UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

JOSÉ CARLOS DE MELO BERNARDINO

Abordagem experimental para avaliação de manobras de
navios em modelos físicos de espaços náuticos

São Paulo
2015

JOSÉ CARLOS DE MELO BERNARDINO

Abordagem experimental para avaliação de manobras de navios em
modelos físicos de espaços náuticos

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título
de Doutor em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Hidráulica

Orientador: Prof. Dr. Paolo
Alfredini

São Paulo

2015

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

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

São Paulo, _____ de _____ de 2015.

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

CATALOGAÇÃO DA PUBLICAÇÃO

Bernardino, José Carlos de Melo

Abordagem experimental para avaliação de manobras de navios em modelos físicos de espaços náuticos / J. C. M. Bernardino -- versão corr. – São Paulo, 2015.

300 p.

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

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

Nome: BERNARDINO, José Carlos de Melo

Título: Abordagem experimental para avaliação de manobras de navios em modelos físicos de espaços náuticos

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Doutor em
Engenharia

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Dedico este trabalho a
Minha esposa Gabriela
Meus pais Clarinda e José Carlos
Minhas filhas Dolly, Sandy e Mel

AGRADECIMENTOS

Ao meu amigo e orientador Prof. Dr. Paolo Alfredini dedico meu especial e sincero agradecimento por todo incentivo, empenho e paciência dispensados durante o período de desenvolvimento desta tese. Prof. Paolo, se os seus incontestáveis conhecimentos sobre Engenharia Hidráulica e Portuária são uma referência no meio técnico nacional e internacional, sou testemunha de que mais notável ainda é a sua dedicação na arte de transferir estes conhecimentos àqueles que têm a honra de serem seus alunos.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, em especial, aos professores e colegas do Departamento de Hidráulica, agradeço pela oportunidade de realização do curso de doutorado.

Aos colegas da área de Engenharia e Operação Portuária da empresa VALE, que de muitas maneiras contribuíram para o desenvolvimento da pesquisa que culminou nesta tese, fica registrado meu agradecimento.

A toda equipe técnica do Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – LHEPUSP e da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica – FCTH, da qual tenho a honra de fazer parte desde 1998, meus calorosos agradecimentos por todo apoio recebido ao longo destes anos na minha formação como engenheiro, e por toda dedicação no desenvolvimento de suas nobres atividades de pesquisa científica, que tornaram possíveis a elaboração do presente trabalho.

RESUMO

BERNARDINO, J. C. M. Abordagem experimental para avaliação de manobras de navios em modelos físicos de espaços náuticos. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

Em um mercado de comércio internacional cada vez mais competitivo existe a necessidade de a infraestrutura do sistema portuário brasileiro modernizar-se, tornando-se mais eficiente do ponto de vista operacional e com capacidade para receber navios de maior porte. Neste cenário, as técnicas de projeto de espaços náuticos precisam ser revistas, utilizando-se de ferramentas mais sofisticadas que permitam otimizar os dimensionamentos sem deixar de lado as questões da eficiência e, principalmente, da segurança operacional. O presente trabalho apresenta uma abordagem experimental para análise do projeto das dimensões de canais de acesso e bacias portuárias, fundamentada no desenvolvimento de um simulador de manobras de navios em modelo físico de escala reduzida, denominado Simulador Analógico de Manobras – SIAMA 2014. Além disso, é proposto um sistema completo para avaliação das condições de manobrabilidade de espaços náuticos portuários, desde a calibração da ferramenta de simulação, até a verificação de cenários complexos e situações de emergência. O SIAMA 2014 e o sistema desenvolvido foram aplicados em um estudo de caso, que contou com a participação de práticos e autoridades portuárias na realização de simulações de manobras para verificação das condições de atracação no novo berço do Terminal Portuário Marítimo de Ponta da Madeira, em São Luís do Maranhão. Os resultados deste estudo foram apresentados e discutidos, de forma a mostrar a importância da utilização de modelos físicos reduzidos na simulação de manobra de navios.

Palavras-chave: Hidráulica Marítima; Navegação Costeira; Portos

ABSTRACT

BERNARDINO, J. C. M. Experimental approach to evaluation of ship manoeuvring in scale models of nautical spaces. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

In an increasingly competitive international trading market there is a need for modernizing the infrastructure of the Brazilian port system, becoming more efficient from an operational point of view and with ability to handle larger vessels. In this scenario, the port approach channels design techniques need to be reviewed, using more sophisticated tools to improve the design without forgetting important questions such as efficiency and, especially, operational safety. This paper presents an experimental approach to evaluate the design of the dimensions of port channels and manoeuvring areas, based on the development of a shiphandling simulator for physical scale models, called Analogic Manoeuvring Simulator – SIAMA 2014. Besides, it is proposed a complete system to evaluate the manoeuvring conditions of port approach channels, since calibration of the simulation tool to check complex scenarios and emergency situations. The SIAMA 2014 and the system developed were applied in a case study, in which pilots and port authorities performed manoeuvring simulations to verify the shiphandling conditions in the new berth of the Maritime Port of Ponta da Madeira in São Luis, Maranhão. The results of this study were presented and discussed in order to show the importance of using physical models in simulation of ship manoeuvring.

Keywords: Maritime Hydraulics; Coastal Navigation; Ports

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Parcelas constituintes do cálculo da profundidade requerida de navegação para canal de acesso. Fonte: Alfredini e Arasaki (2014).	42
Figura 2.2 - Dimensões características dos navios. Fonte: Alfredini e Arasaki (2014).	46
Figura 2.3 – Elementos do canal de acesso. Fonte: Alfredini e Arasaki (2014).	47
Figura 2.4 – Elementos da largura de um canal de acesso de mão-dupla. Fonte: Alfredini e Arasaki (2014).	47
Figura 3.1 – Esquema em planta do lago para simulação física de manobras tripuladas em Port Revel, França. Fonte: Port Revel (2014).	81
Figura 3.2 – Sistema de coordenadas recomendado pela norma DIN 81209-1. Fonte: Biran e López-Pulido (2014).	97
Figura 3.3 – Cortes paralelos ao plano xz. Fonte: Biran e López-Pulido (2014).	97
Figura 3.4 – Cortes paralelos ao plano yz. Fonte: Biran e López-Pulido (2014).	98
Figura 3.5 – Cortes paralelos ao plano xy. Fonte: Biran e López-Pulido (2014).	98
Figura 3.6 – Plano de linhas da embarcação. Fonte: Biran e López-Pulido (2014).	98
Figura 4.1 – SIAMA 2014 – Controle de leme e propulsor.	121
Figura 4.2 – SIAMA 2014 – Controle dos rebocadores.	121
Figura 4.3 – SIAMA 2014 – Tela principal do software de controle para máquina, leme e rebocadores, utilizada durante os ensaios de manobra.	122
Figura 4.4 – Tela de saída do <i>software</i> SIAMA 2014 mostrando potência do motor elétrico (percentual) versus tempo de ensaio. Potência do motor é positiva para movimento à vante (<i>ahead</i>) e negativa para movimento à ré (<i>astern</i>).	127
Figura 4.5 – Ilustração de quatro rebocadores em auxílio à manobra de embarcações – Fonte: Gerent (2010).	129
Figura 4.6 – SIAMA 2014 – Imagem de câmera zenital do sistema <i>ship tracking</i> , com destaque para figuras brancas sobre o convés do modelo do navio que é de cor negra. Fonte: FCTH (2015 b).	131
Figura 4.7 – SIAMA 2014 – Tela de saída do sistema <i>ship tracking</i> com referenciamento do movimento do centro geométrico (pontos azuis) do convés da embarcação em carta náutica durante a manobra.	132

Figura 4.8 – SIAMA 2014 – Tela principal do <i>Software</i> para controle remoto das micro câmeras.	134
Figura 5.1 – Medidor de vazão tipo Venturi.....	142
Figura 5.2 – Curva tensão deformação de uma defesa real. Fonte: Bridgestone (2008) <i>apud</i> Gerent (2010).....	148
Figura 5.3 – Exemplo de gráfico de deformações nas defensas oriundas de impacto de modelo de navio durante simulação de manobra. Fonte: FCTH (2007).	149
Figura 5.4 – Telégrafo náutico para transmissão de comando da ponte para casa de máquina. Fonte: FCTH (2015 b).	153
Figura 5.5 – Esquema do teste de curva de giro (<i>turning circle</i>), com destaque para alguns parâmetros de manobra.....	155
Figura 5.6 – Exemplo de resultado de teste de zig-zag mostrando o curso (ψ) e variação no ângulo de leme (δ) de 10°/10°. Fonte: IMO (2002).....	156
Figura 5.7 – Exemplo de trajetória de embarcação em um teste de parada brusca. Fonte: IMO (2002).	157
Figura 5.8 – <i>Turning circle</i> para diferentes relações de profundidade do escoamento (D_w) e Calado (T). Fonte: PIANC (1992).	158
Figura 6.1 – Localização da baía de São Marcos. Fonte: Google.....	179
Figura 6.2 – Carta Náutica nº 413 e limites do modelo físico da Baía de São Marcos construído e operado pelo LHEPUSP.	181
Figura 6.3 – Ilustração do navio Vale Minas Gerais (classe Valemax). Fonte: www.vale.com	185
Figura 6.4 – Lista de rebocadores disponíveis na Baía de São Marcos. Fonte: Consórcio de Rebocadores da Baía de São Marcos.	186
Figura 6.5 – Janelas de maré para manobras no Terminal Ponta da Madeira segundo regra original que vigorou de 1986 a 2007. Fonte: Gerent (2010).	188
Figura 6.6 – Ampliação na janela de maré para manobras no Píer I do Terminal Ponta da Madeira em virtude das simulações em modelo físico com uso do SIAMA 1993. Fonte: Gerent (2010). ..	188
Figura 6.7 – Instantes de maré escolhidos para a manobra dos navios no Berço Norte do Píer IV.	190
Figura 6.8 – Batimetria selecionada para implantação no modelo físico da Baía de São Marcos. Fonte: FCTH (2015 a).....	192
Figura 6.9 – Imagem digital tridimensional da batimetria implantada no modelo físico da Baía de São Marcos. Fonte: FCTH (2015 a)..	192
Figura 6.10 – Saída do modelo computacional Mike 3® para condição de maré enchente, com destaque para os pontos de monitoramento de velocidades em campo, vetores de	

velocidades indicando as direções e intensidades do campo de correntes e limites do modelo físico. Fonte: FCTH (2015 a).	194
Figura 6.11 – Saída do modelo computacional Mike 3® – Campo de velocidades próximo ao Píer IV do Terminal Ponta da Madeira – Maré com amplitude de 5,5 m em 30 minutos após a baixa-mar.	195
Figura 6.12 – Saída do modelo computacional Mike 3® – Campo de velocidades próximo ao Píer IV do Terminal Ponta da Madeira – Maré com amplitude de 6,0 m em 1 hora antes da preamar. .	195
Figura 6.13 – Pontos para verificação da calibração do modelo físico da Baía de São Marcos para ensaios de manobra no Píer IV. Fonte: FCTH (2015 a).	197
Figura 6.14 – Comparação de velocidades entre modelo computacional e modelo físico para o ponto P19.	199
Figura 6.15 – Comparação de velocidades entre modelo computacional e modelo físico para o ponto PY1.	199
Figura 6.16 – Comparação de velocidades entre modelo computacional e modelo físico para o ponto PX4B.	200
Figura 6.17 – Comparação de velocidades entre modelo computacional e modelo físico para o ponto P4.	200
Figura 6.18 – Plano de linhas do navio Valemax. Fonte: FCTH (2015 c).	201
Figura 6.19 – Curva de correlação entre potência do motor elétrico e velocidade para o modelo reduzido do navio Valemax em lastro com movimento à vante.	204
Figura 6.20 – Curva de correlação entre potência do motor elétrico e velocidade para o modelo reduzido do navio Valemax em lastro com movimento à ré.	205
Figura 6.21 – Teste <i>turning circle</i> – navio Vale Rio de Janeiro (classe Valemax - 400.000 tpb). Toda velocidade à vante. Condição de carregamento em lastro (T = 12 m). Lpp = 350 m. Fonte: DSME (2011).	208
Figura 6.22 – Trajetória do modelo do navio monitorada pelo sistema <i>ship tracking</i> em comparação com o resultado esperado na prova de mar para o teste <i>turning circle</i> do navio da classe Valemax.	209
Figura 6.23 – Teste zig-zag 20°/20° – navio Vale Rio de Janeiro (classe Valemax - 400.000 tpb). Condição de carregamento em lastro (T = 12 m). Fonte: DSME (2011).	211
Figura 6.24 – Comparação do teste zig-zag 20/20 entre modelo físico (linhas verdes) e prova de mar (linhas cinzas) para o navio da classe Valemax.	212
Figura 6.25 – Teste de parada brusca (<i>half speed</i>) – navio Vale Rio de Janeiro (classe Valemax - 400.000 tpb). Condição de carregamento em lastro (T = 12 m). Fonte: DSME (2011).	213

Figura 6.26 – Trajetória da embarcação no teste de parada brusca (<i>half speed</i>) – navio Vale Rio de Janeiro (classe Valemax - 400.000 tpb). Condição de carregamento em lastro (T = 12 m). Fonte: DSME (2011).....	214
Figura 6.27 – Comparação do teste de parada brusca entre modelo físico (pontos na cor azul) e prova de mar (linha vermelha) para o navio da classe Valemax.....	215
Figura 6.28 – Curva de correlação entre “potência elétrica” do motor do ventilador A e tração equivalente de um rebocador.	217
Figura 6.29 – Curva de correlação entre “potência elétrica” do motor do ventilador B e tração equivalente de um rebocador.	217
Figura 6.30 – Curva de correlação entre “potência elétrica” do motor do ventilador D e tração equivalente de um rebocador.	218
Figura 6.31 – Curva de correlação entre “potência elétrica” do motor do ventilador F e tração equivalente de um rebocador.	218
Figura 6.32 – Ponto de partida para as simulações de manobra no canal de acesso próximo à Ilha do Medo. Destaque para a movimentação da embarcação durante a manobra de atracação por boreste no Berço Norte do Píer IV. Fonte: FCTH (2015 c).....	226
Figura 6.33 – Potência da MÁQUINA – ENSAIO 5 – Com sete partidas de máquina (seis à vante e uma à ré) – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.....	232
Figura 6.34 – Atuação do LEME – ENSAIO 5 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.....	232
Figura 6.35 – Potência do REBOCADOR 1 – ENSAIO 5 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.	233
Figura 6.36 – Potência do REBOCADOR 2 – ENSAIO 5 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.	233
Figura 6.37 – Potência do REBOCADOR 3 – ENSAIO 5 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.	234
Figura 6.38 – Potência do REBOCADOR 4 – ENSAIO 5 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.	234
Figura 6.39 – Registro do sistema <i>ship tracking</i> da câmera próxima ao terminal – ENSAIO 5 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.....	235
Figura 6.40 – Comparação de resultados das simulações de manobra – Atuação da MÁQUINA (conjunto motor-propulsor do navio).....	253
Figura 6.41 – Comparação de resultados das simulações de manobra – Atuação do LEME.	254

Figura 6.42 – Comparação de resultados das simulações de manobra – Atuação do REBOCADOR 1.	254
Figura 6.43 – Comparação de resultados das simulações de manobra – Atuação do REBOCADOR 2.	255
Figura 6.44 – Comparação de resultados das simulações de manobra – Atuação do REBOCADOR 3.	255
Figura 6.45 – Comparação de resultados das simulações de manobra – Atuação do REBOCADOR 4.	256

LISTA DE FOTOS

Foto 2.1 – Modelo bidimensional com sistema gerador de ondas irregulares – Foto do acervo do Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da USP – LHEPUSP.	65
Foto 2.2 – Modelo tridimensional do estuário de Santos/SP com sistema gerador de ondas regulares – Foto do acervo do LHEPUSP.	65
Foto 2.3 – Modelo físico tridimensional do Terminal Ponta da Madeira/MA – Foto do acervo do LHEPUSP.	70
Foto 3.1 – Simulador de manobras tripulado com modelos de navio e rebocador em operação – Port Ilawa, Polônia. Fonte: Allen e Graauw (2014).	80
Foto 3.2 – Estudo da barra de Cananéia/SP em 1971 – Fonte: Acervo do LHEPUSP.	84
Foto 3.3 – Simulação de manobra em modelo físico em 1980 – Fonte: Acervo do LHEPUSP.	84
Foto 3.4 – Motor (A), hélice e leme (B) do modelo de navio rádio controlado – Fonte: Alfredini, Gerent e Arasaki (2011).	85
Foto 3.5 – Atuação de rebocadores real (A) e representação em modelo físico (B) – Fonte: Alfredini, Gerent e Arasaki (2011).	85
Foto 3.6 – Ensaio de simulação de manobra no modelo físico do Terminal Ponta da Madeira – Fonte: Acervo do LHEPUSP.	88
Foto 3.7 – Modelo reduzido do navio <i>World Utility</i> com sistema de controle remoto por radio frequência – U.S. Army Engineer Research and Development Center – Fonte: Briggs et. al. (2001).	89
Foto 3.8 – Modelo reduzido do canal de acesso de Barbers Point Harbor – U.S. Army Engineer Research and Development Center – Fonte: Briggs et. al. (2001).	89
Foto 3.9 – <i>Desktop simulation</i> . Fonte: IALA (2011).	92
Foto 3.10 – Part Task simulation – Comandos do navio. Fonte: IALA (2011). .	92
Foto 3.11 – Part Task simulation – Comandos do rebocador. Fonte: IALA (2011).	93
Foto 3.12 – Full Mission simulation – Ponte de comandos do navio. Fonte: IALA (2011).	93
Foto 3.13 – Full Mission simulation – Ponte de comandos do rebocador. Fonte: IALA (2011).	94
Foto 3.14 – Modelo de sistema de medição de nível do mar com <i>data logger</i> (esquerda) e sensor de nível d'água (direita). Fonte: FCTH (2011 a).	102
Foto 3.15 – Exemplo de ADP acoplado a uma estrutura metálica para orientação e fundeio do equipamento. Fonte: FCTH (2011 a). .	103

Foto 4.1 – Modelo reduzido do Navio Valemax com eletrônica para controle de manobra embarcada. Fonte: Acervo pessoal.....	116
Foto 4.2 – Console de comandos do SIAMA 1993, com vista do interior (esquerda) e console montado (direita). Adaptado do acervo do LHEPUSP.....	120
Foto 4.3 – SIAMA 2014 – Prático com “Headset” e canal aberto com a equipe de apoio na sala de comando, durante a execução de um ensaio de manobra. Fonte: acervo do LHEPUSP.	125
Foto 4.4 – SIAMA 2014 – Equipe de apoio na sala de comandos recebendo as instruções do práctico, em canal aberto, durante um ensaio de manobra. Fonte: acervo do LHEPUSP.....	125
Foto 4.5 – SIAMA 2014 – Conjunto de quatro ventiladores para representação dos rebocadores – Adaptação do acervo do LHEPUSP.....	129
Foto 4.6 – SIAMA 2014 – Micro câmeras instaladas sobre o passadiço do modelo do navio em cada bordo para simulação de visão do práctico durante a manobra. Fonte: Acervo do LHEPUSP.	134
Foto 4.7 – SIAMA 2014 – Imagem gerada pela micro câmera de boreste durante ensaio de manobra simulando a visão real do práctico.	135
Foto 4.8 – SIAMA 2014 – Prático durante ensaio de manobra com simulação de visão real. Fonte: Acervo do LHEPUSP.	135
Foto 5.1 – Distribuidores de vazão (tipo colmeia, que são módulos com tubos de PVC que podem operar abertos ou fechados de forma a favorecer o escoamento em uma dada posição), sistema de tranquilização (estrutura gradeada de madeira que funciona como flutuante e mitiga o efeito de turbulência na entrada do modelo) e placas direcionadoras de fluxo. Fonte: Acervo do LHEPUSP.....	143
Foto 5.2 – Comporta basculante para regulação de nível d’água por jusante. Fonte: Acervo do LHEPUSP.	144
Foto 5.3 – Ponta limnimétrica para medição de nível d’água na área de representação do modelo físico. Fonte: Acervo do LHEPUSP..	144
Foto 5.4 – Equipamentos para medição de velocidades – Micromolinetete (esquerda) e medidor de direção (direita).	145
Foto 5.5 – Placas para confinamento do fluxo e aumento de velocidades na seção de interesse. Fonte: Acervo do LHEPUSP.	146
Foto 5.6 – Imposição de rugosidade de fundo para ajuste do nível d’água em modelo físico. Fonte: Acervo do LHEPUSP.	147
Foto 5.7 – Instrumentação adaptada ao berço de atracação em modelo físico para simulação e registro da deformação das defensas. Fonte: FCTH (2006).	148
Foto 5.8 – Confecção de modelos reduzidos do casco de navios – preparação do molde (à esquerda) e finalizado (à direita). Adaptado do acervo do LHEPUSP.....	150

Foto 5.9 – Canal para calibração do motor da embarcação. Fonte: Acervo do LHEPUSP.....	152
Foto 5.10 – Rebocador realizando teste para medição do <i>bollard pull</i> . Fonte: FCTH (2015 b).	160
Foto 5.11 – Bancada de laboratório para levantamento da curva de calibração da tração dos ventiladores (rebocadores). Fonte: FCTH (2015 b).	161
Foto 5.12 – Uso de traçadores flutuantes (mini confetes) para identificação das correntes próximas ao berço de atracação durante simulação de manobra. Fonte: Acervo do LHEPUSP.	165
Foto 6.1 – Vista geral pelo extremo norte do modelo físico da Baía de São Marcos. Fonte: Acervo do LHEPUSP.....	182
Foto 6.2 – Sistema de alimentação da vazão de enchente do modelo físico da Baía de São Marcos (A), com detalhe para o sistema deprimogêneo de medição de vazão (B). Fonte: Acervo pessoal.....	183
Foto 6.3 – Monitoramento das velocidades em modelo físico com uso de micromolinetes para calibração dos instantes de maré dos ensaios de manobra. Fonte: Acervo do LHEPUSP.	197
Foto 6.4 – Fabricação do modelo reduzido do navio Valemax (escala 1:170). Fonte: Acervo do LHEPUSP.	202
Foto 6.5 – Modelo reduzido do Navio Valemax (escala 1:170) com instrumentação embarcada para ensaios de manobra. Fonte: Acervo pessoal.....	202
Foto 6.6 – Tanque de manobras. Fonte: Acervo do LHEPUSP.	207
Foto 6.7 – Prático executando manobra com simulação de visão real em condições noturnas. Fonte: Acervo do LHEPUSP.	240

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 – Amplitudes e instantes de maré convencionados para campanha de ensaios do Berço Norte do Píer IV.	190
Tabela 6.2 – Níveis d'água de referência do marégrafo PI para imposição no modelo físico da Baía de São Marcos.	193
Tabela 6.3 – Comparação de magnitude e direção de velocidades nos modelos computacional e físico para amplitude de maré de 6,0 m.	198
Tabela 6.4 – Resultados dos ensaios para determinação da curva de correlação entre potência do motor elétrico e velocidade para o modelo reduzido do navio Valemax em lastro com movimento à vante.	204
Tabela 6.5 – Resultados dos ensaios para determinação da curva de correlação entre potência do motor elétrico e velocidade para o modelo reduzido do navio Valemax em lastro com movimento à ré.	205
Tabela 6.6 – Tabela de correspondência dos comandos do telégrafo com a velocidade para navios da classe Valemax em lastro.	206
Tabela 6.7 – Curvas de calibração para as referências do telégrafo e potência do motor elétrico do modelo do navio.	207
Tabela 6.8 – Teste <i>turning circle</i> – Navio Vale Rio de Janeiro (classe Valemax - 400.000 tpb). Toda velocidade à vante. Condição de carregamento em lastro (T = 12 m). Lpp = 350 m. Fonte: DSME (2011).	209
Tabela 6.9 – Comparação dos resultados das simulações do teste <i>turning circle</i> entre modelo físico e a prova de mar para o navio da classe Valemax.	209
Tabela 6.10 – Teste zig-zag 20º/20º – Navio Vale Rio de Janeiro (classe Valemax - 400.000 tpb). Condição de carregamento em lastro (T = 12 m). Fonte: DSME (2011).	211
Tabela 6.11 – Comparação de resultados do teste de zig-zag 20/20 entre modelo físico e a prova de mar real para o navio da classe Valemax.	212
Tabela 6.12 – Teste de parada brusca (<i>half speed</i>) – Navio Vale Rio de Janeiro (classe Valemax - 400.000 tpb). Condição de carregamento em lastro (T = 12 m). Fonte: DSME (2011).	214
Tabela 6.13 – Comparação de resultados do teste de parada brusca entre modelo físico e a prova de mar real para o navio da classe Valemax.	215
Tabela 6.14 – Sugestões dos práticos e operadores portuários para as referências padronizadas de potência dos rebocadores da Baía de São Marcos em condição de manobra.	220

Tabela 6.15 – Valores de calibração preliminar para ventiladores do modelo do navio Valemax, simulando rebocadores de 75 tf de <i>bollard pull</i>	220
Tabela 6.16 – Valores de calibração preliminar para ventiladores do modelo do navio Valemax, simulando rebocadores de 55 tf de <i>bollard pull</i>	221
Tabela 6.17 – Resumo das notas dos práticos aos itens do questionário padrão de manobra e cálculo do conceito geral da manobra – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.	227
Tabela 6.18 – Comparação entre os tempos de manobra e quantidade total de comandos utilizados durante a manobra – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.	228
Tabela 6.19 – Porcentagem de tempo de atuação da MÁQUINA (conjunto motor-propulsor do navio) – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.	228
Tabela 6.20 – Quantidade de comandos para atuação da MÁQUINA (conjunto motor-propulsor do navio) – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.	228
Tabela 6.21 – Porcentagem de tempo de cada posição do LEME – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.	229
Tabela 6.22 – Quantidade de comandos de acionamento do LEME – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.	229
Tabela 6.23 – Porcentagem de tempo de atuação do REBOCADOR 1 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.	229
Tabela 6.24 – Quantidade de comandos para atuação do REBOCADOR 1 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.	230
Tabela 6.25 – Porcentagem de tempo de atuação do REBOCADOR 2 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.	230
Tabela 6.26 – Quantidade de comandos para atuação do REBOCADOR 2 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.	230
Tabela 6.27 – Porcentagem de tempo de atuação do REBOCADOR 3 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.	230
Tabela 6.28 – Quantidade de comandos para atuação do REBOCADOR 3 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.	231

Tabela 6.29 – Porcentagem de tempo de atuação do REBOCADOR 4 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.	231
Tabela 6.30 – Quantidade de comandos para atuação do REBOCADOR 4 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.	231
Tabela 6.31 – Resumo das notas dos práticos aos itens do questionário padrão de manobra e cálculo do conceito geral da manobra – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.	236
Tabela 6.32 – Comparação entre os tempos de manobra e quantidade total de comandos utilizados durante a manobra – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.	236
Tabela 6.33 – Porcentagem de tempo de atuação da MÁQUINA (conjunto motor-propulsor do navio) – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.	236
Tabela 6.34 – Quantidade de comandos para atuação da MÁQUINA (conjunto motor-propulsor do navio) – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.	237
Tabela 6.35 – Porcentagem de tempo de cada posição do LEME – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.	237
Tabela 6.36 – Quantidade de comandos de acionamento do LEME – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.	237
Tabela 6.37 – Porcentagem de tempo de atuação do REBOCADOR 1 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.	238
Tabela 6.38 – Quantidade de comandos para atuação do REBOCADOR 1 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.	238
Tabela 6.39 – Porcentagem de tempo de atuação do REBOCADOR 2 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.	238
Tabela 6.40 – Quantidade de comandos para atuação do REBOCADOR 2 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.	238
Tabela 6.41 – Porcentagem de tempo de atuação do REBOCADOR 3 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.	239
Tabela 6.42 – Quantidade de comandos para atuação do REBOCADOR 3 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.	239

Tabela 6.43 – Porcentagem de tempo de atuação do REBOCADOR 4 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.	239
Tabela 6.44 – Quantidade de comandos para atuação do REBOCADOR 4 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.	239
Tabela 6.45 – Comparação dos resultados de tempo total de manobra e número total de comandos entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.	241
Tabela 6.46 – Comparação dos resultados de porcentagem do tempo de atuação da MÁQUINA do navio entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.	241
Tabela 6.47 – Comparação dos resultados de quantidade de comandos na atuação da MÁQUINA do navio entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.	241
Tabela 6.48 – Comparação dos resultados de porcentagem do tempo de atuação do LEME do navio entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.	242
Tabela 6.49 – Comparação dos resultados de quantidade de comandos na atuação do LEME do navio entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.	242
Tabela 6.50 – Comparação dos resultados de porcentagem do tempo de atuação do REBOCADOR 1 entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.	243
Tabela 6.51 – Comparação dos resultados de quantidade de comandos na atuação do REBOCADOR 1 entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.	243
Tabela 6.52 – Comparação dos resultados de porcentagem do tempo de atuação do REBOCADOR 2 entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.	243
Tabela 6.53 – Comparação dos resultados de quantidade de comandos na atuação do REBOCADOR 2 entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.	244

Tabela 6.54 – Comparação dos resultados de porcentagem do tempo de atuação do REBOCADOR 3 entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.....	244
Tabela 6.55 – Comparação dos resultados de quantidade de comandos na atuação do REBOCADOR 3 entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.....	244
Tabela 6.56 – Comparação dos resultados de porcentagem do tempo de atuação do REBOCADOR 4 entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.....	245
Tabela 6.57 – Comparação dos resultados de quantidade de comandos na atuação do REBOCADOR 4 entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.....	245
Tabela 6.58 – Diferenças entre tempos de manobra e número total de comandos máximo e mínimo registrados nas manobras diurnas.	252

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADP	Acoustic Doppler Profile
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
APM	Antes da preamar
BM	Baixa-mar
DBM	Bepois da baixa-mar
FCTH	Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica
IALA	International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities
IMO	International Maritime Organization
LHEPUSP	Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da USP
NBR	Norma brasileira
PIANC	Permanent International Association of Navigation Congresses
PM	Preamar
PWM	Pulse Width Modulation
ROM	Recomendaciones para Obras Marítimas
SIAMA	Simulador Analógico de Manobras
USACE	United States Army Corps of Engineers
VLOC	Very Large Ore Carrier

LISTA DE SÍMBOLOS

	Definição	Dimensão
a	distância medida entre os dois fios paralelos	(L)
a	aceleração da partícula	(LT ⁻²)
B	boca do navio ou largura da seção do escoamento	(L)
Eu	número adimensional de Euler	
FI	força de inércia	(MLT ⁻²)
Fr	número adimensional de Froude	
FV	força devido à viscosidade	(MLT ⁻²)
FP	força devido à pressão	(MLT ⁻²)
F_x	força na direção x	(MLT ⁻²)
F_y	força na direção y	(MLT ⁻²)
g	aceleração da gravidade	(LT ⁻²)
h	profundidade do escoamento	(L)
G	força devido à gravidade	(MLT ⁻²)
I_z	momento de inércia em relação ao eixo z	(ML ² T ⁻²)
L	dimensão linear característica	(L)
L_{OA}	comprimento total do navio	(L)

L_{pp}	comprimento entre perpendiculares do navio	(L)
m	massa da partícula ou massa do navio	(M)
M_z	momento em relação ao eixo z	(ML ² T ⁻²)
p	pressão média no volume elementar	(ML ⁻¹ T ⁻²)
r	velocidade angular	(T ⁻¹)
Re	número adimensional de Reynolds	
R_G	raio de giração do modelo do navio	(L)
t	tempo	(T)
T	calado do navio	(L)
T	período natural médio	(T)
u	componente de velocidade nas direções x	(LT ⁻¹)
v	componente de velocidade nas direções y	(LT ⁻¹)
V	velocidade média do escoamento	(LT ⁻¹)
Vol	volume elementar (dx.dy.dz)	(L ³)
w	componente de velocidade nas direções z	(LT ⁻¹)
W	largura requerida	(L)
W_B	folga com a margem	(L)
We	número adimensional de Weber	

W_M	faixa de manobra	(L)
W_{MB}	faixa de manobra básica	(L)
W_P	distância de passagem	(L)
x_G	coordenada x do centro de gravidade do navio	(L)
β	ângulo de ataque do navio	
λ_L	fator de escala geométrica	
λ_F	fator de escala dinâmico	
λ_V	fator de escala cinemático	
μ	viscosidade dinâmica da água	(ML ⁻¹ T ⁻¹)
ρ	massa específica da água	(ML ⁻³)
σ	tensão superficial da água	(ML ⁻¹ T ⁻²)

Obs.: Dimensões representadas por: M (massa), L (comprimento) e T (tempo).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	29
1.1. Contextualização do problema	29
1.2. Objetivo.....	32
1.3. Justificativa	33
1.4. Método de trabalho.....	35
1.5. Âmbito	36
1.6. Estrutura do texto	37
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	39
2.1. Definição de porto e a tendência dos projetos portuários	39
2.2. Elementos do Projeto Náutico Portuário	41
2.2.1. Projeto das Dimensões Verticais	42
2.2.2. Projeto das Dimensões Horizontais	45
2.3. Conceitos gerais sobre modelos físicos	50
2.3.1. Revisão histórica da modelagem física em Hidráulica.....	50
2.3.2. Princípios da Teoria da Semelhança	52
2.3.3. Importância e limitações do critério de Semelhança de Froude ...	59
2.3.4. Fatores de escala para a Semelhança de Froude	62
2.4. Modelagem física no ambiente costeiro	63
2.5. Cenário atual da modelagem física no ambiente costeiro	71
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE SIMULADORES DE MANOBRAS	76
3.1. Importância dos estudos de manobra e os tipos de modelagem aplicados.....	76
3.2. Simuladores de manobra em modelos físicos	79
3.2.1. Simulador físico de manobras tripulado.....	79
3.2.2. Simulador físico de manobras não tripulado.....	82
3.3. Tipos de simuladores computacionais.....	90
3.4. Dados de entrada dos simuladores de manobra	95
3.4.1. Dados do navio.....	96
3.4.2. Dados ambientais	101
3.4.3. Outras condições de contorno	105

3.5. Comparação entre as ferramentas de simulação de manobra e suas principais limitações	106
3.6. Validação dos simuladores de manobra	110
4. DESENVOLVIMENTO DO NOVO SIMULADOR ANALÓGICO DE MANOBRAS – SIAMA 2014	114
4.1. Características gerais do simulador.....	114
4.2. Inovações do SIAMA 2014	117
4.2.1. Transmissão do sinal de controle das facilidades do modelo do navio.....	119
4.2.2. Software de controle e monitoramento dos comandos	120
4.2.3. Comandos do práctico durante a manobra	124
4.2.4. Software de registro dos comandos	126
4.2.5. Representação dos rebocadores.....	127
4.2.6. Sistema de rastreamento da posição do navio (ship tracking) e georreferenciamento durante a manobra	130
4.2.7. Simulação da visão real (micro câmera) e manobra noturna.....	132
5. SISTEMA PARA VERIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE MANOBRA UTILIZANDO O SIAMA 2014.....	137
5.1. Etapa 0 – Definição dos objetivos e da campanha de simulações de manobra.....	138
5.2. Etapa 1 – Calibração do modelo físico	140
5.3. Etapa 2 – Calibração do modelo do navio	149
5.4. Etapa 3 – Calibração dos rebocadores.....	159
5.5. Etapa 4 – Testes iniciais de verificação das calibrações do modelo e simulações de ambientação	162
5.5.1. Testes iniciais para validação da calibração do modelo físico....	163
5.5.2. Testes iniciais para validação da calibração do modelo do navio e rebocadores.....	165
5.5.3. Simulações de ambientação.....	167
5.6. Etapa 5 – Simulações de manobra com visão “voo de pássaro”	168
5.6.1. Método para avaliação qualitativa dos resultados das simulações	169
5.6.2. Método para avaliação quantitativa dos resultados das simulações	172

5.7. Etapa 6 – Testes avançados com simulação de visão real e outras condições adversas	175
5.8. Etapa 7 – Análise final dos resultados das simulações de manobra .	176
6. ESTUDO DE CASO – APLICAÇÃO DO SIAMA 2014 EM SIMULAÇÕES DE MANOBRA NA BAÍA DE SÃO MARCOS	178
6.1. Modelo físico tridimensional da Baía de São Marcos	178
6.2. Definição dos objetivos e da campanha de simulações de manobra.....	184
6.3. Calibração do modelo físico.....	191
6.4. Calibração do modelo do navio	201
6.4.1. Geometria do navio e confecção do casco	201
6.4.2. Curva de potência do motor elétrico	203
6.4.3. Calibração das referências do telégrafo do motor do navio.....	205
6.4.4. Testes de simulação das provas de mar	207
6.5. Calibração dos rebocadores	216
6.5.1. Curva de potência dos ventiladores.....	216
6.5.2. Calibração dos ventiladores para semelhança com os rebocadores disponíveis	219
6.6. Testes iniciais de verificação das calibrações do modelo e simulações de ambientação	221
6.6.1. Testes iniciais para validação da calibração do modelo físico....	221
6.6.2. Testes iniciais para validação da calibração do modelo do navio do navio Valemax e rebocadores	223
6.6.3. Simulações de ambientação.....	224
6.7. Simulações de manobra com visão geral do modelo	225
6.7.1. Resultados dos ensaios com amplitude de maré de 5,5 m em 1 hora antes da preamar	226
6.7.2. Resultados dos ensaios com amplitude de maré de 6,0 m em 1 hora antes da preamar	235
6.8. Testes avançados com simulação de visão real e outras condições adversas	240
6.9. Análise final dos resultados das simulações de manobra	245
6.9.1. Avaliação do simulador e dos resultados dos ensaios pelos práticos e operadores portuários.....	245

6.9.2. Análise dos resultados das simulações de manobra a partir dos questionários de avaliação qualitativa e dos registros do SIAMA 2014	251
7. CONCLUSÕES	257
8. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	263
8.1. Conceito de modelagem híbrida aplicada à manobra.....	264
8.2. Aplicação da modelagem híbrida na avaliação das condições de manobrabilidade	267
8.2.1. Projetos de novos portos	268
8.2.2. Melhorias em portos existentes	273
REFERÊNCIAS	276
APÊNDICE A – CONCEITOS BÁSICOS SOBRE SIMULADORES DE MANOBRA EM MODELOS COMPUTACIONAIS	282
APÊNDICE B – CALIBRAÇÃO DE MODELOS REDUZIDOS DE NAVIOS PARA ENSAIOS DE MANOBRA SOB AÇÃO DE ONDAS	295
ANEXO I – PILOT CARD DO VALE RIO DE JANEIRO (VALEMAX)	300

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização do problema

O transporte aquaviário é responsável por mais de 90% de toda movimentação de carga em transações comerciais internacionais. Dados da ANTAQ (2014) apontam que, no ano de 2013, as instalações portuárias brasileiras movimentaram 931 milhões de toneladas, o que corresponde a aproximadamente 95% de todo comércio exterior do país, e um aumento de quase 3% em relação ao ano de 2012. Esta enorme importância do transporte marítimo de cargas ocorre pelos baixos custos que este modal agrega aos produtos. De fato, o transporte por meio aquaviário é o mais eficiente entre todos os modais, pois é aquele que consome menos energia por tonelada de carga movimentada, resultando desta forma no menor custo de transporte.

Além disso, com o mercado internacional cada vez mais competitivo, existe a necessidade de cada país reduzir seus custos de produção e comercialização de produtos. Como a maior parte do comércio internacional de produtos é realizada por via marítima, isto significa que se tornar competitivo neste cenário passa por uma necessidade inquestionável de modernização do sistema portuário.

No caso brasileiro, este fator é ainda mais destacado, pois a extensa faixa costeira, com mais de 8 mil km de extensão, e a grande distância em relação a polos consumidores estratégicos como os Estados Unidos, a China e a Europa, tornam o investimento no transporte marítimo, uma necessidade estratégica nacional. E para que este transporte seja eficiente, é preciso que haja um grande investimento no desenvolvimento do sistema portuário.

Atento a isto, desde 1993, por meio da Lei de Modernização dos Portos (Lei Nº 8630 de 25 de fevereiro de 1993), o governo brasileiro procurou reestruturar este setor, promovendo tentativas de desburocratização dos processos

alfandegários, bem como incentivando o desenvolvimento de portos privados e modernização da infraestrutura de movimentação de cargas. Mesmo assim, o país ainda está muito longe de atingir o mesmo padrão dos grandes portos internacionais, e muitos avanços ainda precisam ser feitos.

A Engenharia Portuária depara-se com diversos desafios. Primeiramente porque frequentemente os portos estão instalados em locais de equilíbrio ambiental frágil, com alta biodiversidade, complexas interações entre escoamentos de água e sedimentos, e, muitas vezes, próximos a grandes centros urbanos e concentrações industriais. Em segundo lugar, porque o transporte aquaviário, especialmente o marítimo, precisa estar ligado a outros modais, como ferroviário, rodoviário, dutoviário ou aéreo, para garantir a chegada das mercadorias a seus destinos finais, incorporando, portanto, a necessidade de uma elaborada logística para garantir um alto grau de eficiência na operação do sistema.

Existe também uma forte tendência para que os portos marítimos recebam navios cada vez maiores, pois quanto maior a capacidade de carga de uma embarcação, menor a parcela de custo agregado ao produto final referente ao transporte. Portanto, receber navios de grande porte passa a ser uma vantagem comercial para o país.

A capacidade de receber navios de maiores dimensões passa pela existência de espaços náuticos mais amplos, profundos e abrigados, o que raramente é encontrado conjuntamente em condições naturais junto à costa. Por este motivo, a engenharia portuária precisa investir no desenvolvimento de projetos cada vez mais eficientes, de tal forma a aproveitar da melhor maneira possível os espaços naturais com potencial de implantação de grandes portos, além de propor medidas de intervenção economicamente viáveis e ambientalmente adequadas para adaptar este local às necessidades das grandes embarcações.

Portanto, dentre as diversas etapas a serem desenvolvidas em um projeto portuário, o dimensionamento dos espaços náuticos tem um especial destaque, pois é um dos pontos de partida para avaliação da viabilidade da instalação de um porto em um determinado local. De acordo com os tipos de carga que serão movimentadas, frota de navios que será atendida e condições ambientais locais, tais como ventos, ondas, marés, correntes, profundidades, sedimentação, entre outras, as dimensões necessárias para garantir a navegação segura em canais de acesso e bacias portuárias variam significativamente. As principais normas internacionais, a saber: PIANC (2014), USACE (2006) e ROM (1999), elencam diversos critérios determinísticos para definição das dimensões náuticas portuárias. No Brasil, a referência oficial é a NBR 13246 da ABNT (1995), que está sendo revisada com base na nova norma PIANC (2014).

Os critérios determinísticos definidos pelas normas conduzem quase sempre a dimensionamentos conservadores, que podem ser otimizados por meio de ferramentas mais sofisticadas de suporte a projetos de engenharia. Dentre estas ferramentas destacam-se os modelos físicos e computacionais.

No que tange ao dimensionamento horizontal de espaços náuticos, que tratam das larguras, raios de curvatura e sobrelarguras de canais de acesso, bem como dimensões gerais de bacias portuárias, os modelos de simulação de manobra de navios têm sido largamente utilizados desde a década de 1960 como uma importante ferramenta de otimização de projetos.

Inicialmente estes simuladores de manobras eram operados em modelos físicos de grandes dimensões, nos quais réplicas em escala reduzida de navios autopropelidos eram conduzidas por pilotos embarcados nestas réplicas. Estes simuladores de manobra tripulados são utilizados até hoje, principalmente para treinamento de pilotos.

Posteriormente, modelos físicos empregados para estudos diversos em regiões costeiras passaram a ser utilizados também como simuladores de manobras,

mas, neste caso, em função das escalas muito mais reduzidas, com navios não tripulados e controlados remotamente por rádio frequência.

Mais recentemente, com a evolução dos computadores e o acesso mais fácil a máquinas com grande capacidade de processamento de dados, os simuladores de manobra computacionais ganharam grande força. Estas poderosas ferramentas de simulação evoluíram de maneira muito significativa na última década, permitindo atualmente a reprodução com alto grau de fidelidade de todo ambiente de manobra, em uma sala de comandos similar a um navio real. São os denominados simuladores de ponte completa.

Na atualidade, as divulgações de artigos técnicos e congressos internacionais têm mostrado que praticamente todas as simulações de manobra passaram a ser realizadas em ambiente computacional, sendo que a modelagem física, no que tange a este tipo de estudo, têm se restringido a treinamento de pilotos, práticos e mestres de rebocadores por meio dos modelos tripulados de grandes dimensões.

1.2. Objetivo

O objetivo geral do presente trabalho é propor uma nova abordagem experimental para otimização dos espaços náuticos em áreas portuárias com auxílio de um simulador de manobras de navios para modelos físicos de escalas reduzidas, utilizando réplicas de embarcações rádio controladas, comandadas por práticos não embarcados.

Neste âmbito, são também objetivos do trabalho:

- Apresentar o desenvolvimento de uma nova ferramenta para simulação de manobras em modelo físico reduzido, que permita: (1) o controle mais preciso das funções do modelo do navio, como máquina e leme; (2) melhor reprodução da ação dos rebocadores; (3)

permitir a análise detalhada dos resultados das simulações por meio do registro eletrônico de todos os comandos utilizados durante a manobra, do impacto de atracação sobre a defesa e do rastreamento da posição do navio; e (4) uma representação mais fiel do ambiente de manobra por meio de simulação da visão real em alta resolução;

- Mostrar a importância da utilização desta ferramenta na análise de manobras de navios, tanto para treinamento, quanto para a viabilidade do projeto de espaços náuticos e arranjos de estruturas portuárias, em virtude da capacidade dos modelos físicos de reproduzirem fluxos hidrodinâmicos complexos com maior fidelidade em relação aos modelos matemáticos disponíveis;
- Mostrar a possibilidade de realização rápida de estudos de alternativas contando com a participação de práticos no comando das manobras, bem como de toda uma equipe inter e multidisciplinar ligada ao projeto portuário, estabelecendo-se uma sinergia para a otimização abrangente do projeto do porto.

1.3. Justificativa

A recente ascensão dos simuladores computacionais de manobra causou em muitos profissionais do meio náutico um paradigma de que os modelos físicos aplicados para tal fim teriam se tornado ferramentas superadas. Este ponto de vista de dissociação, na verdade, despreza uma importante sinergia que existe inequivocamente entre as duas ferramentas. De fato, as equações que descrevem o movimento dos navios baseados nos esforços hidrodinâmicos que agem sobre o casco da embarcação não podem ser resolvidas analiticamente, e as soluções numéricas empregadas têm diversas limitações, especialmente em regiões de fluxo complexo. Além disso, a maior parte dos coeficientes hidrodinâmicos utilizados nas soluções numéricas destas

equações precisam ser obtidos empiricamente, por meio, inclusive, de ensaios em modelos físicos.

Neste cenário, o presente texto defende a tese da importância da utilização de modelos físicos de águas nauticamente rasas como uma ferramenta de análise de manobras eficaz. Esta utilização tem especial interesse, mas não excludente de outros casos, em projetos nos quais estes modelos já estejam sendo utilizados para outras finalidades e, portanto, devidamente calibrados e validados com as condições ambientais. A reprodução de cenários com complexas condições ambientais de formação de correntes ou ondas é, via de regra, muito mais realista nos modelos físicos, quando comparado às simulações numéricas, especialmente nas proximidades de estruturas hidráulicas. Afinal, o modelo físico pode ser entendido como um grande computador analógico, que ao invés de aplicar soluções numéricas aproximadas para descrever fenômenos hidráulicos, utiliza-se da própria água para integrar naturalmente as condições de escoamento.

Neste âmbito, o presente trabalho apresenta uma abordagem para otimização de projetos de espaços náuticos fundamentada no desenvolvimento e aplicação de uma ferramenta para simulação de manobras em modelos físicos reduzidos de canais de acesso e bacias portuárias, utilizando-se de réplicas de embarcações rádio controladas pelos práticos.

Além disso, ao final do trabalho, será lançada a ideia para futuras pesquisas de que, além do ganho de qualidade na análise do problema, o uso de modelos físicos como simuladores de manobra também pode representar uma vantagem estratégica para o projeto executivo, quando integrada aos simuladores computacionais de ponte completa. Isto porque os modelos físicos permitem uma avaliação mais rápida de alternativas de manobra para diferentes condições ambientais, e, conseqüentemente, reduzem os cenários a serem representados nos simuladores computacionais de ponte completa. Esta ideia está alinhada com uma tendência mundial que tem sido aplicada em diferentes tipos de estudos de Engenharia Hidráulica e Naval, que é a

integração dos modelos físicos e computacionais para melhor representação de fenômenos, conhecida internacionalmente como modelagem híbrida.

1.4. Método de trabalho

Estabelecida uma fundamentação teórica, foi realizada uma revisão bibliográfica para estabelecer o estado da arte das técnicas utilizadas e sugeridas para o dimensionamento dos espaços náuticos em ambientes portuários, com enfoque na utilização de simuladores de manobras como parte do processo de otimização dos critérios básicos de projeto. Nesta revisão bibliográfica foi avaliada tanto a utilização dos modelos físicos quanto dos modelos computacionais como simuladores das condições de manobrabilidade.

O passo seguinte começou a ser concebido em 2010 e foi concluído em 2014, e consistiu no desenvolvimento de uma nova ferramenta de simulação de manobra em ambiente de modelo físico reduzido, com utilização de réplicas de navios autopropelidos com controle remoto por rádio frequência, que foi denominada de Simulador Analógico de Manobras – SIAMA 2014.

Além disso, fundamentado nesta ferramenta, foi criado um sistema para utilização de modelos físicos de ambientes portuários como simuladores de manobras, definindo-se as etapas necessárias para calibração do modelo e os procedimentos a serem adotados para investigação das condições de manobrabilidade sob diferentes cenários de ação de agentes ambientais e operações de emergência.

Para comprovar a importância e eficácia da aplicação desta ferramenta, simulações com a participação de práticos e autoridades portuárias foram realizadas no ambiente de representação do modelo físico da Baía de São Marcos em São Luís do Maranhão, onde se localiza o mais importante polo exportador de minérios do Brasil. Nestes ensaios de manobras com navios rádio controlados foram definidas diretrizes de operação de manobra para um

novo berço de atracação que está em fase de construção no Terminal Portuário de Ponta da Madeira.

1.5. Âmbito

Este trabalho tem como foco a apresentação de uma nova ferramenta para simulação de manobras em modelos físicos de escala reduzida, bem como um sistema para aplicação deste simulador em estudos portuários. Resultados práticos da utilização desta ferramenta serão explorados através de um estudo de caso realizado para um importante terminal portuário brasileiro, com participação dos práticos que atuam no local.

Embora o trabalho reconheça a relevância dos simuladores computacionais, sugerindo inclusive sua aplicação em conjunto com os estudos em modelos físicos para melhorar as análises de resultados, serão apresentados somente resultados de estudos em modelos físicos, ficando a integração entre as ferramentas, chamada de modelagem híbrida, apenas como sugestão para trabalhos futuros. Portanto, não será objeto desta tese a discussão em detalhes dos simuladores computacionais, ou mesmo da modelagem numérica que os define. Somente serão apresentados os tipos de simuladores computacionais e suas principais características, de tal forma a estabelecer o panorama geral das ferramentas disponíveis em estudos de manobra de navios.

Também não é intuito do trabalho abordar detalhes sobre a hidrodinâmica de navios e a mecânica das manobras, que são especialidades da Engenharia Naval e dos Oficiais de Náutica. Apenas alguns dos conceitos básicos destas disciplinas ligados ao dimensionamento dos espaços náuticos são apresentados, com objetivo de fornecer suporte técnico para compreensão do problema. Para aprofundamento neste viés recomendam-se referências clássicas como The Society of Naval Architects of Japan (1966), Crenshaw Jr. (1975), Rowe (1996) e Hensen (1997).

1.6. Estrutura do texto

O texto da tese foi estruturado da seguinte forma:

- O capítulo 2 trata de uma fundamentação teórica sobre os projetos conceituais de dimensionamentos de espaços náuticos, e ferramentas aplicadas na fase de projeto detalhado para otimização destes dimensionamentos. É também discutida a teoria geral dos modelos físicos, suas aplicações nos estudos de engenharia portuária e as possibilidades de utilização em ensaios de verificação das condições de manobrabilidade de navios.
- O capítulo 3 trata de uma revisão bibliográfica sobre os tipos de simuladores de manobra existentes, contextualizando o estado da arte sobre o assunto. São apresentados os principais tipos de simuladores em modelos físicos e computacionais, suas características e aplicações;
- O capítulo 4 mostra os passos de desenvolvimento e os principais recursos disponíveis de uma nova ferramenta a ser empregada em modelos físicos reduzidos de espaços náuticos para simulação de manobras de navios, denominada de Simulador Analógico de Manobras – SIAMA 2014;
- O capítulo 5 discute cada uma das etapas do sistema desenvolvido para verificação das condições de manobrabilidade de navios, fundamentado na aplicação do conjunto de recursos que integram o SIAMA 2014;
- O capítulo 6 apresenta os principais resultados obtidos na aplicação do SIAMA 2014 em um estudo de caso de simulação de manobras realizadas no modelo físico da Baía de São Marcos, no qual modelos de navios não tripulados e controlados remotamente por rádio

frequência são comandados por práticos sob diferentes condições ambientais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Definição de porto e a tendência dos projetos portuários

Na definição clássica, porto nada mais é do que um ancoradouro de navios, que deve proporcionar local seguro para as operações de movimentação de carga.

Segundo Borgo Filho (2008),

Atualmente, o porto deve ser entendido como uma unidade complexa que integra dois tipos de transporte, cujo objetivo é propiciar de maneira rápida, segura e econômica a transferência de mercadorias do meio aquático para o terrestre e vice-versa.

As vantagens econômicas do transporte aquaviário estão intimamente ligadas às dimensões das embarcações, já que os custos associados ao transporte das mercadorias diminuem quanto maior for o porte (ou a capacidade de carga) das embarcações. Por este motivo, existe uma enorme pressão no mundo inteiro para construção de portos com disponibilidade para receber navios cada vez maiores.

O projeto de grandes portos é essencialmente multidisciplinar e, geralmente, bastante complexo, e dentre suas principais características devem ser garantidas:

- Condições adequadas de abrigo: contra ações ambientais como correntes marítimas, ondas e ventos. A condição de abrigo é fundamental para garantir segurança durante as manobras e também durante o período em que o navio está atracado no terminal para movimentação de carga;
- Profundidade e acessibilidade: lâmina d'água suficiente para a embarcação-tipo entrar ou sair da zona portuária, preferencialmente,

sem restrições de nível d'água, bem como profundidade suficiente nos berços de atracação durante todo o período de movimentação de carga. Os canais de acesso ao porto precisam garantir condições de navegação segura e eficiente, com larguras e raios de curvatura adequados;

- Retroporto: área terrestre suficiente para garantir adequada movimentação de cargas, estocagem das mesmas, bem como para outras facilidades como a administração portuária;
- Acesso a outros modais de transporte: o acesso eficiente a outros modais de transporte é fundamental para inserção do porto na logística de transporte de cada região, considerando-se que as cargas podem ser direcionadas aos polos consumidores por meio terrestre (rodoviário ou ferroviário) ou aéreo.

É importante destacar também que os portos frequentemente estão inseridos em locais de equilíbrio ambiental frágil, com rica biodiversidade e movimentação de sedimentos, responsáveis pela própria morfologia fluvial ou marítima. Por este motivo, os estudos de impacto ambiental de projetos portuários devem ser realizados com bastante cuidado, sob pena das interferências provocadas pela implantação das estruturas portuárias sobre a região lindeira serem bastante drásticos.

No item 2.2 serão destacados os principais elementos que norteiam o dimensionamento dos espaços náuticos em projetos portuários. Para este dimensionamento existem três importantes normas aceitas internacionalmente que são PIANC (2014), USACE (2006) e ROM (1999). O presente trabalho vai apoiar-se fundamentalmente na primeira, pois além de ser a mais recente e atualizada, também está sendo utilizada como base para elaboração da nova norma brasileira.

2.2. Elementos do Projeto Náutico Portuário

Uma das etapas mais importantes do projeto portuário é o dimensionamento dos espaços náuticos, que dizem respeito às áreas aquaviárias propriamente ditas. Estes espaços podem ser classificados em dois tipos:

- Áreas de navegação, que incluem os canais de acesso e bacias de evolução (ou giro);
- Áreas com embarcações estacionadas, que são as áreas de fundeio, bacias de espera ou quarentena, áreas de amarração e berços de atracação.

O projeto dos canais de acesso e bacias portuárias pode ser dividido em duas etapas: projeto das dimensões verticais e projeto das dimensões horizontais. O dimensionamento vertical diz respeito à definição das profundidades, bem como determinação do calado aéreo. O dimensionamento horizontal define a orientação, alinhamento, largura, raios de curvatura e sobrelargura de curvas de canais de acesso e dimensões em planta das demais áreas náuticas.

Para cada uma das etapas supracitadas do projeto, a PIANC (2014) estabelece ainda duas fases de trabalho, denominadas: Projeto Conceitual e Projeto Detalhado. O Projeto Conceitual consiste em uma etapa preliminar de definição geral das principais dimensões, fundamentada em abordagem determinística e de cunho conservador. De fato, no Projeto Conceitual são utilizadas as informações ambientais e das embarcações que estejam à disposição. Já a etapa de Projeto Detalhado propõe o refinamento da solução, procurando minimizar custos, sem abrir mão das condições de segurança, aplicando para tal fim um conjunto mais sofisticado de modelos analíticos, ferramentas computacionais e modelagem física. Nesta etapa aprofunda-se a coleta de informações necessárias para evoluir para um Projeto Básico, finalizado no Projeto Executivo.

2.2.1. Projeto das Dimensões Verticais

A PIANC (2014) elenca os principais fatores intervenientes para determinação da profundidade de canais de acesso portuários, conforme esquematizado na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Parcelas constituintes do cálculo da profundidade requerida de navegação para canal de acesso. Fonte: Alfredini e Arasaki (2014).

Os fatores apresentados na Figura 2.1 podem ser sucintamente descritos da seguinte forma:

➤ Fatores relacionados ao nível d'água:

- **Nível da maré selecionado:** diz respeito à escolha do nível de referência da maré astronômica como situação crítica de operação. Pode ser escolhido desde o mínimo valor já registrado no local (*minimum minimorum*), incluindo efeitos meteorológicos, em portos onde não se deseje obter restrições de navegação, ou valores menos desfavoráveis, estabelecendo-se janelas de maré para navegação, dependendo de análise técnico-econômica;

- Mudança da maré durante trânsito e manobra;
- Tolerâncias para incertezas na referência do nível d'água e para condições meteorológicas mais desfavoráveis;

➤ Fatores relacionados ao navio:

- Calado estático para condições desfavoráveis de carregamento;
- Variação da densidade da água: afundamento do navio aumenta com a redução da densidade da água, por exemplo, na passagem de água salgada para água doce ou salobra;
- *Squat*: afundamento dinâmico longitudinal do navio (afundamento da proa) que ocorre em função do aumento de sua velocidade em relação à água;
- *Dynamic Heel*: afundamento dinâmico transversal do navio (bombordo ou boreste) que pode ocorrer durante um giro ou por ações externas não oscilatórias, tais como ventos, correntes ou mesmo rebocadores. Não deve ser confundido com o movimento de *roll*¹ que é devido à ação de ondas (movimento oscilatório).
- Efeito de onda: incremento de calado em função da movimentação do navio por ação do clima de ondas;
- Folga sob a quilha e tolerância para incertezas no calado estático;

➤ Fatores relacionados ao fundo:

- Tolerância para incertezas da cota de fundo, relacionadas à batimetria e movimentação de sedimentos;

¹ Os movimentos típicos das embarcações são apresentados no apêndice A.1.

- Tolerância na execução da dragagem e para alterações de fundo entre dragagens.

A PIANC (2014) relaciona também os principais critérios para definição determinística da profundidade dos canais de acesso, fundamentando-se em cada um dos fatores supracitados. Os resultados assim obtidos podem ser considerados como uma primeira aproximação do valor da profundidade requerida.

Este dimensionamento deve ser validado e refinado na fase de Projeto Detalhado utilizando-se outras abordagens e ferramentas. Para isto, é necessário, em primeiro lugar, um conjunto de dados e informações mais amplos e detalhados sobre a região, que caracterizem as condições ambientais e as características das embarcações. Nesta fase, levantamentos de campo são importantes para dar confiabilidade no dimensionamento. A PIANC (2012) descreve o seguinte conjunto de dados fundamentais: ventos, ondas, correntes, marés, batimetria, geotecnia, misturação (água doce e salgada), visibilidade, tempestades elétricas e pressão atmosférica.

Dependendo da envergadura do projeto portuário, os levantamentos de campo podem tornar-se bastante onerosos, abrangendo grandes áreas e com monitoramentos de longo período. Entretanto, é importante lembrar que a qualidade dos resultados na fase de detalhamento, depende diretamente da confiabilidade que se tem nos dados ambientais. Afinal, não importa qual seja a ferramenta de modelagem adotada nesta etapa, se os dados de entrada são ruins, o dimensionamento ficará comprometido.

Para refinamento da solução do Projeto Conceitual existem diversas abordagens que podem ser utilizadas. Uma possibilidade é a utilização de modelos probabilísticos, ao invés de modelos determinísticos de cálculo. Os modelos probabilísticos introduzem conceitos como “risco aceitável” e “níveis de segurança” nas operações, o que permite ao projetista obter dimensões otimizadas, fundamentado em critérios estabelecidos em conjunto com os atores envolvidos na obra portuária. Geralmente, este tipo de procedimento

permite economia significativa na execução da obra, mas precisa ser adotado com cuidado, e respeitando-se os níveis de segurança estabelecidos em norma, para evitar problemas de difícil solução na fase de operação do porto.

Além disso, ferramentas como modelagem numérica e física podem ser utilizadas para refinar os resultados. Por exemplo, os modelos numéricos podem ser utilizados para avaliação dos efeitos da variação das marés nos canais, estimativa de movimentação de sedimentos e variação de fundo, simulação de cenários de ondas, entre outros. Os modelos físicos também podem ser utilizados para avaliação qualitativa de movimentação de sedimentos, como suporte ao modelo computacional, e para definição das operações de dragagem e áreas de despejo, assim como podem ser utilizados para avaliação de movimentação de embarcações.

2.2.2. Projeto das Dimensões Horizontais

O projeto das dimensões horizontais dos canais de acesso e bacias portuárias condiciona, em grande parte, o arranjo geral do porto. Nesta fase são definidos elementos fundamentais como alinhamentos, orientações, larguras, raios de curvatura e sobrelarguras dos canais de acesso, assim como dimensões gerais das bacias portuárias.

A definição das dimensões em planta destes elementos depende das características das embarcações-tipo que vão utilizar o porto. A Figura 2.2 define as principais dimensões dos navios.

Figura 2.2 - Dimensões características dos navios. Fonte: Alfredini e Arasaki (2014).

Na fase de projeto conceitual, a PIANC (2014) propõe um método determinístico para definição da largura dos canais de acesso, cujos principais parâmetros intervenientes serão sucintamente discutidos a seguir.

As forças ambientais que condicionam o dimensionamento são: vento, correntes, ondas e visibilidade. Nos critérios gerais, a PIANC (2014) recomenda que o canal seja alinhado com as correntes dominantes, evitando-se assim correntes transversais que dificultem as manobras. Embora os ventos e ondas sejam fenômenos de maior dispersão com relação à direção e intensidade, as condições dominantes destas variáveis devem ser conhecidas, pois ventos transversais aumentam a largura requerida para manobra, especialmente quando as embarcações estão em baixas velocidades. Deve-se atentar também para as ondas com altura significativa expressiva (acima de 2 m) e com comprimento semelhante ou superior ao comprimento da embarcação, pois provocam maiores dificuldades para a manobra.

Para dimensionamento dos trechos retos, a Figura 2.3 e a Figura 2.4 apresentam alguns elementos básicos para definição da largura requerida dos canais de acesso.

Figura 2.3 – Elementos do canal de acesso. Fonte: Alfredini e Arasaki (2014).

Figura 2.4 – Elementos da largura de um canal de acesso de mão-dupla. Fonte: Alfredini e Arasaki (2014).

O dimensionamento determinístico proposto pela PIANC (2014) apresenta critérios simples para atribuição de valores a cada um dos elementos apresentados na Figura 2.4. O valor da largura requerida de um canal de mão-dupla pode ser obtido pela equação:

$$W = W_M + 2 \cdot W_B + W_P \quad (1)$$

$$W_M = W_{MB} + \sum W_i \quad (2)$$

Nas quais:

- W : largura requerida
- W_M : faixa de manobra
- W_B : folga com a margem

- W_P : distância de passagem
- W_{MB} : faixa de manobra básica
- $\sum W_i$: larguras adicionais

A faixa de manobra básica (W_{MB}) é obtida a partir de considerações sobre a manobrabilidade das embarcações, aplicando-se um fator multiplicador à boca do navio (B) que varia de 1,3 para manobrabilidade boa, até 1,8 para manobrabilidade ruim. Para determinar a faixa de manobra (W_M) somam-se diversas parcelas, chamadas genericamente de larguras adicionais, que são tabeladas e correlacionam a velocidade do navio com fatores como velocidade do vento transversal dominante, velocidades das correntes transversal e longitudinal dominantes, altura da onda significativa, auxílios à navegação, tipo de fundo e profundidade do escoamento. O fato de o canal ser abrigado (interno) ou desabrigado (externo) também é parâmetro importante na determinação destas parcelas.

As folgas com as margens e distância de passagem também são tabeladas e dependem de fatores como velocidade do navio, abrigo do canal, entre outros.

Ao cálculo da largura requerida, ainda deve-se considerar sobrelarguras em caso de trechos curvos.

Os raios de giro recomendados nos trechos em curva dependem fundamentalmente do comprimento da embarcação e da relação entre lâmina d'água e calado do navio.

Portanto, o critério proposto pela PIANC (2014) para a etapa de Projeto Conceitual é um modo simples e rápido para se obter uma primeira aproximação da largura requerida dos canais de acesso, devendo ser aplicado para os diversos tipos de embarcações que vão utilizar o porto, a fim de determinar o caso mais crítico.

Entretanto, o dimensionamento assim realizado pode conduzir a condições extremamente conservadoras, e, portanto, a obras de custo muito elevado.

A otimização do dimensionamento dos canais de acesso e bacias portuárias é realizada na fase de Projeto Detalhado, onde ferramentas mais sofisticadas podem ser incorporadas na análise, de tal forma a reproduzir com maior fidelidade o cenário em estudo. Desta forma, é possível a elaboração de projetos mais econômicos, sem abrir mão da questão da segurança operacional.

A PIANC (2014) divide as principais ferramentas que podem ser aplicadas no detalhamento do projeto horizontal em dois grupos:

- Critérios e fórmulas especiais: que levam em consideração de modo mais detalhado o efeito da ação das forças externas (vento, ondas e correntes) sobre a manobrabilidade das embarcações;
- Modelos de simulação de manobra.

O primeiro grupo não será abordado neste texto, mas algumas técnicas para sua aplicação podem ser encontradas nos apêndices da PIANC (2014). Já o segundo grupo, será discutido em maiores detalhes, já que é o foco principal deste trabalho.

Existem diferentes tipos de modelos de simulação de manobra, mas, de forma geral, eles podem ser classificados em dois tipos: modelos físicos e modelos computacionais.

Nos itens a seguir e no capítulo 3, serão discutidos os principais conceitos envolvidos no desenvolvimento e utilização destes modelos para fins de manobra. Esta discussão servirá de base para entendimento da aplicabilidade e limitações destas ferramentas, bem como para o desenvolvimento do sistema experimental de otimização de manobras utilizando os modelos físicos não tripulados.

2.3. Conceitos gerais sobre modelos físicos

2.3.1. Revisão histórica da modelagem física em Hidráulica

A proximidade das grandes civilizações com os cursos d'água e com o mar sempre gerou a necessidade de o homem entender como se comportam as obras de engenharia nestes ambientes. Construções portuárias e a navegação propriamente dita sempre representaram grandes desafios para os engenheiros, pois os fenômenos físicos que intervêm nestas obras são muito difíceis de representar matematicamente.

Por este motivo, desde os primeiros estágios de desenvolvimento da engenharia, a utilização de modelos físicos em escala reduzida representou uma alternativa para entender o comportamento do escoamento de água em diferentes ambientes.

De acordo com Ivicsics (1980), o primeiro registro conhecido de modelo físico hidráulico reduzido pertence a Leonardo da Vinci (1452 – 1519), que tentou reproduzir fenômenos do escoamento de água com dimensões não muito grandes. Entretanto, neste trabalho pioneiro, não foram encontradas tentativas de descrever matematicamente as relações que permitissem a extrapolação das características hidráulicas obtidas no modelo para as condições reais de operação.

Ainda segundo o mesmo autor, o primeiro tratamento teórico do critério de semelhança para processos ocorrendo em diferentes escalas é atribuído a Isaac Newton (1642 – 1727), que estudou forças agindo sobre objetos geometricamente semelhantes movendo-se em líquidos de diferentes densidades. Em seu trabalho, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, publicado em 1687, Newton expõe o critério de semelhança mecânica entre dois sistemas. Apesar de ter sido o primeiro a apresentar a formulação exata para a Teoria da Semelhança, o crédito não é atribuído a este autor, talvez

porque seu trabalho tenha sido exclusivamente teórico, não apontando finalidades práticas para aplicação desta teoria.

John Smeaton (1724 – 1792) foi o primeiro a publicar resultados de testes com modelos em escala para fins práticos, com o objetivo de determinar a performance de rodas d'água e moinhos de vento. Entretanto, este autor não aplicou em seu trabalho as relações matemáticas de semelhança, embora tivesse ressaltado a importância das mesmas.

Segundo Hughes (2005), em 1852, Ferdinand Reech expressou, pela primeira vez, as relações matemáticas, como são conhecidas atualmente, do critério de semelhança, para estudar a resistência dinâmica de navios com ajuda de modelos em escala reduzida. Por meio destas expressões, o autor converteu velocidades e esforços de modelo para escala real.

Por volta de 1870, o engenheiro naval inglês William Froude (1810 – 1879) fez uma série de medidas em modelos de navios de escala reduzida, utilizando-se canais de laboratório construídos especificamente para tal fim, onde os navios eram puxados por sistema controlado. Segundo Ivicsics (1980), neste trabalho, Froude adota essencialmente as mesmas regras de semelhança desenvolvidas por F. Reech, assim como os mesmos métodos para determinação da resistência hidráulica total do modelo de navio. Os resultados obtidos em modelo foram verificados com algumas medidas de campo.

Apesar de não ter sido o primeiro a formular as relações de semelhança, o trabalho de Froude ficou muito mais famoso do que os anteriores, razão pela qual, atualmente, o grupo adimensional fundamental utilizado como critério de conversão de grandezas físicas de modelo para o real, leva o nome deste autor. Os princípios da Teoria da Semelhança, bem como os critérios fundamentais de conversão das grandezas físicas básicas serão apresentados no item 2.3.2.

No final do século XIX, diversos autores avançaram nas pesquisas sobre a utilização de modelos hidráulicos em escala reduzida como ferramenta de

avaliação de projetos de Engenharia. No início do século XX, diversos laboratórios especializados em modelagem física hidráulica começaram a surgir ao redor do mundo. Um dos precursores foi o *Delft Hydraulics Laboratory*, que em 1927 foi fundado com a missão prioritária de auxiliar na proteção costeira da Holanda contra inundações. O Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – LHEPUSP foi o primeiro do gênero no Brasil, tendo iniciado suas atividades em 1947.

2.3.2. Princípios da Teoria da Semelhança

Quando fenômenos físicos muito complexos são estudados, Sharp (1981, tradução nossa) pontua que:

Quando o sistema físico torna-se tão complicado para analisar por técnicas matemáticas, outros métodos podem ser usados para alcançar uma solução parcial ou incompleta. Tais métodos são conhecidos como *análises parciais*. Estes métodos não dão uma resposta completa ao problema, mas conduzem o pesquisador ao longo de um caminho correto, onde seja possível experimentalmente determinar constantes e coeficientes que podem ser usados com objetivo de obter uma definição suficientemente completa das leis físicas que governam o sistema sob investigação.

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.

A partir disto, uma série de experimentos poderia ser conduzida para investigar como estas variáveis afetam o fenômeno. O problema é que em fenômenos complexos, o número de variáveis intervenientes pode ser muito grande, e, portanto, para avaliar a influência de cada uma das variáveis, seria necessário manter as demais fixas. Desta forma, o número de experimentos se tornaria demasiadamente grande.

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 e Cabelka (1981) apresentam o método de Rayleigh e o método de Buckingham (também conhecido como Teorema “Pi”) para definição destes adimensionais.

De acordo com Langhaar¹ (1951 *apud* Hughes, 2005), o problema da análise dimensional é que esta técnica, por si só, não permite uma solução completa do problema (trata-se de uma análise parcial), pois não oferece uma interpretação física da solução obtida.

Apesar disto, em muitos casos, a análise dimensional permite obter os adimensionais fundamentais de um dado fenômeno, de tal forma que, com auxílio de experimentos, possa-se posteriormente entender melhor as leis físicas que regem o processo.

Portanto, 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.

Para que as grandezas físicas obtidas experimentalmente em estudos de modelo físico tenham correspondência com as análogas do ambiente real, é necessário que estes dois sistemas de escoamento tenham semelhança entre

¹ LANGHAAR, H. L. **Dimensional Analysis and Theory of Models**. New York: John Wiley & Sons, 1951.

si. E para que seja obtida a semelhança completa entre dois sistemas hidráulicos, é necessário que os mesmos sejam semelhantes geometricamente, cinematicamente e dinamicamente.

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:

$$\lambda_L = \frac{L_p}{L_m} = \frac{h_p}{h_m} = \frac{B_p}{B_m} \quad (3)$$

Na qual:

- 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 cinemática significa que todas as componentes de velocidades, e conseqüentemente suas derivadas no tempo que são as acelerações, medidas em pontos homólogos de dois sistemas geometricamente semelhantes possuem taxa constante. Esta é a semelhança de movimento, e, para que seja obtida, necessariamente, deve ser garantida também a semelhança de forma (ou geométrica). Vale, portanto, a seguinte relação:

$$\lambda_V = \frac{\vec{U}_p}{\vec{U}_m} = \frac{\vec{V}_p}{\vec{V}_m} = \frac{\vec{W}_p}{\vec{W}_m} \quad (4)$$

Na qual:

- λ_V : fator de escala cinemático;

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

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. Liu e 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). Assim, a segunda lei de Newton aplicada a uma partícula fluida poderia ser escrita como:

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

Ou ainda,

$$\overrightarrow{FP} + \overrightarrow{FV} + \overrightarrow{G} + \overrightarrow{FI} = 0 \quad (5)$$

Na qual, FI é a força de inércia, que, por definição, é igual ao oposto do produto da massa pela aceleração da partícula.

Assim, a semelhança dinâmica estaria garantida quando:

$$\frac{(\overrightarrow{FP})_p}{(\overrightarrow{FP})_m} = \frac{(\overrightarrow{FV})_p}{(\overrightarrow{FV})_m} = \frac{(\overrightarrow{G})_p}{(\overrightarrow{G})_m} = \frac{(\overrightarrow{FI})_p}{(\overrightarrow{FI})_m} = \lambda_F \quad (6)$$

Na qual:

- λ_F : é o fator de escala dinâmico

Ainda segundo Liu e Albertson (1959), a força de inércia para um escoamento em regime permanente, onde se desprezam as acelerações convectivas nas direções ortogonais ao fluxo, pode ser escrita pela seguinte expressão:

$$\vec{F_I} = -\rho \cdot Vol \cdot u \cdot \frac{du}{dx} \quad (7)$$

Na qual:

- ρ : massa específica da água;
- Vol : volume elementar ($dx \cdot dy \cdot dz$);
- u : componente da velocidade na direção x .

Em termos de grandezas dimensionais lineares (L) e de velocidade (V), a equação pode ser reescrita como:

$$\vec{F_I} = -\rho \cdot L^2 \cdot V^2 \quad (8)$$

Analogamente, as demais forças podem ser escritas como:

$$\vec{G} = \rho \cdot g \cdot L^3 \quad (9)$$

$$\vec{F_V} = \mu \cdot V \cdot L \quad (10)$$

$$\vec{F_P} = p \cdot L^2 \quad (11)$$

Nas quais:

- g : é a aceleração da gravidade;
- μ : viscosidade dinâmica da água;
- p : pressão média no volume elementar.

Para que a semelhança dinâmica, Equação (6), seja atendida completamente, ou seja, para que todas as forças reais e de modelo em pontos homólogos

tenham a mesma relação de proporção, é preciso que o fator de escala seja unitário. Em outras palavras, a semelhança dinâmica completa no escoamento fluido só é possível quando o modelo é construído em escala real, o que é inviável para a maior parte dos problemas práticos de Engenharia.

Por este motivo, para os estudos em modelo hidráulico é preciso trabalhar com uma semelhança dinâmica parcial, também chamada por alguns autores de Semelhança Hidráulica, na qual se procura respeitar a relação de proporção das forças mais relevantes na solução do problema. 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, a semelhança hidráulica seria garantida quando:

$$\frac{(\vec{F})_p}{(\vec{F})_m} = \frac{(\vec{G})_p}{(\vec{G})_m} \quad (12)$$

Rearranjando os termos e substituindo as Equações (8) e (9):

$$\begin{aligned} \left(\frac{\vec{F}}{\vec{G}} \right)_p &= \left(\frac{\vec{F}}{\vec{G}} \right)_m \Rightarrow \left(\frac{-\rho \cdot L^2 \cdot V^2}{\rho \cdot g \cdot L^3} \right)_p = \left(\frac{-\rho \cdot L^2 \cdot V^2}{\rho \cdot g \cdot L^3} \right)_m \Rightarrow \\ &\Rightarrow \left(\frac{V^2}{g \cdot L} \right)_p = \left(\frac{V^2}{g \cdot L} \right)_m \end{aligned} \quad (13)$$

A relação entre parênteses na Equação (13) é um adimensional, e sua raiz quadrada é conhecida como número de Froude (Fr):

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (14)$$

Portanto, este é o adimensional fundamental, que 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.

Analogamente, é possível determinar outros adimensionais fundamentais para as demais semelhanças parciais, ou seja, combinando-se as forças de inércia com as forças viscosas e de pressão, respectivamente. Assim:

$$\left(\frac{\vec{F}_I}{\vec{F}_V}\right)_p = \left(\frac{\vec{F}_I}{\vec{F}_V}\right)_m \Rightarrow \left(\frac{-\rho \cdot L^2 \cdot V^2}{\mu \cdot V \cdot L}\right)_p = \left(\frac{-\rho \cdot L^2 \cdot V^2}{\mu \cdot V \cdot L}\right)_m \Rightarrow \left(\frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu}\right)_p = \left(\frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu}\right)_m$$

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} \quad (15)$$

$$\left(\frac{\vec{F}_I}{\vec{F}_P}\right)_p = \left(\frac{\vec{F}_I}{\vec{F}_P}\right)_m \Rightarrow \left(\frac{-\rho \cdot L^2 \cdot V^2}{\rho \cdot L^2}\right)_p = \left(\frac{-\rho \cdot L^2 \cdot V^2}{\rho \cdot L^2}\right)_m \Rightarrow \left(\frac{\rho \cdot V^2}{\rho}\right)_p = \left(\frac{\rho \cdot V^2}{\rho}\right)_m$$

$$Eu = \frac{\rho}{\rho \cdot V^2} \quad (16)$$

Na quais:

- *Re*: número de Reynolds;
- *Eu*: número de Euler.

Hughes (2005) aplica o Teorema “Pi” de Buckingham para análise de problemas hidrodinâmicos costeiros, para os quais define como variáveis independentes fundamentais: velocidade do escoamento, comprimento do trecho, peso específico da água, viscosidade dinâmica da água e aceleração da gravidade (nesta análise também são desprezados a tensão superficial e efeitos de compressibilidade). Utilizando esta técnica de análise dimensional, o autor determina os mesmos três adimensionais característicos do problema: *Fr* (número de Froude), *Re* (número de Reynolds) e *Eu* (número de Euler).

Portanto, por abordagens distintas, é possível chegar às mesmas conclusões. A diferença é que a análise dimensional não se preocupa com a interpretação física do problema. Por este motivo, preferiu-se apresentar neste texto a

determinação dos adimensionais, baseados na aplicação da Segunda Lei de Newton. Entretanto, vale destacar que a análise dimensional, como no exemplo acima, mostra-se extremamente útil, pois no caso do desconhecimento de leis físicas que governam um dado fenômeno, esta técnica pode ser utilizada para estabelecer as relações fundamentais que serão utilizadas para compreender melhor o fenômeno por meio experimental.

2.3.3. Importância e limitações do critério de Semelhança de Froude

Conforme apresentado no item 2.3.2, para obter-se a semelhança dinâmica completa em estudos aquaviários seria necessário que todos os adimensionais fundamentais (Fr , Re e Eu) fossem iguais em modelo e ambiente real. Infelizmente, nos problemas mais comuns de Engenharia Hidráulica, isto só é possível quando o modelo é construído em escala real, o que, evidentemente, é inviável para análises de regiões aquaviárias extensas.

Entretanto, como nestes problemas as relações entre as forças gravitacionais e as forças de inércia são as mais importantes, costuma-se aplicar um critério de semelhança dinâmica parcial, onde são atendidas a semelhança geométrica, a semelhança cinemática e o critério de Semelhança de Froude. Esta condição é chamada por alguns autores, simplesmente, de Semelhança Hidráulica, pois atende a maior parte dos problemas práticos nesta área da Engenharia.

É preciso lembrar que para alcançar esta análise, hipóteses simplificadoras foram feitas. Por exemplo, consideraram-se como desprezáveis os efeitos de tensão superficial e compressibilidade nas equações de força. O segundo efeito, de fato, em se tratando de escoamento de água, tem validade geral, e não representa problema na análise dos resultados, já que para fins práticos a água pode ser considerada como fluido incompressível.

Já o primeiro efeito, de tensão superficial, pode ser importante em algumas análises hidráulicas, como por exemplo, a formação de vórtices e de ondas em modelo. No caso de estudos de manobras em locais com formação de ondas, é

preciso garantir que as ondas reproduzidas em modelo físico não sejam do tipo capilar, o que pode ocorrer quando as escalas são muito reduzidas. Neste caso, as ondas capilares são um efeito de modelo, pois ao se reproduzir uma onda de gravidade real em escala muito reduzida, suas dimensões tornam-se tão pequenas que a força de restauro passa a ser a tensão superficial, diferentemente do que ocorre no ambiente real. As ondas capilares têm propriedades físicas diferentes das ondas de gravidade, propagando-se mais rapidamente quanto menor for seu comprimento. Desta forma, quando a análise de ondas é importante, é comum utilizar outro adimensional de referência, conhecido como número de Weber (We), que expressa a relação entre as forças de inércia e a tensão superficial, conforme a equação (17).

$$We = U \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot L}{\sigma}} \quad (17)$$

Na qual:

- σ : a tensão superficial da água.

Caso o número de Weber seja alto (acima de 500), o efeito da tensão superficial pode ser desprezado. Caso contrário, precisa ser analisado na avaliação do problema que está sendo representado. White (2007) destaca que quando We é muito pequeno, especialmente próximo ou menor do que 1, este efeito passa a ser dominante na formação do fenômeno hidráulico estudado. Portanto, no caso da representação de ondas em modelo físico, o ideal é o que We seja bem maior do que a unidade.

Além disso, pelo critério de Semelhança de Froude, o fato de não haver igualdade do Número de Reynolds significa que estão sendo desprezados os efeitos de viscosidade. Na maior parte dos problemas práticos de Engenharia Hidráulica em superfície livre, esta simplificação não representa empecilhos na análise dos resultados gerais de fluxo, desde que o escoamento em modelo físico seja do tipo turbulento rugoso, como no meio real, pois nesta condição as forças viscosas independem de Re .

Entretanto, em alguns tipos de ensaios em modelos físicos froudianos é preciso levar em consideração os efeitos viscosos. Por exemplo, nos escoamentos em torno de corpos total ou parcialmente submersos, o comportamento da camada limite viscosa em modelo e meio real são distintos. Este fator é particularmente importante na análise das forças de arrasto que agem sobre o casco de um navio em movimento. Como não há possibilidade de garantir simultaneamente as semelhanças de Froude e Reynolds, este problema precisa ser corrigido através de técnicas de laboratório.

A não igualdade do Número de Euler não é considerada como um problema para a Semelhança Hidráulica, pois a força devido à pressão pode ser tratada como uma variável dependente das demais, ou seja, consideradas as forças de inércia, gravitacional e viscosa, a força de pressão poderia ser determinada através da Equação (5).

As limitações acima descritas, especialmente com relação à viscosidade e tensão superficial, vão provocar os chamados efeitos de escala, ou seja, diferenças nos resultados entre modelo e ambiente real provocadas pela incapacidade de simular apropriadamente em escala reduzida todas as forças envolvidas no fenômeno.

Os efeitos de escala são inerentes aos estudos de modelos hidráulicos reduzidos. Por este motivo, é preciso saber lidar com esta limitação da ferramenta, e interpretar adequadamente os resultados. Existem diversas técnicas que são utilizadas na prática dos ensaios e que permitem contornar eventuais problemas oriundos destas limitações. Algumas delas serão comentadas ao longo do texto, para o caso de estudos de manobras de navios em escala reduzida.

2.3.4. 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-se a Equação (13). Assim, por exemplo, o fator de escala cinemático (λ_V), pode ser determinado da seguinte forma:

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

Portanto, todas as velocidades medidas em modelo, terão que ser multiplicadas pela raiz quadrada da escala geométrica para determinação de seu valor real. Por exemplo, num modelo com escala geométrica de 1:100 (dimensões lineares do modelo físico cem vezes menor do que o real), o fator de escala para as velocidades será de 1:10.

Analogamente, é possível determinar o fator de escala para qualquer outra grandeza física de interesse. Nos estudos de manobra, uma das grandezas fundamentais a ser considerada é o tempo. O fator de escala de tempo pode ser determinado utilizando-se a seguinte relação básica:

$$t = \frac{L}{V}$$

Assim,

$$\left(\frac{V^2}{g \cdot L} \right)_p = \left(\frac{V^2}{g \cdot L} \right)_m \Rightarrow \left(\frac{V}{g \cdot t} \right)_p = \left(\frac{V}{g \cdot t} \right)_m \Rightarrow \frac{V_p}{V_m} = \frac{t_p}{t_m} \Rightarrow \lambda_V = \lambda_t \Rightarrow \lambda_t = \sqrt{\lambda_L}$$

O fator de escala de tempo tem a mesma relação com a escala geométrica que o fator de escala cinemático. Por exemplo, numa escala geométrica de 1:100, todos os tempos medidos em modelo terão de ser multiplicados por 10 vezes para obter a relação com os tempos reais. Em termos simples, o intervalo de tempo decorrido num ensaio de modelo é 10 vezes mais rápido que o real para a escala geométrica de 1:100.

Conforme dito anteriormente, outras grandezas físicas de interesse podem ter seus fatores de escala calculados em relação à escala geométrica para o critério de Semelhança de Froude, utilizando o mesmo tipo de procedimento. Abaixo se apresentam alguns dos fatores de escala mais comuns:

- Fator de escala de área: $\lambda_{\text{área}} = \lambda_L^2$
- Fator de escala de volume: $\lambda_{\text{vol}} = \lambda_L^3$
- Fator de escala de vazão: $\lambda_Q = \lambda_L^{5/2}$
- Fator de escala de força: $\lambda_F = \lambda_L^3$

2.4. Modelagem física no ambiente costeiro

Existem diferentes tipos de modelos físicos hidráulicos reduzidos que podem ser aplicados a estudos na região costeira e estuarina¹. 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 e 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;

¹ Optou-se por descrever esse ambiente aquaviário, que é mais complexo e abrangente do que o hidroviário interior, pois ocorrem marés e ondas.

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 (1992) afirma que é possível estudar os seguintes aspectos:

- Abrigo de ondas e/ou correntes, intervindo na geometria de molhes, quebra-mares, 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), por exemplo, 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.

Uma 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. Estes modelos podem ser de dois tipos:

- Bidimensional (2D), também chamado de canal de ondas (Foto 2.1): que são canais de longa extensão, mas largura limitada, usualmente utilizados para estudar efeito das ondas sobre o corpo de quebra-mares, a fim de definir sua estabilidade, dimensões de material de proteção, altura da crista, entre outros fatores;

Foto 2.1 – Modelo bidimensional com sistema gerador de ondas irregulares – Foto do acervo do Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da USP – LHEPUSP.

- Tridimensional (3D), também chamado de bacia de ondas (Foto 2.2): que 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.

Foto 2.2 – Modelo tridimensional do estuário de Santos/SP com sistema gerador de ondas regulares – Foto do acervo do LHEPUSP.

Tanto nos modelos 2D quanto 3D, a geração das ondas de curto período pode ser do tipo regular ou irregular, dependendo do mecanismo de geração disponível. As gerações de ondas regulares, ou seja, com períodos constantes, são uma simplificação do fenômeno natural, mas sua representação pode ser suficiente para atingir os objetivos de uma série de estudos, como, por exemplo, a comparação de alternativas de arranjos. As ondas com períodos irregulares são mais realistas e aproximam as condições do modelo físico da realidade, desde que existam adequados levantamentos de campo que permitam construir séries temporais representativas do fenômeno local.

Ainda sobre os modelos hidráulicos com geração de ondas de curto período é preciso considerar que uma importante questão sobre a formação de ondas espúrias. Estas ondas podem surgir pela ação do próprio mecanismo gerador de ondas, ou por reflexão destas nas paredes do modelo. Darlymple (1985) apresenta uma discussão sobre os tipos de mecanismos geradores de ondas, bem como diferentes tecnologias para evitar formação de ondas espúrias durante a geração, bem como alguns tipos de sistemas mecânicos de absorção de ondas utilizados para evitar a propagação de ondas refletidas pelo efeito de parede dos modelos. Novak e Cabelka (1981) comentam sobre técnicas usualmente empregadas nos modelos para minimizar a reflexão de ondas por efeito de parede, tais como superfícies rugosas com perfis abatidos (tipo praia) nos limites do modelo.

No caso das bacias tridimensionais ainda há de se considerar o caso da necessidade de geração de ondas a partir de diferentes direções de modo a representar todas as variações importantes do fenômeno local. Nestes casos, o problema pode ser contornado por sistemas móveis de geração, ou ainda, por sistema de geração em módulos (batedor tipo serpente), que permite a reprodução do espectro direcional, dependendo das dimensões dos módulos e da área de reprodução do modelo.

Os modelos físicos de ondas de longo período são, na maior parte dos casos, para simulação dos efeitos de maré. As marés são ondas com período usual semi-diurno (aproximadamente 12 horas e 50 minutos) e sua principal

consequência sobre as regiões costeiras e estuarinas, além da elevação e rebaixamento periódicos da linha d'água, é a formação de correntes, que podem ser bastante significativas dependendo da amplitude da maré.

Os modelos para simulação de maré são geralmente de grandes dimensões e têm como finalidade avaliar as condições de fluxo de correntes na região costeira e estuarina, assim como suas consequências sobre estruturas portuárias. No caso de modelos com fundo móvel, podem ainda ter a finalidade de avaliar a capacidade de transportar sedimentos destas correntes em embocaduras estuarinas, ou a influência de intervenções de dragagem sobre a movimentação de sedimentos.

A reprodução da maré nos modelos físicos pode ser de dois tipos: dinâmica ou estática. No primeiro caso, a variação da maré ao longo do tempo (considerada a escala de tempo do modelo) é realizada por sistema de alimentação e comportas que controlam o fluxo e nível d'água no modelo. Allen (1952), Kobus (1980) e Alfredini, Arasaki e Amaral (2007) apresentam alguns tipos de mecanismos para variação automática da maré ao longo do tempo em modelo físico.

Conforme dito anteriormente, os modelos de reprodução de maré possuem geralmente grandes dimensões, de forma a permitir a reprodução de toda a área de interesse. Por este motivo, em muitos casos, é necessária uma grande redução na escala geométrica para atender a este propósito. Em casos assim, pode ser necessário a utilização da técnica de distorção de escala, ou seja, dimensões horizontais muito mais reduzidas do que as verticais, de tal forma a possibilitar a reprodução de áreas extensas, permitindo ainda a avaliação de efeitos verticais decorrentes das variações topobatimétricas, conforme discutido em Alfredini (1983 e 1988).

Allen (1952) apresenta dois exemplos de estudos realizados com maré dinâmica em regiões estuarinas. O primeiro na Baía de Liverpool na Inglaterra, onde foram estudados em modelo físico, com escala horizontal de 1:7.040 e escala vertical de 1:190 (taxa de distorção vertical de 37), melhorias para o

canal de acesso do Porto de Liverpool. O segundo modelo apresentado pelo autor tem escala horizontal de 1:8.060 e vertical de 1:192 (taxa de distorção vertical de 42) no qual foram otimizados os canais de aproximação ao Porto de Rangoon (atualmente Yangon) em Myanmar.

Alfredini *et al.* (2003) e Alfredini, Arasaki e Amaral (2007) apresentam dois exemplos de estudos realizados com maré dinâmica em regiões estuarinas brasileiras. O primeiro na embocadura marítima do Estuário do Rio Itanhaém (SP), onde foram estudados em modelo físico, com escala horizontal de 1:100 e escala vertical de 1:600 (taxa de distorção vertical de 6), melhorias para o canal de acesso ao Rio Itanhaém. O segundo estudo conta com modelo em escala horizontal de 1:1200 e vertical de 1:200 (taxa de distorção vertical de 6), no qual foram avaliados aspectos náuticos na Baía e Estuário de Santos (SP). Em ambos os estudos o fundo era fixo e inferiram-se padrões de transporte de sedimentos mediante a técnica de traçadores sedimentológicos, discutida em Alfredini (1988).

Motta (1965) construiu, operou e concluiu o primeiro estudo em modelo físico com fundo móvel no Brasil, o da regularização da Embocadura do Rio Tramandaí (RS) com escala horizontal 1:300 e vertical de 1:50 (taxa de distorção vertical de 6) para investigação de alternativas de molhes guias-correntes para o canal de navegação. Concomitantemente, no Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica (LHEPUSP) um grande modelo com fundo móvel da Embocadura Lagunar de Cananeia, com escala horizontal 1:400 e vertical de 1:100 (taxa de distorção vertical de 4) estava sendo calibrado para investigação de alternativas para melhoramento da barra homônima. Outro exemplo interessante de modelação com escalas geométricas distorcidas com fundo móvel para investigação do melhoramento do canal de navegação foi o da Barra de Santos, realizado na década seguinte.

Kobus (1980) mostra exemplos de estudos realizados em estuários alemães como Jade-Weser em Hamburgo, para o qual foi construído modelo físico com escala horizontal 1:800 e vertical de 1:100 (taxa de distorção vertical de 8) para investigação de alternativas de melhorias para os canais de navegação. Outro

exemplo interessante apresentado pelo autor é o estudo realizado no Estuário do Rio Elba, para o qual foi utilizado um modelo físico de mesma escala do anterior, mas com fundo móvel para investigação da estabilidade dos canais de navegação em função dos planos de dragagem previstos para recebimento de navios de maior porte.

Em alguns tipos de estudo não é necessário reproduzir a variação da maré ao longo do tempo, mas somente as condições de corrente para diferentes instantes de maré. Neste caso é possível utilizar modelos com sistema de controle de vazão e níveis d'água mais simples, ou seja, sem controle automático, e que trabalham, portanto, em regime permanente médio. São os denominados modelos de maré quase estática, nos quais as correntes são reproduzidas para um dado instante e nível de maré de cada vez. Trata-se portanto de uma “fotografia” de um dado instante considerado importante para avaliação do fenômeno.

Alfredini (1992) apresenta diversos estudos realizados no Terminal Ponta da Madeira, em São Luiz do Maranhão, para a qual foi construído um modelo físico reduzido de maré quase estática com escala de 1:170 (Foto 2.3), sem distorção de escala vertical. Nestes estudos foram avaliadas e otimizadas com extremo sucesso as condições de amarração de navios atracados, bem como obras de abrigo portuário contra ação de correntes (espigões). Portanto, nestes estudos, interessava a reprodução de cenários com as condições críticas de correntes em alguns instantes de marés enchente e vazante, considerando-se ainda diferentes amplitudes de maré, de tal sorte que não foi necessária a simulação da variação da maré ao longo do tempo.

Foto 2.3 – Modelo físico tridimensional do Terminal Ponta da Madeira/MA – Foto do acervo do LHEPUSP.

Este último exemplo mostra que, embora exista tecnologia para reprodução de maré dinâmica, os modelos físicos devem ser tão simples quanto possível, desde que atendam às necessidades do estudo. Quanto mais complexa a operação de um modelo, mais difícil e demorada é sua calibração, bem como maiores são as probabilidades de discrepâncias nos resultados. Por este motivo, é preciso antes de projetar um modelo, determinar claramente o propósito do estudo.

Em alguns tipos de estudo, tanto os efeitos de maré, quanto os efeitos de ondas de curto período são importantes para avaliação dos projetos de Engenharia, conforme apresentado em Alfredini (1988). Em casos como estes, Darlymple (1985) cita que há uma maior dificuldade para controlar e calibrar as duas ações ambientais simultaneamente, o que faz com que, na maior parte das vezes, os fenômenos sejam estudados separadamente.

Outra importante aplicação possível para os modelos físicos marítimos tridimensionais são os estudos de manobras de navios. Aproveitando-se das áreas reproduzidas de canais de acesso e bacias portuárias, devidamente calibradas com condições de níveis de maré, correntes, ondas e, eventualmente, até ventos, os grandes modelos marítimos podem servir para avaliação das condições de aproximação dos navios aos canais de acesso, giro em bacias portuárias e procedimentos de atracação e desatracação, utilizando-se de técnicas de manobras de modelos reduzidos de navios rádio

controlados. Como esta utilização do modelo físico é o foco principal deste trabalho, uma discussão detalhada será feita no item 3.2.2.

Além dos tipos de modelos físicos acima citados, existem outros que são muito importantes na determinação de informações sobre a resistência hidrodinâmica de navios sob diferentes condições de navegação. Estas informações são essenciais no desenvolvimento de projetos de navios, bem como fornecem importantes coeficientes aplicados na solução numérica das equações de movimento dos simuladores de manobra computacionais. Estes modelos e os principais tipos de ensaios realizados são apresentados de modo sucinto no apêndice A.2.

2.5. Cenário atual da modelagem física no ambiente costeiro

Para condução de estudos de engenharia em ambientes físicos complexos, como as zonas estuarinas, existem diferentes tipos de abordagens que podem ser aplicadas. Hughes (2005) aponta três técnicas básicas para tal fim:

- Levantamentos de campo;
- Ferramentas matemáticas;
- Medidas e observações de laboratório.

Levantamentos de campo são aqueles em que a investigação do fenômeno é feita no ambiente real. Embora se constitua na técnica ideal para avaliação de uma grandeza física, uma vez que esta é medida de modo direto no local de interesse, sua aplicação é limitada. Isto porque para a maior parte dos estudos de obras de engenharia em ambientes costeiros, quer por razão de custos, segurança ou prazo, não é possível avaliar diretamente em campo todas as grandezas físicas necessárias para cada uma das alternativas a serem estudadas.

Por exemplo, num estudo de implantação portuária em ambiente costeiro, por questões de custos, não é possível realizar investigações em ambiente real de diferentes arranjos para otimização da localização dos terminais de atracação. O mesmo poderia ser dito em relação a testes de manobras com navios em escala real, não somente pela questão econômica, mas principalmente por razões de segurança. Além disso, a quantidade de variáveis envolvidas na natureza e sua periodicidade dificultariam, ou praticamente impossibilitariam, a investigação de todas as condições ambientais a que estariam submetidas obras implantadas em ambientes costeiros ao longo de sua vida útil.

Portanto, geralmente os levantamentos de campo restringem-se a medições de grandezas básicas no ambiente real, como velocidades de corrente, níveis d'água, velocidade do vento, ondas, transporte sólido, conformações de fundo, entre outras, durante períodos representativos e cobrindo a área de interesse. Os produtos destes levantamentos servem de informação ou dados de entrada para outras técnicas de investigação, como as ferramentas matemáticas ou a modelagem física. Nestas condições é fácil de entender porque a qualidade dos resultados obtidos nestas últimas técnicas está diretamente relacionada a levantamentos de campo adequados.

Por conta das dificuldades com as pesquisas diretas em ambiente real, engenheiros sempre procuraram ao longo da história técnicas alternativas para tentar reproduzir os fenômenos físicos e, conseqüentemente, avaliar as melhores alternativas para implantação das obras. Neste âmbito, as equações matemáticas sempre encontraram destaque.

As dificuldades com o uso das ferramentas matemáticas, especialmente em ambiente complexos, como os costeiros, ficam por conta da infinidade de variáveis que afetam os fenômenos físicos, e da incapacidade das equações de representarem completamente a influência de cada um destes parâmetros. Além disso, grande parte das equações diferenciais que representam estes fenômenos não tem solução analítica, o que conduz à necessidade de aplicação de soluções numéricas.

Com os avanços na tecnologia dos computadores, as soluções numéricas de equações diferenciais complexas passaram a se tornar viáveis e, este tipo de abordagem cada vez mais vantajoso. Entretanto, ainda hoje, Hughes (2005), afirma que a modelagem matemática está longe de resolver completamente problemas como: características não lineares das equações de movimento, informações na zona de quebra das ondas, fenômenos turbulentos, interação do escoamento com o fundo, interações do escoamento com corpos flutuantes e submersos, conexões de múltiplos canais, entre outras. Em resumo, problemas fundamentais em ambientes costeiros.

Assim, a análise de ambientes de alta complexidade pode ser feita utilizando-se técnicas de laboratório, como a modelagem física. Em Engenharia Hidráulica, os modelos físicos em escala reduzida têm uma enorme gama de aplicações, e têm sido usados ao longo de muitos anos com bastante sucesso na avaliação de obras e de suas interferências sobre o meio.

Os modelos físicos reduzidos têm a vantagem de serem pequenos em relação às dimensões reais, o que permite a custos bem mais baixos reproduzir diferentes cenários e alternativas de intervenção para estudos investigativos de engenharia. Além disso, nos modelos reduzidos é possível controlar e variar sistematicamente as condições de contorno, como correntes, ventos e ondas, observando-se e medindo-se as principais variáveis de interesse, como velocidades, níveis d'água, esforços, entre outras, de uma maneira muito mais simples e rápida. Cenários catastróficos de eventos com probabilidade de ocorrência raríssimos, muitas vezes nem observados em campo, podem também ser simulados para avaliação de impactos. Diferentes arranjos de obras podem ser facilmente montados e desmontados, permitindo-se assim otimizar as soluções de engenharia.

Hughes (2005) destaca que o avanço dos computadores, e conseqüentemente das soluções numéricas, não tornou os modelos físicos obsoletos, mas abriu espaço para o progresso em conjunto das duas ferramentas. Este tipo de abordagem foi batizado como modelagem híbrida, e significa o desenvolvimento de estudos com a utilização conjunta das ferramentas de

modelagem física e computacional, aproveitando-se o melhor de cada uma delas, de acordo com suas aptidões. Na modelagem híbrida, os modelos físicos podem ser usados para fornecer dados de entrada ao modelo computacional, em regiões complexas, para diversos cenários previstos. O contrário também é possível, ou seja, estudos onde o modelo computacional é responsável por diversos dados de entrada para calibração do modelo físico.

O mesmo autor relata que, atualmente, os modelos físicos marítimos que reproduzem grandes áreas costeiras ou estuarinas estão ficando cada vez mais raros. Isto porque, em função das grandes dimensões, há dificuldades no processo de calibração e operação do modelo físico, além do custo relativamente alto que o torna menos competitivo em relação a outras ferramentas. O autor comenta que a tendência atual é a utilização de modelagem híbrida, aproveitando os resultados de simulações numéricas da área global do estudo como dados de entrada, ou condições de contorno, para modelos físicos de menores dimensões. Nesta nova tendência, os estudos em modelo físico reproduziriam áreas menores e ficariam restritos ao uso em áreas de escoamento mais complexo ou nas proximidades das estruturas portuárias, onde a modelagem numérica ainda tem problemas para representação adequada das condições de escoamento.

Entretanto, destaca-se que, em função da importância da investigação de manobras em áreas portuárias, os modelos físicos tridimensionais de grandes dimensões ainda encontram seu espaço de aplicação. E, embora a construção de um grande modelo somente para esta aplicação possa ser difícil de justificar considerando-se os recursos financeiros cada vez mais escassos destinados aos projetos no Brasil, deve-se lembrar que os modelos físicos têm aplicações múltiplas e podem subsidiar os estudos portuários de diferentes maneiras, como ilustrado no item 2.4.

Vale também destacar que atualmente as técnicas para construção de modelos físicos têm avançado bastante, o que resultou em consideráveis reduções de custos para implantação. Estas técnicas também possibilitam modelagens de cenários com muita rapidez, o que torna os estudos de alternativas muito mais

rápidos e competitivos, justificando plenamente os custos de manutenção do modelo físico.

Além disso, as ferramentas computacionais ainda estão longe de representar completamente as condições de escoamento e as suas influências sobre o movimento do navio, reforçando a importância da utilização da modelagem física para subsidiar os projetos. Este é um ponto importante para o presente trabalho, uma vez que a abordagem proposta nos capítulos seguintes para estudos de verificação de condições de manobras em ambientes portuários, vai propor a aplicação de modelagem física.

Portanto, o estágio atual dos estudos de engenharia no ambiente portuário costeiro deve considerar a aplicação simultânea das três técnicas supracitadas. Ou seja, levantamentos de campo das principais grandezas hidráulicas intervenientes, em quantidade e qualidade suficientes para garantir a confiabilidade dos modelos propostos, e a utilização da modelagem híbrida (física e computacional) para obter a representação da realidade da forma mais fiel possível, considerando-se o atual estágio de conhecimento técnico disponível.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE SIMULADORES DE MANOBRAS

3.1. Importância dos estudos de manobra e os tipos de modelagem aplicados

Conforme descrito no item 2.2.2, as características de manobrabilidade das embarcações são fundamentais para a definição do projeto horizontal de um porto.

Além disso, o mercado cada vez mais competitivo impõe uma pressão para que tanto os novos portos, como também aqueles existentes, operem com embarcações cada vez maiores, bem como com condições de tráfego mais intensas, o que representa, em última instância, uma redução de custos agregados ao produto final transportado.

Sob esta ótica, fica fácil entender a necessidade de revisitar todos os tradicionais critérios que definem os limites de segurança de manobrabilidade e que resultam, na fase de projeto, nas dimensões de canais de acesso e bacias portuárias. Além disso, estes critérios também definem, na fase de operação, as condições ambientais restritivas para operações de cada um dos navios que acessam os terminais. Esta reavaliação dos critérios tem, portanto, a finalidade de explorar ao máximo as possibilidades do projeto portuário, sem abrir mão da questão de segurança.

A forma mais simples de avaliar as dimensões náuticas horizontais necessárias para manobra de navios é com utilização de expressões matemáticas ou tabelas baseadas em critérios empíricos, semelhantes às adotadas pela PIANC (2014).

Hooft (1990) indica que, no início do projeto, fórmulas empíricas podem ser utilizadas para relacionar manobrabilidade com as dimensões do navio, com relações para determinação do giro da embarcação ou parada da mesma. Entretanto, o mesmo autor comenta que estas expressões não têm grande

precisão, na medida em que não levam em consideração todos os parâmetros necessários para avaliação da manobra, e, portanto, tem baixa confiabilidade para extrapolação de resultados em novos projetos. Como este tipo de abordagem empírica tem várias limitações, são geralmente aplicados generosos coeficientes de segurança sobre os resultados obtidos. Desta maneira, as dimensões estimadas podem tornar-se demasiadamente conservadoras, servindo apenas para avaliações preliminares que definem a ordem de grandeza das soluções.

Entretanto, para refinamento dos resultados e tomada de decisões de engenharia que afetam diretamente o desempenho do complexo portuário são necessárias ferramentas mais sofisticadas de avaliação, que permitam otimizar as dimensões náuticas e avaliar com maior precisão as operações de manobra que podem ser feitas com segurança.

Como os experimentos em ambiente real são muito caros e, em alguns casos, perigosos, duas importantes ferramentas surgem como alternativas para avaliação mais detalhada da manobrabilidade de navios: os modelos físicos e os modelos computacionais.

Os modelos físicos em escala reduzida são utilizados há muito tempo na Engenharia Hidráulica e Naval como uma poderosa ferramenta para representação de fenômenos complexos, cuja modelagem matemática não é capaz de representar com boa precisão. Seu uso e principais características serão discutidos em detalhes no item 3.2, mas, em linhas gerais, para atender aos estudos de manobra, os modelos físicos são de dois tipos: tripulados e não tripulados. Os modelos tripulados são aqueles que realizam os ensaios em escala suficiente para permitir a presença de piloto dentro do modelo reduzido da embarcação. Os modelos não tripulados são aqueles em que o modelo reduzido do navio é rádio controlado e comandado por instruções do prático.

Os avanços na modelagem matemática com a utilização das equações de movimento, e que levam em consideração as diferentes ações meteorológicas e oceânicas sobre o navio, resultam em complexos sistemas de equações

diferenciais que só podem ser resolvidos por aproximações numéricas. Com o avanço tecnológico dos computadores estas soluções numéricas tornaram-se viáveis e os modelos computacionais de manobra passaram a ser utilizados como uma poderosa ferramenta de simulação. A IALA (2011) classifica os modelos computacionais em diversos tipos, mas basicamente eles podem ser divididos em dois grandes grupos: controlados por piloto automático e controlados por ação humana. Os modelos computacionais controlados por piloto automático têm o movimento da embarcação sendo simulado por programa computacional, onde a trajetória é definida preliminarmente e as ações ambientais são conhecidas para que o software escolha as melhores ações para evitar o desvio da trajetória. Já os modelos controlados por ação humana, como o próprio nome sugere, têm a participação de pessoal qualificado para controle da embarcação sob condições ambientais pré-definidas. Os principais tipos de simuladores computacionais serão apresentados no item 3.3.

A PIANC (1992) apresenta diversas aplicações para o uso dos simuladores de manobra. A seguir listam-se algumas das principais:

- Nos estudos preliminares de verificação da viabilidade de implantação de um projeto portuário, sob a ótica da verificação das dificuldades ou restrições de manobras para diferentes condições ambientais no local escolhido;
- Nos projetos de novos portos para avaliação de diferentes arranjos (*layouts*) com objetivo de selecionar as melhores alternativas sob o ponto de vista da navegação, tanto para canais de acesso, como para bacias portuárias;
- Na fase de detalhamento do projeto onde é importante conhecer as restrições de operação do terminal;
- Em portos existentes, onde há previsão de recebimento de novos navios, muitas vezes com dimensões maiores do que aqueles que já

operam nos terminais, com a finalidade de verificar a viabilidade das manobras, bem como para treinamento dos práticos com a nova frota;

- Estudos de modernização de portos em operação, onde estão previstas a implantação de novos píeres ou a ampliação dos existentes, para verificação das condições de manobra de giro, atracação e desatracação;
- Em pontos dos canais de acesso onde há tráfego intenso e possibilidade de cruzamento de embarcações para verificação das interações entre os navios e destes com o entorno; entre outros.

3.2. Simuladores de manobra em modelos físicos

Segundo a PIANC (1992), antes dos primeiros simuladores em modelos numéricos surgirem, as manobras foram reproduzidas em modelos físicos para verificação das condições de navegação.

Inicialmente estes modelos foram construídos em escalas que permitissem a manobra por uma pessoa embarcada no modelo do navio. Posteriormente, o controle do modelo do navio passou a ser realizado à distância, com uso de rádio controle. O primeiro tipo de modelo físico é conhecido como simulador de manobras tripulado e o segundo, não tripulado. A seguir serão apresentados o histórico, conceitos gerais e aplicações de cada uma destas ferramentas.

3.2.1. Simulador físico de manobras tripulado

Os simuladores físicos de manobras tripulados são aqueles em que uma pessoa embarcada no modelo do navio é responsável pela sua operação. Por este motivo são geralmente modelos de grandes dimensões, ou seja, com reduções de escala relativamente pequenas, próximas a 1:25.

Segundo Allen e Graauw (2014, tradução nossa):

Modelos de manobra tripulados em escala reduzida apareceram pela primeira vez em Port Revel, na França, em 1967, seguido por Warsash Maritime Academy (WMA) em Marchwood Lake, no Reino Unido e Lake Ilawa, na Polônia, ambos em 1980. Há também centros de treinamento com modelos tripulados em Port Ash, na Austrália, em Greta Harring Pond, Massachusetts Maritime Academy, nos Estados Unidos e em Port St. Tammany, Louisiana, nos Estados Unidos.

A PIANC (1992) destaca que neste tipo de simulador vão embarcadas uma ou duas pessoas, no segundo caso o piloto e o instrutor, e que a visão do piloto é relativamente parecida com a realidade, bem como os controles para operação do modelo do navio.

Além do modelo do navio propriamente dito, este tipo de simulador também reproduz operações com auxílio de rebocadores, conforme ilustrado na Foto 3.1.

Foto 3.1 – Simulador de manobras tripulado com modelos de navio e rebocador em operação – Port Ilawa, Polônia. Fonte: Allen e Graauw (2014).

Embora as primeiras simulações de manobra em modelo físico tenham sido realizadas em modelos tripulados para investigação das condições propícias para navegação segura, atualmente este tipo de simulador tem sido utilizado amplamente para treinamento de pilotos e estudantes. A IMO (2004) reconhece e recomenda este treinamento.

Port Revel, na França, é um dos locais mais famosos no mundo para desenvolvimento deste tipo de treinamento. Segundo Port Revel (2014), estão disponíveis onze diferentes tipos de modelos reduzidos de navios e quatro tipos de modelos de rebocadores, todos na escala 1:25. O lago onde são realizadas as manobras possui uma área de 50.400 m² e dispõe de sistema de controle de nível d'água, geradores de correntes, ondas e ventos, bem como diferentes possibilidades para configurações de píeres, canais de navegação e eclusas. A Figura 3.1 apresenta um esquema em planta do lago de Port Revel.

Figura 3.1 – Esquema em planta do lago para simulação física de manobras tripuladas em Port Revel, França. Fonte: Port Revel (2014).

Como vantagens deste tipo de simulador, Gonçalves (2005) cita que:

Os modelos pilotáveis são altamente adequados e eficazes na instrução de comandantes e pilotos experientes nos princípios de manobrabilidade de navios e interações hidrodinâmicas. Também têm sido extensivamente

utilizados no projeto de canais e no desenvolvimento de estratégias de manobra em situações novas e inusitadas.

Uma das desvantagens na utilização deste tipo de ferramenta fica por conta das dimensões do modelo, que necessita de grandes áreas para construção e, portanto, custo relativamente alto. Além disso, por conta destas grandes dimensões, a reprodução das condições ambientais de correntes, ondas e ventos também exigem estruturas de grande porte e representam uma dificuldade considerável para controle.

Outra desvantagem está por conta de o modelo ficar numa grande área aberta, sujeita a ação do vento natural (não forçado), e que, portanto, torna-se uma forçante ambiental não controlada e exagerada sobre a manobra experimental. Embora alguns destes modelos tenham anteparos laterais para controle e mitigação de efeitos de vento, o problema não é eliminado por completo.

Outro ponto importante, considerado quase sempre como uma desvantagem do sistema, fica por conta da escala de tempo. Como se trata de um modelo físico que respeita a Semelhança de Froude, na escala 1:25, por exemplo, o tempo de modelo é cinco vezes mais rápido que o real, conforme explicado no item 2.3.4. Isto requer algum tempo de adaptação do piloto, que precisa dar respostas mais rápidas às ações ambientais do que em uma manobra real.

Entretanto, conforme destacado por Allen e Graaw (2014), os modelos tripulados são uma importante ferramenta de complementação dos simuladores computacionais, permitindo a reprodução de manobras em regiões de fluxo complexo, interferência de obstáculos ou outras embarcações, que muitas vezes são difíceis ou tem restrições de representação por algoritmos numéricos.

3.2.2. Simulador físico de manobras não tripulado

Conforme mencionado no item 3.2.1, a utilização de modelos físicos para simulação de manobras começou por volta da década de 1960, com os

simuladores tripulados. Como se tratam de modelos com escala relativamente grande, da ordem de 1:25, são em geral de custo elevado e precisam de muito espaço e infraestrutura para implementação.

Assim, surgiu a ideia de aproveitar os modelos físicos marítimos existentes, que eram utilizados para estudos das condições hidrodinâmicas de marés, correntes e ondas, também para simulação de manobras. Neste caso, a tecnologia utilizada foi a de modelos de navios rádio controlados. Estes modelos são chamados também de simuladores físicos de manobras não tripulados.

No Brasil, o Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – LHEPUSP foi precursor no desenvolvimento de tecnologia nacional para realização de manobras não tripuladas em modelos físicos conduzidas por práticos.

O LHEPUSP iniciou suas pesquisas na área de Hidráulica Marítima em 1953 com diversos estudos em modelos físicos para melhoramento de embocaduras marítimas, como as barras de Cananéia (Foto 3.2), do Rio Itanhaém e do Porto de Santos, e obras portuárias, como no caso dos Portos de Praia Mole, no Espírito Santo, Ponta da Madeira e Itaqui, em São Luiz do Maranhão, e Ilha Guaíba, no Rio de Janeiro. Os modelos físicos tridimensionais portuários foram utilizados para estudos de otimização de arranjos portuários, avaliação de obras de proteção da bacia portuária, estudos de planos de amarração, entre outros. Em função desta vasta experiência na operação e calibração deste tipo de modelo, e sentindo a necessidade de avaliar as condições de manobra como parte fundamental da operação portuária, o LHEPUSP começou no ano de 1980 a utilizar as grandes bacias dos modelos tridimensionais para este tipo de ensaio.

Foto 3.2 – Estudo da barra de Cananéia/SP em 1971 – Fonte: Acervo do LHEPUSP.

Inicialmente, as simulações de manobra foram realizadas apenas de forma qualitativa com modelos de navios presos a cordões na proa e popa, para que o prático pudesse perceber a diferença de esforços hidrodinâmicos agindo sobre o navio, sob diferentes condições de corrente, conforme ilustrado na Foto 3.3.

Foto 3.3 – Simulação de manobra em modelo físico em 1980 – Fonte: Acervo do LHEPUSP.

No ano de 1990, o LHEPUSP começou os primeiros testes para simulações de manobras por sistema de controle remoto via rádio, resultando em 1993 no desenvolvimento de seu primeiro simulador de modelo físico, denominado de Simulador Analógico de Manobras – SIAMA 1993. Os modelos dos navios

possuíam motor ligado à hélice propulsora e sistema de leme (Foto 3.4). Para a reprodução da ação dos rebocadores durante as manobras foram utilizados ventiladores em dutos de ar (Foto 3.5). Em função das escalas mais reduzidas destes tipos de modelo, que em geral são do tipo 1:100, 1:150 ou mais reduzidas ainda¹, não é possível simular a ação dos rebocadores utilizando modelos reduzidos destas embarcações.

Foto 3.4 – Motor (A), hélice e leme (B) do modelo de navio rádio controlado – Fonte: Alfredini, Gerent e Arasaki (2011).

Foto 3.5 – Atuação de rebocadores real (A) e representação em modelo físico (B) – Fonte: Alfredini, Gerent e Arasaki (2011).

O sistema de controle remoto via rádio permitia o acionamento do motor, leme e rebocadores do modelo do navio, de acordo com os comandos do práctico, que eram transmitidos por sistema de comunicação às equipes de controle do modelo reduzido.

Segundo Gonçalves (2005), o sistema original de simulação de manobras não tripulado do LHEPUSP era composto por:

¹ Os simuladores de manobra em modelo físico no LHEPUSP possuem escala geométrica de 1:170.

- Sistema de rádio controle constituído por um console de comando com seis canais de controle e um transmissor de rádio, bem como um receptor de rádio controle instalado no navio;
- Um motor propulsor para hélice, um servo mecanismo para acionamento do leme e três circuitos de velocidade para acionamento de cada um dos três ventiladores de simulação dos rebocadores, um no centro do navio alinhado longitudinalmente ao eixo proa-popa, e outros dois localizados nas extremidades do navio, um na proa e outra na popa, posicionados transversalmente ao eixo longitudinal do navio;
- Bateria automotiva sob o convés do modelo suficiente para garantir autonomia de 15 horas de ensaios de manobra.

Neste sistema, a simulação das forças exercidas pela atuação do conjunto de rebocadores no navio real deveria ser realizada pela resultante da atuação dos três ventiladores instalados no modelo do navio.

No LHEPUSP quando os modelos físicos tridimensionais portuários eram utilizados para manobras, passavam a ser denominados de Simuladores Analógicos de Manobras – SIAMA.

No SIAMA, o práctico poderia realizar a manobra numa posição estratégica sobre o modelo físico, de tal forma que tivesse uma visão geral do cenário, ou ainda, por meio de uma simulação de visão real. Neste segundo caso, o práctico ficava dentro de uma sala, sem visão do modelo, operando e visualizando imagens produzidas por uma câmera de vídeo giratória localizada no passadiço do modelo da embarcação, de forma a aproximar a sensação de realidade durante a manobra.

As menores escalas em relação aos simuladores tripulados podem ser entendidas como uma desvantagem, pois são maiores os efeitos de escala, mas também como uma vantagem, já que os custos são menores, tanto com relação ao espaço necessário para implantação, como também a infraestrutura

para controle de condições ambientais, como correntes, ondas ou vento. Por conta da menor área de reprodução, estes modelos são construídos geralmente em áreas abrigadas, ou seja, em ambientes controlados, livres de efeitos de ventos naturais e outras ações climáticas prejudiciais aos ensaios.

Evidentemente, com a menor escala, o fator de tempo passa a ser mais severo. Conforme explicado no item 2.3.4, em um modelo com escala geométrica de 1:100, o tempo é 10 vezes mais rápido que o real, dificultando a realização da manobra e obrigando o prático a passar por um período de adaptações na simulação.

Apesar de ser considerada quase sempre como a maior desvantagem dos ensaios em modelos não tripulados, o fator de escala de tempo pode ser entendido também como uma vantagem estratégica, pois após a adaptação do prático ao modelo, é possível realizar em um único dia, diversas operações de manobra sob diferentes condições ambientais, a fim de realizar um estudo estatístico das melhores alternativas. Este ponto representa uma vantagem em relação às simulações numéricas com atuação humana, que têm o mesmo tempo de duração de uma manobra real.

Com relação às simulações computacionais do tipo *fast time* (realizadas por computador sem participação humana), as simulações no SIAMA possuem a vantagem de serem realizadas por práticos¹.

De 1993 a 2008, Alfredini, Gerent e Arasaki (2011) afirmam que foram realizados mais de 1.500 testes oficiais de manobras não tripuladas em modelos físicos do LHEPUSP, conduzidos por quinze práticos de duas diferentes Zonas de Praticagem em cooperação com autoridades marítimas e portuárias, além da participação das empresas que operam em quatro portos. Ainda segundo os autores, estes testes incluíram projeto e otimização de sete píeres com quinze berços, utilizando modelos rádio controlados que representavam navios mineraleiros de 75.000, 152.000, 276.000, 365.000,

¹ As simulações computacionais serão apresentadas no item 3.3, e as comparações entre os simuladores físico e computacional serão discutidas em maiores detalhes no item 3.5.

400.000 e 615,000 tpb. A Foto 3.6 ilustra um ensaio de manobra realizado com o SIAMA 1993 no modelo físico do Terminal Ponta da Madeira.

Foto 3.6 – Ensaio de simulação de manobra no modelo físico do Terminal Ponta da Madeira – Fonte: Acervo do LHEPUSP.

De 2008 até 2013 os ensaios de manobras foram interrompidos nos modelos físicos da LHEPUSP e passaram a ser realizados somente em simuladores computacionais. Entretanto, novas tecnologias implantadas no SIAMA provocaram a retomada dos ensaios em modelo físico no ano de 2014, com uma primeira bateria de manobras já realizada no novo simulador. Os resultados destas simulações serão apresentados no capítulo 6.

Com relação à utilização de aplicações semelhantes ao SIAMA em outros lugares do mundo, tem-se muito pouca notícia ou divulgação de resultados. Briggs et. al. (2001) apresentaram resultados de ensaios de manobra em modelo físico com escala de 1:75, utilizando o sistema de navio rádio controlado (Foto 3.7), simulando o canal de acesso de *Barbers Point Harbor* (Foto 3.8). Neste estudo foi realizada uma comparação entre o movimento do navio real sob a ação de ondas no canal de acesso, que é parcialmente abrigado, e o movimento do modelo do navio, permitindo uma validação dos resultados do estudo.

Foto 3.7 – Modelo reduzido do navio *World Utility* com sistema de controle remoto por radio frequência – U.S. Army Engineer Research and Development Center – Fonte: Briggs et. al. (2001).

Foto 3.8 – Modelo reduzido do canal de acesso de Barbers Point Harbor – U.S. Army Engineer Research and Development Center – Fonte: Briggs et. al. (2001).

Além disso, a utilização de modelos reduzidos de navios rádio controlados é usual também em ensaios para determinação de coeficientes hidrodinâmicos em Engenharia Naval ou para validação de simulações computacionais, por meio dos ensaios conhecidos como *free sailing tests*¹.

¹ Este tipo de ensaio é apresentado de modo sucinto no apêndice A.2.

3.3. Tipos de simuladores computacionais

Existem diversos tipos diferentes de simuladores computacionais de manobra. Entretanto, de acordo com a PIANC (1992), todos eles possuem uma estrutura básica em comum que pode ser descrita como:

- Um modelo matemático para descrever as características hidrodinâmicas do navio;
- Uma descrição matemática das influências externas;
- Uma descrição matemática dos controles do navio.

A primeira parte do simulador é responsável pela descrição da forma do navio, bem como seus coeficientes hidrodinâmicos.

Entre as influências externas estão as ações do meio ambiente como ventos, ondas ou correntes de maré. Dependendo da complexidade das características do local, um modelo computacional hidrodinâmico pode ser requerido para determinar os dados de entrada do simulador. A batimetria, confinamentos laterais em canais de acesso, ou presença de bancos de areia também são importantes influências externas que devem ser considerados na simulação. Além destas, a interação entre navios também pode ser considerada nas simulações.

A descrição matemática dos controles do navio é responsável por simular o comportamento da embarcação diante de comandos relacionados à ação do motor, leme ou *thrusters*.

Uma importante classificação entre os simuladores computacionais diz respeito à presença ou não de ação humana no controle da manobra. Em outras palavras, os simuladores podem operar em modo de piloto automático ou com pilotagem humana.

O modo piloto automático, conhecido como *fast-time simulation*, além da estrutura básica supracitada dos simuladores, possui mais um módulo destinado a descrever matematicamente a ação humana durante uma manobra.

Segundo a IALA (2011), nos modelos *fast-time* a representação da ação humana pode ser feita de maneira determinística, ou seja, o piloto automático reage com respostas pré-definidas às ações externas que desviam o navio de um trajeto estabelecido inicialmente. Como neste modo o piloto automático tem pleno conhecimento das ações ambientais, sua resposta é imediata, e certamente um operador humano não conseguiria reagir da mesma maneira. Outra possibilidade seria o programa computacional representar a ação humana de modo probabilístico. Neste caso, funções estocásticas tentam representar a limitação do conhecimento humano referente aos agentes externos, baseado nas informações que estariam disponíveis durante uma manobra real, bem como a resposta do prático a estas informações. Este processo resulta em diferentes traçados, que poderiam ser analisados estatisticamente ao final do processo.

Quanto aos simuladores computacionais com pilotagem humana existem diferentes tipos. Geralmente todos estes programas possuem a mesma estrutura básica supracitada, mas são classificados entre si por conta dos diferentes recursos que disponibilizam aos usuários, especialmente a interface visual do ambiente náutico e as representações dos instrumentos de navegação e dos controles do navio. A IALA (2011), classifica as simulações com pilotagem humana em três grupos, do mais simples ao mais sofisticado:

- **Desktop simulation:** simulação da manobra realizada com visão limitada do ambiente, onde o programa funciona em um computador pessoal com monitor. Dados de rota, velocidade e giro são fornecidos geralmente na barra superior do vídeo, conforme ilustrado na Foto 3.9.

Foto 3.9 – *Desktop simulation*. Fonte: IALA (2011).

- **Part task simulation:** reproduz com maior fidelidade o ambiente de manobra, com visão tridimensional aperfeiçoada do local de navegação, bem como reprodução mais precisa dos instrumentos e controles manuais, conforme ilustrado na Foto 3.10. Pode ser representada a ação de rebocadores com bom nível de realismo (Foto 3.11);

Foto 3.10 – Part Task simulation – Comandos do navio. Fonte: IALA (2011).

Foto 3.11 – Part Task simulation – Comandos do rebocador. Fonte: IALA (2011).

- **Full mission simulation (simulação de ponte completa):** representa com o maior nível de fidelidade disponível atualmente a ponte de comando de um navio, com visão ampla (de 210° ou maior), bem como todos os comandos manuais e instrumentos de navegação, conforme ilustrado na Foto 3.12. A ponte de comandos do rebocador também é representada com realismo (Foto 3.13). Os exercícios de manobra podem contar com a participação de diversos agentes simultaneamente, tais como: prático, mestres de rebocadores, autoridades portuárias, além do instrutor do simulador;

Foto 3.12 – Full Mission simulation – Ponte de comandos do navio. Fonte: IALA (2011).

Foto 3.13 – Full Mission simulation – Ponte de comandos do rebocador. Fonte: IALA (2011).

Em geral, as simulações tipo *fast time* são utilizadas para estudo de alternativas, pois como as manobras são realizadas pelo piloto automático do computador, o tempo de simulação é mais curto e é possível estabelecer as condições de manobra para diversos cenários diferentes.

As simulações do tipo *Desktop* são utilizadas normalmente nas investigações iniciais da fase de projeto, especialmente de canais de aproximação. Embora sejam mais simples, já contam com a ação humana e têm a vantagem de ser um sistema mais simples, barato e portátil em relação aos demais simuladores de pilotagem humana.

As simulações do tipo *Part Task* ou *Full Mission* são utilizadas nas etapas mais avançadas de projeto, ou para avaliação das condições de manobra de novas embarcações em portos existentes. A utilização de cada uma delas vai depender dos objetivos estabelecidos na simulação. Tarefas específicas para conhecimento do local e estabelecimento de diretrizes gerais podem ser realizadas com módulos *Part Task*. Entretanto, a simulação do tipo Ponte Completa (*Full Mission*) permite maior nível de realismo, sendo recomendada na fase final de avaliação das condições de manobra e treinamento de pessoal especializado. A desvantagem principal destas duas ferramentas em relação às

anteriores é que são mais caras e não são portáteis, exigindo a disponibilização de uma estrutura permanente para realização dos ensaios. Evidentemente esta desvantagem é mais crítica no caso do simulador tipo *Full Mission*.

3.4. Dados de entrada dos simuladores de manobra

Para que os simuladores de manobra, tanto em modelo físico como computacional, sejam eficazes, ou seja, representem de maneira adequada as operações reais de condução dos navios nos canais de acesso e bacias portuárias, é preciso que uma série de dados de entrada sejam conhecidos e bem definidos.

A movimentação do navio durante a manobra pode ser entendida como uma consequência da ação de diversos fatores em conjunto sobre a embarcação¹. Em outras palavras, o movimento do navio é provocado pela resultante dos esforços hidrodinâmicos atuando sobre o casco da embarcação. De acordo com a PIANC (1992), estes esforços dependem dos seguintes fatores: forma do casco do navio, posição do leme, atuação do propulsor, calado, trim, profundidade da água, forçantes ambientais (correntes marítimas, vento, ondas), confinamento lateral de água (na presença de obstáculos como outros navios e bancos de areia), atuação de rebocadores, entre outros.

É importante destacar que por melhor que seja a qualidade do modelo aplicado, os resultados da simulação serão sempre ruins caso os dados de entrada representem mal as condições de operação reais dos navios. Por este motivo, a fase de levantamento destes dados é crucial no desenvolvimento do projeto.

Além disso, deve-se destacar que os modelos são incapazes de reproduzir completamente a ação de todos estes fatores sobre a embarcação, quer por

¹ No apêndice A.1 são apresentados os princípios básicos da descrição do movimento de um navio durante a manobra.

limitações operacionais ou efeitos de escala, no caso dos modelos físicos, quer pela inexistência de soluções matemáticas exatas para as equações diferenciais de movimento resultantes das ações externas sobre o casco navio, no caso dos modelos computacionais. Por estes motivos, além de conhecer os dados de entrada, é preciso muitas vezes interpretar os fenômenos para decidir a melhor forma de inserir os dados nos modelos. Este procedimento só é possível quando são conhecidas em detalhes a aplicabilidade e as limitações dos modelos.

A seguir apresentam-se algumas notas gerais sobre a definição dos dados de entrada dos modelos de simulação, que apenas por motivo de organização foram divididas em três grupos: dados do navio, dados ambientais, e outras condições de contorno.

3.4.1. Dados do navio

Nos modelos físicos, a construção do modelo do navio deve garantir sua semelhança geométrica. Para isto, é utilizado o plano de linhas da embarcação, que é composto por três desenhos, que são: plano de perfil, plano de baliza e plano de linha d'água, que serão explicados a seguir.

A Figura 3.2 apresenta o sistema de coordenadas proposto pela norma DIN (1999, apud Biran e López-Pulido, 2014)¹.

¹ DIN 81209-1. **Geometrie und Stabilität von Schiffen – Formelzeichen, Benennungen, Definitionen.** Teil 1: Allgemeines, Überwasser-Einrumpfschiffe (Geometry and stability of ships - Symbols, terms, definitions - Part 1: General, monohull surface ships), 1999.

Figura 3.2 – Sistema de coordenadas recomendado pela norma DIN 81209-1. Fonte: Biran e López-Pulido (2014).

Segundo Biran e López-Pulido (2014) na maior parte dos casos a superfície do casco não pode ser definida com equações analíticas simples, sendo que a Arquitetura Naval resolve o problema desta descrição “cortando” a superfície do casco em planos paralelos. Utilizando o sistema de coordenadas definido na Figura 3.2, os cortes paralelos ao plano xz definem os planos de perfil (*sheer plan*). Cortes paralelos ao plano yz definem os planos de baliza (*body plan*). E por fim, os planos de linha d’água são definidos pelos cortes paralelos ao plano xy . As representações esquemáticas dos cortes paralelos aos três planos são apresentadas na Figura 3.3, na Figura 3.4 e na Figura 3.5 e o plano de linhas da embarcação, resultante da composição destes cortes, na Figura 3.6.

Figura 3.3 – Cortes paralelos ao plano xz . Fonte: Biran e López-Pulido (2014).

Figura 3.4 – Cortes paralelos ao plano yz. Fonte: Biran e López-Pulido (2014).

Figura 3.5 – Cortes paralelos ao plano xy. Fonte: Biran e López-Pulido (2014).

Figura 3.6 – Plano de linhas da embarcação. Fonte: Biran e López-Pulido (2014).

Vale destacar que na maior parte das vezes não é fácil conseguir o plano de linhas de uma embarcação real, pois existe uma forte questão de sigilo sobre esta informação por conta da concorrência entre os fabricantes de navios.

No projeto de navios, além da descrição geométrica, os cascos são classificados de acordo com alguns coeficientes de forma, como, por exemplo, o coeficiente de bloco, que é a relação entre o volume deslocado pela embarcação na água e o volume do paralelepípedo correspondente ao produto L (comprimento), B (boca) e T (calado) do navio. Existem diversos coeficientes de forma, que são amplamente descritos na bibliografia. No caso dos modelos computacionais, estes coeficientes de forma são utilizados como fatores componentes das soluções numéricas das equações de movimento.

Além dos fatores ligados à forma do casco, os modelos precisam reproduzir também as ações do motor, propulsor e leme, e quando existirem, dos *thrusters*. A forma como são representados depende do tipo de modelo.

Nos modelos computacionais, a PIANC (1992) destaca que atuação do conjunto motor e propulsor é simulada pela diferença entre o torque de saída do motor e o torque de resistência da água sobre a hélice propulsora. O torque de saída do motor depende da rotação e do tipo de motor e o torque sobre o propulsor depende do diâmetro da hélice, da área da lâmina, da taxa de rotação, velocidade de entrada na água, velocidade do navio, etc. A propulsão efetiva é calculada por meio de expressão matemática simplificada que considera a utilização de coeficientes hidrodinâmicos, que variam de acordo com a folga sob a quilha, forma do casco e curso do navio.

No caso do leme, a PIANC (1992) aponta que os principais fatores envolvidos nos esforços resultantes são o escoamento ao longo do leme, ângulo do leme em relação à corrente e a área do leme. Para os modelos computacionais, as equações resultantes do movimento são escritas em função destas variáveis e associadas a coeficientes hidrodinâmicos, que precisam ser determinados empiricamente por meio de ensaios em modelos físicos.

Para os modelos físicos, a reprodução geométrica em escala da hélice e leme ou a reprodução da rotação do motor não garantem a semelhança do comportamento do modelo do navio em relação ao real. Neste caso, o modelo do navio deve ser calibrado de acordo com as provas de mar. Inicialmente as

velocidades devem ser ajustadas e aferidas com a rotação do motor elétrico. Em seguida, os testes básicos como *turning circle*, zig-zag e parada brusca devem ser realizados para garantir que a resposta do modelo será semelhante à de um navio real em prova de mar¹.

Neste ponto vale a pena destacar que a prova de mar é feita em condições de águas profundas, assim como devem ser as condições de contorno no modelo físico para calibração análoga. Mesmo assim, deve-se considerar que quando em águas mais rasas próximas aos terminais portuários, não há como garantir que o comportamento do modelo seja exatamente igual ao navio real, em função dos efeitos de escala do modelo físico. Este é um problema que ainda carece de estudos mais aprofundados, mas que tem solução difícil em função da carência de dados de campo referentes a manobras de navios em água rasa.

Entretanto, os modelos reduzidos ainda são a melhor técnica disponível para verificar as condições de manobra em águas rasas, tanto que os próprios simuladores computacionais utilizam coeficientes hidrodinâmicos estabelecidos em ensaios de modelagem física para estabelecer esta condição de contorno.

Como indicativo de que a despeito dos efeitos de escala os modelos físicos são capazes de reproduzir com boa fidelidade as manobras em águas rasas, Briggs et. al. (2001) compararam resultados de ensaios em modelos físicos com medidas de campo para navios reais adentrando o canal de acesso *Barbers Point Harbor* (em situação de águas rasas) e obtiveram bons resultados em uma redução de escala de 1:75. Infelizmente validações como estas com dados reais são raras, o que dificulta a quantificação efetiva dos erros oriundos do efeito de escala.

Quando o ensaio do modelo físico do navio inclui a ação de ondas de curto período, dados adicionais do plano de carregamento do navio são necessários, tais como: centro de gravidade (x, y, z) e momento de inércia (em relação aos

¹ Os testes básicos recomendados nas provas de mar serão apresentados sucintamente no item 5.3.

eixos x, y, z) para as diferentes condições de carregamento desejadas na simulação. Estas condições precisam ser calibradas no modelo do navio antes do início dos ensaios, conforme será discutido no item 5.3.

3.4.2. Dados ambientais

Os principais dados ambientais para entrada nos simuladores de manobra são: ventos, correntes, ondas, marés, profundidades, movimentação de material de fundo, existência de bancos de areia ou outros obstáculos naturais e visibilidade.

O problema é que a maior parte destes dados tem variação espaço-temporal complexa e, em alguns casos, necessitam de longos períodos de monitoramento para uma definição clara desta variação, bem como uma área de varredura que pode ser bastante extensa.

Como o monitoramento dos dados ambientais, que muitas vezes é necessário ainda nos primeiros estágios de estudos de alternativas, possui custo relativamente alto, especialmente em regiões costeiras e estuarinas onde o ambiente é de alta complexidade, este precisa ser realizado a partir de uma especificação técnica de levantamento de campo, desenvolvida por equipe especializada, de tal forma a permitir uma otimização dos recursos financeiros, sem perder a qualidade da informação. Na maior parte das vezes, estas especificações de campo são feitas em etapas, partindo-se desde levantamentos mais simplificados para análise da viabilidade de implantação, até altos níveis de refinamento para as fases de detalhamento do projeto.

No caso de ventos e ondas, para as etapas iniciais do estudo é possível utilizar dados de modelos globais de previsão como o Wavewatch® da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), que pertence ao serviço de monitoramento climático dos Estados Unidos (*National Weather Service*), e permite uma inferência sobre a formação destes fenômenos para todas as regiões do planeta. Estes modelos não permitem estabelecer detalhes sobre os

fenômenos localmente, pois são baseados em dados climáticos globais, mas são uma boa referência inicial para projeto.

Em fases iniciais de estudos de viabilidade, as variações de maré e profundidades também podem ser estabelecidas a partir de tábuas de maré de regiões próximas e cartas náuticas disponibilizadas pela Marinha.

Entretanto, nas fases posteriores de projeto, para análise de alternativas ou mesmo detalhamento de soluções, é preciso definir levantamentos de campo no local do empreendimento. FCTH (2011 a) indica alguns princípios básicos destas campanhas que são apresentados abaixo:

- Nível do mar: são determinadas por meio de estações maregráficas (marégrafos) referenciadas altimetricamente nas proximidades do local que se deseja estudar. Atualmente os marégrafos são constituídos de sensores de nível d'água e *data logger* para armazenamento de dados (Foto 3.14). Recomenda-se que os dados sejam coletados a cada 15 minutos e o sistema fique ativo pelo período mínimo de 33 dias. Entretanto, vale destacar que é recomendável que todos os portos tenham pelo menos um marégrafo permanente instalado, pois a condição de maré é um dos dados fundamentais a ser monitorado o tempo todo para permitir avaliações operacionais do porto, tais como janelas de manobra ou possibilidade de manter navios atracados nos terminais;

Foto 3.14 – Modelo de sistema de medição de nível do mar com *data logger* (esquerda) e sensor de nível d'água (direita). Fonte: FCTH (2011 a).

- Correntes: devem ser preferencialmente monitoradas com auxílio de ADP's (*acoustic doppler profile*) devidamente posicionados e em quantidade suficiente para mapear a área de interesse. Recomenda-se que as campanhas de medição estendam-se por pelo menos 33 dias contínuos, em duas campanhas no ano, de tal forma a abranger os períodos das sizígias equinociais de primavera e outono, quando as correntes são mais intensas. Os ADP's devem ser programados para determinação dos perfis de correntes a cada 15 minutos, em camadas de metro em metro a partir do fundo. A Foto 3.15 mostra o exemplo de um sistema com ADP montado para monitoramento de correntes na Baía de São Marcos, com detalhe da estrutura metálica para direcionamento e fundeio do equipamento de medição;

Foto 3.15 – Exemplo de ADP acoplado a uma estrutura metálica para orientação e fundeio do equipamento. Fonte: FCTH (2011 a).

- Ondas: podem ser medidas por meio do fundeio de ondógrafos posicionados estrategicamente de forma a subsidiar a futura simulação de propagação de ondas em modelos numéricos. O período mínimo de registro é de 1 ano, com aquisição 24 horas por dia a cada 3 horas, fornecendo informações como altura, período e rumo da onda, bem como a profundidade do local;
- Vento: atualmente pode ser monitorado por estação meteorológica automática, fornecendo informações importantes sobre velocidade e direção. Analogamente ao caso dos marégrafos, e em função dos custos

relativamente baixos de instalação e manutenção, recomenda-se que os portos tenham uma estação meteorológica permanente, já que os ventos podem ser fator importante tanto para definir condições de manobra, quanto de segurança de navios atracados;

- Topografia e batimetria: a definição da área a ser mapeada pelos serviços de topografia e batimetria, bem como as técnicas que serão utilizadas para tal, dependem das características de cada local e projeto a ser implementado. No caso da batimetria, é importante estar atento na região de interesse se a movimentação de sedimentos é significativa, se ocorrem efeitos sazonais de modificações nas conformações de fundo ou formação de bancos de areia, entre outros. Estas informações são fundamentais, pois efeitos de águas rasas ou confinamento de fluxo por conta de bancos de areia, podem provocar modificações importantes para as condições de manobra, além de condicionarem a rugosidade de fundo. Em locais de alta complexidade, por exemplo, os levantamentos batimétricos podem ter que ser realizados a cada 15 dias nos primeiros meses de medição (incluindo uma sizígia equinocial), passando então a uma periodicidade mensal. A decisão por utilização de equipamentos para realização de batimetria multifeixe ou monofeixe também vai depender das características do local e dimensões da área de monitoramento;
- Parâmetros sedimentológicos: por meio de amostras coletadas em campo e caracterização granulométrica do material de fundo, é possível inferir características importantes sobre o transporte de sedimento e conformação do fundo, e consequentemente a rugosidade. Além disso, este parâmetro é importante também como dado de entrada de modelos hidrodinâmicos utilizados para avaliar a movimentação do material sólido de fundo.

No caso dos estudos de instalações portuárias, é altamente recomendável que os dados coletados sejam utilizados na calibração de modelos hidrodinâmicos para simulação do escoamento local. Em regiões de alta complexidade, ou

terminais portuários de maior envergadura, o uso de modelos hidrodinâmicos é fundamental.

Modelos hidrodinâmicos como o Mike 3® do DHI ou o Delft 3D® de Deltares são programas computacionais extremamente robustos e consagrados no mercado, e têm sido utilizados com sucesso em importantes estudos portuários. Nestes modelos, deve ser estabelecida uma área de interesse e definida uma malha computacional, que deve ter sua grade mais refinada nos pontos onde são esperadas informações mais detalhadas e precisas, como próximo aos terminais de atracação, por exemplo. Os dados levantados em campo de ondas, correntes, ventos e maré são utilizados para calibração do modelo hidrodinâmico. Uma vez calibrado, este modelo pode fornecer informações sobre estas variáveis ambientais e sua variação ao longo do tempo em qualquer ponto da malha computacional. Estas informações, por sua vez, podem ser utilizadas como dados de entrada dos simuladores de manobra, sejam eles físicos ou computacionais.

FCTH (2015 a) apresenta os resultados de estudos de calibração dos campos de correntes do modelo físico tridimensional da Baía de São Marcos – MA, utilizando os resultados de modelos hidrodinâmicos. A técnica para calibração dos modelos físicos utilizando esta abordagem será discutida em maiores detalhes no capítulo 5.

3.4.3. Outras condições de contorno

Além dos dados básicos do navio e das condições ambientais, outros dados podem ser associados aos exercícios de manobra, a fim de estabelecer os cenários de avaliação mais importantes. Por exemplo:

- Atuação de rebocadores, com informações sobre número de rebocadores disponíveis para auxílio à manobra e potência dos mesmos. Deve-se destacar que analogamente ao navio, os rebocadores precisam ter sua atuação calibrada em modelo, por exemplo, no que

tange à potência efetivamente aplicada ao navio durante a manobra, que é uma parcela do *bollard pull* (capacidade de tração estática);

- Possibilidade de cruzamento de navios durante a manobra ou efeitos da passagem de um navio em manobra próximo a um navio amarrado em um terminal;
- Condições de pouca visibilidade por efeito de neblina ou mesmo realização de manobras noturnas;
- Avaliação de possíveis manobras de emergência, retratando cenários como perda de motor ou leme durante a manobra, falha de rebocadores, entre outros.

3.5. Comparação entre as ferramentas de simulação de manobra e suas principais limitações

Os avanços obtidos na modelagem computacional nas últimas décadas e o surgimento de máquinas no mercado de excelente capacidade de processamento a custos relativamente baixos, gerou em muitos pesquisadores e profissionais do meio técnico a sensação de que os modelos físicos estavam ficando obsoletos, e todas as atividades antes realizadas por estes últimos poderiam ser substituídas por soluções numéricas. Esta visão não poderia estar mais longe da verdade, e mostra total desconhecimento das limitações destas ferramentas.

Hughes (2005) aponta alguns motivos claros para mostrar a atual impossibilidade de substituir integralmente os modelos físicos por soluções numéricas, que são: características não-lineares das equações de movimento, que não podem ser resolvidas analiticamente; inexistência de modelos matemáticos que descrevam completamente os fenômenos do escoamento turbulento, o fluxo próximo às zonas de quebra de ondas, a interação do escoamento com o fundo ou com obstáculos naturais ou artificiais, entre outros.

Dalrymple (1985) afirma que os modelos físicos integram as equações que governam o fenômeno hidráulico sem as simplificações assumidas pelos métodos analíticos ou numéricos.

Le Méhauté¹ (1990 apud HUGHES, 2005, p.25, tradução nossa) aponta como vantagens dos modelos físicos em relação aos modelos numéricos:

- O custo dos modelos em escala é compatível com o tamanho e magnitude das obras costeiras. E os resultados adicionam credibilidade ao processo de tomada de decisão, especialmente quando há discordância;
- Técnicas de Laboratório permanecem ferramentas extremamente úteis em Engenharia Costeira por causa dos limites da mecânica dos fluidos determinística devido à turbulência;
- Novas técnicas como *Laser Doppler Velocimeter* estão disponíveis para estudos em modelos físicos e com elas possibilidades de estabelecer relações mais complexas com maior número de variáveis, utilizando novas técnicas de processamento de dados;
- Modelos físicos permanecem o melhor computador analógico, permitindo a reprodução de cenários complexos muito além da precisão das diferenças finitas. Efeitos não lineares e dissipativos, que representam enormes dificuldades de representação por equações matemáticas, são também considerados nos modelos físicos;
- Contato físico com o fluido permanece o melhor guia intuitivo. Os resultados são visuais e tem credibilidade. Estimulam a imaginação e as soluções criativas em um nível que não pode ser alcançado em teorias saídas de computador.

A PIANC (1992) também afirma que os modelos físicos são menos duvidosos quanto à validade comparados aos modelos numéricos, assim como são extremamente úteis em situações onde o conhecimento matemático é insuficiente, e nos locais em que os processos físicos são muito complicados e extensivos para serem descritos matematicamente, como por exemplo: interações do escoamento com o fundo, presença de bancos de areia, cruzamento entre navios, entre outros.

É preciso lembrar também que os simuladores computacionais necessitam como dados de entrada de uma série de coeficientes hidrodinâmicos, que nem sempre são conhecidos ou podem ser determinados matematicamente. Estes coeficientes são obtidos, via de regra, por meio de ensaios em modelos físicos, quer na fase de projeto do navio propriamente dito, quer para estudos

¹ Le Méhauté, B. **Similitude**. In Ocean Engineering Science, Vol. 9, Part B. New York: John Wiley and Sons, 1990.

específicos de manobras quando estas informações não são disponibilizadas pelos fabricantes do navio.

Evidentemente, os modelos físicos também possuem diversas limitações, que poderiam ser resumidas em quatro grandes grupos:

- Efeitos de escala: a impossibilidade de garantir a Semelhança Dinâmica Completa entre modelo e ambiente real exceto para a escala 1:1, traz como consequência imediata a representação apenas parcial do fenômeno hidráulico nos modelos físicos. Por exemplo, a utilização dos critérios de Semelhança de Froude, mais comum nos modelos hidráulicos, faz com que os modelos não representem bem as forças viscosas ou a tensão superficial da água, conforme explicado no item 2.3.3, podendo trazer consequências sobre análise dos resultados em determinados tipos de abordagens;
- Fatores de escala: em função da redução geométrica em relação ao meio real, as demais grandezas físicas também têm alteradas suas relações com as correspondentes medidas reais. Estes efeitos são importantes em alguns casos particulares, como os ensaios de manobra, por exemplo, nos quais o tempo no modelo reduzido é muito mais rápido do que o real, resultando na necessidade do prático se adaptar para dar respostas mais rápidas às ações externas;
- Efeitos de Laboratório: associados às condições de fronteira dos modelos físicos. Por questões de custos, espaço físico, ou infraestrutura disponível, os modelos físicos não podem ser exageradamente grandes de forma a acomodar perfeitamente as condições de aproximação das correntes na área de interesse ou evitar efeitos de parede, exigindo cuidados do modelista para avaliar a importância destes fatores durante o estudo;
- Simplificações da realidade: não é possível simular em modelo físico com perfeição todas as variações espaço-temporais das ações da

natureza, com correntes, ventos ou ondas, sendo que simplificações da realidade são realizadas para representar somente as condições de contorno mais importantes.

Além disso, exceto em casos muito raros, os modelos físicos são mais caros para construir e operar do que os modelos computacionais.

No caso dos estudos de manobra, a principal vantagem dos simuladores numéricos fica por conta da sua capacidade de reproduzir o tempo real de manobra. Todos os modelos físicos têm o fator de escala de tempo como seu principal fator limitador. Quanto menor a escala, maior é o impacto. Neste aspecto, os modelos tripulados com escalas relativamente grandes (da ordem de 1:25) levam vantagem sobre os modelos hidráulicos de maior fator de redução, que utilizam navios rádio controlados.

Por outro lado, os modelos não tripulados, por conta da escala de tempo, estão habilitados a realizar um maior número de manobras por dia, sendo ideais para as investigações preliminares de estudos de alternativas. Nesta fase de estudos levam vantagem inclusive sobre os simuladores computacionais *fast time*, pois contam com o controle humano na realização da manobra. Por esta vantagem da maior velocidade na realização das simulações, os modelos não tripulados foram apelidados no LHEPUSP de simuladores *fast time* analógicos.

A PIANC (1992) aponta também como vantagem do uso dos modelos físicos tripulados em relação aos modelos físicos controlados via rádio, a visão mais realista do piloto que está embarcado, ao contrário dos modelos rádio controlados onde a visão é geral (denominada visão de pássaro). Sob este aspecto é preciso ressaltar que, atualmente, os sistemas de câmeras em modelos rádio controlados já permitam representar com muito mais realismo a visão do práctico sobre o passadiço das embarcações, com uma série de opções técnicas para simular os pontos de visão real.

Apesar de mais atrativos, é preciso lembrar que os modelos tripulados para representar os cenários de manobras devem ter dimensões muito extensas,

exigindo áreas enormes para implantação e sendo, portanto, de custo muito mais elevado do que modelos hidráulicos costeiros convencionais. Ainda por conta destas dimensões, fica evidente que o controle das ações externas fica muito mais complexo, exigindo infraestrutura muito maior para gerar artificialmente ondas, correntes ou vento. Também é preciso ressaltar que os modelos tripulados ficam em grandes áreas abertas, sujeitas ao vento local e outras condições climáticas, que podem agregar aos cenários simulados condições de contorno inexistentes.

Além do tempo real, os simuladores computacionais de manobra, em especial o *Full Mission*, tem a vantagem de reproduzir com grande fidelidade todos os controles da ponte de comando, bem como a visão do ambiente de navegação, com telas de alta resolução e objetos gráficos cada vez mais sofisticados. Isto confere ao treinamento das equipes envolvidas na manobra (práticos, mestres de rebocadores, entre outros) a possibilidade de se aproximarem muito mais das condições que serão encontradas em manobras reais, bem como uma adaptação muito mais rápida à ferramenta do que no caso dos modelos físicos.

Portanto, fica claro que cada ferramenta de simulação de manobra possui suas vantagens e desvantagens. Por este motivo, o caminho mais indicado para as simulações é a integração entre os sistemas, utilizando a chamada modelagem híbrida. As vantagens desta abordagem são claras, em especial quando há necessidade da aplicação destes modelos hidráulicos para outros estudos de interesse na área portuária, como no caso de obras de proteção, avaliação de planos de amarração, entre outros.

3.6. Validação dos simuladores de manobra

“Validação é o processo de construção de um aceitável nível de confiança de que uma inferência sobre um processo simulado é uma inferência correta ou válida para o processo verdadeiro” (PIANC, 1992).

Os resultados de modelos, sejam eles físicos ou numéricos, não têm a intenção ou a pretensão de reproduzir a realidade com perfeição, mas sim representá-la da maneira mais adequada, de tal forma a extrair resultados confiáveis para os fins a que se destina o modelo.

É preciso entender que mesmo o estabelecimento do padrão de “realidade”, ou seja, o parâmetro de referência que se quer atingir, no caso de escoamentos hidráulicos de superfície livre, como acontecem em zonas costeiras, está sujeito a uma série de limitações. Em princípio, por melhor que sejam os equipamentos de medição de variáveis ambientais como correntes, ondas, batimetria, vento, entre outras, não é possível descrever com absoluta precisão o ambiente real, seja por erros intrínsecos aos próprios equipamentos, mas principalmente pela complexa variabilidade destas grandezas no tempo e no espaço. Em outras palavras, as campanhas de campo podem ser vastas, mas jamais vão conseguir varrer toda a área de influência, nem mesmo durar tempo suficiente para conhecer todo tipo de variação e combinações possíveis entre as variáveis ambientais. Portanto, mesmo a referência de informação “real” é apenas uma representação simplificada das grandezas físicas.

Além disso, no caso dos simuladores computacionais, as equações matemáticas que descrevem o movimento do navio de acordo com os esforços hidrodinâmicos não podem ser resolvidas analiticamente e dependem fundamentalmente de calibrações de coeficientes hidrodinâmicos para estimar estes movimentos.

Por outro lado, os modelos físicos possuem restrições técnicas para representar toda a gama de variações das condições ambientais, e, geralmente, são capazes apenas de reproduzir cenários simplificados de ação de correntes, ondas ou ventos, ou ainda das condições de contorno como batimetrias, bancos de areia, entre outras.

Assim, os modelos devem reproduzir a realidade apenas de modo suficientemente preciso e sempre com objetivos claros e bem definidos.

Em princípio, a validação de simuladores de manobra, quer sejam físicos ou numéricos, necessitariam de dados básicos de campo para sua comprovação. Ao calibrar um modelo de navio, por exemplo, dados básicos da geometria do casco ou da movimentação deste, baseados geralmente nas provas de mar, são a referência mais usual. O problema neste caso, é que a prova de mar é feita em águas profundas, e as manobras costeiras feitas em águas rasas. A calibração dos modelos de navios em águas profundas, não garante que o comportamento dos modelos será o mesmo do navio verdadeiro quando submetidos a condições de águas confinadas. E praticamente não há dados disponíveis sobre provas de mar para navios reais em águas rasas, por conta dos riscos envolvidos na execução deste tipo de manobra neste ambiente.

Na prática, os simuladores em modelos físicos têm sido calibrados a partir de ensaios que reproduzem as provas de mar em águas profundas, e os efeitos de águas rasas são considerados de modo empírico, por meio de um refinamento da calibração original com auxílio dos práticos antes da execução das simulações.

Os dados de campo para comparação entre modelos e navios verdadeiros são escassos. Na bibliografia existem alguns estudos feitos a respeito, mas ainda é necessário avançar muito neste campo para consolidar os conhecimentos. Briggs et. al. (2001) comparou os resultados de medições feitas em campo com valores obtidos em ensaios de modelo reduzido para o canal de acesso de *Barbers Point Harbor*, sujeito a ação de ondas. Trata-se de um modelo hidráulico costeiro na escala 1:75, com sistema de geração espectral de ondas, onde foi basicamente avaliada a folga sob a quilha, considerando-se diversos fatores como níveis da maré, onda e *squat*. A comparação entre os resultados de modelo e reais para diferentes condições ambientais revelaram excelente aderência no parâmetro da folga sob a quilha para a maior parte dos parâmetros analisados, o que garantiu confiabilidade aos estudos realizados.

Sem análises deste tipo não é possível nem mesmo atribuir um erro a uma medida feita em modelo. Por exemplo, sabe-se que os efeitos de escala associados à semelhança dinâmica incompleta para estudos em modelo físico,

conduzem a erros na avaliação da resistência hidrodinâmica. Mas para quantificar estes erros seria necessário compará-los com medidas de campo para condições de contorno de fluxo semelhantes.

Infelizmente praticamente inexistem dados sobre manobras para diferentes navios e condições ambientais monitoradas em zonas portuárias, a fim de validar os modelos. Entretanto, com o avanço dos equipamentos de monitoramento de posição do navio e das variáveis de controle ambientais, espera-se grande evolução nesta área nos próximos anos, de tal forma a permitir um maior conhecimento quantitativo sobre as limitações destas ferramentas.

4. DESENVOLVIMENTO DO NOVO SIMULADOR ANALÓGICO DE MANOBRAS – SIAMA 2014

4.1. Características gerais do simulador

O Simulador Analógico de Manobras – SIAMA foi criado pelo LHEPUSP para avaliação das condições de manobrabilidade em modelos físicos de ambientes portuários utilizando-se de navios rádio controlados. Esta ferramenta começou a ser desenvolvida em 1990, e a ser utilizada com maior frequência entre os anos de 2001 e 2008, com mais de 1500 testes de manobras realizadas. Basicamente, o modelo do navio é autopropelido e conta com conjunto motor, hélice e leme acionados por controle remoto, assim como os rebocadores, que são simulados por ventiladores instalados no convés da embarcação, conforme explicado em detalhes no item 3.2.2. A operação do simulador deve contar ainda com a presença de um prático real, que transmite os comandos via rádio para uma equipe técnica do laboratório responsável por acionar os controles do navio remotamente.

Entretanto, o SIAMA 1993 possuía uma série de limitações e dificuldades operacionais que acabaram levando, com o advento dos simuladores computacionais de ponte completa (*full mission*), a praticagem e autoridades portuárias a preferirem realizar os ensaios de manobra em ambiente computacional.

Esta nova tendência de utilização exclusiva de simuladores computacionais de manobra implica em uma perda de informações importante, especialmente em regiões de escoamentos complexos, nas quais os modelos físicos marítimos bem calibrados têm respostas mais próximas ao real. Por este motivo, foi realizado um grande investimento entre os anos de 2010 e 2014 na criação de uma nova ferramenta de simulação de manobras de navios para modelos físicos, batizada de SIAMA 2014.

O SIAMA 2014 é uma ferramenta que pode ser aplicada em qualquer modelo físico aquaviário que tenha redução de escala e área de reprodução suficientes para realização de ensaios de manobra de navios rádio controlados, fazendo-se poucas adaptações ao ambiente do modelo para instalação da instrumentação de monitoramento. O SIAMA 2014 é basicamente composto pelas seguintes partes:

- Modelo reduzido do navio auto propelido (Foto 4.1):
 - Motor DC de 12V com driver de controle acoplado à hélice por meio de mini eixo cardã;
 - Leme acoplado a servo motor para controle de posição;
 - LED's de iluminação padronizados da embarcação para manobras noturna;
 - Módulo de comunicação via rádio (XBee);
 - Micro controlador (arduino) para todas as funções do navio;
 - Relê para controle de iluminação;
 - 1 Bateria específica para micro controlador;
 - 2 Baterias para demais funções (inclusive rebocadores).

Foto 4.1 – Modelo reduzido do Navio Valemax com eletrônica para controle de manobra embarcada. Fonte: Acervo pessoal.

➤ Rebocadores:

- Quatro mini ventiladores instalados dois na proa e dois na popa do navio;
- Um motor DC com driver para controle de rotação de cada mini ventilador;
- Um servo motor acoplado a mecanismo sobre o qual está instalado cada mini ventilador para controle de posição;
- 3 LED's de iluminação para cada mini ventilador para indicação de acionamento e posição durante a manobra.

➤ Câmeras de simulação de visão real do práctico durante a manobra:

- Duas micro câmeras HD instaladas sobre o convés do navio;
- Um servo motor para cada micro câmera acoplado a mecanismo para controle de posição;
- Conjunto de comunicação e micro controlador (XBee/Arduino) para acionamento do servo motor;

- Uma bateria específica para este conjunto.
- *Software* de controle e monitoramento: desenvolvido na plataforma Labview®. Acionamento dos comandos via controle de videogame padrão;
- Sistema de rastreamento da posição do navio:
 - Conjunto de câmeras digitais HD instaladas sobre o modelo a uma altura suficiente para cobrir toda área de manobra e permitir resolução adequada;
 - *Software* de reconhecimento de imagens por padrão de cores (preto e branco, para aumento da precisão e redução de erros na leitura).
- Sistema de comunicação em canal aberto entre prático e equipe de apoio à manobra;
- *Software* de armazenamento: responsável pela criação do banco de dados de todas as informações monitoradas durante a manobra sincronizadas no tempo (motor, leme, rebocadores, defensas, posição do navio, velocidades, entre outros).

4.2. Inovações do SIAMA 2014

Embora o SIAMA 2014 siga o mesmo princípio básico de funcionamento do simulador original, esta nova ferramenta foi completamente redesenhada e desenvolvida a partir de um conceito operacional distinto, de tal forma a permitir maior controle, precisão e realismo no ambiente de manobra, visando inclusive a futura integração com as simulações em ambiente computacional. Para isso, diversas inovações tecnológicas foram desenvolvidas e, em relação ao SIAMA 1993, podem ser destacados os seguintes avanços:

- Desenvolvimento de um software de controle e monitoramento das facilidades do navio, de tal forma a permitir maior precisão e rapidez no estabelecimento das condições de contorno durante as fases de calibração e ensaios de manobra propriamente ditos;
- Desenvolvimento de um sistema de rastreamento da posição do navio durante o ensaio de manobra, denominado de *ship tracking*;
- Desenvolvimento de um software de registro que cria um banco de dados de todos os comandos executados em função do tempo, ao longo de todo ensaio de manobra, além de outras informações como a posição do navio a partir do sistema *ship tracking*;
- Modificação no sistema de transmissão de sinais remotos que controlam as facilidades do modelo do navio (motor, leme e rebocadores), de tal forma a evitar perda ou interferência nos sinais durante um ensaio de manobra;
- Melhoria na representação de rebocadores de acordo com as sugestões de práticos, pilotos e operadores portuários;
- Modificação no sistema de comunicação entre o práctico e a equipe de apoio à manobra na sala de controle, para evitar perda de informações;
- Melhoria na qualidade do sistema de simulação da visão real do práctico durante o ensaio de manobra, com uso de micro câmeras de alta resolução.

Os itens a seguir apresentarão uma descrição mais detalhada das principais limitações e dificuldades que eram encontradas durante a realização dos ensaios com o SIAMA 1993, bem como os avanços tecnológicos implementados na ferramenta e que permitiram o desenvolvimento do SIAMA 2014.

4.2.1. Transmissão do sinal de controle das facilidades do modelo do navio

Segundo GONÇALVES (2005), no SIAMA 1993 ocorriam comportamentos anômalos do navio em alguns trechos do modelo físico, como, por exemplo, alterações nas rotações do motor da hélice e dos ventiladores, acionamento das facilidades do navio sem interferência humana e perda de sinal. Estes problemas foram atribuídos à transmissão do sinal, que sofria interferência com a estrutura do galpão, refletindo-se nas partes metálicas e, até mesmo a movimentação de pessoas no entorno do modelo físico onde estava sendo executada a manobra ocasionava problemas deste tipo.

No caso do SIAMA 1993 o sistema utilizado era um rádio controle de aeromodelismo convencional, no qual um dado sinal era enviado em uma determinada frequência no ar, sendo captado pelo receptor localizado na embarcação (similar a um rádio AM). O problema deste sistema é que não havia garantias de que um comando seria recebido. Além disso, se ocorresse algum ruído de mesma frequência captado pela embarcação, isto poderia ser interpretado como um comando, o que explicaria as ocorrências anômalas destacadas por GONÇALVES (2005).

No SIAMA 2014 a comunicação foi mantida via rádio, mas passou a ser do tipo “ponto-a-ponto”, isto é, cada par de transmissores é configurado para se comunicar apenas entre si, evitando interferências. Também foi desenvolvida uma rotina que verifica se o dado que foi transmitido pelo sistema foi recebido corretamente pela embarcação. Desta forma, se ocorrer qualquer problema na transmissão do sinal, o *software* de controle indica em tela.

Este novo sistema desenvolvido, além de garantir as melhorias na transmissão do sinal, promoveu também a possibilidade de realização no SIAMA 2014 de ensaios de manobra simultânea de mais de um modelo de navio, o que não era possível no simulador anterior. Isto porque, com o sistema novo, cada embarcação pode ser controlada remotamente por sinal independente e sem risco de interferência.

4.2.2. Software de controle e monitoramento dos comandos

No SIAMA 1993 o controle dos comandos era feito por consoles analógicos, que consistiam em painéis com escalas desenhadas (Foto 4.2). Cada painel era responsável pelo controle de uma das funções: posição do leme, rotação da hélice acoplada ao motor do navio e rotação dos ventiladores para reproduzir a ação dos rebocadores. Os ajustes dos comandos eram feitos por um braço fixado ao eixo de um potenciômetro. Após a calibração da potência desejada para reproduzir um comando, uma marcação era feita sobre o painel, indicando, por exemplo, uma dada potência de máquina, ou um ângulo de leme. Este sistema introduzia um erro associado a cada medida, pois como uma dada calibração estava associada ao posicionamento manual da haste em um ponto específico marcado sobre o painel, não era possível garantir a repetição precisa da mesma posição devido ao erro humano associado à visão, além do erro de precisão mecânico na posição do potenciômetro.

Foto 4.2 – Console de comandos do SIAMA 1993, com vista do interior (esquerda) e console montado (direita). Adaptado do acervo do LHEPUSP.

O SIAMA 2014 foi concebido com o desenvolvimento de um *software* para acionamento e controle das facilidades do modelo do navio. Como o tempo de modelo físico é “acelerado” em relação ao real, a resposta aos comandos do prático precisa ser a mais rápida e intuitiva possível. Desta forma, para acionamento dos comandos do *software* foram utilizados dois controles de videogame comuns, um para o leme e o motor do navio (Figura 4.1), e o outro para os rebocadores (Figura 4.2).

Figura 4.1 – SIAMA 2014 – Controle de leme e propulsor.

Figura 4.2 – SIAMA 2014 – Controle dos rebocadores.

Neste sistema a equipe de apoio à manobra, que é aquela formada por técnicos do laboratório que recebem as instruções do prático via rádio, precisa contar com pelo menos duas pessoas, uma para acionamento de motor e leme e outra para acionamento de rebocadores¹.

A partir do *software* do SIAMA 2014 é possível controlar e monitorar durante a manobra a condição de potência de motor, ângulo de leme, atuação dos rebocadores, entre outras informações de interesse, por meio de uma IHM (interface homem-máquina) ilustrada na Figura 4.3.

¹ A equipe de apoio à manobra será discutida em maiores detalhes no item 4.2.3.

Figura 4.3 – SIAMA 2014 – Tela principal do software de controle para máquina, leme e rebocadores, utilizada durante os ensaios de manobra.

Na tela principal do *software* é possível observar da esquerda para a direita e de cima para baixo:

- O nível de carga das baterias para verificação da necessidade de troca antes do início de um ensaio e, dessa forma, evitar interrupções durante a simulação da manobra;
- Os indicadores do motor que aciona a hélice:
 - “Setagem”: 10%, 5% ou 1%, fundamental na fase de aferição do modelo do navio e durante a manobra, pois permite a escolha da taxa de variação da potência de motor elétrico. Assim, por exemplo, para uma “setagem” de 5% cada acionamento do botão de potência do motor vai varia-la entre 5%, 10%, 15% e, assim por diante;
 - Quadro indicativo da potência atual do motor, numa graduação de 0 a 100% com variação mínima de 1%;
 - Tabela de acesso rápido aos botões: “Força Máxima”, “Toda Força”, “Meia Força”, “Devagar” e “Muito Devagar”,

que são configurados na fase de calibração para potências específicas, facilitando assim a escolha pelo prático durante a manobra da função de motor que ele deseja, utilizando a mesma terminologia de uma manobra real.

- Botão para início de gravação do ensaio;
- Angulação do leme, com graduação de -40° (todo a bombordo) até 40° (todo a boreste) e variação mínima de 1° ;
- Indicador de tempo de manobra, em valores de “Tempo de modelo”, que é um cronometro convencional disparado no início da gravação do ensaio, e “Tempo Real”, que é o tempo de modelo multiplicado pela raiz quadrada da escala do modelo, de tal forma a obter de uma contagem “acelerada” e ao final do ensaio apresentar o resultado do tempo de manobra em valores reais;
- Botão de finalização de ensaio, com registro do tempo real final da manobra e data do ensaio;
- Indicadores dos rebocadores, sendo que na Figura 4.3 é apresentado um exemplo com um máximo de 4 rebocadores, sendo o número 1 na proa e sequencialmente até o número 4 na popa. Para cada rebocador é controlada e indicada a posição angular (em graus), a potência calibrada (numa graduação de 0 a 5), além de ser possível escolher o tipo de rebocador para cada uma das posições a partir de uma biblioteca, conforme será explicado em detalhes no item 4.2.5.

O desenvolvimento deste software também foi fundamental para facilitar e, ao mesmo tempo, permitir maior precisão na etapa de calibração das facilidades do modelo do navio, como será apresentado nos itens 5.3 e 5.4.

4.2.3. Comandos do práctico durante a manobra

Conforme já mencionado os ensaios em simuladores analógicos de manobra são realizados por prácticos que comandam as embarcações via instruções por rádio. Estas instruções são passadas a uma equipe de técnicos do laboratório, chamada de equipe de apoio à manobra, que é por sua vez responsável por executar os comandos no software de controle.

No SIAMA 1993, as informações do práctico eram transmitidas via transceptor tipo PTT (*Push to talk*), similar ao utilizado em manobras reais. O problema é que o tempo de ensaio em modelo é muito mais rápido do que o tempo real de uma manobra, especialmente em modelos marítimos de áreas portuárias que possuem em geral grande redução de escala. Neste caso, esta técnica pode provocar atrasos e perdas de informação durante as instruções de manobras, sendo que não há tempo hábil para a equipe de apoio solicitar a confirmação de um comando, ou mesmo para o práctico repeti-lo.

Para minimizar este problema que foi detectado em diversas simulações no SIAMA 1993, o SIAMA 2014 passou a trabalhar com a utilização de canais de comunicação abertos e sem interferências entre o práctico e a equipe de apoio, conforme ilustrado na Foto 4.3 e na Foto 4.4.

Foto 4.3 – SIAMA 2014 – Prático com “Headset” e canal aberto com a equipe de apoio na sala de comando, durante a execução de um ensaio de manobra. Fonte: acervo do LHEPUSP.

Foto 4.4 – SIAMA 2014 – Equipe de apoio na sala de comandos recebendo as instruções do práctico, em canal aberto, durante um ensaio de manobra. Fonte: acervo do LHEPUSP.

4.2.4. Software de registro dos comandos

Um avanço fundamental para permitir uma análise mais apurada dos ensaios de manobra em modelo físico foi o registro eletrônico dos comandos de motor, leme e rebocadores ao longo de todo tempo de ensaio.

No SIAMA 1993, os comandos do práctico via transceptor tinham seu áudio gravado e editado em conjunto com a filmagem do ensaio, o que permitia ter um entendimento geral da manobra executada.

O SIAMA 2014, por sua vez, realiza gravações digitais das câmeras zenitais e a bordo do navio, bem como do áudio do canal aberto onde o práctico dá os comandos, criando arquivos eletrônicos que podem ser facilmente editados para compor os resultados dos ensaios.

Entretanto, o principal ganho não está na qualidade digital das informações audiovisuais, mas no desenvolvimento de um *software* para registrar cada comando executado pela equipe de apoio durante o ensaio de manobra, sincronizado com o tempo da informação audiovisual. Este novo recurso permite, após a execução da manobra, saber em cada instante de tempo, todos os comandos executados de motor, leme e rebocadores. A Figura 4.4 mostra um exemplo de tela de resultados do SIAMA 2014 para um registro de variação da potência do motor elétrico (a partir dos comandos do práctico) durante um ensaio de manobra.

Figura 4.4 – Tela de saída do *software* SIAMA 2014 mostrando potência do motor elétrico (percentual) versus tempo de ensaio. Potência do motor é positiva para movimento à vante (*ahead*) e negativa para movimento à ré (*astern*).

Além disso, associado à ferramenta de monitoramento da posição do navio, que será mostrada no item 4.2.6, este *software* permite uma análise completa da manobra com registro de todos os comandos, em paridade com a posição do navio para qualquer instante de tempo.

4.2.5. Representação dos rebocadores

Conforme descrito no item 3.2.2, no SIAMA 1993, os rebocadores eram representados por três ventiladores, dois transversais ao eixo longitudinal do navio, localizados na popa e na proa e outro no centro do navio na direção longitudinal, e os esforços resultantes dos rebocadores eram simulados como uma resultante destas três forças. Posteriormente, os ventiladores foram embutidos sob o convés do modelo do navio com aberturas no casco (Foto 3.5 B), para permitir que a câmera instalada sobre o convés da embarcação pudesse simular a visão do práctico. De acordo com GONÇALVES (2005), este último sistema gerou perda na eficiência do sistema de reboque e maior gasto de energia para gerar o mesmo esforço.

Os principais problemas apontados pelos práticos na operação deste sistema foram:

- A dificuldade em representar ações combinadas dos rebocadores reais, que podem inclusive atuar de maneira angulada em relação ao eixo longitudinal do navio. Neste caso era necessário reproduzir o esforço no modelo imaginando uma combinação da ação dos ventiladores disponíveis que gerasse a mesma resultante dos rebocadores reais;
- O sistema não permitia uma referência precisa da perda aplicada na potência dos ventiladores em relação ao *bollard pull*, que faz parte do refinamento da calibração dos rebocadores, e que deve ser feita pelo práctico antes do início das manobras. Conforme dito no item 4.2.2, as calibrações eram feitas por posicionamento manual dos potenciômetros, o que não permitia precisão na determinação dos valores de referência e dificultava a repetição precisa numa próxima manobra.

Em modelos físicos, os rebocadores podem ser representados de várias formas diferentes. Em escalas maiores, da ordem de 1:25, os rebocadores podem ser representados por modelos de embarcações como mostrado no item 3.2.1. Já para escalas da ordem de 1:100, ou ainda mais reduzidas, que são comuns aos modelos físicos para estudos portuários, não é possível representar os rebocadores como pequenos flutuantes, devido às dificuldades de embarcar nestes modelos todo aparato necessário para controle remoto. Neste último caso, o efeito dos rebocadores pode ser representado de modo indireto, pelos esforços gerados pelo empuxo de jatos de água lançados a partir de pequenas bombas fixadas no casco, ou mais usualmente, por ventiladores fixados no navio.

Para o SIAMA 2014 foi mantido o princípio geral de utilização de ventiladores para representação dos rebocadores. Entretanto, foram consultados práticos, pilotos e operadores portuários para definição da melhor maneira de operação e disposição do conjunto de ventiladores, de tal forma a facilitar a utilização da

ferramenta durante a manobra, bem como garantir maior fidelidade na reprodução da ação.

Assim, o SIAMA 2014 foi concebido para permitir a reprodução de quatro ou mais rebocadores de forma independente, considerando-se a atuação em diferentes ângulos em relação ao eixo do navio, conforme esquematizado na Figura 4.5).

Figura 4.5 – Ilustração de quatro rebocadores em auxílio à manobra de embarcações – Fonte: Gerent (2010).

O modelo do navio reproduzido com quatro ventiladores tem dois na proa e dois na popa (Foto 4.5), instalados sobre mecanismo que permite giro em torno de seu eixo central de 360°. Desta forma, é possível não apenas mudar a angulação de atuação do rebocador, mas também rapidamente alterar sua forma de atuação, puxando ou empurrando.

Foto 4.5 – SIAMA 2014 – Conjunto de quatro ventiladores para representação dos rebocadores – Adaptação do acervo do LHEPUSP.

Além disso, como apresentado no item 4.2.2, o controle dos ventiladores passou a ser realizado por programa computacional que permite precisão no estabelecimento do valor de referência do *bollard pull*, além de um controle preciso em seu fator de redução de potência, de acordo com o ajuste fino na calibração proposta pela praticagem. Este fator de redução é informado em termos percentuais ao prático no momento da calibração e, geralmente, o ajuste final é decidido antes do início da manobra. A calibração dos rebocadores será detalhada no item 5.4.

Outra vantagem é que o software permite o registro em um banco de dados das características de diferentes rebocadores, criando uma biblioteca que pode ser acionada para qualquer um dos ventiladores antes do início do ensaio. Isto confere flexibilidade e precisão de repetibilidade à manobra, sendo que os rebocadores de diferentes potências podem ser posicionados pelos práticos da forma como acharem mais conveniente, momentos antes do ensaio.

Dependendo da dimensão do modelo da embarcação, é possível a instalação de um número superior a quatro ventiladores, sendo que o software de controle pode ser adaptado para controlá-los de maneira simultânea. Vale destacar que para um número maior de rebocadores, é necessário também pelo menos mais um técnico na equipe de apoio, pois cada controle manual permite o acionamento das funções de um máximo de quatro rebocadores, além da dificuldade operacional de uma única pessoa controlar um grande número de funções, o que aumenta a possibilidade de erro.

4.2.6. Sistema de rastreamento da posição do navio (*ship tracking*) e georreferenciamento durante a manobra

O sistema de rastreamento da posição do navio, também chamado de *ship tracking*, funciona a partir de imagens geradas por um conjunto de câmeras digitais instaladas em posição zenital e distribuídas ao longo do modelo, de forma a cobrir toda a área de movimentação da embarcação durante o ensaio de manobra. A partir destas imagens um *software*, especialmente desenvolvido

para este fim, captura cores específicas na tela, que nada mais são do que figuras presas no convés da embarcação, em cores contrastantes com o convés para facilitar a identificação, conforme ilustrado na Figura 4.6.

Figura 4.6 – SIAMA 2014 – Imagem de câmera zenital do sistema *ship tracking*, com destaque para figuras brancas sobre o convés do modelo do navio que é de cor negra.
Fonte: FCTH (2015 b).

Além de localizar as figuras sobre o convés do navio (na Figura 4.6 um “X” e um “Quadrado”), o *software* foi desenvolvido para referenciar a imagem com a carta náutica correspondente, estabelecendo desta maneira o *georreferenciamento* do ensaio de manobra. Para isto, pelo menos dois pontos de coordenadas conhecidas na imagem de cada câmera (destacados no fundo do modelo físico) são utilizados para estabelecer a posição da respectiva imagem na carta náutica. A partir daí, a cada iteração, é calculada a posição relativa entre uma das figuras e os pontos de referência para estabelecer a posição do modelo do navio e calcular a posição real na carta náutica.

Vale destacar que são colocadas duas figuras presas no convés da embarcação com objetivo de estabelecer a variação angular do navio em relação ao eixo Norte-Sul. Isto permite estabelecer a posição do centro geométrico do navio em cada instante de tempo do ensaio de manobra, ou ainda desenhar todo o deslocamento do navio pela carta náutica ao longo da manobra.

Figura 4.7 – SIAMA 2014 – Tela de saída do sistema *ship tracking* com referenciamento do movimento do centro geométrico (pontos azuis) do convés da embarcação em carta náutica durante a manobra.

Com estes resultados, os trajetos das embarcações percorridos durante as manobras de diferentes práticos podem ser analisados e comparados entre si. A posição em cada instante de tempo tem seu arquivo de dados sincronizado com o registro dos comandos aplicados sobre a embarcação no *software* de controle, permitindo uma análise integrada das informações.

Além disso, tendo a posição da embarcação em cada instante de tempo, é possível calcular a velocidade de deslocamento do navio ao longo de toda a manobra. Como a velocidade de aproximação ao píer é um importante dado para verificação da manobra, uma câmera é posicionada sobre o terminal e mais próxima do que as outras, de tal forma a aumentar a precisão deste resultado.

4.2.7. Simulação da visão real (micro câmera) e manobra noturna

Conforme já destacado no item 3.2.2, nos simuladores físicos não tripulados os ensaios de manobra podem ser feitos pelo práctico posicionado sobre o modelo físico, com visão geral do arranjo portuário. Este tipo de ensaio é chamado de

visão “voo de pássaro”, em alusão ao fato de o prático poder observar todo o cenário em uma posição superior e privilegiada.

Entretanto, o ensaio “voo de pássaro” coloca o prático em um ângulo de visão absolutamente diferente daquele que será utilizado em uma manobra real. Simular a visão real do prático durante uma manobra em modelo físico não é tarefa simples, mas é importante, para garantir que o ensaio tenha características mais próximas possíveis de um treinamento. No SIAMA 1993 este processo foi desenvolvido por meio de instalação sobre o castelo de popa do modelo do navio de uma câmera de vídeo acoplada a um mecanismo de movimentação controlado remotamente. Posteriormente, foram instaladas duas câmeras (asa de boreste e asa de bombordo) com limitado controle de giro comandado remotamente pelo prático. Contudo, por conta da tecnologia disponível na época, em que câmeras de dimensões relativamente pequenas, necessárias para montagem sobre o convés da embarcação, não possuíam boa resolução, as imagens ficavam comprometidas e este tipo de ferramenta era utilizado com menor frequência, embora já representasse uma boa aproximação da visão real.

No SIAMA 2014, o sistema de visão simulada foi aperfeiçoado com instalação de duas micro câmeras de alta resolução sobre o passadiço da embarcação, uma em cada bordo (Foto 4.6), acopladas a um servo mecanismo que permite um giro superior a 180° em torno de seu eixo.

Foto 4.6 – SIAMA 2014 – Micro câmeras instaladas sobre o passadiço do modelo do navio em cada bordo para simulação de visão do práctico durante a manobra. Fonte: Acervo do LHEPUSP.

As micro câmeras podem ser controladas remotamente por meio de um *software* desenvolvido para tal fim (Figura 4.8). Durante a manobra, o práctico recebe um controle no qual pode girar a câmera a qualquer momento e, inclusive, escolher a velocidade de rotação.

Figura 4.8 – SIAMA 2014 – Tela principal do *Software* para controle remoto das micro câmeras.

A filmagem gerada por cada micro câmera (Foto 4.7) é gravada digitalmente e, posteriormente, editada para apresentação em conjunto com as filmagens das demais câmeras zenitais instaladas no modelo, bem como com o áudio dos comandos do práctico.

Foto 4.7 – SIAMA 2014 – Imagem gerada pela micro câmera de boreste durante ensaio de manobra simulando a visão real do prático.

Durante a manobra, o prático recebe as imagens da câmera em um monitor de alta resolução, em local cujo acesso visual ao modelo físico pode ser impedido (Foto 4.8). Desta sala de manobra, ele pode movimentar a câmera que está visualizando e trocar a imagem da câmera de um bordo para a câmera do outro.

Foto 4.8 – SIAMA 2014 – Prático durante ensaio de manobra com simulação de visão real. Fonte: Acervo do LHEPUSP.

Com a melhoria na qualidade das imagens de simulação da visão real foi possível começar a executar no SIAMA 2014 os ensaios de manobras em condições noturnas. Para isso, o modelo físico deve estar preparado com mecanismo para impedir a entrada de luz natural, bem como providenciar os sinais luminosos (cores e frequências de lampejo) correspondentes às embarcações, boias, balizas e faroletes de navegação e berços de atracação, de tal modo a permitir ao prático que visualize condições similares às que vai encontrar no ambiente real.

5. SISTEMA PARA VERIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE MANOBRA UTILIZANDO O SIAMA 2014

O SIAMA 2014 foi concebido a partir de uma estratégia definida para realização de ensaios de verificação das condições de manobrabilidade de navios em espaços náuticos utilizando-se de modelos físicos de escala reduzida. Esta estratégia teve como fundamento estabelecer uma série de premissas consideradas necessárias para garantir uma adequada reprodução do fenômeno, conferindo maior confiabilidade nos resultados. A partir da definição destas premissas é que foram planejados e desenvolvidos os recursos do SIAMA 2014, apresentadas no capítulo 4.

Por fim, a estratégia para avaliação das condições de manobra em modelos físicos utilizando o SIAMA 2014 foi sistematizada, de tal forma a definir um método claro para aplicação desta técnica. Este sistema pode ser dividido em oito etapas:

- Definição dos objetivos da manobra;
- Calibração do modelo físico;
- Calibração do modelo do navio;
- Calibração dos rebocadores;
- Testes iniciais de verificação das calibrações do modelo e simulações de ambientação;
- Simulações de manobra com visão “voo de pássaro”;
- Testes avançados com simulação de visão real e outras condições adversas;
- Análise final dos resultados das simulações de manobra.

A descrição geral das principais atividades a serem realizadas em cada uma das etapas supracitadas será apresentada nos itens a seguir.

5.1. Etapa 0 – Definição dos objetivos e da campanha de simulações de manobra

A etapa de definição dos objetivos é fundamental para que os ensaios em modelo físico sejam realizados com a maior eficiência possível, ou seja, abrangendo todos os cenários esperados e com um número mínimo de simulações, de forma a otimizar o uso do tempo dos participantes, que, via de regra, são constituídos por práticos, pilotos, consultores náuticos, autoridades marítimas, autoridades portuárias, operadores portuários, mestres de rebocadores, entre outros.

Os objetivos dos ensaios de verificação das condições de manobrabilidade podem ser de diferentes naturezas, mas usualmente estão relacionados a algum projeto ou cenário novo que precisa ser verificado para garantir a condição de segurança no ambiente real. Dentre os principais objetivos podem ser citados:

- Projeto de novos terminais portuários, onde se desejam otimizar as dimensões dos canais de acesso ou posicionamento das estruturas de acostagem;
- Modificações em terminais existentes, com ampliação de berços ou implantação de novos píeres;
- Nova frota de navios que passarão a utilizar o porto;
- Treinamento de novos práticos.

Definido o(s) objetivo(s) principal(is) do estudo, é preciso estabelecer os cenários que vão definir a campanha de ensaios. Neste caso, os aspectos fundamentais a serem considerados são:

- Condições ambientais, incluindo: marés, correntes, ondas, ventos, batimetria, visibilidade, horário de operação (manobra diurna ou noturna), entre outros;
- Frota de navios: cada modelo de navio representa uma classe, e devem ser consideradas todas as classes de interesse para o estudo do terminal;
- Quantidade e tipos de rebocadores disponíveis: que poderão ser solicitados pelos práticos durante o procedimento de manobra;
- Participantes: definição do número de práticos que vão comandar as simulações, de tal forma a permitir a comparação de resultados e uma melhor avaliação de cada cenário. Na escolha dos participantes é sempre importante mesclar práticos mais experientes, com outros mais novos, para avaliar eventuais diferenças nas percepções de dificuldade;
- Condições de tráfego: se a manobra do navio vai ser isolada ou vai contar com a movimentação de outras embarcações durante o processo;
- Presença de obstáculos: como navios atracados em berços próximos que dificultem a execução da manobra;
- Manobras de emergência: simulações de cenários com quebra de rebocadores, ou problemas em motor ou leme, entre outras.

As condições acima descritas precisam ser acordadas por meio de reuniões preliminares (“*briefing*”) com a participação dos principais agentes envolvidos e já mencionados acima. É preciso haver consenso sobre as condições fundamentais a serem avaliadas, pois a tentativa de abranger todas as possibilidades, resulta numa combinação imensa de fatores e vai implicar em

um número exagerado de ensaios. Isto vai na contramão do tempo disponível destes profissionais para a participação em simulações de manobra. Desta forma, vale a pena restringir os estudos para as condições consideradas como críticas para manobra.

5.2. Etapa 1 – Calibração do modelo físico

Conforme detalhado no item 2.4, existem diversos tipos diferentes de modelos físicos hidráulicos reduzidos que podem ser utilizados em ambiente costeiro. Para aplicação em estudos de manobra de navios, são de especial interesse as bacias tridimensionais com simulação de marés ou com sistema gerador de ondas (ou ainda com reprodução de ambos os fenômenos), dependendo das características ambientais do local a ser representado. Também é possível incluir a simulação do vento.

Em modelos físicos como estes, para garantir que os fenômenos representados em escala reduzida tenham correspondência com o ambiente real em pontos homólogos, além de garantir as condições de contorno de forma, que são a representação da topografia, batimetria e demais estruturas que tenham interface com o escoamento, e reproduzir as condições de fronteira hidráulicas, que são a geração de ondas e a vazão de entrada correspondente a cada instante de maré estudado, é preciso uma série de outras medidas para estabelecer condições semelhantes de escoamento entre o modelo e a realidade.

Isto ocorre fundamentalmente porque o modelo físico, em geral, reproduz apenas uma área limitada dentro de um complexo cenário costeiro ou estuarino muito mais amplo, de tal forma que as condições de ondas ou correntes precisam ser adequadas através de técnicas de laboratório para que atinjam os pontos de controle da maneira mais próxima possível ao observado em campo. Além disso, via de regra, as condições de contorno de topografia e batimetria no modelo físico não representam a mesma resistência ao escoamento do

meio real, sendo muitas vezes necessários ajustes na rugosidade de fundo para garantir a semelhança de comportamento. Em algumas regiões, a movimentação de material sólido altera significativamente a forma de fundo tornando o problema ainda mais complicado, pois a condição batimétrica real passa a ser variável com o tempo.

Por estes motivos, antes do início de qualquer tipo de ensaio em modelo físico é preciso realizar uma etapa de calibração das condições hidráulicas, de tal forma a garantir uma adequada reprodução nos pontos de interesse das alturas, períodos e direções de ondas, bem como dos níveis d'água, velocidades e direções de correntes em cada instante de maré.

Na etapa de calibração de um modelo físico, os dados resultantes de levantamentos de campo, conforme descritos no item 3.4.2, são as informações de referência para a realização dos ajustes necessários. Entretanto, deve-se destacar que estes dados são pontuais, e muitas vezes bastante espaçados entre si, principalmente por razões de custos envolvidos nos monitoramentos de campo. Isto muitas vezes dificulta a percepção global dos fenômenos hidrodinâmicos que controlam as condições de escoamento, e portanto, tornam a tarefa de calibração do modelo físico mais árdua e demorada, podendo algumas vezes, inclusive, comprometer a própria precisão dos resultados.

Desta forma, é altamente recomendável utilizar o apoio de modelos hidrodinâmicos computacionais para auxiliar na calibração do modelo físico. Os modelos computacionais têm a vantagem de representar áreas muito maiores do que os modelos físicos, o que permite o estabelecimento de condições de contorno mais amplas e a compreensão dos fenômenos globais que regem o escoamento na região de interesse. Além disso, uma vez aferidos e validados com os dados de campo, os modelos computacionais permitem a determinação das condições de ondas, níveis d'água e velocidades para diferentes cenários em qualquer ponto de sua grade, permitindo uma calibração muito mais detalhada do modelo físico.

Nos modelos físicos com simulação de maré, as condições de contorno impostas são as vazões e os níveis d'água. No caso dos modelos quase estáticos, que retratam as condições de escoamento para um instante específico de maré, e, portanto, operam em regime permanente (com vazão constante), uma primeira aproximação para a vazão pode ser obtida a partir da velocidade média do fluxo (oriunda dos levantamentos de campo ou dos resultados do modelo computacional) em uma dada seção multiplicada pela área molhada da mesma seção representada no modelo. Este procedimento pode ser feito para diversas seções no modelo físico que tenham levantamentos de velocidade, a fim de estabelecer um valor de referência. Evidentemente este valor de vazão terá de ser ajustado posteriormente durante os ensaios de calibração.

As vazões são controladas por registros instalados nas tubulações de alimentação do modelo físico. Destaca-se que, em modelos marítimos são normalmente utilizados dois sistemas de alimentação, um para representar maré enchente e outro para representar a maré vazante.

A medição da vazão nas tubulações de alimentação pode ser feita por diversas técnicas diferentes, sendo as mais comuns: medidores deprimogêneos inseridos (Venturi, Tubo Dall ou Diafragma), medidores por ultrassom e medidores eletromagnéticos. A Figura 5.1 mostra o exemplo de um medidor deprimogêneo tipo Venturi.

Figura 5.1 – Medidor de vazão tipo Venturi.

Além do controle da vazão é preciso estabelecer uma adequada distribuição do fluxo na entrada do modelo, de tal forma a conformar o escoamento de modo semelhante à realidade. Para isto, o sistema de alimentação conta também com distribuidores de vazão, sistema de tranquilização e placas direcionadoras, conforme ilustrado na Foto 5.1.

Foto 5.1 – Distribuidores de vazão (tipo colmeia, que são módulos com tubos de PVC que podem operar abertos ou fechados de forma a favorecer o escoamento em uma dada posição), sistema de tranquilização (estrutura gradeada de madeira que funciona como flutuante e mitiga o efeito de turbulência na entrada do modelo) e placas direcionadoras de fluxo. Fonte: Acervo do LHEPUSP.

Para cada condição de maré, o modelo é considerado calibrado se os níveis d'água e velocidades medidos em cada ponto de interesse tem valor correspondente no ambiente real nos pontos homólogos.

Em cada uma das duas saídas do modelo (maré enchente ou vazante), comportas basculantes (Foto 5.2) permitem o controle de nível d'água, de tal forma a estabelecer ao longo de toda área de representação os correspondentes níveis obtidos em campo para cada condição de maré. Os níveis d'água no modelo são medidos por meio de pontas limnimétricas, que podem ser fixas em pontos estratégicos do modelo (Foto 5.3), ou acopladas a tripés que podem ser facilmente deslocados e posicionados de acordo com o interesse do estudo.

Foto 5.2 – Comporta basculante para regulação de nível d'água por jusante. Fonte: Acervo do LHEPUSP.

Foto 5.3 – Ponta limnimétrica para medição de nível d'água na área de representação do modelo físico. Fonte: Acervo do LHEPUSP.

No caso das velocidades, é preciso garantir a semelhança entre modelo e campo quanto à magnitude e a direção. No modelo físico, as velocidades são determinadas com uso de micromolinetes e medidores de direção, ambos ilustrados na Foto 5.4.

Foto 5.4 – Equipamentos para medição de velocidades – Micromolinete (esquerda) e medidor de direção (direita).

Os micromolinetes são pequenas hélices acopladas a um eixo horizontal ligado a uma haste fina vertical, que são imersas no ponto de interesse de medição de velocidades, posicionadas na direção preferencial do fluxo. Estes equipamentos funcionam em conjunto com um contador de giros, e são instrumentos projetados para girar em velocidades diferentes de acordo com a velocidade da água no ponto a ser medido. A relação entre velocidade da água e velocidade de rotação do molinete é a “equação do molinete”, que é determinada em tanque de aferição do laboratório.

Os medidores de direção de corrente são lemes metálicos com curvaturas nas extremidades, que são imersos no ponto de interesse de medição, posicionados sobre um eixo direcional escolhido, como, por exemplo, o eixo norte-sul. Como o arranjo é leve, o mesmo tende a estabilizar sua posição na direção do fluxo naquele ponto. Este leme é acoplado a uma haste vertical de pequeno diâmetro, que é interligada a um rolamento, onde o ângulo em relação ao eixo escolhido é medido por meio de um potenciômetro.

As velocidades obtidas nos ensaios em modelo físico precisam ser equivalentes em pontos homólogos aos dados de levantamento de campo.

Caso isso não ocorra, são possíveis diversos tipos de ajustes no modelo, tais como:

- Aumento ou redução da vazão de entrada para alteração correspondente na magnitude dos campos de velocidades;
- Instalação de placas de restrição de seção transversal (Foto 5.5), quando as velocidades precisam ser aumentadas em pontos específicos, mas já possuem boa correspondência em outras regiões;

Foto 5.5 – Placas para confinamento do fluxo e aumento de velocidades na seção de interesse. Fonte: Acervo do LHEPUSP.

- Modificação na distribuição da vazão de entrada com restrição de seções, instalação de novas placas direcionadoras ou reposicionamento das existentes para ajustes na direção do fluxo;
- Ajuste da rugosidade de fundo para alteração das propriedades de resistência ao escoamento e, conseqüentemente, dos campos de velocidades. Por exemplo, rugosidades artificiais são simuladas em modelo físico com colagem de pedriscos no fundo, que provocam redução das velocidades no trecho, conforme ilustrado na Foto 5.6. Em

caso de necessidade de redução da rugosidade, o fundo do modelo que normalmente é de argamassa pode ser revestido com cimento queimado ou com tintas especiais.

Foto 5.6 – Imposição de rugosidade de fundo para ajuste do nível d'água em modelo físico. Fonte: Acervo do LHEPUSP.

Equipamentos de acostagem fundamentais a serem instalados e calibrados de acordo com os objetivos da simulação no modelo físico de manobras são as defensas.

No modelo reduzido, as defensas são representadas por lâminas em balanço (*"cantilever"*), que se flexionam com o impacto da embarcação, acopladas a sensores de deslocamento (Foto 5.7), que são calibrados de acordo com a curva de deformação (tensão x deformação) das defensas reais (Figura 5.2).

Foto 5.7 – Instrumentação adaptada ao berço de atracação em modelo físico para simulação e registro da deformação das defensas. Fonte: FCTH (2006).

Figura 5.2 – Curva tensão deformação de uma defesa real. Fonte: Bridgestone (2008)¹ *apud* Gerent (2010).

O *software* do SIAMA 2014 permite o registro das deformações resultantes dos impactos sobre as defensas dos navios durante as manobras de atracação. Com este resultado é possível verificar se o limite de deformação não foi ultrapassado, conforme ilustrado no gráfico da Figura 5.3.

¹ BRIDGESTONE CORPORATION. **Marine fender system proposal for Ponta da Madeira Brazil.** Japan, 2008.

Figura 5.3 – Exemplo de gráfico de deformações nas defensas oriundas de impacto de modelo de navio durante simulação de manobra. Fonte: FCTH (2007).

5.3. Etapa 2 – Calibração do modelo do navio

Para que as simulações realizadas em modelo físico representem de forma adequada as manobras de navios reais, é necessário realizar a calibração do modelo reduzido do navio.

O primeiro passo para esta calibração é garantir a semelhança de forma da embarcação, ou seja, reproduzir o casco com a mesma geometria considerando-se o fator de escala linear do modelo físico. Para isto, é utilizado o plano de linhas do navio, conforme descrito no item 3.4.1. A Foto 5.8 mostra o exemplo de um modelo de navio em construção.

Foto 5.8 – Confeção de modelos reduzidos do casco de navios – preparação do molde (à esquerda) e finalizado (à direita). Adaptado do acervo do LHEPUSP.

Além da semelhança de forma, a FCTH (2011 b) destaca a importância de considerar que a massa e o calado do navio precisam ser representados em escala de modelo e que, para facilitar a calibração da massa e os ajustes de calado, é interessante que o modelo do navio seja o mais leve possível, ampliando as opções de lastreamento da embarcação para ensaio.

A mera representação da geometria do casco, ainda que a reprodução da ação do conjunto motor-propulsor e leme fossem ideais, não garantiria que a movimentação do modelo do navio fosse necessariamente como o real. Nos modelos froudianos, como já explicado no item 2.3.3, os efeitos de viscosidade são desprezados, e a tendência é que a camada limite que se forma no descolamento do escoamento junto ao casco seja diferente em modelo e navio real. De fato, no navio real a camada limite torna-se turbulenta relativamente próxima ao ponto de descolamento no início do casco, ao passo que no modelo físico a extensão da camada limite laminar é muito maior. O resultado imediato deste efeito de escala é que o coeficiente de arraste em modelo tem a tendência a ser maior do que no navio real. Como este efeito de escala depende das condições de escoamento e da velocidade da embarcação, é muito difícil estabelecer quantitativamente o impacto dele nos resultados de uma manobra. Desta forma, geralmente opta-se por artifícios de modelo, como por exemplo, aumentar artificialmente a rugosidade do casco, de tal forma que a camada limite torne-se turbulenta logo no início, como no navio real, minimizando o efeito de escala.

Existem várias formas de aumentar artificialmente a rugosidade do casco de um modelo de navio. Dentre as mais usuais, pode-se apontar:

- Pinos de turbulência: pequenas peças com formato geométrico normalmente cilíndrico, instaladas na parte de proa do casco. As dimensões e distâncias entre as peças podem variar de acordo a forma e tamanho do modelo;
- Cabos verticais: consistem em cabos metálicos colados sobre o casco e dispostos verticalmente a uma distância correspondente a 5% do comprimento entre perpendiculares, começando da proa do modelo. Geralmente, o cabo tem diâmetro variando entre 0,5 mm e 1 mm;
- Faixas de areia espalhada: consistem em tiras adesivas cobertas de areia colocadas verticalmente no casco a partir de uma distância correspondente a 5% do comprimento entre perpendiculares. O tamanho das partículas de areia é de aproximadamente de 0,5 mm e usualmente a largura das tiras varia entre 5 mm e 10 mm;

O passo seguinte é garantir que o conjunto casco, motor, propulsor e leme do modelo tenha comportamento semelhante ao navio real que está representado, quando submetido aos ensaios de manobra.

O propulsor (hélice) do modelo reduzido da embarcação é acionado por um motor elétrico DC, que é controlado por uma técnica conhecida como PWM (*Pulse Width Modulation* ou Modulação de Largura de Pulso). Com esta técnica é possível controlar a rotação dos motores, mantendo o torque ainda que em baixas velocidades. Assim, para diferentes rotações induzidas no motor elétrico, mede-se a velocidade da embarcação em um trecho reto suficientemente longo e largo de um canal de grande profundidade (Foto 5.9), obtendo-se desta forma uma curva que relaciona a “potência”¹ de referência do motor elétrico com a velocidade do navio. O procedimento deve ser repetido para diferentes condições de carregamento da embarcação, quando as simulações de manobra assim o requisitarem, determinando-se assim

¹ A potência do motor elétrico será mencionada como um valor percentual em relação a uma referência máxima e mínima dentro da faixa de trabalho de velocidades estabelecida para o conjunto motor-propulsor naquele ensaio.

diferentes curvas de correlação. Além disso, é preciso estabelecer as curvas de potência do motor elétrico para o movimento do navio à vante e à ré.

Foto 5.9 – Canal para calibração do motor da embarcação. Fonte: Acervo do LHEPUSP.

De posse das curvas de potência do motor elétrico, é possível calibrar o conjunto propulsor do modelo do navio de acordo com o padrão de referência comum aos práticos para comando de máquina durante as manobras. Nos navios reais é comum a utilização da graduação de potência definida pelo telégrafo. A graduação mais comum é: toda força (*full*), meia força (*half*), devagar (*slow*), muito devagar (*dead slow*) e parada (*stop*), com posições para comunicação de movimento de máquina à vante (*ahead*) e máquina à ré (*astern*), conforme ilustrado na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Telégrafo náutico para transmissão de comando da ponte para casa de máquina. Fonte: FCTH (2015 b).

As relações entre as graduações de potência do telégrafo do motor e as respectivas velocidades de um navio real são conhecidas para condições de águas profundas, em condições semelhantes à determinação da curva de potência do motor elétrico do modelo do navio nos ensaios realizados em canal no laboratório. Por este motivo, é possível estabelecer uma relação entre a potência do motor elétrico e as graduações do navio real. Entretanto, deve-se lembrar que geralmente as manobras de atracação e desatracação em terminais portuários estuarinos ou costeiros são realizadas em condições de águas rasas ou confinadas, para a qual teoricamente não há referência para validação do comportamento do navio. Daí a importância, antes do início das manobras, da verificação das calibrações estabelecidas para o motor elétrico, de modo empírico, pelos práticos, preferencialmente em condições de manobra que eles estejam acostumados a navegar, de tal forma que possam inferir com maior facilidade sobre estas condições.

Outro ponto importante a considerar é a diferença na ação do conjunto motor-propulsor em modelo e navio real. Em primeiro lugar porque a ação do motor elétrico, normalmente utilizado em modelo físicos, é completamente diferente de um motor de navio real. No modelo, as rotação induzidas no propulsor podem ser executadas de modo praticamente imediato, inclusive na troca de movimento à vante para movimento à ré, não possuindo a mesma inércia a ser vencida do navio real.

Além disso, a ação do propulsor, ainda que a geometria da hélice seja bem reproduzida em escala, não seria a mesma do navio real para uma rotação equivalente, pois não se deve esquecer que o fluido deslocado em modelo e no ambiente real é o mesmo, ou seja, as propriedades físicas do fluido não estão representadas em escala.

No caso do leme, sabe-se que como os modelos froudianos negligenciam os efeitos da viscosidade, o escoamento que se forma na vizinhança do casco no modelo do navio não é semelhante ao real, o que implica em uma corrente diferente passando pelo leme. De acordo com a The Society of Naval Architects of Japan (1966), a força produzida pelo leme é relativamente maior em um modelo físico reduzido do que no navio real.

Portanto, fatores como rotação e geometria do propulsor e dimensões do leme, em geral, devem ser reproduzidos de modo geometricamente distorcido para garantir um comportamento da embarcação dentro dos padrões desejados.

Dos principais efeitos de escala acima expostos, é possível afirmar que são conhecidos qualitativamente, mas não podem ser estimados quantitativamente por meio de uma relação bem conhecida. Assim, é preciso utilizar uma referência de resultados de navios reais em manobra para calibrar as ações do modelo físico, fazendo, se necessário, as devidas correções no modelo do navio, tais como aumento de rugosidade do casco, mudanças na geometria de propulsor e leme, entre outras.

Para isso, no caso de simuladores físicos, são utilizados os resultados de provas de mar de navios reais, representados pelos três testes de manobrabilidade básicos previstos pela IMO (2002), que são:

- Curva de giro (*turning circle test*): o navio é conduzido em linha reta até atingir uma velocidade pré-determinada (denominada de velocidade inicial) e, então, o leme é posicionado com um determinado ângulo, até que a trajetória da embarcação descreva um círculo completo. Este teste permite a determinação de importantes parâmetros de manobrabilidade,

tais como: diâmetro tático (*tactical diameter*), transferência (*transfer*), avanço (*advance*), entre outros, conforme ilustrado na Figura 5.5. A IMO (2002) define como padrão o teste com ângulo de leme a 35° ou o máximo permitido, tanto em manobra para bombordo quanto para boreste;

Figura 5.5 – Esquema do teste de curva de giro (*turning circle*), com destaque para alguns parâmetros de manobra.

- Teste de Zig-zag: o navio é conduzido em linha reta até atingir uma velocidade pré-determinada e, então, é imposto um dado ângulo de leme (δ) até que um dado curso (ψ) seja alcançado. Neste momento, é imposto o ângulo de leme oposto ($-\delta$). A IMO (2002) define como padrão para provas de mar, testes com ângulos de leme de 10° e 20° . A Figura 5.6 mostra um exemplo de teste de zig-zag com ângulo de leme variando de 10° para um curso de também 10° (zig-zag 10/10);

Figura 5.6 – Exemplo de resultado de teste de zig-zag mostrando o curso (ψ) e variação no ângulo de leme (δ) de 10°/10°. Fonte: IMO (2002).

- Teste da parada brusca (*crash stop*): para uma determinada velocidade e rotação de motor do navio, é aplicada sobre a máquina toda força a ré, em alguns casos utilizando angulação de leme. A trajetória da embarcação deve ser medida (*track reach*), bem como deve ser monitorada a velocidade, a rotação, a distância de parada e a excursão lateral (*lateral deviation*). A Figura 5.7 mostra um exemplo de trajetória de embarcação em um teste de parada brusca.

Figura 5.7 – Exemplo de trajetória de embarcação em um teste de parada brusca.
Fonte: IMO (2002).

Os três testes propostos para provas de mar de navios reais devem ser reproduzidos em modelo físico utilizando-se o navio rádio controlado, simulando-se os mesmos movimentos e ambiente de manobra. As provas de mar são realizadas em condições de águas profundas, que segundo a PIANC (1992) pode ser considerada quando a relação entre a lâmina d'água e o calado da embarcação é maior do que 3. Esta condição também deve ser imposta em modelo físico, a fim de evitar interferência na calibração da embarcação. A Figura 5.8 mostra um desenho esquemático evidenciando a diferença no raio da curva para testes do tipo *turning circle* com leme a 35°, para razões entre profundidade e calado superiores a 3 (águas profundas), 1,5 (águas rasas) e 1,2 (águas muito rasas).

Figura 5.8 – *Turning circle* para diferentes relações de profundidade do escoamento (D_w) e Calado (T). Fonte: PIANC (1992).

Como nos testes de prova de mar de navios reais, geralmente só há informações sobre as condições de águas profundas¹, somente esta condição

¹ Alguns documentos de provas de mar contêm resultados de testes para condição de águas intermediárias e rasas, mas derivados de simulações computacionais e não de testes de campo em navios reais. Entretanto, vale destacar que estas simulações precisam ser calibradas com coeficientes hidrodinâmicos que são extraídos de ensaios em modelos físicos cativos ou do tipo *free sailing*, conforme explicado no apêndice A.2.

pode ser adequadamente calibrada para o ensaio em modelo físico. Entretanto, as condições de manobra na zona portuária são muitas vezes feitas em condições de águas rasas. Neste caso, espera-se que os resultados do modelo reduzido do navio respondam adequadamente e tenham semelhança. Embora se saiba que existem diferenças no comportamento do navio real e de seu respectivo modelo em condições semelhantes de manobras em águas rasas, por conta da interação entre o casco, o fluxo e o fundo possuírem efeitos de escala na modelação física, esta ainda é a melhor aproximação disponível para representar este fenômeno. Os próprios simuladores computacionais utilizam-se de resultados de modelos físicos para calibrar seus coeficientes hidrodinâmicos nestas condições. Para validar os resultados de modelo físico em condições de águas não profundas, seriam necessários dados de campo de manobras de navios reais na mesma situação, que são bastante raros.

Outro fator importante a ser considerado na calibração dos modelos reduzidos de navios utilizados em manobras, é se durante os ensaios a embarcação terá que navegar em trecho de canal sujeito a ação de ondas. Neste caso, é importante que a distribuição de pesos no modelo do navio respeite não apenas a condição de calado desejada, mas também o centro de gravidade e o momento de inércia. O LHEPUSP possui bancadas especiais para calibração destas grandezas e o apêndice B descreve as condições gerais de como devem ser os ensaios de calibração para modelos de navios que serão utilizados para manobras em áreas desabrigadas ou parcialmente abrigadas da ação de ondas.

5.4. Etapa 3 – Calibração dos rebocadores

Para navios de grande porte, como o caso de graneleiros e petroleiros, os rebocadores são essenciais para a realização de atracações e desatracações em espaços náuticos restritos e em baixas velocidades. Sendo assim, sua representação nas simulações de manobras destes tipos de embarcações em modelo físico também deve ser considerada.

Conforme explicado no item 4.2.5, os rebocadores são representados no SIAMA 2014 por meio de um conjunto de mini ventiladores que procuram reproduzir os esforços aplicados por estas embarcações durante o procedimento de auxílio à manobra. Entretanto, para que esta representação seja similar ao real, seu comportamento deve ser calibrado.

A principal característica para representação da atuação dos rebocadores durante as manobras é sua força de tração. Em campo, os rebocadores são classificados de acordo com seu *bollard pull*, também chamado de força de tração estática. Este valor é inferido a partir de um teste de mar, onde o rebocador aplica a potência máxima de sua máquina a um cabo preso a um ponto fixo, no qual um dinamômetro registra a tração estática máxima (*bollard pull*). Neste teste, as amarrações do cabo no rebocador e no ponto fixo devem estar na mesma altura em relação ao nível do mar, de tal forma a obter o valor de tração máxima (Foto 5.10).

Foto 5.10 – Rebocador realizando teste para medição do *bollard pull*. Fonte: FCTH (2015 b).

Em modelo físico, a calibração de cada rebocador, representado por um mini ventilador, é realizada de modo similar em um tanque de aferição. Nesta bancada, em um volume de água parado, o ventilador (rebocador) é fixado a um cubo de isopor (flutuante), ao qual é amarrado um fio esticado e paralelo à linha d'água (Foto 5.11). Este fio é preso a uma mola (de constante elástica conhecida), e o sistema é conectado a um instrumento de medição de deslocamento, denominado LVDT (*linear variable differential transformer*).

Desta forma, aplicando-se ao motor DC do ventilador a mesma técnica PWM, explicada no item 5.3, para um dado empuxo gerado pelo ventilador monitora-se o deslocamento do conjunto até que seja atingida uma condição de equilíbrio. O valor de deslocamento é posteriormente convertido em tração no cabo pela equação da mola.

Foto 5.11 – Bancada de laboratório para levantamento da curva de calibração da tração dos ventiladores (rebocadores). Fonte: FCTH (2015 b).

O procedimento acima estabelecido é repetido para diferentes condições de empuxo do ventilador, de tal forma a estabelecer uma curva de calibração de “potência elétrica”¹ versus tração no cabo, similar à estabelecida para o motor do navio em relação à velocidade da embarcação. Desta forma, cada ventilador pode ser utilizado para representar um determinado *bollard pull* de um rebocador real, utilizando-se esta curva de correlação.

¹ Analogamente ao motor DC do conjunto propulsor da embarcação, utiliza-se para identificar a intensidade do empuxo gerado pelos ventiladores, um valor percentual de referência para o motor do ventilador em relação aos valores máximo e mínimo calibrados para as simulações de manobra, que se convencionou chamar de “potência elétrica”.

Com relação à calibração final do esforço gerado pelos rebocadores no modelo reduzido, é preciso fazer uma observação sobre a utilização do valor do *bollard pull* como referência. Sabe-se que em condições de manobra real, não é possível ao rebocador aplicar sobre navio esforço equivalente à tração estática, ou seja, há uma perda de tração em função da angulação do cabo, das correntes marítimas e agitação do mar, fazendo com que o rebocador tenha que gastar energia também para se manter na posição, entre outros. Esta perda em relação à tração estática tem um valor que pode variar de manobra para manobra, dependendo das condições locais, e, portanto, deve ser atribuído de maneira empírica pelos práticos antes do início das simulações. No SIAMA 2014, este ajuste pode ser feito de modo imediato no sistema, uma vez que se dispõe da curva completa de correlação entre as grandezas, permitindo ao prático rapidamente realizar diversos testes de observação para ajuste fino.

5.5. Etapa 4 – Testes iniciais de verificação das calibrações do modelo e simulações de ambientação

Antes do início das simulações propriamente ditas, recomenda-se que a equipe de práticos, pilotos, mestres rebocadores e demais profissionais que forem executar as manobras, participem de uma etapa preliminar com dois tipos de atividades de objetivos distintos:

- Testes iniciais com intuito de verificar as condições gerais de todas as calibrações executadas nas etapas anteriores, ou seja, das características ambientais, do modelo do navio e dos rebocadores. Esta atividade deve ser executada por profissionais que conheçam bem a região, e já tenham participado de manobras no local, preferencialmente com embarcações de características similares às que serão simuladas;
- Simulações de ambientação para treinamento do pessoal que nunca participou de um ensaio em modelo físico reduzido, com a finalidade de

que se habitue principalmente com o fator de escala de tempo, que é inerente a este tipo de simulador.

Vale observar que em casos onde o terminal portuário em estudo fica localizado numa região onde nunca foi realizada manobra antes, ou mesmo onde a embarcação a ser estudada é de uma classe bem diferente das que estavam sendo utilizadas no local, os testes iniciais de validação da calibração podem ser dispensados ou mesmo executados parcialmente, pois seu objetivo básico é de permitir a validação da calibração proposta para a ferramenta com informações conhecidas de campo (reais). Caso estas informações não existam, o teste fica comprometido. Entretanto, é importante que fique claro que, mesmo sem a realização desta etapa, as simulações de manobra podem ser realizadas utilizando-se as calibrações preliminares executadas nas etapas anteriores, que serão consideradas como a melhor aproximação possível. Nestes casos, entretanto, é preciso ser mais conservador nas análises dos resultados e margens de segurança, cientes de que o modelo é uma representação simplificada da realidade e, portanto, sujeito a efeitos de escala que muitas vezes são conhecidos apenas qualitativamente.

Raciocínio semelhante pode ser aplicado também aos testes de ambientação, ou seja, caso todos os profissionais já tenham participado de simulações em modelo físico tipo SIAMA, esta atividade pode ser dispensada.

Os itens a seguir discutirão brevemente cada uma destas atividades preliminares.

5.5.1. Testes iniciais para validação da calibração do modelo físico

No caso da calibração do modelo físico, devem ser apresentadas aos práticos as condições gerais ambientais (níveis d'água, correntes e ondas) para cada instante de maré selecionado para manobra, ou por meio de dados disponíveis de levantamento de campo, ou preferencialmente utilizando-se meios gráficos ilustrativos resultantes de modelos computacionais, que facilitam a visão geral

e a discussão dos resultados. Neste ponto, os próprios práticos devem compartilhar suas experiências para corroborar ou não com os resultados das simulações computacionais. Como, em geral, as datas reservadas para as simulações de manobra são de poucos dias, o ideal é que esta avaliação das condições ambientais a serem calibradas no modelo físico seja revisada pelos práticos antes dos dias das simulações. Assim, caso ocorra alguma solicitação de alteração ou refinamento de resultado, há tempo hábil para ajuste do modelo físico.

Os resultados das comparações de magnitudes e direções de velocidades entre modelo físico e computacional (ou dados de campo), ou mesmo das características das ondas, obtidos durante as campanhas de calibração do modelo físico, também devem ser apresentadas aos práticos, para mostrar eventuais discrepâncias, e para que fiquem claras eventuais limitações ou erros associados à simulação.

Já durante as datas de manobras, a etapa final de validação da calibração ocorre com os práticos observando as condições gerais de correntes e ondas no próprio modelo físico, para verificar a similaridade com os padrões normalmente observados por eles em campo e preconizados nas simulações computacionais. Para o caso de reprodução de ondas, a visualização do fenômeno é relativamente mais fácil. Entretanto, no caso das correntes, a técnica empregada nos modelos físicos para permitir a inspeção visual é uso de traçadores, como corantes ou flutuantes (Foto 5.12), que possibilitam a avaliação das direções e dão uma ideia melhor das velocidades ao longo da trajetória das correntes.

Foto 5.12 – Uso de traçadores flutuantes (mini confetes) para identificação das correntes próximas ao berço de atracação durante simulação de manobra. Fonte: Acervo do LHEPUSP.

Embora a etapa de validação da calibração do modelo físico possa parecer algo pouco científico, de caráter meramente intuitivo, e, portanto, especulativo em relação às técnicas de medições de velocidades e demais grandezas, na verdade, é algo crucial para o sucesso dos trabalhos, especialmente quando os práticos têm grande experiência trabalhando no local. Isto porque, apesar de toda a precisão e técnicas cada vez mais avançadas que são aplicadas na calibração de modelos, é preciso lembrar que estas são apenas representações simplificadas da realidade, o que implica em uma série de limitações, que precisam ser bem conhecidas por todos os envolvidos na simulação. Desta forma, espera-se conseguir uma confiabilidade maior nos resultados, e também uma visão clara para todos envolvidos do tipo de resultados que a ferramenta pode oferecer e suas limitações.

5.5.2. Testes iniciais para validação da calibração do modelo do navio e rebocadores

Os resultados de calibração do conjunto motor-propulsor do modelo do navio em relação às graduações de potência de um telégrafo padrão devem ser

apresentados aos práticos, para que eles avaliem as questões de velocidades a serem empreendidas na área de manobra. Após esta avaliação, o refinamento da calibração em modelo físico, antes do início das simulações, é muito importante para garantir maior confiabilidade nos resultados, pois deve ser lembrado que as curvas de velocidade utilizadas para aferição das graduações de potências são obtidas em condições de águas profundas, ou seja, sem influência de fundo ou confinamentos laterais. Na região de manobra na zona portuária a condição pode ser bem diferente, e é preciso que os práticos, pilotos, operadores portuários e demais autoridades, que tenham experiência no local, e com o tipo de embarcação a ser utilizado na manobra, verifiquem se a questão do comportamento do navio em águas rasas é próxima ao esperado.

Como não há uma teoria que permita determinar quantitativamente o efeito de escala sobre a embarcação para a condição de água rasa, considera-se que o resultado do modelo físico (com redução de escala apropriada) seja a melhor aproximação para o fenômeno. Mesmo assim, por meio de inspeção visual, o pessoal técnico de operação consegue auxiliar no refinamento desta calibração, pois discrepâncias no comportamento da embarcação são percebidas em condições de manobra habituais. Daí a importância dos testes iniciais, onde os práticos vão simular manobras com o modelo do navio sob condições ambientais conhecidas.

Analogamente, os resultados das calibrações de rebocadores e das simulações de prova de mar devem também ser apresentados aos práticos, pois os testes iniciais para simulação de manobra em condições conhecidas permitem avaliar com boa sensibilidade não apenas o comportamento do conjunto motor-propulsor, mas também a atuação do leme e dos rebocadores.

Em especial sobre o item da prova de mar, é preciso explicar aos participantes que tipos de ajustes foram feitos no modelo do navio para tentar mitigar os efeitos de escala e permitir maior conformidade com os dados de campo, conforme explicado no item 5.3.

5.5.3. Simulações de ambientação

As simulações de ambientação têm como objetivos principais: integrar os práticos com a ferramenta SIAMA e também com as equipes de apoio à manobra do laboratório.

Mesmo práticos experientes precisam realizar algumas simulações preliminares para acostumar-se com o SIAMA, especialmente devido ao fator tempo de resposta. Como explicado no item 2.3.4, os modelos físicos que trabalham com a Semelhança de Froude têm fator de escala de tempo equivalente à raiz quadrada da escala geométrica, o que implica em uma “passagem de tempo” muito mais rápida em modelo do que na realidade.

Além disso, é preciso se habituar também nestas simulações de ambientação com o tipo de visualização “voo de pássaro”, que, embora se constitua em uma vantagem do ponto de vista de permitir uma visão global de todo ambiente de navegação, é completamente diferente da visão real que o prático tem do passadiço da embarcação.

A experiência do LHEPUSP tem mostrado que a adaptação dos práticos ao simulador é bastante rápida e, normalmente, é realizada no primeiro dia de atividades, em conjunto com os testes iniciais para calibração do modelo físico e navio.

Além disso, nestes testes de ambientação é preciso estabelecer certo entrosamento entre os práticos e a equipe de apoio do laboratório, responsável por operar o software de controle do SIAMA 2014. A forma como os comandos serão comunicados via rádio precisa ser acertada em linguagem clara e inequívoca, pois diferente do que ocorre em campo, em função do tempo “acelerado”, geralmente não há possibilidade de confirmar um comando ou solicitar a repetição do mesmo. Caso um comando seja mal interpretado, a possibilidade é muito grande de a manobra ter de ser abortada, pois praticamente não há tempo de correção.

5.6. Etapa 5 – Simulações de manobra com visão “voo de pássaro”

A Etapa 5 trata das simulações de manobra focadas no objetivo central dos trabalhos, em cumprimento a todos os cenários estabelecidos na campanha de ensaios definida na Etapa 0. Em outras palavras, no sistema proposto para avaliação de manobras em modelos físicos, trata-se da primeira etapa que vai fornecer resultados diretos para o estudo de interesse, sendo que as etapas anteriores podem ser entendidas como uma preparação para garantir o sucesso desta.

Conforme explicado nos capítulos anteriores, os simuladores físicos de manobras não tripulados, como o SIAMA 2014, podem executar os ensaios de duas maneiras bem distintas no que tange à participação do prático. Na primeira delas, este profissional comanda a manobra sobre o próprio modelo físico, em posição privilegiada, com visão global de todo cenário, denominada de visão “voo de pássaro”. Embora seja uma visão bem distinta daquela que será utilizada pelo prático em seu ambiente real de trabalho, após o treinamento de ambientação, esta maneira de simular a manobra confere ao prático inegável vantagem, com possibilidade de observações muito mais amplas referentes às condições de aproximação e ângulos de ataque ao berço, distâncias de segurança a obstáculos (como outros navios atracados ou o próprio terminal), entre outras. Portanto, no processo de investigação das melhores alternativas para executar as operações de manobra, sugere-se iniciar os ensaios em modelo físico com a visão de “voo de pássaro”, de modo a permitir análises mais rápidas da estratégia de ataque, assim como estabelecer as eventuais restrições ambientais.

A segunda maneira de realizar a manobra é com simulação da visão real do prático no passadiço do navio por meio das micro câmeras. Embora esta seja a melhor forma de simular em modelo físico a visão real do ambiente de manobra, é preciso relevar que as imagens fornecidas pela câmera, mesmo em alta resolução, não substituem a visão humana. Além disso, mesmo sendo possível ao prático movimentar as câmeras durante a manobra, como se

estivesse se movimentando sobre o passadiço, é preciso algum treinamento para se habituar ao sistema. Os motivos citados corroboram a sugestão de sempre iniciar as simulações de manobra pela visão “voo de pássaro”, deixando as simulações de visão real para os treinamentos finais em testes avançados, posteriores, portanto, à definição da melhor estratégia de ataque.

Para avaliação e comparação dos resultados das simulações de manobra, são propostos dois métodos baseados em abordagens distintas: uma qualitativa e outra quantitativa, que serão explicados nos itens a seguir.

5.6.1. Método para avaliação qualitativa dos resultados das simulações

Na avaliação qualitativa, o prático independentemente faz uma análise pessoal de alguns itens específicos, preenchendo um questionário¹. Para cada questão, ao finalizar uma simulação, baseado em sua experiência profissional, o prático deve atribuir uma classificação entre três opções possíveis: inviável (ruim), aceitável (razoável) ou adequado (bom).

As questões, identificadas por palavras-chave, são as seguintes:

- **REBOCADORES – Nº de comandos:** Em relação a uma manobra convencional, como você avalia o número de vezes que os rebocadores foram acionados? Trata-se de uma análise comparativa do número de vezes que os rebocadores foram acionados durante a simulação em relação a uma manobra considerada ideal. Sendo a pior avaliação no caso em que o número de comandos foi excessivo;
- **REBOCADORES – Potência:** Em relação a uma manobra convencional, como você avalia a potência solicitada aos rebocadores? A classificação deve ser considerada como “ruim” se durante muitas

¹ O questionário foi formulado com itens considerados fundamentais para avaliação de manobras, e foi concebido a partir das sugestões dos próprios práticos, além de operadores e autoridades portuárias.

vezes, ou em intervalos longos, as solicitações de rebocadores foram com potência elevada (toda força, por exemplo);

- **MÁQUINA – Atuação:** Em relação a uma manobra convencional, como você avalia o grau de atuação do propulsor do navio? Caso a máquina do navio tenha sido acionada muitas vezes e com potência elevada durante a simulação, a classificação deve ser considerada como “ruim”. Também deve ser avaliado o número de partidas, pois o número de acionamentos depende da reserva de ar comprimido de que o sistema do navio dispõe;
- **TRAJETÓRIA:** Durante a simulação, como você avalia o nível de dificuldade na manutenção da trajetória predefinida para execução da manobra? Caso tenha ocorrido muita dificuldade ou mesmo a impossibilidade de manter a trajetória pré-estabelecida, deve ser atribuída a classificação “inviável”;
- **POSIÇÃO:** Qual foi o nível de dificuldade em alcançar o posicionamento planejado para o navio já nas proximidades do berço de atracação? Caso tenha ocorrido grande dificuldade ou impossibilidade a avaliação deve ser “inviável”;
- **FOLGA:** Durante a manobra foi possível manter uma distância segura para outra embarcação que estava atracada em berço próximo? Outros obstáculos que sejam de interesse também podem ser avaliados neste quesito, e evidentemente se em algum momento houve dificuldade ou impossibilidade de manter uma distância considerada como segura, a classificação deve ser “inviável”;
- **CONTROLE:** Em uma avaliação global da manobra, as condições ambientais permitiram manter o controle da embarcação em todo traçado para o conjunto de rebocadores escolhido?

- **SEGURANÇA:** Do ponto de vista da segurança operacional, qual sua avaliação geral desta manobra?

Os dois primeiros itens do questionário, que se referem aos rebocadores, têm como objetivo permitir uma avaliação do nível de dificuldade da atuação destas embarcações de apoio e consumo de combustível das mesmas. De modo similar, a questão sobre MÁQUINA refere-se ao conjunto motor-propulsor e sua atuação durante a manobra. As questões sobre TRAJETÓRIA e POSIÇÃO têm como finalidade verificar se o percurso predeterminado para a manobra teve resultado dentro do esperado. A questão sobre FOLGA trata de entender a visão dos práticos em relação à facilidade de executar a manobra tendo em vista obstáculos naturais ou artificiais que façam parte do percurso. As duas últimas questões têm o objetivo de perceber uma visão geral do prático sobre dois aspectos fundamentais da manobra, que são a facilidade de CONTROLE da embarcação durante todo percurso e o nível de SEGURANÇA de toda a operação.

As questões podem ser alteradas ou outras questões podem ser acrescentadas, de acordo com os interesses dos práticos ou demais envolvidos nas simulações.

Para sistematizar a análise dos resultados foi estabelecido um critério de cálculo que permite estabelecer uma nota de conceito para cada item do questionário e um conceito geral para a manobra, utilizando avaliação qualitativa dos práticos. O critério pode ser descrito da seguinte forma:

- Atribuem-se notas para cada uma das opções: 0 (zero) para inviável, 5 (cinco) para aceitável e 10 (dez) para adequado;
- Dentro de um mesmo cenário de ensaio, para cada item do questionário, estabelece-se uma média aritmética das notas resultantes da avaliação de diferentes práticos. Quando cinco ou mais práticos repetirem a mesma simulação, recomenda-se a eliminação da maior e da menor nota para o quesito antes do cálculo da média. Para quatro práticos, recomenda-se a exclusão da maior nota, de forma que a avaliação fique

a favor da segurança. No caso de três ou menos práticos executarem um dado cenário, não se recomenda nenhum tipo de descarte, mas a análise qualitativa pode ficar tendenciosa, perdendo a característica comparativa, que procura avaliar um item sob o ponto de vista de diversos profissionais. Assim, é possível estabelecer uma nota de conceito médio para cada item do questionário;

- Para cada item do questionário deve ser atribuído um “peso”, que pode variar de acordo com os interesses gerais do trabalho, mas que deve sempre refletir a importância considerada para aquele item em relação aos outros. Quanto maior a importância, maior o valor do “peso” atribuído ao item. Recomenda-se sempre que o item referente à SEGURANÇA tenha peso maior;
- Ao final calcula-se uma nota de conceito geral para a manobra, que é uma média ponderada dos conceitos médios de cada item do questionário considerando-se seus respectivos “pesos”. Neste cálculo, recomenda-se que caso o item referente à SEGURANÇA tenha um conceito médio abaixo de 5,0 (cinco), que a nota atribuída ao conceito geral da manobra seja igual ao conceito médio da SEGURANÇA.

As notas de cada quesito podem ser avaliadas individualmente na etapa 7, a fim de discutir possíveis medidas de melhorias em caso de notas baixas. A nota de conceito geral também é um importante indicador sobre o cenário estudado. Por exemplo, se esta nota fica entre 0 e 5, indica que sérios problemas foram encontrados durante a operação, sendo recomendada uma reavaliação da abordagem ou estabelecimento de restrições.

5.6.2. Método para avaliação quantitativa dos resultados das simulações

A avaliação quantitativa dos resultados independe da opinião dos práticos ou de qualquer outro participante. Trata-se de um levantamento estatístico dos

dados fundamentais armazenados pelo sistema computacional do SIAMA 2014 durante uma dada manobra.

Como no SIAMA 2014, todos os comandos solicitados pelos práticos são armazenados em um banco de dados, em conjunto com a posição da embarcação em cada instante de tempo, é possível estabelecer critérios estatísticos sobre a manobra.

O método proposto para avaliação considera dois parâmetros fundamentais:

- Porcentagem do tempo em que um dado comando esteve ligado;
- Número de vezes que um dado comando foi acionado.

Estes parâmetros são extraídos do banco de dados para os seguintes comandos:

- Situação do motor do navio (MÁQUINA):
 - DESLIGADO
 - VANTE - MUITO DEVAGAR
 - VANTE - DEVAGAR
 - VANTE - MEIA FORÇA
 - VANTE - TODA FORÇA
 - RÉ - MUITO DEVAGAR
 - RÉ - DEVAGAR
 - RÉ - MEIA FORÇA
 - RÉ - TODA FORÇA

➤ Ângulo de leme (LEME):

- BOMBORDO 35°
- BOMBORDO 30°
- BOMBORDO 20°
- BOMBORDO 10°
- LEME A MEIO
- BORESTE 10°
- BORESTE 20°
- BORESTE 30°
- BORESTE 35°

➤ Atuação dos rebocadores (REBOCADOR “n”):

- DESLIGADO
- MUITO DEVAGAR
- DEVAGAR
- MEIA FORÇA
- TODA FORÇA
- FORÇA MÁXIMA

À lista supracitada ainda pode ser acrescido o comando de angulação dos rebocadores, quando for acordado que poderá haver alteração no ângulo de atuação dos rebocadores durante o ensaio.

As estatísticas de média, máximo e mínimo de cada parâmetro são calculadas a partir dos resultados obtidos para simulações executadas por diferentes práticos para um mesmo cenário. Isto permite uma comparação quantitativa entre as simulações de manobra.

Ao final, as avaliações quantitativas e qualitativas podem ser analisadas de maneira integrada, possibilitando conclusões mais completas sobre os resultados finais do estudo.

5.7. Etapa 6 – Testes avançados com simulação de visão real e outras condições adversas

Definido o plano geral de manobra para cada cenário de estudo na Etapa 5, esta etapa tem como objetivo refinar a solução proposta utilizando outros recursos do SIAMA 2014 na análise.

Um primeiro recurso muito importante é o simulador de visão real, que nada mais é do que o conjunto de câmeras instaladas a bordo do modelo do navio e controladas remotamente pelo práctico durante a manobra, que lhe conferem uma visão semelhante ao passadiço da embarcação. Neste caso, a manobra passa a ser feita com o práctico em local no qual a visão geral do modelo físico pode ser impedida. Neste caso, a única referência visual passa a ser uma tela de alta resolução que reproduz as imagens das câmeras. Nesta sala um controle permite ao práctico movimentar qualquer uma das duas câmeras, como se estivesse se movimentando sobre o passadiço a procura o melhor ângulo de visão. Neste ambiente o práctico tenta repetir a mesma manobra executada na Etapa 5 em situação de “voo de pássaro”, de forma a corroborar os resultados e permitir o treinamento da manobra com maior nível de fidelidade.

Outro recurso importante é o controle de visibilidade. No SIAMA 2014 é possível realizar manobras em ambiente noturno, utilizando-se o simulador de visão real acoplado ao sistema de iluminação do navio, píeres, boias, balizas e faróis sinalizadores. Para isto, o galpão onde fica instalado o modelo deve ser todo fechado, e permitir o controle de luminosidade natural, de tal forma que na tela de alta resolução que orienta a manobra, o prático tenha apenas como referência a sinalização existente, que deve ser reproduzida de modo similar ao ambiente real, inclusive com mesmo esquema de cores e intermitência de iluminação (frequência com que boias, balizas e faróis lampejam), quando for o caso.

Além destes, outros recursos podem ser aplicados aos testes avançados de forma a verificar os limites de segurança da manobra, e para definição de plano de ação em situações de emergência. Por exemplo, condições ambientais extremas podem ser simuladas para verificar as dificuldades em controlar o navio, ou ainda simulações de falhas no motor, leme e até mesmo perda de rebocadores durante uma manobra convencional.

Os critérios para avaliação destes cenários são similares àqueles apresentados na Etapa 5, utilizando-se também a abordagem qualitativa, por meio dos questionários, e quantitativa, a partir dos registros do banco de dados do SIAMA 2014.

5.8. Etapa 7 – Análise final dos resultados das simulações de manobra

Esta última etapa consiste em uma reunião de fechamento dos trabalhos, que deve preferencialmente contar com a participação de todos os envolvidos nas simulações: práticos, pilotos, mestres rebocadores, operadores portuários, autoridades marítimas e portuárias e corpo técnico do laboratório. Normalmente é realizada no último dia da programação para a campanha de ensaios após o término de todas as simulações previstas.

Os principais objetivos desta reunião são:

- Discutir os resultados obtidos para todos os cenários simulados, avaliando-se as dificuldades encontradas, estabelecendo-se eventuais restrições ambientais para execuções das manobras, como janelas de maré, alturas de ondas, entre outras. Para estudos preliminares ou que ainda vão contar com novas etapas de avaliação, é importante definir as premissas para as próximas etapas, com as sugestões de novos cenários a serem estudados;
- Avaliar as dificuldades encontradas na operação do simulador e possíveis melhorias a serem implementadas. A ideia central é que o SIAMA 2014 seja uma ferramenta em constante evolução, de tal forma a proporcionar um ambiente de simulação mais próximo possível daquele encontrado pelos práticos em seu dia-a-dia, considerando-se, evidentemente, as limitações intrínsecas ao tipo de simulador. Esta avaliação final é fundamental para que novas ideias sejam expostas pelos especialistas em manobras, permitindo ao corpo técnico do laboratório que verifique a possibilidade de representação no modelo físico.

Além desta reunião, é enviado posteriormente a todos os envolvidos um relatório completo dos ensaios de manobras contendo os principais resultados registrados pelo SIAMA 2014, um resumo das avaliações qualitativas dos práticos e as filmagens de todas as simulações realizadas. Este relatório elaborado pela equipe técnica do laboratório permite aprofundar as discussões sobre as condições de manobrabilidade dos cenários estudados, auxiliando nas tomadas de decisões ou mesmo nas programações de novas campanhas de testes.

6. ESTUDO DE CASO – APLICAÇÃO DO SIAMA 2014 EM SIMULAÇÕES DE MANOBRA NA BAÍA DE SÃO MARCOS

Este capítulo apresenta, como exemplo da aplicação do SIAMA 2014 em um estudo de caso real, os resultados de simulações de manobra de navios no modelo físico da Baía de São Marcos, em operação no LHEPUSP.

Os ensaios foram realizados com a participação de cinco práticos de São Luís do Maranhão, que comandaram as simulações de manobras, contando ainda com a presença de autoridades e operadores portuários que acompanharam todos os trabalhos. Ao todo foram realizadas mais de 40 simulações de manobras (além de diversos testes para calibração e ambientação) durante três dias, no período de 17/11/2014 a 19/11/2014.

No item 6.1 será apresentada uma breve descrição do modelo físico da Baía de São Marcos no qual foram realizadas as simulações, e nos itens seguintes serão apresentadas as etapas desenvolvidas durante o estudo de caso, seguindo-se o sistema proposto no capítulo 5.

6.1. Modelo físico tridimensional da Baía de São Marcos

A Baía de São Marcos é a maior da costa Norte do Brasil, sendo delimitada a oeste pelo continente, a leste pela ilha do Maranhão (ou de São Luís) e ao sul pela foz do Rio Mearim, conforme ilustrado no mapa da Figura 6.1. Na ilha do Maranhão está situada a cidade de São Luís, capital do Estado do Maranhão.

Figura 6.1 – Localização da baía de São Marcos. Fonte: Google.

A Baía de São Marcos possui grande potencial para instalação portuária, pois dispõe de áreas com boas profundidades e naturalmente abrigadas da ação de ondas. Por este motivo, estão agrupados neste local vários importantes portos brasileiros, dentre os quais se destacam:

- Terminal Ponta da Madeira: porto privado operado pela VALE, especializado em exportação de minério de ferro;
- Porto de Itaqui: porto público (organizado) administrado pela Empresa Maranhense de Administração Portuária – EMAP, que opera com movimentação de grãos, combustíveis, celulose, contêineres, fertilizantes, entre outras cargas;
- Terminal do Consórcio Alumínio do Maranhão – ALUMAR: terminal privado cuja principal carga movimentada é a bauxita, além da *commodity* alumina. Neste terminal também são movimentados carvão, coque e óleo combustível em menor escala.

Embora se trate de uma região com enorme potencialidade para instalação de portos, a Baía de São Marcos apresenta uma condicionante natural que impõe grande dificuldade para a navegação e amarração de navios nos berços de atracação, que são as grandes amplitudes de maré registradas nesta região. As amplitudes mais frequentes são próximas de 4,5 m, mas podem atingir até mesmo valores próximos a 7,0 m nas sizígias equinociais. Esta grande variação ao longo do dia nos níveis d'água dentro da baía resultam em correntes com velocidades muito intensas, ora vazando, ora enchendo, dificultando tanto as manobras de navios, quanto a manutenção dos navios amarrados durante as operações de carregamento ou descarregamento.

Além disso, em função das intensas correntes que se formam na baía, ocorre também grande movimentação de material de fundo, que é basicamente constituído de areia, formando um fenômeno conhecido como ondas de areia. Nos locais onde este fenômeno é mais intenso, as alturas das ondas de areia podem chegar a valores da ordem de 10 m, gerando, portanto, grandes variações de profundidades que, evidentemente, são problemáticas para a navegação, ou mesmo para a instalação de berços.

Diante da intensidade e complexidade dos fenômenos naturais que se formam na região, e em função do Terminal Ponta da Madeira se tratar do mais importante polo exportador de minério de ferro do Brasil, a antiga empresa pública Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), atualmente de capital privado e denominada VALE, contratou o LHEPUSP em 1977 para iniciar os primeiros estudos em modelo físico tridimensional deste porto. O objetivo inicial destes estudos era a avaliação de obras de abrigo para garantir maiores janelas de carregamento para os navios graneleiros, e posteriormente, a determinação de esforços sobre os cabos de amarração de navios atracados nos berços. Com a evolução da tecnologia, em 1993 foram iniciados também os estudos de manobras de navios rádio controlados utilizando o mesmo modelo físico.

No ano de 2011, a VALE contratou o LHEPUSP para a construção de um novo modelo físico da Baía de São Marcos na região próxima ao Terminal Ponta da Madeira abrangendo desde a região ao norte da Ilha do Medo até o sul do

Porto de Itaqui. Os limites deste novo modelo físico estão representados sobre a Carta Náutica nº 413 da Marinha do Brasil ilustrada na Figura 6.2, e abrange, em sua extremidade norte, desde o canal de acesso próximo à Ilha do Medo e Canal do Boqueirão, até os berços do Porto de Itaqui em sua extremidade sul. O novo modelo foi construído como parte dos estudos para expansão do terminal portuário, visando a implantação de novos píeres, bem como para simulação de manobras, daí sua grande largura, representando parte dos fundeadouros e áreas de giro, determinados entre as boias 23, 25, 28, CO, CN1, CN2, ITAQUI 1 E ITAQUI 3.

Figura 6.2 – Carta Náutica nº 413 e limites do modelo físico da Baía de São Marcos construído e operado pelo LHEPUSP.

O modelo físico foi construído na escala geométrica linear não distorcida de 1:170, obedecendo aos critérios de semelhança de Froude, e foi reproduzido com fundo fixo. A Foto 6.1 mostra uma vista geral do modelo, que ocupa uma área de aproximadamente 1.700 m² no LHEPUSP.

Foto 6.1 – Vista geral pelo extremo norte do modelo físico da Baía de São Marcos.
Fonte: Acervo do LHEPUSP.

O modelo possui dois sistemas de alimentação independentes, um no extremo norte para representação da maré enchente (Foto 6.2), e outra no extremo sul, para representação da maré vazante. A maré é representada em sistema quase estático, ou seja, em condições de escoamento permanente de tal forma a reproduzir as condições críticas de corrente para um dado instante de maré.

Foto 6.2 – Sistema de alimentação da vazão de enchente do modelo físico da Baía de São Marcos (A), com detalhe para o sistema deprimogêneo de medição de vazão (B).
Fonte: Acervo pessoal.

Nos dois sistemas de restituição (de enchente e de vazante), comportas planas controlam os níveis d'água na área de reprodução. O modelo opera em um circuito fechado, composto de um grande reservatório enterrado que recebe as águas do sistema de restituição. Por meio de um sistema elevatório, a água é bombeada do reservatório enterrado para um reservatório elevado, que por sua vez alimenta o modelo por gravidade. O sistema possui capacidade instalada para gerar vazões de até 800 L/s, sendo sua faixa normal de operação entre 600 L/s e 700 L/s.

Além disso, vale destacar que o modelo físico foi construído em conformidade com os critérios já comentados no item 5.2, para permitir uma adequada calibração das condições hidráulicas.

Os principais estudos desenvolvidos neste modelo físico são:

- Avaliação dos movimentos e forças sobre os cabos de amarração de navios atracados e nas defensas dos píeres em estudo, visando verificar com a modelação da elasticidade dos cabos e defensas, as condições de limites operacionais e de segurança, em função dos cenários mais adversos;

- Estudo de obras de abrigo, inclusive avaliação da estabilidade do enrocamento de maciços, e modificações nas estruturas dos berços de atracação, visando a criação de cenários mais favoráveis para as condições de amarração dos navios;
- Estudo de manobras de navios radio controlados para diversas condições de maré em sistema quase estático;
- Estudo das tendências do transporte de sedimentos de fundo e em suspensão.

A partir do estudo de semelhança, a escala de 1:170 foi adotada de tal forma a:

- Garantir a adequada reprodução dos fenômenos hidráulicos de interesse e permitir as medições preconizadas em seus objetivos, minimizando a influência de forças viscosas e de tensão superficial na área de estudo;
- Reproduzir uma área suficientemente grande para permitir a adequada representação das condições de escoamento, visando não somente os ensaios de esforços nos cabos de navios atracados, mas também os ensaios de manobras com navios rádio controlados, incluindo navegação em canal de acesso e áreas de giro na bacia portuária;
- Atender às limitações físicas de espaço do laboratório e infraestrutura disponíveis, especialmente no que tange a capacidade de vazão.

6.2. Definição dos objetivos e da campanha de simulações de manobra

A campanha de ensaios de manobras no modelo físico, de que trata este estudo de caso, foi definida a partir de reuniões realizadas entre práticos, operadores e autoridades portuárias, onde foram definidos os objetivos prioritários das simulações. Depois disto, o LHEPUSP foi consultado a respeito das possibilidades de atendimento a estas demandas com a utilização do

modelo físico da Baía de São Marcos e do SIAMA 2014. A partir daí, o LHEPUSP predefiniu uma programação de ensaios, que, em uma segunda reunião com a participação de todos os envolvidos, foi avaliada e validada.

O objetivo básico da campanha era realizar investigações preliminares acerca das condições de manobrabilidade do novo berço do Píer IV, chamado de Berço Norte, que está em fase de construção, a fim de identificar eventuais restrições operacionais para o maior navio para o qual o berço foi dimensionado, o Valemax.

O Valemax é um navio mineraleiro do tipo VLOC (*Very Large Ore Carrier*) com capacidade de 400.000 tpb, boca de 65 m, comprimento total de 362 m e calado máximo de 23,0 m (Figura 6.3). Os dados gerais de um navio da classe Valemax são apresentados no anexo I.

Figura 6.3 – Ilustração do navio Vale Minas Gerais (classe Valemax). Fonte: www.vale.com.

Para as simulações de manobras foi escolhido sempre utilizar um número máximo de quatro rebocadores, iniciando-se os testes com todos rebocadores de tração estática (*bollard pull*) de 55 tf, que representam os rebocadores de menor potência disponíveis na Baía de São Marcos, conforme ilustrado no quadro da Figura 6.4. Caso a potência dos rebocadores não fosse suficiente para permitir uma manobra segura ou eficiente, sob determinadas condições

ambientais, os rebocadores poderiam ser substituídos por outros com *bollard pull* de 75 tf, também disponíveis no local.

<div> <div> CONSÓRCIO DE REBOCADORES DA BAIÁ DE SÃO MARCOS Rua Perdizes, nº 4, Qd. 36, Sala 406 - Ed. Console Renascença II - CEP 65075-340 - São Luís/MA Telefax: (98) 3213-9400 </div> </div>							
GENERAL TUG CHARACTERISTICS							
TUG NAME	MOTOR HP	LOA (m)	BEAM (m)	DRAFT (m)	GRT (mt)	NRT (mt)	BOLLARD PULL
SOSSEGO	2X 3070 GE 12V228	30,05	11,60	3,70	448	134	78,76
ALEGRIA	2X 3151 CAT 3516	32	11,60	3,80	482	134	76,34
PRAIA MOLE	2X 3151 CAT 3516	32	11,60	3,80	482	144	75,05
FAZENDAO	2 X 3151 CAT 3516	32	11,60	3,80	482	144	75,01
CORONA	2X 2816 CAT 3516	24,47	10,70	3,50	250	75	73,02
SATURNO	2X 2816 CAT 3516	24,47	10,70	3,50	250	75	72,91
CAUE	2X 2200 CAT 3516	23,18	10,25	2,90	292	87	55,93
MASCARENHAS	2X 2250 MAK9M20C	28,47	9,80	4,10	357	107	54,4
SAO LUIS	2X 2250 MAK9M20C	30,90	9,80	4,10	357	107	54

Updated: 04/01/2012

Figura 6.4 – Lista de rebocadores disponíveis na Baía de São Marcos. Fonte: Consórcio de Rebocadores da Baía de São Marcos.

As simulações de manobra foram realizadas por cinco práticos que atuam na Baía de São Marcos, sendo que um deles possuía experiência na utilização do

SIAMA 1993 e os outros quatro nunca haviam realizado simulações em modelos físicos. Foram previstos três dias de trabalhos no laboratório.

Por este motivo, foi sugerido que o primeiro dia de ensaios, além da verificação e refinamento da calibração de motor, leme e rebocadores, fosse destinado a ambientação, ou seja, testes preliminares para que o prático se habituassem com a simulação em modelo físico, especialmente por conta do fator de escala de tempo. Nestas simulações de ambientação, são propostos cenários de manobra em condições que os práticos estão acostumados a operar no porto. Assim, foi escolhido o Berço Sul do próprio Píer IV, que já está em operação para navios da classe Valemax, para uma amplitude e instante de maré frequentes na região.

Já no segundo e terceiro dia foram realizadas as manobras de interesse no Berço Norte do Píer IV, para diferentes condições de maré.

Conforme comentado no item 6.1, os níveis de maré na Baía de São Marcos apresentam elevadas amplitudes. Em função disto, as velocidades das correntes marítimas possuem grandes magnitudes, sendo esta a principal forçante a dificultar a execução de manobras na região. Para as maiores amplitudes de maré, não é possível manobrar o navio em qualquer instante, existindo intervalos para os quais a manobra é segura, chamados de **janelas de maré**. As menores velocidades na região interior da baía ocorrem nos estofos de maré, tanto enchente quanto vazante, e próximos a estes instantes é que são definidas as janelas de maré. Evidentemente, quanto maiores forem as janelas disponíveis para operação, maior é a eficiência do porto, ou seja, menores são as restrições operacionais.

No caso do Terminal Ponta da Madeira, as janelas de maré para manobra segura obedeciam uma regra geral que vigorou de 1986 a 2007, que estabelecia que os navios deveriam operar para condições de marés com amplitudes de no máximo 5,0 m, somente no intervalo de tempo compreendido entre o estofo da baixa-mar até uma hora depois, e no intervalo de duas horas antes da preamar até o instante do estofo da preamar, conforme ilustrado na

Figura 6.5. Esta regra, aplicada a todos os berços de atracação, era considerada bastante restritiva, pois permitia manobras durante somente seis horas por dia, desde que a maré não excedesse a amplitude de 5,0 m.

Figura 6.5 – Janelas de maré para manobras no Terminal Ponta da Madeira segundo regra original que vigorou de 1986 a 2007. Fonte: Gerent (2010).

Por meio dos ensaios com o SIAMA 1993, foi possível estabelecer janelas de manobra muito mais amplas para alguns berços de atracação do Terminal Ponta da Madeira. Por exemplo, após diversas campanhas de ensaios com participação de diferentes práticos e de autoridades portuárias, as simulações em modelo físico permitiram que o Píer I ampliasse sua janela de maré diária para 16 horas por dia, conforme ilustrado na Figura 6.6.

Figura 6.6 – Ampliação na janela de maré para manobras no Píer I do Terminal Ponta da Madeira em virtude das simulações em modelo físico com uso do SIAMA 1993. Fonte: Gerent (2010).

No caso do Berço Norte do Píer IV, como se trata de um novo berço que ainda está em construção e, portanto, nunca foi operado, nesta primeira campanha de simulações de manobra, os práticos de São Luís, em acordo com as autoridades portuárias, optaram por realizar ensaios de atracação em instantes de maré mais conservadores, ou seja, dentro da janela de maré original, onde as velocidades das correntes são sabidamente menores. Esta abordagem permitiu definir as características gerais de operação do novo berço, bem como eventuais restrições de manobra para as maiores amplitudes de maré. A partir dos resultados destas simulações iniciais, futuras campanhas serão programadas para refinar os resultados, procurando-se ampliações nas janelas operacionais, analogamente ao que foi realizado em estudos passados para o Píer I.

Desta forma, para a presente campanha de ensaios do Berço Norte, foram estabelecidas as condições de amplitude de maré de 5,5 m e 6,0 m, ambas para o instante de 1 hora antes da preamar (60' APM).

Já o ensaio de ambientação foi realizado no Berço Sul do Píer IV, que já é operado com frequência pelos práticos, para uma condição de maré bem conhecida destes profissionais, que é a amplitude de 5,5 m e instante de 30 min depois da baixa-mar (30' DBM).

Os instantes de maré utilizados nos ensaios de manobra são ilustrados na Figura 6.7 e as condições ambientais ensaiadas são apresentadas na Tabela 6.1.

Figura 6.7 – Instantes de maré escolhidos para a manobra dos navios no Berço Norte do Píer IV.

Tabela 6.1 – Amplitudes e instantes de maré convencionados para campanha de ensaios do Berço Norte do Píer IV.

Amplitude de Maré (m)	Instante
5,5	30' DBM
5,5	60' APM
6,0	60' APM

Na Tabela 6.1 é possível observar que os instantes escolhidos estão próximos dos estofos da baixa-mar (BM) e da preamar (PM), onde as velocidades das correntes são menores. Embora estes instantes de maré estejam dentro dos intervalos estabelecidos na regra operacional original do Terminal Ponta da Madeira, as amplitudes de maré para simulação foram escolhidas em 0,5 m e 1,0 m acima de 5,0 m, que era utilizada como referência original para amplitude máxima. Este critério foi estabelecido para tentar estabelecer eventuais condições de restrição do novo berço de atracação, uma vez que o Berço Sul do Píer IV, que é adjacente a ele, opera hoje com restrição de maré de 5,5 m nesta mesma janela.

6.3. Calibração do modelo físico

A calibração do modelo físico da Baía de São Marcos não é tarefa simples, por diversos motivos. Em primeiro lugar, há de se destacar que as intensas correntes provocadas pelas grandes amplitudes de maré resultam em significativas mudanças periódicas na batimetria em diversos locais da baía. Como o fundo do modelo é fixo, é preciso escolher uma batimetria média, que represente um cenário global, e facilite a representação dos campos de velocidades para todas as condições de maré.

A partir das campanhas batimétricas de campo iniciadas em 2011 e concluídas em 2013, realizou-se uma análise para determinação de um padrão de conformação de fundo que poderia ser implantado no modelo físico. Com auxílio de modelagem digital do terreno, utilizando-se os dados de campo de cada uma das campanhas realizadas, foi possível identificar um padrão sazonal de conformação das superfícies de fundo, sendo possível assim estabelecer um padrão médio, que foi selecionado para representar o fundo fixo do modelo físico, conforme ilustrado na Figura 6.8 e na Figura 6.9.

Figura 6.8 – Batimetria selecionada para implantação no modelo físico da Baía de São Marcos. Fonte: FCTH (2015 a).

Figura 6.9 – Imagem digital tridimensional da batimetria implantada no modelo físico da Baía de São Marcos. Fonte: FCTH (2015 a)

Vale destacar que a simplificação na utilização de fundo fixo no modelo físico, adotando-se uma batimetria média da variação sazonal, não representa uma limitação importante para os principais tipos de estudo que são desenvolvidos neste ambiente, que são as avaliações de planos de amarração de navios atracados e ensaios de simulação de manobras. Isto porque, para estes dois tipos de ensaios, é fundamental a reprodução adequada dos campos de correntes críticos em cada instante de maré selecionado, e o fundo do modelo

deve somente representar em média as profundidades reais, de tal forma a permitir a aferição das velocidades do escoamento.

Conforme explicado no item 5.2, no modelo físico, os níveis d'água são inicialmente ajustados a partir de uma referência, que é imposta pelo controle de uma comporta basculante na seção de saída do fluxo. No caso do modelo físico da Baía de São Marcos, o ponto de referência para estabelecimento do nível d'água é o marégrafo localizado próximo ao Píer I. A partir da imposição deste nível para uma dada condição de maré, os demais pontos de verificação de nível d'água são medidos e comparados com os valores do modelo computacional, promovendo-se ajustes de calibração se necessário. A Tabela 6.2 apresenta os níveis d'água de referência do marégrafo do Píer I.

Tabela 6.2 – Níveis d'água de referência do marégrafo PI para imposição no modelo físico da Baía de São Marcos.

Amplitude de maré (m)	Instante de maré	Nível d'água Marégrafo PI (m)
5,5	30' DBM	0,60
5,5	60' APM	5,63
6,0	60' APM	5,85

Os dados de campos de corrente utilizados na calibração do modelo foram determinados a partir de uma extensa campanha de levantamentos de campo realizados durante o período de Outubro de 2011 a Maio de 2013, onde diversos pontos foram monitorados conforme ilustrado na Figura 6.10. Em alguns destes pontos, o equipamento de medição (ADP) ficou fundeado durante praticamente todo o período, e nos demais pontos foram realizadas campanhas periódicas.

Figura 6.10 – Saída do modelo computacional Mike 3® para condição de maré enchente, com destaque para os pontos de monitoramento de velocidades em campo, vetores de velocidades indicando as direções e intensidades do campo de correntes e limites do modelo físico. Fonte: FCTH (2015 a).

Além do modelo físico, os estudos do LHEPUSP na Baía de São Marcos incluem simulações em modelo computacional Mike 3® para outras finalidades, como estudos de sedimentação e dragagem na área do Terminal Ponta da Madeira. O modelo computacional foi calibrado com os dados de correntometria, de tal forma a reproduzir os campos de velocidade em qualquer ponto de sua grade, para qualquer amplitude e instante de maré. Como a grade do modelo computacional abrange uma área muito mais ampla, é possível definir a velocidade em qualquer ponto de interesse dentro da área de representação do modelo físico, para qualquer condição ambiental desejada. A

Figura 6.10 mostra como exemplo uma saída do modelo Mike 3® para condição de maré enchente na área do modelo físico.

Para as amplitudes e instantes de maré apresentados na Tabela 6.1 foram extraídos os campos de velocidades das simulações computacionais. A Figura 6.11 e a Figura 6.12 mostram exemplos de saídas do modelo computacional para estas simulações.

Figura 6.11 – Saída do modelo computacional Mike 3® – Campo de velocidades próximo ao Píer IV do Terminal Ponta da Madeira – Maré com amplitude de 5,5 m em 30 minutos após a baixa-mar.

Figura 6.12 – Saída do modelo computacional Mike 3® – Campo de velocidades próximo ao Píer IV do Terminal Ponta da Madeira – Maré com amplitude de 6,0 m em 1 hora antes da preamar.

Com relação aos dados de levantamento de campo que foram obtidos por meio de extensa campanha de campo (mais de um ano e meio), os resultados de velocidade em pontos homólogos no modelo computacional apresentaram excelente aderência (dentro da precisão preconizada para esta ferramenta) para todas as variações de maré monitoradas. Por este motivo, o modelo computacional foi considerado como validado, e, portanto, apto a ser utilizado como referência para calibração do modelo físico em qualquer ponto de sua grade e para qualquer amplitude ou instante de maré.

Das simulações do modelo computacional, foram extraídos os resultados de magnitude e direção de velocidade em pontos específicos, indicados na Figura 6.13, para comparação com os valores obtidos a partir de medições no modelo físico. Com base nesta avaliação, foram realizadas as devidas calibrações na corrente do modelo físico (por meio de variações na vazão de entrada, distribuição de fluxo na entrada e placas direcionadoras) até que os valores ficassem compatíveis dentro da faixa de erro estimada (Foto 6.3). É importante destacar que este procedimento trata-se de um mero refinamento da calibração geral do modelo físico para um dado instante de maré, uma vez que as condições gerais já se encontravam calibradas no modelo físico para os instantes de meia maré, após mais de quatro meses de trabalho de calibração para diversas amplitudes e estabelecimento de uma equação geral de controle de fluxo na entrada para os demais instantes.

Figura 6.13 – Pontos para verificação da calibração do modelo físico da Baía de São Marcos para ensaios de manobra no Pier IV. Fonte: FCTH (2015 a).

Foto 6.3 – Monitoramento das velocidades em modelo físico com uso de micromolinetes para calibração dos instantes de maré dos ensaios de manobra. Fonte: Acervo do LHEPUSP.

Os resultados finais após o refinamento da calibração são apresentados na Tabela 6.3, comparando-se os valores obtidos pelas medições em modelo físico com os resultados esperados (modelo computacional).

Tabela 6.3 – Comparação de magnitude e direção de velocidades nos modelos computacional e físico para amplitude de maré de 6,0 m.

Ponto	Amplitude de maré (m)	Instante de maré	Modelo Computacional		Modelo Físico	
			Velocidade (m/s)	Direção N (°)	Velocidade (m/s)	Direção N (°)
P19	5,5	30' DBM	1,5	21,8 ¹	1,4	18,4
	5,5	60' APM	1,5	212,2	1,4	202,7
	6,0	60' APM	1,8	212,6	1,6	193,7
PY1	5,5	30' DBM	1,1	6,0	1,0	5,9
	5,5	60' APM	1,6	190,1	1,4	182,9
	6,0	60' APM	1,9	190,3	1,7	187,0
PX4B	5,5	30' DBM	1,2	18,2	1,2	19,4
	5,5	60' APM	1,1	204,6	1,0	193,8
	6,0	60' APM	1,4	204,6	1,4	205,0
P4	5,5	30' DBM	1,2	5,5	1,0	8,6
	5,5	60' APM	1,5	182,2	1,4	183,0
	6,0	60' APM	1,8	182,3	1,6	189,6

Para o micromolinete, o erro estimado na escala do modelo físico é de $\pm 0,2\text{m/s}$ e para o medidor de direção, o erro estimado é de $\pm 5^\circ$. Considerando-se que o modelo computacional também possui erros associados aos valores apresentando que são da mesma ordem de grandeza, pode-se considerar que todas as medições em modelo físico corresponderam aos valores determinados em modelo computacional.

Os gráficos da Figura 6.14 a Figura 6.17 ilustram as comparações de magnitudes de velocidades entre os dois modelos.

¹ Embora o instante 30'DBM refira-se a condição de maré enchente no marégrafo do Píer I, em função das complexas condições de fluxo na Baía de São Marcos, as correntes ainda tem direção oposta (vazante) em muitos locais, inclusive nos pontos monitorados utilizados na calibração. Este resultado do modelo computacional foi validado pelos práticos que observam o mesmo fenômeno em campo.

Figura 6.14 – Comparação de velocidades entre modelo computacional e modelo físico para o ponto P19.

Figura 6.15 – Comparação de velocidades entre modelo computacional e modelo físico para o ponto PY1.

Figura 6.16 – Comparação de velocidades entre modelo computacional e modelo físico para o ponto PX4B.

Figura 6.17 – Comparação de velocidades entre modelo computacional e modelo físico para o ponto P4.

Desta forma, com base nos resultados acima apresentados, o modelo da Baía de São Marcos foi considerado calibrado para todas as amplitudes e instantes de maré utilizados nos ensaios de manobra.

Vale destacar que para esta campanha de simulação de manobras, por se tratar de uma investigação preliminar de um novo berço, não foi incluído nos ensaios o monitoramento das defensas, cujo projeto final ainda será enviado ao laboratório para calibração da curva tensão-deformação em etapas futuras de trabalho.

6.4. Calibração do modelo do navio

6.4.1. Geometria do navio e confecção do casco

A representação em escala do Navio graneleiro Valemax foi realizada a partir do plano de linhas (Figura 6.18). A Foto 6.4 ilustra etapas da fabricação do modelo reduzido do navio Valemax, e a Foto 6.5 mostra o modelo pronto.

Figura 6.18 – Plano de linhas do navio Valemax. Fonte: FCTH (2015 c).

Foto 6.4 – Fabricação do modelo reduzido do navio Valemax (escala 1:170). Fonte: Acervo do LHEPUSP.

Foto 6.5 – Modelo reduzido do Navio Valemax (escala 1:170) com instrumentação embarcada para ensaios de manobra. Fonte: Acervo pessoal.

O primeiro ajuste antes do início dos testes é o calado da embarcação, que deve corresponder à condição desejada de carregamento máximo, em lastro ou situações intermediárias, conforme o caso. Neste ponto vale observar que é importante que o material de confecção do casco, bem como as baterias e demais componentes eletrônicos embarcados, sejam os mais leves possíveis, de tal forma a garantir a representação adequada mesmo em condição de lastro mínimo da embarcação real. Para atingir o calado desejado são utilizados pesos adicionais padronizados, distribuídos cuidadosamente nos porões do modelo do navio.

Os píeres em estudo na Baía de São Marcos são abrigados naturalmente da ação de ondas. Por este motivo, na distribuição de pesos para estabelecimento calado dos modelos de navios é preciso preocupar-se apenas em manter o calado uniforme ao longo de todo o casco, ou seja, não há preocupações com

verificação do centro de gravidade ou momento de inércia preconizado para cada condição de carregamento, conforme explicado no 5.3.

6.4.2. Curva de potência do motor elétrico

Os navios da classe Valemax possuem velocidade de cruzeiro próxima a 15 nós (aproximadamente 7,7 m/s). Entretanto, na área de manobras da zona portuária da Baía de São Marcos (área de praticagem obrigatória), a velocidade da embarcação usualmente não ultrapassa 8 nós. Desta forma, o conjunto motor-propulsor do modelo reduzido do Valemax foi calibrado dentro de uma ampla faixa, de modo a permitir tanto as simulações de provas de mar, com velocidades mais altas, até as condições de manobra na bacia portuária com velocidades mais reduzidas.

Para determinação da curva de correlação entre a potência do motor elétrico do modelo do navio e sua velocidade foi utilizado no laboratório um canal de comprimento de 16 m, sendo aproveitado o trecho central de 10 m para estabelecimento de velocidade constante.

As curvas de potência do motor do navio dependem da condição de carregamento. Como para esta campanha de ensaios estão previstas apenas manobras de atracação, foi calibrada somente a condição do modelo da embarcação em lastro, pois neste porto os navios mineraleiros só realizam carregamento de minério e, portanto, entram no terminal sem carregamento nos porões.

Foram obtidas duas curvas de potência do motor, uma para movimento à vante e outra para movimento a ré. A curva do movimento a ré preocupa-se com uma faixa de velocidades menores, similares ao que ocorre com o navio real.

A Tabela 6.4 e a Figura 6.19 mostram os resultados do teste em canal para determinação da curva de correlação do movimento à vante, e a Tabela 6.5 e a Figura 6.20 do movimento à ré. Vale destacar que os valores de potência de

motor elétrico, em porcentagem, apresentados nestes resultados, são uma mera referência adotada pelo laboratório para restringir os limites máximo e mínimo de cada tipo de movimento, e são diferentes para vante e para ré.

Tabela 6.4 – Resultados dos ensaios para determinação da curva de correlação entre potência do motor elétrico e velocidade para o modelo reduzido do navio Valemax em lastro com movimento à vante.

Potência do Motor elétrico (%)	Movimento à vante	
	Velocidade (m/s)	Velocidade (nós)
30	3,1	6,0
40	3,9	7,5
50	4,3	8,3
60	5,1	9,9
70	5,8	11,2
80	6,2	12,1
90	6,8	13,2
100	7,8	15,2

Figura 6.19 – Curva de correlação entre potência do motor elétrico e velocidade para o modelo reduzido do navio Valemax em lastro com movimento à vante.

Tabela 6.5 – Resultados dos ensaios para determinação da curva de correlação entre potência do motor elétrico e velocidade para o modelo reduzido do navio Valemax em lastro com movimento à ré.

Potência do Motor elétrico (%)	Movimento à ré	
	Velocidade (m/s)	Velocidade (nós)
20,00	0,8	1,6
40,00	1,3	2,5
60,00	1,5	2,9
80,00	2,2	4,3

Figura 6.20 – Curva de correlação entre potência do motor elétrico e velocidade para o modelo reduzido do navio Valemax em lastro com movimento à ré.

6.4.3. Calibração das referências do telégrafo do motor do navio

Para que a comunicação entre os práticos e a equipe de apoio durante as simulações seja similar a uma operação real de manobra, os operadores portuários de São Luís forneceram uma relação de faixa de valores de

velocidade de navios da classe Valemax¹ associadas às referências padronizadas do telégrafo do motor, conforme apresentado na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Tabela de correspondência dos comandos do telégrafo com a velocidade para navios da classe Valemax em lastro.

Telégrafo do motor	Velocidade aproximada (nós)
Força máxima à vante (mar aberto)	16 a 17
Toda força à vante	10 a 12
Meia Força à vante	8,5 a 9,5
Devagar à vante	7,5 a 8,5
Muito devagar à vante	5 a 6
Máquina parada	0
Muito devagar à ré	-1,5 a -2,0
Devagar à ré	-2,0 a -2,5
Meia força à ré	-2,5 a -3,0
Toda força à ré	-4,0 a -4,5

A partir desta informação foi possível estabelecer curvas de calibração entre as referências do telégrafo e as potências do motor elétrico do modelo do navio Valemax, para movimentos à vante e à ré. Como se tratam de velocidades aproximadas que serão avaliadas posteriormente pelos práticos, antes do início das simulações de manobras, para eventual refinamento da calibração, optou-se por utilizar porcentagens de potência com dezenas inteiras como uma aproximação inicial, uma vez que nestas condições as velocidades obtidas ficaram dentro do intervalo estabelecido. Os resultados são apresentados na Tabela 6.7.

¹ De acordo com os operadores portuários existe uma variação nas velocidades entre os navios da classe Valemax para as referências do telégrafo, mas normalmente estão dentro da faixa apresentada na Tabela 6.6.

Tabela 6.7 – Curvas de calibração para as referências do telégrafo e potência do motor elétrico do modelo do navio.

REFERÊNCIA DO TELÉGRAFO	MOVIMENTO À VANTE		MOVIMENTO À RÉ	
	POTÊNCIA		POTÊNCIA	
	DO MOTOR	VELOCIDADE	DO MOTOR	VELOCIDADE
	(%)	(nós)	(%)	(nós)
TODA FORÇA	70	11,2	80	4,3
MEIA FORÇA	50	8,3	60	2,9
DEVAGAR	40	7,5	40	2,5
MUITO DEVAGAR	30	6,0	20	1,6

6.4.4. Testes de simulação das provas de mar

Para a simulação das provas de mar o LHEPUSP dispõe de um tanque com profundidade, extensão e largura suficientes para permitir que os modelos dos navios cumpram quase todos os tipos de testes requeridos (Foto 6.6). Além disso, é utilizado o sistema *ship tracking* para rastreamento da posição do navio durante estes ensaios de calibração, possibilitando que, ao final da simulação, faça-se uma comparação precisa dos resultados obtidos com aqueles esperados pelas provas de mar.

Foto 6.6 – Tanque de manobras. Fonte: Acervo do LHEPUSP.

Os testes do modelo reduzido do navio Valemax foram realizados com base no relatório DSME (2011), que contém os resultados de todas as provas de mar do navio Vale Rio de Janeiro (da classe Valemax). Para a verificação da calibração do modelo do navio foram utilizados os resultados das três principais provas de mar: curva de giro (*turning circle*), zig-zag e parada brusca.

No caso da simulação do teste *turning circle* foram utilizados como parâmetros de comparação: o avanço, a transferência lateral e o diâmetro tático. A Figura 6.21 e a Tabela 6.8 mostram os resultados das provas de mar. As trajetórias do modelo do navio durante o teste, extraídas do sistema *ship tracking*, podem ser vistas na Figura 6.22, em comparação com os dados reais da prova de mar. Já o erro associado aos parâmetros de comparação é apresentado na Tabela 6.9.

Figura 6.21 – Teste *turning circle* – navio Vale Rio de Janeiro (classe Valemax - 400.000 tpb). Toda velocidade à vante. Condição de carregamento em lastro ($T = 12$ m). $L_{pp} = 350$ m. Fonte: DSME (2011).

Tabela 6.8 – Teste *turning circle* – Navio Vale Rio de Janeiro (classe Valemax - 400.000 tpb). Toda velocidade à vante. Condição de carregamento em lastro (T = 12 m). Lpp = 350 m. Fonte: DSME (2011).

Dados	Bombordo	Boreste
Avanço (/Lpp) ¹	3,270	3,098
Transferência Lateral (/Lpp)	-0,678	0,538
Diâmetro Tático (/Lpp)	-2,714	2,502
Ângulo do leme (graus)	35,00	35,00
Velocidade inicial (nós)	15,63	15,80
Velocidade inicial (m/s)	8,04	8,13

Figura 6.22 – Trajetória do modelo do navio monitorada pelo sistema *ship tracking* em comparação com o resultado esperado na prova de mar para o teste *turning circle* do navio da classe Valemax.

Tabela 6.9 – Comparação dos resultados das simulações do teste *turning circle* entre modelo físico e a prova de mar para o navio da classe Valemax.

Parâmetros	Bombordo			Boreste		
	Modelo	Real	Desvio	Modelo	Real	Desvio
Velocidade inicial (nós)	16,1	15,6	3%	15,9	15,8	1%
Avanço (/Lpp)	3,69	3,27	13%	3,51	3,10	13%
Transferência Lateral (/Lpp)	-0,70	-0,68	3%	0,57	0,54	5%
Diâmetro Tático (/Lpp)	-2,92	-2,70	8%	2,67	2,50	7%

Vale destacar que os resultados no modelo físico do teste *turning circle* foram obtidos aplicando-se uma correção para área do leme, conforme

¹ Nesta tabela os valores de avanço, transferência lateral e diâmetro tático são apresentados na forma adimensional, ou seja, divididos pelo comprimento entre perpendiculares do navio (Lpp).

recomendação da The Society of Naval Architects of Japan (1966), pois, em função da não representação dos efeitos da viscosidade em modelos froudianos de escala reduzida, as forças produzidas pelo leme são relativamente maiores em comparação ao real. Por este motivo, esta bibliografia sugere reduções de até 30% (dependendo da escala de redução geométrica) na área relativa do leme do modelo do navio para reproduzir a mesma ação. No modelo reduzido do Valemax, a área do leme (em dimensões reais) foi dimensionada aproximadamente 10% menor do que aquela correspondente ao navio real (mantendo forma geométrica similar ao real).

Em relação aos resultados, foram considerados aceitáveis, com desvio padrão máximo em relação à prova de mar pouco acima de 10% para o avanço. Os demais parâmetros tiveram seu desvio abaixo deste limite.

Para o teste de zig-zag foram escolhidos ângulos de leme e curso de 20° e os parâmetros de comparação dos resultados de modelo com a prova de mar foram os primeiro e segundo *overshoot*, que é o ângulo de *yaw* excedente no curso da embarcação, após a mudança na direção do leme. Os resultados da prova de mar são apresentados na Figura 6.23 e na Tabela 6.10. A Figura 6.24 mostra os resultados do ensaio em modelo físico, lançados sobre a curva da prova de mar real, e a Tabela 6.11 apresenta a comparação dos parâmetros principais, com respectivo cálculo do desvio associado.

Figura 6.23 – Teste zig-zag 20°/20° – navio Vale Rio de Janeiro (classe Valemax - 400.000 tpb). Condição de carregamento em lastro (T = 12 m). Fonte: DSME (2011).

Tabela 6.10 – Teste zig-zag 20°/20° – Navio Vale Rio de Janeiro (classe Valemax - 400.000 tpb). Condição de carregamento em lastro (T = 12 m). Fonte: DSME (2011).

Descrição	Resultado
Velocidade inicial (nós)	15,68
Velocidade inicial (m/s)	8,07
1º overshoot (graus)	8,00
2º overshoot (graus)	8,60

Figura 6.24 – Comparação do teste zig-zag 20/20 entre modelo físico (linhas verdes) e prova de mar (linhas cinzas) para o navio da classe Valemax.

Tabela 6.11 – Comparação de resultados do teste de zig-zag 20/20 entre modelo físico e a prova de mar real para o navio da classe Valemax.

Parâmetros	Modelo	Real	Desvio
Velocidade inicial (nós)	14,7	15,7	6%
1º <i>Overshoot</i> (graus)	6,5	8,0	19%
2º <i>Overshoot</i> (graus)	8,0	8,6	7%

Embora o 1º *Overshoot* tenha ficado com desvio em relação à prova de mar de praticamente 20%, há de se considerar o erro associado à medição do grau de yaw da embarcação pelo sistema *ship tracking* que foi estimado da ordem de ± 1 grau. Considerando este erro associado à determinação do valor, pode-se dizer que ele caiu dentro da faixa considerada como aceitável para esta simulação, uma vez que estes tipos de guinadas não são esperadas nas águas rasas próximas ao porto.

No caso da parada brusca, por restrições na dimensão do tanque de teste, foram utilizados os resultados da prova de mar obtidos para a condição *half speed ahead*, que representa uma velocidade de partida menor do que a

máxima a frente e reversão total de máquina (*full astern*). Os valores de comparação foram a distância percorrida, o alcance frontal e a excursão lateral. Os resultados da prova de mar são apresentados na Figura 6.25, na Figura 6.26 e na Tabela 6.11. A Figura 6.27 mostra os resultados do ensaio em modelo físico, lançados juntamente com a curva da prova de mar real, e a Tabela 6.13 apresenta a comparação dos parâmetros principais, com respectivo cálculo do desvio associado.

Figura 6.25 – Teste de parada brusca (*half speed*) – navio Vale Rio de Janeiro (classe Valemax - 400.000 tpb). Condição de carregamento em lastro (T = 12 m). Fonte: DSME (2011).

Figura 6.26 – Trajetória da embarcação no teste de parada brusca (*half speed*) – navio Vale Rio de Janeiro (classe Valemax - 400.000 tpb). Condição de carregamento em lastro (T = 12 m). Fonte: DSME (2011).

Tabela 6.12 – Teste de parada brusca (*half speed*) – Navio Vale Rio de Janeiro (classe Valemax - 400.000 tpb). Condição de carregamento em lastro (T = 12 m). Fonte: DSME (2011).

Descrição	Resultado
Velocidade inicial (nós)	12,20
Velocidade inicial (m/s)	6,28
Distância percorrida (m)	2.880,1
Alcance Frontal (m)	2.869,9
Excursão Lateral (m)	174,6

Figura 6.27 – Comparação do teste de parada brusca entre modelo físico (pontos na cor azul) e prova de mar (linha vermelha) para o navio da classe Valemax.

Tabela 6.13 – Comparação de resultados do teste de parada brusca entre modelo físico e a prova de mar real para o navio da classe Valemax.

Parâmetros	Modelo	Real	Desvio
Velocidade inicial (m/s)	13,2	12,2	8%
Distância percorrida (m)	2.459,0	2.880,1	15%
Alcance Frontal (m)	2.431,0	2.869,9	15%
Alcance Lateral (m)	261,8	174,6	50%

A simulação da parada brusca foi aquela que apresentou as maiores discrepâncias em relação ao navio real. Credita-se grande parte do problema à diferença na atuação do propulsor do modelo em relação ao real. No modelo reduzido do navio, o motor elétrico DC ligado ao propulsor permite a parada e reversão do movimento com toda força a ré de modo praticamente instantâneo. Isto resulta em uma parada do modelo do navio em curtíssima distância, bem diferente do navio real. Para tentar simular este efeito, foram programadas no software de controle do motor DC rotinas para desaceleração e aceleração de rotação do motor no caso de um comando de parada de máquina ou reversão, seguindo os princípios básicos da máquina do navio real (curva de variação de RPM apresentada na prova de mar). Os resultados foram em muito melhorados, embora os desvios, especialmente na excursão lateral, ainda

tenham sido elevados. Entretanto, segundo a opinião dos próprios pilotos e práticos, a melhoria apresentada na distância percorrida e alcance frontal eram suficientes para as simulações que seriam feitas em condições de manobra próximas aos berços, onde as velocidades usuais do navio eram bem menores do que em prova de mar, e as diferenças encontradas não deveriam influenciar a análise dos resultados.

6.5. Calibração dos rebocadores

6.5.1. Curva de potência dos ventiladores

Para os ensaios no Berço Norte do Píer IV do Terminal Ponta da Madeira, foi escolhido pelos práticos o esquema padrão de quatro rebocadores em auxílio à manobra, representados no modelo físico por quatro mini ventiladores, posicionados dois na proa e dois na popa (Foto 4.5).

Conforme explicado no item 5.4, as curvas de correlação entre a “potência elétrica” do motor DC do ventilador e a tração equivalente de um rebocador são obtidas por meio de ensaios padronizados em bancada de laboratório. Os resultados destes ensaios são apresentados nos gráficos da Figura 6.28 à Figura 6.31 para os quatros ventiladores selecionados: A, B, D e F.

Figura 6.28 – Curva de correlação entre “potência elétrica” do motor do ventilador A e tração equivalente de um rebocador.

Figura 6.29 – Curva de correlação entre “potência elétrica” do motor do ventilador B e tração equivalente de um rebocador.

Figura 6.30 – Curva de correlação entre “potência elétrica” do motor do ventilador D e tração equivalente de um rebocador.

Figura 6.31 – Curva de correlação entre “potência elétrica” do motor do ventilador F e tração equivalente de um rebocador.

Como equação de correlação entre as grandezas acima discutidas, optou-se por um polinômio quadrático, que mostrou boa aderência aos dados obtidos nos testes de todos os ventiladores, permitindo, desta maneira, boa interpolação de resultados para qualquer valor necessário durante o processo de calibração.

6.5.2. Calibração dos ventiladores para semelhança com os rebocadores disponíveis

Conforme apresentado no item 6.2, na Baía de São Marcos, estão disponíveis para manobras rebocadores com tração estática (*bollard pull*) de aproximadamente 75 tf e 55 tf. Ao invés de calibrar todos os rebocadores disponíveis de acordo com seu valor exato de *bollard pull*, optou-se por disponibilizar para simulação apenas dois tipos, utilizando seus respectivos valores de referência (75 tf e 55 tf), até porque a diferença em relação ao valor exato não seria significativa em termos de alteração de resultados da simulação.

Para calibração dos ventiladores, de forma que eles tenham atuação durante as simulações semelhante aos rebocadores disponíveis, é preciso inicialmente estabelecer algum tipo de critério de “perda” de capacidade dos rebocadores em relação ao *bollard pull* para a condição de força máxima dos motores, conforme explicado no item 5.4. De modo preliminar, para permitir uma primeira calibração do sistema, os práticos de São Luís, em acordo com os operadores portuários, estabeleceram uma redução da ordem de 25% em relação ao *bollard pull* para a capacidade máxima dos rebocadores em condições de trabalho na Baía de São Marcos. Além disso, também como uma primeira aproximação, foram estabelecidos valores de referência para a redução (em relação ao *bollard pull*) para cada um dos comandos padronizados de potência de rebocadores, a saber: toda força, meia força, devagar e muito devagar. As sugestões iniciais dos práticos e operadores portuários para as referências padronizadas de potência dos rebocadores são apresentadas na Tabela 6.14.

Tabela 6.14 – Sugestões dos práticos e operadores portuários para as referências padronizadas de potência dos rebocadores da Baía de São Marcos em condição de manobra.

Referência	Refer.	Rebocador		Rebocador
			75 tf	55 tf
Telégrafo	Siama	Redução (%)	Tração (tf)	Tração (tf)
FORÇA MÁXIMA	5	25,0	56,3	41,3
TODA FORÇA	4	45,0	41,3	30,3
MEIA MÁQUINA	3	55,0	33,8	24,8
DEVAGAR	2	70,0	22,5	16,5
MUITO DEVAGAR	1	80,0	15,0	11,0
DESLIGADO	0	-	0,0	0,0

Com base nestas estimativas e nas curvas de correlação apresentadas no item 6.5.1, foi possível estabelecer uma calibração inicial para o conjunto de ventiladores, que passaram a representar os seguintes rebocadores da proa para a popa: Ventilador A - Rebocador 1, Ventilador B - Rebocador 2, Ventilador D - Rebocador 3 e Ventilador F - Rebocador 4. Os valores de calibração encontrados são apresentados na Tabela 6.15 e na Tabela 6.16.

Tabela 6.15 – Valores de calibração preliminar para ventiladores do modelo do navio Valemax, simulando rebocadores de 75 tf de *bollard pull*.

Referência	Ref.	Bollard pull	Reboc. 1	Reboc. 2	Reboc. 3	Reboc. 4
Telégrafo	SIAMA	75 tf	Ventil. A	Ventil. B	Ventil. D	Ventil. F
		Tração (tf)	Potência (%)	Potência (%)	Potência (%)	Potência (%)
FORÇA MÁXIMA ¹	5	56,3	54,7	51,9	54,0	56,6
TODA FORÇA	4	41,3	44,8	39,9	45,5	45,5
MEIA MÁQUINA	3	33,8	39,2	33,5	40,6	39,4
DEVAGAR	2	22,5	29,8	23,3	32,1	29,0
MUITO DEVAGAR	1	15,0	22,3	16,0	25,3	21,0
DESLIGADO	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

¹ A força máxima é uma condição limite de operação do rebocador que não é utilizada em situações normais de manobra, mas apenas uma reserva para caso de situação extrema.

Tabela 6.16 – Valores de calibração preliminar para ventiladores do modelo do navio Valemax, simulando rebocadores de 55 tf de *bollard pull*.

Referência	Ref.	Bollard pull	Reboc. 1	Reboc. 2	Reboc. 3	Reboc. 4
Telégrafo	SIAMA	55 tf	Ventil. A	Ventil. B	Ventil. D	Ventil. F
		Tração (tf)	Potência (%)	Potência (%)	Potência (%)	Potência (%)
FORÇA MÁXIMA	5	41,3	44,8	39,9	45,5	45,5
TODA FORÇA	4	30,3	36,5	30,4	38,1	36,3
MEIA MÁQUINA	3	24,8	31,8	25,4	34,0	31,2
DEVAGAR	2	16,5	23,9	17,5	26,8	22,7
MUITO DEVAGAR	1	11,0	17,6	12,0	20,9	16,3
DESLIGADO	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

6.6. Testes iniciais de verificação das calibrações do modelo e simulações de ambientação

A etapa de verificação das calibrações e testes de ambientação foi realizada no primeiro dos três dias de simulações de manobra. Os principais tópicos abordados nesta etapa serão descritos de modo breve nos itens a seguir.

6.6.1. Testes iniciais para validação da calibração do modelo físico

Os resultados dos estudos em modelo computacional com a caracterização dos campos de corrente para as amplitudes e instantes de maré a serem utilizados durante as simulações de manobras, ilustrados no item 6.3, foram encaminhados aos operadores portuários e práticos com aproximadamente três semanas de antecedência às datas programadas para os ensaios. Uma vez todas as partes tendo concordado que os cenários estavam bem representados, passou-se a uma campanha de verificação e refinamento de calibração do modelo físico para reproduzir adequadamente estas condições.

No primeiro dia de trabalhos, foram apresentados aos práticos os resultados destas campanhas de refinamento da calibração do modelo físico, como mostrado na Tabela 6.3. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios.

Por fim, para validar a calibração do modelo físico foram utilizados traçadores flutuantes (mini confetes de papel), de tal forma que os práticos pudessem acompanhar todas as trajetórias das correntes nos pontos de interesse. Nesta avaliação final, foi observado pelos práticos que para a amplitude 5,5 m e instante de maré de 30 min após a baixa-mar, a direção e intensidade das correntes estavam adequadas na região próxima ao terminal, mas não estavam bem reproduzidas no canal de acesso à bacia portuária. Esta observação está correta e o problema era conhecido. De fato, na Baía de São Marcos, quando o marégrafo do Píer I, que é utilizado como referência, indica a condição de 30 minutos após a baixa-mar, as correntes próximas aos berços de atracação ainda estão na direção norte, como se a maré estivesse vazando. Entretanto, no canal de acesso, as correntes já apontam para o sul. A região possui um complexo sistema de escoamento, e embora o problema seja conhecido, não pode ser reproduzido desta forma no modelo físico. Neste simulador, as correntes só podem ser reproduzidas e aferidas em uma direção (vazante ou enchente) de cada vez. Por conta disto, as correntes foram calibradas somente para a região próxima aos píeres, que são mais importantes para a avaliação final da manobra. Assim, ficou acordado que para o instante de 30 minutos após a baixa-mar, seria analisado somente o comportamento do navio na bacia portuária, sendo o trecho do canal de acesso desprezado para análise dos resultados.

A condição de amplitude 5,5 m e 30 minutos após a baixa-mar foi utilizada apenas no teste de ambientação, e, mesmo apresentado as limitações de representação supra referidas, atingiu seus objetivos, conforme será explicado no item 6.6.3.

Já para as demais condições, marés com amplitude de 5,5 m e 6,0 m em instantes de 1 hora antes da preamar, utilizadas nos ensaios para avaliação do

berço norte do Píer IV, as condições gerais de correntes em toda área de domínio do modelo físico foram aprovadas pelos práticos.

6.6.2. Testes iniciais para validação da calibração do modelo do navio do navio Valemax e rebocadores

Antes do início dos testes propriamente ditos, os resultados de calibração do conjunto motor-propulsor do modelo do navio em relação às graduações de potência de um telégrafo padrão (Tabela 6.7), bem como das simulações das provas de mar (Tabela 6.9, Tabela 6.11 e Tabela 6.13) e das curvas de calibração dos rebocadores (Tabela 6.15 e Tabela 6.16) foram apresentadas aos práticos para avaliação.

Referente aos testes em modelo físico de simulação da prova de mar foram informadas as alterações nas dimensões do leme utilizadas no modelo do navio para mitigar os efeitos de escala, bem como as programações feitas para aceleração e desaceleração de rotação do motor na mudança de potência, a fim de permitir maior proximidade em relação ao navio real, conforme explicado no item 6.4.4. Os práticos concordaram com a avaliação do laboratório de que os resultados do teste *turning circle* e zig-zag estavam adequados, e destacaram que no teste de parada brusca, o parâmetro que julgavam mais importante, que era a distância de parada, já havia apresentado resultados bem razoáveis, e que as discrepâncias encontradas na excursão lateral não representariam grande empecilho para a condução do presente estudo, pois a situação extrema representada pelo teste não seria utilizada durante as condições de manobra na zona portuária. Desta forma, o modelo do navio Valemax foi considerado calibrado para a condição de águas profundas.

A validação da calibração do conjunto motor-propulsor, leme e rebocadores para as condições de manobra em águas restritas (bacia portuária) foi realizada por meio de simulações conduzidas pelos práticos para cenários em que eles já trabalharam. O cenário escolhido foi o Berço Sul do Píer IV, manobra de atracação para amplitude de maré de 5,5 m e instante de 30

minutos após a baixa-mar, para o qual os práticos presentes no laboratório já tinham realizado pelo menos uma manobra real com um navio da classe Valemax.

Os testes iniciais para validação começaram com o práctico mais experiente da região e que, inclusive, já havia realizado diversas manobras no SIAMA 1993. Os demais práticos também testaram a mesma condição, mas somente após algumas simulações iniciais para ambientação com a ferramenta.

Após os testes iniciais, todos os práticos atestaram que o comportamento do navio sob as condições de manobra proposta estavam muito semelhantes ao real e concluíram que nenhum tipo de ajuste seria necessário em relação às calibrações preliminares. Desta forma, o modelo do navio e o conjunto de rebocadores tiveram sua calibração validada.

6.6.3. Simulações de ambientação

No modelo físico da Baía de São Marcos, que possui fator de escala geométrico de 1:170, o fator de escala de tempo é de 1:13,04, o que significa que todas as ações durante a manobra ocorrem aproximadamente 13 vezes mais rápido do que o real. Esta grande diferença no tempo faz com que os comandos sobre máquina, leme e rebocadores ocorram de maneira quase ininterrupta durante todo o tempo de manobra. Por este motivo, os práticos que nunca utilizaram este tipo de simulador precisam se habituar

Na ambientação realizada, a adaptação dos práticos que nunca haviam usado o SIAMA foi considerada muito rápida. Eles se habituaram ao fator de escala de tempo após duas ou três simulações no máximo, que foram realizadas em condições de maré brandas, apenas para familiarização com a ferramenta.

Além disso, todos passaram também pelos testes iniciais para a condição de maré de 5,5 m e 30' DBM, para verificação e ajustes do conjunto, conforme descrito no item 6.6.2. Todos estes ensaios foram realizados ao longo do

primeiro dia de trabalhos, no qual quase trinta simulações preliminares de manobras foram realizadas.

6.7. Simulações de manobra com visão geral do modelo

As simulações de manobra para estudos de atracação no Berço Norte do Píer IV do Terminal Ponta da Madeira, que ainda está em fase de construção, foram realizadas para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m, sempre no instante de 1 hora antes da preamar. Estas simulações foram realizadas durante o segundo e terceiro dia de trabalhos.

Como esta campanha de ensaios trata-se de uma investigação inicial acerca das condições de manobrabilidade de um novo berço, praticamente todas as manobras foram realizadas com os práticos sobre o modelo físico, em situação de visão “voo de pássaro”, ou seja, com visão global de toda área de manobra.

A primeira maré simulada foi a de amplitude 5,5 m, que é uma condição bem conhecida dos práticos para manobras nos demais berços do terminal portuário, inclusive o Berço Sul do Píer IV, que é adjacente ao novo berço.

Entretanto, vale destacar que mesmo sendo adjacente a um berço em operação no terminal, o Berço Norte tem condições de correntes bem distintas, tanto que sua linha de atracação foi projetada com ângulo diferente do Berço Sul.

Para cada uma das duas condições ambientais ensaiadas, cada práctico repetiu a simulação da manobra entre três e cinco vezes, a fim de testar diferentes formas de abordagem. Ao final, os próprios práticos escolheram entre suas manobras aquela considerada como mais representativa.

Para efeito de comparação dos resultados todos os práticos partiram com a manobra aproximadamente da mesma posição no canal de acesso ao terminal e fizeram o giro por bombordo para atracação do navio por boreste. A título de

exemplo, a Figura 6.32 ilustra uma das manobras realizadas, com destaque para o ponto de início da simulação e a representação da evolução do posicionamento da embarcação ao longo do ensaio.

Figura 6.32 – Ponto de partida para as simulações de manobra no canal de acesso próximo à Ilha do Medo. Destaque para a movimentação da embarcação durante a manobra de atracação por boreste no Berço Norte do Píer IV. Fonte: FCTH (2015 c).

6.7.1. Resultados dos ensaios com amplitude de maré de 5,5 m em 1 hora antes da preamar

Para a condição de amplitude de maré de 5,5 m, os práticos optaram por selecionar para auxílio à manobra quatro rebocadores com *bollard pull* de 55 tf, que são os menos potentes disponíveis na Baía de São Marcos, a fim de verificar a facilidade e segurança para execução da manobra. Os práticos também acertaram entre si utilizar um único esquema para os quatro rebocadores, sendo:

- Rebocadores 1 e 4 (extremos de proa e popa): sempre “PUXANDO” o navio por bombordo;
- Rebocadores 2 e 3 (internos de proa e popa): sempre “EMPURRANDO” o navio rumo ao berço de atracação.

Desta forma, não houve variação no ângulo de trabalho dos rebocadores.

Para todas as simulações realizadas foi utilizado na composição do cenário um modelo de navio da classe Valemax atracado no Berço Sul do Píer IV, que é adjacente ao berço estudado. Um navio atracado no berço adjacente foi utilizado por se tratar, possivelmente, da condição mais frequente que os práticos encontrarão em manobras reais, assim que o Berço Norte entrar em operação, e também para avaliar melhor as condições de segurança da manobra.

De todas as simulações realizadas pelos cinco práticos, são apresentados a seguir os resultados de apenas uma das manobras de cada prático (selecionada pelo próprio prático como a ideal¹), referidas como ensaios de 1 a 5.

As notas referentes às avaliações qualitativas dos práticos no preenchimento do questionário-padrão e as respectivas avaliações de resultados, conforme explicado no item 5.6.1, são apresentadas na Tabela 6.17.

Tabela 6.17 – Resumo das notas dos práticos aos itens do questionário padrão de manobra e cálculo do conceito geral da manobra – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.

QUESTÕES	ENSAIOS					Média	Peso	Ponderada
	1	2	3	4	5			
REBOCADORES – Nº de comandos	10	10	5	5	5	6,7	1,0	6,7
REBOCADORES – Potência	5	10	10	10	5	8,3	1,0	8,3
MÁQUINA – Atuação	10	10	10	10	10	10,0	1,0	10,0
TRAJETÓRIA	10	10	5	10	5	8,3	2,0	16,7
POSIÇÃO	10	5	5	5	5	5,0	2,0	10,0
FOLGA	10	10	10	10	5	10,0	2,0	20,0
CONTROLE	5	10	5	10	5	6,7	2,0	13,3
SEGURANÇA	5	10	10	10	5	8,3	3,0	25,0
CONCEITO GERAL								7,9

¹ Entende-se como ideal, a manobra que o prático considerou a mais bem-sucedida e que ele gostaria de utilizar como referência para repetição em treinamentos futuros.

Da Tabela 6.18 à Tabela 6.30 são apresentados os principais resultados registrados pelo SIAMA 2014, conforme explicado no item 5.6.2, comparando-se as manobras realizadas por diferentes práticos (ensaios 1 a 5).

Tabela 6.18 – Comparação entre os tempos de manobra e quantidade total de comandos utilizados durante a manobra – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.

ENSAIO	1	2	3	4	5	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
TOTAL DA MANOBRA (min)	67,2	36,5	62,2	87,2	114,3	73,5	114,3	36,5
Nº TOTAL DE COMANDOS	147	64	107	162	155	127	162	64

Tabela 6.19 – Porcentagem de tempo de atuação da MÁQUINA (conjunto motor-propulsor do navio) – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.

ENSAIO	1	2	3	4	5	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
DESLIGADO	28%	26%	18%	44%	40%	31%	44%	18%
VANTE - MUITO DEVAGAR	40%	36%	49%	37%	39%	40%	49%	36%
VANTE - DEVAGAR	12%	21%	18%	14%	3%	14%	21%	3%
VANTE - MEIA FORÇA	20%	7%	11%	4%	10%	10%	20%	4%
VANTE - TODA FORÇA	0%	10%	0%	0%	7%	3%	10%	0%
RÉ - MUITO DEVAGAR	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
RÉ - DEVAGAR	0%	0%	1%	1%	1%	1%	1%	0%
RÉ - MEIA FORÇA	0%	0%	2%	1%	0%	1%	2%	0%
RÉ - TODA FORÇA	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 6.20 – Quantidade de comandos para atuação da MÁQUINA (conjunto motor-propulsor do navio) – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.

ENSAIO	1	2	3	4	5	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
DESLIGADO	6	3	5	8	8	6	8	3
VANTE - MUITO DEVAGAR	9	5	9	11	7	8	11	5
VANTE - DEVAGAR	3	4	5	6	2	4	6	2
VANTE - MEIA FORÇA	3	2	1	1	3	2	3	1
VANTE - TODA FORÇA	0	1	0	0	2	1	2	0
RÉ - MUITO DEVAGAR	0	0	1	0	0	0	1	0
RÉ - DEVAGAR	0	0	1	1	1	1	1	0
RÉ - MEIA FORÇA	0	0	1	1	0	0	1	0
RÉ - TODA FORÇA	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 6.21 – Porcentagem de tempo de cada posição do LEME – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.

ENSAIO	1	2	3	4	5	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
BOMBORDO 35°	11%	21%	12%	15%	17%	15%	21%	11%
BOMBORDO 30°	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
BOMBORDO 20°	2%	1%	0%	0%	0%	1%	2%	0%
BOMBORDO 10°	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
TOTAL DE BOMBORDO	13%	22%	12%	15%	17%	16%	22%	12%
LEME A MEIO	72%	64%	53%	54%	48%	58%	72%	48%
BORESTE 10°	0%	2%	9%	1%	11%	5%	11%	0%
BORESTE 20°	1%	4%	13%	24%	9%	10%	24%	1%
BORESTE 30°	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
BORESTE 35°	13%	8%	12%	6%	16%	11%	16%	6%
TOTAL DE BORESTE	15%	14%	35%	30%	35%	26%	35%	14%

Tabela 6.22 – Quantidade de comandos de acionamento do LEME – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.

ENSAIO	1	2	3	4	5	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
BOMBORDO 35°	3	1	1	3	2	2	3	1
BOMBORDO 30°	1	0	0	0	1	0	1	0
BOMBORDO 20°	1	1	0	0	1	1	1	0
BOMBORDO 10°	0	1	0	2	2	1	2	0
TOTAL DE BOMBORDO	5	3	1	5	6	4	6	1
LEME A MEIO	8	5	7	7	9	7	9	5
BORESTE 10°	1	1	6	3	5	3	6	1
BORESTE 20°	2	1	4	3	5	3	5	1
BORESTE 30°	0	0	0	0	0	0	0	0
BORESTE 35°	4	2	2	2	3	3	4	2
TOTAL DE BORESTE	7	4	12	8	13	9	13	4

Tabela 6.23 – Porcentagem de tempo de atuação do REBOCADOR 1 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.

ENSAIO	1	2	3	4	5	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
DESLIGADO	100%	100%	88%	92%	95%	95%	100%	88%
MUITO DEVAGAR	0%	0%	0%	0%	1%	0%	1%	0%
DEVAGAR	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MEIA FORÇA	0%	0%	0%	2%	2%	1%	2%	0%
TODA FORÇA	0%	0%	11%	5%	2%	4%	11%	0%
FORÇA MÁXIMA	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 6.24 – Quantidade de comandos para atuação do REBOCADOR 1 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.

ENSAIO	1	2	3	4	5	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
DESLIGADO	0	0	2	3	4	2	4	0
MUITO DEVAGAR	0	0	2	4	5	2	5	0
DEVAGAR	0	0	2	4	4	2	4	0
MEIA FORÇA	0	0	2	3	3	2	3	0
TODA FORÇA	0	0	1	1	1	1	1	0
FORÇA MÁXIMA	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 6.25 – Porcentagem de tempo de atuação do REBOCADOR 2 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.

ENSAIO	1	2	3	4	5	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
DESLIGADO	57%	70%	56%	43%	63%	58%	70%	43%
MUITO DEVAGAR	2%	0%	0%	0%	2%	1%	2%	0%
DEVAGAR	5%	14%	9%	10%	8%	9%	14%	5%
MEIA FORÇA	11%	1%	7%	2%	14%	7%	14%	1%
TODA FORÇA	25%	15%	20%	43%	9%	22%	43%	9%
FORÇA MÁXIMA	0%	0%	8%	1%	4%	3%	8%	0%

Tabela 6.26 – Quantidade de comandos para atuação do REBOCADOR 2 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.

ENSAIO	1	2	3	4	5	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
DESLIGADO	12	3	2	4	9	6	12	2
MUITO DEVAGAR	12	3	2	4	9	6	12	2
DEVAGAR	12	6	4	8	9	8	12	4
MEIA FORÇA	12	7	6	11	9	9	12	6
TODA FORÇA	11	4	5	9	3	6	11	3
FORÇA MÁXIMA	1	0	1	3	1	1	3	0

Tabela 6.27 – Porcentagem de tempo de atuação do REBOCADOR 3 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.

ENSAIO	1	2	3	4	5	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
DESLIGADO	87%	98%	72%	69%	88%	83%	98%	69%
MUITO DEVAGAR	1%	0%	15%	1%	2%	4%	15%	0%
DEVAGAR	12%	2%	6%	5%	0%	5%	12%	0%
MEIA FORÇA	0%	0%	1%	6%	5%	2%	6%	0%
TODA FORÇA	0%	0%	6%	18%	5%	6%	18%	0%
FORÇA MÁXIMA	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 6.28 – Quantidade de comandos para atuação do REBOCADOR 3 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.

ENSAIO	1	2	3	4	5	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
DESLIGADO	7	2	5	6	3	5	7	2
MUITO DEVAGAR	7	2	5	6	3	5	7	2
DEVAGAR	7	2	3	7	2	4	7	2
MEIA FORÇA	0	1	2	7	2	2	7	0
TODA FORÇA	0	0	2	5	1	2	5	0
FORÇA MÁXIMA	0	0	0	1	0	0	1	0

Tabela 6.29 – Porcentagem de tempo de atuação do REBOCADOR 4 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.

ENSAIO	1	2	3	4	5	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
DESLIGADO	94%	100%	97%	93%	95%	96%	100%	93%
MUITO DEVAGAR	1%	0%	0%	1%	1%	1%	1%	0%
DEVAGAR	5%	0%	3%	5%	0%	3%	5%	0%
MEIA FORÇA	0%	0%	0%	1%	2%	1%	2%	0%
TODA FORÇA	0%	0%	0%	0%	2%	0%	2%	0%
FORÇA MÁXIMA	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 6.30 – Quantidade de comandos para atuação do REBOCADOR 4 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.

ENSAIO	1	2	3	4	5	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
DESLIGADO	4	0	2	4	4	3	4	0
MUITO DEVAGAR	6	0	2	6	5	4	6	0
DEVAGAR	3	0	1	4	4	2	4	0
MEIA FORÇA	0	0	0	1	3	1	3	0
TODA FORÇA	0	0	0	0	1	0	1	0
FORÇA MÁXIMA	0	0	0	0	0	0	0	0

Dentre os ensaios cujos resultados acima foram apresentados, aquele que teve desempenho mais próximo à média em termos de porcentagem de tempo de atuação de cada um dos comandos foi o ensaio 5. Desta forma, a título de exemplo, da Figura 6.33 à Figura 6.39 apresentam-se os registros gráficos destas atuações, que são saídas automáticas do *software* do SIAMA 2014.

Figura 6.33 – Potência da MÁQUINA – ENSAIO 5 – Com sete partidas de máquina (seis à vante e uma à ré) – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.

Figura 6.34 – Atuação do LEME – ENSAIO 5 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.

Figura 6.35 – Potência do REBOCADOR 1 – ENSAIO 5 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.

Figura 6.36 – Potência do REBOCADOR 2 – ENSAIO 5 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.

Figura 6.37 – Potência do REBOCADOR 3 – ENSAIO 5 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.

Figura 6.38 – Potência do REBOCADOR 4 – ENSAIO 5 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.

Figura 6.39 – Registro do sistema *ship tracking* da câmera próxima ao terminal – ENSAIO 5 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 5,5 m – 1 hora APM.

6.7.2. Resultados dos ensaios com amplitude de maré de 6,0 m em 1 hora antes da preamar

Para a amplitude de maré de 6,0 m, os ensaios foram iniciados com os mesmos quatro rebocadores de 55 tf de *bollard pull* utilizados na condição anterior. Entretanto, com estes rebocadores não foi possível concluir a manobra de atracação com segurança por conta do aumento de intensidade das correntes próximas ao píer.

Desta forma, os práticos solicitaram que as manobras fossem conduzidas com quatro rebocadores de *bollard pull* de 75 tf, mantendo a mesma configuração do cenário anterior, ou seja, rebocadores 1 e 4 sempre “puxando” e rebocadores 2 e 3 “empurrando”.

Para estes ensaios também foi mantido na composição do cenário um navio da classe Valemax atracado no Berço Sul do Píer IV.

Os resultados das simulações de manobra são apresentados a seguir de modo análogo ao item 6.7.1. De todas as simulações realizadas pelos cinco práticos,

são apresentados os resultados de apenas uma das manobras de cada prático, referidas como ensaios de 6 a 10.

Tabela 6.31 – Resumo das notas dos práticos aos itens do questionário padrão de manobra e cálculo do conceito geral da manobra – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.

QUESTÕES	ENSAIOS						Peso	Ponderada
	6	7	8	9	10	Média		
REBOCADORES – Nº de comandos	10	5	10	10	5	8,3	1,0	8,3
REBOCADORES – Potência	10	5	5	10	10	8,3	1,0	8,3
MÁQUINA – Atuação	10	5	5	10	10	10,0	1,0	8,3
TRAJETÓRIA	10	5	5	10	5	6,7	2,0	13,3
POSIÇÃO	5	10	10	5	10	8,3	2,0	16,7
FOLGA	10	10	10	10	10	10,0	2,0	20,0
CONTROLE	5	5	5	10	10	6,7	2,0	13,3
SEGURANÇA	5	10	5	10	10	8,3	3,0	25,0
CONCEITO GERAL								8,1

Tabela 6.32 – Comparação entre os tempos de manobra e quantidade total de comandos utilizados durante a manobra – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.

ENSAIO	6	7	8	9	10	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
TOTAL DA MANOBRA (min)	71,5	111,1	95,2	53,5	109,3	88,1	111,1	53,5
Nº TOTAL DE COMANDOS	151	206	170	86	162	155	206	86

Tabela 6.33 – Porcentagem de tempo de atuação da MÁQUINA (conjunto motor-propulsor do navio) – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.

ENSAIO	6	7	8	9	10	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
DESLIGADO	26%	40%	26%	32%	36%	32%	40%	26%
VANTE - MUITO DEVAGAR	55%	19%	54%	40%	30%	40%	55%	19%
VANTE - DEVAGAR	6%	30%	14%	5%	17%	14%	30%	5%
VANTE - MEIA FORÇA	12%	1%	5%	4%	9%	6%	12%	1%
VANTE - TODA FORÇA	2%	6%	0%	14%	4%	5%	14%	0%
RÉ - MUITO DEVAGAR	0%	1%	0%	0%	0%	0%	1%	0%
RÉ - DEVAGAR	0%	3%	0%	0%	3%	1%	3%	0%
RÉ - MEIA FORÇA	0%	0%	0%	4%	2%	1%	4%	0%
RÉ - TODA FORÇA	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 6.34 – Quantidade de comandos para atuação da MÁQUINA (conjunto motor-propulsor do navio) – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.

ENSAIO	6	7	8	9	10	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
DESLIGADO	4	16	6	5	12	9	16	4
VANTE - MUITO DEVAGAR	6	11	11	6	8	8	11	6
VANTE - DEVAGAR	4	10	7	2	10	7	10	2
VANTE - MEIA FORÇA	4	1	1	2	4	2	4	1
VANTE - TODA FORÇA	1	1	0	1	1	1	1	0
RÉ - MUITO DEVAGAR	0	4	0	0	1	1	4	0
RÉ - DEVAGAR	0	3	0	1	2	1	3	0
RÉ - MEIA FORÇA	0	0	0	1	1	0	1	0
RÉ - TODA FORÇA	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 6.35 – Porcentagem de tempo de cada posição do LEME – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.

ENSAIO	6	7	8	9	10	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
BOMBORDO 35°	12%	0%	12%	20%	7%	10%	20%	0%
BOMBORDO 30°	0%	1%	0%	0%	1%	0%	1%	0%
BOMBORDO 20°	0%	0%	0%	0%	1%	0%	1%	0%
BOMBORDO 10°	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
TOTAL DE BOMBORDO	12%	2%	12%	20%	9%	11%	20%	2%
LEME A MEIO	87%	89%	85%	57%	85%	81%	89%	57%
BORESTE 10°	0%	0%	0%	0%	4%	1%	4%	0%
BORESTE 20°	0%	3%	1%	8%	2%	3%	8%	0%
BORESTE 30°	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
BORESTE 35°	1%	6%	2%	14%	1%	5%	14%	1%
TOTAL DE BORESTE	1%	9%	3%	22%	6%	8%	22%	1%

Tabela 6.36 – Quantidade de comandos de acionamento do LEME – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.

ENSAIO	6	7	8	9	10	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
BOMBORDO 35°	6	0	4	1	4	3	6	0
BOMBORDO 30°	0	1	0	0	1	0	1	0
BOMBORDO 20°	0	3	0	0	1	1	3	0
BOMBORDO 10°	0	3	0	0	1	1	3	0
TOTAL DE BOMBORDO	6	7	4	1	7	5	7	1
LEME A MEIO	8	6	8	5	11	8	11	5
BORESTE 10°	0	4	1	2	5	2	5	0
BORESTE 20°	0	3	1	2	2	2	3	0
BORESTE 30°	0	0	0	0	0	0	0	0
BORESTE 35°	1	2	3	1	1	2	3	1
TOTAL DE BORESTE	1	9	5	5	8	6	9	1

Tabela 6.37 – Porcentagem de tempo de atuação do REBOCADOR 1 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.

ENSAIO	6	7	8	9	10	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
DESLIGADO	100%	97%	100%	100%	95%	98%	100%	95%
MUITO DEVAGAR	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
DEVAGAR	0%	1%	0%	0%	2%	1%	2%	0%
MEIA FORÇA	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
TODA FORÇA	0%	2%	0%	0%	3%	1%	3%	0%
FORÇA MÁXIMA	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 6.38 – Quantidade de comandos para atuação do REBOCADOR 1 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.

ENSAIO	6	7	8	9	10	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
DESLIGADO	2	3	0	0	3	2	3	0
MUITO DEVAGAR	1	5	0	0	4	2	5	0
DEVAGAR	0	5	0	0	3	2	5	0
MEIA FORÇA	0	4	0	0	2	1	4	0
TODA FORÇA	0	2	0	0	1	1	2	0
FORÇA MÁXIMA	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 6.39 – Porcentagem de tempo de atuação do REBOCADOR 2 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.

ENSAIO	6	7	8	9	10	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
DESLIGADO	45%	17%	40%	61%	48%	42%	61%	17%
MUITO DEVAGAR	1%	2%	1%	0%	4%	2%	4%	0%
DEVAGAR	9%	10%	5%	10%	10%	9%	10%	5%
MEIA FORÇA	1%	6%	3%	2%	5%	3%	6%	1%
TODA FORÇA	44%	64%	51%	27%	34%	44%	64%	27%
FORÇA MÁXIMA	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 6.40 – Quantidade de comandos para atuação do REBOCADOR 2 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.

ENSAIO	6	7	8	9	10	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
DESLIGADO	11	4	12	4	6	7	12	4
MUITO DEVAGAR	11	6	14	4	9	9	14	4
DEVAGAR	14	11	15	7	11	12	15	7
MEIA FORÇA	14	14	14	8	12	12	14	8
TODA FORÇA	11	9	14	5	7	9	14	5
FORÇA MÁXIMA	0	1	2	0	0	1	2	0

Tabela 6.41 – Porcentagem de tempo de atuação do REBOCADOR 3 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.

ENSAIO	6	7	8	9	10	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
DESLIGADO	79%	61%	77%	89%	89%	79%	89%	61%
MUITO DEVAGAR	1%	10%	1%	0%	11%	5%	11%	0%
DEVAGAR	19%	20%	22%	2%	0%	13%	22%	0%
MEIA FORÇA	0%	0%	0%	1%	0%	0%	1%	0%
TODA FORÇA	1%	9%	0%	7%	0%	3%	9%	0%
FORÇA MÁXIMA	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 6.42 – Quantidade de comandos para atuação do REBOCADOR 3 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.

ENSAIO	6	7	8	9	10	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
DESLIGADO	10	10	11	3	6	8	11	3
MUITO DEVAGAR	10	11	10	3	6	8	11	3
DEVAGAR	9	8	10	3	1	6	10	1
MEIA FORÇA	1	4	0	3	1	2	4	0
TODA FORÇA	1	2	0	2	1	1	2	0
FORÇA MÁXIMA	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 6.43 – Porcentagem de tempo de atuação do REBOCADOR 4 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.

ENSAIO	6	7	8	9	10	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
DESLIGADO	95%	82%	94%	92%	94%	91%	95%	82%
MUITO DEVAGAR	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
DEVAGAR	3%	7%	3%	0%	0%	3%	7%	0%
MEIA FORÇA	2%	8%	3%	0%	0%	3%	8%	0%
TODA FORÇA	0%	2%	0%	7%	6%	3%	7%	0%
FORÇA MÁXIMA	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 6.44 – Quantidade de comandos para atuação do REBOCADOR 4 – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Amplitude de maré de 6,0 m – 1 hora APM.

ENSAIO	6	7	8	9	10	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
DESLIGADO	4	4	4	2	2	3	4	2
MUITO DEVAGAR	6	6	6	2	2	4	6	2
DEVAGAR	4	6	5	2	2	4	6	2
MEIA FORÇA	1	4	2	2	2	2	4	1
TODA FORÇA	0	2	0	1	1	1	2	0
FORÇA MÁXIMA	0	1	0	0	0	0	1	0

6.8. Testes avançados com simulação de visão real e outras condições adversas

Como esta campanha de ensaios objetivou estudos preliminares para avaliação das condições de manobrabilidade do novo berço que está em construção na Baía de São Marcos, o Berço Norte do Píer IV, não foram programados testes avançados. A campanha previu somente as simulações com visão “voo de pássaro”, descritas no item 6.7, com a finalidade de determinar as diretrizes gerais de manobra para o novo berço.

Entretanto, a fim de testar os novos recursos desenvolvidos para o SIAMA 2014, os práticos decidiram ao final de cada um dos dias de testes do novo berço, realizar para o mesmo cenário de maré, uma manobra com simulação de visão real em condições de visibilidade noturna.

Como a programação de ensaios prevista originalmente ocupava praticamente toda a agenda, apenas dois práticos participaram do exercício, um em cada dia, realizando uma simulação de manobra noturna para a condição de amplitude de maré de 5,5 m e instante de 1 hora antes da preamar e outra para condição de 6,0 m no mesmo instante. A Figura 6.7 mostra um dos práticos executando a manobra com simulação de visão real em ambiente noturno.

Foto 6.7 – Prático executando manobra com simulação de visão real em condições noturnas. Fonte: Acervo do LHEPUSP.

Os resultados destas duas simulações são apresentados a seguir em comparação com os valores médios obtidos para a correspondente manobra em ambiente diurno e visão “voo de pássaro”, apresentadas no item 6.7.

Tabela 6.45 – Comparação dos resultados de tempo total de manobra e número total de comandos entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Pier IV – Instante de maré de 1 h APM.

ENSAIO	DIURNA	NOTURNA	DIURNA	NOTURNA
	5,5 m	5,5 m	6,0 m	6,0 m
TOTAL DA MANOBRA (min)	73,5	80,6	88,1	64,5
Nº TOTAL DE COMANDOS	127	181	155	95

Tabela 6.46 – Comparação dos resultados de porcentagem do tempo de atuação da MÁQUINA do navio entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Pier IV – Instante de maré de 1 h APM.

ENSAIO	DIURNA	NOTURNA	DIURNA	NOTURNA
	5,5 m	5,5 m	6,0 m	6,0 m
DESLIGADO	31%	27%	32%	49%
VANTE - MUITO DEVAGAR	40%	38%	40%	19%
VANTE - DEVAGAR	14%	30%	14%	32%
VANTE - MEIA FORÇA	10%	4%	6%	0%
VANTE - TODA FORÇA	3%	0%	5%	0%
RÉ - MUITO DEVAGAR	0%	0%	0%	0%
RÉ - DEVAGAR	1%	0%	1%	0%
RÉ - MEIA FORÇA	1%	1%	1%	0%
RÉ - TODA FORÇA	0%	0%	0%	0%

Tabela 6.47 – Comparação dos resultados de quantidade de comandos na atuação da MÁQUINA do navio entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Pier IV – Instante de maré de 1 h APM.

ENSAIO	DIURNA	NOTURNA	DIURNA	NOTURNA
	5,5 m	5,5 m	6,0 m	6,0 m
DESLIGADO	6	6	9	6
VANTE - MUITO DEVAGAR	8	10	8	3
VANTE - DEVAGAR	4	6	7	1
VANTE - MEIA FORÇA	2	2	2	0
VANTE - TODA FORÇA	1	0	1	0
RÉ - MUITO DEVAGAR	0	1	1	0
RÉ - DEVAGAR	1	1	1	0
RÉ - MEIA FORÇA	0	1	0	0
RÉ - TODA FORÇA	0	0	0	0

Tabela 6.48 – Comparação dos resultados de porcentagem do tempo de atuação do LEME do navio entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.

ENSAIO	DIURNA	NOTURNA	DIURNA	NOTURNA
	5,5 m	5,5 m	6,0 m	6,0 m
BOMBORDO 35°	15%	10%	10%	15%
BOMBORDO 30°	0%	0%	0%	0%
BOMBORDO 20°	1%	1%	0%	0%
BOMBORDO 10°	0%	0%	0%	0%
TOTAL DE BOMBORDO	16%	11%	11%	15%
LEME A MEIO	58%	76%	81%	77%
BORESTE 10°	5%	4%	1%	1%
BORESTE 20°	10%	5%	3%	3%
BORESTE 30°	0%	0%	0%	0%
BORESTE 35°	11%	4%	5%	4%
TOTAL DE BORESTE	26%	13%	8%	8%

Tabela 6.49 – Comparação dos resultados de quantidade de comandos na atuação do LEME do navio entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.

ENSAIO	DIURNA	NOTURNA	DIURNA	NOTURNA
	5,5 m	5,5 m	6,0 m	6,0 m
BOMBORDO 35°	2	2	3	2
BOMBORDO 30°	0	0	0	0
BOMBORDO 20°	1	1	1	0
BOMBORDO 10°	1	2	1	0
TOTAL DE BOMBORDO	4	5	5	2
LEME A MEIO	7	11	8	8
BORESTE 10°	3	7	2	4
BORESTE 20°	3	6	2	4
BORESTE 30°	0	0	0	0
BORESTE 35°	3	5	2	1
TOTAL DE BORESTE	9	18	6	9

Tabela 6.50 – Comparação dos resultados de porcentagem do tempo de atuação do REBOCADOR 1 entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.

ENSAIO	DIURNA	NOTURNA	DIURNA	NOTURNA
	5,5 m	5,5 m	6,0 m	6,0 m
DESLIGADO	95%	91%	98%	100%
MUITO DEVAGAR	0%	1%	0%	0%
DEVAGAR	0%	7%	1%	0%
MEIA FORÇA	1%	0%	0%	0%
TODA FORÇA	4%	0%	1%	0%
FORÇA MÁXIMA	0%	0%	0%	0%

Tabela 6.51 – Comparação dos resultados de quantidade de comandos na atuação do REBOCADOR 1 entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.

ENSAIO	DIURNA	NOTURNA	DIURNA	NOTURNA
	5,5 m	5,5 m	6,0 m	6,0 m
DESLIGADO	2	6	2	2
MUITO DEVAGAR	2	10	2	2
DEVAGAR	2	5	2	1
MEIA FORÇA	2	0	1	0
TODA FORÇA	1	0	1	0
FORÇA MÁXIMA	0	0	0	0

Tabela 6.52 – Comparação dos resultados de porcentagem do tempo de atuação do REBOCADOR 2 entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.

ENSAIO	DIURNA	NOTURNA	DIURNA	NOTURNA
	5,5 m	5,5 m	6,0 m	6,0 m
DESLIGADO	58%	39%	42%	51%
MUITO DEVAGAR	1%	1%	2%	0%
DEVAGAR	9%	15%	9%	15%
MEIA FORÇA	7%	23%	3%	5%
TODA FORÇA	22%	22%	44%	29%
FORÇA MÁXIMA	3%	0%	0%	0%

Tabela 6.53 – Comparação dos resultados de quantidade de comandos na atuação do REBOCADOR 2 entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.

ENSAIO	DIURNA	NOTURNA	DIURNA	NOTURNA
	5,5 m	5,5 m	6,0 m	6,0 m
DESLIGADO	6	6	7	4
MUITO DEVAGAR	6	6	9	4
DEVAGAR	8	10	12	6
MEIA FORÇA	9	12	12	7
TODA FORÇA	6	6	9	3
FORÇA MÁXIMA	1	0	1	0

Tabela 6.54 – Comparação dos resultados de porcentagem do tempo de atuação do REBOCADOR 3 entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.

ENSAIO	DIURNA	NOTURNA	DIURNA	NOTURNA
	5,5 m	5,5 m	6,0 m	6,0 m
DESLIGADO	83%	94%	79%	84%
MUITO DEVAGAR	4%	1%	5%	1%
DEVAGAR	5%	3%	13%	12%
MEIA FORÇA	2%	1%	0%	4%
TODA FORÇA	6%	2%	3%	0%
FORÇA MÁXIMA	0%	0%	0%	0%

Tabela 6.55 – Comparação dos resultados de quantidade de comandos na atuação do REBOCADOR 3 entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.

ENSAIO	DIURNA	NOTURNA	DIURNA	NOTURNA
	5,5 m	5,5 m	6,0 m	6,0 m
DESLIGADO	5	3	8	4
MUITO DEVAGAR	5	3	8	4
DEVAGAR	4	4	6	4
MEIA FORÇA	2	2	2	1
TODA FORÇA	2	2	1	0
FORÇA MÁXIMA	0	1	0	0

Tabela 6.56 – Comparação dos resultados de porcentagem do tempo de atuação do REBOCADOR 4 entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.

ENSAIO	DIURNA	NOTURNA	DIURNA	NOTURNA
	5,5 m	5,5 m	6,0 m	6,0 m
DESLIGADO	96%	91%	91%	92%
MUITO DEVAGAR	1%	1%	0%	0%
DEVAGAR	3%	7%	3%	7%
MEIA FORÇA	1%	0%	3%	0%
TODA FORÇA	0%	0%	3%	0%
FORÇA MÁXIMA	0%	0%	0%	0%

Tabela 6.57 – Comparação dos resultados de quantidade de comandos na atuação do REBOCADOR 4 entre manobras diurna e noturna para as amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m – Atracação no Berço Norte do Píer IV – Instante de maré de 1 h APM.

ENSAIO	DIURNA	NOTURNA	DIURNA	NOTURNA
	5,5 m	5,5 m	6,0 m	6,0 m
DESLIGADO	3	6	3	4
MUITO DEVAGAR	4	10	4	6
DEVAGAR	2	5	4	3
MEIA FORÇA	1	0	2	0
TODA FORÇA	0	0	1	0
FORÇA MÁXIMA	0	0	0	0

6.9. Análise final dos resultados das simulações de manobra

6.9.1. Avaliação do simulador e dos resultados dos ensaios pelos práticos e operadores portuários

Após a finalização das simulações no modelo físico da Baía de São Marcos, os práticos e operadores portuários do Terminal Ponta da Madeira se reuniram com o corpo técnico do LHEPUSP para discussões gerais sobre o uso do simulador físico nos exercícios de manobra e sobre os resultados obtidos nos ensaios propriamente ditos.

A calibração das correntes para todas as condições simuladas foi considerada muito boa nas proximidades dos berços de atracação. A única ressalva feita foi com relação ao instante de maré de 30 minutos após a baixa-mar, utilizado somente durante os testes de ambientação, onde os práticos expuseram que o complexo fluxo da região tem direção de corrente aproximadamente para o norte (direção de corrente vazante) próximo aos berços, o que estava corretamente reproduzido no modelo físico, mas na direção sul (direção de corrente enchente) no canal de acesso à bacia portuária, o que não ocorria no modelo físico. Conforme explicado no item 5.2, o LHEPUSP informou que esta se trata de uma limitação na representação do escoamento no modelo físico, que dificilmente poderia ser reproduzido e calibrado com fluxo em direções opostas no canal e bacia portuária simultaneamente, em função da concepção dos sistemas de alimentação e restituição do modelo. Por este motivo o laboratório optou por reproduzir bem o fluxo junto aos berços, onde a verificação da condição de manobra é mais importante. O LHEPUSP propôs ainda que seria possível simular as condições em etapas, fazendo-se primeiro o ensaio da navegação no canal de acesso e, posteriormente, na bacia portuária, calibrando-se dois cenários de maneira independente. Os práticos julgaram desnecessária esta caracterização, pois concluíram que a navegação no canal de acesso é relativamente simples e que, para os exercícios de manobra, é muito mais importante a região próxima aos berços, devendo-se, portanto, manter o cenário preparado pelo laboratório.

Com relação à aferição do conjunto motor-propulsor do modelo do navio, os ajustes às referências do telégrafo foram considerados adequados. Sobre esta particularidade, os práticos e operadores portuários alertaram sobre as consideráveis diferenças que existem entre as potências de navios da mesma classe, que resultam em comportamentos bem distintos em manobras reais, e que exigem a capacidade do práctico de se adaptar rapidamente a cada navio. Portanto, não haveria maneira de calibrar algo com precisão maior do que esta para representar navios de uma classe qualquer. Apenas para corroborar a informação, destaca-se que os navios da classe Valemax, embora com características gerais similares, são produzidos em quatro diferentes estaleiros, com planos de linhas, motores, propulsores e lemes razoavelmente distintos.

Quanto aos resultados das simulações das provas de mar, que visam garantir comportamento de manobra semelhante do modelo em relação ao navio real, até mesmo em função das diferenças supracitadas entre as características dos navios da mesma classe, foi considerado que os resultados obtidos estavam adequados. Isto foi confirmado nos testes iniciais de atracação no Berço Sul, já em operação no ambiente real. Por meio destes testes, os práticos confirmaram que o comportamento do modelo do navio durante a manobra realizada em modelo físico foi muito similar ao navio real para condições semelhantes de maré.

Com relação ao teste de parada brusca, o laboratório expressou sua preocupação com relação à reprodução dos movimentos de aceleração e desaceleração programadas para o conjunto propulsor do modelo do navio, que poderiam estar distintos do real em função da natureza de funcionamento do motor elétrico. Os práticos e operadores portuários concordaram que seria muito difícil avaliar esta relação, pois havia muita variação entre os navios de mesma classe, e que, da forma como havia sido calibrado, a reação do modelo do navio aos comandos estava semelhante ao real, não havendo necessidade de modificação. Somente foi solicitado ao laboratório, para futuras simulações, que reduzisse um pouco a aceleração da rotação da hélice somente para a potência “MUITO DEVAGAR”. Isto facilitaria a reprodução, já nas proximidades do berço, de uma manobra muito comum na prática, que é o acionamento em baixa rotação e desligamento relativamente rápido da máquina somente para reposicionamento do navio, chamada de “paletada”. Neste caso, houve dificuldade em caracterizar este tipo de manobra em função da reposta relativamente rápida do navio pelo fator de escala de tempo. O sistema de controle do SIAMA 2014 permite ajustar esta configuração facilmente.

Ainda com relação à aceleração e desaceleração do navio na solicitação de um comando de máquina, cabe dizer que o práctico mais experiente que participou de diversas manobras no SIAMA 1993, constatou que houve um enorme avanço do SIAMA 2014. De acordo com ele, no simulador anterior o navio atingia a velocidade final de maneira brusca, ou ainda, durante um deslocamento à vante da embarcação, quando solicitada máquina à ré, a

parada e inversão do movimento eram quase imediatas, o que evidentemente não ocorre com um navio real. Já no SIAMA 2014, em função da programação implantada no motor elétrico, as respostas foram mais suaves, reproduzindo melhor as condições reais.

A calibração dos rebocadores foi considerada adequada, pois durante os testes iniciais de verificação, a resposta destes foi semelhante ao ambiente real. Além disso, a nova forma de reproduzir estas embarcações de apoio, com um mini ventilador móvel (giro livre em torno de seu eixo) representando cada rebocador, foi elogiada, pela facilidade de controle e visualização da ação, além da maior flexibilidade nos testes de investigação de alternativas. No caso do rebocador 2, para futuras atracações no Berço Norte do Píer IV, além das calibrações promovidas para os rebocadores com *bollard pull* de 75 tf e 55 tf, foi solicitado pelos práticos que fosse configurada também a representação da ação de dois rebocadores simultâneos empurrando, que é uma operação comum no Terminal Ponta da Madeira, em outros berços, para condições ambientais de correntes mais intensas. Nestas situações, um quinto rebocador pode ser utilizado para ajudar a empurrar o navio contra o berço. O *software* de controle do SIAMA 2014 permite calibrar esta configuração para qualquer um dos ventiladores e deixa-la à disposição para manobra ao comando do práctico. Este aperfeiçoamento será implementado para futuras simulações de manobra.

Quanto ao sistema de simulação de visão real por micro câmeras, embora não tenham sido programados testes específicos para uso desta função na campanha relatada, os práticos que experimentaram este recurso relataram a dificuldade de executar a manobra utilizando a movimentação da câmera, pois como o fator tempo no ensaio é “acelerado”, durante o movimento da imagem perde-se por alguns segundos a referência de posição, induzindo a erros nos comandos. Para resolver este problema, foi sugerido pelos práticos que no bordo de atracação escolhido para a manobra, ao invés de uma, fossem posicionadas duas câmeras, uma na posição atual, com visada de todo bordo do navio, e a outra perpendicular a esta, que permitisse visada completa do berço de atracação e possibilitasse a sensação de aproximação do navio, sem movimentação da outra câmera. Desta forma, seriam três câmeras instaladas

ao todo sobre o passadiço do modelo do navio. As imagens seriam reproduzidas para os práticos simultaneamente, ou dividindo-se a tela do monitor ou em três monitores independentes. O LHEPUSP vai verificar como realizar a instalação desta outra câmera de forma a atender a esta solicitação. Deve-se destacar, que apesar desta dificuldade, os práticos conseguiram realizar algumas manobras bem sucedidas utilizando-se do recurso de visão real, inclusive com simulação de ambiente noturno.

Com relação à maior dificuldade na execução da manobra em função do fator de escala de tempo, os práticos consideraram que, embora este seja realmente um fator complicador, é possível realizar a simulação com um pouco de treinamento. Neste aspecto julgaram fundamental a realização de testes de ambientação, por meio dos quais foi possível adaptar-se à ferramenta de modo bem rápido, após duas ou três simulações no máximo. Além disso, os práticos avaliaram também que por se tratar de um simulador, o tempo “acelerado” poderia ser encarado como um “fator de segurança”, uma vez que se impondo esta dificuldade adicional, a realização da manobra no ambiente do modelo físico daria maior conforto para execução real em campo, onde o tempo para tomada de decisão é muito maior.

Referente aos resultados dos ensaios propriamente ditos para verificação das condições de manobrabilidade do Berço Norte do Píer IV, os operadores portuários concluíram que foi possível realizar com sucesso as manobras para as duas condições ensaiadas de amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m para o instante de 1 hora antes da preamar. Desta forma, praticamente não haveria restrição operacional para o novo berço nesta janela de maré, uma vez que amplitudes de maré superiores a 6,0 m são raras na região. Já os práticos fizeram as seguintes observações:

- As manobras foram consideradas aceitáveis, mas não confortáveis, pois tiveram de contar com uso excessivo do rebocador 2 (empurrando na proa) com toda força, e ainda assim alguma dificuldade para encostar o navio nas defensas;

- Era esperada uma dificuldade muito maior na manobra com amplitude de maré de 6,0 m, o que acabou não se concretizando por conta da decisão em utilizar rebocadores com menor potência para a condição de maré de 5,5 m¹, estabelecendo-se assim níveis de dificuldades semelhantes para as duas condições ambientais. Desta forma, os práticos recomendaram preliminarmente a execução de manobras no Berço Norte do Píer IV somente com rebocadores de 75 tf, especialmente para marés de 5,5 m ou superiores;
- Para marés com amplitudes inferiores e mais frequentes, como as que se situam entre 4,5 m e 5,0 m, foi recomendada a execução de novos ensaios de verificação da atuação dos rebocadores, de modo a definir se rebocadores menos potentes (como os de 55 tf) seriam suficientes ou também causariam desconforto na manobra;
- Para as manobras em condição de maré com amplitude de 6,0 m, que são consideradas de alto risco, os práticos recomendaram além dos quatro rebocadores de 75 tf, mais um de prontidão na posição 2 (junto à proa), em função das fortes correntes que empurram o navio para fora do berço a partir da proa;
- Por fim, foi recomendado que antes da investigação de outras amplitudes e instantes de maré para detalhamento das janelas de manobra, os demais práticos que manobram na Baía de São Marcos fizessem os mesmos tipos de simulação para saber o parecer de toda a praticagem sobre estas condições ambientais consideradas como críticas.

¹ Nas manobras com amplitude de maré de 5,5 m foram utilizados rebocadores com *bollard pull* de 55 tf, e para a amplitude de 6,0 m, rebocadores de 75 tf.

6.9.2. Análise dos resultados das simulações de manobra a partir dos questionários de avaliação qualitativa e dos registros do SIAMA 2014

Após a realização das manobras, o LHEPUSP emite um relatório com a compilação e comparação dos resultados das avaliações qualitativas, obtidas a partir dos questionários preenchidos pelos próprios práticos, e quantitativas, oriundas dos registros do SIAMA 2014.

Para as condições ensaiadas no Berço Norte do Píer IV, apresenta-se a seguir um breve resumo desta análise, com intuito de mostrar que os resultados gerados pelo SIAMA 2014 corroboram e ajudam a detalhar o parecer final dos práticos dado na reunião de fechamento após a campanha de manobras.

Os comentários dos práticos na reunião de fechamento ficam retratados nas avaliações qualitativas preenchidas após as manobras. No geral, as avaliações foram relativamente semelhantes para as duas condições ambientais ensaiadas. As notas foram sempre iguais ou ligeiramente superiores para a condição de amplitude de maré de 6,0 m, o que poderia parecer um contrassenso, uma vez que se trata de uma condição de correntes mais intensas e, portanto, implicando em maiores dificuldades para a manobra. Entretanto, deve-se lembrar que a manobra com amplitude de maré de 5,5 m foi realizada com simulação de rebocadores menos potentes, o que dificultou mais o controle. Daí a recomendação dos práticos para utilização do rebocador de 75 tf também para a maré de 5,5 m de amplitude.

Quanto ao conceito geral da avaliação qualitativa, as notas foram semelhantes, próximas de 8,0, o que significa que a manobra poderia ser executada sem problemas. Entretanto, o quesito CONTROLE foi avaliado apenas como “aceitável” por pelo menos três dos cinco práticos em cada uma das duas condições ambientais, o que deve ser levado em conta, já que este é um importante critério. A utilização de rebocadores mais potentes poderia melhorar este conceito para a condição de maré de 5,5 m.

Com relação aos resultados registrados pelo SIAMA 2014, a ideia de apresentar o número de comandos dados para cada função, seria definir um parâmetro estatístico sobre o nível de dificuldade da manobra. Assim, por exemplo, se uma dispersão muito grande fosse encontrada, ou seja, se entre o número máximo e mínimo de comandos dados por diferentes práticos houvesse uma diferença muito grande, poderia significar uma dificuldade maior de controle nas manobras (muitas idas e vindas para posicionamento da embarcação). O mesmo raciocínio valeria para o tempo de manobra. Evidentemente, estes indicadores poderiam ser verificados posteriormente nos vídeos gravados da manobra. No caso da presente campanha, a Tabela 6.58 mostra esta diferença calculada para cada uma das condições ensaiadas.

Tabela 6.58 – Diferenças entre tempos de manobra e número total de comandos máximo e mínimo registrados nas manobras diurnas.

CONDIÇÃO DE MARÉ	PARÂMETRO	MÁXIMO	MÍNIMO	DIFERENÇA
Amplitude de 5,5 m	Tempo de manobra (min)	114,3	36,5	77,8
Amplitude de 5,5 m	Nº total de comandos	162	64	98,0
Amplitude de 6,0 m	Tempo de manobra (min)	111,1	53,5	57,6
Amplitude de 6,0 m	Nº total de comandos	206	86	120,0

As diferenças consideráveis apresentadas acima poderiam indicar manobras com certo grau de dificuldade, ou seja, problemas para posicionamento do navio antes da atracação em algumas simulações. Este fato pode ser confirmado por meio dos vídeos das manobras. Além disso, as semelhanças nos padrões de diferença para os dois casos tendem a indicar que as duas manobras tiveram nível de dificuldade parecido, o que também foi atribuído qualitativamente pelos práticos por meio do questionário.

Outra comparação interessante é que os ensaios com maior número de comandos e maiores tempos de manobra, tiveram a maior quantidade de notas 5 nos itens do questionário, enquanto os menores números de comandos ou tempo de manobra apresentaram notas máximas para quase todos os quesitos do questionário, o que também mostra coerência. Entretanto, para consolidar

estes parâmetros de análise, é preciso uma quantidade maior de simulações, com um número maior de práticos, de forma a aumentar o espaço amostral.

Ainda com relação aos resultados registrados pelo SIAMA 2014, os gráficos das figuras a seguir apresentam uma comparação dos resultados médios de porcentagem do tempo de atuação de máquina, leme e rebocadores para as duas condições ambientais simuladas em ambiente diurno, ou seja, amplitudes de maré de 5,5 m e 6,0 m, em conjunto com os resultados dos ensaios em ambiente noturno.

Figura 6.40 – Comparação de resultados das simulações de manobra – Atuação da MÁQUINA (conjunto motor-propulsor do navio).

Figura 6.41 – Comparação de resultados das simulações de manobra – Atuação do LEME.

Figura 6.42 – Comparação de resultados das simulações de manobra – Atuação do REBOCADOR 1.

Figura 6.43 – Comparação de resultados das simulações de manobra – Atuação do REBOCADOR 2.

Figura 6.44 – Comparação de resultados das simulações de manobra – Atuação do REBOCADOR 3.

Figura 6.45 – Comparação de resultados das simulações de manobra – Atuação do REBOCADOR 4.

Para as duas condições ambientais ensaiadas, é possível observar um padrão muito parecido das atuações de máquina leme e rebocadores. Mesmo para a manobra noturna, que não teve grande quantidade de ensaios, e por isso não permite uma análise estatística dos resultados, é possível ver que a tendência se mantém quando comparada à média dos resultados das manobras noturnas.

Dos resultados é possível observar que no caso da atuação do conjunto motor-propulsor quase todas as ações se concentraram entre máquina desligada, muito devagar ou devagar, raras vezes excedendo estas potências.

Quanto aos rebocadores, é possível notar que os rebocadores 1, 3 e 4 trabalharam muito pouco, ao passo que o rebocador 2 (empurrando na proa) foi o mais solicitado, inclusive em condição de toda força. Isto vai de encontro à observação de necessidade de aumento de potência dos rebocadores para a manobra de amplitude de maré de 5,5 m, e também com a solicitação de simular dois rebocadores empurrando na proa. Conforme dito anteriormente, quando o navio aproxima-se do terminal para atracação por boreste, as correntes tendem a empurrar a proa para fora do berço, forçando o rebocador 2 a trabalhar com bastante frequência.

7. CONCLUSÕES

Pode-se concluir que o objetivo geral do trabalho de propor uma nova abordagem experimental para otimização de espaços náuticos foi atingida, na medida em que, a partir do desenvolvimento de uma nova ferramenta para simulação de manobras utilizando modelos físicos reduzidos, foi possível desenvolver um método para avaliação das condições de manobrabilidade de terminais portuários, baseado na análise qualitativa e quantitativa dos resultados dos testes no simulador.

Para atingir a esta meta, a criação do novo simulador analógico de manobras, denominado SIAMA 2014, foi passo fundamental, pois os recursos desenvolvidos para esta ferramenta permitiram:

- Um controle mais preciso das funções do modelo do navio, como potência do motor e posicionamento do leme, por meio da eletrônica embarcada e *software* de comando. Esta precisão é essencial para garantir a adequada calibração das atuações do modelo do navio, tanto por meio das simulações das provas de mar em tanque de águas profundas, quanto pela verificação empírica do prático no espaço náutico de seu domínio. Além disso, este controle garante também a repetibilidade dos ensaios, possibilitando uma avaliação e comparação mais confiável dos resultados de diferentes testes;
- Da mesma forma, uma reprodução mais precisa da atuação dos rebocadores, tanto por meio do controle eletrônico e por *software* de suas funções de potência e posicionamento, quanto pela mudança na forma de disposição dos mini ventiladores na embarcação, que passaram a representar individualmente cada um dos rebocadores durante a manobra. O controle por *software* melhorou significativamente o processo de calibração da tração estática dos ventiladores em tanque apropriado, e permitiu também estabelecer com precisão porcentagens de perda sobre este valor para cada uma das potências de referência

usualmente adotadas para os rebocadores, como toda força, meia força, devagar e muito devagar. Embora sejam atribuídos empiricamente, o SIAMA 2014 permite o ajuste destes valores imediatamente antes das simulações, com a participação dos práticos e demais envolvidos, garantindo maior confiabilidade nos resultados. A representação de quatro ventiladores giratórios na posição usual de cada rebocador também facilitou os comandos do práctico durante as simulações, assim como a análise dos resultados, na medida em que permitiu a identificação de qual rebocador trabalhou mais, além de eventuais necessidades de aumento de potência ou rebocadores adicionais;

- O registro eletrônico dos comandos dados pelo práctico na máquina, leme do navio e rebocadores. Isto possibilitou, posteriormente às simulações, uma avaliação dos resultados e comparação dos mesmos com as avaliações qualitativas que os práticos fizeram da mesma manobra. Com uma maior quantidade de ensaios neste novo simulador, espera-se reunir resultados suficientes para estabelecer índices de controle sobre níveis de dificuldades encontrados nas manobras. No presente trabalho apresentou-se apenas uma ideia geral de como estes índices podem ser aplicados na análise dos resultados;
- A simulação da visão real do práctico do passadiço da embarcação com uso de micro câmeras instaladas sobre o convés. Embora tenham sido realizadas com sucesso algumas manobras utilizando os recursos das câmeras de alta resolução sem visão global do modelo, este recurso precisa ser melhorado, pois o nível de dificuldade na execução da manobra aumentou significativamente. O principal problema encontrado foi na movimentação da câmera, que devido ao fator de escala de tempo, tornava difícil o rápido ajuste da imagem em outra posição, tomando segundos preciosos do práctico no processo de tomada de decisão, e que algumas vezes resultaram na perda da manobra por atraso no comando. O LHEPUSP vai investir no aperfeiçoamento desta tecnologia, seguindo as orientações dos próprios práticos e posicionando mais uma câmera sobre o navio, de acordo com o bordo

de atracação, com visada para o porto e aproximadamente perpendicular ao eixo longitudinal do navio. Isto vai eliminar ou reduzir a necessidade de movimentação da câmera, conferindo ao prático uma visão mais ampla do ambiente.

Além disso, os resultados dos estudos realizados mostraram a importância da utilização dos modelos físicos como simuladores de manobras, especialmente em cenários de fluxos complexos como na Baía de São Marcos, que foi abordada no estudo de caso. A formação complexa de correntes próximas ao terminal para um dado instante de maré, que é aquela em que a praticagem habitualmente atraca os navios nos berços, pode ser reproduzida no modelo físico com alta precisão, o que faz com que os comandos necessários para controle do navio sejam muito semelhantes ao real. Este fato foi comprovado pelos próprios práticos que atuam na região, de duas maneiras diferentes: utilizando traçadores para identificação das correntes antes e durante as manobras, e nos testes iniciais de verificação das calibrações, onde um cenário de manobra conhecido dos práticos foi reproduzido em modelo, para que eles avaliassem a semelhança entre a manobra simulada e manobra real.

O principal ponto de crítica aos simuladores em modelos físicos de escala reduzida, que é o fator de escala de tempo, não mostrou ser um empecilho para a análise das condições de manobrabilidade. Evidentemente, o tempo “acelerado” acrescenta dificuldade ao exercício, mas os testes de ambientação realizados pelos práticos que nunca haviam utilizado este tipo de simulador anteriormente, mostraram que a adaptação é muito rápida. Além disso, os próprios práticos atentaram ao fato de que, como simulador, a ferramenta atendia às expectativas, e que o “fator tempo” poderia ser encarado até mesmo como uma segurança na avaliação da manobra. Isto porque se a manobra puder ser executada com segurança no simulador físico, assim também o será no ambiente real com maior facilidade. Outro ponto a destacar é que, como preconizado desde o início dos trabalhos, o fator de escala de tempo permitiu a execução de cada simulação de manobra de maneira muito rápida. Foram aproximadamente 10 minutos para cada simulação, o que permitiu a realização de mais de 40 testes em dois dias de trabalho, com diferentes práticos, para

avaliação das melhores alternativas de manobra para o novo berço de atracação em estudo. Em outras palavras, o SIAMA 2014 mostrou ser extremamente eficiente como ferramenta de investigação de alternativas.

Uma crítica importante que era feito ao SIAMA 1993, era referente ao sistema de comunicação entre prático e equipe de apoio do laboratório, que apresentava falhas durante a execução da manobra, como também acontece no ambiente real, mas que em função do fator de escala de tempo do modelo reduzido, provocava muitas vezes a perda da manobra, pois não havia tempo de confirmar ou corrigir um comando não entendido. Neste aspecto, foi notória a evolução do SIAMA 2014. Durante as simulações, não foram registradas falhas na comunicação e praticamente não houve problemas na interpretação dos comandos, devido ao uso da técnica de canal aberto e à boa qualidade do equipamento de comunicação.

Outros problemas também detectados no SIAMA 1993 e destacados no item 3.2.2, relacionados à perda do sinal de transmissão via rádio para as funcionalidades do navio, ou interferência de outros equipamentos (que também funcionam com sinal de rádio) na faixa de alcance do receptor do modelo do navio, induzindo comandos não desejados, também foram solucionados no SIAMA 2014. Devido à nova tecnologia implantada de transmissão de dados, durante os diversos testes realizados antes da campanha inaugural de manobras, bem como em toda a campanha de ensaios, nenhum problema desta natureza foi detectado.

Assim, pode-se afirmar que a aplicação do SIAMA 2014 no estudo de caso da Baía de São Marcos foi um grande sucesso, atingindo plenamente os objetivos de investigação prévia das condições de manobrabilidade do novo berço. Esta afirmação foi ratificada pelos práticos e operadores portuários, que aprovaram os resultados do estudo e reconheceram o simulador físico como uma importante ferramenta na avaliação de manobras de navios. Este fato fica ainda mais evidente se considerado que a Praticagem de São Luís declarou a necessidade de sistematicamente turmas de práticos e praticantes utilizarem o

simulador para prosseguir nas investigações de janelas de manobra de novos berços, e também para dar treinamento aos iniciantes.

Portanto, conclui-se que os simuladores de manobra em modelos físicos podem ser utilizados de maneira eficaz na avaliação das condições de manobrabilidade de navios em espaços náuticos, fornecendo subsídios importantes para otimização do projeto. Suas principais vantagens sobre os simuladores computacionais podem ser resumidas como:

- Reprodução das condições ambientais de modo muito mais preciso, especialmente em regiões de grande complexidade na formação de ondas e correntes, onde as equações matemáticas não são bem resolvidas;
- Capacidade de realizar diversas simulações em um único dia e conduzidas por práticos, em função do fator de escala de tempo. Este tipo de abordagem é ideal para as fases de estudos de estratégias de atracação, definição das condições ambientais restritivas, simulações de situações de emergência e treinamentos preliminares dos práticos para conhecimento da região. Além disso, em relação aos modelos computacionais do tipo *fast time*, que também são utilizados em investigações preliminares, o SIAMA possui a incontestável vantagem de contar com a execução da manobra feita por um profissional qualificado;
- Capacidade de modificar os cenários de simulação de modo célere, alterando o alinhamento ou geometria de píeres e outras estruturas portuárias, implantando diferentes cotas de dragagem, introduzindo obstáculos, entre outros. As técnicas de construção e alteração de cenários em modelo físico têm evoluído bastante nos últimos anos, resultando em custos e prazos bem menores do que no passado, e se tornando extremamente competitivos quando comparado aos modelos computacionais. O LHEPUSP desenvolve estudos em modelos físicos desde a década de 1950, e desde o final da década de 1990 aplica a

modelação computacional hidrodinâmica em conjunto nos estudos da área de Hidráulica Marítima, trabalhando com o sistema conhecido internacionalmente como modelagem híbrida. Atualmente pode-se dizer que os modelos físicos, em função das modernas técnicas de construção, são extremamente eficientes para modificação de cenários e estudos de alternativas, muitas vezes mais rápidos do que os próprios modelos computacionais.

Deve-se destacar que o uso dos modelos físicos não substitui os simuladores computacionais, os quais vieram para complementar o conhecimento, mas constitui-se em importante ferramenta, que pode ser utilizada em conjunto com estes simuladores, de forma a produzir resultados mais completos. Uma ideia da aplicação combinada destas ferramentas será explorada no capítulo 8, como sugestão para trabalhos futuros sobre o tema.

Por fim, vale dizer que o objetivo do LHEPUSP, por meio dos financiamentos em pesquisa obtidos junto aos operadores portuários, é dar continuidade ao desenvolvimento do Simulador Analógico de Manobras, de tal forma que o SIAMA 2014 seja uma ferramenta em constante evolução, acrescentando novos recursos que aproximem cada vez mais os usuários do seu ambiente real de manobra, e fornecendo, desta maneira, importante subsídio aos projetos de engenharia e treinamento de pessoal.

8. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

O SIAMA 2014 foi concebido dentro de um conceito inovador de implantação de novos recursos tecnológicos ao sistema de simulação de manobras em modelos físicos reduzidos com alguns objetivos principais:

- Acrescentar maior precisão aos controles do navio e rebocadores, pensando não somente na manobra em si, mas também na melhor fundamentação da calibração de suas atuações com base em dados reais;
- Permitir um registro e análise das informações de modo mais consistente por meio de um banco de dados eletrônico e integrado;
- Introduzir maior realismo por meio do aprimoramento do sistema de simulação de visão real;
- Criar recursos que pudessem integra-lo futuramente com os simuladores de manobra computacionais, de modo a criar um modelo híbrido de simulação de manobras.

Os primeiros três itens foram amplamente discutidos ao longo desta tese e considera-se como demonstrada a importância da implantação dos novos recursos no alcance destas metas.

Entretanto, ainda resta como parte de um trabalho mais longo, que fica como proposta para trabalhos futuros, a integração do SIAMA 2014 com simuladores computacionais, a fim de permitir o desenvolvimento de um sistema completo de avaliação de condições de manobrabilidade em ambientes náuticos, utilizando o princípio da modelagem híbrida (modelo físico e computacional). Entende-se que com os recursos implantados no SIAMA 2014 de rastreamento da posição do navio e controle e registro eletrônico de todas as facilidades do navio, esta tarefa possa ser desenvolvida com maior facilidade.

Neste item, é discutida a importância da utilização do conceito de modelagem híbrida em estudos de manobra de navios, bem como é sugerida uma metodologia para aplicação desta técnica a ser explorada em futuros trabalhos.

8.1. Conceito de modelagem híbrida aplicada à manobra

Com o avanço tecnológico, computadores de boa capacidade de processamento tiveram seus custos muito reduzidos, possibilitando a usuários comuns e instituições de pesquisa o acesso a estas máquinas. Isto abriu caminho para uma utilização muito mais difundida dos modelos numéricos.

Na área de simulação de manobras, antes de domínio exclusivo dos modelos físicos, não foi diferente. Com a chegada no mercado brasileiro dos simuladores computacionais de ponte completa (*full mission*) houve uma proliferação nas ferramentas disponíveis para avaliação das condições de manobrabilidade e treinamento de pilotos, práticos e mestres de rebocadores.

Todavia, estes avanços evidenciaram ainda mais a importância e versatilidade dos modelos físicos, nos quais é possível a aplicação de simuladores de última geração, como o SIAMA 2014. Em outras palavras, a evolução dos modelos computacionais criou novas possibilidades de integração entre as duas ferramentas, iniciando uma nova era nas pesquisas de Engenharia, por meio da modelagem híbrida, ou seja, aplicação conjunta de modelagem física e computacional na otimização de projetos.

A vantagem dos modelos híbridos é que eles aliam o melhor das duas ferramentas, ao mesmo tempo em que mitigam algumas limitações destas pela análise conjunta de resultados.

É possível citar alguns exemplos claros destas vantagens em estudos de simuladores de manobras. Por exemplo, os modelos físicos tridimensionais de áreas portuárias têm a grande vantagem de simular melhor as condições de

escoamento em áreas de fluxo complexas, especialmente nas proximidades de estruturas hidráulicas, como pilares, espigões, quebra-mares, molhes, ou ainda nas proximidades de obstáculos naturais, como bancos de areia. Por outro lado, tem uma área de reprodução restrita, por questões econômicas, nem sempre sendo possível representar toda a área dos canais de aproximação e bacias de manobra. Já os modelos computacionais representam áreas bem mais extensas, podendo reproduzir a manobra desde as áreas de entrada do porto, ou mais distantes, se for preciso. Nestas áreas mais distantes, normalmente as condições de escoamento são mais simples de serem simuladas numericamente, sendo que a reprodução das condições de escoamento poderia ser comprometida na aproximação ao local de atracação. Desta forma, uma integração entre as ferramentas permitiria uma avaliação completa das condições de manobra desde a aproximação do porto até o berço de atracação.

Com relação à representação das condições de escoamento, é preciso fazer uma observação sobre outro tipo de aplicação da modelagem híbrida. Originalmente, os modelos físicos eram calibrados com dados de ambientais pontuais, correspondentes aos locais onde foram instalados os equipamentos de medição em campo. Como possuem áreas de reprodução limitadas por conta do custo, os levantamentos de campo também eram restritos a estas áreas, dificultando muitas vezes a compreensão da dinâmica complexa de formação das correntes e ondas no local e, conseqüentemente, dificultando também a calibração destas condições em modelo físico. Este fato era tão mais agravado, quanto mais complexa fosse a formação dos fenômenos físicos na área de estudo. Atualmente, com o advento dos modelos computacionais hidrodinâmicos de última geração, este problema foi mitigado. Os modelos computacionais podem representar áreas muito maiores, o que possibilita especificações de levantamento de dados de campo mais completas, e melhor compreensão das condições hidráulicas. Além disso, uma vez calibrados e validados, os modelos computacionais permitem extração de dados em qualquer ponto de interesse para a calibração do modelo físico, tornando esta tarefa menos árdua e muito mais precisa. O único cuidado que se deve tomar é na representação das correntes dos modelos numéricos próximos às estruturas

hidráulicas, conforme dito acima, pois este tipo de modelo não reproduz bem o escoamento próximo a estas interferências. O LHEPUSP tem utilizado com muito sucesso em estudos portuários os modelos computacionais em sinergia com modelos físicos em diversas aplicações, como estudos de amarração em navios atracados, verificação das condições de sedimentação e dragagem, avaliações de obras de abrigo portuário, entre outros.

Ainda sobre a questão da modelagem híbrida aplicada aos simuladores de manobra, é evidente que, do ponto de vista visual, os modelos tipo ponte completa permitem uma sensação muito melhor do ambiente real de navegação, com representação fiel da ponte de comando e possibilidade de visão de 210° ou mais, conforme apresentado no item 3.3. Entretanto, neste aspecto, há que se considerar que o modelo físico da área portuária permite uma visão global de toda a região de interesse, inclusive com avaliação das condições de correntes ou ondas de modo mais amplo. Antes do início das manobras em simulador físico, habitualmente, os práticos fazem uso de traçadores de fluxo, como confetes de papel ou permanganato de potássio, para ter uma ideia geral das correntes em toda a área e desta forma interpretar e definir a melhor forma de abordar a manobra. Este procedimento, embora aparentemente simples, confere ao prático notável sensibilidade física sobre as condições locais, facilitando sobremaneira sua compreensão do problema. Além disso, há de se destacar também que, atualmente, com a tecnologia das micro câmeras de última geração é possível conferir ao prático grande fidelidade da visão simulada do passadiço da embarcação durante as manobras em modelo físico. Evidentemente, esta visão não se compara a uma simulação de ponte completa, mas é um importante artifício da modelagem física para conferir maior realismo à manobra.

Outro importante exemplo da complementação das duas ferramentas diz respeito ao tempo de manobra. Apontada geralmente como a principal limitação dos modelos físicos em simulações de manobra, o tempo “acelerado” em função da escala reduzida pode também ser encarado como uma vantagem estratégica. Utilizando um exemplo simples para facilitar os cálculos, um modelo reduzido de escala 1:100, muito comum em estudos em bacias

portuárias, tem seu tempo 10 vezes mais curto que o real, o que significa que o tempo de resposta do prático às ações do escoamento precisa ser 10 vezes mais rápido. Evidentemente, é necessária uma adaptação à ferramenta, pois este fator provoca uma dificuldade muito maior na realização da manobra. Entretanto, a experiência do LHEPUSP nesta atividade mostra que os práticos rapidamente se adaptam a esta nova condição. Desta forma, o que poderia ser entendido como um problema, passa a tornar-se uma vantagem, pois é possível realizar em um único dia de trabalho um número de ensaios de manobra muito superior a um simulador de ponte completa, em condições mais dificultosas para o prático, permitindo assim um completo leque do estudo de alternativas. Por este motivo, o modelo físico foi apelidado no LHEPUSP de **simulador *fast-time* analógico**, em alusão aos modelos *fast-time* computacionais, utilizados para estudos iniciais. Neste caso, as grandes vantagens do modelo físico sobre o *fast-time* computacional são a participação humana, conferindo muito mais realismo à manobra, além da reprodução mais realista das condições de fluxo nas proximidades do terminal. Neste quesito também há um claro aspecto complementar entre as ferramentas, que podem ser utilizadas em diferentes fases do projeto.

Fundamentado nesta lógica da modelagem híbrida aplicada aos estudos de verificação de condições de manobrabilidade em terminais portuários, o item 8.2 apresentará uma sugestão de método para avaliação do problema integrando as suas ferramentas física e computacional.

8.2. Aplicação da modelagem híbrida na avaliação das condições de manobrabilidade

Os diferentes tipos de simuladores de manobra permitem a realização de um estudo integrado com possibilidades de obtenção de resultados muito mais completos e precisos.

Dependendo do tipo de estudo, propõem-se duas diferentes abordagens para o problema, que serão descritas nos itens 8.2.1 e 8.2.2.

8.2.1. Projetos de novos portos

Geralmente, os projetos de novos portos contam em suas etapas iniciais de verificação da viabilidade com poucas informações de dados ambientais como topografia, batimetria, marés, correntes, ondas, ventos, etc., bem como ainda não têm definida toda a frota de navios que utilizarão o terminal.

Conforme explicado no item 2.2, nas etapas preliminares quase sempre as dimensões náuticas são definidas a partir dos critérios determinísticos propostos pela PIANC, USACE, ROM ou ABNT. Nestas etapas, os dados ambientais utilizados são aqueles disponíveis em cartas náuticas existentes, marégrafos próximos ao local de interesse, ou dados de modelos climáticos globais. O navio-tipo pode ser preliminarmente adotado a partir da definição do tipo de carga que será movimentada e de navios comuns que a operam, com atenção à tendência mundial de aumento das dimensões das embarcações para redução de custos.

Vencida esta etapa preliminar, e escolhida uma ou mais alternativas para detalhamento de projeto, o uso de ferramentas mais sofisticadas passa a ser importante. No caso das dimensões náuticas horizontais, os simuladores de manobra são a opção mais adequada para verificação de larguras, raios de curvatura e sobrelargura de canais de acesso, assim como das dimensões gerais das bacias portuárias.

A seguir apresenta-se um descritivo geral das fases de detalhamento do projeto horizontal. Evidentemente a evolução das fases abaixo descrita depende também de outros projetos avançarem de modo conjunto, como o projeto vertical dos espaços náuticos, obras de abrigo, acostagem e demais facilidades portuárias. Entretanto, estes outros itens do projeto serão omitidos para objetivar a explicação em relação ao tema do trabalho.

Na fase inicial de detalhamento, aqui denominada FASE 1, a ferramenta mais aconselhada é o simulador *fast-time*, que permite uma investigação preliminar da viabilidade e das dificuldades de navegação nos canais de acesso e

manobras de atracação. Embora este simulador não disponha de todo nível de detalhamento na representação dos cenários, como o simulador de ponte completa, nem mesmo conte com a participação humana na execução da manobra (piloto automático computacional), este modelo permite uma boa ideia inicial do problema.

Durante a FASE 1, normalmente, executam-se também os levantamentos de dados ambientais por meio de serviços de campo. Conforme abordado no item 3.4.2, esta fase pode ser relativamente longa, mas, mês a mês, dados importantes vão sendo obtidos de tal forma a permitir o desenvolvimento concomitante do modelo *fast-time*, bem como de um modelo computacional hidrodinâmico para simulação das condições de correntes, marés, ondas e ventos. O modelo hidrodinâmico é uma ferramenta fundamental para produzir dados de entrada ambientais aos simuladores de manobra. Evidentemente, sua calibração só estará completa após toda campanha de levantamento de campo, mas cenários parciais podem ser gerados ao longo de seu desenvolvimento, permitindo melhor conhecimento da região.

Espera-se como resultado da FASE1 que o número de alternativas para posicionamento dos berços e dimensões náuticas horizontais tenha sido reduzido, de tal forma que a solução possa ser mais direcionada na FASE 2.

Na FASE 2, dependendo da envergadura do projeto, da importância do terminal portuário ou da complexidade das condições ambientais na região de implantação, a construção de um modelo físico é fundamental para garantir a confiabilidade na análise dos resultados. Como já comentado no item 2.4, os modelos físicos portuários têm fins múltiplos e podem ser aplicados: para estudos de otimização de arranjos portuários, detalhamento de obras de abrigo, especificação de planos de amarração de navios atracados, apoio aos modelos hidrodinâmicos em estudos de sedimentação, dragagem e áreas de descarte, entre outros. Embora os custos de construção de um modelo físico possam ser considerados comparativamente altos em relação a um modelo computacional, de modo a dificilmente serem utilizados em estudos mais

simples, ou projetos de menor envergadura, deve lembrar-se de dois aspectos importantes:

- A especialidade dos modelos físicos é diferente dos modelos computacionais, tendo uma precisão muito maior na reprodução de escoamentos em áreas complexas, especialmente próximos a estruturas hidráulicas, ou obstáculos naturais;
- Em mais de 60 anos de estudos em modelos físicos, o acervo do LHEPUSP permite comprovar que o custo de um estudo em modelo físico representa uma porcentagem insignificante dentro do orçamento necessário para implantação e manutenção de uma grande obra portuária. Por outro lado, o benefício trazido por suas otimizações representa economia significativa no custo global do empreendimento.

Uma vez construído e calibrado, o modelo físico portuário poderá ser utilizado para verificação das condições de manobrabilidade, utilizando o sistema de modelos de navios rádio controlados, conforme descrito no item 3.2.2. Em princípio, o método do SIAMA (Simulador Analógico de Manobras) pode ser aplicado em qualquer modelo físico portuário, desde que as dimensões existentes sejam compatíveis com a execução de manobras de aproximação, giro e atracação. A escala geométrica do modelo não costuma ser problema, pois o máximo fator de redução aceitável para implantação do SIAMA é similar a outros estudos hidráulicos no ambiente portuário.

Como o modelo físico froudiano tem escala de tempo “acelerada” num fator correspondente à raiz quadrada da escala geométrica de redução, um grande número de ensaios diários podem ser realizados, configurando-se em uma excelente ferramenta para estudo de alternativas de manobras, com três vantagens fundamentais em relação ao sistema *fast-time* computacional:

- O controle dos navios é comandado por práticos e não com sistema de piloto automático controlado por programa computacional. Isto integra ao estudo de alternativas um caráter muito mais realista, pois o fator

humano é decisivo para definição das possibilidades e dificuldades de manobra, contando com a experiência de profissionais com larga experiência na execução de manobras reais;

- A reprodução das condições de escoamento dos modelos físicos apropriadamente calibrados é mais precisa do que os modelos computacionais em regiões de interações complexas de fluxo, como por exemplo nos locais próximos aos pontos de atracação de navios, onde geralmente há presença de obstáculos, confinamento de fluxo, etc;
- No modelo físico, a possibilidade de investigação de novas alternativas de arranjo, caso as restrições operacionais de manobrabilidade tornem a janela de tempo de utilização do terminal muito pequena, também é muito rápida, e independe de aplicação de qualquer outro modelo em paralelo para reproduzir adequadamente as novas condições de fluxo.

O trabalho executado em modelo físico na FASE 2, permite a investigação de manobras para diferentes cenários, variando-se condições ambientais de correntes, ondas, marés e ventos, ou ainda simulando-se situações especiais como manobras noturnas, falha de equipamentos, como motor, leme ou rebocadores, entre outros. Inclusive vale destacar que, dependendo da escala, os simuladores físicos podem ser utilizados também para otimização das profundidades mínimas (gabarito vertical) em canais de acesso parcialmente abrigados da ação de ondas, conforme apresentado por Briggs et. al. (2001).

O estudo de alternativas da FASE 2 permite a definição das denominadas condições limites das janelas de manobrabilidade para os terminais portuários, ou seja, as restrições de atuações ambientais para as quais os práticos consideram que a manobra possa ser executada em condições seguras e eficientes.

Além disso, conforme destacado acima, caso as condições de manobras seguras tornem o terminal portuário com acessibilidade muito restrita, o modelo físico portuário permite de modo simples e rápido a investigação de alternativas

de otimização no projeto, alterando-se as dimensões de canais e bacias portuárias, ou mesmo verificando-se a implantação de obras de abrigo. Neste aspecto, sem dúvida, pode-se afirmar que esta ferramenta é absolutamente incomparável com os atuais modelos computacionais hidrodinâmicos, reproduzindo com fidelidade muito maior as condições do escoamento próximo às estruturas hidráulicas.

A partir deste conhecimento, inicia-se a FASE 3, na qual se propõe que as condições limites de manobrabilidade estabelecidas na FASE 2 sejam ainda investigadas em um modelo computacional de ponte completa (*full mission*). Em função do excelente ambiente virtual de simulação de uma ponte de comando, com reprodução dos controles da embarcação e visão de 210° ou superior, este modelo permite que os práticos, pilotos e mestres de rebocadores vivenciem uma experiência bem próxima ao real, com tempo de manobra sem distorções por efeito de escala, e com visualização cada vez mais próxima da realidade.

Como as manobras em simuladores de ponte completa levam aproximadamente o mesmo tempo de manobras reais, isto permite a execução de poucas simulações por dia. Assim, a vantagem da FASE 2 no método proposto torna-se evidente, pois, no modelo físico, todo o estudo de alternativas já foi executado, inclusive de otimizações no projeto, reduzindo-se substancialmente o número de cenários a serem simulados em ponte completa. Apenas como dado ilustrativo, pode-se destacar que, incluindo-se a preparação de diferentes cenários, e reunião ao final do dia entre os participantes para discussão dos resultados, é possível realizar por dia no SIAMA vinte ou mais simulações de manobras, que nos modelos do LHEPUSP costumam levar aproximadamente 10 minutos cada uma.

As mudanças de cenário em modelo físico portuário para diferentes condições de correntes, ondas ou marés, ou mesmo de visibilidade (manobras noturnas), são praticamente imediatas (alguns poucos minutos), assim como as simulações de falhas de equipamentos, como motor, leme e rebocadores que são realizadas via software de controle. Já as mudanças para otimização do

projeto como: alterações de topobatimetria (como novas escavações para canais de acesso), implantação de obras de abrigo, mudança na posição de píeres, etc., dependem do tipo de interferência, mas são executadas, na maior parte dos casos, de um dia para o outro.

Em resumo, no caso de projetos de novos portos, é possível, seguindo o procedimento acima recomendado:

- Definir as restrições operacionais de manobrabilidade do terminal portuário para o projeto proposto;
- Estudar otimizações deste projeto, de tal forma a maximizar o tempo de operação do terminal, mesmo para condições ambientais mais severas;
- Definir as novas restrições de manobrabilidade para as condições finais do projeto, após estudo e implantação das otimizações.

8.2.2. Melhorias em portos existentes

A metodologia proposta para avaliação de projetos de melhorias das dimensões planimétricas em portos existentes, em princípio, deveria seguir os mesmos passos da implantação de novos portos. Entretanto, dependendo do tipo de modificação proposta, dos investimentos reservados pela empresa interessada na modificação e das ferramentas já disponíveis remanescentes do estudo do porto original, esta metodologia pode ser reavaliada.

Como na maior parte dos casos, estas melhorias estão relacionadas a adaptações no terminal para recebimento de navios de maiores dimensões, existem dois cenários possíveis: o primeiro, no qual o estudo do layout original do porto foi realizado sem utilização de modelagem física; e o segundo, no qual existe um modelo físico da região do porto em condições operacionais.

No primeiro caso, dependendo do vulto do investimento esperado para o estudo e implantação, pode não se justificar a construção de um modelo físico

para verificação de uma melhoria. Desta forma, estudos com ferramentas computacionais podem ser utilizados, aplicando-se a seguinte metodologia:

- FASE 1 – Estudo com simulador de manobras do tipo *fast-time* utilizando-se de dados ambientais disponíveis do porto. A utilização de um modelo computacional hidrodinâmico para avaliação da influência das melhorias sobre as condições de escoamento também deve ser considerada. Os resultados do modelo hidrodinâmico servirão como dados de entrada para o simulador computacional. Levantamentos de campo podem também ser necessários, de forma mais localizada e focada nas alterações, uma vez que se suponha que portos em operação disponham de dados gerais sobre as condições ambientais da região. Os estudos com simulador *fast-time* e modelo computacional hidrodinâmico serão responsáveis na FASE 1 pela investigação e otimização de alternativas, de tal forma a permitir a avaliação do menor número possível de cenários na fase seguinte;
- FASE 2 – Estudo de manobrabilidade com simulador de ponte completa (*full mission*) para maior precisão na avaliação das condições estudadas e treinamento dos práticos, pilotos e mestres de rebocadores nas novas condições propostas. Especialmente neste caso, onde estes profissionais já conhecem bem a região, a participação deles é fundamental inclusive na calibração de alguns parâmetros empíricos do simulador computacional, permitindo desta forma a obtenção de resultados mais realistas.

No segundo caso, desde que exista um modelo físico calibrado e de dimensões suficientes para permitir a aplicação do SIAMA, pode-se adotar a seguinte metodologia:

- FASE 1 – Os estudos em modelo físico seriam utilizados inicialmente para verificação das alterações nas condições hidráulicas do escoamento em função das alterações propostas, por meio de observações e medições de campos de velocidades, ondas, etc. Depois

disto, o SIAMA poderia ser utilizado para avaliação das condições de manobrabilidade. No caso específico de melhorias em projetos de portos em operação, recomenda-se que inicialmente sejam realizadas manobras com a presença dos práticos nas condições originais de operação do porto. Esta subfase inicial dos trabalhos é importantíssima para calibração da ferramenta de acordo com a experiência dos profissionais que atuam diariamente no terminal portuário, garantindo uma confiabilidade ainda maior nos resultados. Numa subfase seguinte, simulam-se os cenários pós-implantação das melhorias, e os práticos podem avaliar se as alterações provocaram diferenças significativas nas condições de manobra. Vale destacar que durante a subfase inicial de calibração do modelo com presença dos práticos nas condições originais do porto é preciso simular cenários ambientais bem conhecidos, preferencialmente com navios que eles já estejam habituados a operar no terminal. Na subfase final, navios de maiores dimensões e condições ambientais adversas podem ser implementadas para avaliação de cenários críticos;

- FASE 2 – Analogamente ao caso anterior, os estudos devem ser finalizados com algumas simulações computacionais do tipo ponte completa, não somente para confirmação das condições determinadas em modelo físicos, mas também para treinamento do pessoal de operação em um ambiente de simulação muito mais próximo do real.

REFERÊNCIAS¹

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13246:** Planejamento portuário - Aspectos náuticos – Procedimento. Rio de Janeiro, 1995.

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

_____. **Análise de métodos de modelação física da ação de correntes sobre leito móvel.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Hidráulica apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1983.

_____. **A técnica de traçadores em modelos de fundo fixo aplicada a estudos sedimentológicos.** Tese de Doutorado em Engenharia Hidráulica apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1988.

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

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

_____; _____. AMARAL R. F. **Mean sea-level rise impacts on Santos Bay, Southeastern Brazil** – physical modelling study. Environmental Monitoring Assessment. Springer Science: 2007.

_____; GERENT J. P.; ARASAKI E. **Analogical Manoeuvring Simulator with Remote Pilot Control for Port Design and Operation Improvement.** TransNav – International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 5, No. 3, pp. 315-322, 2011.

_____; SOUZA, O. J.; GÓIS, J. S.; SILVA, G. C. **Avaliação do impacto morfológico do projeto de guias-correntes na Barra do Rio Itanhaém (SP).** Anais. Curitiba: Associação Brasileira de Recursos Hídricos: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003.

¹ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

ALLEN, J. **Scale Models in Hydraulic Engineering**. London: Longmans, Greens and Co. Ltd., 1952.

ALLEN, N.; GRAAUW, A. **Scaled Manned Models**. United Kingdom: IMPA on Pilotage, 2014.

ANTAQ – AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO. **Boletim anual de movimentação de cargas – 2013**. Análise da movimentação de cargas nos portos organizados e terminais de uso privado. Brasília, 2014.

BIRAN, A. B.; LÓPEZ-PULIDO; R. **Ship Hydrostatic and Stability**. Second Edition. London: Elsevier, 2014.

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

BRIGGS, M. J.; MELITO, I.; DEMIRBILEK, Z. e SARGENT, F. **Deep-Draft Entrance Channels: preliminary comparisons between field and laboratory measurements**. ERDC/CHL CHETN-IX-7. US Army Corps of Engineers: 2001.

CRENSHAW JR., R. S. **Naval Shiphandling**. 4th Edition. Maryland: Naval Institute Press, 1975.

DALRYMPLE, R. A. (Ed.) **Physical Modelling in Coastal Engineering**. Rotterdam: 1985.

DE VRIES, W. A. **Determination of hydrodynamic coefficients by force excitation on free sailing ship models**. Publications n° 427. Delft Hydraulics: 1989.

DSME – DAEWOO SHIPBUILDING & MARINE ENGINEERING CO. **Report of Sea Trial**. Vale 400,000 DWT Very Large Ore Carrier. Project n° 1202. DA101Z033. November, 2011.

FCTH – FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRAÚLICA. **Avaliação da flexibilização das janelas dos horários de marés para manobras de navios VLOC (270.000 tpb) e Capesize (150.000 tpb) nos píeres I e III do**

Terminal Marítimo de Ponta da Madeira da CVRD, em São Luís (MA). Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2006.

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

FCTH – FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRAÚLICA. **Desenvolvimento do Simulador Analógico de Manobras – SIAMA 2014.** RL-3000KP-X-20444. Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2015 b.

FCTH – FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRAÚLICA. **Ensaio de simulação de manobras para o Píer IV – Valemax.** RL-3000KP-X-20445. Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2015 c.

FCTH – FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRAÚLICA. **Especificação Técnica para levantamentos de campo na área de instalação do Píer IV e na área de interesse do Píer V da Baía de São Marcos – MA.** Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2011 a.

FCTH – FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRAÚLICA. **Estudos de manobras de navio Capesize no Píer II do PDM.** Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2007.

FCTH – FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRAÚLICA. **Projeto de implantação da Infraestrutura para ensaios de calibração dos modelos em escala reduzida de navios.** Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2011 b.

FLANDERS HYDRAULICS RESEARCH. **Nautical research Towing tank and ship manoeuvring simulator.** Antwerp: 2010. Disponível em: <<http://www.watlab.be>>. Acesso em: 30 Jan 2015.

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

GONÇALVES, R. R. C. **A criação de um simulador para otimização de manobras de navios com a técnica de modelo rádio-controlado conduzido por piloto real em modelo físico.** Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Engenharia. São Paulo, 2005.

HENSEN, H. **Tug use in port** – a practical guide. London: The Nautical Institute, 1997.

HIRATA, K. **Ajuste de inércia e centro de gravidade de modelos.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Divisão de Engenharia Naval e área de Tecnologia de Experimentação. Relatório Nº 16.583. São Paulo, 1982.

HOOFT, J. P. **Manoeuvring simulation.** 19th International Towing Tank Conference. Group Discussion 3. Madrid, 1990. p. 550-555.

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

IALA – INTERNATIONAL ASSOCIATION OF MARINE AIDS TO NAVIGATION AND LIGHTHOUSE AUTHORITIES. **The use of simulation as a tool for waterway design and AtoN planning.** IALA Guideline nº 1058. Edition 2. France, 2011.

IMO – INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **Explanatory notes to the standards for ship manoeuvrability.** MSC/Circ.1053. London, 2002.

_____. **Recommendations on training and certification and on operational procedures for maritime pilots other than deep-sea pilots.** A 23/Res.960. London, 2004.

ITTC – International Towing Tank Conference. **Final report and recommendations.** The Manoeuvring Committee. Proceedings of 26th ITTC – Volume I. Rio de Janeiro, 2011.

ITTC – International Towing Tank Conference. **Final report and recommendations.** The Manoeuvring Committee. Proceedings of 23rd ITTC – Volume I. Venice, 2002.

IVICSICS, L. **Hydraulic Models**. Colorado, USA: Water Resources Publications, 1980.

KIJIMA, K.; NAKIRI, Y.; TANAKA, S.; FURUKAWA, Y. **On a numerical simulation for predicting of ship manoeuvring performance**. 19th International Towing Tank Conference. Group Discussion 3. Madrid, 1990. p. 559-568.

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

LYU, H. K.; ALBERTSON, M. L. **Significance and application of Froude and Reynolds Numbers as criteria for similitude**. Colorado: Fort Collins, 1959.

MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S. R.; HUDSON, D. A. **Ship Resistance and Propulsion**. Practical estimation of ship propulsive power. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

MOTTA, V. F. **Relatório geral sobre o estudo em modelo reduzido para regularização da embocadura do Rio Tramandaí**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, 1965.

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

NTNU - NORWEGIAN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY. **Conventional Ship Testing**. Experimental Methods in Marine Hydrodynamics. Chapter 6. Lecture Notes, 2014. Disponível em: <<http://www.ntnu.no>>. Acesso em: 08 Fev 2015.

PIANC – PERMANENT INTERNATIONAL ASSOCIATION OF NAVIGATION. **Capability of ship manoeuvring simulation models for approach channels and fairways in harbours**. Report of Working Group nº 20 of Permanent Committee II. Supplement to Bulletin nº 77. Brussels, 1992.

_____. **Report nº 117 – 2012: Use of Hydro/Meteo Information for Port Access and Operations**. 2012.

_____. **Report nº 121 – 2014: Harbour Approach Channels Design Guidelines.** Bruxelles, 2014.

PORT REVEL. **Quality standard for shiphandling training on manned models.** In Port Revel Quality Assurance Document. Artelia – Port Revel Shiphandling, 2014. Disponível em: <<http://www.portrevel.com>>. Acesso em: 04 Jan 2015.

RITA, M. A. B. M. **On the behaviour of moored ships in harbours: theory, practice and model tests.** A thesis presented in partial fulfillment of the requirements for obtaining the degree of Research Officer at the Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC. Lisboa, 1984.

ROM – RECOMENDACIONES PARA OBRAS MARÍTIMAS. **Recommendations for the Design of the Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Harbour Basins.** ROM 3.1-99. Puertos Del Estado. 1999.

ROWE, R. W. **The Shihandlers's guide.** London: The Nautical Institute, 1996.

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

THE SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS OF JAPAN. **Researches on the manoeuvrability of ships in Japan.** Keibundo Matsumoto Printing Inc. Tokyo, 1966.

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

USACE – United States Army Corps of Engineers. **Hydraulic Design of Deep-Draft Navigation Projects.** Engineer Manual. Washington DC, 2006.

WHITE, F. M. **Fluid Mechanics.** 6th ed. New York: Mc Graw Hill Co. 2007.

APÊNDICE A – CONCEITOS BÁSICOS SOBRE SIMULADORES DE MANOBRA EM MODELOS COMPUTACIONAIS

A.1. Princípios da modelagem computacional para simulação de manobras

Conforme mencionado anteriormente, os modelos computacionais para simulação de manobras são baseados na descrição do movimento do navio a partir da resolução das equações de equilíbrio de todas as forças agindo sobre o casco.

Em linhas gerais, estes modelos foram concebidos a partir do princípio fundamental da dinâmica, a segunda lei de Newton, que diz que a variação temporal da quantidade de movimento de um corpo é igual à soma de todas as forças externas agindo sobre ele. Esta lei poderia ser escrita de forma a representar os seis graus de liberdade de movimentação de uma embarcação, conforme apresentado na Figura A.1.

Figura A.1 – Seis graus de liberdade de movimentação de um navio: três movimentos de translação (*surge*, *sway* e *heave*) e três de rotação (*roll*, *pitch* e *yaw*).

Entretanto, segundo a PIANC (1992), por simplicidade, raramente são considerados na análise das manobras todos os graus de liberdade, sendo

geralmente desprezados o movimento de translação no eixo z (*heave*) e os movimentos de rotação em torno de y (*pitch*) e x (*roll*), sendo que este último é incluído somente em alguns casos especiais.

Desta forma, De Vries (1989) escreveu as equações de translação no plano horizontal (*surge* e *sway*) e rotação em torno do eixo z (*yaw*) para um sistema de coordenadas fixado no centro geométrico longitudinal do navio (Figura A.2) da seguinte forma:

Figura A.2 – Sistema de coordenadas fixado no centro geométrico longitudinal da embarcação. Fonte: De Vries (1989).

$$m \cdot (du/dt - v \cdot r - x_G \cdot r^2) = F_{x_NAVIO} + F_{x_EXT} \quad (18)$$

$$m \cdot (dv/dt - u \cdot r + x_G \cdot dr/dt) = F_{y_NAVIO} + F_{y_EXT} \quad (19)$$

$$I_z \cdot dr/dt + m \cdot x_G \cdot (dv/dt + u \cdot r) = M_{z_NAVIO} + M_{z_EXT} \quad (20)$$

Nas quais:

- m : massa do navio;
- I_z : momento de inércia em relação ao eixo z , perpendicular ao plano xy ;
- u : velocidade na direção x (*surge velocity*);
- v : velocidade na direção y (*sway velocity*);
- r : velocidade angular: $d\delta/dt$ (*yaw velocity*);

- x_G : coordenada x do centro de gravidade do navio;
- F_x : força na direção x (*surge force*);
- F_y : força na direção y (*sway force*);
- M_z : momento em relação ao eixo z (*yaw moment*);
- Sub-índice $_{NAVIO}$: componentes hidrodinâmicas das forças ou momento sobre o casco do navio e leme, e devido à ação do sistema propulsor;
- Sub-índice $_{EXT}$: componentes hidrodinâmicas externas das forças ou momento, em função de agentes ambientais (ventos, correntes, ondas) ou outros agentes externos (rebocadores, por exemplo).

Portanto, a partir do sistema de equações descrito acima, caso sejam conhecidos a massa, o momento de inércia e o centro de gravidade do navio, bem como os valores dos esforços hidrodinâmicos (lado direito das equações) em cada ponto de interesse e para cada instante de tempo, é possível determinar os valores das velocidades de translação (u e v) e rotação (r) do navio. Assim, a determinação da posição da embarcação em cada instante de tempo poderia ser obtida a partir da integração destes resultados.

Entretanto, a resolução das equações diferenciais que resultam na posição do navio é uma tarefa complexa, pois embora a massa, o momento de inércia e o centro de gravidade sejam grandezas relativamente simples de serem obtidas para o navio estudado, situação bem diferente ocorre com as componentes hidrodinâmicas das forças longitudinais e transversais e do momento. A determinação destas últimas depende da representação matemática de uma série de fenômenos que ainda hoje não podem ser descritos analiticamente e que carecem de considerações empíricas para sua avaliação.

“O processo de modelagem torna-se ainda mais complicado quando efeitos das águas rasas, das águas restritas (incluindo a lateral do canal e efeitos de banco) e as interações entre navios são consideradas” (Gonçalves, 2005).

Além disso, sabe-se que a representação da variação temporal e espacial de forçantes ambientais como correntes, ondas ou ventos pode ser extremamente difícil de descrever matematicamente, pois em alguns locais esta variação pode ocorrer bruscamente por questões climáticas ou batimétricas.

A PIANC (1992, tradução nossa) destaca que:

No lado direito da equação, as forças podem ser expressas em termos de velocidades e acelerações do navio, combinada com variáveis ambientais. Dado um conjunto de condições iniciais, estas equações diferenciais podem ser resolvidas para acelerações, velocidades e finalmente para os movimentos e curso do navio.

As forças hidrodinâmicas dependem, além da forma do casco e do arranjo do leme e propulsão, também da profundidade da água, calado, trim, confinamento lateral de água, correntes, etc. Até hoje, estas grandezas são escritas como função das velocidades, rotação da hélice, ângulo de leme, etc., envolvendo um grande número de coeficientes (também chamados de coeficientes hidrodinâmicos [...]).

De Vries (1989) destaca que as derivações teóricas destas equações são ainda muito limitadas e que, por este motivo, a técnica mais adequada para solução do problema é a composição das equações com o uso de coeficientes hidrodinâmicos, que podem ser determinados a partir de curvas interpoladoras de resultados experimentais. As técnicas utilizadas para determinação destes coeficientes serão discutidas no item A.2.

Além da dificuldade de representar matematicamente os complexos fenômenos que resultam nos esforços sobre o casco do navio, vale destacar que no passado, um grande problema era a capacidade de processamento dos computadores, que limitava a resolução numérica dos sistemas de equações diferenciais, comprometendo a qualidade dos resultados. Com o advento dos computadores mais modernos, a solução numérica destas equações passou a ser viável, mesmo para grades mais complexas e refinadas, tornando os modelos computacionais ferramentas poderosas na avaliação de manobras de navios em ambiente portuário.

A PIANC (1992) comenta ainda que a condição ideal para avaliação das manobras seria o uso de modelos computacionais tridimensionais, onde todas as forças sobre o casco pudessem ser calculadas em tempo real. Entretanto,

ainda hoje, mesmo com o advento dos modelos CFD (*computational fluid dynamics*), isto ainda é muito complicado. Por outro lado, há de se destacar que, o progresso nas técnicas de modelagem computacional e o avanço da capacidade dos computadores, devem estimular o desenvolvimento de modelos matemáticos cada vez mais sofisticados e próximos da realidade.

A.2. Uso de modelos físicos na determinação dos coeficientes hidrodinâmicos

A descrição da movimentação dos navios depende da determinação das forças hidrodinâmicas agindo sobre o casco da embarcação, leme e sistema propulsor. Conforme explicado no item A.1, não existe uma solução exata para este sistema de equações, em função da complexidade da interação do fluxo com estas estruturas. Assim, soluções aproximadas que descrevem a ação dos agentes externos, bem como sua influência sobre as estruturas do navio são escritas em função de coeficientes, chamados coeficientes hidrodinâmicos, que podem ser determinados experimentalmente.

Estes coeficientes hidrodinâmicos podem ser obtidos através de dois diferentes métodos. O primeiro tipo considera as forças sobre o casco, leme e propulsor, e as interações entre eles, como uma entidade única. O segundo tipo resolve separadamente cada uma destas estruturas para compor o sistema de forças no final.

KIJIMA et. al. (1990) apresenta uma solução baseada no segundo método, que de acordo com o autor é mais vantajosa, pois permite avaliar a influência na movimentação da embarcação devido à modificação das características de qualquer uma das estruturas (casco, leme ou propulsores) individualmente. Nesta solução o autor procura associar os coeficientes hidrodinâmicos a parâmetros que podem ser obtidos de modo relativamente simples para

classes de navios, tais como coeficientes de forma do casco (no caso foi utilizado o coeficiente de bloco¹), ângulo de leme e rotação do propulsor.

A PIANC (1992) comenta também que o segundo tipo de método tem ainda a vantagem de associar a cada um dos coeficientes hidrodinâmicos significados físicos, ao contrário do primeiro tipo de método, onde os coeficientes obtidos são apenas valores matemáticos decorrentes da análise de regressão aplicada na solução do sistema de equações.

Segundo KIJIMA et. al. (1990), os coeficientes hidrodinâmicos necessários para a modelagem numérica podem ser obtidos por dois caminhos: testes em modelos físicos e cálculos teóricos. Entretanto, o autor ainda ressalta que métodos teóricos não permitem determinar todos os coeficientes com a precisão adequada, e que futuras investigações são necessárias para avanços neste tema.

O princípio básico dos testes em modelo físico é restringir os graus de liberdade do movimento, permitindo apenas uma trajetória bem definida. Desta forma, os coeficientes hidrodinâmicos podem ser calculados pela medição das forças e momentos para diferentes condições de velocidade, carregamento do navio, posição do leme, entre outras.

Evidentemente, os testes em modelos físicos têm efeitos de escala associados. Sobre este assunto, o ITTC (2002) apresenta uma série de recomendações de cuidados sobre a análise de resultados oriundos dos testes em modelos físicos. Mais recentemente, o ITTC (2011) apresenta um capítulo específico sobre os efeitos de escala associados às medições em modelos físicos onde é aprofundada a discussão sobre o tema, inclusive suportada por recentes avanços em modelagem CFD, a fim de analisar os resultados e propor fatores de correção para extrapolação dos valores reais.

A PIANC (1992) agrupou os testes em modelos físicos que podem ser realizados para determinação dos coeficientes hidrodinâmicos de acordo com o

¹ O coeficiente de bloco foi apresentado no item 3.4.1.

tipo de tanque (ou modelo) utilizado e os recursos disponíveis. Nesta classificação, são considerados três tipos diferentes de modelo, que serão discutidos de modo breve a seguir.

A. Towing Tank Tests

Towing Tanks são uma família de modelos físicos destinados a estudar a resistência hidrodinâmica de navios. Tratam-se de grandes canais com dimensões variáveis, mas usualmente têm comprimento da ordem de 100 m ou maior, a largura fica entre 5 a 30 m, e a profundidade entre 2 e 8 m. São equipados com uma grande viga metálica, transversal ao canal, denominada de vagão, na qual a embarcação é presa por meio de uma haste. O vagão é responsável por arrastar a embarcação pelo canal. Um dinamômetro é responsável pela medição dos esforços. A Figura A.3 e a Figura A.4 ilustram a operação de um *towing tank*.

Figura A.3 – Esquema de funcionamento de um *towing tank*. Fonte: Molland, Turnock e Hudson (2011).

Figura A.4 – Ensaio em um modelo *towing tank*. Fonte: Flanders Hydraulics Research (2010).

Nestes modelos podem ser realizados diversos tipos de ensaios para caracterização de coeficientes hidrodinâmicos, sendo os mais relevantes:

- Testes em linha reta: O modelo do navio é puxado com velocidade constante e diferentes ângulos de ataque (β), conforme ilustrado na Figura A.5, para determinação das forças transversais e momentos. Também podem ser consideradas outras condições como $\beta=0$ e diversos ângulos de leme, bem como a operação do propulsor;

Figura A.5 – Esquema do teste em linha reta em um *towing tank*. Fonte: PIANC (1992).

- Testes de movimentos planares: Dois braços de oscilação são presos ao modelo do navio, um na proa e o outro na popa, produzindo oscilações transversais independentes, enquanto o navio é arrastado ao longo do tanque com velocidade constante. Nem todo *towing tank* está habilitado a fazer este tipo de ensaio. É necessário que haja instalado no tanque um dispositivo conhecido como PMM (*Planar Motion Mechanism*),

ilustrado na Figura A.6 e na Figura A.7, o que torna este ensaio mais caro e especializado. Com os braços de proa e popa oscilando na mesma frequência, mesma amplitude e ângulo de fase igual a zero é criado o movimento de puro *sway* com zero *yaw* (Figura A.8 superior). Se a mesma condição for proposta alterando-se somente o ângulo de fase dos dois braços, cria-se um movimento de puro *yaw* e zero *sway* (Figura A.8 inferior). Desta forma, restringindo-se graus de liberdade é possível monitorar os esforços e momentos específicos e, conseqüentemente, obter os coeficientes hidrodinâmicos. Nestes ensaios podem ser utilizados também diferentes ângulos de ataque e de leme, mas quanto maiores forem estes ângulos, maiores os efeitos de escala, em função da presença de turbulência e formação de vórtices;

Figura A.6 – Esquema de funcionamento do dispositivo PMM para testes de movimentos planares. Fonte: PIANC (1992).

Figura A.7 – Towing tank com dispositivo PMM na Noruega. Fonte: NTNU (2014).

Figura A.8 – Testes de movimentos planares. Na parte superior da figura puro sway e na parte inferior puro yaw. Fonte: PIANC (1992).

- Testes de oscilação: Este teste pode ser realizado em um *towing tank* convencional, e tem objetivos similares aos testes de movimentos planares. Neste caso, entretanto, sobre o braço único preso ao modelo do navio é exercido um movimento oscilatório de yaw, enquanto o navio é arrastado com velocidade constante. Assim, o movimento do navio é uma combinação de sway e yaw. Embora não exija instrumentação sofisticada, a análise dos resultados medidos pelo dinamômetro é muito mais complicada do que no caso da utilização do PMM.

B. Manoeuvring Tank Tests

O *Manoeuvring Tank* é uma variação mais sofisticada do *towing tank*, pois além do vagão principal que se desloca em uma direção, um vagão secundário é capaz de se deslocar sobre o principal na direção ortogonal ao movimento

principal. Além disso, o tanque é de dimensões maiores, em geral retangular, pois como há movimentos transversais mais amplos, há necessidade de evitar-se o efeito de parede.

Uma grande gama de testes pode ser feita neste tipo de tanque. Um exemplo é o teste de rotação, no qual o modelo do navio é preso há um braço que roda em torno de um eixo. A velocidade da embarcação é mantida constante e sempre orientada na direção perpendicular ao braço, com ângulo de ataque nulo (Figura A.9). Desta forma, o dinamômetro pode medir a força transversal e o momento para cada rotação testada.

Figura A.9 – Esquema de teste de rotação realizado em um modelo tipo *Manoeuvring Tank*. Fonte: PIANC (1992).

Este tanque também permite realizar alguns ensaios que não são utilizados para estimativa direta de coeficientes hidrodinâmicos, mas que são importantes na validação do simulador numérico, quando repetidos em ambiente computacional. São ensaios similares aos testes de manobrabilidade padronizados previstos pela IMO (2002), realizados também nas provas de mar de navios reais, e podem ser feitos sob diferentes condições de velocidades e profundidades.

C. Free-sailing Models

Os modelos do tipo *free-sailing* são muito mais simples do ponto de vista de infraestrutura. Dentre todos os testes apresentados nesta seção, estes são os únicos em que o modelo de navio não é cativo (ou seja, preso a um braço mecânico). Neste caso, o modelo do navio é auto propelido, semelhante ao

utilizado nos simuladores físicos de manobra não tripulado, apresentado no item 3.2.2. O tanque, em si, não precisa de nenhuma estrutura especial, podendo ser um lago ou uma piscina.

O modelo do navio possui motor, hélice propulsora e leme, bem como dois ventiladores, um na proa e outro na popa, com seus eixos perpendiculares ao eixo longitudinal da embarcação (Figura A.10). A força exercida pelas hélices é medida por sistema instalado a bordo do navio, conforme esquematizado na Figura A.11.

Figura A.10 – Esquema de um modelo de navio autopropelido para ensaios do tipo *free-sailing* com representação do motor, hélice e leme, bem como dois ventiladores de proa (F_1) e popa (F_2). Fonte: De Vries (1989).

Figura A.11 – Esquema de medição de esforços aplicado pelos ventiladores nos modelos do tipo *free-sailing*. Fonte: De Vries (1989).

De acordo com De Vries (1989) todos os tipos de testes realizados em *towing tanks* ou *manoeuvring tanks* são possíveis, tais como: movimentos em linha reta e oblíquos, testes de rotação e testes de oscilação, bem como os ensaios para validação de modelos computacionais, como curva de giro (*turning circle*), zig-zag e parada brusca.

Um sistema de computador a bordo do navio registra a rotação do motor, posição do leme, força exercida pelos ventiladores e a trajetória do navio. Este sistema permite a determinação dos coeficientes hidrodinâmicos de modo similar aos tanques cativos, ou mesmo da definição completa da trajetória do navio para os testes similares a provas de mar.

A grande vantagem deste sistema é o custo e a flexibilidade, pois não é necessária a instalação de nenhuma infraestrutura mais elaborada e quase todos os tipos de ensaios são possíveis. As desvantagens ficam por conta da precisão, que é menor do que em ensaios de modelos cativos, e da interpretação dos resultados, pois neste tipo de ensaio muitos dos movimentos são combinados (é muito difícil realizar movimentos puros como nos modelos cativos), necessitando de uma análise mais complexa para determinação dos coeficientes hidrodinâmicos.

APÊNDICE B – CALIBRAÇÃO DE MODELOS REDUZIDOS DE NAVIOS PARA ENSAIOS DE MANOBRA SOB AÇÃO DE ONDAS

A calibração do modelo do navio é fundamental para garantir que a sua resposta às ações ambientais representadas em modelo físico correspondam ao comportamento de um navio real sob as mesmas condições.

As principais ações ambientais que podem influenciar sobre o movimento de um navio que está em condições de manobra são o vento, as correntes marítimas e as ondas. As embarcações possuem ao todo seis graus de liberdade para seu movimento, como mostrado na Figura A.1, e especialmente quando estão sujeitas à ação de ondas, não é possível desprezar nenhum destes movimentos.

Conforme explicado no item 5.3, para que a resposta do modelo do navio em manobra seja semelhante ao real é preciso reproduzir adequadamente em escala a geometria e rugosidade do casco (para garantir semelhança na resistência hidrodinâmica) e as atuações de motor e leme, que são verificadas ao final por meio das simulações nas provas de mar. Entretanto, as provas de mar são realizadas sob condições de águas calmas com reduzida ação de ventos, ondas e correntes. Quando estas últimas ações ambientais são importantes, é preciso complementar a calibração garantindo para a embarcação uma distribuição de massa correspondente em escala ao navio real, de tal forma que não apenas o calado seja obedecido, mas também o centro de gravidade e os momentos de inércia do navio. Respeitando-se estas condições, que devem ser ajustadas para cada situação de carregamento do navio, a resposta do modelo será semelhante ao protótipo, considerando-se, evidentemente, os efeitos de escala.

De acordo com Hirata (1982), para garantir a reprodução dos fenômenos dinâmicos em modelo reduzido é necessário ajustar-se o centro de gravidade e o raio de giração da embarcação, pois deste modo os movimentos, as acelerações e outras variáveis descritivas do fenômeno em estudo, estarão representadas em escala no modelo. A determinação do raio de giração do

modelo do navio faz parte da técnica de ajuste da inércia da embarcação, que será discutida adiante.

Segundo Rita (1984) estes ajustes do centro de gravidade e momento de inércia devem ser feitos por meio da adequada distribuição de pesos conhecidos nos porões do modelo do navio.

Portanto, para a construção e calibração de modelos de navio sujeitos a ensaios com ação de ondas, o LHEPUSP, com o apoio do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, desenvolveu bancadas especiais e definiu a seguinte metodologia:

- Etapa 1 – Determinação do conjunto de dados completo do navio;
- Etapa 2 – Construção do modelo do navio em escala;
- Etapa 3 – Ajuste do centro de gravidade;
- Etapa 4 – Ajuste do raio de giração;

Na Etapa 1, os dados para aferição do navio provêm de dois documentos: projeto de engenharia e plano de carregamento do navio. Segundo FCTH (2011 b), do plano de engenharia são obtidas as dimensões reais do navio, disposição e dimensões dos porões, plano de linhas do casco, calado, arranjo do convés e o peso da embarcação em lastro. Do plano de carregamento são obtidos o peso da carga total que o navio suporta, o centro de gravidade (x , y , z) e o momento de inércia nos diferentes eixos (x , y , z) para as diferentes condições de carregamento.

A Etapa 2, que trata da construção do modelo do navio na escala adequada, foi discutida no item 5.3.

A Etapa 3, que consiste na determinação do centro de gravidade (x , y , z) do modelo do navio, é realizada com auxílio de uma bancada especialmente projetada para tal fim. Esta bancada trata-se basicamente de uma mesa plana,

totalmente nivelada, a uma altura confortável do chão (aproximadamente 80 cm) para facilitar os ajustes no posicionamento do navio em relação ao centro de gravidade. No centro da bancada deve existir uma “faca” com lâmina suficientemente fina para equilibrar o navio em torno de seu centro de massa, sem danificar a geometria do casco, conforme ilustrado na Figura B.1.

Figura B.1 – Esquema geral da bancada para calibração do centro de gravidade dos modelos de navio. Fonte: FCTH (2011 b).

O sistema acima representado é baseado no conhecido “método da balança”, no qual além do ponto de apoio ilustrado na Figura B.1, outro ponto de apoio é colocado sobre o prato de uma balança, e os pesos são distribuídos na embarcação, até que o valor do centro de gravidade¹ coincida aproximadamente com o esperado, para cada uma das três direções (x, y e z). O princípio da bancada utilizada no LHEPUSP é exatamente o mesmo, com a diferença que, ao invés de uma balança, utiliza-se célula de carga presa ao navio como segundo ponto de apoio.

Para calibração do raio de giração, de que trata a Etapa 4, é realizado o chamado “ensaio bifilar”, que consiste na amarração do modelo do navio a dois fios indeformáveis e 100% paralelos (com um comprimento superior a 3 m) e a imposição de um deslocamento padrão do navio, tendo o seu tempo de oscilação em torno de um determinado eixo cronometrado. Esta técnica

¹ O centro de gravidade é uma função da leitura da balança, da distância entre os pontos de apoio e do peso do objeto. O método é descrito em detalhes em Hirata (1982).

permite determinar o raio de giração em torno dos eixos x, y e z, conforme ilustrado na Figura B.2.

Figura B.2 – Ensaio bifilares para determinação do momento de inércia dos modelos de navios nos três eixos (*sway*, *pitch* e *roll*). Fonte: FCTH (2011 b).

Para a determinação dos raios de giração do modelo com precisão, é necessária a realização de 5 ciclos de medição para cada posição do navio, onde cada ciclo apresente no mínimo 10 oscilações em torno do próprio eixo. O raio de giração do modelo do navio pode ser calculado a partir da média de tempo (cronometrada para os 5 ciclos de 10 oscilações dos diferentes eixos do navio modelo) por meio da seguinte equação:

$$R_G = \frac{T \cdot a}{4 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (21)$$

Na qual:

- R_G : raio de giração do modelo do navio;
- T : período natural médio (cronômetro);
- a : distância medida entre os dois fios paralelos;
- g : aceleração da gravidade;
- L : comprimento livre dos fios (comprimento do pêndulo).

O raio de giração do navio real em torno de cada eixo pode ser obtido analiticamente por meio do momento de inércia correspondente, que é conhecido a partir do plano de carregamento do navio. Os pesos devem ser distribuídos na embarcação até que os valores de modelo e protótipo sejam suficientemente coincidentes.

O ajuste dos pesos no navio de que tratam as Etapas 3 e 4 devem evidentemente respeitar o calado para a condição de carregamento desejada, bem como considerar os equipamentos referentes à instrumentação de controle remoto do navio. Os pesos de ajuste do centro de gravidade e raio de giração precisam ser dimensionados de acordo com o espaço disponível nos porões do modelo (Figura B.3), o que vai definir inclusive a densidade necessária do material de confecção dos pesos. Não há restrições quanto à forma dos pesos, mas a sugestão é para utilização de blocos paralelepípedicos para facilitar o posicionamento em qualquer direção.

Figura B.3 – Exemplo de distribuição de pesos nos porões dos modelos de navios.

ANEXO I – PILOT CARD DO VALE RIO DE JANEIRO (VALEMAX)

. -Pilot Card

Ship Name:		Vale Rio de Janeiro		Data: August 2011	
Ship's Particulars					
LOA (m)	362.0	Trial Draft Fore (m)	11.10		
LBP (m)	350.0	Trial Draft Aft (m)	11.80		
Beam (m)	65.0	Cargo Capacity (dwt)	400000		
Draught (Aft)	23.0	AT -Transversal Area (m2)	2064.8		
Draught (Fwd)	23.0	AL -Lateral Area (m2)	8366.5		
General Arrangement

Propulsion Particulars					
Speed					
Service Speed:	15.4 knots, average speed between at design/scantling draft of 23.0 m and at normal ballast intermediate condition at 85% MCR with 15% S.M				
Cruising Range:	20,500 nautical miles at service speed of 14.8 knots at design/scantling draft of 23.0 m				
Complement:	33 Persons				
Main Engine					
Type:	MAN B&W 7S80ME-C8 × 1 set				
Maker:	Hyundai Heavy Industrial Co., Ltd.				
MCR:	29,260 kW × 78.0 rpm				
NCR:	24,870 kW × 73.9 rpm				
Propeller					
Type:	Fixed Pitch Propeller				
No. of Blade:	4				
Diameter (D):	10.20 m				
Pitch Ratio (0.7 R):	0.6145				
Maker:	Mecklenburger Metallguss GmbH				
Designer:	Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.				
Type of Freeboard					
Type:	" B-100 " type assigned on ICLL 1966.				
Rudder					
Type:	Semi-spade				
Movable Area:	120.46 m ²				
Balanced Ratio:	24.00 %				
Aspect Ratio:	1.650				