois este pode parecer um tanto intuitivo, mas é fundamental definir a escala de redução com o conhecimento necessário, pois, pode-se dimensionar um modelo que não irá representar os principais fenômenos que regem as condições ambientais da região de estudo. Além do mais, para se obter uma modelagem que irá ajudar a tomar as decisões de viabilidade de um projeto, seja implantação ou otimização, é necessário dispor de algumas informações como:

- Batimetria da região;
- Dados ambientais da região de estudo (ondas, correntes e ventos);
- Projeto base ou executivo das estruturas de atracação (píeres com suas dimensões, fundação e a posição dos elementos de amarração);
- Projeto do plano de linhas dos navios a serem estudados ou similares;
- Informações características do navio para calibração da movimentação (centro de massa);
- Prova de mar para calibração do propulsor e leme do navio (no caso da realização de manobras);
- Plano de amarração com calado e tipo de cabos a serem empregados.

Obtendo-se todas essas informações, o modelo deve ser construído seguindo recomendações nacionais e internacionais que possuam procedimentos para garantir a eficácia da ferramenta. A calibração, por exemplo, deve ser realizada com auxílio de equipamentos confiáveis para medição de cada fenômeno presente.

Em casos nos quais seja possível aplicar os dois métodos no mesmo projeto, deve-se considerar o emprego do método analítico no início do estudo, como

uma premissa do projeto (conceitual), o qual deverá ser refinado em estudos realizados em modelo físico, no qual será possível subsidiar o projeto executivo do terminal estudado.

Por fim, considerando que o modelo físico possui grandes técnicas por trás de sua concepção, passando por calibração hidrodinâmica, calibração do sistema de representação da amarração e das características do modelo do navio, isto tudo validado com os dados de campo, gera maior confiabilidade e pode representar diversas áreas e fenômenos envolvidos em estudos hidráulicos. O método analítico depende muito da região que se pretenda estudar, sendo indicada a sua aplicação em casos mais simples.

7. REFERÊNCIAS

ALFREDINI, P. **A modelação física do comportamento de navios atracados na otimização do arranjo geral de áreas portuárias**. Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Livre-Docente em Engenharia. São Paulo, 1992.

_____. **Obras e Gestão de Portos e Costas** – A técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental. 1ª edição. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

_____; ARASAKI, E. **Engenharia Portuária.** São Paulo: Blücher, 2014.

ASCE – AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Manual and Reports on Engineering Pratice No.129**: Mooring of Ships to Piers and Wharves. Virginia, 2014.

BERNARDINO, J.C.M. **Abordagem experimental para avaliação de manobras de navios em modelos físicos de espaços náuticos**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental São Paulo, 2015.

BORGO FILHO, M. **Elementos de Engenharia Portuária.** Vitória: Flor&Cultura, 2008.

Bruun, P. **Port engineering, 4th Ed, Vol. 1**, Gulf Publishing, Houston, 1989.

BS 6349-1- Maritime structures — **Part 1: Code of practice for general criteria,** London; 2000.

Clark, I.C. **Mooring and anchoring ships, Vol. 1: Principles and practice**, The Nautical Institute, London, 2009.

Comin, C. **Estruturas Portuárias – Distribuição de esforços na infraestrutura devido à amarração e atracação de embarcações**. Tese (Mestrado). Universidade Federal do Pará Belém, 2015.

CSL – Cordoaria São Leopoldo, **Curso de teoria e prática estruturas tênseis.** São Leopolodo – RS, 2015.

ESFERRA, R.; Bernardino, J.C.; Alfredini, P. **Physical modeling applied in evaluation of the safety and efficiency of vessel mooring plans**. RBRH vol.23, Porto Alegre, 2018.

FCTH – FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRAÚLICA. **Descrição da concepção e operação do modelo físico do Terminal Ponta da Madeira**. RL-3000KP-X-09820. Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2015 a.

FCTH – FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRAÚLICA. **Calibração do modelo físico PDM-Norte**. RL-3000KP-X-20443. Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2015 a.

Flory, J.F. "**Good and not so good mooring practices.**" Oil Spill Prevention Symposium, California State Lands Commission, Long Beach, CA, 1998.

Flory, J.F.; Ractliffe, A. "**Mooring arrangement management by computer**." Ships Operations, Management, and Economics Conference, Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York, 1994.

GERENT, J.P. **A simulação analógica de manobras não tripuladas de navios na otimização de projetos e operações portuárias.** Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. São Paulo, 2010.

HUGHES, S.A. **Physical models and laboratory techniques in Coastal Engineering.** Advanced Series on Ocean Engineering – Volume 7. USA: World Scientific Publishing, 2005.

ISO. "**Fibre ropes — Determination of certain** physical and mechanical properties." ISO 3730:2012, Geneva, 2012.

ISO. "**Shipbuilding and marine structures-mooring winches**." ISO 2307, Geneva, 2010.

ISO. "**Fibre ropes — General specifications**." ISO, 9554, Geneva, 2005.

KOBUS, H. (Ed.) **Hydraulic Modelling.** German Association for Water Resources and Land Improvement, Bulletin 7. London: Pitman Books, 1980.

MOTTA, V.F. **Curso de Teoria da Semelhança.** Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS, 1972.

NOVAK, P.; CABELKA, J. **Models in Hydraulic Engineering.** Physical Principles and Design Applications. London: Pitman Publishing, 1981.

Oil Companies International Marine Forum **"Mooring equipment guidelines" 3rd**. London, 2013.

Oil Companies International Marine Forum **"Guideline and recommendations for the safe mooring of large ships at piers and sea islands**. London, 1978.

OPTIMOOR **user's guide**. Tension Technology International, Morristown, NJ, 2011.

PIANC – Permanent International Association of Navigation Congresses – **"Report of Working Group no. 24"**. Supplement to Bulletin no. 88. Brussels, 1995.

PIANC. "**Approach channels, a guide for design**." Supplement to Bulletin No. 95, Brussels, Belgium, 1197.

SANTOS, P. J. R.; **Análise da Interação de Navios com dispositivos de Acostagem e Amarração - Estudo em Modelo Físico do Posto "A" do terminal de Petroleiros do Porto de Leixões.** Dissertação para doutorado Portugal, 2010.

SHARP, J.J. **Hydraulic Modelling**. London: Butterwoths, 1981.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Sistema Integrado de Bibliotecas da USP. **Diretrizes para apresentação de dissertações e teses da USP:** documento eletrônico e impresso Parte I (ABNT). 2ª edição revisada e ampliada. São Paulo, 2009.

USACE. “**Coastal engineering manual**.” Part VI, EM 1110-2-1100. Vicksburg, MS, 2006.

8. APÊNDICE

APÊNDICE A - Coeficientes de arrasto de vento, C_{Xw}(forças longitudinais), C_{Yw}(forças laterais) e C_{XYw}(momento).

Tabela 8-1 - Coeficiente de força de arrasto para vento longitudinal (C_{Xw})

Cxw - Carregado		Cxw - Lastro (Poroa Conv.)		Cxw - Lastro (Proa Cilín.)	
θw	Cxw	θw	Cxw	θw	Cxw
0	0,75301	0	0,60949	0	0,60949
9	0,77437	9	0,63410	9	0,63410
18	0,75424	18	0,62378	18	0,62378
27	0,68601	27	0,57068	27	0,57068
36	0,57251	36	0,49958	36	0,49958
45	0,44742	45	0,42090	45	0,42090
54	0,35289	54	0,33515	54	0,33515
63	0,26475	63	0,24655	63	0,24655
72	0,19553	72	0,15175	72	0,15175
81	0,12878	81	0,06543	81	0,11045
90	0,04226	90	0,00101	90	0,30022
99	-0,06093	99	-0,04135	99	0,47739
108	-0,17469	108	-0,06712	108	0,47739
117	-0,29754	117	-0,10588	117	0,35657
126	-0,41855	126	-0,17255	126	0,11475
135	-0,54312	135	-0,26788	135	-0,14605
144	-0,65646	144	-0,37399	144	-0,34491
153	-0,75511	153	-0,50265	153	-0,50265
162	-0,84079	162	-0,63640	162	-0,63640
171	-0,90398	171	-0,75684	171	-0,75684
180	-0,95242	180	-0,86169	180	-0,86169

Tabela 8-2 - Coeficiente de força de arrasto para vento lateral (C_{Yw})

Cyw - Carregado		Cyw - Lastro	
θw	Cyw	θw	Cyw
0	0,00000	0	0,00000
9	0,10657	9	0,14705
18	0,24983	18	0,27680
27	0,38389	27	0,40209
36	0,50254	36	0,51771
45	0,59108	45	0,62629
54	0,64586	54	0,72423
63	0,68412	63	0,82158
72	0,70622	72	0,90214
81	0,71558	81	0,95473
90	0,71558	90	0,98403
99	0,70537	99	0,99124
108	0,68302	108	0,96785
117	0,64672	117	0,91875
126	0,58906	126	0,84353
135	0,49747	135	0,74838
144	0,37868	144	0,62565
153	0,26532	153	0,47606
162	0,15844	162	0,27919
171	0,06895	171	0,11596
180	0,00000	180	0,00000

APÊNDICE B - Coeficientes de arrasto de corrente, C_{Xc}(forças longitudinais), C_{Yc}(força lateral) e C_{XYc}(momento).

Tabela 8-3 - Coeficiente de força de arrasto para corrente longitudinal (WD/T=1.1).

Cxc Proa Conv. (WD/T = 1.1)		Cxc Proa Cilí. (WD/T = 1.1)	
θc	Cxc	θc	Cxc
0	0,03777	0	0,03777
9	0,00033	9	0,00033
18	-0,01265	18	-0,01265
27	0,02275	27	0,03405
36	0,06612	36	0,10028
45	0,08908	45	0,15154
54	0,09430	54	0,16937
63	0,08459	63	0,16937
72	0,06367	72	0,13905
81	0,03482	81	0,10538
90	-0,00161	90	0,07129
99	-0,04171	99	0,03137
108	-0,07970	108	-0,00899
117	-0,10557	117	-0,04756
126	-0,11313	126	-0,07960
135	-0,08690	135	-0,04401
144	-0,01129	144	0,05882
153	0,06519	153	0,13012
162	0,05658	162	0,06855
171	-0,00948	171	-0,00948
180	-0,03596	180	-0,03596

Tabela 8-4 - Coeficiente de força de arrasto para corrente longitudinal (WD/T=1.2).

Cxc Proa Conv. (WD/T = 1.2)		Cxc Proa Cilí. (WD/T = 1.2)	
θc	Cxc	θc	Cxc
0	0,03744	0	0,03744
9	0,02194	9	0,02194
18	-0,03495	18	-0,02152
27	-0,06496	27	-0,02995
36	-0,03594	36	0,00672
45	0,01018	45	0,05603
54	0,03912	54	0,10518
63	0,04529	63	0,13087
72	0,03273	72	0,10614
81	0,01475	81	0,07200
90	-0,00473	90	0,04168
99	-0,02466	99	0,01662
108	-0,03846	108	0,00689
117	-0,04389	117	0,00478
126	-0,03500	126	0,00689
135	-0,00100	135	0,03349
144	0,06408	144	0,09263
153	0,12080	153	0,12901
162	0,05852	162	0,05852
171	-0,00109	171	-0,00109
180	-0,02418	180	-0,02418

Tabela 8-5 - Coeficiente de força de arrasto para corrente longitudinal (WD/T=1.5).

Cxc Proa Conv. (WD/T = 1.5)		Cxc Proa Cilí. (WD/T = 1.5)	
θc	Cxc	θc	Cxc
0	0,03584	0	0,03584
9	0,03183	9	0,03183
18	0,01703	18	0,01703
27	-0,02393	27	-0,02393
36	-0,06149	36	-0,05860
45	-0,07554	45	-0,01632
54	-0,05712	54	0,10264
63	-0,01386	63	0,17505
72	0,01440	72	0,13394
81	0,02489	81	0,09881
90	0,02018	90	0,07190
99	0,01414	99	0,05821
108	0,01724	108	0,06562
117	0,03242	117	0,09302
126	0,08926	126	0,12292
135	0,12393	135	0,13024
144	0,09480	144	0,09480
153	0,01800	153	0,01800
162	-0,02405	162	-0,02405
171	-0,03512	171	-0,03512
180	-0,03667	180	-0,03667

Tabela 8-6 - Coeficiente de força de arrasto para corrente longitudinal (WD/T=3.0).

Cxc Proa Conv. (WD/T = 3.0)		Cxc Proa Cilí. (WD/T = 3.0)	
θc	Cxc	θc	Cxc
0	0,03912	0	0,03912
9	0,03674	9	0,03674
18	0,03508	18	0,03508
27	0,02713	27	0,02713
36	0,00928	36	0,00928
45	-0,01123	45	-0,00750
54	-0,02600	54	-0,01274
63	-0,03376	63	-0,01166
72	-0,03160	72	-0,00534
81	-0,01791	81	0,00791
90	0,01078	90	0,03105
99	0,04767	99	0,05291
108	0,05806	108	0,05806
117	0,04827	117	0,04931
126	0,02734	126	0,02734
135	0,00361	135	0,00361
144	-0,01573	144	-0,01573
153	-0,02647	153	-0,02647
162	-0,03112	162	-0,03112
171	-0,03255	171	-0,03255
180	-0,03255	180	-0,03255

Tabela 8-7 - Coeficiente de força de arrasto para corrente longitudinal (WD/T=4.4).

Cxc Proa Conv. (WD/T = 4.4)		Cxc Proa Cilí. (WD/T = 4.4)	
θc	Cxc	θc	Cxc
0	0,03807	0	0,05008
9	0,03738	9	0,04752
18	0,03395	18	0,04416
27	0,02648	27	0,03719
36	0,01159	36	0,02484
45	-0,00777	45	0,00917
54	-0,02401	54	-0,00221
63	-0,02967	63	-0,00482
72	-0,02351	72	-0,00239
81	-0,00891	81	0,00547
90	0,01053	90	0,01888
99	0,02882	99	0,03376
108	0,04057	108	0,04263
117	0,04344	117	0,04344
126	0,03022	126	0,03022
135	0,00609	135	0,00609
144	-0,01247	144	-0,01247
153	-0,02419	153	-0,02419
162	-0,03025	162	-0,03025
171	-0,03025	171	-0,03025
180	-0,03319	180	-0,03319

Tabela 8-8 - Coeficiente de força de arrasto para corrente lateral.

Cyc (WD/T = 1.05)		Cyc (WD/T = 1.10)		Cyc (WD/T = 1.20)		Cyc (WD/T = 1.50)		Cyc (WD/T = 3.00)		Cyc (WD/T > 6.00)	
θc	**Cyc**	**θc**	**Cyc**	**θc**	**Cyc**	**θc**	**Cyc**	**θc**	**Cyc**	**θc**	**Cyc**
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0,75431	9	0,35241	9	0,51822	9	0,27372	9	0,13393	9	0,06441
18	0,92878	18	0,69263	18	0,99779	18	0,63341	18	0,28501	18	0,14432
27	1,08820	27	1,02633	27	1,15358	27	0,93226	27	0,42869	27	0,22124
36	1,52246	36	1,36573	36	1,31809	36	1,16190	36	0,56045	36	0,30076
45	1,95044	45	1,69604	45	1,52588	45	1,33585	45	0,67757	45	0,37001
54	2,34201	54	2,02301	54	1,72932	54	1,46691	54	0,78159	54	0,43624
63	2,71472	63	2,34165	63	1,92096	63	1,56119	63	0,86757	63	0,49267
72	3,06378	72	2,63950	72	2,10018	72	1,62335	72	0,93420	72	0,53877
81	3,23176	81	2,83070	81	2,24663	81	1,67191	81	0,97526	81	0,57275
90	3,28522	90	2,86607	90	2,33179	90	1,67191	90	0,98864	90	0,58428
99	3,23063	99	2,79393	99	2,29496	99	1,64860	99	0,96723	99	0,57203
108	3,06151	108	2,60505	108	2,16944	108	1,60198	108	0,91371	108	0,53712
117	2,72677	117	2,34086	117	1,99490	117	1,52457	117	0,82675	117	0,48667
126	2,38051	126	2,01813	126	1,83434	126	1,42004	126	0,71614	126	0,42788
135	2,03472	135	1,66189	135	1,68702	135	1,27780	135	0,59261	135	0,35595
144	1,69678	144	1,54870	144	1,49488	144	1,09335	144	0,46836	144	0,28360
153	1,56097	153	1,51194	153	1,22547	153	0,84875	153	0,34444	153	0,20454
162	1,37881	162	1,16573	162	0,86460	162	0,52564	162	0,22403	162	0,12794
171	0,69522	171	0,59974	171	0,35241	171	0,21335	171	0,11037	171	0,05519
180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180	0

APÊNDICE C - Resumo resultados do método físico e analítico

Tabela 8-9 – Resultados método físico e analítico para Píer I.

MODELO FÍSICO																					
Píer I	**Grupo / Nº cabos**	LR1	2	LR2	2	TR1	2	SR1	2	SR2	2	SV1	2	SV2	2	TV1	2	LV1	2	LV2	2
	Esforços / MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL
1/2 E 5.0 m	F Máxima	8	8%	8	8%	9	9%	13	13%	15	15%	8	8%	6	6%	8	8%	8	8%	9	9%
	F Significativa	7	7%	7	7%	7	7%	12	12%	10	10%	7	7%	5	5%	7	7%	8	8%	8	8%
	F Med	7	7%	7	7%	7	7%	11	11%	8	8%	7	7%	5	5%	6	6%	7	7%	8	8%
1/2 V 5.0 m	F Máxima	9	9%	10	10%	12	12%	17	17%	13	13%	11	11%	11	11%	11	11%	11	11%	10	10%
	F Significativa	7	7%	7	7%	8	8%	11	11%	10	10%	9	9%	7	7%	8	8%	8	8%	8	8%
	F Med	6	6%	6	6%	6	6%	9	9%	8	8%	7	7%	5	5%	7	7%	8	8%	8	8%
Material Cabo		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)	

ANALÍTICO																					
Píer I	**Grupo / Nº cabos**	LR1	2	LR2	2	TR1	2	SR1	2	SR2	2	SV1	2	SV2	2	TV1	2	LV1	2	LV2	2
	Esforços / MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL
1/2 E 5.0 m	F Máxima	0,76	1%	4,35	4%	5,79	6%	1	1%	0,63	1%	0,31	0%	1,25	1%	5,58	6%	4,44	4%	0,36	0%
1/2 V 5.0 m	F Máxima	2,63	3%	5,31	5%	7,08	7%	3,49	3%	2,18	2%	1,09	1%	4,35	4%	6,81	7%	5,42	5%	1,26	1%
Material Cabo		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)	

Tabela 8-10 - Resultados método físico e analítico para Píer III Berço Sul.

MODELO FÍSICO																	
Píer III - Sul	**Grupo / Nº cabos**	LR1	2	LR2	2	TR1	2	SR1	2	SV1	2	SV2	2	LV1	2	LV2	2
	Esforços / MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL
1/2 E 5.0 m	F Máxima	11	11%	15	15%	16	16%	16	16%	7	7%	9	9%	26	26%	21	21%
	F Significativa	10	10%	13	13%	15	15%	12	12%	7	7%	9	9%	23	23%	19	19%
	F Med	10	10%	13	13%	15	15%	11	11%	7	7%	8	8%	21	21%	18	18%
1/2 V 5.0 m	F Máxima	15	15%	20	20%	21	21%	17	17%	22	22%	25	25%	28	28%	23	23%
	F Significativa	11	11%	14	14%	15	15%	8	8%	14	14%	16	16%	17	17%	16	16%
	F Med	9	9%	11	11%	13	13%	5	5%	11	11%	13	13%	15	15%	15	15%
Material Cabo		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)	

ANALÍTICO																	
Píer III - Sul	**Grupo / Nº cabos**	LR1	2	LR2	2	TR1	2	SR1	2	SV1	2	SV2	2	LV1	2	LV2	2
	Esforços / MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL
1/2 E 5.0 m	F Máxima	0,07	0%	0,04	0%	4,78	5%	1,58	2%	0,71	1%	0,51	1%	4,04	4%	5,05	5%
1/2 V 5.0 m	F Máxima	0,62	1%	0,36	0%	10,21	10%	14,59	15%	1,62	2%	1,85	2%	22,79	23%	16,44	16%
Material Cabo		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)	

Tabela 8-11 - Resultados método físico e analítico para Píer IV Berço Norte.

MODELO FÍSICO																															
Píer IV - NORTE	**Grupo / Nº cabos**	LR1	2	LR2	2	TR1	4	TR2	5	SR1	2	SR2	2	SR3	2	SR4	2	SV1	2	SV2	2	SV3	2	TV1	4	TV2	4	LV1	2	LV2	2
	Esforços / MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL
1/2 E 5.0 m	F Máxima	19	11%	11	11%	17	17%	30	17%	36	20%	18	18%	25	14%	14	14%	5	5%	7	4%	6	6%	32	18%	17	17%	17	17%	31	17%
	F Significativa	18	10%	10	10%	17	17%	30	17%	35	19%	17	17%	25	14%	14	14%	5	5%	6	3%	5	5%	27	15%	15	15%	16	16%	29	16%
	F Med	18	10%	10	10%	16	16%	29	16%	35	19%	17	17%	25	14%	14	14%	4	4%	6	3%	4	4%	26	14%	14	14%	15	15%	28	16%
1/2 V 5.0 m	F Máxima	33	18%	19	19%	31	31%	54	30%	31	17%	11	11%	21	12%	10	10%	11	11%	20	11%	14	14%	36	20%	17	17%	14	14%	26	14%
	F Significativa	28	16%	16	16%	23	23%	40	22%	24	13%	9	9%	18	10%	9	9%	10	10%	19	11%	12	12%	27	15%	13	13%	12	12%	22	12%
	F Med	27	15%	15	15%	22	22%	37	21%	22	12%	9	9%	18	10%	9	9%	9	9%	18	10%	12	12%	24	13%	12	12%	11	11%	22	12%
Material Cabo		HMPE (180tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (180tf)		HMPE (180tf)		HMPE (100tf)		HMPE (180tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (180tf)		HMPE (100tf)		HMPE (180tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (180tf)	

ANALÍTICO																															
Píer IV - NORTE	**Grupo / Nº cabos**	LR1	2	LR2	2	TR1	4	TR2	5	SR1	2	SR2	2	SR3	2	SR4	2	SV1	2	SV2	2	SV3	2	TV1	4	TV2	4	LV1	2	LV2	2
	Esforços / MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL	tf	% MBL
1/2 E 5.0 m	F Máxima	3,24	2%	3,27	3%	3,42	3%	4,06	2%	6,14	3%	6,27	6%	4,08	2%	3,97	4%	4,75	5%	6,97	4%	7,13	7%	4,53	3%	3,48	3%	2,48	2%	2,69	1%
1/2 V 5.0 m	F Máxima	1,15	1%	1,16	1%	60,19	60%	71,47	40%	2,18	1%	2,23	2%	1,45	1%	1,41	1%	1,69	2%	2,47	1%	2,53	3%	79,71	44%	61,18	61%	0,88	1%	0,96	1%
Material Cabo		HMPE (180tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (180tf)		HMPE (180tf)		HMPE (100tf)		HMPE (180tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (180tf)		HMPE (100tf)		HMPE (180tf)		HMPE (100tf)		HMPE (100tf)		HMPE (180tf)	