UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA

ROBERTO DE OLIVEIRA BEZERRA

Desenvolvimento de sistema de monitoramento de deslocamentos de modelos reduzidos de navios atracados em simuladores experimentais

São Paulo

2021

ROBERTO DE OLIVEIRA BEZERRA

Desenvolvimento de sistema de monitoramento de deslocamentos de modelos reduzidos de navios atracados em simuladores experimentais

Versão Corrigida

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

Área de Concentração: Engenharia Hidráulica

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Melo Bernardino

São Paulo 2021 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.

| responsabilidade única do autor e o | do em relação a versão original, so com a anuência de seu orientador. |
|-------------------------------------|--|
| São Paulo, de | de |
| Assinatura do autor: | |
| Assinatura do orientador: | |

Catalogação-na-publicação

Bezerra, Roberto de Oliveira

Desenvolvimento de sistema de monitoramento de deslocamentos de modelos reduzidos de navios atracados em simuladores experimentais / R. O. Bezerra – versão corr. -- São Paulo, 2021. 88 p.

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: BEZERRA, Roberto de Oliveira

Título: Desenvolvimento de sistema de monitoramento de deslocamentos de modelos reduzidos de navios atracados em simuladores experimentais

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 Luilde Meus pais Mônica e Roberto Minha avó Alcina

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Doutor José Carlos de Melo Bernardino pela disponibilidade total e pela ajuda constante ao longo da execução da tese. Muito Obrigado por seus ensinamentos, pela atenção, pela paciência e por ter acreditado em mim para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Doutor Paolo Alfredini pelo conhecimento, pela paciência e por sempre mostrar interesse em me ajudar em tudo que necessitei.

Ao Prof. Doutor Pedro Cardozo de Mello pelo empréstimo dos equipamentos e pela imensa colaboração durante a fase dos testes em modelo físico.

À toda a equipe da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, da qual tenho orgulho em fazer parte, por em todos em anos de pesquisa sempre estarem dispostos e interessados em me ajudar. Com certeza, sem o auxílio de todos, a realização dessa pesquisa seria inviável.

RESUMO

BEZERRA, R.O. Desenvolvimento de sistema de monitoramento de deslocamentos de modelos reduzidos de navios atracados em simuladores experimentais. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

Tendo em vista a complexidade do comportamento de navios amarrados e, em consequência, as condições de operacionalidade e de segurança em um dado terminal portuário, a modelação física é a ferramenta mais indicada para o estudo deste tipo de problema. No contexto dos estudos que subsidiam os projetos de segurança de terminais portuários, o presente trabalho aborda o desenvolvimento de um sistema de medição de deslocamentos de modelos reduzidos de navios atracados, com a finalidade de proporcionar subsídios para avaliação das amplitudes de deslocamentos e, se eles excedem ou não os limites operacionais preestabelecidos. Desenvolveu-se um sistema alternativo aos existentes que, combina o uso de câmeras e sensores inerciais para medir os deslocamentos da embarcação em relação ao píer. O sistema mede 4 deslocamentos (surge, sway, heave e yaw) via algoritmo de reconhecimento de padrões por imagens e os demais deslocamentos (roll e pitch), com a utilização de um acelerômetro combinado a um giroscópio. Inicialmente, o sistema desenvolvido foi testado em bancada, para cada grau de liberdade separadamente e, posteriormente, aplicado à um modelo reduzido de um navio graneleiro amarrado em um berço de atracação de um terminal portuário sujeito a ação de ondas. Os testes em modelos reduzidos foram realizados em modelos de terminais portuários amplamente validados ao longo de diversos anos de pesquisa e desenvolvimento no Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da USP, garantindo todos os pré-requisitos necessários para a avaliação dos resultados do sistema desenvolvido. Para avaliar a resposta do sistema quando utilizado no modelo físico, os valores de deslocamentos medidos foram comparados a outro sistema de medição de deslocamentos, o sistema Qualisys®, sistema comercial consagrado para medição da movimentos de corpos rígidos. Os resultados obtidos foram apresentados, evidenciando a proximidade entre as medições de ambos os sistemas, indicando que o sistema desenvolvido atende adequadamente à sua finalidade.

Palavras-chave: Engenharia Portuária, Medições para Engenharia, Instrumentação para Engenharia, Modelos Físicos Reduzidos.

ABSTRACT

BEZERRA, R.O. Development of a monitoring system for displacement of reduced models of ships moored in experimental simulators. Thesis (Master degree) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

In view of the complexity of the behavior of moored ships and, consequently, the operational and safety conditions in a port terminal, physical modeling is the most suitable tool for the study of this type of problem. In the context of studies that support port terminal security projects, the present work addresses the development of a displacement measurement system for reduced models of moored ships, with the purpose of providing subsidies for assessing the amplitude of displacements and, if whether they exceed the pre-established operating limits. An alternative system was developed to the existing ones, which combines the use of cameras and inertial sensors to measure the vessel's displacements in relation to the pier. The system measures 4 displacements (surge, sway, heave and yaw) via pattern recognition algorithm by images and the other displacements (roll and pitch), using an accelerometer combined with a gyroscope. Initially, the developed system was tested on a bench, for each degree of freedom separately and, later, applied to a reduced model of a bulk carrier tied to a berth of a port terminal subject to wave action. The tests on reduced models were performed on models of port terminals widely validated over several years of research and development at the Hydraulics Laboratory of the Polytechnic School of USP, guaranteeing all the necessary prerequisites for the evaluation of the results of the developed system. To assess the response of the system when used in the physical model, the measured displacement values were compared to another displacement measurement system, the Qualisys® system, a well-known commercial system for measuring rigid body movements. The results obtained are presented showing the proximity between the measurements of both systems, ensuring the effectiveness of the developed system.

Keywords: Port Engineering, Measurements and instrumentation for engineering, Reduced physical models.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| Figura 2.1 – Porto de Imbituba-SC apresenta um exemplo de obra contínua de acostagem com |
|---|
| equipamento de movimentação de carga deslizante7 |
| Figura 2.2 – Terminal Ponta da Madeira apresenta obra em estruturas discretas de acostagem |
| para amarração e movimentação de carga em um navio graneleiro |
| Figura 2.3 – Exemplo de curva da carga absorvida pela defensa em relação a sua deflexão. O |
| gráfico também representa a energia absorvida pela defensa (Modelo Bridgestone |
| SUC2000H R0) |
| Figura 2.4 – Plano de amarração típico para terminais portuários e a denominação de cada |
| cabo de amarração de acordo com sua função11 |
| Figura 2.5 – Exemplo de cabeços de amarração utilizados para fixar os cabos de amarração na |
| estrutura de acostagem 12 |
| Figura 2.6 - Exemplo de ganchos de desengate rápido utilizados para fixar os cabos de |
| amarração na estrutura de acostagem12 |
| Figura 2.7 - Seis graus de liberdade de movimentação de uma embarcação livre 13 |
| Figura 2.8 – Relação entre eficiência do processo de carregamento/descarregamento e o |
| deslocamento da embarcação em relação ao píer 14 |
| Figura 2.9 – Exemplo de onda regular com destaque aos seus parâmetros básicos de avaliação |
| |
| Figura 2.10 – Superposição de duas ondas regulares unidirecionais distintas (c1 e c2) |
| formando uma onda irregular19 |
| Figura 2.11 Parte de um registro histórico simples de uma onda irregular no tempo, com |
| destaque para as diferentes alturas de ondas 19 |
| Figura 2.12 - Modelo Físico Tridimensional com sistema gerador de ondas presente no |
| LHEPUSP |
| Figura 3.1 – Exemplo de uso de reconhecimento de padrões em um programa feito em |
| plataforma Labview |
| Figura 3.2 - Exemplo de uso de Reconhecimento de Geometrias em um programa feito em |
| plataforma Labview |
| Figura 3.3 – Dificuldades de correspondência encontradas para o algoritmo de |
| reconhecimento de padrões utilizado em plataforma Labview. Imagens A: O |
| objeto a detectar é de um tamanho diferente do modelo; Imagens B: O objeto a |

| detectar é bloqueado na imagem; Imagens C: alteração no contraste que diminua o |
|---|
| contraste das bordas |
| Figura 3.4 – Exemplo de funcionamento do Sistema Qualisys |
| Figura 3.5 – Sitemas Optotrak de medição de deslocamentos. A: Sensor de posição. B: |
| Marcador com emissor de luz infravermelha |
| Figura 3.6 – Marcadores e câmeras utilizados pelo sistema Vicon Motion Capture System33 |
| Figura 3.7 – Detalhe do sistema Microsoft Kinect de captura de deslocamentos |
| Figura 4.1 – Parte do sistema de medição de deslocamentos que é localizado sobre a |
| embarcação com os sensores inerciais e o alvo marcador montado (A) e |
| desmontado (B)37 |
| Figura 4.2 – Desenho esquemático mostrando o sistema de monitoramento de deslocamentos |
| que contêm duas partes: uma fixada ao píer e a outra sobre a embarcação |
| Figura 4.3 – Padrão utilizado no alvo marcador que facilite o algoritmo de reconhecimento de |
| padrões |
| Figura 4.4 – Câmera com sistema de iluminação posicionada sobre o alvo marcador40 |
| Figura 4.5 – Método de calibração de imagens por pontos circulares presente no software |
| LabView |
| Figura 4.6 – c utilizando o método de pontos circulares com distância entre o alvo e a câmera |
| de 10 centímetros42 |
| Figura 4.7 – Sensibilidade do sistema utilizando o método de pontos circulares com distância |
| entre o alvo e a câmera de 25 centímetros42 |
| Figura 4.8 – Desenho esquemático demonstrando a distância relativa entre a câmera e o alvo |
| marcador |
| Figura 4.9 – Variação da sensibilidade do sistema em relação à distância entre a câmera e o |
| alvo marcador |
| Figura 4.10 – Variação da escala dimensional da imagem em relação ao deslocamento da |
| embarcação em heave45 |
| Figura 4.11 - IMU comercial contendo sensores inerciais utilizados na pesquisa (GY-80) 46 |
| Figura 4.12 – Erro acumulativo (drift) de orientação no uso do giroscópio presente no multi- |
| sensor GY-80, sob a ação de um movimento senoidal47 |
| Figura 4.13 – Deslocamento (roll) ao longo do tempo, com destaque para os ruídos gerados |
| pela dinâmica característica do acelerômetro presente no multi-sensor Gy-80 ao |
| medir deslocamentos rotacionais, sob a ação de um movimento senoidal48 |

| Figura 4.14 – Utilização do filtro complementar com $\alpha = 0.9$ para corrigir os erros |
|--|
| apresentados pelos sensores inerciais 49 |
| Figura 4.15 - Transformações geométricas dos deslocamentos medidos pelo sensor 50 |
| Figura 4.16 – Captura da tela de programação do LabView para a função de teste do sensor |
| inercial |
| Figura 4.17 – Captura de tela do programa computacional de medição de esforços nos cabos |
| de amarração utilizado no LHEPUSP com o sistema de monitoramento de |
| deslocamento anexo (destaque em vermelho) 52 |
| Figura 4.18 - Fluxograma do algoritmo utilizado pelo programa computacional desenvolvido |
| para o sistema de medição de deslocamentos 53 |
| Figura 4.19 – Servo motor gerador de deslocamentos rotacionais utilizado para testar o |
| sistema em laboratório 54 |
| Figura 4.20 – Sistema gerador de deslocamento de translação para avaliação do sistema em |
| ambiente controlado56 |
| Figura 4.21 – Movimento senoidal com frequência de 0,2 Hz e amplitude de 15°, aplicado |
| sobre o sistema desenvolvido58 |
| Figura 5.1 – Área abrangida pelo modelo físico reduzido localizado no LHEPUSP com a |
| representação das curvas batimétricas utilizadas para a construção |
| Figura 5.2 – Arranjo geral simplificado do gerador de ondas basculante implementado no |
| modelo físico reduzido do TPEC 63 |
| Figura 5.3 - Modelo físico reduzido tridimensional com sistema gerador de ondas localizado |
| no LHEPUSP. Escala 1:17063 |
| Figura 5.4 – Detalhe do píer do modelo físico reduzido do terminal portuário com |
| embarcações em ambos os berços64 |
| Figura 5.5 – Espectro de ondas JONSWAP em comparação com as interações de calibração |
| do gerador de ondas |
| Figura 5.6 – Plano de capacidades do navio do tipo VLOC, com capacidade de carga de |
| 300.000°DWT, utilizado nos testes em modelo físico reduzido |
| Figura 5.7 – Casco do modelo de embarcação construído em resina e fibra de vidro em escala |
| geométrica de 1:17067 |
| Figura 5.8 – Plano de amarração do navio do tipo VLOC com capacidade de carga de |
| 300.000°DWT utilizado nos testes em modelo físico reduzido |

| Figura 5.9 – Alvos marcadores do sistema Qualisys® de medição de deslocamentos, |
|--|
| destacados por círculos vermelhos, montados sobre a embarcação utilizada nos |
| testes em modelo físico reduzido69 |
| Figura 5.10 – Sistema desenvolvido e sistema Qualisys® trabalhando em sincronismo durante |
| ensaio em modelo físico70 |
| Figura 6.1 – Deslocamentos translacionais medidos pelo sistema desenvolvido e pelo sistema |
| Qualisys® para a embarcação atracada sob ação de ondas regulares71 |
| Figura 6.2 – Registro gráfico comparativo dos deslocamentos translacionais medidos pelo |
| sistema desenvolvido e pelo sistema Qualisys® para a embarcação atracada sob |
| ação de ondas regulares72 |
| Figura 6.3 - Deslocamentos rotacionais medidos pelo sistema desenvolvido e pelo sistema |
| Qualisys® para a embarcação atracada sob ação de ondas regulares74 |
| Figura 6.4 - Registro gráfico comparativo dos deslocamentos rotacionais medidos pelo |
| sistema desenvolvido e pelo sistema Qualisys® para a embarcação atracada sob |
| ação de ondas regulares74 |
| Figura 6.5 - Deslocamentos translacionais medidos pelo sistema desenvolvido e pelo sistema |
| Qualisys® para a embarcação atracada sob ação de ondas irregulares77 |
| Figura 6.6 – Registro gráfico comparativo dos deslocamentos translacionais medidos pelo |
| sistema desenvolvido e pelo sistema Qualisys® para a embarcação atracada sob |
| ação de ondas irregulares77 |
| Figura 6.7 - Deslocamentos rotacionais medidos pelo sistema desenvolvido e pelo sistema |
| Qualisys® para a embarcação atracada sob ação de ondas irregulares |
| Figura 6.8 - Registro gráfico comparativo dos deslocamentos rotacionais medidos pelo |
| sistema desenvolvido e pelo sistema Qualisys® para a embarcação atracada sob |
| ação de ondas irregulares80 |
| |

LISTA DE TABELAS

| Tabela 2.1 | - Dimensões e características técnicas de diferentes tipos de defensas 1 | .0 |
|------------|---|-------------|
| Tabela 2.2 | - Recomendação de limites para os deslocamentos da embarcação atracada em | |
| | relação ao píer (Per Bruun, 1981) 1 | 6 |
| Tabela 2.3 | - Recomendação de limites para os deslocamentos da embarcação atracada em | |
| | relação ao píer (PIANC, 1995) 1 | 6 |
| Tabela 4.1 | - Características da câmera utilizada para captar as imagens do alvo marcador par | a |
| | o algoritmo de reconhecimento de padrões 4 | 0 |
| Tabela 4.2 | - Relação da distância entre a câmera e o alvo marcador e a sensibilidade do | |
| | sistema 4 | 3 |
| Tabela 4.3 | -Características dos sensores presentes no multi-sensor GY-80 4 | 6 |
| Tabela 4.4 | – Variação do erro MSE entre a excitação e a leitura do sistema em relação ao | |
| | valor coeficiente de complementação de fusão 5 | ;0 |
| Tabela 4.5 | - Especificações do servo motor gerador de deslocamentos rotacionais para | |
| | avaliação do sistema em ambiente controlado5 | ;5 |
| Tabela 4.6 | - Especificações do conjunto composto pelo motor de passo e o fuso de esferas | |
| | gerador de deslocamentos translacionais | ;7 |
| Tabela 4.7 | - Análise estatística dos deslocamentos senoidais aplicados sobre o sistema em ro |)]] |
| | e o erro comparativo RMAE | ;9 |
| Tabela 5.1 | - Restrições máximas das dimensões dos navios que podem operar no TPEC 6 | 50 |
| Tabela 5.2 | - Configuração dos cenários ensaiados no modelo físico reduzido 6 | 55 |
| Tabela 5.3 | - Características gerais do navio do tipo VLOC, com capacidade de carga de | |
| | 300.000°DWT utilizado nos testes em modelo físico reduzido | 6 |
| Tabela 6.1 | - Comparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema | |
| | Qualisys® para o deslocamento translacional em surge sob a ação de ondas | |
| | regulares7 | '2 |
| Tabela 6.2 | - Comparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema | |
| | Qualisys® para o deslocamento translacional em sway sob a ação de ondas | |
| | regulares 7 | '3 |
| Tabela 6.3 | - Comparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema | |
| | Qualisys® para o deslocamento translacional em heave sob a ação de ondas | |
| | regulares | '3 |

| Tabela 6.4 – M | létodos matemáticos de avaliação de semelhança das medições para |
|------------------------|---|
| des | locamentos translacionais para a embarcação atracada sob ação de ondas |
| reg | ulares73 |
| Tabela 6.5 - Co | omparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema |
| Qua | alisys® para o deslocamento rotacional em roll sob a ação de ondas regulares. |
| | |
| Tabela 6.6 - Co | omparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema |
| Qua | alisys® para o deslocamento rotacional em pitch sob a ação de ondas regulares. |
| | |
| Tabela 6.7 - Co | omparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema |
| Qua | alisys® para o deslocamento rotacional em yaw sob a ação de ondas regulares. |
| | |
| Tabela 6.8 - M | étodos matemáticos de avaliação de semelhança das medições para |
| des | locamentos rotacionais para a embarcação atracada sob ação de ondas |
| reg | ulares76 |
| Tabela 6.9 - Co | omparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema |
| Qua | alisys® para o deslocamento translacional em surge sob a ação de ondas |
| irre | gulares78 |
| Tabela 6.10 - 0 | Comparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema |
| Qua | alisys® para o deslocamento translacional em sway sob a ação de ondas |
| irre | gulares |
| Tabela 6.11 - 0 | Comparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema |
| Qua | alisys® para o deslocamento translacional em heave sob a ação de ondas |
| irre | gulares |
| Tabela 6.12 – I | Métodos matemáticos de avaliação de semelhança das medições para |
| des | locamentos translacionais para a embarcação atracada sob ação de ondas |
| irre | gulares79 |
| Tabela 6.13 - 0 | Comparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema |
| Qua | alisys® para o deslocamento rotacional em roll sob a ação de ondas irregulares. |
| | |
| Tabela 6.14 - (| Comparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema |
| Qua | alisys® para o deslocamento rotacional em pitch sob a ação de ondas |
| irre | gulares |

| Tabela 6.15 - Comparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema | |
|--|----------|
| Qualisys [®] para o deslocamento rotacional em yaw sob a ação de ondas | |
| irregulares | L |
| Tabela 6.16 - Métodos matemáticos de avaliação de semelhança das medições para | |
| deslocamentos rotacionais para a embarcação atracada sob ação de ondas | |
| irregulares | L |
| Tabela 6.17 – Síntese dos métodos matemáticos de avaliação de semelhança das medições | |
| para deslocamentos translacionais e rotacionais para a embarcação atracada sob | |
| ação de ondas regulares e irregulares82 | <u>)</u> |
| Tabela 8.1 – Classificação da qualidade dos resultados do modelo, segundo os valores e | |
| RMAE | 3 |

SUMÁRIO

| 1 | I | NTRODUÇÃO | 1 |
|------|--------|--|---|
| 1.1 | С | ontextualização do problema | 1 |
| 1.2 | 0 | bjetivo | 4 |
| 1.3 | Jı | ustificativa | 4 |
| 1.4 | 0 | rganização do texto | 5 |
| 2 | F | UNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 6 |
| 2.1 | С | lassificação dos tipos de portos | 6 |
| 2.2 | Ε | struturas de acostagem | 6 |
| | 2.2.1 | Ação das embarcações nas obras de acostagem | 8 |
| 2.3 | D | eslocamentos fundamentais de embarcações livres1 | 3 |
| | 2.3.1 | Critérios de deslocamentos recomendados1 | 5 |
| 2.4 | Т | eoria Linear de Ondas de Gravidade1 | 6 |
| 2.5 | Ν | Iodelo Físico em escala reduzida2 | 2 |
| | 2.5.1 | Princípios da Teoria da Semelhança2 | 2 |
| | 2.5.2 | Fatores de Escala para a Semelhança de Froude2 | 4 |
| 2.6 | Ν | Iodelagem Física do Ambiente Costeiro2 | 5 |
| 3 | S | ISTEMA DE MEDIÇÕES DE DESLOCAMENTOS EM MODELOS | |
| FÍSI | ICOS E | EM ESCALA REDUZIDA2 | 7 |
| 3.1 | Т | écnicas de Medições de Deslocamentos via Uso de Imagens2 | 7 |
| | 3.1.1 | Reconhecimento de Padrões (Pattern Match)2 | 8 |
| | 3.1.2 | Reconhecimento de Geometrias (Geometric Match)2 | 9 |
| | 3.1.3 | Sistemas Comerciais de Captura de Deslocamentos via Uso de Imagens | 0 |
| 3.2 | S | ensores inerciais3 | 4 |
| 4 | D | ESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DE | |
| DES | SLOCA | MENTOS | 6 |
| 4.1 | С | aracterísticas Gerais do Sistema3 | 6 |
| 4.2 | Μ | Iedição de Deslocamentos via Análise de Imagens | 8 |
| | 4.2.1 | Alvo Marcador | 8 |
| | 4.2.2 | Vídeo Câmera | 9 |
| | 4.2.3 | Sensibilidade do Sistema de captura de deslocamentos via Análise de Imagens4 | 1 |
| 4.3 | Μ | Iedição de Deslocamentos por Sensores Inerciais4 | 5 |
| | 4.3.1 | Giroscópio e Acelerômetro4 | 5 |

| | 4.3.2 | Transformações Geométricas no Espaço 50 | | | | | |
|-----|---|---|--|--|--|--|--|
| 4.4 | P | cograma Computacional (Software) | | | | | |
| 4.5 | T | estes do Sistema de Medição de Deslocamentos em Ambiente Controlado 54 | | | | | |
| | 4.5.1 | Resultados dos Testes do Sistema em Ambiente Controlado 57 | | | | | |
| 5 | E | STUDO DE CASO 60 | | | | | |
| 5.1 | D | escrição do Terminal Portuário 60 | | | | | |
| 5.2 | D | escrição do modelo físico reduzido61 | | | | | |
| 5.3 | С | enários de Ondas Utilizados para o Teste do Sistema em Modelo Físico 64 | | | | | |
| 5.4 | E | mbarcação Utilizada para o Teste do Sistema em Modelo Físico | | | | | |
| 5.5 | P | ano de Amarração da Embarcação Utilizada para o Teste do Sistema em | | | | | |
| | Μ | odelo Físico | | | | | |
| 5.6 | C | omparação com Outro Sistema de Medição de Deslocamentos | | | | | |
| 6 | R | ESULTADOS | | | | | |
| 6.1 | Embarcação Atracada sob Ação de Ondas Regulares | | | | | | |
| | 6.1.1 | Deslocamentos Translacionais para Embarcação Atracada sob Ação de Ondas | | | | | |
| | | Regulares | | | | | |
| | 6.1.2 | Deslocamentos Rotacionais para Embarcação Atracada sob Ação de Ondas | | | | | |
| | | Regulares | | | | | |
| 6.2 | E | mbarcação Atracada sob Ação de Ondas Irregulares | | | | | |
| | 6.2.1 | Deslocamentos Translacionais para Embarcação Atracada sob Ação de Ondas | | | | | |
| | | Irregulares | | | | | |
| | 6.2.2 | Deslocamentos Rotacionais para Embarcação Atracada sob Ação de Ondas | | | | | |
| | | Irregulares | | | | | |
| 6.3 | R | esultados da Comparação com outro Sistema de Medição de Deslocamentos | | | | | |
| | ••• | | | | | | |
| 7 | С | ONCLUSÕES | | | | | |
| 8 | R | EFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 86 | | | | | |
| APÊ | ÈNDICI | E A - Índices Estatísticos | | | | | |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do problema

O transporte marítimo é o principal meio de transporte de cargas do comércio internacional. Em 2012, cerca de 80% do comércio mundial em volume e mais de 70% em termos de valor, foi transportado por mar e distribuído pelos portos e economias de todo o mundo (UNCTAD, 2012). Para suprir essa enorme demanda, os navios estão sempre em evolução e, cada vez mais econômicos, mais seguros e, claro, com maiores capacidades de transportar cargas.

O aumento no volume de transporte de mercadorias impulsionou o tamanho dos navios cargueiros. Segundo (ITF, 2015), a capacidade média dos navios porta-contêineres recémconstruídos oscilava em torno de aproximadamente 3400 TEU's (*Twenty-foot Equivalent Unit*) entre 2001 e 2008, 5800 TEU's entre 2009 e 2013, atingindo aproximadamente 8000 TEU's em 2015.

Com o aumento das dimensões das embarcações, os portos necessitaram readequar seus espaços náuticos e, dois fatores são importantes para determinar qual a capacidade dos navios que poderão atracar em um determinado porto: a profundidade das vias de acesso e atracação e, o aspecto e manutenção da bacia de evolução.

Para suprir a necessidade de ampliação dos espaços náuticos, os novos portos, bem como eventuais expansões de portos existentes, procuram regiões mais profundas e largas. A consequência disso é o deslocamento dos portos, geralmente, na direção do mar, onde o abrigo das ações ambientais é menor, ou, em alguns casos, inexistente.

A construção de terminais portuários em áreas não abrigadas deixa as embarcações vulneráveis as ações ambientais, principalmente as embarcações atracadas ao píer. Para garantir a segurança das embarcações atracadas nos terminais portuários, é fundamental estudar os esforços sobre as linhas de amarração e os deslocamentos da embarcação em relação ao píer durante o processo de movimentação de cargas. Esses estudos sobre a resposta das embarcações em um terminal portuário sob a ações ambientais, tornam-se tema cada vez mais importantes e necessários para que os projetos de engenharia portuária possam ser otimizados, levando a soluções seguras e, ao mesmo tempo, viáveis do ponto de vista ambiental e econômico.

Os testes experimentais com uso de modelos físicos em escala reduzida surgem como uma das ferramentas mais importantes na Engenharia para representar o ambiente náutico portuário e sua interação com as condições ambientais, permitindo a simulação de cenários de navios amarrados em berços de atracação e o monitoramento de seus deslocamentos quando submetidos a ações ambientais ou passagem de outros navios.

Os deslocamentos das embarcações atracadas em relação ao píer, que é o foco do presente trabalho, quando excedidos durante os procedimentos de movimentação de carga, tem implicações tanto na segurança, quanto na eficiência das operações portuárias, sendo um importante condicionante dos projetos portuários. A PIANC (*Permanent International Association of Navigation Congresses*), organização mundial que fornece orientação e assessoria técnica relativas à infraestrutura de transporte marítimo, possui uma série de recomendações para os deslocamentos das embarcações. Os limites recomendados para cada deslocamento variam de acordo com o tipo de embarcação e o tipo de equipamento de carregamento (PIANC, 1995).

Os sistemas de monitoramento de deslocamentos de embarcações em modelos físicos reduzidos devem ser capazes de medir com precisão satisfatória os deslocamentos nos seis graus de liberdade, tarefa dificultada, em geral, pela redução geométrica presente nos modelos físicos.

Tradicionalmente, a medição de deslocamentos de embarcações em modelos físicos reduzidos é realizada com sistemas potenciométricos acoplados à embarcação, ou, com o uso de acelerômetros e giroscópios (ITTC, 1999). (Briggs & Melito, 2008) apresenta um exemplo de um sistema de monitoramento de deslocamentos que utiliza acelerômetros e giroscópios.

Segundo o *International Towing Tank Conference* (ITTC I. T., 2008), a abordagem tradicional para monitoramento dos deslocamentos das embarcações em modelos reduzidos tem sido substituída pelo uso de um sistema de medição que utiliza a captura e análise de imagens de vídeo. (Kieviet, 2015) apresenta um sistema deste tipo, que analisa a sequência de imagens de vídeo de um objeto tridimensional de dimensões conhecidas, posicionado sobre o convés da embarcação. (Benetazzo, 2011) apresenta um sistema similar, porém, utiliza um alvo marcador quadriculado sobre o convés, ao invés do objeto tridimensional.

Atualmente, esse tipo de medição de deslocamentos tornou-se muito utilizado em Laboratórios de Hidráulica, devido ao fato de ser uma técnica de medição não intrusiva, evitando o contato dos equipamentos de instrumentação com a água e, também, a interferência do equipamento sobre a embarcação.

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de monitoramento dos deslocamentos (6 graus de liberdade) para modelos físicos em escala reduzida de embarcações atracadas em terminais portuários sujeitos à ação de ondas. O sistema desenvolvido combina medições via algoritmo de reconhecimento de padrões por imagens com

medições via a utilização de sensores inerciais e será implementado em um modelo físico de um terminal portuário no Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LHEPUSP) utilizado para estudos das linhas de amarração de embarcações atracadas sob condicionantes ambientais.

1.2 Objetivo

O objetivo desse trabalho é desenvolver um sistema de monitoramento de deslocamentos para modelos físicos em escala reduzida de embarcações, de tal forma a permitir a avaliação da condição de segurança, bem como da eficiência, das operações de movimentação de carga durante o período em que as embarcações estão atracadas em terminais portuários, sujeitas a diferentes ações ambientais e outras solicitações decorrentes das próprias operações do porto.

1.3 Justificativa

Para atender a grande demanda de transporte marítimo de carga, além da necessidade de embarcações maiores, o processo de movimentação de carga no píer deve ser seguro e interrupto. A interrupção desse processo implica em um maior tempo da embarcação atracada, resultando em atrasos no transporte e na ocupação desnecessária do píer de atracação, interferindo na logística de diversos setores do terminal. Isso ocorre, em sua maioria, por dois fatores que atentam contra a segurança do terminal: o rompimento dos cabos de amarração ou a excedência dos deslocamentos da embarcação em relação ao píer.

Para garantir a segurança do terminal e evitar interrupções no processo de movimentação de cargas, o estudo comportamental de embarcações atracadas é de suma importância pois, dessa forma, é possível estabelecer previamente a melhor configuração de atracação para a embarcação suportar as condições mais adversas, sem riscos à segurança do terminal.

Os ensaios experimentais em modelos físicos reduzidos constituem-se em uma ferramenta consagrada para estudos de comportamentos no mar, capaz de fornecer a modelação correta do comportamento náutico, num complexo contorno geométrico e hidrodinâmico (Bernardino, 2015). Diante disso, é indicado a utilização desse tipo de ferramenta para estudos comportamentais de embarcações atracadas em um terminal, avaliando modos e configurações de amarração da embarcação que evitem rompimentos de cabos e elevados deslocamentos.

O desenvolvimento do sistema de monitoramento de deslocamentos de modelos reduzidos de navios atracados permite realizar um estudo detalhado, em modelo físico reduzido, dos deslocamentos da embarcação atracada e, a partir dos resultados, selecionar o plano de amarração mais seguro para o terminal. Desta maneira, as medições dos deslocamentos em modelo físico auxiliam a escolha de planos de amarração não suscetíveis à deslocamentos

excessivos e, consequentemente, aumentam a segurança do terminal e evitam interrupções no carregamento das embarcações atracadas.

1.4 Organização do texto

O presente trabalho foi organizado da seguinte forma:

- Capítulo 2 exibe os fundamentos teóricos utilizados no desenvolvimento do trabalho, apresentando conceitos básicos sobre portos e as estruturas presentes em um terminal portuário. Também são apresentados conceitos sobre embarcações atracadas e as condições de ondas as quais são submetidas. Por fim, são apresentados conceitos sobre modelagem física em escala reduzida;
- Capítulo 3 discute fundamentos de medições de deslocamentos através de dois métodos: algoritmo de reconhecimento de padrões em imagens e através do uso de sensores inerciais;
- Capítulo 4 apresenta os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do trabalho, demonstrando a fabricação, calibração e implementação de todos os componentes do sistema desenvolvido. Também é apresentando o desenvolvimento do software de captura do sistema.;
- Capítulo 5 apresenta o estudo de caso utilizado para a verificação do sistema.
 Para avaliação do sistema desenvolvido, sua implementação foi testada em um modelo físico reduzido de um terminal portuária e seus resultados comparados a outro sistema de medição de deslocamentos;
- Capítulo 6 descreve e discute os resultados obtidos pelo sistema desenvolvido, comparando-os aos resultados decorrentes de outro sistema de medição de deslocamentos utilizado simultaneamente;
- Capítulo 7 discute os resultados obtidos e faz conclusões sobre o desenvolvimento do trabalho;
- Capítulo 8 apresenta as referências utilizadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Classificação dos tipos de portos

De acordo com a Lei n° 12.815, de 5 de junho de 2013, um porto organizado é definido como um bem público construído e aparelhado para atender a necessidades de navegação, de movimentação de passageiros ou de movimentação e armazenagem de mercadorias, e cujo tráfego e operações portuárias estejam sob jurisdição de autoridade portuária.

Para (Alfredini & Arasaki, 2014) o conceito de porto é ligado à cinco fatores:

 Condições adequadas de abrigo contra ações ambientais como correntes marítimas, ondas e ventos. A condição é fundamental para garantir segurança durante a operação portuária, reduzindo os esforços de atracação e o deslocamento da embarcação;

• Profundidade e acessibilidade no canal de acesso, bacias portuárias e nos berços de acostagem;

• Retroporto: área terrestre suficiente para garantir adequada movimentação de cargas e passageiros;

• Comunicações com outros modos de transporte para prover o transporte eficiente de carga ou passageiros ao porto, possibilitando a comunicação entre meios de transporte marítimo, terrestre e ferroviário.

• Impacto ambiental: Para obter a licença para construção e operação de um porto, é necessário um estudo de impacto ambiental multidisciplinar aprovado pelas agências de controle do meio ambiente governamentais, devido ao impacto que essas obras têm no meio ambiente.

Em resumo, o porto pode ser definido como uma área de água protegida, que deve prover segurança e alojamento adequado (Thoresen, 2014).

Atendendo esses conceitos, os portos podem ser classificados como naturais, artificiais ou seminaturais, e possuem diferentes funções, tais como comerciais (pública ou privada), granéis sólidos ou líquidos, containers, pesqueiros, militares, entre outras.

2.2 Estruturas de acostagem

Inseridas nas estruturas portuárias, as estruturas de acostagem e de amarração são obras maciças que possibilitam a aproximação e fixação dos navios em terra, criando condições de segurança indispensáveis para as operações portuárias. São recomendáveis estruturas esbeltas devido aos elevados esforços estruturais advindos do impacto das embarcações, esforços de amarração das embarcações atracadas e de sustentar cargas concentradas em virtude dos equipamentos de movimentação de carga.

Obra de acostagem, de acordo com a Norma Técnica (ABNT, 1994), é configurada como:

Estrutura construída no mar, em cursos d'água ou lagos, destinada à amarração e/ou atracação de embarcações para fins de operação de carga e/ou descarga de mercadorias ou embarque e/ou desembarque de pessoas, veículos rodoviários e ferroviários.

Segundo (Alfredini & Arasaki, 2014), as obras de acostagem podem ser classificados, em termos de sua estrutura, em estrutura continua ou em elementos discretos.

Obras de acostagem contínuas (Figura 2.1) apresentam as funções de acesso, suporte de equipamentos, atracação e amarração das embarcações estão integradas em uma plataforma principal. Esse tipo de estrutura normalmente utiliza-se de equipamentos de movimentação de carga deslizantes.

Figura 2.1 – Porto de Imbituba-SC apresenta um exemplo de obra contínua de acostagem com equipamento de movimentação de carga deslizante



Fonte: Revista Modal, 2017.

Obras em estruturas discretas apresentam elementos distintos que possuem funções específicas de acostagem. Esse tipo de obra apresenta maior segurança em comparação à estrutura contínua, pois os danos ficam localizados em determinados elementos. Também

reduzem a envergadura das obras por permitirem uma construção em etapas. Este tipo de solução é mais usual para navios petroleiros ou graneleiros (Figura 2.2).

Figura 2.2 – Terminal Ponta da Madeira apresenta obra em estruturas discretas de acostagem para amarração e movimentação de carga em um navio graneleiro.



Fonte: Revista Maranhão Hoje, 2019.

2.2.1 Ação das embarcações nas obras de acostagem

No projeto de obras portuárias é fundamental o conhecimento quanto às ações das embarcações sobre as estruturas acostáveis, correspondentes aos esforços transmitidos às estruturas na atracação e na amarração.

Na atracação, a energia cinética da embarcação é transmitida para a estruturas e defensas, deformando-as. E na amarração, com a embarcação já atracada, os esforços são transmitidos pelos cabos para os elementos de fixação, essas forças são provenientes dos ventos, ondas e correntes que atingem o navio.

2.2.1.1 Defensas

As defensas são estruturas localizadas na área de interação entre a embarcação e a estrutura de acostagem no intuito de absorver a energia cinética da movimentação da embarcação, protegendo ambos de danos estruturais.

(Alfredini & Arasaki, 2014) definem que um sistema de defensas deve ter como requisitos:

• Capacidade de absorção da energia transmitida pelas embarcações, mantendo a força na estrutura nos limites capazes de serem suportados;

 Não causar danos aos cascos das embarcações. As pressões máximas admissíveis nos cascos dos navios são da ordem de 20 a 40 tf/m²;

• Impedir o contato direto dos navios com as partes desprotegidas da obra;

• Boa capacidade de absorção de esforços localizados aplicados sobre pequeno número de elementos protetores, principalmente na manobra de atracação.

Existem diversos tipos de defensas, com diferentes materiais como madeira, metal, borracha e outros, e diferentes formas como cilíndricas, em arco (Tipo V), modular (Tipo PI), de rodas, cônica, cilíndrica axial, pneumática e de espuma. O tipo de defensa difere de acordo com o fabricante e com a capacidade de absorção de energia.

(Silva, 2014) descreve a equação (1) para calcular a energia que a defensa necessita absorver.

$$E_{\rm d} = \frac{1}{2} M v^2 C_e C_m C_s C_c \tag{1}$$

Na qual:

• E_d : Energia de projeto (em condições normais) a ser absorvida pelo sistema de defensas (kNm);

- M: Massa do navio de projeto (toneladas);
- v: Componente normal ao cais da velocidade de aproximação do navio (m/s);
- C_e : Fator de excentricidade;
- C_m : Coeficiente de massa virtual;
- C_s : Coeficiente de rigidez do casco do navio;
- C_c : Fator de configuração do posto de acostagem;

A capacidade de absorção de energia da defensa é representada pela curva força de reação e absorção de energia pela deflexão da defensa (Figura 2.3).



Figura 2.3 – Exemplo de curva da carga absorvida pela defensa em relação a sua deflexão. O gráfico também representa a energia absorvida pela defensa (Modelo Bridgestone SUC2000H R0).

Fonte: Bridgestone – Marine Fender Catalogue

Para exemplificar os diferentes tipos de defensas, a Tabela 2.1 apresenta um quadro comparativo de diferentes tipos de defensas.

| Tipo de Defensa | Aspecto | Dimensões mm | Energia Absorvida kN.n/m | Força de Reacção kN | Deflexão máxima % | Curva de Deformação |
|---|---------|---|--------------------------------|---------------------------|----------------------|------------------------|
| Arco (ou V) | A | W - 500 - 1800 w - 200 - 800 H - 250 - 1000 C - 178 - 610 L - 1000 - 3500 | 8,7 - 363 | 129 - 516 | 55 | \bigcirc |
| Célula | | D – 650 - 3350 H – 400 - 3000 | 9,0 - 9327 | 50 - 8099 | 55 | \bigcirc |
| Cilíndricas | | D – 100 - 2700 d – 50 - 1300 L – Até 20 metros | 0,8 - 818 | 43 - 1486 | 50 | |
| Cónica | | D – 500 - 3090 d – 262 - 2750 H – 300 - 2000 | 9 - 5221 | 55 - 5000 | 72,5 | \bigcirc |
| Donut | - | D – 1270 - 4220 H – Definido pelo Cliente | 7,2-81,3 | 116 – 389 | 60 | |
| Elementos | | H – 250 - 1600 B – 158 - 1002 C – 80 - 507 L - 1000 | 8,7 - 609 | 79 - 823 | 60 | |
| Espuma (O. Cushion) | | D – 1000 - 4200 L – 2000 - 8400 | 65 - 11710 | 298 - 12826 | 65 | |
| Espuma (O. Guard) | \sim | D – 700 - 3300 L – 1500 - 6000 | 26 - 6295 | 133 - 7010 | 65 | |
| Pneumática | | D – 300 - 4500 L – 500 - 10500 | 1,3 - 6357 | 22,6 - 7544 | 65 | |
| Nota (1) - Defensas produzidas pela empresa Fender Team AG, Hamburgo, Alemanha. | | | | | | |

Tabela 2.1 - Dimensões e características técnicas de diferentes tipos de defensas

Fonte: ctborracha.com (2019)

2.2.1.2 Cabos de amarração

A função dos cabos e sistemas de amarração é a de manter a embarcação atracada com segurança no berço, de forma a permitir uma operação de movimentação de carga dentro dos limites operacionais toleráveis (Esferra, 2019). Os cabos de amarração são comumente fornecidos pela embarcação aos portos, desse modo a manutenção dos cabos é responsabilidade do navio que chega ao porto.

Figura 2.4 – Plano de amarração típico para terminais portuários e a denominação de cada cabo de amarração de acordo com sua função



Fonte: Autor

A Figura 2.4 demonstra um tipo comum de plano de amarração para uma embarcação atracada, os cabos utilizados, dependendo da sua função, recebem nomenclatura diferente. Existem 3 tipos de cabos em um plano de amarração:

• Lançantes (de vante e de ré): são cabos longos e longitudinais à embarcação, destinados a resistir aos esforços longitudinais ao navio;

• Travesses (de vante e de ré): são cabos de comprimento intermediário, destinados a resistir aos esforços transversais ao navio;

• Espringues (de restrição à vante e à ré): são cabos curtos longitudinais, também destinados a resistir aos esforços longitudinais ao navio.

Cabos de amarração são confeccionados por cordão trançados e podem ser feitos de fibras naturais vegetais, fibras sintéticas ou arames de aço. E têm como principais características a elasticidade, extensibilidade e rigidez.

2.2.1.3 Cabeços de amarração e ganchos de desengate rápido

A fixação dos cabos de amarração na estrutura de acostagem pode ser feito por cabeços (Figura 2.5) ou ganchos de desengate rápido (Figura 2.6). Os ganchos de desengate rápido são mais utilizados em terminais portuários de grande porte pois apresentam um sistema que libera imediatamente os cabos apenas por ação de uma alavanca, tornando a ação muito mais segura em casos de emergência.

Figura 2.5 – Exemplo de cabeços de amarração utilizados para fixar os cabos de amarração na estrutura de acostagem



Fonte: UK P&I, 2006

Figura 2.6 - Exemplo de ganchos de desengate rápido utilizados para fixar os cabos de amarração na estrutura de acostagem



Fonte: Suprabakti, 2019

2.3 Deslocamentos fundamentais de embarcações livres

As embarcações livres possuem 6 graus de liberdade (Figura 2.7), estes são divididos em 3 deslocamentos translacionais e 3 deslocamentos rotacionais e são definidos por¹:

- Translações:
 - Surge ou Deslocamento: na direção x longitudinal, positiva para proa;
 - Sway ou Abatimento: na direção y lateral, positiva para o lado de bombordo;
 - Heave ou Arfagem: na direção z vertical, positiva para cima.
 - Rotações:
 - Roll ou Balanço: sobre o eixo x, giro positivo para direita;
 - Pitch ou Caturro: sobre o eixo y, giro positivo para a direita;
 - Yaw ou Cabeceio: sobre o eixo z, virada para direita positiva.



Figura 2.7 - Seis graus de liberdade de movimentação de uma embarcação livre

Fonte: Autor

Quando a embarcação está amarrada junto ao píer, a magnitude dos seus deslocamentos é de extrema importância para o sistema de amarração e atracação (Swiegers, 2011). A Figura 2.8 apresenta uma relação entre a eficiência das atividades de carga e descarga em função do deslocamento da embarcação em relação ao píer. Essa relação é válida para os seis graus de liberdade da embarcação.

¹ O presente trabalho utilizará a nomenclatura em inglês para se referir aos movimentos: *surge, sway, heave, roll, pitch* e *yaw*, por ser mais usual no meio técnico, inclusive no Brasil

Figura 2.8 – Relação entre eficiência do processo de carregamento/descarregamento e o deslocamento da embarcação em relação ao píer.



Fonte: PIANC (1995)

A Figura 2.8 demonstra que o deslocamento da embarcação afeta a eficiência do processo de carregamento/descarregamento de quatro modos (PIANC, 1995):

- Quando os deslocamentos da embarcação são pequenos, a produtividade logística do carregamento praticamente não é afetada (A e B);
- Deslocamentos intermediários causam condições de carregamentos desconfortáveis, fazendo com que exista uma menor eficiência do carregamento (B e C);
- Se os deslocamentos da embarcação se tornam grandes, o carregamento do navio é interrompido, devido às dificuldades operacionais e na justificativa de evitar acidentes e/ou avarias (C e D);
- 4. Na ocorrência de deslocamentos muito grandes é aconselhado que o navio seja desatracado do berço, a fim de evitar o rompimento das linhas de amarração, colisões com outras embarcações e estruturas portuárias (D em diante).

A Figura 2.8 é de simples interpretação para deslocamentos provocados por condicionantes ambientais ou operacionais, uma vez que os passos C e D podem ser desencadeados por ondas, ventos, correntes de maré ou pela própria operação portuária.

Os elementos de amarração, descritos no item 2.2.1, podem restringir efetivamente os movimentos de *surge*, *sway* e *yaw*, que são os deslocamentos atuantes no plano horizontal. Por

esse motivo, o estudo e projeto de um plano de amarração eficiente é extremamente necessário para segurança do processo portuário.

2.3.1 Critérios de deslocamentos recomendados

Diversos autores propõem limites aceitáveis para cada um dos deslocamentos em relação ao píer de uma embarcação atracada. Entretanto, ainda não há um conjunto de critérios amplamente aceito e aplicável para todos os casos, pois esses critérios dependem de um conjunto complexo de fatores (ASCE,2014), incluindo:

- O tamanho da embarcação;
- Se a embarcação está carregada ou não;
- Tipo de carga e equipamento de movimentação de carga;
- Habilidade do operador;
- A frequência das ondas;

• A natureza do sistema de ancoragem ao lado da terra (por exemplo, pilares fixos com ganchos de liberação rápida);

- O tipo de guincho de amarração utilizado a bordo da embarcação;
- Opinião local e tradições de tolerância.

Com exceção de certos tipos de especialidade de embarcações, como petroleiros (onde os movimentos podem ser limitados pela quantidade de articulação possível nos braços de carga), os limites propostos, geralmente, não representam os limites superiores absolutos acima do qual a operação adicional se torna impossível.

Uma das fontes mais citadas para as limitações de deslocamentos de embarcações em relação ao píer é (Bruun, 1981). O texto recomenda que os deslocamentos não excedam valores conforme mostrado na Tabela 2.2.

| Navio Tipo | Surge (m) | Sway (m) | Heave (m) | Roll (°) | Yaw (°) | |
|--------------|-----------|----------|-----------|----------|---------|--|
| Navio-Tanque | 2,5 | 2,0 | 1,5 | 4,0 | 2,0 | |
| Mineraleiro | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 4,0 | 2,0 | |
| Graneleiro | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,0 | 1,0 | |
| Cargueiro | 1,0 | 0,5 | 0,5 | 3,0 | 2,0 | |

Tabela 2.2 - Recomendação de limites para os deslocamentos da embarcação atracada em relação ao píer (Per Bruun, 1981)

Fonte: Per Bruun (1981)

A (PIANC, 1995) é outro exemplo de material muito utilizado para limitações de deslocamentos de embarcações em relação ao píer e, recomenda que os deslocamentos não excedam valores conforme mostrado na (Tabela 2.3)

Tabela 2.3 – Recomendação de limites para os deslocamentos da embarcação atracada em relação ao píer (PIANC, 1995)

| Navio Tipo | Equipamento de Carga | Surge | Sway | Heave (m) | Yaw | Pitch | Roll |
|-------------------------------|-----------------------------------|-------|------|--------------|-----|-------|------|
| Pesqueiro | Guindaste monta-cargas | 0,2 | 0,2 | - | - | - | - |
| | Carga/descarga 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 |
| Balsas, Ro-Ro | Rampa lateral ² | 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 |
| Cargueiro | 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 | 3,03 | 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)

2.4 Teoria Linear de Ondas de Gravidade

As estruturas marítimas estão submetidas a forças produzidas por ondas que são formadas, principalmente, pela ação dos ventos sobre a superfície do oceano, chamadas ondas

de gravidade. Esse tipo de onda tem a gravidade como principal força atuante restaura o estado de equilíbrio em repouso da superfície da água. Na natureza, essas ondas possuem períodos de 1 a 30 segundos e normalmente são as ondas mais importantes para os estudos de hidráulica marítima e de grandes lagos.

O estudo do comportamento dinâmico de estruturas flutuantes em ondas requer, como ponto de partida, a modelação da excitação causada por uma determinada situação ou estado de mar.

2.4.1.1 Ondas Monocromáticas ou Regulares

Para representar a aleatoriedade das ondas, a solução é uma modelagem estatística das ondas do mar composta por sobreposições de ondas de oscilação mais simples, as ondas monocromáticas ou regulares.





Fonte: Autor

A onda regular, como a onda apresentada na Figura 2.9, se caracteriza por sua amplitude A, pelo seu comprimento L e seu período de oscilação T e, a partir destes parâmetros básicos, podemos definir outras propriedades das ondas regulares:

• Frequência angular da onda (ω):

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \tag{2}$$

• Número de onda (k):

$$k = \frac{2\pi}{L} \tag{3}$$

 A velocidade de propagação (c) da onda definida como a velocidade de movimento de suas cristas e cavas:

$$c = \frac{L}{T} \tag{4}$$

• A altura de onda definida pela altura entre a crista e a cava da onda (H):

$$H = 2A \tag{5}$$

Conforme (Journée & Massie, 2001), as ondas são frequentemente classificadas de acordo com a profundidade relativa $\binom{h}{L}$, onde h é a profundidade da onda no ponto determinado:

- Águas profundas para $h/L \ge 0.5$;
- Águas intermediárias para $0,04 < \frac{h}{L} < 0,5;$
- Águas rasas para $h/L \leq 0,04$.

Essa classificação é importante pois as equações utilizadas para representar as ondas variam para as 3 diferentes condições.

2.4.1.2 Ondas Naturais ou Irregulares

As ondas naturais no mar compreendem um espectro de períodos, rumos e alturas de ondas. (Journée & Massie, 2001) demonstram que é possível representar a superfície do mar usando uma superposição linear de ondas regulares, descritas no capítulo 2.4.1.1. e, para obter um registro realista de ondas irregulares unidirecionais, uma superposição deve ter 15 ou 20 componentes sobrepostas.

A Figura 2.10 demonstra o registro de uma onda irregular formada pela superposição de 2 ondas regulares unidirecionais.


Figura 2.10 – Superposição de duas ondas regulares unidirecionais distintas (c₁ e c₂) formando uma onda irregular

Fonte: Journée e Massie (2001)

2.4.1.3 Parâmetros estatísticos das ondas

A análise de ondas irregulares, devido a sua aleatoriedade, é realizada de maneira estatística. A Figura 2.11 apresenta uma parte de um histórico de uma onda irregular e, quando há esse registro do comportamento da onda, uma análise estatística pode caracterizar esse registro. A duração desse registro deve ser pelo menos 100 vezes a onda de mais longo período, para obter informações estatísticas confiáveis (HUGHES, 2005). No caso da Figura 2.11, para caracterizar as alturas de onda, é utilizado o método de cruzamento conhecido por *up crossing*, onde a altura é definida da crista anterior ao cavado seguinte.

Figura 2.11. - Parte de um registro histórico simples de uma onda irregular no tempo, com destaque para as diferentes alturas de ondas



Fonte: Journée e Massie (2001)

De um modo bem simplificado, a altura média de ondas pode ser obtida com base em um histograma contendo as informações do número de ocorrências dentro de determinadas faixas de alturas de ondas. Um parâmetro importante normalmente empregado para a descrição de um determinado estado de mar é a chamada altura significativa de ondas (H_s) e é definida como a médias das ondas 1/3 maiores.

Em relação ao período das ondas irregulares, um parâmetro importante é chamado período de pico (T_p) . O T_p corresponde à frequência com maior densidade espectral e, consequentemente, representa as ondas mais energéticas.

Para avaliar a probabilidade de ocorrência de determina altura de onda, (Longuet-Higgins, 1963) mostrou que a distribuição das alturas de ondas segue a curva de distribuição de Rayleigh. Se a faixa de frequências em um estado de mar não for muito ampla, a probabilidade de que a amplitude *A* exceda um determinado valor *a* é dada por:

$$P\{A > a\} = \int_{a}^{\infty} f(A)dA = \frac{1}{\sigma^{2}} \int_{a}^{\infty} Ae^{-A^{2}/2\sigma^{2}} dA = e^{-A^{2}/2\sigma^{2}}$$
(6)

Sendo σ a média das alturas de onda

Muitas vezes é desejável fazer uma suposição estatisticamente baseada na onda mais alta que pode ser esperado em uma tempestade e um parâmetro normalmente empregado na análise da dinâmica de sistemas oceânicos no mar é a máxima altura de onda (H_{max}) esperada em um determinado estado de mar. (Journée & Massie, 2001) diz que H_{max} é escolhido, por convenção, como a altura da onda que será excedida (em média) uma vez em cada 1000 (tempestade) ondas num período de 3 horas.

2.4.1.4 O Espectro de JONSWAP

Entre 1968 e 1969 um extenso programa de monitoração de ondas, conhecido como JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*) foi conduzido no Mar do Norte ao longo de uma linha de 100 milhas com origem na ilha Sylt (costa noroeste da Alemanha). A análise dos dados desse programa de monitoração resultou na proposta de um formato de espectro para mares gerados em pistas limitadas (*fetch-limited*) ou costeiros. A (ITTC T. I., 1984) recomenda a seguinte definição do espectro de JONSWAP para mares com pista limitadas:

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{320.H_{1/3}^{2}}{T_{P}^{4}} \omega^{-5} . exp\left\{\frac{-1950}{T_{P}^{4}} \omega^{-4}\right\} . \gamma^{A}$$
(7)

Com:

$$\gamma = 3,3$$

$$A = exp\left\{-\left(\frac{\omega/\omega_P - 1}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2\right\}$$
(8)

Onde a constante σ assume diferentes valores dependendo de ω :

$$\sigma = 0.07 (se \ \omega < \omega_P)$$

$$\sigma = 0.09 (se \ \omega > \omega_P)$$

O parâmetro é γ conhecido como *peak enhancement factor*. O valor de $\gamma = 3,3$ sugerido pela (ITTC T. I., 1984). Atualmente, na grande maioria dos casos o espectro de JONSWAP é empregado com um ajuste variável para o valor do parâmetro γ .

2.5 Modelo Físico em escala reduzida

Modelos físicos de escala reduzida de ambientes náuticos portuários permitem, entre diversos outros possíveis testes, a simulação de cenários de navios amarrados em berços de atracação a ações ambientais ou passagem de outros navios.

Os ensaios em modelos reduzidos de planos de amarração têm como objetivo geral a verificação do comportamento dos navios atracados, medindo a solicitação de esforços nos cabos e os deslocamentos da embarcação em relação ao píer. Destes estudos, como resultado, espera-se avaliar o plano de amarração de maior eficiência, entendido como aquele que apresenta a maior segurança para manter o navio atracado empregando o menor número de cabos possível, sendo realizados os ensaios sob as condições mais críticas de corrente de maré e sob a condição de ondas.

2.5.1 Princípios da Teoria da Semelhança

Projetos de Engenharia necessitam da previsão do comportamento de um sistema a ser construído pelo homem, ou de um sistema natural com o qual ele vai interferir. No caso específico de obras na proximidade de mares ou rios, essa previsão se torna ainda mais difícil pois os fenômenos físicos são de maior complexidade.

Uma das técnicas mais conhecidas para análises parciais de problemas físicos é a análise dimensional. Esta técnica parte do princípio de que quando não se conhecem as formulações matemáticas teóricas que regem um fenômeno físico, o primeiro passo para investigação das leis que o governam é procurar estabelecer todas as variáveis independentes que interferem no processo.

Para simplificar o processo de investigação, a análise dimensional propõe a definição de um número suficiente de adimensionais, que são uma combinação das variáveis independentes que governam o fenômeno, de modo a reduzir a quantidade de experimentos necessários para investigação do mesmo.

Alguns métodos para determinação destas variáveis adimensionais independentes são amplamente discutidos na bibliografia técnica especializada. (Sharp, 1981) e (Novak & Cabelka, 1981) apresentam o método de Rayleigh e o método de Buckingham (também conhecido como Teorema "PI") para definição destes adimensionais.

A aplicação desta técnica tem uma ligação muito lógica com os estudos em modelo físico, especialmente os estudos hidráulicos de ambientes complexos, como os estuarinos ou costeiros. Nestes casos, ainda há outro fator complicador. Como os modelos físicos hidráulicos

são construídos em escala reduzida, existe a necessidade de se estabelecer uma relação entre as variáveis obtidas nas investigações experimentais em modelo, e os respectivos valores destas grandezas em escala real. Esta relação é chamada de fator de escala.

Segundo (Bernardino, 2015), a semelhança geométrica entre dois sistemas é obtida toda vez que as taxas entre todas as correspondentes dimensões lineares são constantes ao longo de todo espaço reproduzido. Garante-se assim a semelhança de forma. Por exemplo, comprimentos (L), profundidades de escoamento (h) ou larguras de seções de fluxo (B) medidas em modelo reduzido, tem que respeitar a seguinte relação (9):

$$\lambda_L = \frac{L_p}{L_m} = \frac{h_p}{h_m} = \frac{B_p}{B_m} \tag{9}$$

Onde:

- λ_L : Fator de escala geométrica;
- Subscrito "p": refere-se às grandezas em escala real;
- Subscrito "m": refere-se às grandezas de modelo.

A semelhança dinâmica, por sua vez, é obtida sempre que todas as componentes de forças que atuam em dois sistemas, medidas em pontos homólogos, possuem taxas constantes. (Lyu & Albertson, 1959) afirmam que no caso de escoamentos de fluidos reais, onde os efeitos de tensão superficial e compressão podem ser negligenciados, as principais forças agindo sobre os elementos fluidos são: força devido à pressão (FP), força devido à viscosidade (FV) e força devido à gravidade (g).

Em praticamente todos os estudos de escoamento em superfície livre, como o caso dos modelos aquaviários, as forças de inércia e as forças gravitacionais são as mais relevantes. Neste caso, um adimensional conhecido como número de Froude (Fr) (equação 10) se torna fundamental e deve ser mantido constante para que haja semelhança hidráulica entre modelo e ambiente real, considerando-se as forças de inércia e gravitacionais como as preponderantes, pois esse adimensional representa justamente essa relação:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g.L}} \tag{10}$$

Sendo:

• V: Velocidade (m/s);

g: aceleração da gravidade (m/s²);

• L: Comprimento (m).

Outro adimensional fundamental é o chamado número de Reynolds (equação 11) que relaciona as forças de inércia com as forças viscosas e de pressão, respectivamente.

$$Re = \frac{V.L.\rho}{\mu} \tag{11}$$

Sendo:

- *ρ*: Massa específica do fluido (kg/m³);
- μ: Viscosidade dinâmica do fluido (kg/ms);
- L: Comprimento (m);
- V: Velocidade (m/s).

2.5.2 Fatores de Escala para a Semelhança de Froude

Fatores de escala são relações matemáticas que permitem a conversão de valores de grandezas físicas obtidas por meio de ensaios em modelo físico, para os respectivos valores do meio real. Os fatores de escala das principais grandezas físicas podem ser obtidos como uma relação da escala geométrica (λ_L). Para o caso da Semelhança de Froude, isto pode ser feito utilizando o número de Froude. Assim, por exemplo, o fator de escala cinemático (λ_V) pode ser determinado da seguinte forma (12):

$$\left(\frac{V^2}{g.L}\right)_p = \left(\frac{V^2}{g.L}\right)_m \to \frac{V_p^2}{V_m^2} = \frac{L_p}{L_m} \to \lambda_V^2 = \lambda_L \to \lambda_V = \sqrt{\lambda_L}$$
(12)

Portanto, todas as velocidades medidas em modelo, terão que ser multiplicadas pela raiz quadrada da escala geométrica para determinação de seu valor real.

Analogamente, é possível determinar o fator de escala para qualquer outra grandeza física de interesse.

- Fator de escala de área: $\lambda_{AREA} = \lambda_L^2$
- Fator de escala de volume: $\lambda_{VOL} = \lambda_L^3$
- Fator de escala de vazão: $\lambda_0 = \lambda_L^{5/2}$
- Fator de escala de força: $\lambda_F = \lambda_L^3$

2.6 Modelagem Física do Ambiente Costeiro

Segundo (Bernardino, 2015), existem diferentes tipos de modelos físicos hidráulicos reduzidos que podem ser aplicados a estudos na região costeira e estuarina. Cada um destes modelos tem objetivos distintos, e esta extensa gama ocorre pela impossibilidade de atender a todos os objetivos com um único tipo de modelagem.

(Novak & Cabelka, 1981) apontam como possíveis objetivos dos estudos em modelo físico: investigação do efeito de marés, correntes e ondas na morfologia estuarina e costeira; processos de formação e migração de praias; estudos de proteção costeira; estudos de arranjos portuários; efeitos de intervenções de dragagens; entre outras.

No caso dos modelos para otimização de arranjo portuário, (Alfredini P., 1992) afirma que é possível estudar os seguintes aspectos:

- Abrigo de ondas e/ou correntes, intervindo na geometria de molhes, quebramares, espigões, canais de acesso, bacias, etc.
- Características dos berços, intervindo em sua orientação, tipo de estrutura, etc.
- Características de amarração e defensas, intervindo no arranjo dos cabeços, ou ganchos de desengate rápido, disposição e tipo das defensas, recomendações quanto ao número e tipo de cabos, bem como dos níveis de pré-tensões.

Os modelos físicos marítimos podem ser classificados de diversas formas. (HUGHES, 2005) propõe a classificação destes modelos em dois tipos: fundo fixo e fundo móvel. Os modelos de fundo fixo, também chamados pelo autor de modelos hidrodinâmicos, seriam aqueles utilizados para estudar a influência da ação de ondas e correntes sobre a região costeira ou portuária. Já os modelos com representação de fundo com material granular solto (modelos de fundo móvel) seriam utilizados para avaliar efeitos de movimentação de material sólido devido ao transporte e deposição de sedimentos junto à costa.

Outra classificação também bastante utilizada é aquela que separa os modelos marítimos em: modelos com sistema gerador de ondas de curto período e modelos com reprodução de ondas de longo período. Os modelos para ondas de curto período são utilizados para estudar efeitos de ondas formadas pelo vento local, denominadas vagas (*seas*), ou ventos distantes da costa, denominadas ondulações (*swell*), sobre projetos portuários, formações costeiras ou navegação.



Figura 2.12 - Modelo Físico Tridimensional com sistema gerador de ondas presente no LHEPUSP

Fonte: Jornal da USP, 2016

Modelos físicos tridimensionais (3D), também chamados de bacia de ondas (Figura 2.12), são modelos de maiores dimensões, que podem reproduzir todo o arranjo portuário, ou parte dele (tridimensional parcial), bem como as obras de abrigo, possuindo finalidades diversas como:

- Verificação de estabilidade e otimização de quebra-mares (especialmente o cabeço destas estruturas, para o qual o efeito tridimensional de ação das ondas é importante);
- Avaliação das ondas residuais dentro da zona portuária abrigada (devido aos efeitos de difração, refração e reflexão);
- Condições de amarração de navios atracados em terminais portuários sobre ação de ondas;
- Condições de estabilidade de embocaduras estuarinas ou entradas portuárias (no caso dos modelos com transporte de sedimentos); entre outras.

3 SISTEMA DE MEDIÇÕES DE DESLOCAMENTOS EM MODELOS FÍSICOS EM ESCALA REDUZIDA

As soluções para medir distâncias e áreas em modelos físicos em escala reduzida podem ser separados em dois tipos, métodos intrusivos e métodos não intrusivo. As medições intrusivas, que necessitam o contato com o objeto (corpo, modelo etc.), têm como exemplos réguas, paquímetros, micrometros, entre outros. Entretanto, em casos específicos, como o monitoramento de deslocamentos de embarcações em ambientes hidrodinâmicos, o uso desses instrumentos se torna inviável devido à imensa variabilidade dos deslocamentos, dificultando a sua fixação e medição, e para alguns tipos de material, podendo levá-los à corrosão.

Para medição não intrusivas, ou seja, que não apresentam contato com a embarcação, também apresenta diferentes soluções, como a reflexão a laser, apresentada em diversos trabalhos ((Klimkov, 1996), (Sviridov & Sterlyagov, 1994). O termo laser provém das iniciais em inglês de Amplificação de Luz por meio de Emissão Estimulada de Radiação (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) e, se refere ao processo de emissão do raio laser. Os sistemas laser de medição de deslocamentos, emitem radiação em duas frequências muito próximas entre si com polarizações circulares opostas. O deslocamento é mensurado através do tempo de retorno da radiação refletida no objeto em relação a sua velocidade. Embora o uso da tecnologia a laser tenha a vantagem da velocidade, a refletividade do objeto desempenha um papel importante. Se a refletividade do objeto é ruim e, ou sistema funcionará mal, ou não funcionará.

Outro modo de medição não intrusivo é reflexão ultrassônica ((Yasuda, Kuwashima, & Kanai, 1985)). O ultrassom utiliza o mesmo princípio de funcionamento dos medidores à laser, porém em frequências ultrassónicas, e por esse motivo apresenta a mesma dificuldade em relação à refletividade do objeto.

3.1 Técnicas de Medições de Deslocamentos via Uso de Imagens

Uma tarefa típica no processamento de imagens é identificar objetos específicos em uma imagem e determinar, posicionamentos e orientações em relação ao sistema de coordenadas definido. Essa técnica é aplicável em medições de deslocamentos em modelos físicos reduzidos, abaixo são exemplificados dois métodos de identificação de objetos em processamentos de imagens em uma plataforma de linguagem de programação gráfica denominada *Labview* (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*).

3.1.1 Reconhecimento de Padrões (Pattern Match)

Reconhecimento de padrões é a técnica usada para localizar rapidamente padrões de referência conhecidos em uma imagem, os chamados modelos de referência. Fornecendo informações sobre presença ou ausência, quantidade e localização do modelo em uma imagem.

O reconhecimento de padrões encontra correspondências em um modelo com base em valores de cinza e informações de gradiente de borda. Isso significa que, examina-se a intensidade de cor dos pixels da imagem (valores de cinza), comparando seções de pixels entre si para determinar se há uma grande diferença de intensidade de cor, indicando uma borda.

Esse processo localiza regiões de imagens em escala de cinza e, em seguida, procura variações do modelo em cada imagem capturada, calculando uma pontuação para cada correspondência. Esta pontuação relaciona como as correspondências localizadas se assemelham ao modelo. O reconhecimento de padrões pode encontrar correspondências de modelos em diferentes graus de iluminação, desfoque, ruído e transformações geométricas, como deslocamento, rotação ou dimensionamento do modelo. (Figura 3.1)

Figura 3.1 – Exemplo de uso de reconhecimento de padrões em um programa feito em plataforma Labview



Fonte: LabView, 2015

3.1.2 Reconhecimento de Geometrias (Geometric Match)

O reconhecimento de geometrias (Figura 3.2) encontra correspondências em um modelo com base em recursos geométricos. Isso inclui recursos de baixo nível, como bordas e curvas, mas também recursos de alto nível, como as formas (círculos, retângulos, vértices etc.) feitas pelas bordas e curvas.

Figura 3.2 - Exemplo de uso de Reconhecimento de Geometrias em um programa feito em plataforma Labview





Como o reconhecimento de geometrias precisa reconhecer as arestas, bem como as formas que elas criam, um algoritmo desse tipo pode demorar mais do que um algoritmo de reconhecimento de padrões. No entanto, reconhecimento de padrões precisa de arestas fortes para encontrar uma correspondência, por isso, terá dificuldade em encontrar uma correspondência em alguns casos (Figura 3.3):

- O objeto a detectar é de um tamanho diferente do modelo;
- O objeto a detectar é bloqueado na imagem;

• Não há iluminação uniforme ou uma alteração no contraste que diminua o contraste das bordas

Figura 3.3 – Dificuldades de correspondência encontradas para o algoritmo de reconhecimento de padrões utilizado em plataforma Labview. Imagens A: O objeto a detectar é de um tamanho diferente do modelo; Imagens B: O objeto a detectar é bloqueado na imagem; Imagens C: alteração no contraste que diminua o contraste das bordas



Fonte: LabView, 2015

3.1.3 Sistemas Comerciais de Captura de Deslocamentos via Uso de Imagens

Comercialmente, existem sistemas de capturas de deslocamentos que utilizam imagens. A seguir, são apresentados alguns dos sistemas mais conhecidos que fazem esse tipo de medição:

1. Sistema Qualisys®

Um sistema consagrado em relação à captura de deslocamentos via imagens é o sistema *Qualisys*®. O sistema captura, via imagens, a luz infravermelha emitida por câmeras digitais especiais de alta resolução (*ProReflex MCU*) e refletidas por marcas ou alvos refletores

fixos rigidamente. Esses alvos são denominados "passivos" pois não emitem luz, apenas reflete a luz que recebem.

Estas câmeras, após calibração, detectam a luz refletida e tratam a informação recebida. Os dados digitais obtidos em cada câmera são enviados para a unidade de processamento. Nessa unidade, o software *QTM (Qualisys Track Manager)* (Figura 3.4), combina a informação 2D recebida de cada câmera, determinando o posicionamento 3D de cada marca, em cada instante. Isto é possível apenas para as marcas localizadas na zona de intersecção da vista de pelo menos duas câmeras. Então para obter uma maior precisão nas medições é necessário cobrir todo o volume de teste.



Figura 3.4 – Exemplo de funcionamento do Sistema Qualisys.

Fonte: Rosa Santos et al., 2008

Segundo Qualisys (2019), os benefícios do uso da captura de movimento ótico da Qualisys para aplicações marítimas é que o sistema não requer fiação para a embarcação durante o experimento, a posição da embarcação é captada pelas câmeras montadas ao lado da bacia.

2. Sistema Optotrak®

O sistema *Optotrak* é um sistema de captura de movimentos baseado com uso de câmeras lançado pela *Northern Digital*. O sistema utiliza diodos emissores de luz infravermelha (LEDs IV) como marcadores de posição (Figura 3.5). Quando um LED IV está ligado, ele será visto por uma câmera. Um sensor de posição tem três sensores que são colocados ligeiramente separados (Figura 3.5).

Figura 3.5 – Sitemas Optotrak de medição de deslocamentos. A: Sensor de posição. B: Marcador com emissor de luz infravermelha



Fonte: Optotrak., 2019

O sistema Optotrak Certus suporta um máximo de 512 marcadores e, ativando a emissão de luz de cada marcador de forma sequencial, captura-se a posição de um grande número de marcadores em um curto período de tempo.

3. Sistema Vicon®

O sistema criado pela *Vicon*®, fundada em Oxford em 1984, é análogo ao sistema *Qualisys*®, pois utiliza o mesmo princípio de marcadores "passivos" e câmeras com emissores de luz infravermelha.





Fonte: Vicon., 2019

4. Sistema Microsoft Kinect®

A indústria de jogos começou a desenvolver sensores de captura de movimentações para utilizá-los em seus jogos, tornando a experiencia mais interativa. A Microsoft lançou no ano de 2010 o Kinect para uso em seus videogames. Apesar de ser um sensor específico, sua tecnologia pode ser implementada em outras áreas.

O Kinect (Figura 3.7) contém três partes que trabalham em conjunto para detectar o movimento e criar sua imagem física na tela: uma câmera de vídeo VGA (*Video Graphics Array*) colorida em cores RGB (*Red-Blue-Green*), um sensor de profundidade e um microfone de vários arranjos.

A câmera detecta os componentes de cor vermelha, verde e azul, além dos recursos faciais e corporais. Tem uma resolução de pixels de 640x480 e uma taxa de quadros de 30 fps, este recurso ajuda no reconhecimento facial e no reconhecimento do corpo.

O sensor de profundidade contém um sensor CMOS monocromático e um projetor infravermelho semelhante ao utilizado nos sistemas Qualisys e Vicon. Ele mede a distância de cada ponto do corpo do jogador transmitindo a luz infravermelha e captando o reflexo nos objetos.

Esses componentes se juntam para detectar e rastrear 48 pontos diferentes no corpo de cada jogador e se repetem 30 vezes a cada segundo.



Figura 3.7 – Detalhe do sistema Microsoft Kinect de captura de deslocamentos

Fonte: jameco.com., 2019

3.2 Sensores inerciais

São chamados de sensores inerciais aqueles que têm por objetivo monitorar os efeitos da ação de forças que provoquem uma mudança do estado inercial de sistemas sobre os quais

estas forças são exercidas, sensores estes baseados na tecnologia MEMS (*Micro ElectroMechanical Systems*).

Sensores inerciais são dispositivos capazes de medir variações de velocidade e aceleração, linear ou angular, direta ou indiretamente, através da conversão de forças inerciais em alguma mudança física conhecida que possa ser capturada por um transdutor correspondente e convertida em um sinal elétrico. Este sinal elétrico é submetido a processos de filtragem linear e não-linear a fim de se criar uma estimativa do sinal de entrada. A saída final representará um valor calibrado da aceleração e velocidade angular.

Em um único circuito integrado encontramos estruturas mecânicas micro usinadas formando os transdutores mecânicos, responsáveis por realizar a tarefa de sensoriamento por sinais elétricos analógicos correspondentes às forças as quais o sensor foi submetido. Em alguns chips, é possível encontrar a tarefa mais facilitada, recorrendo a dispositivos que forneçam sinais já digitalizados, filtrados digitalmente, processados, e até aos que armazenem leituras anteriores em memória, tudo de forma autônoma, sem a interferência da CPU principal.

A categoria de sensores inerciais baseados em MEMS é representada, principalmente por dois dispositivos: acelerômetro e giroscópio. Já o magnetômetro é aplicado em IMUs (*Inertial Measurement Unit*) para melhorar a qualidade e a exatidão do sinal de saída dos sensores inerciais.

- Acelerômetros: capazes de medir a aceleração linear na direção de um eixo referencial. Aceleração é a taxa de variação da velocidade no tempo, representada em m/s² (SI);
- Giroscópios: capazes de medir a velocidade angular em torno de um eixo de referência. A velocidade angular é uma grandeza que representa a taxa de variação da posição angular no tempo em rad/s (SI);
- Magnetômetros: capazes de medir a intensidade, direção e sentido de campos magnéticos em sua proximidade, cuja unidade no Sistema Internacional de Unidades é G (Gauss). Apesar de não ser um sensor do tipo inercial, o magnetômetro é bastante utilizado em sistemas de rastreamentos de movimentos em conjunto com o acelerômetro e giroscópio.

4 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DE DESLOCAMENTOS

4.1 Características Gerais do Sistema

O sistema de monitoramento de deslocamentos de modelos reduzidos de navios atracados em simuladores experimentais foi desenvolvido no LHEPUSP para auxiliar os estudos de navios atracados em modelo físico reduzido, mensurando os deslocamentos das embarcações em relação ao píer e, utilizando esses dados, estudar maneiras de garantir a segurança do ambiente portuário. O sistema pode ser aplicado em qualquer modelo físico hidráulico de estudos com navios atracados que tenha redução de escala e espaço suficiente para posicioná-lo.

De modo geral, o sistema é composto por um conjunto de sensores inerciais acoplados sob um alvo marcador e uma câmera fixada ao píer. Os sensores e o alvo marcador formam um elemento que é posicionado sobre o convés da embarcação, com o centro geométrico desse elemento coincidente ao centro geométrico da embarcação no plano paralelo ao convés. A Figura 4.1 mostra o elemento que contém os sensores inerciais e o alvo marcador, montado na imagem A e desmontado na imagem B.

Figura 4.1 – Parte do sistema de medição de deslocamentos que é localizado sobre a embarcação com os sensores inerciais e o alvo marcador montado (A) e desmontado (B)



Fonte: Autor

O elemento possui dimensões totais de 230x100x25mm. Esses valores podem ser adaptados dependendo das necessidades do ensaio, entretanto, haverá uma alteração na precisão do sistema, e uma redução exagerada pode tornar inviável a sua utilização.

Outro elemento que compõe o sistema de monitoramento é uma câmera fixada ao píer, sobre o alvo marcador. Essa câmera transmite as imagens do alvo marcador à um computador que processa as imagens e obtém os deslocamentos. A Figura 4.2 mostra uma visão geral do sistema.

Figura 4.2 – Desenho esquemático mostrando o sistema de monitoramento de deslocamentos que contêm duas partes: uma fixada ao píer e a outra sobre a embarcação



Fonte: Autor

4.2 Medição de Deslocamentos via Análise de Imagens

4.2.1 Alvo Marcador

No sistema desenvolvido, quatro dos seis deslocamentos (*surge*, *sway*, *heave* e *yaw*) são captados via análise de imagens do alvo marcador posicionado sobre a embarcação. Para isso, é utilizado o algoritmo de reconhecimento de padrões, que em resumo, usa as informações de intensidade de pixel como o recurso principal para correspondência, observando mudanças bruscas nos valores de intensidade na cor dos pixels para caracterizar a forma de um objeto.

Para usar esse método, o objeto e o plano de fundo devem ser distinguíveis por regiões nitidamente contrastantes para determinar, com precisão, o limite do objeto. A informação de forma de limite dos objetos é comparada com a de um objeto em uma imagem de modelo para determinar a similaridade. Se a borda do limite não for nítida, a correspondência de padrões e nesse contexto o tipo de marcador influencia a qualidade da medição.

O alvo marcador Figura 4.3 apresenta uma forma externa retangular, de fácil caracterização, porém no interior, foram inseridos dois quadrados com formas distintas para evitar erros de simetria ao medir o ângulo da imagem. Ao utilizar um marcador simétrico, o algoritmo pode confundir um ângulo com seu suplementar.





Fonte: Autor

As cores do alvo marcador foram escolhidas de modo a apresentar um alto contraste de cores e nitidez nas bordas do desenho. O algoritmo transforma a imagem captada em tons de cinza e contendo pixels com valores de 255 para partes claras e 0 para as partes escuras. Isso reduz a influência da luminosidade externa ao sistema.

4.2.2 Vídeo Câmera

A Vídeo Câmera capta as imagens do alvo marcador e transmite ao computador para o algoritmo de reconhecimento de padrões. A qualidade dessas imagens influencia diretamente na precisão do sistema pois, quanto maior a quantidade de pixels da imagem, menor será o seu detalhamento, e consequentemente, a relação de milímetro por pixels será menor.

A câmera utilizada concilia uma boa qualidade de imagens com um custo financeiro acessível, fazendo um sistema de custo razoável, diferente dos comercializados atualmente. Suas especificações são apresentadas na Tabela 4.1.

| Modelo | Microsoft H5D-00013 |
|-----------------|---------------------|
| Resolução | HD 720p (16:9) |
| FPS da Gravação | 30 Fps |
| Conectividade | USB 2.0 |
| Altura (mm) | 56 |
| Espessura (mm) | 46 |
| Largura (mm) | 24 |

Tabela 4.1 – Características da câmera utilizada para captar as imagens do alvo marcador para o algoritmo de reconhecimento de padrões.

Fonte: Microsoft

Outras características importantes presente nesse modelo de câmera são: foco automático, rastreamento facial, rotação de 360° e um microfone integrado. Esses fatores, principalmente o foco automático, ajudam o algoritmo de reconhecimento de padrões pois entregam imagens mais homogêneas e definidas.

Para diminuir o efeito da variação de luminosidade externa, a câmera é fixada em um suporte metálico articulado que possui uma lâmpada *LED* circular que mantem a quantidade luz incidida no alvo marcador sempre constante (Figura 4.4).

Figura 4.4 – Câmera com sistema de iluminação posicionada sobre o alvo marcador



Fonte: Autor

4.2.3 Sensibilidade do Sistema de captura de deslocamentos via Análise de Imagens

Antes de cada início de ensaio, é necessário fazer uma calibração para relacionar as medições em pixel na imagem com a medição em milímetros do modelo.

O modelo de calibração utilizado é uma grade de pontos circulares igualmente distantes entre si. Como mostrado na Figura 4.5, a grade tem espaçamentos constantes nas direções x e y. O algoritmo de calibração considera os seguintes pontos da Figura 4.5:

- 1. Distância entre centro dos pontos circulares;
- 2. Centro do ponto circular;
- 3. Distância entre bordas dos pontos circulares.

Figura 4.5 – Método de calibração de imagens por pontos circulares presente no software LabView.



Fonte: LabView, 2019

O deslocamento nas direções x e y deve ser igual (dx = dy). Os pontos devem cobrir toda a área de trabalho necessária. Para expressar medições em unidades do mundo real, definese um sistema de coordenadas na imagem da grade, que necessita de uma origem, ângulo e direção do eixo.

Após a calibração correta, o algoritmo fornecerá a posição do alvo com as correções de distorção implementadas. As imagens, Figura 4.6 e Figura 4.7, mostram a calibração da grade de pontos para duas distâncias entre o alvo e a câmera, de 10 centímetros e 25 centímetros, respectivamente. Os vetores, presentes no centro de cada círculo, apresentam a necessidade de deslocamento de cada ponto para obter uma imagem normalizada, ou seja, com uma relação de pixels por milímetros igual em toda a imagem.



Figura 4.6 – c utilizando o método de pontos circulares com distância entre o alvo e a câmera de 10 centímetros

Fonte: Autor

Figura 4.7 – Sensibilidade do sistema utilizando o método de pontos circulares com distância entre o alvo e a câmera de 25 centímetros



Fonte: Autor

4.2.3.1 Transformação de Deslocamentos em Pixels para Deslocamentos em Milímetros

A precisão do sistema de captação de deslocamentos por imagens depende da relação de pixels por milímetros, que define a quantidade de divisões que o algoritmo usará para cada

milímetro. Essa precisão provém da sensibilidade descrita no item 4.2.3 e depende, principalmente, da quantidade de pixels da imagem gerada pela câmera e da distância entre o alvo marcador e a câmera (Figura 4.8).



Figura 4.8 – Desenho esquemático demonstrando a distância relativa entre a câmera e o alvo

Fonte: Autor

A Tabela 4.2 mostra o valor da relação de pixel por milímetro variando-se a distância relativa entre o alvo marcador e a câmera, bem como a área total abrangida pela imagem ao variar a distância.

| Distância (mm) | Sensibilidade (mm/pixel) | Área Total Abrangida (mm²) | Comp. Total em X (mm) | Comp. Total em Y (mm) |
|-------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 50 | 0,0647 | 3852,750 | 82,761 | 46,553 |
| 100 | 0,1107 | 11286,139 | 141,648 | 79,677 |
| 150 | 0,1631 | 24508,104 | 208,734 | 117,413 |
| 200 | 0,2099 | 40616,690 | 268,714 | 151,152 |
| 250 | 0,2587 | 61687,367 331,159 186, | | 186,277 |
| 300 | 0,3126 | 90068,385 | 400,152 | 225,085 |
| 350 | 0,3599 | 119403,585 | 460,731 | 259,161 |

Tabela 4.2 – Relação da distância entre a câmera e o alvo marcador e a sensibilidade do sistema

Fonte: Autor

Pela Figura 4.9, observa-se que a sensibilidade do sistema varia linearmente em relação à distância da câmera. Esse fato permite idealizar o alvo marcador previamente e conseguir a sensibilidade necessária para o estudo. A área total abrangida pela câmera é importante para obter a melhor sensibilidade possível, não superando os limites das amplitudes máximas de deslocamento permitidas para determinado estudo.





Fonte: Autor

Para o estudo de caso do presente trabalho, a câmera foi fixada à **150 mm** do alvo marcador colocado sobre a embarcação. Isso fornece uma relação para o sistema de 0,1631 mm/pixels, fornecendo uma sensibilidade da ordem de 0,08155 mm aos deslocamentos em *surge* e *sway*, captados pelo uso de imagens. Esse valor varia, pois, antes de cada ensaio o sistema é recalibrado, porém, essa alteração é mínima e para melhores resultados, a precisão de cada ensaio é gravada antes do ensaio. Os deslocamentos em *yaw*, também captados pelo uso de imagens, apresentam sensibilidade de 0,05°.

4.2.3.2 Deslocamentos em Heave obtidos por Escala Geométrica do Alvo Marcador

Os deslocamentos em *heave* são medidos através do fator de escala das imagens do algoritmo de reconhecimento de padrões. Para isso o algoritmo procura por diversas ocorrências do modelo do alvo marcador na imagem, independentemente se as correspondências encontradas possuem tamanhos diferentes. A partir da comparação das dimensões da

correspondência encontrada com a original do alvo marcador é possível verificar a escala dimensional da correspondência encontrada. A relação entre à distância da câmera e a escala dimensional do alvo marcador encontrada pelo algoritmo é apresentada na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Variação da escala dimensional da imagem em relação ao deslocamento da embarcação em heave



Fonte: Autor

Através de uma regressão linear, é possível obter uma equação que fornece o deslocamento em *heave* pela escala do alvo marcador na imagem. No caso da Figura 4.10, a reta obtida é:

$$heave (mm) = 3,351 * escala - 327,9$$
 (13)

Com $R^2 = 0,9999$. Essa equação é inserida no software antes da realização dos ensaios. Como o algoritmo de reconhecimento de padrões apresenta sensibilidade de 0,1% para o fator de escala de imagem, o sistema apresenta sensibilidade de 0,1675 mm.

4.3 Medição de Deslocamentos por Sensores Inerciais

4.3.1 Giroscópio e Acelerômetro

Para complementar o sistema de câmeras nos demais deslocamentos (*pitch* e *roll*), foi utilizado um multi-sensor do tipo IMU (*Inertial Measurement Unit*), modelo GY-80 (Figura 4.11). Este IMU possui um giroscópio, um acelerômetro, um magnetômetro e um sensor de pressão e temperatura. As características dos sensores são apresentadas na Tabela 4.3.



Figura 4.11 - IMU comercial contendo sensores inerciais utilizados na pesquisa (GY-80)

Fonte: Robotpark

Tabela 4.3 -Características dos sensores presentes no multi-sensor GY-80

| Multi-sensor GY-80 | Tipo | Resolução Máxima Utilizada |
|---------------------------------|----------|----------------------------|
| Giroscópio | L3G4200D | 2000°/s |
| Acelerômetro | ADXL345 | ±16 g |
| Magnetômetro | HMC5883L | não utilizado |
| Sensor de pressão e temperatura | BMP085 | não utilizado |

Fonte: Robotpark

Para se comunicar com o software central, o sensor utiliza comunicação I2C (*Inter-Integrated Circuit*) para endereçar os sensores e obter os dados lidos. Desenvolvido nos anos 80 pela *Philips (Koninklijke Philips Electronics N.V.*), o barramento I2C é usado em uma ampla variedade de aplicativos porque é simples e rápido de usar. O I2C consiste em um barramento de comunicação de dois fios que suporta transferência bidirecional de dados entre um mestre e vários escravos (I2C Guide, 2013).

A interface com o computador é feita com um Arduino Uno, e a conexão com o computador pode ser realizada via cabo USB, ou ainda, para evitar que o cabo de comunicação influencie na movimentação da embarcação, utilizar uma comunicação via rádio, por exemplo, um módulo Xbee.

O giroscópio presente na IMU fornece medições de velocidade angular em 3 eixos. No entanto, o acompanhamento da orientação angular também requer integração matemática dessas leituras. A maioria dos giroscópios comerciais de baixo custo apresentam um erro, onde a velocidade angular fornecida é diferente de zero mesmo quando o sistema não está se movendo. Ao se integrar a velocidade angular, esses valores produzem um erro de orientação,

chamado *drift*, que implica em muitos problemas para a navegação e outras aplicações que usam esse tipo de sensor.

A Figura 4.12 apresenta os resultados de um teste para verificar o efeito de *drift* do giroscópio presente no multi-sensor GY-80. Aplicando um movimento senoidal de amplitude de 10 mm e frequência de 1 Hz, o sensor apresentou um erro acumulativo em sua leitura média de aproximadamente de 1° por segundo.

Figura 4.12 – Erro acumulativo (drift) de orientação no uso do giroscópio presente no multi-sensor GY-80, sob a ação de um movimento senoidal.



Fonte: Autor

O acelerômetro também presente na IMU fornece medições de acelerações em 3 eixos. Desta forma, é possível utilizar o ângulo formado pelos vetores de aceleração para medir deslocamentos rotacionais. Esse método é quantitativo e apresenta diversos erros devido aos ruídos gerados pela dinâmica característica do acelerômetro. Para verificar esses problemas, foi aplicado o mesmo movimento senoidal utilizado no teste do giroscópio para o teste do acelerômetro. (Figura 4.13)

Figura 4.13 –Deslocamento (roll) ao longo do tempo, com destaque para os ruídos gerados pela dinâmica característica do acelerômetro presente no multi-sensor Gy-80 ao medir deslocamentos rotacionais, sob a ação de um movimento senoidal.





4.3.1.1 Filtro Complementar

Para amenizar esses erros foi implementado uma ação conjunta dos sensores por meio do algoritmo denominado Filtro Complementar, para eliminar os ruídos e assim garantir uma medida angular adequada (Sabatelli et al, 2012).

Esse filtro utiliza, para cada ângulo medido (*roll* e *pitch*), uma composição proporcional da medição angular do giroscópio e o ângulo formado pelo vetor composto pelas duas acelerações sobre o plano.

A proporção utilizada de cada sensor é apresentada pelo coeficiente de complementação de fusão (α), e para $\alpha = 1$, apenas a medição do giroscópio é utilizada e para $\alpha = 0$, apenas a medição do acelerômetro. A equação (14) apresenta a implementação do filtro complementar para a medição do ângulo θ no instante k.

$$\theta_{k} = \alpha (\theta_{k-1} + \theta_{\text{giro},k} \Delta t) + (1 - \alpha) \theta_{\text{acel},k}$$
(14)

Implementando o filtro complementar com $\alpha = 0,9$, o sistema apresenta uma leitura mais satisfatória do movimento medido (Figura 4.14).

Medidor Composto \sim Referência 14 12 10 8 Deslocamento ROLL (") 2 0 -2 -4 -6 -8 -10 -12-Tempo (s)

Figura 4.14 – Utilização do filtro complementar com $\alpha = 0,9$ para corrigir os erros apresentados pelos sensores inerciais

Fonte: Autor

Para uma utilização do filtro complementar foram testados diversos valores de α para uma mesma excitação, de modo a avaliar qual valor apresenta melhor leitura do comportamento.

O sistema de monitoramento de deslocamentos utiliza uma frequência de leitura de 5 Hz e, para evitar qualquer erro durante a fase de testes o sistema foi implementado com uma frequência de leitura de 25 Hz, valor 5 vezes maior do que o valor aplicado pelo sistema.

Para o teste do filtro complementar, uma onda senoidal de **amplitude de 10° e 0,5 Hz de frequência** foi aplicada ao sistema. Estes valores foram escolhidos para obter o coeficiente α em um deslocamento de grande amplitude e baixa frequência, deslocamentos considerados mais simples de serem medidos.

Para avaliar o erro entre a excitação e a leitura foi utilizado o *Mean Square Error* (MSE) Os resultados são apresentados na Tabela 4.4, destaca-se o valor de α que apresentou o menor valor de erro. Este valor foi utilizado na implementação do sistema.

Tabela 4.4 – Variação do erro MSE entre a excitação e a leitura do sistema em relação ao valor coeficiente de complementação de fusão.

| α | MSE |
|------|------|
| 0,95 | 6,36 |
| 0,9 | 6,14 |
| 0,85 | 6,61 |
| 0,8 | 7,32 |
| 0,75 | 8,2 |

Fonte: Autor

4.3.2 Transformações Geométricas no Espaço

O sensor para medição de deslocamentos inerciais está posicionado sobre o convés da embarcação e, desse modo, o eixo do deslocamento rotacional medido é deslocado em relação ao eixo de giro da embarcação. A utilização correta das leituras de deslocamento angular (*roll* e *pitch*) fornecidas pelo IMU necessitam do transporte do eixo rotacional do sensor para o eixo rotacional da embarcação. Esse transporte de valores é feito em 4 etapas como demonstrado na Figura 4.15, para cada um dos deslocamentos.





Fonte: Autor

Esse processo de transformação geométrica no espaço é simplificado pois, é um caso específico de quando o eixo de rotação é paralelo ao eixo x de coordenadas. No caso do presente trabalho, isso é aplicável, pois o eixo de rotação do sensor é sempre paralelo ao eixo de rotação da embarcação para ambos os deslocamentos medidos, devido ao posicionamento do sensor sobre o eixo geométrico da embarcação.

O transporte é realizado por uma composição de matrizes de translação e rotação, utilizando a distância entre os eixos de rotação como fator de translação. A composição matricial é da seguinte maneira:

$$X' = T^{-1} \cdot R_{\chi}(\theta) \cdot T \cdot X \tag{15}$$

 $\begin{bmatrix} x'\\y'\\z'\\1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0\\0 & 1 & 0 & 0\\0 & 0 & 1 & d_z\\0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0\\0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0\\0 & \sin\theta & \cos\theta & 0\\0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0\\0 & 1 & 0 & 0\\0 & 0 & 1 & -d_z\\0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x\\y\\z\\1 \end{bmatrix}$ (16)

Onde *T* é a matriz de translação do sensor até o eixo de giro longitudinal da embarcação (d_z) e $R_x(\theta)$ é a matriz de rotação com ângulo θ sobre o eixo geométrico longitudinal da embarcação (eixo x).

4.4 **Programa Computacional** (*Software*)

O sistema de monitoramento de deslocamentos tem interface com o usuário via *software* escrito em plataforma LabView (Figura 4.16). O programa computacional captura as informações dos sensores e câmera, calcula os deslocamentos, grava os valores em arquivo e apresenta os resultados ao usuário em tempo real.

Figura 4.16 – Captura da tela de programação do LabView para a função de teste do sensor inercial





O programa computacional desenvolvido é um complemento do programa de medição de esforços nos cabos de amarração utilizado no LHEPUSP, trabalhando de forma paralela e provendo mais informações para o ensaio de amarração de embarcações. A interface com o usuário é prática e de fácil utilização (Figura 4.17). As calibrações das variáveis iniciais são feitas por um usuário administrador antes do início da bateria de ensaios.

Figura 4.17 – Captura de tela do programa computacional de medição de esforços nos cabos de amarração utilizado no LHEPUSP com o sistema de monitoramento de deslocamento anexo (destaque em vermelho).





O software apresenta um ciclo de funções (Figura 4.18) que permite a repetibilidade do sistema e facilita a detecção de erros durante o processo, fator importante para um software que opera em tempo real.



Figura 4.18 - Fluxograma do algoritmo utilizado pelo programa computacional desenvolvido para o sistema de medição de deslocamentos.

Fonte: Autor

4.5 Testes do Sistema de Medição de Deslocamentos em Ambiente Controlado

Para testar o sistema sem influência do ambiente em sua medição, a avaliação é realizada em laboratório, um ambiente controlado com a possibilidade de gerar deslocamentos de forma independente, evitando a influência dos demais deslocamentos sobre a sua medição.

Outro teste importante realizado é verificar a resposta em frequência do sistema, examinando a abrangência de sua implementação, bem como o mínimo período de oscilação do deslocamento captado pelo sistema.

A bancada de calibração possui dois elementos atuadores que geram deslocamentos com precisão, que podem atuar individualmente ou em conjunto, implementando um deslocamento único por vez, ou um movimento composto por dois deslocamentos simultâneos, possibilitando analisar a capacidade dos sensores medirem deslocamentos simultâneos.

Os deslocamentos rotacionais são gerados por um servo motor que possui um *encoder* e um controlador acoplado. Esse motor apresenta um controle em malha fechada da velocidade e posição angular.

Figura 4.19 – Servo motor gerador de deslocamentos rotacionais utilizado para testar o sistema em laboratório




O motor utilizado nos testes em laboratório (Figura 4.19) possui as seguintes especificações conforme a Tabela 4.5:

Tabela 4.5 – Especificações do servo motor gerador de deslocamentos rotacionais para avaliação do

| Modelo | Futaba S3003 |
|------------------|------------------------------|
| Torque | 3,17 kg.cm (4,8V) |
| Velocidade | 0,23 segundos / 60° |
| Peso | 37 gramas |
| Largura de Pulso | $500-3000\ \mu s$ |
| Dimensões (mm) | 39,9x20,1x36,1 |

sistema em ambiente controlado.

Fonte: Futaba

Já os deslocamentos de translação são gerados por um motor de passo conectado à um fuso de esferas e uma guia linear (Figura 4.20).

Figura 4.20 – Sistema gerador de deslocamento de translação para avaliação do sistema em ambiente



Um motor de passo é um dispositivo eletromecânico que converte os impulsos elétricos em movimentos discretos mecânicos. Uma das vantagens mais significativas de um motor de passo é a sua capacidade de ser controlado com precisão de posição mesmo na ausência de um sistema de detecção de posição. Sua posição é conhecida simplesmente através do controle dos impulsos de entrada.

O conjunto composto pelo motor de passo e o fuso de esferas possuem as seguintes especificações conforme a Tabela 4.6.

| Modelo | Action SM1.8-D19-CS |
|--------------------|---------------------|
| Torque | 19 Kgf.cm |
| Diâmetro do eixo | 6.35mm |
| Flange | Nema 23 |
| Classe de isolação | В |
| Passo Fuso | 5 mm/rotação |
| Modelo Driver | DR SMM040035-NH |
| Alimentação | 12-38 V |
| Corrente Máxima | 3,5 A |
| Micropasso | 1/32 |

Tabela 4.6 – Especificações do conjunto composto pelo motor de passo e o fuso de esferas gerador de deslocamentos translacionais

Fonte: Action

Os testes realizados em laboratório são divididos em dois grupos de deslocamentos: rotacionais e translacionais. Nos testes rotacionais o sistema é imposto a um movimento senoidal angular constante com frequências entre 0,1 Hz e 2,0 Hz e amplitudes de 2° à 45° . Nos testes translacionais, o movimento senoidal imposto tem frequências na faixa de 0,1 Hz à 1,5 Hz e amplitudes de 1,5 mm à 15 mm.

4.5.1 Resultados dos Testes do Sistema em Ambiente Controlado

4.5.1.1 Deslocamentos rotacionais unitários controlados

Os deslocamentos rotacionais em *roll* e *pitch*, medidos pelos sensores inerciais, foram avaliados sob a ação de deslocamentos senoidais de diferentes amplitudes e frequências. Esses deslocamentos são gerados por um servo motor acoplado ao sistema.

Ambos os deslocamentos possuem o mesmo princípio de medição, onde utilizam os sensores inerciais combinados pelo método do filtro complementar, e por isso, serão apresentados os resultados apenas para o deslocamento em *roll*, já que o deslocamento em *pitch* apresentara os mesmos resultados nos testes realizados.

O servo motor aplica um deslocamento senoidal sobre o sistema e a leitura dos sensores é comparado ao deslocamento induzido (Figura 4.21).



Figura 4.21 – Movimento senoidal com frequência de 0,2 Hz e amplitude de 15°, aplicado sobre o sistema desenvolvido.

Os deslocamentos rotacionais aplicados apresentam amplitudes e frequências conforme a Tabela 4.7. Também estão apresentados na Tabela 4.7 os erros *RMAE* resultantes da comparação entre o deslocamento gerado pelo servo motor e o deslocamento medido pelo sistema.

| Frequência (Hz) | Amplitude (°) | RMAE |
|-----------------|---------------|--------|
| | 2 | 0,8030 |
| | 5 | 0,1628 |
| | 10 | 0,0664 |
| 0,1 | 15 | 0,0456 |
| | 20 | 0,0378 |
| | 30 | 0,0313 |
| | 45 | 0,0214 |
| | 2 | 0,6714 |
| | 5 | 0,1911 |
| | 10 | 0,0817 |
| 0,5 | 15 | 0,0593 |
| | 20 | 0,0496 |
| | 30 | 0,036 |
| | 45 | 0,0294 |
| | 2 | 0,7389 |
| | 5 | 0,1649 |
| | 10 | 0,0909 |
| 1 | 15 | 0,0619 |
| | 20 | 0,0621 |
| | 30 | 0,0505 |
| | 45 | 0,0629 |
| | 2 | 1,4184 |
| | 5 | 0,2291 |
| | 10 | 0,1420 |
| 2 | 15 | 0,1177 |
| | 20 | 0,114 |
| | 30 | 0,1325 |
| | 45 | 0,1898 |

Tabela 4.7 – Análise estatística dos deslocamentos senoidais aplicados sobre o sistema em roll e o erro comparativo RMAE.

Para os deslocamentos rotacionais medidos por sensores inerciais (*roll* e *pitch*), o sistema apresenta precisão de medição de $0,5^{\circ}$ e bons resultados para amplitudes maiores do que 2°, com considerável melhora para amplitudes maiores.

5 ESTUDO DE CASO

5.1 Descrição do Terminal Portuário

Após os testes do sistema de monitoramento de deslocamentos em laboratório, seu desempenho foi avaliado em um modelo físico reduzido de um terminal portuário. Este modelo físico representa um porto de carregamento de minério de ferro localizado em uma ilha situada no litoral brasileiro. Esta ilha está localizada próxima à costa, entre duas baias, ligada ao continente por uma ponte ferroviária, utilizada para o transporte do minério de ferro às embarcações atracadas. Como o estudo de caso vai se tratar somente da aplicação e avaliação do sistema de monitoramento desenvolvido, com propósitos acadêmicos, o nome do porto será mantido em sigilo neste trabalho, e, daqui por diante, será denominado genericamente como TPEC (Terminal Portuário do Estudo de Caso).

O TPEC é constituído de uma estrutura de concreto com aproximadamente 400 metros de comprimento e 21,00 metros de largura (montado sobre estacas e tubulões de aço), com dois berços de atracação denominados Norte e Sul. Os berços recebem navios com restrições máximas conforme a Tabela 5.1.

| Dimensões dos Navios | Berço Norte | Berço Sul |
|--------------------------|-------------|-----------|
| Comprimento Total Máximo | 290,00 m | 340,00 m |
| Boca Máxima | 45,00 m | 62,00 m |
| Calado Máximo | 18,50 m | 20,40 m |

Tabela 5.1 – Restrições máximas das dimensões dos navios que podem operar no TPEC.

Fonte: FCTH

A maré da região apresenta em duas preamares e duas baixa-mares por dia, porém, com consideráveis desigualdades. As desigualdades se fazem sentir com mais intensidade conforme influências pluviométricas da região (principalmente nas marés vazante) ou nos períodos de quadratura. A região apresenta amplitudes de maré médias de 1,05 metros e máxima de 1,5 metros.

A corrente atuante ao longo do píer e bacia de manobras (onde são normalmente efetuadas medições), são basicamente resultantes do movimento das marés, mas que pode ser influenciada pela ação de ventos e/ou chuvas locais principalmente nas marés vazante, onde o índice pluviométrico tem relação direta e proporcional.

O TPEC apresenta um abrigo natural parcial da incidência de ondas. Os berços de atracação deste porto sofrem influência somente das ondas vindas das direções Sul e Sudeste. As ondas são o efeito hidrodinâmico que mais afetam, em termos de amarração, a segurança deste terminal e apresenta valores de altura significativa de ondas mais frequentes de 0,5 a 1,0

metros e, os valores de período de pico de ondas mais frequentes estão entre 7 e 12 s. O TPEC apresenta valor máximo de Hs de 2,75 m e máximo de Tp de 15,4 s.

5.2 Descrição do modelo físico reduzido

Para diversos estudos de planejamento de operação, otimização de planos de amarração de navios atracados e manobras de navios, foi construído um modelo físico reduzido do Terminal Portuário descrito no item 5.1 no Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LHEPUSP). Este modelo físico foi utilizado durante toda a pesquisa de mestrado de que trata esta dissertação.

O modelo hidráulico físico foi construído na escala geométrica de 1:170, sem distorção, segundo os critérios de semelhança de Froude.

A escala de redução escolhida permite a representação de toda região de interesse, dentro dos limites do Laboratório, e a magnitude do número de Reynolds do escoamento nas áreas de estudo é suficientemente elevada para que não ocorram efeitos viscosos e/ou de tensão superficial na simulação de correntes. Além disso, a escala geométrica adotada permite também a simulação das ondas críticas de projeto, reproduzindo adequadamente a energia das ondas nas simulações.

A Figura 5.1 mostra o projeto para a construção do modelo, bem como as curvas batimétricas, a localização do píer e localização do gerador de ondas.



Figura 5.1 – Área abrangida pelo modelo físico reduzido localizado no LHEPUSP com a representação das curvas batimétricas utilizadas para a construção

Fonte: FCTH

O modelo físico construído é capaz de reproduzir as correntes de maré e seus efeitos sobre os navios, e também de representar ondas regulares e irregulares. O presente estudo focou apenas na ação hidrodinâmica das ondas sobre a embarcação atracada.

O gerador de ondas é do tipo basculante. Seu movimento é gerado por um servo-motor conectado à um fuso de esferas que, por sua vez é conectado à placa basculante (Figura 5.2). O A placa frontal do gerador tem 8,65 metros de comprimento e 0,58 metros de altura. O sistema é capaz de gerar, em valores de protótipo, ondas com altura significativa entre 1 e 2,75 metros e períodos de pico entre 8 e 14 segundos.

Figura 5.2 – Arranjo geral simplificado do gerador de ondas basculante implementado no modelo físico reduzido do TPEC



Fonte: FCTH

As figuras Figura 5.3 e Figura 5.4 apresentam, respectivamente, uma visão geral do modelo físico reduzido e uma visão aproximada dos berços de amarração.

Figura 5.3 - Modelo físico reduzido tridimensional com sistema gerador de ondas localizado no LHEPUSP. Escala 1:170



Fonte: FCTH

<text>

Figura 5.4 – Detalhe do píer do modelo físico reduzido do terminal portuário com embarcações em ambos os bercos

Fonte: FCTH

5.3 Cenários de Ondas Utilizados para o Teste do Sistema em Modelo Físico

O gerador de ondas do modelo físico foi calibrado para que reproduza corretamente as condições ambientais de ondas da região do TPEC. A calibração do gerador foi realizada a partir das informações fornecidas por um modelo computacional da região que, considera o clima de ondas em águas profundas determinadas a partir dos resultados do modelo global *Wave Watch* III (WWIII) (Wavewatch III, 2016).

A geração de ondas irregulares foi baseada no modelo de espectro paramétrico JONSWAP (Joint North Sea Wave Project), utilizado na maioria dos projetos de engenharia relacionados a regiões costeiras para o cálculo de espectro de ondas.

O sistema de monitoramento de deslocamentos foi testado em dois cenários de ondas diferentes: regular e irregular. A Tabela 5.2 apresenta o tipo de onda gerada, bem como os valores de altura significativa (Hs), Período de Pico (Tp), apresentando os valores de protótipo e também os valores medidos em modelo na escala geométrica de 1:170.

| Tine de Onde Prot | | ótipo | Modelo | (1:170) | |
|-------------------|-----------|--------------------------|--------|----------------|--------------|
| 1 ipo de | Ullua | Altura (Hs) Período (Tp) | | Altura (Hs) | Período (Tp) |
| Cenário 1 | Regular | 2,5 m | 14 s | 14,71 mm | 1,08 s |
| Cenário 2 | Irregular | 1,5 m | 12 s | 8,82 mm | 0,92 s |

Tabela 5.2 – Configuração dos cenários ensaiados no modelo físico reduzido

Para registros em campo, a ITTC (1984) recomenda que o número total de ciclos de ondas (N) que deve ser maior do que 50, e N \geq 200 é considerado o valor de ciclos de ondas excelente para análise espectral de um determinado estado de mar. Assim, utilizando esse princípio, o tempo total de ensaio escolhido foi de N = 300, ou seja, aplicação de 300 ciclos do período de pico da onda estudada.

A Figura 5.5 apresenta o espectro de ondas JONSWAP teórico e os resultados de 3 interações de calibração de ondas do gerador de ondas do modelo físico reduzido.

Figura 5.5 – Espectro de ondas JONSWAP em comparação com as interações de calibração do gerador de ondas.



Fonte: Autor

5.4 Embarcação Utilizada para o Teste do Sistema em Modelo Físico

A embarcação utilizada nos testes em modelo físico reduzido é um navio graneleiro classificado por seu porte como um VLOC (*Very Large Ore Carriers*), com capacidade de carga nominal de 300.000 DWT (*Deadweight Tonnage*) (Figura 5.6). Suas características principais de protótipo e em escala geométrica de 1:170 são apresentadas na Tabela 5.3.



Figura 5.6 – Plano de capacidades do navio do tipo VLOC, com capacidade de carga de 300.000°DWT, utilizado nos testes em modelo físico reduzido.



Tabela 5.3 – Características gerais do navio do tipo VLOC, com capacidade de carga de 300.000°DWT utilizado nos testes em modelo físico reduzido.

| Características Gerais | Protótipo | Modelo (1:170) |
|-----------------------------------|-----------|----------------|
| Comprimento Total | 330,30 m | 1,94 m |
| Comprimento entre Perpendiculares | 320,00 m | 1,88 m |
| Boca Moldada | 57,00 m | 0,34 m |
| Pontal Moldado | 29,50 m | 0,17 m |
| Calado de Projeto Moldado | 21,50 m | 0,13 m |

Fonte: FCTH

O casco do navio é confeccionado respeitando-se a semelhança geométrica de 1:170 com as dimensões de protótipo, a partir do plano de linhas do projeto de engenharia. O modelo do navio em escala reduzida é feito em resina e fibra de vidro.

Figura 5.7 – Casco do modelo de embarcação construído em resina e fibra de vidro em escala geométrica de 1:170



Fonte: FCTH

Para representar corretamente os movimentos, as acelerações e outras variáveis do fenômeno em estudo, o modelo de embarcação, além de reproduzir a geometria do protótipo, também teve seu centro de gravidade e os momentos de inercia ajustados conforme os dados de protótipo.

5.5 Plano de Amarração da Embarcação Utilizada para o Teste do Sistema em Modelo Físico

A embarcação é segura junto ao píer por meio dos cabos de amarração, que restringem os deslocamentos do navio. Sendo assim, o plano de amarração da embarcação influencia diretamente em seus deslocamentos em relação ao píer.

O plano de amarração utilizado para todos os cenários de ondas sobre a embarcação é composto por 20 cabos de *HMPE* (*High Modulus Polyethylene*), material que possui tração nominal mínima de ruptura de 100 tf.

A embarcação foi atracada por boreste e os 20 cabos de amarração estão divididos em:

- 6 lançantes de vante;
- 4 espringues de vante;
- 4 espringues de ré;
- 2 traveses de ré;
- 4 lançantes de ré.

A Figura 5.8 apresenta posição de cada cabo (em vermelho) em relação ao píer e a embarcação atracada.

Figura 5.8 – Plano de amarração do navio do tipo VLOC com capacidade de carga de 300.000°DWT utilizado nos testes em modelo físico reduzido



Fonte: FCTH

5.6 Comparação com Outro Sistema de Medição de Deslocamentos

Para avaliar a eficácia do sistema de monitoramento de deslocamentos em modelo físico reduzido, foi montado junto a embarcação atracada, o sistema de medição por imagens Qualisys®. Os deslocamentos medidos pelo sistema Qualisys® serviram de parâmetro de comparação com os resultados obtidos pelo sistema desenvolvido nos testes em modelo físico.

Na Figura 5.9 também é possível visualizar 4 esferas brancas, assinaladas em vermelho, também posicionadas sobre o convés da embarcação. Essas esferas são utilizadas pelo sistema Qualisys® para a medição dos deslocamentos.



Figura 5.9 – Alvos marcadores do sistema Qualisys® de medição de deslocamentos, destacados por círculos vermelhos, montados sobre a embarcação utilizada nos testes em modelo físico reduzido

A Figura 5.10 mostra ambos os sistemas trabalhando em sincronismo sobre o modelo físico reduzido com ação de ondas. A montagem simultânea de ambos os sistemas garante que a medição, para cada sistema, seja do mesmo deslocamento e no mesmo instante de tempo em que ele ocorre e, dessa forma, a comparação dos valores medidos é plausível para avaliar a divergência de medição do sistema desenvolvido em relação ao sistema Qualisys®.

Figura 5.10 – Sistema desenvolvido e sistema Qualisys® trabalhando em sincronismo durante ensaio em modelo físico



Fonte: Autor

6 **RESULTADOS**

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de comparação do sistema de monitoramento de deslocamentos desenvolvido com o sistema Qualisys®, descrito no capítulo 5.6. A comparação dos valores medidos por ambos os sistemas é realizada por meio de ferramentas estatísticas, que medem a disparidade dos deslocamentos observados.

Os resultados são classificados em dois cenários de ondas, conforme descrito na Tabela 5.2, considerando o comportamento do sistema para ondas regulares e irregulares.

6.1 Embarcação Atracada sob Ação de Ondas Regulares

A embarcação atracada é submetida à um cenário sob ação de ondas regulares onde, a onda regular gerada em modelo reduzido com escala de 1:170, apresenta amplitude de 14,71 milímetros e período de pico de 1,08 segundos. Esses valores transportados para protótipo, representam ondas regulares com amplitude 2,5 metros e período de pico de 14 segundos.

6.1.1 Deslocamentos Translacionais para Embarcação Atracada sob Ação de Ondas Regulares

Os deslocamentos translacionais (*surge*, *sway* e *heave*) medidos pelo sistema de monitoramento desenvolvido e pelo sistema Qualisys® são apresentados na Figura 6.1. A Figura 6.1 apresenta o ensaio de ondas completo, com duração de 320 segundos em modelo.





Fonte: Autor

Para uma melhor avaliação visual da aderência entre os deslocamentos medidos pelo sistema desenvolvido e pelo sistema Qualisys®, a Figura 6.2 apresenta um período de 10 segundos dos dados, possibilitando uma melhor visualização da diferença entre as medições de cada sistema.

Figura 6.2 – Registro gráfico comparativo dos deslocamentos translacionais medidos pelo sistema desenvolvido e pelo sistema Qualisys® para a embarcação atracada sob ação de ondas regulares



Fonte: Autor

A Tabela 6.1 apresenta a análise estatística do deslocamento translacional em *surge* medidos para cada sistema de medição utilizado, também o erro percentual ²entre as análises. As tabelas Tabela 6.2 e Tabela 6.3 apresentam os mesmos resultados para os deslocamentos translacionais em *sway* e *heave*, respectivamente.

Tabela 6.1 – Comparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema Qualisys® para o deslocamento translacional em surge sob a ação de ondas regulares.

| Surge (mm) | Sistema Desenvolvido | Sistemas Qualisys® | Erro % |
|---------------|----------------------|--------------------|--------|
| Média | 0,859 | 0,856 | -0,32% |
| RMS | 1,500 | 1,631 | 8,01% |
| Desvio Padrão | 1,231 | 1,389 | 11,38% |
| Amplitude | 9,338 | 10,612 | 12,00% |

Fonte: Autor

 $^{^2}$ As ferramentas estatísticas utilizadas são apresentadas no APÊNDICE A

| Sway (mm) | Sistema Desenvolvido | Sistemas Qualisys® | Erro % |
|---------------|----------------------|--------------------|--------|
| Média | 12,753 | 13,026 | 2,10% |
| RMS | 13,133 | 13,455 | 2,39% |
| Desvio Padrão | 3,141 | 3,370 | 6,81% |
| Amplitude | 22,039 | 23,493 | 6,19% |

Tabela 6.2 - Comparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema Qualisys®para o deslocamento translacional em sway sob a ação de ondas regulares

Tabela 6.3 - Comparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema Qualisys® para o deslocamento translacional em heave sob a ação de ondas regulares

| Heave (mm) | Sistema Desenvolvido | Sistemas Qualisys® | Erro % |
|---------------|----------------------|--------------------|--------|
| Média | -1,482 | -1,596 | 7,14% |
| RMS | 2,078 | 2,265 | 8,25% |
| Desvio Padrão | 1,457 | 1,608 | 9,35% |
| Amplitude | 6,628 | 6,644 | 0,24% |

Fonte: Autor

Para os deslocamentos translacionais da embarcação atracada sob a ação de ondas regulares, os erros percentuais entre as análises estatísticas de ambos os sistemas de medição apresentam valor máximo de 12%, demonstrando boa aderência entre as curvas.

Entretanto, uma melhor apresentação da aderência dos dados é a utilização de métodos matemáticos de avaliação de semelhança das curvas, no caso, foram utilizados os métodos *Relative Mean Absolute Error (RMAE)* e o coeficiente R². Os valores para os 3 métodos matemáticos para os deslocamentos translacionais para a embarcação atracado sob a ação de ondas regulares são apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Métodos matemáticos de avaliação de semelhança das medições para deslocamentos translacionais para a embarcação atracada sob ação de ondas regulares

| Ondas Regulares | RMAE | R ² |
|------------------------|------|----------------|
| Surge (mm) | 0,16 | 0,980 |
| Sway (mm) | 0,03 | 0,987 |
| Heave (mm) | 0,26 | 0,860 |

Fonte: Autor

Os valores de *RMAE* são próximos de zero e o valor de R², próximo de 1, o que demonstra boa aderência entre as curvas. O pior resultado provém do deslocamento em *heave*, pois, esse deslocamento é medido através do fator de escala da imagem do marcador e não da posição do marcador na imagem.

6.1.2 Deslocamentos Rotacionais para Embarcação Atracada sob Ação de Ondas Regulares

Os deslocamentos rotacionais (*roll, pitch* e *yaw*) medidos pelo sistema de monitoramento desenvolvido e pelo sistema Qualisys® são apresentados na Figura 6.3. A Figura 6.3 apresenta o ensaio de ondas completo, com duração de 320 segundos em modelo.

Figura 6.3 - Deslocamentos rotacionais medidos pelo sistema desenvolvido e pelo sistema Qualisys® para a embarcação atracada sob ação de ondas regulares



Fonte: Autor

Assim como nos deslocamentos translacionais, para uma melhor avaliação visual da aderência dos valores de deslocamentos rotacionais medidos, a Figura 6.4 apresenta um período de 10 segundos dos valores medidos pelo sistema desenvolvido e pelo sistema Qualisys®.

Figura 6.4 - Registro gráfico comparativo dos deslocamentos rotacionais medidos pelo sistema desenvolvido e pelo sistema Qualisys® para a embarcação atracada sob ação de ondas regulares.



Fonte: Autor

As tabelas Tabela 6.5, Tabela 6.6 e Tabela 6.7 apresentam a análise estatística dos deslocamentos rotacionais *roll, pitch* e *yaw,* respectivamente.

Tabela 6.5 - Comparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema Qualisys®para o deslocamento rotacional em roll sob a ação de ondas regulares.

| Roll (°) | Sistema Desenvolvido | Sistemas Qualisys® | Erro % |
|---------------|----------------------|--------------------|---------|
| Média | 0,244 | 0,209 | -16,74% |
| RMS | 0,825 | 0,845 | 2,33% |
| Desvio Padrão | 0,788 | 0,819 | 3,69% |
| Amplitude | 3,460 | 3,307 | -4,64% |

Fonte: Autor

Tabela 6.6 - Comparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema Qualisys® para o deslocamento rotacional em pitch sob a ação de ondas regulares.

| Pitch (°) | Sistema Desenvolvido | Sistemas Qualisys® | Erro % |
|---------------|----------------------|--------------------|---------|
| Média | 0,073 | -0,066 | 210,84% |
| RMS | 0,481 | 0,471 | -2,12% |
| Desvio Padrão | 0,476 | 0,472 | -0,94% |
| Amplitude | 2,457 | 1,490 | -64,89% |

Fonte: Autor

Tabela 6.7 - Comparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema Qualisys® para o deslocamento rotacional em yaw sob a ação de ondas regulares.

| Yaw (°) Sistema Desenvolvido | | Sistemas Qualisys® | Erro % |
|------------------------------|--------|--------------------|--------|
| Média | -0,274 | -0,272 | -0,54% |
| RMS | 1,021 | 0,996 | -2,53% |
| Desvio Padrão | 0,984 | 0,958 | -2,69% |
| Amplitude | 3,910 | 3,636 | -7,52% |

Fonte: Autor

Ao analisar os erros percentuais das comparações estatísticas, os deslocamentos rotacionais apresentam erros muito maiores do que os deslocamentos translacionais, entretanto, alguns deslocamentos apresentam valores muito pequenos, próximos à precisão do sistema.

Os valores para os 3 métodos matemáticos utilizados para avaliar a semelhança entre os sistemas de medição para os deslocamentos rotacionais são apresentados Tabela 6.8.

| Ondas Regulares | RMAE | R ² |
|------------------------|------|----------------|
| Roll (°) | 0,42 | 0,790 |
| Pitch (°) | 0,76 | 0,451 |
| Yaw (°) | 0,11 | 0,987 |

Tabela 6.8 - Métodos matemáticos de avaliação de semelhança das medições para deslocamentos rotacionais para a embarcação atracada sob ação de ondas regulares.

Para o deslocamento em *yaw*, os valores de RMAE são próximos de zero e o valor de R² muito próximo de 1, isso demonstra boa aderência. Entretanto, os deslocamentos em *roll* e *pitch* apresentam menor aderência do que os demais deslocamentos, incluindo os deslocamentos translacionais. Esses dois deslocamentos rotacionais são medidos por sensores inerciais e não pelo uso de imagens, e por esse motivo apresentam menor aderência nos resultados.

6.2 Embarcação Atracada sob Ação de Ondas Irregulares

A embarcação atracada é submetida à um cenário sob ação de ondas irregulares utilizando o espectro de ondas *JONSWAP* com altura significativa de 8,82 mm e período de pico de 0,92 segundos em valores de modelo reduzido. Esses valores transportados para protótipo, representam ondas irregulares com altura significativa 1,5 metros e período de pico de 12 segundos.

6.2.1 Deslocamentos Translacionais para Embarcação Atracada sob Ação de Ondas Irregulares

Os deslocamentos translacionais (*surge, sway* e *heave*) medidos ambos os sistemas sob ação de ondas irregulares são apresentados na Figura 6.5. A Figura 6.5 apresenta o ensaio de ondas irregulares completo, com duração de 280 segundos em modelo.

Figura 6.5 - Deslocamentos translacionais medidos pelo sistema desenvolvido e pelo sistema Qualisys® para a embarcação atracada sob ação de ondas irregulares



Para uma melhor avaliação visual da aderência entre os deslocamentos medidos pelo sistema desenvolvido e pelo sistema Qualisys®, a Figura 6.6 apresenta um período de 10 segundos dos dados, possibilitando uma melhor visualização da diferença entre as medições de cada sistema.

Figura 6.6 – Registro gráfico comparativo dos deslocamentos translacionais medidos pelo sistema desenvolvido e pelo sistema Qualisys® para a embarcação atracada sob ação de ondas irregulares



Fonte: Autor

Assim como no capítulo 6.1.1, as tabelas Tabela 6.9, Tabela 6.10 e Tabela 6.11 apresentam a análise estatística dos deslocamentos translacionais.

| Surge (mm) | Sistema Desenvolvido | Sistemas Qualisys® | Erro % |
|---------------|----------------------|--------------------|--------|
| Média | 0,942 | 0,946 | 0,39% |
| RMS | 1,153 | 1,192 | 3,27% |
| Desvio Padrão | 0,664 | 0,725 | 8,40% |
| Amplitude | 3,841 | 4,196 | 8,47% |

Tabela 6.9 - Comparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema Qualisys® para o deslocamento translacional em surge sob a ação de ondas irregulares.

Tabela 6.10 - Comparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema Qualisys®

| para o | deslocamento | translacional | em sway | sob a | ação de | ondas | irregul | ares |
|--------|--------------|---------------|---------|-------|---------|-------|---------|------|
| - | | | • | | 3 | | 0 | |

| Sway (mm) | Sistema Desenvolvido | Sistemas Qualisys® | Erro % |
|---------------|----------------------|--------------------|--------|
| Média | 1,742 | 1,751 | 0,54% |
| RMS | 2,131 | 2,178 | 2,17% |
| Desvio Padrão | 1,228 | 1,296 | 5,22% |
| Amplitude | 6,810 | 7,492 | 9,10% |

Fonte: Autor

Tabela 6.11 - Comparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema Qualisys® para o deslocamento translacional em heave sob a ação de ondas irregulares.

| Heave (mm) | Sistema Desenvolvido | Sistemas Qualisys® | Erro % |
|---------------|----------------------|--------------------|--------|
| Média | -0,685 | -0,689 | 0,55% |
| RMS | 0,842 | 0,862 | 2,25% |
| Desvio Padrão | 0,491 | 0,518 | 5,32% |
| Amplitude | 2,883 | 2,945 | 2,09% |

Fonte: Autor

Assim como as medições de deslocamentos sob a ação de ondas regulares, os erros percentuais entre as análises estatísticas de ambos os sistemas têm valores baixos, menores que 10%, demonstrando, novamente, boa aderência entre as curvas, segundo a classificação de (Walstra, Van RIJN, Blogg, & Van Ormondt, 1999).

Os valores para os 3 métodos matemáticos utilizados para avaliar a semelhança entre os sistemas de medição para os deslocamentos translacionais sob a ação de ondas irregulares são apresentados na Tabela 6.12.

| Ondas Irregulares | RMAE | R ² |
|--------------------------|------|-----------------------|
| Surge (mm) | 0,13 | 0,956 |
| Sway (mm) | 0,18 | 0,913 |
| Heave (mm) | 0,28 | 0,751 |

Tabela 6.12 – Métodos matemáticos de avaliação de semelhança das medições para deslocamentos translacionais para a embarcação atracada sob ação de ondas irregulares.

Novamente, semelhantes as medições de deslocamentos sob a ação de ondas regulares, os valores de RMAE são próximos de muito próximos de zero e o valor de R² muito próximo de 1, com pior resultado no deslocamento em *heave*.

6.2.2 Deslocamentos Rotacionais para Embarcação Atracada sob Ação de Ondas Irregulares

Os deslocamentos rotacionais (*roll*, *pitch* e *yaw*) medidos pelo sistema de monitoramento desenvolvido e pelo sistema Qualisys® são apresentados na Figura 6.7. A Figura 6.7 apresenta o ensaio de ondas irregulares completo, com duração de 280 segundos em modelo.

Figura 6.7 - Deslocamentos rotacionais medidos pelo sistema desenvolvido e pelo sistema Qualisys® para a embarcação atracada sob ação de ondas irregulares



Fonte: Autor

Assim como nos deslocamentos translacionais, para uma melhor avaliação visual da aderência dos valores de deslocamentos rotacionais medidos a Figura 6.8 apresenta um período de 10 segundos dos dados coletados.



Figura 6.8 - Registro gráfico comparativo dos deslocamentos rotacionais medidos pelo sistema desenvolvido e pelo sistema Qualisys® para a embarcação atracada sob ação de ondas irregulares

As tabelas Tabela 6.13, Tabela 6.14 e Tabela 6.15 apresentam respectivamente os valores estatísticos das medições e o erro percentual em relação ao sistema Qualisys® para *roll*, *pitch* e *yaw*.

Tabela 6.13 - Comparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema Qualisys® para o deslocamento rotacional em roll sob a ação de ondas irregulares.

| Roll (°) | Sistema Desenvolvido | Sistemas Qualisys® | Erro % |
|---------------|----------------------|--------------------|----------|
| Média | 0,065 | 0,083 | 21,46% |
| RMS | 0,324 | 0,229 | -41,45% |
| Desvio Padrão | 0,317 | 0,213 | -48,59% |
| Amplitude | 2,192 | 1,003 | -118,56% |

Fonte: Autor

Tabela 6.14 - Comparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema Qualisys®

para o deslocamento rotacional em pitch sob a ação de ondas irregulares.

| Pitch (°) | Sistema Desenvolvido | Sistemas Qualisys® | Erro % |
|---------------|----------------------|--------------------|----------|
| Média | 0,012 | -0,004 | 413,15% |
| RMS | 0,210 | 0,100 | -109,68% |
| Desvio Padrão | 0,210 | 0,100 | -109,50% |
| Amplitude | 1,385 | 0,360 | -284,18% |

Fonte: Autor

| Yaw (°) | Sistema Desenvolvido | Sistemas Qualisys® | Erro % |
|---------------|----------------------|--------------------|--------|
| Média | 0,027 | 0,027 | 2,86% |
| RMS | 0,129 | 0,136 | 4,72% |
| Desvio Padrão | 0,126 | 0,133 | 4,80% |
| Amplitude | 0,801 | 0,753 | -6,27% |

Tabela 6.15 - Comparação da análise estatística do sistema desenvolvido com o sistema Qualisys® para o deslocamento rotacional em yaw sob a ação de ondas irregulares.

Assim como as medições de deslocamentos sob a ação de ondas regulares, os deslocamentos rotacionais apresentam erros maiores do que os deslocamentos translacionais, com valores bem maiores que 10%. Porém seus valores absolutos têm amplitudes muito menores do que as medições de deslocamentos sob a ação de ondas regulares, dificultando a medição pois se aproxima da precisão do sensor.

Os valores para os 3 métodos matemáticos utilizados para avaliar a semelhança entre os sistemas de medição para os deslocamentos rotacionais sob a ação de ondas irregulares são apresentados na Tabela 6.16.

Tabela 6.16 - Métodos matemáticos de avaliação de semelhança das medições para deslocamentos rotacionais para a embarcação atracada sob ação de ondas irregulares.

| Ondas Irregulares | RMAE | R ² |
|--------------------------|------|-----------------------|
| Roll (°) | 0,96 | 0,437 |
| Pitch (°) | 1,82 | 0,043 |
| Yaw (°) | 0,36 | 0,824 |

Fonte: Autor

Novamente, para o deslocamento em *yaw*, os valores de RMAE são próximos são próximos de zero e o valor de R² próximo de 1, isso demonstra boa aderência. Entretanto, para os deslocamentos de roll e pitch, os valores são de menor aderência, com amplitudes próximas de zero.

6.3 Resultados da Comparação com outro Sistema de Medição de Deslocamentos

Para uma avaliação completa sobre a comparação do sistema de medição de deslocamentos desenvolvido com o sistema Qualisys®, a Tabela 6.17 apresenta uma síntese dos métodos matemáticos de avaliação de semelhanças para os deslocamentos apresentados nos capítulos 6.1 e 6.2.

Tabela 6.17 – Síntese dos métodos matemáticos de avaliação de semelhança das medições para deslocamentos translacionais e rotacionais para a embarcação atracada sob ação de ondas regulares

e irregulares.

| | Deslocamento | RMAE | R ² |
|--------------------|--------------|------|----------------|
| | Surge (mm) | 0,16 | 0,98 |
| | Sway (mm) | 0,03 | 0,987 |
| Ondes Desulenes | Heave (mm) | 0,26 | 0,86 |
| Ondas Regulares | Roll (°) | 0,42 | 0,79 |
| | Pitch (°) | 0,76 | 0,451 |
| | Yaw (°) | 0,11 | 0,987 |
| | Surge (mm) | 0,13 | 0,956 |
| | Sway (mm) | 0,18 | 0,913 |
| Onder Innerulance | Heave (mm) | 0,28 | 0,751 |
| Oliuas irregulares | Roll (°) | 0,96 | 0,437 |
| | Pitch (°) | 1,82 | 0,043 |
| | Yaw (°) | 0,36 | 0,824 |

Fonte: Autor

Analisando a Tabela 6.17 é notável que o deslocamento em *pitch* apresenta os piores valores para os métodos matemáticos em ambos os cenários de ondas. O deslocamento em *roll* também apresenta resultados ruins. Para os demais deslocamentos, o sistema desenvolvido apresenta boa aderência as medições realizadas pelo sistema Qualisys®.

7 CONCLUSÕES

O presente trabalho concluiu o seu objetivo de desenvolver um sistema que permite avaliar o potencial risco de acidentes em terminais portuários decorrentes de deslocamentos excessivos de embarcações atracadas, pois, apresentou uma ferramenta de avaliação das condições de operação do terminal através dos deslocamentos medidos em simuladores experimentais consagrados, que são os modelos físicos hidráulicos em escala reduzida.

Para atender o objetivo geral, desenvolveu-se um novo sistema de monitoramento de deslocamentos de embarcações atracadas para simuladores experimentais que combina medições de deslocamentos via análise de imagens, com medições de deslocamentos via sensores inerciais. Devido à combinação de métodos de medição, o sistema apresenta um menor custo computacional do que sistemas que realizam medições apenas via análise de imagens, uma vez que, necessitam um custo computacional maior devido à separação dos deslocamentos rotacionais dos translacionais. Desta forma, o sistema desenvolvido no presente trabalho mede quatro dos seis deslocamentos (*surge, sway, heave* e *yaw*) por análise de imagens e, os dois deslocamentos restantes (*roll e pitch*), são medidos por sensores inerciais (acelerômetro e giroscópio).

Nos testes do sistema em ambiente controlado, foi encontrada uma precisão para os deslocamentos medidos por análise de imagem de aproximadamente: 0,08 mm para *surge* e *sway*, 0,17 mm para *heave* e 0,05 graus para *yaw*. Para avaliar a precisão dos deslocamentos medidos por sensores inerciais (*roll* e *pitch*), o conjunto foi avaliado sob a ação de um movimento senoidal onde, apresenta bons resultados ($R^2 > 0,9$) para frequências entre 0,1 Hz e 2 Hz e, amplitudes maiores do que 2 graus.

Para verificação do sistema desenvolvido foi utilizado um modelo físico reduzido de um terminal portuário, com escala 1:170, que simula o sistema de amarração de navios atracados sob ação de diferentes condições ambientais. As medições realizadas pelo sistema desenvolvido foram comparadas com os resultados captados simultaneamente pelo sistema Qualisys®. Foram realizados testes em condições de ondas regulares e irregulares, apresentando resultados comparativos muito próximos entre os dois sistemas.

Para *surge* e *sway*, deslocamentos em que o sistema apresenta maior precisão, a correspondência dos valores, em relação à Qualisys, apresentou valores de RMAE < 0,18, resultado classificado como "Excelente" segundo a classificação de (Walstra, Van RIJN, Blogg, & Van Ormondt, 1999). Os deslocamentos em *heave* apresentaram RMAE < 0,28 e *yaw*

apresentaram RMAE < 0,36, ambos os resultados classificados como "Bom", segundo a mesma classificação.

As recomendações da PIANC para deslocamentos máximos de graneleiros com carregadores de esteira abrangem 3 deslocamentos: *surge*, *sway* e *yaw*. Isto porque esses deslocamentos são os mais relevantes para esse tipo de embarcação e carregador, o mesmo utilizado no estudo de caso do presente trabalho. Desta forma, quando avaliadas as recomendações da PIANC em modelo físico, o sistema desenvolvido apresentou, quando comparados aos resultados do sistema Qualisys®, resultados "excelentes" em *surge* e *sway*, e "bom" em *yaw*. Esses resultados demonstram a aplicabilidade do sistema desenvolvido para os referidos estudos em modelo físico.

Os piores resultados dos testes foram encontrados nos deslocamentos em *roll* e *pitch*, com RMAE próximos de 1, resultados considerados ruins pela classificação de (Walstra, Van RIJN, Blogg, & Van Ormondt, 1999). Estes deslocamentos, quando avaliados em testes em laboratório, apresentaram medição mínima de 2°, ou seja, mesmo que o sistema apresente precisão de leitura de 0,5°, ele se demonstrou incapaz de medir deslocamentos com amplitudes menores que 2°. Entretanto, vale destacar que deslocamentos menores do que este não tem grande interesse prático, pois nas operações de carregamento e descarregamento de navios graneleiros, por exemplo, assim como de outros tipos de navios, não representam problemas para a eficiência ou segurança da operação.

Os valores de RMAE próximos de 1 para os deslocamentos em *roll* e *pitch*, nos ensaios em modele físico, são justificados pois, o sistema Qualisys® apresentou resultados em *roll* e *pitch* com amplitudes angulares menores que 2° , faixa angular onde o sistema desenvolvido não é capaz de medir com precisão. Este fato é observável, ao comparar os erros obtidos em *pitch*, para as condições de ondas regulares (RMAE < 0,76) e ondas irregulares (RMAE < 1,82). As ondas irregulares apresentam menor amplitude de deslocamentos e, consequentemente, maior erro comparativo em relação as ondas regulares.

Com os resultados obtidos, tanto nos testes em ambiente controlado como na comparação com o sistema Qualisys® em modelo físico reduzido, é possível concluir que o objetivo específico desse trabalho de desenvolver um sistema de monitoramento dos deslocamentos (6 graus de liberdade) para modelos físicos em escala reduzida de embarcações atracadas em terminais portuários sujeitos à ação de ondas foi concluído. Apesar dos erros, em comparação ao sistema Qualisys®, para *roll* e *pitch*, o sistema atende a precisão para medições de deslocamentos apresentadas na PIANC.

Os problemas encontrados na aplicação do sistema desenvolvido são:

- O sistema se mostrou incapaz de medir deslocamentos menores que 2 graus em *roll* e *pitch*. Essas medidas também foram os que apresentaram piores resultados comparativos, uma possível explicação, é a capacidade do sensor inercial acoplado utilizado;
- Com consequência da utilização de análise do fator de escala de imagem, os deslocamentos em *heave* apresentaram menor precisão em comparação aos demais deslocamentos translacionais, ainda que, os resultados foram considerados "bons" segundo a classificação do RMAE;
- Os deslocamentos em *yaw* apresentaram pior resultado comparativo quando submetidos a ondas irregulares. Em virtude das mudanças abruptas geradas pelas ondas irregulares, os deslocamentos chegaram próximos ao limite de leitura e, consequentemente, diminuíram a precisão dos resultados. Entretanto, os valores ainda apresentam precisão suficiente para utilização, com resultados considerados "bons" pela classificação do RMAE.

Desta forma, conclui-se que o sistema desenvolvido poderá ser utilizado nos estudos de embarcações atracadas, acrescentando novos recursos que aproximem cada vez mais os testes em simuladores experimentais ao ambiente real, fornecendo subsídio aos projetos de engenharia.

Por fim, como sugestão para pesquisas futuras neste tema, destaca-se que o sistema desenvolvido no presente trabalho pode ser aperfeiçoado, utilizando-se sensores mais precisos para melhorar as medições dos deslocamentos em *roll* e *pitch*, ou até mesmo, visando o desenvolvimento de uma forma alternativa de captura desses deslocamentos, com novos tipos de sensores.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, A. B. (1994). NBR13209 - Planejamento portuário - Obras de acostagem.

- Alfredini, P. (1992). 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.
- Alfredini, P., & Arasaki, E. (2014). Engenharia Portuária (Vol. 1). São Paulo: Blücher.
- ASCE American Society of Civil Engineers. (2014). Mooring of Ships to Piers an Wharves. Asce Manuals and Reports on Engenieering Pratice nº 129.
- Benetazzo, A. (2011). Accurate measurement of six Degree Of Freedom small-scale ship motion through analysis of one camera images.
- Bernardino, J. C. (2015). Abordagem experimental para avaliacao de manobras em modelos fisicos. Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia, São Paulo, SP.
- Briggs, M. J., & Melito, I. (2008). *Barbers Point Harbor, Hawaii, Jetty Modification Study*. US Army Corps of Engineers, Honolulu.
- Bruun, P. (1981). Breakwaters vs. mooring (Vol. The Dock and Harbour Authority Vol. XLII.).
- Caarullo, A., & Parvis, M. (2001). An ultrasonic sensor for distance measurement in automotive applications. *IEEE Sensors J., vol. 1, no. 3*, (pp. 143-147).
- Cramer, H., & Krueger, S. (2001). *Numerical capsizing simulations and consequences for ship design.* JSTG, Spinger.
- Cucchiara, R., Piccardi, M., & Mello, P. (2000). Image analysis and rule-based reasoning for a traffic monitoring system. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, *vol. 1, no. 4*, (pp. 119-130).
- Esferra, R. (2019). Avaliação crítica do emprego de métodos análitico e de modelagem física para estimar esforços nos cabos de amarração de embarcações atracadas sob a ação de correntes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- European Maritime Safety Agency. (2018). *Annual overview of marine casualties and incidents* 2018. European Maritime Safety Agency, Lisboa, Portugal.
- Fossum, E. R. (1997). CMOS image sensors: Electronic camera-on-a-chip. *IEEE Trans. Electron Devices, vol. 44, no. 10,,* (pp. 1689–1698).
- Gulden, P., Becker, D., & Vossiek, M. (2004). Novel optical distance sensor based on MSM technology. *IEEE Sensors J., vol. 4, no. 5,* (pp. 612-618).

- HUGHES, S. (2005). *Physical models and laboratory technique in Costal Engineering*. USA: World Scientific Publishing.
- ITF, I. T. (2015). The Impact of Mega-Ships.
- ITTC. (1999). The Loads and Responses Commitee: Final Report and Recommendations to the 22nd ITTC. Seoul e Shanghai.
- ITTC, I. T. (2008). The Ocean Engineering Committee: Final Report and Recommendations to the 25th ITTC. Fukuoka, Japan.
- ITTC, T. I. (1984). The Loads and Responses Comitee: Final Report and Recommendations to the 17th ITTC. Goreborg, Sweden.
- Journée, J., & Massie, W. (2001). OFFSHORE HYDROMECHANICS. Delft.
- Kieviet, J. (2015). A non-intrusive video tracking method to measure movement of a moored vessel. Stellenbosch University, South Africa.
- Kim, J. (2006). A finite-element computation for three-dimensional problems of sloshing in LNG tank. Proceedings of the 25th OMAE Conference. Hamburg, Germany.
- Klimkov, Y. M. (1996). A laser polarmetric sensor for measuring angular displacement of objects. *Proc. Eur. Conf. Lasers and Electro-Optics*, (pp. 190-190).
- LabView. (2015). Fonte: National Instruments: www.ni.com
- Lee, W., & Kim, W. (1999). Self-organization neural network for multiple texture image segmentation. *Proc. IEEE Region 10 Conf., vol. 1,*, (pp. 730-733).
- Longuet-Higgins, M. S. (1963). The generation of capillary waves by steep gravity waves. Jornal of Fluid Mechanics.
- Lyu, H., & Albertson, M. (1959). Significance and application of Froude and Reynolds Numbers as criteria for similitude. Colorado: Fort Collins.
- Mertzios, B., & Tsirikolias, K. (2001). Applications of coordinate logic filters in image analysis and pattern recognition. *Proc. Int. Symp. Image and Signal Processing and Analysis*, (pp. 125-130).
- Mizuguchi, Y., Tsujioka, K., & Horikawa, K. (s.d.). On wave height transformation in the surf zone. *Proc. 25th Japanese Int. Conf. on Coastal, JSCE*, (pp. 155-159).
- Novak, P., & Cabelka, J. (1981). *Models in Hydraulic Engineering: Physical Principles and Design Applications*. London: Pitman Publishing.
- OCIMF. (2013). *Mooring Equipment Guidelines*. Oil Companies International Marine Forum, Bermuda.

- Paschalakis, S., & Lee, P. (1999). Pattern recognition in grey level images using moment based invariant features. *Proc. Int. Conf. Image Processing and its Applications vol. 1*, (pp. 245-249).
- PIANC. (1995). Criteria for movements of moored ships in harbours: a practical guide. Permanent International Association of Navigational Congresses, Report of working group PTC II-24.
- Rosa Santos, P., Veloso Gomes, F., Taveira Pinto, F., Guedes Soares, C., Fonseca, N., Alfredo Santos, J., . . . Brógueira Dias, E. (2008). Physical model study of the behaviour of an oil tanker moored at a jetty. *Proceedings of the Second International Conference on the Application of Physical Modeling to Port and Coastal Protection CoastLab.* Bari, Italy.

Sharp, J. J. (1981). Hydraulic Modelling. London: Butterwoths.

- Silva, R. M. (2014). *Caracterização de estruturas portuárias*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- Sviridov, S., & Sterlyagov, M. (1994). Sea surface slope statistics measured by a laser sensor. Proc. Ocean Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation, (pp. I/900 - I/905).
- Swiegers, P. B. (2011). Calculation on the forces on a moored ship. *Stellenbosch University* (p. 374). South Africa.
- Thoresen, C. A. (2014). Port Designer's Handbook (3 ed.). Institution of Civil Engineer.
- UK P&I Club. (2009). Mooring Incidents.
- UNCTAD, U. N. (2012). Review of Maritime Transport.
- Walstra, D., Van RIJN, L., Blogg, H., & Van Ormondt, M. (1999). Evaluation of a hydrodynamic area model based on the COAST3D data at Teignmouth. *Proceedings of 4th Coastal Dynamics Conference*. Wallingford, United Kingdom.
- Wavewatch III. (2016). User manual and system documentation o WAVEWATCH III. The WAVEWATCH III Development Group (WWW3DG).
- Willmott, C. (1982). On the validation of models. *Physical Geography*.
- Xin, L. (2006). Research on motion response of soft yoke mooring FPSO System. Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering (ISOPE) Conference. São Francisco, USA.
- Yan, H. (2001). Image analysis for digital media applications. *IEEE Comput. Graph. Appl., vol.* 21, no. 1, (pp. 18-21).

Yasuda, A., Kuwashima, S., & Kanai, Y. (1985). A shipborne-type wave-height mater for oceangoing vessels, using microwave Doppler radar. *IEEE J. Ocean. Eng., vol. OE-10*, no. 2,, (pp. 138-143). Para a quantificação dos erros entre duas series de dados, é possível aplicar-se uma série de índices e escores estatísticos, os quais são usados como ferramentas de avaliação da acurácia dos experimentos e validação dos dados comparativos.

O procedimento de validação de um modelo consiste em comparar seus resultados com resultados provenientes de outro conjunto de dados, utilizando índices estatísticos. O presente trabalho fez uso de dois desses índices.

A1 - Erro absoluto médio

Em estatística, o método *Mean Absolute Error (MAE)*, é uma medida da diferença entre duas variáveis contínuas. Suponha que X e Y são variáveis de observações que expressam o mesmo fenômeno, por exemplo, que Y seja uma técnica de medição e X uma técnica alternativa de medição. O *MAE* (equação 17) representa a distância vertical média entre cada ponto e a linha de identidade (X = Y) e, também, a distância horizontal média entre cada ponto e a linha de identidade (X = Y).

$$MAE = \sum_{i=1}^{n} \frac{|y_i - x_i|}{n}$$
(17)

Esse método também pode ser calculado de forma relativa, ou seja, o erro relativo para cada ponto de medição. O *Relative Mean Absolute Error (RMAE)*, erro absoluto médio relativo (equação 18) é definido como:

$$RMAE = \sum_{i=1}^{n} \frac{|y_i - x_i|}{|y_i|}$$
(18)

O RMAE ideal deve corresponder a zero, e a qualidade da comparação dos valores possui uma classificação de acordo com seu valor (Walstra, Van RIJN, Blogg, & Van Ormondt, 1999), conforme a Tabela 8.1
| RMAE | Classificação |
|--------------------|---------------|
| RMAE < 0,20 | Excelente |
| 0,20 < RMAE < 0,40 | Bom |
| 0,40 < RMAE < 0,70 | Razoável |
| 0,70 < RMAE < 1,00 | Ruim |
| RMAE > 1,00 | Péssimo |

Tabela 8.1 – Classificação da qualidade dos resultados do modelo, segundo os valores e RMAE

Fonte: Walstra et al. (1999)

A2 - Coeficiente R²

Outra medida da diferença entre duas variáveis contínuas, é o chamado Coeficiente de determinação (R^2). O R^2 varia entre 0 e 1, e expressa a quantidade da variância entre as duas observações *X* e *Y*. (Willmott, 1982). O R^2 é definido por (equação 19):

$$R^{2} = 1 - \sum_{i=1}^{n} \frac{(y_{i} - x_{i})^{2}}{(y_{i} - \bar{y})^{2}}$$
(19)

O valor ideal para o R² deve ser igual a 1.