

ALEXANDRE NICOLAOS SIMOS

# Contribuições à Modelagem Hidrodinâmica de Sistemas Oceânicos Fundeados

Texto de sistematização das atividades de pesquisa  
apresentado à Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo para fins de Concurso de Livre  
Docência junto ao Departamento de Engenharia  
Naval e Oceânica

Especialidade:  
Engenharia Naval e Oceânica

São Paulo

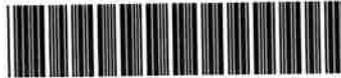
2013

---

**PNV**  
**FT-3265**

*OK*

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600022519

Res.  
23/11/13

PNU

Universidade de São Paulo  
Biblioteca da Escola Politécnica

FT- 3265

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Simos, Alexandre Nicolaos**

**Contribuições à modelagem hidrodinâmica de sistemas oceânicos fundeados: texto de sistematização das atividades de pesquisa / A.N. Simos. -- São Paulo, 2013.**

265 p.

**Livre Docência - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.**

**1. Hidrodinâmica 2. Manobrabilidade (Modelos) 3. Comportamento de embarcações no mar 4. Inferência Bayesiana I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Mecânica II. t.**



## REITORIA

Proc. USP nº 08.1.2617.3.9

Portaria nº 1027

3689/2013

O REITOR DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, usando de suas atribuições legais, EXPED E a presente Portaria para declarar que tendo ALEXANDRE NICOLAOS SIMOS, Professor Doutor, ref. MS-3, do QDUSP-PG, em Regime de Dedicção Integral à Docência e à Pesquisa, lotado na Escola Politécnica (Departamento de Engenharia Naval e Oceânica), obtido o título de Livre-Docente, conforme elementos constantes do Processo USP nº 08.1.2617.3.9, fica, a contar de 04/10/2013, designado para exercer a função de Professor Associado, ref. MS-5, do mesmo Quadro, Parte, Regime e Lotação, nos termos do artigo 84 do Estatuto da Universidade de São Paulo.

Reitoria da Universidade de São Paulo, 14/10/13

Assinatura manuscrita em tinta preta, correspondente ao nome João Grandino Rodas.

JOÃO GRANDINO RODAS

Reitor

Publicado no D.O.  
Em 16-10-13.  
Bete  
SUPUBL-01

Defesa  
25/09



À Luciana,  
incansável incentivadora



## Agradecimentos

Expresso minha gratidão, primeiramente, aos amigos e professores Celso Pupo Pesce e José Augusto Penteado Aranha, a quem devo muito de minha formação como pesquisador.

Agradeço também aos companheiros de trabalho Eduardo Aoun Tannuri, Kazuo Nishimoto, André Luis Condino Fugarra e José Jaime da Cruz, com quem compartilhei muitos dos estudos aqui relatados, e cuja cooperação enriqueceu sobremaneira minhas atividades de pesquisa.

Os resultados apresentados ao longo deste texto também contaram, direta ou indiretamente, com a preciosa colaboração de muitos outros colegas da USP, docentes e alunos, de companheiros pesquisadores do IPT, da Petrobrás e de outras instituições. Agradeço, portanto:

Aos colegas do Depto. de Engenharia Naval e Oceânica da EPUSP pela amizade e apoio, garantindo um ambiente propício para a realização de minhas atividades acadêmicas e de pesquisa;

Aos alunos e pesquisadores da EPUSP que participaram dos estudos e cuja dedicação foi crucial para a obtenção dos resultados: João Vicente Sparrano, Fábio Tadao Matsumoto, Iuri Baldaconi da Silva Bispo, Rafael de Andrade Watai, Felipe Ruggeri, Carlos Hakio Fucatu, Pedro Cardozo de Mello, Mario Luis Carneiro, César Illuminati e Asdrubal do Nascimento Queiroz;

Aos pesquisadores da Petrobrás Vinícius Leal Ferreira Matos, André Jacques de Paiva Leite (hoje na Statoil do Brasil) e Marcos Donato Ferreira que, assim como muitos outros colegas do E&P e do CENPES, sempre aportaram conhecimentos técnico-científicos de grande valor para as pesquisas;

Ao professor Sérgio Hamilton Sphaier da COPPE/UFRJ, pela colaboração no estudo dos movimentos ressonantes em ondas, e ao professor Antonio-Souto Iglesias, da *Universidad Politécnica de Madrid*, por tornar possível e participar do estudo referente à turbina eólica flutuante;

Aos pesquisadores do IPT Carlos Daher Padovezi, José Carlos Zanutto, Carlos H. Umeda e Kazuo Hirata (em memória), pela colaboração nas atividades experimentais que serviram como base de verificação e validação de alguns dos métodos aqui apresentados;

À Petrobrás, empresa que além de propiciar os tópicos de investigação e financiar boa parte dos estudos descritos neste trabalho, sempre se mostrou favorável à divulgação dos resultados científicos alcançados;

À FAPESP, ao CNPq e à Marinha do Brasil pelas bolsas de estudo e de pesquisa que me foram concedidas ao longo destes anos.



## Resumo

Procuro fazer, através deste texto, uma síntese das principais contribuições resultantes de minhas atividades de pesquisa na área de Hidrodinâmica de Sistemas Oceânicos. Em sua quase totalidade, se tratam de trabalhos desenvolvidos junto ao Depto. de Engenharia Naval e Oceânica da EPUSP, quer seja na condição de pós-graduando ou como parte de minhas atividades docentes, iniciadas no ano de 2002.

Na elaboração do presente documento, optei por destacar o trabalho em três linhas de pesquisa às quais dediquei a maior parte de meus esforços como pesquisador nestes pouco mais de dez anos, deixando de lado atividades mais pontuais em temas correlatos. São as linhas de pesquisa que julgo conterem as contribuições mais relevantes. Estão todas associadas ao desenvolvimento de modelos e métodos para o estudo da hidrodinâmica de sistemas flutuantes de produção, com especial ênfase naqueles que operam em zonas de grande profundidade. Refletem, assim, em sua maior parte, demandas associadas ao aprimoramento de métodos de projeto e operação dos sistemas *offshore* que caracterizam a exploração e produção de petróleo e gás nas costas brasileiras.

A primeira linha de pesquisa abordada neste texto diz respeito ao desenvolvimento de um modelo semi-empírico para a previsão das forças de correnteza sobre navios petroleiros fundeados. O principal alvo deste modelo são as chamadas plataformas FPSO, usualmente baseadas na conversão de antigos petroleiros de grande porte. As atividades neste tema conduziram à elaboração de um modelo analítico cuja principal virtude é o caráter quasi-explícito de sua formulação. Tomando como base uma versão prévia desenvolvida na própria EPUSP, minha principal contribuição neste desenvolvimento foi a inclusão de efeitos decorrentes da velocidade de rotação do casco, o que permitiu a inclusão do modelo em simuladores dinâmicos e possibilitou seu emprego no estudo de uma maior gama de problemas práticos, inclusive no estudo de instabilidade dinâmica nas operações de alívio deste tipo de plataforma (problema conhecido como *fishtailing*). A validação do modelo foi obtida mediante ensaios em tanque de reboque e a simplicidade do modelo teórico, construído sobre uma formulação que distingue claramente os principais fenômenos físicos associados ao escoamento, permitiu, entre outras coisas, um melhor entendimento do problema de *fishtailing*.

O segundo tópico de pesquisa se refere ao estudo de movimentos ressonantes de sistemas flutuantes induzidos por efeitos de segunda-ordem em ondas. O principal objetivo aqui foi o de definir uma metodologia apropriada para

a previsão de movimentos ressonantes verticais em sistemas de grande porte. Este problema, identificado em ensaios com modelos em escala-reduzida de novas gerações de sistemas flutuantes de produção, causou preocupação em virtude da ausência de procedimentos bem-definidos para sua previsão e consequente consideração nas diferentes etapas de projeto destes sistemas. Entre outros resultados relevantes, o estudo levou à proposição do emprego de uma aproximação (denominada *aproximação de ruído-branco*) que possibilita uma significativa economia de esforço computacional para a previsão das forças hidrodinâmicas de segunda-ordem e, dessa forma, permite uma rápida verificação dos movimentos ressonantes desde as etapas iniciais de projeto. A validade dos procedimentos propostos foi testada não apenas em tanques de provas, mas também através do monitoramento de uma plataforma semi-submersível em escala-real, o que permitiu uma análise de efeitos práticos normalmente desconsiderados em projeto, como a influência do espalhamento direcional das ondas do mar sobre os movimentos medidos.

Por fim, a terceira e última linha de pesquisa diz respeito, justamente, a atividades de monitoramento em escala-real, as quais adquirem importância cada vez maior para a identificação de problemas operacionais e para a verificação de métodos e procedimentos de projeto. Trata-se do desenvolvimento e implementação de um método de inferência de ondas do mar através do registro de movimentos de navios ancorados ou de plataformas. Este estudo, iniciado há mais de dez anos, envolveu a seleção de métodos de inferência estatística apropriados, a adaptação de técnicas ao problema de estimação com base em navios de grande porte e o desenvolvimento de um pacote computacional específico para a tarefa. Como resultado concreto, hoje se dispõe de um sistema capaz de realizar medidas contínuas de ondas a bordo de plataformas *offshore* dotado de instrumentação simples e robusta, de fácil manutenção. Já testado através de extensos conjuntos de ensaios em tanques oceânicos e também em campanha de testes em campo, este sistema configura atualmente uma importante ferramenta para o levantamento das condições de ondas em regiões de águas profundas, atividade comumente sujeita a inúmeras dificuldades técnicas.

# Abstract

In this text, I try to do a summary of the main contributions arising from my research activities in the area of Hydrodynamics of Offshore Systems. Mostly they concern the work undertaken in the Department of Naval Architecture and Ocean Engineering of EPUSP, whether as a post-graduate student, or as part of my teaching activities, initiated in 2002.

In preparing this document, I chose to highlight the work in three lines of research to which I devoted most of my efforts as a researcher in the past years, leaving aside some short-term activities on related topics. These lines I think contain my most relevant contributions and they are all associated with the development of models and methods for studying the hydrodynamics of floating production systems, with particular emphasis on those operating in areas of great water depth. Thus they mostly reflect the demands associated with the improvement of methods of design and operation of the offshore systems that characterize the exploration and production of oil and gas in the Brazilian coast.

The first line of research addressed in this text concerns the development of a semi-empirical model for predicting the current forces on moored tankers. The main target of this model are the so-called FPSO platforms, usually based on the conversion of large tanker ships. Activities in this area led to the development of an analytical model whose main virtue is the quasi-explicit nature of its formulation. Based on a previous version developed in EPUSP, my main contribution to this development was the inclusion of effects associated to the ship's yaw rotation, which allowed the inclusion of the model in dynamic simulators and also its use in studying a wider range of practical problems, including the study of dynamic instability in the offloading operations of this type of platform (a problem known as *fishtailing*). The validation of the model was obtained by means of towing tank tests and the simplicity of the theoretical model, built on a formulation which clearly distinguishes the major physical phenomena associated with the flow, allowed, among other things, a better understanding of the fishtailing phenomenon.

The second research topic refers to the study of resonant motions of floating systems induced by second-order wave effects. The main goal here was to define a suitable methodology for predicting resonant vertical motions of large-volume platforms. This problem, identified in tests with small-scale models of new generations of floating production systems, caused concern because of the lack of well-defined procedures for its forecast and consequent

consideration in the different stages of design. Among other relevant findings, the study led to the proposal of a simplified approach (the so-called *white-noise* approximation) that allows a significant saving of computational effort to predict the second-order hydrodynamic forces and thus allows a quick check of the eventual resonant motions from the early stages of design. The validity of the proposed procedures was tested not only in wave basins, but also by monitoring a semi-submersible platform in real-scale, allowing an analysis of practical effects often ignored during the system design, as the influence of the directional spreading of waves on the measured motions.

Finally, the third line of research relates precisely to monitoring activities in real-scale, which gain increasing importance for the identification of operational problems and the verification of methods and procedures commonly adopted in the design. It concerns the development and implementation of a method for predicting the ocean waves through the recorded motions of moored vessels or platforms. This study, initiated more than ten years ago, involved the selection of appropriate methods of statistical inference, the adaptation of techniques to the problem of wave estimation based on large ships and the development of a computational package specific to the task. As a concrete result, today we have a system capable of performing continuous measurements of waves aboard offshore platforms which is built with simple and robust instrumentation, and therefore very easy to maintain. Such system, previously tested in ocean basin and also in a field campaign, currently represents an important tool for monitoring the wave conditions in deep water regions, an activity commonly subjected to numerous technical difficulties.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Um Breve Histórico . . . . .	3
1.2	Tópicos de Hidrodinâmica . . . . .	10
1.3	Organização do Texto . . . . .	19
<b>2</b>	<b>Modelo Hidrodinâmico de Forças de Correnteza em Navios Petroleiros Amarrados</b>	<b>21</b>
2.1	Desenvolvimento do Modelo e suas Particularidades . . . . .	23
2.2	Principais Resultados Obtidos . . . . .	29
2.3	Tópicos de Pesquisa Atuais e Resultados Recentes . . . . .	39
<b>3</b>	<b>Estudo de Movimentos Ressonantes Induzidos por Efeitos Não-lineares de Ondas em Baixas Frequências</b>	<b>47</b>
3.1	Aspectos Teóricos e Computacionais . . . . .	50
3.2	Principais Contribuições . . . . .	59
3.3	Um Estudo Recente sobre Turbinas Eólicas Flutuantes . . . . .	70
<b>4</b>	<b>Um Método para Inferência de Ondas a partir dos Movimen- tos de Sistemas Ancorados</b>	<b>77</b>
4.1	O Modelo de Inferência Estatística e os Procedimentos de Medição . . . . .	80
4.2	Principais Contribuições ao Desenvolvimento do Método e Re- sultados Obtidos . . . . .	85
4.3	Estágio Atual da Pesquisa e Novos Tópicos de Investigação . . . . .	95
	<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>99</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>105</b>
	<b>A (Simos et al., 2001)</b>	<b>107</b>
	<b>B (Simos et al., 2002)</b>	<b>121</b>

C (Tannuri et al., 2001)	127
D (Illuminati et al., 2009)	141
E (Matos et al., 2011)	153
F (Matos et al., 2010)	171
G (López-Pavón et al., 2013)	185
H (Tannuri et al., 2003)	197
I (Simos et al., 2010)	217
J (Tannuri et al., 2012)	237
K (Tannuri et al., 2013)	257

# Lista de Figuras

1.1	Processo de <i>deck mating</i> da plataforma P55 . . . . .	6
1.2	Deslocamento das plataformas de produção da Petrobras em função do ano de primeiro óleo. Extraída de Matos et al. (2011) . . . . .	7
1.3	Calado das plataformas de produção da Petrobras em função do ano de primeiro óleo. Extraída de Matos et al. (2011) . . . . .	8
1.4	Representação gráfica de uma das novas plataformas FPSO projetadas para operação na área do Pré-sal. Figura obtida em <a href="http://www.riograndeoffshore.com">www.riograndeoffshore.com</a> ; endereço consultado em 26 de março de 2013 . . . . .	10
2.1	Vista de arranjo experimental usado nos ensaios de bifurcação estática (esquerda) e curvas de bifurcação previstas pelo modelo hidrodinâmico original e com variação do coeficiente $C_Y$ . Extraídas de Simos et al. (2002) . . . . .	32
2.2	Força lateral e momento de guinada do modelo SHIP2 em calado de lastro. Ensaios de <i>yaw-rotating</i> . Velocidades de avanço ( $U$ ) e de rotação ( $r$ ) em escala real. Figura extraída de Simos et al. (2001) . . . . .	33
2.3	Curva de estabilidade para o modelo em condição de calado de lastro. Figura extraída de Tannuri et al. (2001) . . . . .	35
2.4	Comparação de resultados experimentais e teóricos para ensaio de <i>hawser</i> rígido. Modelo em condição de máxima carga. Figura extraída de Tannuri et al. (2001) . . . . .	37
2.5	Comparação de resultados de <i>fishtailing</i> de um sistema SPM em escala real e escala do modelo (1:90). Figura extraída de Tannuri et al. (2001) . . . . .	38
2.6	Operação de alívio de sistema FPSO SMS na Bacia de Campos. Figura extraída de Illuminati et al. (2009) . . . . .	40
2.7	Fotografias de testes de verificação executados no NMRI. Ensaios de medição de forças em dois modelos (esquerda) e ensaios de reboque de sistema FPSO-aliviador conectados por <i>hawser</i> rígido (direita). . . . .	43

2.8	Resultados de ensaios de sistema tandem com <i>hawser</i> rígido. Séries temporais de ângulo do <i>hawser</i> (esquerda) e mapa do escoamento com posição final de equilíbrio (direita). Figuras extraídas de Illuminati et al. (2009) . . . . .	44
3.1	Trechos simultâneos de registros de ondas (a) e de movimento de <i>roll</i> (b) obtidos em ensaio com modelo de plataforma semi-submersível. Figura extraída de Simos et al. (2008) . . . . .	56
3.2	Sobreposição dos espectros de ondas e de movimento de <i>roll</i> correspondentes aos registros da Figura 3.2. Figura extraída de Simos et al. (2008) . . . . .	57
3.3	Representação de espectro de energia de ondas e espectro de grupo de determinado estado de mar. Figura extraída de Pinkster (1980) . . . . .	58
3.4	QTF de <i>pitch</i> (esquerda) e distribuição de energia do espectro de momento de <i>pitch</i> de segunda-ordem para determinada condição de mar (direita). Figuras extraídas de Matos et al. (2011) . . . . .	63
3.5	Espectro de movimento de <i>pitch</i> da plataforma P52. Comparação entre resultados experimentais e teóricos. Figura extraída de Matos et al. (2011) . . . . .	64
3.6	Vista da plataforma semi-submersível P52. Figura extraída de Matos et al. (2010) . . . . .	66
3.7	Amplitudes significativas de <i>roll</i> de 1a e 2a ordens estimados com base nos registros de movimentos da plataforma P52 durante o mês de junho de 2008. Figura extraída de Matos et al. (2010) . . . . .	67
3.8	Representações de um dos espectros de ondas medidos nas proximidades da plataforma P52. Figuras extraídas de Matos et al. (2010) . . . . .	68
3.9	Comparação entre espectros de resposta em <i>roll</i> da plataforma P52: teórico (em vermelho) e estimado a partir dos movimentos medidos (em azul). Figura extraída de Matos et al. (2010)	69
3.10	Comparação entre espectros de momento de <i>roll</i> de segunda-ordem de um FPSO: calculado com qtf completa (azul) e com a aproximação 3.8 (vermelho). Figura extraída de Matsumoto (2010) . . . . .	70
3.11	Representação gráfica da Turbina Eólica Flutuante Hiprwind. Figura extraída de López-Pavón et al. (2013) . . . . .	72
3.12	Vista de montagem do modelo da FWT para ensaios em ondas bi-cromáticas. Figura extraída de López-Pavón et al. (2013) .	73

3.13	Valores de qtf de baixa-freqüência para ensaios com ondas bicromáticas e $\delta\omega = 0,15$ rad/s. Resultados experimentais (em azul), obtidos com modelo completo de 2a ordem (em vermelho) e através da Aprox. de Newman (em verde). Valores em escala-real. Figura extraída de López-Pavón et al. (2013) . . .	74
4.1	RAOs de <i>roll</i> (a) e <i>pitch</i> (b) do FPSO analisado para diferentes condições de carregamento. Figura extraída de Tannuri et al. (2003) . . . . .	86
4.2	Comparação entre valores de altura significativa de ondas estimadas por movimentos do modelo (eixo vertical) e por leitura de provetas de ondas (eixo horizontal). Figura extraída de Tannuri et al. (2003) . . . . .	88
4.3	Vista da balsa-guindaste e lançamento BGL-1. Figura extraída de Tannuri et al. (2012) . . . . .	89
4.4	Condição de mar cruzado ensaiada no tanque do LabOceano com modelo de FPSO; (b) espectro de potência e (a),(d) mapas de contorno de energia estimados pelo método de movimentos; (c) mapa de contorno obtido por análise dos sinais de <i>wave probes</i> . Figura extraída de Simos et al. (2010) . . . . .	91
4.5	Condição de mar cruzado ensaiada no tanque do LabOceano com modelo da balsa BGL-1; mapas de espalhamento de energia e espectro de potência (gráfico central). Figura extraída de Tannuri et al. (2012) . . . . .	92
4.6	Mapas de variação de erro de estimação para diferentes valores dos hiperparâmetros do modelo bayesiano. Figura extraída de Bispo et al. (2012) . . . . .	93
4.7	Ilustração da interface gráfica do <i>software</i> de monitoramento de ondas. Figura extraída de Simos et al. (2012) . . . . .	94
4.8	Comparação entre as medidas de altura significativa de ondas feitas a bordo de um FPSO e dados fornecidos pela NOAA. Figura extraída de Tannuri et al. (2013) . . . . .	97



# Lista de Abreviaturas

- ABIC** Critério de informação Bayesiano de Akaike (*Akaike's Bayesian Information Criterion*)
- BEM** Método de Elementos de Contorno (*Boundary Elements Method*)
- BVP** Problema de valor de contorno (*Boundary Value Problem*)
- CFD** Dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics*)
- FCT** Método de transporte de fluxo corrigido (*Flux-Corrected Transport*)
- FLNG** Sistema flutuante de produção de gás natural liquefeito (*Floating Liquefied Natural Gas*)
- FPSO** Sistema flutuante de produção e armazenamento de óleo (*Floating Production Storage and Offloading*)
- FWT** Turbina eólica flutuante (*Floating Wind Turbine*)
- IPT** Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
- ITTC** *International Towing Tank Conference*
- JONSWAP** *JOint North Sea WAve observation Project*
- MRU** Sensor de medição de movimentos (*Motion Reference Unit*)
- NMRI** *National Maritime Research Institute*
- NOAA** *National Oceanic and Atmospheric Administration*
- QTF** Função de transferência bi-quadrática das forças de segunda-ordem (*Quadratic Transfer Function*)
- RAO** Função de transferência de movimentos (*Response Amplitude Operator*)

**RANSE** Equação de Navier-Stokes média (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation*)

**SMS** Sistema de amarração espalhado (*Spread-Mooring System*)

**SPD** Sistema de Posicionamento Dinâmico

**SPM** Amarração por ponto único (*Single-Point Mooring*)

**TLP** Plataforma de pernas tracionadas (*Tension-Leg Platform*)

**TPN** Tanque de Provas Numérico da Universidade de São Paulo

**VOF** Método de "volume de fluido" (*Volume of Fluid*)

**VLCC** *Very Large Crude Carrier* (classe de petroleiros de grande porte)

# Glossário

**Hawser** Cabo de amarração que conecta a plataforma FPSO e o navio aliviador durante operações de alívio

**Mar local** Mar observado próximo à zona de geração, marcado por forte irregularidade (em inglês, *wind sea*)

**Modelo de hindcast** Método de modelagem matemática que refina suas previsões atuais com base em informações de instantes anteriores acerca do fenômeno modelado

**Movimento de surge** Movimento de avanço (translação longitudinal)

**Movimento de sway** Movimento de deriva (translação transversal)

**Movimento de heave** Movimento de arfagem (translação vertical)

**Movimento de roll** Movimento de jogo (rotação em torno a eixo longitudinal)

**Movimento de pitch** Movimento de caturro (rotação em torno a eixo transversal)

**Movimento de yaw** Movimento de guinada (rotação em torno a eixo vertical)

**Swell** Mar de características quase regulares, gerado longe do ponto de observação

**Turret** Sistema de mancal-rolamento instalado normalmente à proa de um FPSO e que permite que o navio mude seu aproamento

**Wave-probe** Sensor para medição de ondas por leitura de variação de nível d'água



# Capítulo 1

## Introdução

Durante a década de 1980, a área de engenharia naval no Brasil se viu frente a uma importante mudança de cenário. Saía de cena uma indústria naval que, pouco tempo antes, havia mostrado indiscutível pujança, levando o país a ser o segundo maior construtor naval em toneladas de porte bruto construídas (Pasin, 2002). Se não se retirava de vez dos palcos, essa indústria de construção naval pelo menos passava a desempenhar um papel, por assim dizer, coadjuvante. O novo protagonismo cabia a uma florescente indústria de exploração de petróleo no mar que, sintetizada pelos esforços da companhia estatal de petróleo brasileira, a Petrobrás, iniciava um programa um tanto ambicioso de exploração de reservas em águas profundas na Bacia de Campos, no litoral norte do estado do Rio de Janeiro. Os desafios tecnológicos associados a esta campanha davam origem ao chamado programa PROCAP 1000, que visava concatenar e financiar atividades de pesquisa e desenvolvimento voltadas a eliminar os entraves então existentes para a produção em lâminas d'água de até mil metros.

Afrontado por esta radical mudança no panorama da indústria naval, o ensino de engenharia naval no país se viu obrigado a adaptar-se à nova realidade, readequando seu conteúdo programático para acomodar a nova área de atividades que então despontava. Paralelamente, as ações de desenvolvimento tecnológico da Petrobrás logo alcançaram as universidades e institutos de pesquisa do país, trazendo uma demanda de pesquisa de dimensão até então inédita para a área de engenharia naval e seus centros de ensino. Estes eram, de fato, apenas dois: a então Escola de Engenharia da UFRJ (hoje Escola Politécnica), e a Escola Politécnica da USP. Nesta última, o curso de engenharia naval foi iniciado em 1956, por incentivo da Marinha do Brasil, que promovia a criação de um centro de ensino e pesquisa naval na Universidade de São Paulo. Ação sintomática dos efeitos de transição da década de 1980, no ano de 1990 o curso (e o departamento que

o abriga) tiveram sua denominação alterada (ou quiçá melhor, “ampliada”) para Engenharia Naval e **Oceânica**.

Aqui caberia, sem dúvida, um pequeno parêntese quanto ao que se entende por “Engenharia Oceânica”, já que o emprego do nome no Brasil não subentende necessariamente o mesmo conteúdo de suas traduções diretas a outras línguas em cursos no exterior. Longe de pretender fazer qualquer exercício desnecessário de semântica, a discussão aqui é puramente pragmática: em nosso contexto acadêmico, a “Engenharia Oceânica” se confunde com um ramo de engenharia associado à produção e exploração marítima de petróleo e gás. Essa área estaria mais diretamente relacionada com o que se convencionou chamar em inglês “*Offshore Mechanics*”. Podemos argumentar, também, que o contexto de um entendimento mais amplo, de uma engenharia preocupada com todos os aspectos relacionados ao ambiente oceânico (provavelmente subentendido quando da escolha do nome), ainda não adquiriu todo o seu significado por razões puramente práticas. De fato, a área dominante em termos da engenharia de sistemas marítimos no Brasil é hoje a área de petróleo. É provável que em um futuro próximo (e desejável), outros estudos relevantes (como a extração de energia renovável do mar, por exemplo) venham também a demandar o desenvolvimento de tecnologias em uma escala relevante, colaborando para “ampliar” nosso entendimento do nome “Engenharia Oceânica” (e, talvez, aproximando-o mais daquele originalmente pretendido). Neste momento, contudo, essa identificação é a regra e, desta forma, é considerada para os próprios fins deste texto: todos os sistemas oceânicos que serão abordados no decorrer do mesmo se referem a sistemas flutuantes associados à produção de petróleo no mar.

Este tipo de sistema, por sua vez, tem suas especificidades. A principal delas é o fato de que, durante seu período de operação, deve manter sua posição inalterada (obviamente, dentro de determinados limites de excursão). Em outras palavras, são sistemas que, ao menos durante a operação para o qual foram projetados, não devem se deslocar, ou navegar (no sentido de se deslocar em determinado rumo e com uma determinada *velocidade de avanço*). Para atingir esse objetivo, fazem uso de sistemas que podemos classificar como passivos (fundeios com âncoras e linhas de amarração) ou ativos (conjunto de propulsores operado automaticamente através de um sistema de controle; conhecidos genericamente como *sistemas de posicionamento dinâmico*). Não seria um equívoco, portanto, dizer que nos últimos anos a área de engenharia naval e oceânica no Brasil se ocupou quase que exclusivamente de sistemas marítimos que não podem (e não devem) navegar.

No contexto do seu estudo hidrodinâmico, essa característica comum a estes sistemas tem uma implicação bastante forte. A ausência de velocidade de avanço faz com que a origem das forças hidrodinâmicas sobre tais sistemas

decorra exclusivamente da ação das ondas do mar (ou seja, escoamentos de caráter *oscilatório* em uma faixa de períodos bem estabelecida) ou da ação direta da correnteza marítima (que usualmente se entende como um escoamento “permanente” no tempo, e de baixa velocidade). No primeiro caso, a dinâmica dos escoamentos costuma permitir o emprego de uma aproximação fundamental da mecânica dos fluidos, a de *fluido ideal*, tratando o problema (ou pelo menos boa parte dele) através de uma abordagem de escoamento *potencial*. No segundo, por sua vez, os efeitos predominantes costumam ser mesmo de origem viscosa, requerendo um tratamento de fluido real. Entretanto, o fato de os mesmos se caracterizarem por baixas velocidades (e aqui é necessário acrescentar que essa ideia de “baixa” velocidade deve ser entendida como baixos números de Froude), permite desconsiderar, em seu tratamento, os efeitos de superfície livre, possibilitando assim, em alguns casos, simplificações interessantes.

E é exatamente neste contexto, o da hidrodinâmica de sistemas oceânicos fundeados, que se encaixa este trabalho. Desde que iniciei minha carreira científica, seu enfoque sempre recaiu sobre o desenvolvimento de modelos hidrodinâmicos voltados ao estudo deste tipo de sistema. Embora os temas tenham passeado entre diferentes aspectos do comportamento no mar das embarcações que lhes servem de base e os métodos tenham variado (modelos analíticos, semi-empíricos ou numéricos), todos têm em comum o mesmo pano-de-fundo, o dos sistemas flutuantes de produção de petróleo no mar. Assim, parece-me conveniente começar com um breve histórico acerca do desenvolvimento destes sistemas no Brasil, inclusive como uma oportunidade de apresentar os principais problemas práticos que motivaram os estudos relatados nos tópicos que virão em seguida. Este histórico não tem a pretensão de ser exaustivo ou rico em detalhes. A intenção aqui é simplesmente a de descrever as principais características dos sistemas abordados e introduzir as razões pelas quais determinados estudos hidrodinâmicos foram (ou são) necessários.

## 1.1 Um Breve Histórico

Os primeiros sistemas flutuantes de produção de petróleo empregados no Brasil foram baseados em plataformas conhecidas como Semi-Submersíveis. Entre o final da década de 1970 e o início da década posterior, condições conjunturais relativas ao mercado de petróleo incentivavam investimentos na exploração de campos em águas profundas, o que, por sua vez, demandava o desenvolvimento de novas concepções de sistemas de produção. De fato, era sabido que os sistemas fixos então existentes, que serviram como base

para a primeira fase da produção de petróleo *offshore*, haviam atingido seu limite de viabilidade econômica em termos de profundidade de operação. Em 1988, a companhia *Royal Dutch Shell* instalou uma plataforma do tipo jaqueta em uma lâmina d'água de 411m no campo de Bullwinkle, no Golfo do México, e que viria a ser a jaqueta mais profunda instalada até hoje. O conceito de produção baseado em sistemas flutuantes já era empregado em finais da década de 1970 em campos marginais do Golfo do México e do Mar do Norte (Furtado, 1996). Tais sistemas se caracterizavam também pelo emprego de árvores-de-natal molhadas (conjunto de válvulas de comando elétrico/hidráulico instalado no leito marinho, sobre o poço explorado) e a necessidade de barcos para armazenamento do óleo. Ainda de acordo com Furtado (1996), enquanto as operadoras que atuavam nestas regiões não viam este tipo de sistema como uma alternativa viável para a exploração em águas profundas e apostaram no desenvolvimento de novos sistemas que permitissem o emprego de completação seca (árvores-de-natal na própria plataforma), como as TLPs (Plataformas de Pernas Tracionadas, em inglês, *Tension Leg Platforms*), a Petrobrás investiu no desenvolvimento de semi-submersíveis com completação molhada para grandes profundidades. Esse investimento gerou o que segundo Ortiz Neto and Dalla Costa (2007) foi “o primeiro *hardware* genuinamente brasileiro em tecnologia *offshore*”, que foi a reconversão de sondas de perfuração semi-submersíveis em pequenas plataformas de produção, envolveu o desenvolvimento simultâneo de novas técnicas de construção de sistemas de ancoragem e de instalação destes sistemas e, finalmente, alçou a empresa a uma posição de liderança tecnológica em termos de exploração em águas profundas. O emprego deste conceito no Brasil para exploração em águas profundas ocorre até hoje, como atestam as plataformas recém construídas para operação na Bacia de Campos (como as plataformas P51, P52 e P55). Ao contrário das primeiras semi-submersíveis, no entanto, estas novas plataformas são embarcações de grande deslocamento e já foram projetadas para servir como sistemas flutuantes de produção.

Por outro lado, já na década de 1990, passou a se consolidar o emprego de um novo sistema de produção baseado em navios-plataforma denominado FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading System*). Tal conceito consistia, basicamente, na utilização do casco de um navio (em geral, um antigo navio petroleiro convertido) como base para a planta de produção de óleo, montada sobre seu convés principal. Uma das óbvias vantagens deste sistema é a capacidade de armazenamento que passa a estar disponível na própria plataforma, mas havia outras, não tão óbvias, inclusive questões econômicas associadas a um excedente de navios petroleiros de casco simples que passaram a sofrer restrições de operação após mudanças nas regulamentações marítimas internacionais. Havia também uma clara desvantagem

em relação aos sistemas baseados em semi-submersíveis: o fato de que estes cascos não são projetados com o intuito de serem “transparentes” às ondas e, conseqüentemente, apresentarem características pouco desejáveis em termos de comportamento no mar. De fato, dados os grandes movimentos que esses navios podem apresentar em condições severas de ondas, o emprego dos FPSOs é restrito a regiões onde as condições de mar sejam relativamente “amenas” (caso das costas brasileiras em geral, se comparadas, por exemplo, a regiões como o Mar do Norte e o Golfo do México).

Várias versões desse sistema foram desenvolvidas, com variações referentes sobretudo ao sistema de ancoragem. A Petrobrás iniciou operando sistemas próprios que adotavam a configuração conhecida como “*turret*” (ou “torreta”, em português), que consiste na introdução de um sistema de mancalrolamento (normalmente à proa do navio) ao qual se acoplam as linhas de ancoragem e os *risers*. Este sistema permite ao casco girar em torno deste pivotamento e, assim, se alinhar com a resultante das forças ambientais que atuam sobre o mesmo. Diz-se que este tipo de sistema é “*weathervane*”, o que significa que é capaz de “escolher” por conta própria o aproamento mais conveniente, ou seja, aquele que reduz os esforços totais sobre o sistema de amarração. Posteriormente, dadas principalmente as dificuldades construtivas associadas a estas torretas, a Petrobrás optou por um conceito alternativo, mais simples, de amarração: o chamado “*Spread-Mooring System*” (SMS). O SMS nada mais é do que um sistema que prevê a ancoragem distribuída ao redor do casco, com pontos de conexão (*fairleads*) normalmente localizados à proa e à popa da embarcação.

Ainda hoje, a despeito de um projeto piloto na costa nordeste do país (baseado em uma plataforma do tipo Monocoluna) e do projeto de uma TLP para um campo marginal em baixa profundidade, toda a produção de petróleo nacional em águas profundas é baseada no uso de plataformas semi-submersíveis e FPSOs. Ao longo destes quase 40 anos, contudo, os projetos destes sistemas, em particular as semi-submersíveis, passaram por consideráveis mudanças. A Figura 1.1, a seguir, apresenta uma vista do processo de acoplamento do *deckbox* da plataforma P55, realizado em julho de 2012 no Polo Naval do Rio Grande (RS). Projetada para operar em uma lâmina d’água de 1500 metros no campo de Roncador, na Bacia de Campos, trata-se da maior plataforma semi-submersível do Brasil. Com capacidade para produzir até 180 mil barris de petróleo e seis milhões de metros cúbicos de gás natural por dia, a plataforma sintetiza as mudanças sofridas por este tipo de sistema nos últimos anos. Ao contrário dos primeiros sistemas flutuantes de produção, que resultavam da conversão de sondas de perfuração e que, em geral, eram de pequeno porte, esta plataforma, como se vê, já foi projetada e construída para a produção em águas profundas. Na fotografia

também é possível perceber a geometria que caracteriza o casco dessa nova geração de plataformas, com quatro colunas de grandes dimensões e quatro flutuadores (*pontoons*). Aspectos geométricos à parte, a alteração mais



Figura 1.1: Processo de *deck mating* da plataforma P55

notável em termos do projeto de semi-submersíveis no Brasil diz respeito ao aumento progressivo das dimensões destes sistemas. De fato, desde os pontos de vista técnico e econômico, à medida em que a exploração caminhou para campos mais profundos, passou a ser interessante a construção de sistemas de maior capacidade de produção. Por um lado, maiores volumes de deslocamento passaram a ser necessários para fazer frente às maiores cargas de *risers* e linhas de amarração. Por outro, aspectos logísticos associados à manutenção desses sistemas em pontos cada vez mais distantes da costa também representaram um incentivo à construção de plantas de maior capacidade (o que, mais uma vez, requer cascos de maior porte para suportar plantas de maior peso). Estes (e outros) aspectos, aliados a uma perda de vantagem econômica na conversão de sondas de perfuração, levaram à construção de uma geração de semi-submersíveis de grande deslocamento adaptadas, desde seu projeto, às condições dos campos aos quais se destinam. Essa tendência de aumento do porte/delocamento dos sistemas fica bastante claro ao se observar os dados constantes no gráfico da Figura 1.2. Neste, estão representados os deslocamentos (em toneladas) das semi-submersíveis de produção da Petrobrás em função do ano (efetivo ou previsto) do primeiro óleo de cada sistema. Desde as primeiras plataformas da década de 1980, com deslocamentos que giravam em torno das 20 mil toneladas, o incremento de porte é notável, culminando com as mais de 100 mil toneladas da plataforma P55.

A Figura 1.3, por sua vez, apresenta os valores de calado (em metros) destes

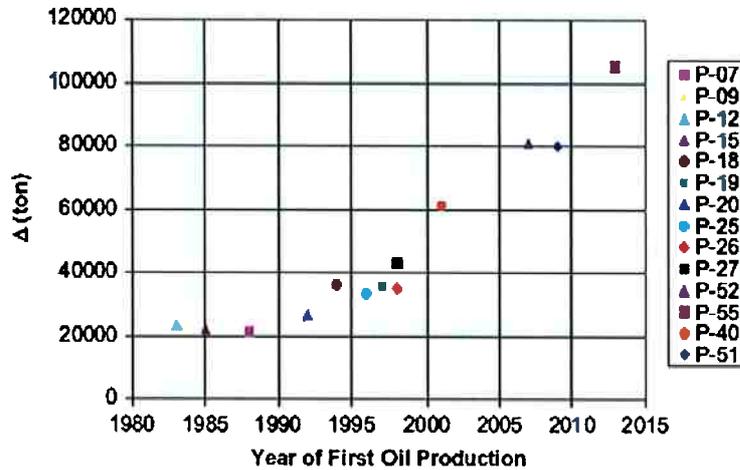


Figura 1.2: Deslocamento das plataformas de produção da Petrobras em função do ano de primeiro óleo. Extraída de Matos et al. (2011)

mesmos sistemas dispostos na mesma base de tempo. A análise destes dados demonstra como o aumento de volume dos cascos não foi acompanhado, em um primeiro momento, de um aumento comparável de calado. De fato, um aumento significativo de calado só se deu a partir do ano 2000, com o projeto da geração de semi-submersíveis mais recente inaugurada com as plataformas gêmeas P51/P52. Nesse momento, os calados que antes variavam pouco em torno dos 20 metros saltaram para mais de 25 metros para, logo em seguida, chegar aos quase 35 metros de calado da plataforma P55.

No que se refere aos FPSOs, as mudanças não foram tão significativas quanto aquelas experimentadas pelas semi-submersíveis, mas alguns aspectos certamente merecem destaque. Um deles se refere às alterações já mencionadas nas configurações do sistema de amarração. Com efeito, a partir do final da década de 1990 a Petrobrás passou a adotar preferencialmente a configuração SMS, reduzindo progressivamente o número de projetos novos que adotavam a amarração em *turret*. Questões de custo, manutenção e arranjo incentivaram a mudança, mas não foram as únicas razões para a mesma. A própria experiência da Petrobrás na operação dos FPSOs em *turret* na Bacia de Campos revelou um aspecto indesejado com respeito ao comportamento *weathervaning* deste sistema: dadas as estatísticas ambientais da Bacia, com relativa frequência os FPSOs passavam por condições nas quais ondas de *swell* com períodos próximos aos períodos típicos de ressonância de jogo do navio acabavam por atingir o mesmo pelo través e, dessa forma, resultavam

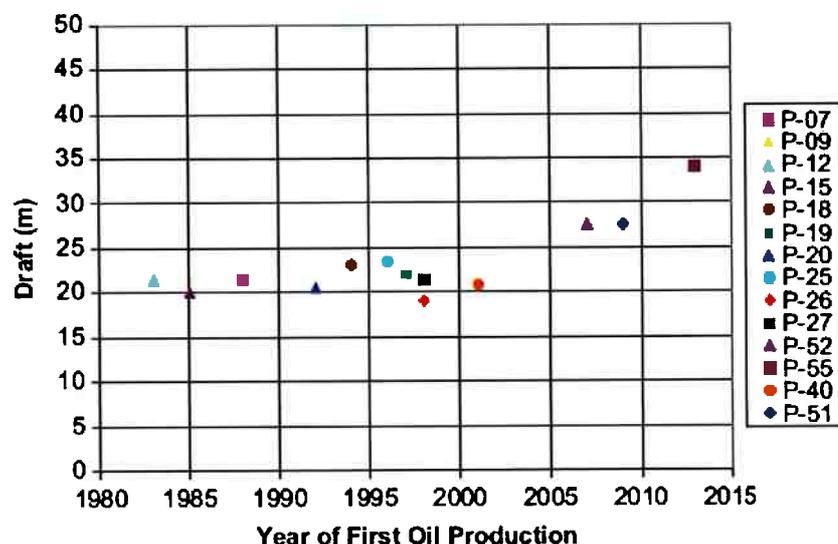


Figura 1.3: Calado das plataformas de produção da Petrobras em função do ano de primeiro óleo. Extraída de Matos et al. (2011)

em grandes amplitudes de movimento. Essas mesmas características meteo-oceanográficas, por outro lado, se mostraram favoráveis para a adoção da nova configuração de sistema de amarração. Um alinhamento das condições mais prováveis de correnteza (que, via de regra, vem do quadrante N-NE, seguindo a corrente do Brasil), com a direção de condições de ondas mais severas (as quais provêm geralmente dos setores SW-S-SE), permitiu definir um aproamento preferencial para os FPSOs em SMS. Efetivamente, um aproamento do navio entre as direções S-SW resulta favorável para o sistema de amarração por combinar os efeitos de cargas menores devido à ação de correnteza sobre o navio com a concomitante redução de esforços em mares extremos, já que estes tendem a atingir o navio pela proa. Ademais, já que os mares de *swell* provêm do mesmo quadrante dos mares de maior intensidade, acompanhando o sentido de deslocamento das frentes frias que passam pela costa da América do Sul, tal aproamento permite também uma redução dos movimentos ressonantes provocados por estas ondas<sup>1</sup>. Apesar destes fatores positivos, que justificam a preferência pelo novo sistema, a restrição de va-

<sup>1</sup>Entre os anos de 2008 e 2010, coordenei um projeto de pesquisa na EPUSP cujo objetivo principal consistia em verificar a metodologia adotada para definir o aproamento dos sistemas FPSO com amarração SMS e definir seus valores preferenciais para as Bacias de Campos e de Santos. Este projeto foi financiado integralmente pela Petrobrás e seus resultados respaldam as considerações aqui apresentadas a respeito da viabilidade dos sistemas SMS.

riação do aproamento imposta pela configuração SMS não é livre de efeitos negativos. O principal se dá com respeito às operações de alívio destes sistemas. Nestas operações, um navio petroleiro convencional (no contexto da operação, chamado de “aliviador” ou, em inglês, “*shuttle tanker*”) é atracado ao navio FPSO para o transbordo do óleo armazenado neste último. Não resulta difícil compreender que estas operações são bastante delicadas e que, portanto, devem ser executadas sob rígidas normas de segurança. Retomando a questão da ancoragem, o caráter *weathervaining* dos FPSOs em *turret* representa um aspecto benéfico para as operações de alívio. Com efeito, como os dois navios (FPSO e aliviador) tendem a se alinhar de forma semelhante com as condições ambientais momentâneas, resulta relativamente fácil manter a distância entre os mesmos durante o transbordo. Isso, contudo, deixa de ser verdade para os FPSOs em SMS. Por esta razão, as operações de alívio destes últimos seguem regras mais restritivas que atualmente exigem o emprego de navios petroleiros especiais, dotados dos chamados “Sistemas de Posicionamento Dinâmico” (SPD).

Além das questões pertinentes ao sistema de ancoragem, os FPSOs também passaram recentemente por uma mudança relativa aos aspectos de projeto e construção de seus cascos. Com o esgotamento dos cascos de navios petroleiros de grande porte disponíveis para conversão, os projetos mais recentes, de forma similar ao ocorrido com as semi-submersíveis, estão partindo agora de novas concepções de casco. É o caso da série de FPSOs projetados para operação na área do Pré-sal, apelidados de “replicantes”. A título de ilustração, a Figura 1.4 apresenta uma vista do desenho de uma destas plataformas. Embora em termos de dimensões principais o casco não se diferencie de maneira pronunciada dos cascos de petroleiros que foram convertidos, na figura é possível perceber algumas modificações de geometria. Em geral, dado que o navio que serve como base para a plataforma não está mais “preso” às restrições de resistência ao avanço de um navio convencional, a maioria delas visa tornar a construção mais simples e ampliar, de certa forma, o espaço disponível para o armazenamento de óleo. Daí as superfícies mais planas e as formas mais “cheias”, resultando em um casco com coeficiente de bloco mais elevado do que o usual para navios convencionais.

Além das alterações de forma, esses navios, que também serão ancorados em configuração SMS, estão sendo projetados com períodos naturais de jogo mais altos, se comparados aos FPSOs hoje em operação. A razão para isto, claro, é o afastamento da frequência de ressonância da faixa de frequências de ondas de maior energia para, assim, reduzir os movimentos ressonantes.

Não por acaso, parte substancial de meus trabalhos de pesquisa na área de hidrodinâmica de sistemas *offshore* teve como motivação o desenvolvimento de modelos hidrodinâmicos para o estudo do comportamento no mar



Figura 1.4: Representação gráfica de uma das novas plataformas FPSO projetadas para operação na área do Pré-sal. Figura obtida em [www.riograndeoffshore.com](http://www.riograndeoffshore.com); endereço consultado em 26 de março de 2013

destes dois tipos de sistemas, os FPSOs e as plataformas semi-submersíveis. E, é este justamente o ponto deste breve histórico, todas estas modificações de projeto pelas quais estas duas concepções passaram nestes últimos anos tiveram algum impacto importante em termos deste estudo, exigindo refinamentos e/ou extensões dos modelos até então empregados para representar efeitos hidrodinâmicos relevantes para o projeto e a operação dos mesmos. Uma discussão desta relação causa-efeito é o alvo da próxima seção.

## 1.2 Tópicos de Hidrodinâmica

O primeiro tópico a ser abordado neste texto trata do desenvolvimento de um modelo hidrodinâmico para as forças devidas à ação da correnteza marítima sobre os cascos de navios petroleiros fundeados em grandes profundidades. Dentre os três temas incluídos neste documento, é, também do ponto de vista cronológico, o primeiro assunto que estudei, servindo como tema de pesquisa de minha tese de doutorado, concluída em 2001 (Simos, 2001). O ponto de partida foi um primeiro modelo proposto pouco antes na dissertação de mestrado do engenheiro André Jacques de Paiva Leite, então do setor de E&P da Petrobrás, junto ao Depto. de Engenharia Naval da EPUSP (Leite, 1997). A motivação do estudo era clara: não havia na literatura um modelo validado, de fácil aplicação, para se estimar com a confiança necessária as forças de correnteza sobre os FPSOs recém instalados na Bacia de Campos. Estes

FPSOs, em sua totalidade, adotavam a configuração *turret* e um modelo de forças de correnteza se fazia necessário para prever corretamente a atitude da embarcação em condições combinadas de vento, ondas e corrente. Obviamente, prever corretamente essa atitude era fundamental para se avaliar uma série de aspectos de projeto (cargas nas amarras, movimentos do casco, etc.) e de operação destes navios (por exemplo, na simulação de operações de alívio). Os poucos modelos disponíveis então para se lidar com o problema de fluxos de correnteza em ângulos de incidência arbitrários sobre o casco normalmente exigiam um grande número de ensaios em escala reduzida, abordavam as correções necessárias em função dos deslocamentos do casco de forma puramente empírica e, via de regra, careciam de uma verificação suficientemente abrangente. Dessa forma, tendo como motivação o estudo dos navios FPSO da Bacia de Campos, o engenheiro André Leite e seu orientador, o Prof. José Augusto Penteado Aranha, propuseram um novo modelo para se estimar as forças de correnteza sobre cascos fixos cuja principal vantagem decorria de seu caráter quasi-explícito, ou seja, do pequeno número de parâmetros externos que tal modelo exigia. Para tanto, o desenvolvimento do modelo recorreu ao emprego de teoria de asas de baixa razão-de-aspecto para descrever as forças em pequenos ângulos de ataque (incidências próximas às de proa/popa), enquanto as forças em ângulos próximos ao de través eram descritas com base em um modelo de *cross-flow* calibrado por apenas dois parâmetros; a transição entre os dois regimes era feita de forma heurística<sup>2</sup>, garantido a suavidade das forças hidrodinâmicas. Validado através de uma série de ensaios com diferentes modelos de petroleiros, o modelo permitia, assim, uma avaliação expedita das forças de correnteza sobre os FPSOs *turrets* em análises *quasi-estáticas* (supondo que as velocidades de movimento do casco fossem pequenas comparadas à velocidade da correnteza). No entanto, ao não incorporar os efeitos de movimento do casco, o modelo apresentava limitações de aplicação e, dentre estas, a mais séria se referia a seu emprego em simulações dinâmicas de operações de alívio. Nestas, FPSO e navio aliviador eram conectados em tandem e esta configuração estava sujeita a instabilidades que faziam com que o navio aliviador descrevesse um movimento que se assemelhava ao da cauda de um peixe (daí o fenômeno ser conhecido como *fishtailing*). Nas simulações para se avaliar os impactos desse tipo de ocorrência sobre a operação de transbordo de óleo, a descrição das forças de correnteza sobre o navio aliviador é de primordial importância e, nesse caso, a aplicação de um modelo estático ficava comprometida. Foi justamente na busca de uma extensão de suas possíveis aplicações que iniciei, em 1997, meus estudos sobre o modelo.

---

<sup>2</sup>Característica que lhe valeu, posteriormente, a alcunha de “Modelo Heurístico”

O objetivo da extensão do modelo foi o de incorporar os efeitos hidrodinâmicos decorrentes dos movimentos do navio (com pequenas velocidades) no plano horizontal, sem, com isso, “descaracterizar” o modelo original. Em outras palavras, o equacionamento dos novos termos de forças deveria seguir a estrutura já adotada para a descrição das forças estáticas (separando os efeitos para diferentes incidências) e, mais importante, preservar o caráter quasi-explícito da primeira versão, o que implicava limitar a um mínimo o número de novos parâmetros de calibração necessários para sua aplicação. Com efeito, o novo modelo Heurístico apresentado em Simos (2001), manteve, como requisito para sua calibração, unicamente os mesmos dois parâmetros já previstos pelo modelo original. Parte da verificação do novo modelo teórico se deu através da realização de ensaios que emulavam os movimentos de *fish-tailing* de navios aliviadores, com o reboque de modelos a partir de barras rígidas articuladas em suas proas (reproduzindo, assim, a ação de *hawsers* rígidos). A boa aderência observada entre os resultados experimentais e os resultados de simulações destes ensaios baseadas no modelo estendido justificaram sua aplicação a este tipo de estudo e o mesmo foi, então, incorporado ao simulador dinâmico de operações *offshore* que a EPUSP desenvolvia à época para a Petrobrás<sup>3</sup>.

A alteração nas configurações de ancoragem dos FPSOs, com a introdução dos sistemas SMS, trouxe, por sua vez, novos problemas para o estudo das operações de alívio. Ao contrário das operações baseadas em *turret*, quando os dois navios dispostos em *tandem* naturalmente se alinhavam uma vez que as direções das forças resultantes sobre os dois navios eram bastante próximas, as operações baseadas em FPSOs SMS podem experimentar situações em que o ângulo relativo entre os navios é consideravelmente maior. Assim, dada a tendência de cargas aero-hidrodinâmicas maiores sobre os navios, o alívio de sistemas SMS é submetido a normas mais rígidas de operação, exigindo, entre outros aspectos, o emprego de navios aliviadores dotados de SPD. O estudo do comportamento dinâmico destes navios e a determinação de requisitos mínimos de potência dos sistemas de posicionamento dinâmico passaram a ser relevantes para este tipo de operação e, mais uma vez, a questão da adequação dos modelos hidrodinâmicos voltou à cena. O problema, desta vez, decorria dos possíveis efeitos de interferência hidrodinâmica entre os dois cascos. De fato, dependendo da posição relativa entre os dois navios e da direção de incidência de correnteza sobre os mesmos, o aliviador pode ter seu casco parcial ou totalmente imerso na esteira turbulenta que se

---

<sup>3</sup>Trata-se do simulador *Dynasim*, que hoje é o simulador-padrão empregado nos projetos de ancoragem de sistemas flutuantes desenvolvidos na Petrobrás, e que também deu origem ao simulador de maior capacidade de processamento que é o núcleo do Laboratório *Tanque de Provas Numérico* (TPN) da EPUSP.

forma à popa do FPSO e, quando o ângulo de ataque da mesma sobre o FPSO é relativamente grande, as variações de fluxo nesta esteira têm impacto relevante sobre as forças hidrodinâmicas experimentadas pelo navio aliviador. Isso exigiu o desenvolvimento de novos modelos capazes de levar em conta, ao menos de forma aproximada, estes efeitos de “sombra” entre os dois cascos e, é claro, do ponto de vista hidrodinâmico o problema resulta muito mais complexo. Aqui, dois aspectos passam a ser importantes: primeiro, como os efeitos viscosos de separação da camada-limite sobre o casco do FPSO à montante altera o escoamento na posição onde se encontra o outro navio e, segundo, como contabilizar os efeitos de um fluxo variável (em velocidade e direção) sobre o casco de último. Em função destas novas demandas, coordenei um projeto de pesquisa na EPUSP destinado ao estudo destes efeitos de interação hidrodinâmica. O projeto, desenvolvido entre os anos de 2006 e 2008, foi financiado pela Petrobrás e incluiu uma série de ensaios em tanques de provas executados no *National Maritime Research Institute* (NMRI), em Tóquio. Como um dos resultados deste projeto, uma nova versão do modelo de forças de correnteza foi proposta, incluindo, mais uma vez de maneira heurística, os efeitos de variação no fluxo incidente e sua aplicação em um simulações dinâmicas se mostrou vantajosa em termos de tempo e esforço computacional, quando confrontada a uma análise baseada exclusivamente em códigos comerciais de CFD.

Como segundo tópico de estudo, destaco o problema de movimentos ressonantes lentos de sistemas flutuantes de produção induzidos por ação das ondas do mar. Aqui, é importante contextualizar melhor o próprio objeto da pesquisa, partindo de uma breve descrição da natureza do problema: No estudo de comportamento no mar de sistemas *offshore* ancorados em grandes profundidades, a análise dos chamados movimentos de deriva-lenta que o sistema realiza nas mais diversas condições de mar (os chamados *slow-drifts*) é, hoje em dia, uma atividade de projeto corriqueira. Estes movimentos se caracterizam por serem movimentos ressonantes no plano horizontal, ocorrendo, portanto, com períodos equivalentes aos períodos naturais de excursão do sistema, estes definidos pelas características inerciais da plataforma e pela rigidez conferida pelo sistema de amarração. Em águas profundas, esses períodos naturais costumam ser bastante altos, na casa dos 100 ou 200 segundos e, portanto, muito acima dos períodos típicos de energia do espectro de ondas. A excitação destes movimentos se dá, então, por efeitos hidrodinâmicos *não lineares* decorrentes da interação entre ondas de diferentes frequências que coexistem em um mesmo estado de mar. Do ponto de vista teórico, a natureza do fenômeno pressupõe uma dificuldade considerável para o cálculo numérico das forças hidrodinâmicas envolvidas. Todavia, para os sistemas em questão, em função de seus elevados períodos de ressonância e da

ausência de efeitos hidrodinâmicos de profundidade, algumas aproximações propostas na literatura permitiram simplificar sobremaneira o cômputo das forças de *slow-drift*, limitando o esforço necessário à solução do problema hidrodinâmico *linear*. Para os projetistas destes sistemas, em especial, a solução do problema linear é uma tarefa um tanto trivial, auxiliada hoje por uma vasta gama de ferramentas numéricas comerciais. Com o emprego das mencionadas aproximações amparado por uma base experimental considerável, construída ao longo de anos através de ensaios com diferentes tipos de sistemas de produção, o problema de *slow-drift* de sistemas flutuantes como semi-submersíveis e FPSOs em águas profundas deixou de ser um assunto de debate científico já há alguns anos<sup>4</sup>. Contudo, dada a origem do fenômeno hidrodinâmico, a existência de forças de excitação não lineares em baixas frequências não se restringe às forças que acarretam movimentos no plano horizontal. De fato, componentes de forças em baixas frequências ocorrem nos seis graus de liberdade do sistema flutuante mas, devido às suas pequenas magnitudes (se comparadas às forças que oscilam nas frequências de ondas) somente são capazes de causar movimentos relevantes se estes forem amplificados por efeitos de ressonância; e os mesmos serão tão mais intensos, em geral, quanto menores forem as frequências de ressonância do sistema em questão. Por suas características (geométricas e inerciais), os sistemas de produção usados para a exploração da Bacia de Campos não eram suscetíveis a movimentos ressonantes induzidos por efeitos não lineares de ondas que não fossem aqueles associados aos seus movimentos de deriva no plano horizontal<sup>5</sup>. Esse panorama mudou, no entanto, a partir do projeto das novas gerações de semi-submersíveis e FPSOs em finais da década de 1990. Os ensaios realizados com modelos em escala reduzida destes novos sistemas em tanques de provas passaram a indicar, claramente, a ocorrência de movimentos ressonantes relevantes fora das faixas de frequências dos espectros de ondas ensaiados. Dado o ineditismo do problema, esses movimentos foram

---

<sup>4</sup>Cabe neste ponto um parêntese relativo a uma renovação de interesse no problema de deriva que acompanhou o recente surgimento de novas concepções de sistemas *offshore*, sobretudo os sistemas de engenharia associados à produção e transporte de gás natural liquefeito (ou LNG, da sigla em inglês), como terminais de descarga flutuantes ou navios de produção e armazenamento (os FLNG). A novidade aqui é o fato de estes sistemas estarem projetados para locais próximos à costa, em regiões de baixas profundidades. Isso faz com que as aproximações teóricas comumente usadas nos estudos de *slow-drift* em águas profundas percam a validade e, dessa forma, exigem a solução do correspondente problema hidrodinâmico não linear, agora ainda mais difícil em função dos mesmos efeitos de profundidade.

<sup>5</sup>Descartadas, portanto, as ressonâncias em *heave* e *roll* dos FPSOs, normalmente dominadas pelas forças induzidas nas próprias frequências de onda, isto é, por efeitos ditos lineares.

motivo de preocupação por parte dos projetistas destes sistemas e suscitaram, assim, estudos visando a caracterização do fenômeno, sua modelagem teórica e computacional e a avaliação dos possíveis impactos em termos de projeto. É exatamente a esse estudo, o estudo de movimentos ressonantes lentos nos movimentos verticais de sistemas de produção *offshore*, que se refere o segundo tópico abordado neste texto. À continuação, será apresentada uma breve descrição das razões que levaram à ocorrência destes movimentos nos sistemas mais recentes, seguida de uma rápida descrição das particularidades deste tópico de pesquisa.

Analisemos, primeiramente, algumas características relacionadas aos dois tipos de sistemas flutuantes em questão e como as mesmas foram alteradas em suas versões de projeto mais recentes. As plataformas semi-submersíveis se distinguem por serem sistemas que procuram reduzir os possíveis movimentos verticais ressonantes de seus cascos fazendo uso de períodos naturais acima da faixa de períodos de energia significativa das ondas do mar. Dessa forma, os períodos próprios de *heave*, *pitch* e *roll* desses sistemas se situam (ou, melhor dizendo, se situavam) normalmente em uma faixa entre 20 e 25 segundos. As plataformas da nova geração projetada pela Petrobrás, no entanto, passaram por um considerável aumento de volume de deslocamento, como explicado na seção anterior (ver Figura 1.2). Esse aumento de volume foi acompanhado de uma elevação nos períodos naturais, principalmente em relação aos movimentos angulares, que passaram a apresentar valores na faixa dos 40 segundos ou até mais, favorecendo, assim, a intensificação dos movimentos induzidos por efeitos não-lineares em baixa frequência. Um aumento semelhante pode ser observado nos períodos naturais de *roll* dos novos projetos de FPSOs. Enquanto estes sistemas provinham de conversões de petroleiros convencionais, seus períodos estavam relativamente “atados” àqueles apresentados pelo navio antes da sua conversão. Dado que os períodos de *roll* (movimento mais “problemático” em função de seus amortecimentos relativamente baixos) dos navios em questão costumam se situar dentro da faixa de maior energia dos espectros de mar, esse sempre foi, do ponto de vista de seu comportamento no mar, o “calcanhar de Aquiles” dos sistemas FPSO. Assim, a partir do momento em que os projetistas se viram livres das restrições impostas pela conversão, trataram de providenciar um aumento destes períodos naturais de forma a dessintonizar a ressonância de *roll* da faixa de frequências importante das ondas. Obviamente, essa alteração acarretou um inevitável aumento dos movimentos de segunda-ordem, que passaram a ser evidentes nos ensaios em tanques de provas destas novas plataformas. Embora o saldo da mudança seja indiscutivelmente positivo, já que os movimentos ressonantes lentos experimentados por esses navios são de amplitudes muito menores do que aquelas que os mesmos teriam se fossem mantidos os períodos na-

turais típicos de seus predecessores, isso trouxe a necessidade de se antever, ainda em fase de projeto, a magnitude destes movimentos e suas possíveis consequências.

No que se refere à modelagem teórica/computacional deste problema hidrodinâmico, os valores dos períodos naturais em questão, muito mais baixos se comparados àqueles associados à deriva no plano horizontal, pressupunha um primeiro problema. De fato, rapidamente se verificou que a abordagem simplificada comumente adotada para tratar o problema dos *slow-drifts* (comumente baseada na chamada aproximação de Newman; ver Newman (1974)) não produzia bons resultados<sup>6</sup>. Esse impeditivo, por si só, já exigiria um tratamento mais completo, com o cálculo das forças de excitação de segunda-ordem em diversas combinações de frequências<sup>7</sup>. Além disso, seguindo-se a técnica de perturbação que separa o problema hidrodinâmico original, não linear, em uma série ordenada de problemas de contorno lineares, é possível deduzir que essas forças apresentam duas parcelas de origens distintas; a primeira delas decorre de efeitos quadráticos da solução de primeira-ordem e, como tal, requer apenas a solução do problema linear, a outra depende diretamente do potencial de velocidades de segunda-ordem e, conseqüentemente, exige a solução do problema de contorno correspondente. A dificuldade associada à estimativa numérica dessa segunda parcela é considerável. Sabe-se também que a importância relativa dessa parcela de força, com respeito àquela decorrente dos efeitos quadráticos, aumenta com a profundidade e, nesse aspecto, o aumento de calado experimentado não só pelas novas semi-submersíveis (ver Figura 1.3) mas também, em menor grau, pelos novos FPSOs poderia representar uma complicação adicional, a ser estudada. Essas e outras questões de ordem prática também serviram de motivação para um projeto de pesquisa EPUSP-Petrobrás realizado entre os anos de 2006 e 2008 e também para duas orientações de doutorado. Como resultado, obtiveram-se não apenas uma caracterização ampla do fenômeno e de suas consequências para os dois tipos de sistemas flutuantes, como também propostas de simplificações alternativas, que permitem reduzir consideravelmente o esforço computacional necessário para se tratar o problema, facilitando uma avaliação expedita dos efeitos de segunda ordem ainda nas fases iniciais de projeto. Adicionalmente, os modelos teóricos desenvolvidos ao longo destes estudos foram incluídos no simulador dinâmico

---

<sup>6</sup>É sabido que o erro associado a este tratamento do problema cresce com o quadrado da frequência natural do sistema.

<sup>7</sup>A aproximação de Newman permite substituir esse cálculo pelo uso de uma única componente de força, a componente constante no tempo chamada força de deriva-média (*mean drift*), cujo cômputo exige exclusivamente a solução do problema hidrodinâmico linear.

do TPN, que passou a ser capaz de reproduzir os efeitos ressonantes lentos também nos movimentos verticais das plataformas e, conseqüentemente, a influência dos mesmos em outros aspectos importantes do projeto, como na dinâmica das linhas de ancoragem e *risers*.

Por fim, o terceiro e último tópico de hidrodinâmica que compõe este texto, embora tenha igualmente como pano de fundo o problema geral de comportamento no mar de sistemas flutuantes de produção, tem um caráter distinto. Trata-se do desenvolvimento de um método de inferência estatística das condições de ondas observadas em determinado local por meio da análise dos movimentos que as mesmas provocam (ou provocaram) em uma embarcação. O princípio é idêntico ao empregado pelas boias oceanográficas, muito embora, ao se tratar de uma embarcação de grande porte, sua dinâmica própria tenha que ser considerada no processo de estimação. Esta linha de pesquisa teve início no ano de 1999 e, desde então, se mantém ativa com o constante aprimoramento dos algoritmos de inferência e com a extensão dos processos de verificação e validação dos métodos, inclusive com campanhas de medição em campo.

A principal motivação para esse estudo surgiu da dificuldade enfrentada pela Petrobrás para manter um número mínimo de boias de medição operando nas áreas de interesse de exploração. Além dos óbvios problemas relacionados à amarração das boias em zonas de grandes profundidades, outros aspectos menos óbvios, inclusive a depredação e o furto destes equipamentos, tornam sua manutenção bastante difícil. Alternativas como medições a partir de varreduras de radares instalados nas plataformas vêm sendo adotadas na tentativa de sanar esse problema, mas diversos fatores técnicos têm, na prática, comprometido sua efetividade<sup>8</sup>. Nesse contexto, a possibilidade de se obter estimativas de ondas através de um sistema embarcado que requer o simples registro dos movimentos da plataforma representa uma alternativa bastante atraente.

As razões pelas quais um constante monitoramento das condições de ondas das áreas de exploração é necessário são várias: para levantamento dos dados que suprem as estatísticas de longo termo que definem as características meteoceanográficas da região, nas quais se baseiam os critérios de projeto dos sistemas que operarão na mesma; como auxílio para a tomada de decisão de operações, com base nas informações instantâneas de altura e direção de ondas; para posterior validação de modelos computacionais do comportamento no mar destes sistemas, como parte de campanhas

---

<sup>8</sup>Dentre os fatores com os quais nos deparamos ao longo da pesquisa podemos citar, por exemplo, a necessidade de uma campanha de calibração relativamente longa, problemas de bloqueios de leitura por outros equipamentos das plataformas e interferência das condições meteorológicas do local.

de monitoramento em campo e, até mesmo, como *input* para alimentação de sistemas de posicionamento dinâmico como forma de antever as forças de ondas que deverão ser compensadas por tal sistema (processo conhecido como *feedforward*). Logicamente, determinados equipamentos de medição se mostram mais ou menos apropriados para cada uma destas aplicações. Assim, por exemplo, por estar menos sujeita a limitações das condições de medida, as boias seriam (à parte os problemas operacionais mencionados anteriormente) a alternativa mais adequada para um levantamento de longo prazo<sup>9</sup>. Para aplicações que envolvem a operação de uma embarcação específica, os métodos embarcados (radar ou inferência por movimentos) são mais atrativos, embora mais sujeitos a limitações de medidas ou dificuldades técnicas de medição. No que se refere ao método baseado nos movimentos das plataformas, a principal limitação é bastante óbvia: só é possível estimar condições de ondas efetivamente capazes de induzir movimentos significativos dos cascos destas embarcações.

Justamente por estarem sujeitos a maiores movimentos, dentre os dois tipos de sistemas flutuantes empregados na Bacia de Campos, os FPSOs foram a primeira escolha para servir como base para a inferência de ondas. Porém, por se tratar de navios de grande porte, ao serem utilizados como sensores de ondas os mesmos atuam filtrando as componentes que não têm energia suficiente para impor movimentos relevantes de seus cascos. Assim, ondas acima de uma determinada frequência não contribuem para a resposta dinâmica do navio e, conseqüentemente, estarão fora do alcance do método em questão. Em uma etapa inicial da pesquisa, quando se fez um estudo de viabilidade do método, facilmente se determinou para os FPSOs uma frequência limite (ou frequência de corte) correspondente a um período de pico do espectro de ondas de cerca de 7 segundos. Isso significa que espectros de ondas com períodos de pico inferiores a este não poderiam ser estimados com precisão razoável pela análise dos movimentos. Significa também que, mesmo para espectros de ondas com períodos maiores, parte da energia do espectro será filtrada e que esse corte será tanto menos severo quanto menor for tal período. A meu ver, essa perda de informação inerente ao processo é um dos motivos que levou a uma predominância do uso de métodos de inferência

---

<sup>9</sup>É necessário destacar, porém, o rápido desenvolvimento de sistemas de inferência de ondas por satélites. Ao longo deste trabalho de pesquisa, tivemos a oportunidade de empregar os dados disponibilizados publicamente pela agência meteorológica americana NOAA para a região da Bacia de Campos e, em todas as comparações realizadas com métodos locais de medição, a aderência das previsões se mostrou bastante forte. De fato, dada a dificuldade de se obter registros de comparação, em boa parte do tempo empregamos a base da NOAA como único auxílio para a verificação das estimativas obtidas com o método em desenvolvimento na EPUSP.

estatísticos capazes de aportar informações prévias a respeito da variáveis de medição (ou seja, informações qualitativas a respeito dos espectros de ondas esperados). De fato, na literatura prévia o problema de inferência a partir de movimentos de navios já vinha sendo estudado, embora o foco recaísse sempre sobre os navios em curso (ou seja, com velocidade de avanço, o que torna o problema um pouco mais complicado). Com base em uma revisão dos trabalhos prévios disponíveis, o método que parecia mais promissor era baseado em um modelo de inferência baseado na chamada *estatística Bayesiana*, caracterizada justamente por seu princípio de "correção" das previsões mediante o aporte de informações conhecidas *a priori* acerca do fenômeno em questão (neste contexto, deve-se destacar o trabalho pioneiro de Iseki and Ohtsu (2000)). No caso da estimação de ondas, tais informações se referiam ao grau de suavidade na variação da energia de ondas com respeito à direção de propagação das mesmas, o qual era controlado por um parâmetro que também deveria ser estimado em cada processo de medida por meio de um critério de informação Bayesiano (posteriormente passou-se a empregar um segundo parâmetro referente à variação de energia em frequência; maiores detalhes serão apresentados no capítulo que trata deste tópico de pesquisa).

Ao longo do desenvolvimento desta linha de pesquisa, um método alternativo foi estudado, baseado em uma estimação paramétrica de espectros cujas formas eram estipuladas *a priori* a partir de espectros padrão como os de Pierson-Moskowitz ou JONSWAP. Dificuldades associadas principalmente à convergência numérica do método, porém, fizeram com que o mesmo fosse descartado e que optássemos pela abordagem Bayesiana, adaptando-a ao problema de estimação baseada em plataformas FPSO. No decorrer deste processo de adaptação, vários aprimoramentos originais foram propostos e validados e diversos aspectos ainda não discutidos na literatura correspondente foram estudados em profundidade, como a sensibilidade da inferência a erros na previsão da resposta dinâmica do navio e a efeitos não lineares desta resposta, como os que caracterizam o movimento de *roll* dos navios. O estudo, que também serviu de tema para orientações de mestrado e doutorado na EPUSP, já conta com uma extensa validação experimental através de ensaios em tanque oceânico e também com verificações baseadas em medições de campo realizadas em um dos FPSOs que operam na Bacia de Campos.

### 1.3 Organização do Texto

A forma como o presente texto se estrutura é bastante direta: à continuação, três capítulos são dedicados, respectivamente, a cada um dos três tópicos de pesquisa mencionados na seção anterior, seguindo a ordem na qual os mes-

mos foram apresentados. Assim, o Capítulo 2 se destina à apresentação dos resultados obtidos no estudo do modelo de forças de correnteza sobre navios petroleiros fundeados, enquanto o Capítulo 3 trata das investigações sobre os movimentos ressonantes lentos em ondas e, por fim, o Capítulo 4 aborda o tema da inferência estatística de ondas. Cada um destes capítulos tem como objetivo apresentar uma descrição resumida dos aspectos principais da pesquisa e ressaltar as contribuições originais em cada tópico, deixando uma apresentação mais detalhada de hipóteses, equacionamento matemático, metodologia e resultados obtidos para a coletânea de artigos científicos que são apresentados ao final do presente documento, na forma de Anexos. A seção final de cada capítulo é sempre dedicada à discussão de tópicos de estudo que se encontram em desenvolvimento e à sugestão de trabalhos futuros que podem vir a aprimorar e estender as contribuições aqui apresentadas.

## Capítulo 2

# Modelo Hidrodinâmico de Forças de Correnteza em Navios Petroleiros Amarrados

Com a rápida expansão, a partir de meados dos anos 1990, dos projetos de exploração da Bacia de Campos baseados em sistemas FPSO, surgiu a demanda por um modelo hidrodinâmico capaz de prever as forças de correnteza às quais os mesmos estariam submetidos ao longo de sua operação, modelo este que constitui, certamente, uma importante peça do ferramental de projeto destes sistemas. Paralelamente, uma análise dos riscos associados às operações de alívio destes sistemas, com o objetivo de estabelecer normas e procedimentos que garantissem a segurança das operações, também requeria a consideração das forças de correnteza atuantes não apenas sobre o FPSO mas também sobre o navio aliviador que estaria conectado à plataforma. Esta necessidade, em particular, tornou-se ainda mais premente com os primeiros projetos de ancoragem SMS destes sistemas, quando se abriu mão das vantagens do alinhamento natural do sistema FPSO-aliviador que a ancoragem em *turret* oferecia.

Do ponto de vista de uma solução do escoamento que as origina, o problema da determinação das forças de correnteza sobre o casco destas plataformas é, de fato, bastante exigente. Tais forças têm origem em efeitos combinados de fricção e de variação de pressão originados por separação da camada-limite em um problema caracterizado por números de Reynolds altos. Mesmo com o avanço das técnicas de CFD e com o rápido aumento da capacidade de processamento numérico, uma solução computacional do problema é, ainda, um assunto delicado. Por outro lado, os ensaios em escala-reduzida, alternativa sempre à mão para os estudos de hidrodinâmica de navios, neste caso também sofrem com as incertezas associadas à impossibilidade prática de

se obter semelhança dinâmica dos escoamentos. Curiosamente, ao contrário do que se pode pensar em um primeiro momento, o fato de o navio em questão estar ancorado e de os números de Froude serem suficientemente baixos para que efeitos de superfície-livre possam ser desconsiderados não implicam, do ponto de vista da engenharia, uma solução mais simples do problema. Na realidade, na solução dos problemas de resistência ao avanço ou de manobras de navios, as parcelas de forças associadas às ondas geradas pelo casco são, digamos, a parte do problema sobre a qual se tem maior controle, para a qual existe uma solução mais eficaz e confiável. Isso se pode afirmar tanto com relação à solução computacional, para a qual modelos de escoamento potencial ou, mais recentemente, modelos dotados de técnicas aprimoradas para a simulação da superfície-livre<sup>1</sup> empregados nos códigos de solução baseados em RANSE se mostram capazes de fornecer soluções adequadas, como no que se refere ao emprego de modelos em escala reduzida, já que a similaridade dinâmica, nesse aspecto, pode ser obtida em tanque de provas. Na ausência, ou melhor dizendo, na irrelevância dos efeitos de ondas, subsiste apenas a parcela do escoamento de mais difícil solução. Isso não quer dizer, porém, que não se possa vislumbrar para o problema um modelo de forças relativamente simples que permita, com o auxílio talvez de alguns poucos ensaios, fornecer estimativas para essas forças que sejam suficientemente boas para emprego em um contexto de projeto. As razões para tal otimismo serão discutidas a seguir.

É possível fazer uma clara associação do problema de determinação das forças de correnteza sobre os FPSOs com o estudo geral de manobras de navios, uma das áreas que caracterizam a hidrodinâmica de sistemas navais. No desenvolvimento deste último, a determinação em se obter uma abordagem única, que permitisse tratar o problema de forma ampla, incluindo todos os possíveis formatos de casco e de seus apêndices e suas diferentes velocidades de deslocamento, levou à inevitável proposição de um método com forte dependência de resultados experimentais de “calibração”. Mais do que um modelo teórico de previsão de forças, a abordagem de “*derivadas hidrodinâmicas*” representa um método de sistematização através do qual as forças em questão são levantadas através de uma extensa série de ensaios em tanques de provas. O método, que encontra como precursor o trabalho de Abkowitz (1964), permite tratar o problema de manobras sem discriminar os diferentes tipos de cascos, podendo ser empregado tanto no estudo de ma-

---

<sup>1</sup>Dentre estas técnicas destacam-se, por exemplo, aquelas baseadas nos métodos genericamente conhecidos como *Flux-Corrected Transport Methods*, FCT, (Boris and Book, 1973; Zalesak, 1979), dos quais derivou-se também o método *Volume of Fluid*, VOF, (Hirt and Nichols, 1981) hoje de ampla aplicação nos códigos comerciais de CFD que lidam com problemas de superfície-livre.

nobras de petroleiros de grande porte como nas previsões das características de resposta de veleiros de alta velocidade. Serve apenas, contudo, para se estudar o problema de manobras em torno das velocidades de cruzeiro das embarcações, já que lança mão de um modelo de forças baseado na expansão em série das mesmas tendo como ponto de partida a condição de velocidade de avanço constante. Dentre outras restrições, a abordagem pressupõe então pequenos ângulos de incidência do escoamento sobre o casco, o que faz com que o modelo perca a validade, por exemplo, no estudo de manobras de navios em baixas velocidades (necessário, por exemplo, para a previsão de manobras de atracação em portos e outras operações). Nesses casos, assim como para o estudo das plataformas FPSO, os efeitos de ondas passam a ser pouco importantes, mas os ângulos de incidência aparente do escoamento podem ser bastante grandes devido justamente às rotações do casco efetuadas em baixas velocidades de avanço. Visando o estudo deste tipo de problema, surgiram alguns modelos hidrodinâmicos que têm como ponto em comum um tratamento mais heurístico do problema. A contrário de nosso estudo de interesse, todavia, estes modelos normalmente permanecem sujeitos às dificuldades associadas à inclusão de diferentes tipos de navios e geometrias de cascos e à necessidade de se representar efeitos de lemes e propulsores.

No que se refere ao problema particular dos FPSOs (e aliviadores), a geometria básica do casco está definida: é aquela comum aos petroleiros de grande porte. Ademais, não há velocidade de avanço envolvida, muito menos efeitos de propulsores ou lemes (com a possível exceção do caso de operações de alívio efetuadas por navios DP). No que se refere à sua associação aos estudos de manobras, portanto, o problema está claramente sujeito a um menor número de variáveis e, conseqüentemente, apresenta melhores chances de ser representado através de um modelo com menor dependência de parâmetros externos. Foi exatamente com esse intuito que, em finais dos anos 1990, passou a ser desenvolvido na EPUSP um modelo hidrodinâmico de forças de correnteza destinado exclusivamente ao problema dos FPSOs e aliviadores que tivesse como característica principal uma baixa exigência de ensaios de calibração prévios em tanques de provas e que representasse, assim, uma ferramenta de auxílio expedita para o projeto destes sistemas.

## 2.1 Desenvolvimento do Modelo e suas Particularidades

O desenvolvimento partiu de um modelo para as forças estáticas atuantes sobre o casco de navios petroleiros, ou seja, contemplando a situação em que

o fluxo incidente de correnteza é constante no tempo, em módulo e direção, ao longo do comprimento do navio. Pressupôs, portanto, uma abordagem quasi-estática do problema, na qual a premissa básica é a de que as velocidades de movimento do casco (associados à sua translação e rotação no plano horizontal) possam ser consideradas pequenas em comparação com a velocidade de correnteza incidente. Este modelo foi apresentado por Leite (1997) em sua dissertação de mestrado junto à EPUSP e, de forma concisa, reproduzido em Leite et al. (1998) juntamente com resultados de validação por ensaios em tanques de provas e uma discussão do problema de bifurcação do equilíbrio estático de FPSOs ancorados em configuração *turret*.

Para fins de completude deste texto, cabe mencionar que a formulação que compõe este modelo está sintetizada no artigo Simos et al. (2001), apresentado em anexo (Anexo A). A mesma é compreendida pelas conjunto de equações (4) a (6) deste anexo, das quais se depreende que o equacionamento matemático é, de fato, bastante simples. Os coeficientes de força dependem, além do ângulo de correnteza incidente, de parâmetros geométricos do casco e de apenas dois parâmetros externos, os quais devem ser calibrados para cada casco em estudo, a saber, os coeficientes de força e momento do casco sob correnteza de través (ou seja, incidência de 90 graus). Na definição destes coeficientes, explicada em detalhes em Leite (1997), dois regimes de escoamento foram considerados: o escoamento que ocorre sob pequenos ângulos de ataque, quando a correnteza incide pela proa ou popa da embarcação (ou seja, com pequenos ângulos relativos ao plano central do navio), e o que se convencionou chamar regime de escoamento cruzado (*cross-flow*), quando a incidência se dá por través ou em direções próximas a esta. O modelo foi então concebido considerando-se aspectos qualitativos dos escoamentos em cada um destes regimes, de forma a estabelecer um equacionamento de validade “local”, e posteriormente providenciando-se uma transição (heurística) entre os dois regimes que garantisse a necessária “suavidade” nesta transição. Assim, para as faixas de pequenos ângulos, quando a força longitudinal é dominada por efeitos de arrasto e a força transversal por efeitos de sustentação, fez-se uso de um modelo de asas de pequena razão-de-aspecto (caracterizada, aqui, pela razão entre o calado e o comprimento da embarcação) para representar o comportamento predominante em função do ângulo de ataque do fluxo incidente. Quando, por outro lado, da modelagem das forças no regime de *cross-flow*, sabendo-se da predominância dos efeitos de arrasto dominados por variação de pressão decorrente da separação da camada-limite sobre o casco, a opção foi por um modelo que capturasse o caráter quadrático destas forças com respeito à velocidade do fluxo incidente para, a partir desta, definir-se sua variação em termos de ângulos de incidência. Sobre este modelo básico que define a variação das forças com a direção da correnteza,

foram incorporados fatores que determinam suas magnitudes em cada regime de escoamento e a escolha destes fatores representou, obviamente, um aspecto crucial do desenvolvimento. Alguns detalhes deste processo devem ser discutidos com um pouco mais de detalhes por envolverem particularidades importantes do modelo ou porque serão fundamentais, mais adiante, para as discussões sobre a extensão do mesmo.

No regime de pequenos ângulos, seguindo a analogia com a teoria de asas curtas, a força longitudinal foi representada pela combinação de efeitos de arrasto de fricção e esteira (ou arrasto *de forma* do casco) com o arrasto induzido proporcionado pelos efeitos de sustentação. Para os primeiros, pôde-se fazer uso de um modelo clássico em engenharia naval, empregado regularmente nos cálculos de resistência ao avanço de navios, que se baseia na chamada linha de fricção proposta pela ITTC (que determina o coeficiente de arrasto por fricção com base no número de Reynolds do escoamento) e em um *fator de forma* que procura acrescentar a parcela de força decorrente dos efeitos de esteira à popa do navio (detalhes podem ser encontrados, por exemplo, em van Manem and van Oossanen (1988)). O modelo em questão tem aceitação ampla na área de engenharia naval e valores representativos dos coeficientes de forma para diferentes tipos de navios, obtidos em ensaios de reboque em tanques de provas, podem ser encontrados na literatura. Cabe ressaltar ainda que neste coeficiente de força longitudinal reside o único fator de dependência do modelo com respeito ao número de Reynolds do escoamento, já que, para todas as demais forças (sustentação ou *cross-flow*), o modelo supõe que tal dependência possa ser desconsiderada (essa hipótese voltará a ser discutida mais adiante). A principal dificuldade no regime de pequenos ângulos residia, então, na definição dos coeficientes de força e momento para os termos de sustentação, para os quais a sensibilidade a variações na geometria do casco e apêndices é maior. Para fins de cálculo da força longitudinal, dado que em grande medida esta é composta por efeitos de fricção e esteira que se supõem bem representados, os coeficientes de sustentação foram baseados diretamente naqueles deduzidos através da teoria de Jones (Jones, 1946) para asas planas retangulares de pequena razão-de-aspecto. Não se considerou necessária a incorporação de qualquer correção adicional que incorporasse parâmetros geométricos do navio, como, ao contrário, se propôs para a força transversal e para o momento. Para estes, sua magnitude em pequenos ângulos de correnteza depende fortemente dos efeitos de sustentação, tornando algum tipo de correção inevitável. Como estas forças encontram correspondência naquelas extensivamente estudadas no problema de manobras de navios, a opção adotada por Leite (1997) foi, então, a de empregar as aproximações analíticas propostas por Clarke et al. (1982) para as derivadas hidrodinâmicas lineares de força transversal e de momento (mais

particularmente, dado que se tratava de uma modelagem estática, para as derivadas que se convencionou denotar por  $Y_v$  e  $N_v$ , as quais não incorporam efeitos de rotação do casco). No entanto, é importante mencionar aqui que, em comparação, por exemplo, com a confiabilidade que se atribui ao modelo que foi incorporado para representar as “forças de resistência” longitudinais, a seleção destes coeficientes é, digamos, problemática. O nível de imprecisão associado a estas aproximações tem consequências importantes, como se verá mais adiante, no estudo da dinâmica de sistemas FPSO-aliviador em *tandem*, um dos alvos de estudo quando da extensão do modelo de forças. Por esta razão, essa questão voltará a ser discutida em maiores detalhes mais adiante.

A definição dos coeficientes de força para o regime de *cross-flow* foi, por sua vez, bastante objetiva. Ciente da sensibilidade do arrasto a particularidades geométricas do casco (especialmente em relação às regiões de proa e popa) e de seus apêndices (leme, bolinas) e da ausência de uma base de dados experimental prévia que permitisse antever com razoável precisão os valores destes coeficientes, Leite (1997) propõe que os mesmos sejam preferencialmente *medidos* através de ensaios de reboque em tanque de provas. Com isso, evidentemente, o modelo perde seu caráter puramente “explícito”, e passa a depender de dois coeficientes externos (ou de calibração) que devem ser levantados para cada casco em estudo<sup>2</sup>. Por outro lado, é importante observar que, uma vez que um modelo em escala do casco esteja disponível, a obtenção experimental destes coeficientes requer pouco esforço, bastando para isso ensaios de modelo cativo com uma única direção de reboque, correspondente à incidência de correnteza por través<sup>3</sup>.

O modelo de Leite (1997) foi validado através de ensaios de reboque com modelos cativos de diferentes cascos de navios petroleiros. Sua eficiência foi também comprovada no estudo das bifurcações estáticas experimentadas pelos sistemas ancorados em *turret*, um aspecto de projeto importante à época. A estabilidade aqui se refere ao aproamento do sistema sujeito a uma corren-

---

<sup>2</sup>Tratam-se dos coeficientes referenciados em todos os trabalhos sobre este modelo de forças como  $C_Y$  e  $lC_Y$ , respectivamente para a força lateral e o momento.

<sup>3</sup>De fato, quando o modelo foi originalmente proposto, sugeriu-se inclusive uma versão completamente explícita do mesmo para situações em que os coeficientes em questão não pudessem ser obtidos através de ensaios prévios, versão esta obtida mediante o emprego de possíveis aproximações para tais coeficientes. As aproximações sugeridas são discutidas também em Simos et al. (2001), no Anexo A, e envolvem principalmente o uso de coeficientes de arrasto de seções retangulares publicados por Hoerner (1965). Hoje, do ponto de vista prático, o emprego destas aproximações para estudos envolvendo sistemas FPSOs me parece pouco recomendável. Além da base de dados já construída a partir de ensaios de diversos destes sistemas, a partir das qual se poderia levantar valores mais representativos para essa calibração, os coeficientes em questão podem ser obtidos também, com razoável acurácia, através de uma modelagem numérica em códigos comerciais de CFD.

teza de proa e o parâmetro de controle corresponde à posição longitudinal em que o ponto de pivotamento (o próprio *turret*) é instalado. Há uma posição crítica para este ponto, à ré da qual o equilíbrio estático é perdido e o FPSO não mais é capaz de manter seu alinhamento com a correnteza incidente. A previsão desta posição crítica do *turret* e o novo ângulo de equilíbrio que o navio assumiria em condições instáveis foram estudados em sua dissertação e o modelo estático de forças se mostrou apto a reproduzir de forma bastante precisa os resultados obtidos em ensaios realizados em tanque de provas.

Simultaneamente ao desenvolvimento do modelo estático de forças, trabalhava-se na EPUSP na elaboração de um simulador computacional capaz de reproduzir o comportamento no mar de sistemas de produção ancorados. Tratava-se do simulador Dynasim (Nishimoto et al., 2002), desenvolvido sob demanda para a Petrobrás, e que hoje constitui o *software* de referência para os projetos de ancoragem executados ou avaliados por esta empresa. À época, o simulador carecia de um modelo forças de correnteza apto a tratar da dinâmica de navios ancorados, ou seja, de um modelo capaz de lidar com uma gama mais ampla de situações, envolvendo também acelerações dos navios e casos em que as velocidades de deslocamento do(s) casco(s) fossem comparáveis à velocidade de correnteza incidente. Uma das aplicações de maior interesse era, como já comentei anteriormente, a dinâmica dos navios conectados em configuração SPM<sup>4</sup> quando estes se encontram em regime de *fishtailing*, condição para a qual não era claro se um modelo quasi-estático seria capaz de fornecer previsões confiáveis. Como opções iniciais para a modelagem das forças de correnteza, foram implementados neste simulador dois modelos semi-empíricos previamente disponíveis na literatura, a saber, aqueles propostos por Takashina (1986) e por Obokata (1987). Estes dois modelos, em particular, se preocupavam com a representação das forças hidrodinâmicas em manobras de baixas velocidades e, portanto, procuravam cobrir toda a possível faixa de ângulos de incidência de fluxo. Os dois, no entanto, apresentavam aspectos negativos no que se referia às aplicações-alvo do simulador: o primeiro requeria a determinação de um conjunto grande de derivadas hidrodinâmicas (para algumas forças, até de 5ª ordem) em ensaios de modelo cativo e de *yaw-rotating*<sup>5</sup>, exigindo, portanto, um considerável esforço experimental; o segundo, por sua vez, adotava uma abordagem um

---

<sup>4</sup>*Single Point Mooring*, denominação dada às condições de amarração por um ponto de âncora/conexão único. É o caso, por exemplo, dos navios atracados a monobóias e também dos aliviadores conectados a um FPSO através de um *hawser* durante as operações de transbordo.

<sup>5</sup>Tipo de ensaio no qual o modelo é rebocado com velocidade de translação constante enquanto se imprime ao casco um movimento de rotação (também com velocidade constante) em torno de um eixo vertical que, em geral, passa por seu centro de gravidade.

tanto diferente para prever as forças totais, incluindo efeitos de rotação do casco com base exclusivamente nas forças estáticas (medidas sem os efeitos de tal rotação). Neste caso, conhecidas as forças estáticas (que poderiam inclusive ser estimadas de acordo com o modelo de Leite (1997)), sua aplicação era bastante expedita. Todavia, o caráter eminentemente heurístico do modelo, desprovido de uma base teórica associada a aspectos hidrodinâmicos do escoamento, e a falta de um conjunto sólido de validações experimentais para cascos de navios petroleiros punham em dúvida a confiabilidade de suas previsões para os estudos de interesse.

Foi nesse contexto, então, que comecei a trabalhar na extensão do modelo estático de Leite (1997), com o objetivo de incluir os efeitos de movimentos do casco (em translação e rotação) para, dessa forma, torná-lo apto para o estudo de casos em que a dinâmica do navio é relevante (caso do problema de *fishtailing*) e permitir sua incorporação ao simulador Dynasim.

O trabalho, que foi tema de minha tese de doutorado ((Simos, 2001)), partiu de uma análise crítica do modelo estático, procurando mapear suas principais vantagens e limitações, para então avaliar a viabilidade de uma extensão para se tratar de problemas mais complexos, como a dinâmica de sistemas SPM. Dentre os principais aspectos desta análise, uma questão central dizia respeito às possíveis margens de erro associadas à representação de forças no regime de pequenos ângulos de incidência, que foi discutida à luz da variabilidade observada entre diferentes conjuntos de aproximações analíticas que visavam aproximar as derivadas hidrodinâmicas lineares de navios com base em regressões sobre resultados experimentais. Dentre estes encontrava-se o conjunto proposto por Clarke et al. (1982), empregado na dedução do modelo estático. Outro aspecto abordado foi a avaliação de possíveis efeitos de escala na obtenção experimental dos coeficientes de *cross-flow* ( $C_Y, lC_Y$ ), a partir da qual foram feitas sugestões de procedimentos que visavam reduzir a influência de tais efeitos nas medidas em tanques de provas.

A extensão do modelo de forças de correnteza, com a inclusão dos efeitos de rotação do casco, foi descrita em Simos et al. (2001) (ver Anexo A). Em linhas gerais, ela compreendeu as seguintes modificações:

i) A inclusão de aproximações para as derivadas hidrodinâmicas lineares de força lateral e momento que são função da velocidade de rotação do casco  $Y_r, N_r$ . Mantendo-se a abordagem adotada pelo modelo original, tais aproximações foram também extraídas do trabalho de Clarke et al. (1982), embora uma ressalva tenha sido feita sobre o fato de que, em comparação com as derivadas de translação  $Y_v, N_v$ , estas estavam baseadas em regressões sobre medidas experimentais que apresentavam uma dispersão bastante maior. Ressaltava-se, então, que novos ensaios de verificação se faziam necessários para se analisar a aderência proporcionada pela adoção destas novas apro-

ximações.

ii) A correção dos termos de força e momento de *cross-flow* mediante a consideração de um modelo de arrasto seccional, que passou a incorporar a variação de velocidade do escoamento cruzado resultante da velocidade de rotação do casco. Tal modelo levou em consideração uma variação típica do coeficiente de arrasto seccional entre as seções de proa e de popa de um navio petroleiro, garantindo, ao mesmo tempo, a compatibilidade entre os valores globais de arrasto e momento e os parâmetros de calibração ( $C_Y, lC_Y$ ). Dessa forma, a inclusão dos efeitos de rotação nas forças de *cross-flow* foi feita sem a necessidade de se incorporar qualquer parâmetro de ajuste adicional.

iii) A incorporação de um termo de momento que levasse em conta o efeito de amortecimento proporcionado pela geração de vorticidade no escoamento quando do movimento de rotação do casco; este efeito é fundamentalmente tridimensional e não poderia ser captado pelo modelo seccional descrito em (ii). Para este termo de momento, cuja variação é quadrática na velocidade de rotação, foi adotada uma expressão diretamente proporcional ao coeficiente de arrasto  $C_Y$ , com fator de proporcionalidade definido por meio de ensaios de rotação pura (sem velocidade de avanço) de diferentes modelos de navios petroleiros.

É possível notar, então, que a extensão realizada procurou preservar as peculiaridades mais marcantes do modelo original: seguiu a mesma ideia de transição heurística entre diferentes modelos de forças, cada qual válido apenas em um determinado regime de escoamento, e manteve seu caráter quasi-explicito, sem requer qualquer acréscimo no número de parâmetros externos. A validade deste modelo mais geral foi então confirmada mediante comparação com um extenso conjunto de resultados experimentais obtidos em tanque de provas, atestando que um modelo semi-empírico simples, que exige apenas um pequeno esforço de calibração, poderia de fato ser útil para a previsão das forças de correnteza sobre as plataformas FPSO. Esta verificação experimental, com um resumo de seus principais resultados, será discutida na próxima seção. O *modelo heurístico estendido* foi então implementado no simulador Dynasim como uma das opções para o cálculo de forças de correnteza em petroleiros amarrados, e hoje se encontra disponível também no simulador-base do laboratório Tanque de Provas Numérico da USP.

## 2.2 Principais Resultados Obtidos

Do trabalho que realizei objetivando a extensão do modelo hidrodinâmico, o primeiro resultado destacável diz respeito a uma discussão sobre a consistência do equacionamento matemático proposto para o modelo estático.

A discussão, relevante à época, residia sobretudo em uma diferença observada entre este modelo (e outros que se propõe ao estudo de manobras de baixas velocidades) e os modelos clássicos de derivadas hidrodinâmicas que seguiam a abordagem originalmente proposta por Abkowitz (1964). Tal diferença consistia na forma de variação da força transversal ao casco com o ângulo de incidência do escoamento para pequenos ângulos de ataque: quadrática, segundo os primeiros; cúbica, de acordo com os últimos. Do ponto de vista prático, na análise de problemas associados à dinâmica de sistemas ancorados, essa discussão podia ser considerada, por assim dizer, um tanto bizantina, já que o impacto destas diferenças sobre as magnitudes das forças hidrodinâmicas é, de fato, insignificante. Entretanto, quando do estudo de estabilidade estática de sistemas SPM, essa diferença de modelagem provocava uma variação qualitativa de resposta que chamou a atenção. Esse estudo consistia basicamente na determinação dos parâmetros críticos de estabilidade para um sistema SPM (basicamente, a posição longitudinal do ponto de pivotamento sobre o casco), verificando em que condições o sistema permaneceria alinhado (de forma estável) à correnteza incidente (caso que podemos definir pelo ângulo  $\psi = 0$ ) e como o mesmo se comportaria quando se encontra em situação instável ou, em outras palavras, como seria a variação do novo ângulo de equilíbrio ( $\psi \neq 0$ ) em função deste parâmetro. O comportamento do sistema instável nas vizinhanças do ponto crítico de estabilidade (*ponto de bifurcação*) segue o comportamento de uma bifurcação em *pitchfork*. A questão era simples: estudos prévios realizados, por exemplo, por Papoulias and Bernitsas (1988), mostravam que o emprego de um modelo hidrodinâmico cúbico para este estudo de estabilidade resultava em curvas de bifurcação que seguem o comportamento clássico das curvas em *pitchfork*, com uma variação dependente da raiz quadrada do parâmetro de bifurcação nas vizinhanças do ponto crítico de estabilidade, enquanto os estudos de estabilidade estática de sistemas *turret* apresentados por Leite et al. (1998) resultavam em um padrão de variação distinto para estas curvas. Dessa forma, considerando que esse tipo de observação suscitava dúvidas quanto à própria consistência do modelo hidrodinâmico, decidi investigar de maneira mais profunda a origem das diferenças e como as mesmas poderiam ser influenciadas por fatores como a geometria dos cascos em questão <sup>6</sup>. As conclusões resultantes deste estudo foram apresentadas em Simos et al. (2002),

---

<sup>6</sup>Este estudo foi quase que integralmente realizado durante minha estada como pesquisador visitante da Universidade de Michigan/Ann Arbor entre os anos de 1998 e 1999. Nesta ocasião, houve a oportunidade para discussões bastante interessantes com o Prof. Michael M. Bernitsas, então meu supervisor. Ademais, devo a ele a disponibilização do canal de ensaios desta universidade para a execução dos testes que foram fundamentais para a conclusão do estudo.

artigo que constitui o Anexo B do presente texto. Nele, são apresentados resultados de ensaios de bifurcação estática que realizei com um modelo de navio porta-contenedores (o modelo padrão ITTC S-175), através dos quais foi possível levantar a curva de bifurcação experimental para este casco. Os resultados apontavam claramente para o fato de que esta curva se aproximava mais às previsões dos modelos de forças cúbicos e, de fato, o emprego do modelo estático de Leite (1997) levou a resultados com um comportamento qualitativo discrepante em relação aos ensaios para pequenos ângulos de bifurcação. Como, por outro lado, esse modelo recuperava bem o padrão de bifurcação de diferentes cascos de petroleiros (Leite et al., 1998), os novos resultados apontaram para o fato de que a geometria do casco desempenhava um papel relevante neste comportamento. Efetivamente, Hooft (1994) já havia mostrado, na análise dos coeficientes de arrasto seccionais de um casco semelhante ao ensaiado, uma redução abrupta destes coeficientes para pequenos ângulos de ataque (especialmente para valores abaixo de 10 graus). Era razoável imaginar, então, que as formas mais afiladas do navio porta-contenedores levasse a uma variação mais significativa da força transversal ao casco para pequenos ângulos (observada a analogia com as forças em um fólio, quando efeitos de separação levam a um estol mais pronunciado de fólios de menor razão-de-aspecto), e que estes efeitos poderiam ser mais suaves no caso dos navios petroleiros, dadas as suas formas mais rombudas. Tendo esse aspecto em vista, foi fácil definir um modelo de ajuste baseado em uma variação do coeficiente de *cross-flow*  $C_Y$  para pequenos ângulos de ataque que reproduzisse os resultados obtidos nos ensaios com o porta-contenedores. De fato, era óbvio que uma variação linear deste coeficiente (na forma  $C_Y = c * \psi$ ,  $c = \text{cte}$ ) em pequenos ângulos transformava a variação da força transversal de quadrática em cúbica, recuperando as previsões dos modelos clássicos de derivadas hidrodinâmicas. A Figura 2.1, a seguir, apresenta uma vista do arranjo experimental usado neste estudo e um gráfico com as curvas de bifurcação previstas segundo o modelo estático original ( $C_Y$  constante) e considerando a variação proposta para o coeficiente de *cross-flow* em pequenos ângulos, juntamente com os resultados experimentais obtidos com o modelo S-175. Neste gráfico, a abscissa corresponde à distância do *turret* avante da seção mestra do navio, adimensionalizada por seu comprimento de linha d'água; a ordenada representa os ângulos de equilíbrio com a direção do escoamento incidente. Percebe-se, então, que a diferença observada entre as curvas de bifurcação *pitchfork* pode ser facilmente explicada por uma variação de força transversal mais intensa em pequenos ângulos. Dessa forma, embora não se tratasse de um problema com consequências relevantes para os problemas práticos aos quais os modelos se destinam, o estudo serviu para lançar alguma luz sobre a questão da compatibilidade entre as duas diferen-

tes abordagens adotadas pelos modelos hidrodinâmicos em questão e para dirimir uma dúvida que alimentava certa discussão quanto à consistência da formulação heurística.

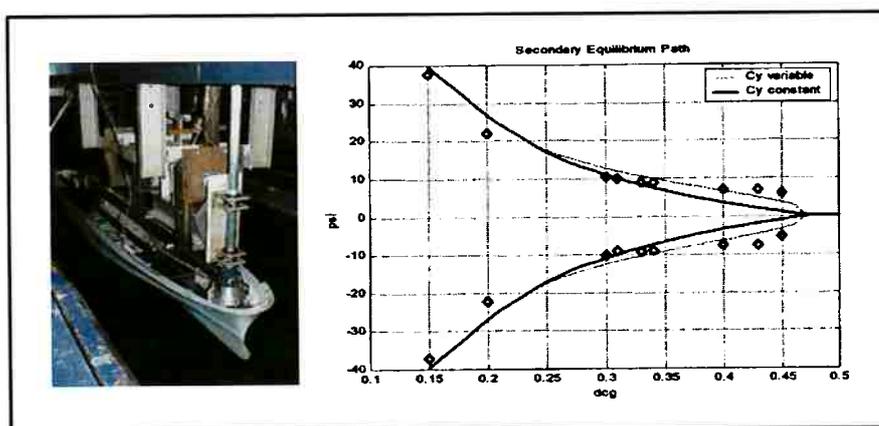


Figura 2.1: Vista de arranjo experimental usado nos ensaios de bifurcação estática (esquerda) e curvas de bifurcação previstas pelo modelo hidrodinâmico original e com variação do coeficiente  $C_Y$ . Extraídas de Simos et al. (2002)

A validação da nova versão do modelo hidrodinâmico foi obtida mediante comparação de seus resultados com os de um conjunto de ensaios de *yaw-rotating* conduzidos com diferentes modelos de navios petroleiros em diferentes calados. Os resultados dessa comparação são apresentados e discutidos em Simos et al. (2001) (Anexo A). São, via de regra, bastante satisfatórios, mesmo para os casos de ensaios com velocidades de rotação do casco relativamente altas. A título de ilustração, a Figura 2.2 reproduz alguns destes resultados. Nela, é possível observar a aderência entre os valores de força lateral e momento medidos ao longo dos ensaios e aqueles previstos pelo modelo hidrodinâmico.

O artigo em questão apresenta também uma verificação do desempenho que seria obtido com a aplicação da versão *explícita* do modelo hidrodinâmico, na qual os coeficientes de calibração são estimados com base nos valores de arrasto seccional apresentados por Hoerner (1965). Neste caso, mostra-se que os erros associados a esta aproximação não são suficientes para alterar sobremaneira a qualidade das predições, embora, ao menos para um dos modelos, discrepâncias um pouco mais significativas tenham sido observadas<sup>7</sup>.

<sup>7</sup>Os resultados que ilustram essa comparação podem ser observados na Fig.9 do Anexo A.

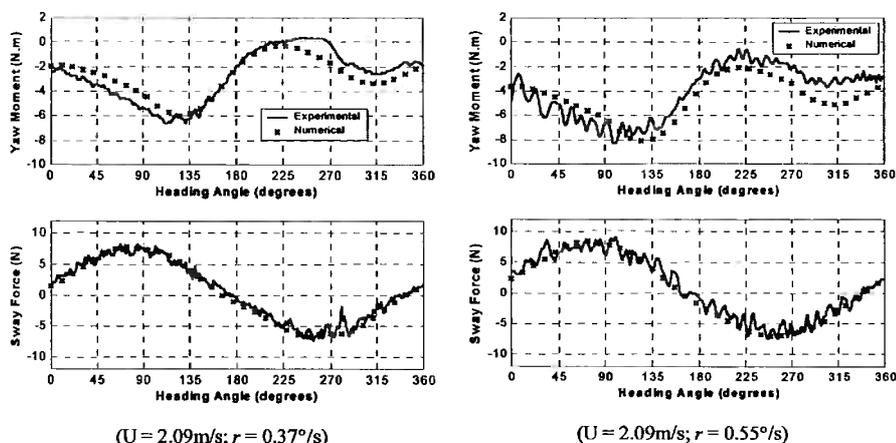


Figura 2.2: Força lateral e momento de guinada do modelo SHIP2 em calado de lastro. Ensaio de *yaw-rotating*. Velocidades de avanço ( $U$ ) e de rotação ( $r$ ) em escala real. Figura extraída de Simos et al. (2001)

Por fim, outro conjunto de resultados importante foi obtido através de um estudo envolvendo o problema de instabilidade de navios amarrados em SPM. Como já ressalté anteriormente, a principal motivação deste estudo consistia em verificar a capacidade do modelo hidrodinâmico de prever corretamente as forças envolvidas quando o navio está sujeito aos movimentos característicos das instabilidades de *fishtailing*. O artigo apresentado no Anexo C deste texto (Tannuri et al., 2001) aborda este estudo e várias são as contribuições importantes que ele traz.

Primeiramente, há que se notar que a ausência de resultados prévios que servissem de paradigma exigia a execução de um conjunto de ensaios dedicado ao problema; e a própria concepção destes ensaios nada tinha de trivial. De fato, vários eram os fatores que criavam dificuldades para a obtenção de medidas adequadas em tanque de provas. A principal delas consistia em como garantir que, dentro do tempo disponível para os ensaios de reboque (limitado pelo comprimento útil do tanque e dependente da velocidade de reboque desejada), fosse possível transpor os efeitos dinâmicos transientes e ainda obter um número razoável de ciclos de oscilação que se pudesse considerar “em regime” (e aqui entrava a questão dos períodos de oscilação, por sua vez dependentes de outros parâmetros do problema como o comprimento do *hawser* empregado, sua posição de conexão e o calado do modelo). Para que estas condições fossem cumpridas, uma modelagem simplificada do problema dinâmico foi concebida, através da qual alguns fatores que contribuía para o prolongamento dos efeitos transientes foram eliminados, em especial, a presença do navio que faz o papel do FPSO (em geral à montante do escoamento

que incide sobre o navio aliviador em operações de transbordo) e a dinâmica própria do *hawser* (cuja flexibilidade introduz efeitos transientes adicionais no problema). Chegou-se, então, a uma concepção na qual o modelo do navio aliviador é rebocado mediante uma barra rígida (fazendo o papel de um *hawser* rígido, capaz de suportar forças tanto de tração como de compressão). No entanto, embora esta concepção simplificada colaborasse para a obtenção de um regime dinâmico no decorrer dos ensaios, um outro fator ainda impunha dificuldades sérias: a dinâmica de *fishtailing* não é isenta de efeitos de escala significativos em sua transposição para as dimensões do tanque de provas e estes efeitos de escala atuam no sentido de tornar o sistema em escala-reduzida mais estável do que o sistema real.

Este é outro aspecto interessantíssimo do problema. Na realidade, a dinâmica do navio aliviador conectado por intermédio de um *hawser* a um ponto fixo é análoga à dinâmica de um pêndulo, analogia na qual a força de arrasto longitudinal do casco faz o papel de força gravitacional. Esta força longitudinal é responsável pela quase totalidade dos efeitos restauradores na dinâmica de *fishtailing* e, fato evidente desde os primeiros estudos de resistência ao avanço de navios em tanques de reboque, é justamente sobre essa componente de força que pesam os maiores efeitos de escala. Dependendo fundamentalmente do número de Reynolds do escoamento, essa componente é superestimada nos ensaios, quando os efeitos do atrito hidrodinâmico sobre o casco se fazem notar de forma mais intensa. Disso decorrem facilmente duas conclusões acerca do ensaio em questão: primeiro, a dinâmica de um navio em *fishtailing* não pode ser observada diretamente em tanque de provas, tornando-se imprescindível, para isso, uma extrapolação baseada em um modelo hidrodinâmico de forças capaz de “corrigir” os efeitos de escala envolvidos; segundo, quanto menor a velocidade de correnteza emulada no ensaio (velocidade de reboque do modelo), mais estável será o sistema, se mantidos todos os demais parâmetros de ensaio inalterados. E era esse último aspecto o qual, na prática, complicava ainda mais a obtenção das medidas desejadas. De fato, observou-se experimentalmente que, se fossem mantidas velocidades de correnteza compatíveis com os valores característicos da Baía de Campos, os ensaios resultariam muito próximos do limite de estabilidade dos sistemas modelados. Esse aspecto pôde ser estudado em maiores detalhes mediante uma análise de estabilidade do sistema dinâmico, que empregava como modelo de forças hidrodinâmicas o modelo heurístico anteriormente validado através dos ensaios de *yaw-rotating*. Através deste estudo, baseado em um linearização do sistema dinâmico em torno da posição de equilíbrio original (alinhamento do navio com a direção de correnteza incidente), foi possível levantar diagramas de estabilidade baseados em dois parâmetros, a saber, a razão entre comprimento do *hawser* e comprimento do navio e o

coeficiente de arrasto friccional do casco, este último dependente do número de Reynolds. A Figura 2.3, a seguir, reproduz o resultado da curva de estabilidade prevista para o modelo ensaiado (modelo de um navio VLCC) em condição de calado de lastro. Apresenta também, sobre esta curva, os valores do coeficiente friccional ( $C_f$ ) previsto para o modelo em quatro diferentes velocidades de correnteza (estas são indicadas por seus valores em escala reduzida e correspondem às velocidades de reboque do modelo, devidamente calculadas para reproduzir os mesmos números de Froude na escala real; a escala dos ensaios era de 1:90).

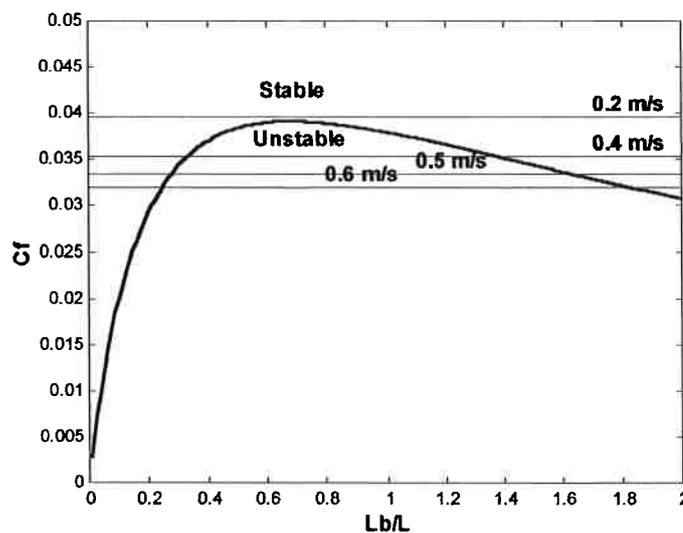


Figura 2.3: Curva de estabilidade para o modelo em condição de calado de lastro. Figura extraída de Tannuri et al. (2001)

Percebe-se, então, que, para velocidades de reboque iguais ou inferiores a  $U = 0.2m/s$ , o sistema ensaiado resulta estável, independentemente do comprimento de *hawser* considerado<sup>8</sup>. É importante notar também que este valor de velocidade já está próximo do maior valor estatístico de correnteza centenária da Baía de Campos. Conseqüentemente, as limitações de escala do ensaio exigiam que velocidades de reboque maiores fossem adotadas, com o intuito de “forçar” condições de instabilidade que servissem como referência para a verificação do modelo hidrodinâmico, mesmo que essas fossem supe-

<sup>8</sup>De fato, a Fig.2 deste artigo mostra as oscilações dos ângulos de medida (ângulo de aproamento do navio e ângulo formado pelo *hawser* com a direção de reboque) ao longo de um ensaio do modelo em calado leve com velocidade correspondente a  $U = 0.2m/s$ . É fácil notar como tais oscilações são rapidamente amortecidas, tendendo à situação (estável) de alinhamento do navio com a direção de reboque

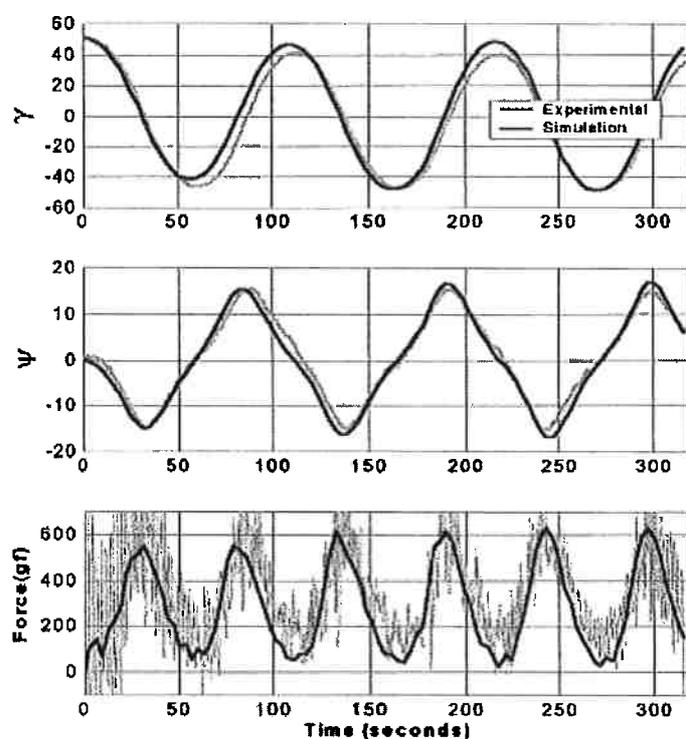
riores às velocidades de correnteza observadas em problemas reais. Por essa razão, os ensaios foram conduzidos com velocidades entre  $U = 0.4m/s$  e  $U = 0.6m/s$ , o que, não obstante, acarretou um problema de outra ordem: para esses valores, os números de Froude já não poderiam ser considerados baixos o suficiente para garantir a ausência de efeitos de superfície-livre sobre as forças hidrodinâmicas atuantes sobre o casco. Para contornar esse novo problema, um conjunto de ensaios adicionais foi realizado para se levantar fatores de correção dos momentos hidrodinâmicos para as diferentes velocidades ensaiadas<sup>9</sup>.

Uma vez contornados todos os problemas discutidos acima (o que, por si só, definiu uma metodologia de ensaio original para o estudo do problema de *fishtailing*), foi possível conduzir uma série de testes reproduzindo situações instáveis do sistema SPM. Nestes testes, todo movimento de excursão realizado pelo modelo podia ser descrito através da medida de apenas dois ângulos (uma vantagem adicional da adoção dos *hawser*s rígidos): o ângulo de aproamento do navio e o ângulo formado pelo *hawser* com a direção de reboque (no artigo, indicados respectivamente por  $\psi$  e  $\gamma$ ). As séries temporais destes ângulos e da força de tração no *hawser* obtidas nos ensaios foram confrontadas diretamente com resultados de simulação numérica, para fins de verificação do modelo hidrodinâmico. Pode-se ver, através dos resultados apresentados no Anexo C, que a aderência entre valores experimentais e teóricos se mostrou, via de regra, bastante boa. Mais uma vez a título de ilustração, a Figura 2.4 reproduz um destes resultados; neste caso, correspondente a um ensaio com o modelo em calado de máxima carga. Através da mesma é possível perceber que o modelo hidrodinâmico foi capaz não apenas de fornecer estimativas bastante precisas de ambos os ângulos de oscilação e da força de tração, como inclusive de captar efeitos sutis na variação do ângulo de aproamento, como evidencia o próprio formato de suas séries temporais.

Dada a sensibilidade dos ensaios a todos os fatores previamente mencionados, a aderência obtida entre resultados experimentais e teóricos é, até mesmo, surpreendente; e uma análise mais detalhada das características hidrodinâmicas do problema reforça ainda mais esta impressão. De fato, os resultados mostram que a dinâmica do problema de *fishtailing* ocorre com pequenos ângulos de ataque do fluxo incidente sobre o navio (ângulos inferiores, inclusive, aos valores de  $\psi$  observados nos ensaios, dada a redução de ângulo aparente). Faço uma análise sobre este aspecto em minha tese

---

<sup>9</sup>Esta correção foi obtida mediante ensaios de bifurcação estática do modelo para as diferentes velocidades consideradas, conforme discutido na seção "*Friction force, stability and Froude effect*" do Anexo C.



$$(U = 0.5 \text{ m/s}; C_f = 0.0211; \alpha = 0.5; L_b/L = 0.7)$$

Figura 2.4: Comparação de resultados experimentais e teóricos para ensaio de *hawser* rígido. Modelo em condição de máxima carga. Figura extraída de Tannuri et al. (2001)

de doutoramento (Simos, 2001), mostrando que os ângulos típicos se situam na faixa dos 5 graus. Nessa condição, as forças hidrodinâmicas dominantes, aquelas que determinam a dinâmica do navio no regime instável, são as forças no regime de pequenos ângulos de incidência de fluxo. Estas, além do modelo de arrasto friccional que incorpora os efeitos do número de Reynolds (e os correspondentes efeitos de escala), incluem também os efeitos de asa e suas correções. Para tais correções, como já foi discutido anteriormente neste capítulo, o modelo hidrodinâmico se baseia nas aproximações para as derivadas hidrodinâmicas lineares propostas por Clarke et al. (1982) e, efetivamente, a resposta obtida para o sistema em *fishtailing* resulta sensível a tais aproximações. O fato de o modelo ser capaz de reproduzir os resultados dos ensaios de *hawser* rígido feitos com o modelo de um navio VLCC, em seus dois calados, atesta que estas aproximações são bastante razoáveis para

essa que é a geometria-padrão da grande maioria dos FPSOs em operação no Brasil. Não obstante, dada a variabilidade da base de dados sobre a qual tais aproximações se baseiam, é razoável supor que o mesmo grau de precisão não possa ser obtido para outras geometrias de casco, reforçando a questão dos limites de aplicação do modelo, destinado, desde o princípio, ao estudo exclusivo de navios petroleiros. Uma discussão sobre este aspecto pode ser encontrada em Simos (2001), onde se procede a uma análise de sensibilidade dos movimentos previstos para o sistema SMS em condição instável com base em variações destes parâmetros intrínsecos ao modelo hidrodinâmico. Por outro lado, é também interessante observar que, por ocorrer fundamentalmente no regime de pequenos ângulos aparentes de correnteza, a dinâmica de *fishtailing* praticamente independe dos coeficientes de *cross-flow*. Dessa forma, os resultados de oscilação do navio puderam ser reproduzidos de forma praticamente idêntica mediante o emprego da versão explícita do modelo.

Por fim, Tannuri et al. (2001) discutem mais detalhadamente a importância dos efeitos de escala através de uma comparação entre os resultados obtidos em tanque de provas e aqueles que seriam previstos, extrapolados através do modelo hidrodinâmico, para a escala real. A Figura 2.5, abaixo, ilustra a discussão comparando os movimentos para uma das situações ensaiadas.

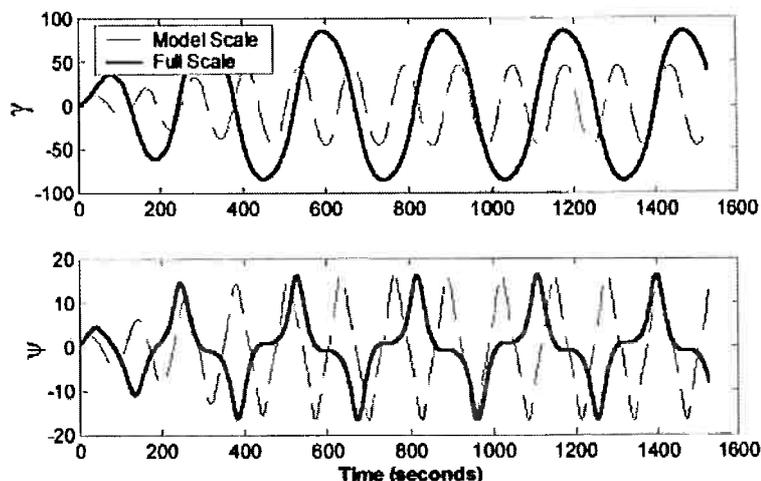


Figura 2.5: Comparação de resultados de *fishtailing* de um sistema SPM em escala real e escala do modelo (1:90). Figura extraída de Tannuri et al. (2001)

É importante notar como a redução do coeficiente de arrasto longitudinal, resultante da redução do coeficiente de atrito do casco, influencia a resposta: tendo a analogia com o pêndulo em mente, a menor restauração do sistema real faz com que os períodos de oscilação se alarguem e, mais importante, que

as amplitudes de passeio do navio no plano horizontal (ditadas fundamentalmente pelo ângulo do *hawser*  $\gamma$ ) aumentem. Mostram, com este exemplo, que não apenas a dinâmica do navio em *fishtailing* não pode ser observada em um ensaio com modelo em escala reduzida, mas também que o fenômeno observado em tanque de provas será sempre menos severo do que o problema real. Em última instância, portanto, os resultados reforçam a necessidade de um modelo hidrodinâmico confiável para o estudo deste problema que, como já discutimos acima, tem fortes implicações práticas na operação dos sistemas FPSO.

## 2.3 Tópicos de Pesquisa Atuais e Resultados Recentes

Mais recentemente, o emprego crescente de FPSOs ancorados em configuração SMS suscitou a definição de uma nova regulamentação para as operações de alívio destes sistemas. Dado que, neste caso, o alinhamento natural do sistema em tandem (FPSO + aliviador) com a direção resultante das forças ambientais deixa de ser garantida pela amarração, as novas normas passaram a ser mais exigentes quanto à seleção dos navios aliviadores e também quanto à definição das condições ambientais sob as quais a operação é permitida. Como resultado dessa nova regulação, uma das principais mudanças com respeito à logística envolvida no alívio dos sistemas FPSO baseados em *turret* foi a exigência de que a operação seja feita exclusivamente com navios dotados de sistema de posicionamento dinâmico (SPD). Além disso, as novas normas passaram a estabelecer uma classificação mínima para estes navios (esta classificação atribui categorias aos SPD baseadas, principalmente, em suas características de potência) e promoveram mudanças referentes às atividades que devem ser executadas durante este tipo de operação.

Dentre as principais questões envolvidas estava a definição de uma nova *zona de operação segura*, zona esta que delimita as áreas dentro das quais o navio aliviador pode se posicionar no decorrer da operação de transferência do óleo. O objetivo é o de se evitar situações de posicionamento relativo dos navios nas quais um incidente, como, por exemplo, uma eventual falha do SPD, acarrete riscos excessivos de colisão dos navios (leia-se, claro, riscos acima de um limite de tolerância previamente estipulado). Em linhas gerais, além de óbvias condições de distância mínima entre os dois navios, a zona de operação segura procura impedir situações nas quais o desalinhamento entre o navio aliviador e o FPSO seja grande. E isso, de fato, pode ocorrer de forma muito frequente em se tratando dos sistemas SMS, bastando para tanto a

ocorrência de condições em que os ângulos entre ondas, vento e correnteza sejam desfavoráveis. A Figura 2.6, a seguir, ilustra a ocorrência de uma destas condições, quando se percebe que o desalinhamento entre o aliviador (da proa do qual se obtém a imagem) e o navio FPSO é considerável.



Figura 2.6: Operação de alívio de sistema FPSO SMS na Bacia de Campos. Figura extraída de Illuminati et al. (2009)

As implicações que a definição destas zonas de segurança têm sobre a logística das operações de alívio é clara: quanto mais restritivas forem estas zonas, maior será a frequência de ocorrência de condições ambientais para as quais não se poderá garantir seu atendimento (dadas as limitações de potência dos SPD) e, conseqüentemente, maiores deverão ser as margens de segurança previstas no dimensionamento de todo o sistema logístico envolvido nas operações (disponibilidade de navios aliviadores e demais embarcações de apoio, frequência programada das operações de descarregamento, etc.). Certamente, o impacto econômico associado a este balanço é um incentivo considerável para que se refinem os estudos envolvendo a dinâmica destas operações, buscando garantir que as conclusões acerca da viabilidade ou não das mesmas sob determinadas condições ambientais sejam mais confiáveis. Assim, a partir de meados da década passada intensificaram-se as pesquisas referentes, sobretudo, ao comportamento dinâmico dos navios dotados de SPD durante este tipo de operação, comportamento este que deve ser analisado considerando-se o panorama geral das condições ambientais que os navios podem enfrentar.

No que tange a hidrodinâmica do problema (e a aerodinâmica também, considerando-se que as cargas de vento são bastante importantes), uma das principais dificuldades consiste na modelagem adequada dos efeitos de interação que modificam o fluxo entre os dois navios. Esta interação pode se dar tanto no que se refere aos efeitos de ondas (difratadas e irradiadas pelos dois cascos) como em termos dos efeitos de correnteza (já que o casco à montante perturba o escoamento que atinge aquele que se encontra à jusante) e, em situações como aquela ilustrada na Figura 2.6, estes efeitos podem ter uma intensidade considerável. Por esta razão, este tópico foi alvo de um projeto de pesquisa na EPUSP entre os anos de 2006 e 2008. O principal objetivo era o de investigar os efeitos desta interação hidrodinâmica nas forças de correnteza, sobretudo naquelas experimentadas pelo navio aliviador, durante as operações de alívio de sistemas FPSO com amarração SMS, e como estes efeitos poderiam afetar as previsões sobre a potência empregada pelo SPD durante estas operações. Cabe ressaltar que estes efeitos são, em sua maior parte, derivados dos efeitos de separação da camada-limite sobre o casco à montante no escoamento e na subsequente dinâmica do fluxo fortemente vortical observado na esteira deste, requerendo assim métodos numéricos capazes de lidar adequadamente com os efeitos de viscosidade presentes no escoamento.

Os estudos realizados ao longo deste projeto consideraram diferentes metodologias para a modelagem dos efeitos de interação. Uma delas foi baseada exclusivamente em resultados obtidos com códigos comerciais de CFD, os quais foram empregados para prever diretamente as forças sobre os dois navios em diferentes posições relativas de seus cascos. Contudo, apesar de certamente permitir uma modelagem mais precisa dos efeitos de esteira e do campo de pressão resultante sobre o navio à jusante, a aplicação desta metodologia impõe algumas dificuldades práticas, além daquelas naturalmente associadas com a modelagem do fluxo turbulento nestes casos. A principal delas dizia respeito ao seu emprego como base para as simulações dinâmicas das operações, o que exigia um grande esforço computacional prévio. De fato, uma análise abrangente pressupunha que novas simulações de CFD fossem executadas mediante quaisquer alterações das condições iniciais ou de contorno do escoamento, fossem elas advindas da mudança de posição relativa entre os cascos (o que ocorria naturalmente ao longo de uma única simulação dinâmica), da velocidade ou direção da correnteza incidente ou ainda das condições de carga (calados) das embarcações.

Dessa forma, com o intuito de aliviar o esforço computacional necessário, ao menos visando uma primeira análise de caráter mais abrangente das condições de operação, uma metodologia alternativa foi proposta, sendo esta baseada no desenvolvimento e no emprego de uma adaptação do modelo

analítico heurístico de forças de correnteza. Nesta abordagem, o modelo hidrodinâmico foi empregado apenas para o cálculo das forças sobre o navio aliviador. A adaptação requerida disse respeito à possibilidade de se tratar um fluxo incidente perturbado pela influência do casco do FPSO à montante. Este fluxo ainda seria considerado permanente, supondo os valores médios no tempo das flutuações turbulentas na esteira e desconsiderando efeitos transitórios sobre estes valores médios<sup>10</sup>; no entanto, o mesmo passava a ser *não uniforme*, com velocidade e direção dependentes da posição e, portanto, variáveis ao redor da superfície do casco em questão. Este fluxo era calculado com base em simulações de CFD do escoamento ao redor do casco do FPSO, a partir das quais se mapeavam as características do escoamento à sua jusante, cobrindo toda a área de interesse onde poderia se posicionar posteriormente o navio aliviador. Em uma segunda etapa, então, esse mapa de velocidades era empregado como dado de entrada para os cálculos de força do modelo hidrodinâmico.

A estrutura do modelo hidrodinâmico heurístico discutido na seção anterior, com suas funções simples e sua clara separação de equacionamento nos regimes de escoamento distintos, facilitou a proposição de modificações que permitissem considerar, ao menos de forma bastante aproximada, os efeitos de um fluxo incidente não uniforme. As alterações adotadas se basearam em simples correções de ângulos de ataque e velocidades médias (para os efeitos de asas, por exemplo) e do fluxo seccional que já era empregado pelo modelo estendido para a integração das forças e momentos de *cross-flow*. A forma através da qual estas correções foram incorporadas é apresentada em detalhes em Illuminati et al. (2009), artigo apresentado como Anexo D deste texto, e que serve de referência para os tópicos de pesquisa discutidos nesta seção.

Obviamente, dada a complexidade envolvida na modelagem destes escoamentos, especialmente das regiões de esteira turbulenta, todos os resultados previstos pelos modelos computacionais e analíticos foram confrontados com outros medidos em uma série extensa de ensaios em tanque de provas executada, com esta finalidade, nas instalações do NMRI, em Tóquio. O conjunto de ensaios envolveu três diferentes grupos de testes: ensaios de mapeamento de esteira à jusante do navio VLCC (FPSO), ensaios de medida de forças em dois navios em ensaios de modelos cativos e, por fim, novos ensaios de *fishtailing* com emprego de *hawser* rígido (desta vez, porém, com a presença do modelo de FPSO à frente do navio aliviador). As fotografias apresentadas

---

<sup>10</sup>Aqui lançava-se mão, obviamente, de uma hipótese: a de que os tempos característicos das flutuações de velocidade e pressão decorrentes dos vórtices de esteira de maiores dimensões possam ainda ser considerados curtos o suficiente para não influenciar significativamente a dinâmica do navio submetido a este fluxo. Esta hipótese, posteriormente, veio a se mostrar acertada.

na Figura 2.7 ilustram alguns destes testes.



Figura 2.7: Fotografias de testes de verificação executados no NMRI. Ensaios de medição de forças em dois modelos (esquerda) e ensaios de reboque de sistema FPSO-aliviador conectados por *hawser* rígido (direita).

Embora problemas de instabilidade de *fishtailing* não fossem o alvo dos novos estudos, uma vez que não devem ocorrer com a operação dos navios dotados de SPD (ao menos não em condições normais de operação), os ensaios com *hawser* rígido foram retomados por representarem uma das melhores formas de se verificar, indiretamente, a validade do modelo de forças de correnteza. O interesse aqui recaía nos efeitos que as perturbações no fluxo incidente, causados pela presença do modelo à montante, exercem sobre a dinâmica do navio aliviador. Por esta razão, os ensaios foram repetidos com diversos ângulos de aproamento do modelo do navio FPSO com relação à direção de correnteza incidente (direção de reboque do conjunto). Em algumas situações, especialmente quando o FPSO se encontrava em calado de plena carga, ângulos de aproamento acima de 25 graus foram suficientes para extinguir, nos ensaios, as oscilações de *fishtailing* do navio aliviador, oscilações que anteriormente se apresentavam de forma clara quando o modelo de FPSO estava aproado em ângulos menores. Nestas situações, a mudança do panorama dinâmico do sistema FPSO-aliviador dependia exclusivamente dos efeitos de interação hidrodinâmica entre os cascos, tornando os ensaios excelentes bases de verificação para tais efeitos. Este tipo de situação é ilustrada pelos resultados da Figura 2.8, a seguir. Nela, são comparados os resultados de movimento do modelo de navio aliviador medidos no decorrer de um ensaio (caracterizados aqui pelo ângulo formado pelo *hawser* ao longo do ensaio) e aqueles previstos por intermédio do emprego do modelo analítico de forças adaptado (figura à esquerda). Neste ensaio, o ângulo que o FPSO formava com a correnteza incidente gerou uma esteira turbulenta com uma tal redução de velocidades em seu interior que foi suficiente para atrair o modelo aliviador a um novo equilíbrio estático (com seu casco parcialmente

imerso nesta esteira). Uma representação esquemática deste efeito é fornecida pela figura à direita, que mostra a situação de equilíbrio obtida ao final da simulação dinâmica deste ensaio. O mapa de velocidades de correnteza que serve como plano de fundo para esta figura corresponde àquele empregado como *input* para o modelo heurístico, obtido previamente em análise de CFD.

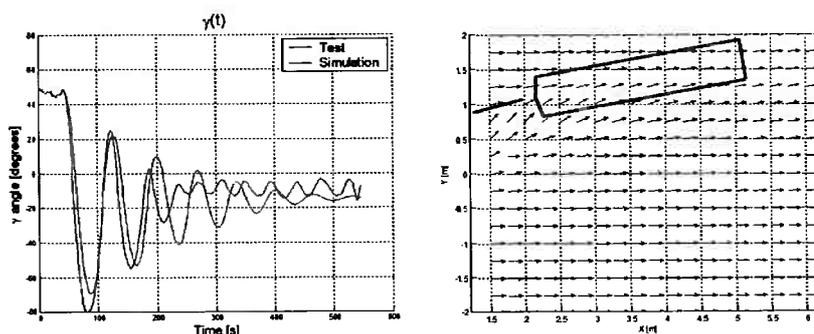


Figura 2.8: Resultados de ensaios de sistema tandem com *hawser* rígido. Séries temporais de ângulo do *hawser* (esquerda) e mapa do escoamento com posição final de equilíbrio (direita). Figuras extraídas de Illuminati et al. (2009)

Além da adaptação do modelo hidrodinâmico e dos resultados de verificação obtidos mediante comparação com os ensaios, Illuminati et al. (2009) discutem ainda possíveis efeitos práticos decorrentes destes fenômenos de interação hidrodinâmica sobre as operações de transbordo baseadas em navios dotados de posicionamento dinâmico. Para tanto, fazem uma extensa série de simulações dinâmicas emulando o controle ativo característico de um destes sistemas. Mostram, por exemplo, que os efeitos de perturbação no fluxo incidentes podem ser responsáveis por variações da ordem de até 20% na potência exigida para os propulsores de proa. Além disso, através de simulações de condições de falha do SPD, mostram que as previsões de curso do navio aliviador quando submetido bruscamente a uma velocidade de avanço indesejada<sup>11</sup> também podem depender fortemente destes efeitos hidrodinâmicos. Este conjunto de resultados veio a reforçar o fato de que o desenvolvimento de modelos capazes de reproduzir os fenômenos de interação entre os cascos propiciam uma contribuição importante para o estudo destas

<sup>11</sup>Refere-se aqui a um dos modos de falha frequentemente estudados no contexto dos sistemas de posicionamento dinâmico, conhecido como *drive-off*. Nele, um erro do sistema de controle faz com que o navio, cuja posição média deveria se manter inalterada, avance de forma súbita.

operações e para uma definição mais segura dos critérios que as regulamentam.

O tema de pesquisa tratado nesta seção é ainda um tema em aberto, sobre o qual diversos trabalhos de investigação vêm sendo realizados. Como já mencionei acima, não se restringe às forças de correnteza, mas envolve também estudos referentes a efeitos de interação nas forças hidrodinâmicas decorrentes da ação de ondas e sobre os efeitos de esteira aerodinâmica nas forças de vento experimentadas pelos dois navios. A julgar pelos resultados publicados recentemente acerca destes tópicos, estes estudos se concentram hoje, como não poderia deixar de ser, em modelos computacionais de cálculo dos escoamentos. Não há dúvida de que esta deve ser a base para estes estudos e de que diferentes aspectos desta modelagem, como, por exemplo, a definição dos modelos de turbulência mais adequados, requerem ainda investigações mais detalhadas. Não obstante, como mostram os resultados de Illuminati et al. (2009), ter-se à disposição um modelo simplificado, comprovadamente apto a reproduzir aspectos relevantes da dinâmica de operações reais de transbordo, propicia ainda uma vantagem considerável, especialmente quando se tem em vista estudos abrangentes destas operações. Exemplos destes são os já mencionados estudos de critérios de segurança de operação, mas pode-se citar também outros de grande importância em projeto, como os estudos de *downtime*<sup>12</sup> de alívio de uma determinada plataforma. Tanto um como o outro exigem, em geral, a simulação de inúmeras combinações de condições ambientais, calados das embarcações, parâmetros dos sistemas DP, etc. Ainda hoje, dados os esforços de modelagem e os tempos de processamento necessários para as simulações de CFD, os modelos hidrodinâmicos semi-empíricos podem ser uma ferramenta valiosa para os projetistas quando estes se deparam com a necessidade de semelhante tipo de avaliação.

---

<sup>12</sup>Estimativa da probabilidade de que as operações não possam ser realizadas, dadas as condições meteoceanográficas da região



## Capítulo 3

# Estudo de Movimentos Ressonantes Induzidos por Efeitos Não-lineares de Ondas em Baixas Frequências

Este capítulo trata de um tópico relacionado aos estudos de comportamento em ondas (*seakeeping*, em inglês) de sistemas *offshore* cuja importância se revela principalmente no projeto de seus sistemas de amarração. Mais especificamente, trata de forças hidrodinâmicas induzidas pelas ondas sobre as estruturas flutuantes cujas oscilações se dão em frequências menores do que as frequências que caracterizam as ondas que as produziram. Na terminologia naval, estas forças são chamadas de *forças de deriva*. Toda estrutura, fixa ou livre para mover-se, sujeita à ação de uma onda regular (digamos, uma onda de amplitude  $A$  e frequência  $\omega$  constantes no tempo) experimentará, além da força hidrodinâmica que oscila com a mesma frequência  $\omega$ , a ação de uma força constante no tempo e de outras que oscilam em super-harmônicos desta frequência original.

Embora as forças em frequências mais altas que as das ondas tenham também relevância prática em algumas aplicações *offshore*, aqui estaremos interessados apenas no conjunto das forças de deriva, ou seja, as forças em frequências baixas, que incluem também as componentes constantes no tempo. A importância destas forças se revela facilmente na prática, bastando-se para isso analisar o comportamento de uma embarcação ancorada sujeita à ação de ondas (pensemos aqui em uma ancoragem convencional, por um único ponto, em geral à proa do barco). Na ausência de quaisquer outros agentes que a façam deslocar-se, como vento e correnteza, essa embarcação, além das oscilações de movimento nas frequências de ondas, se deslocará

lentamente a partir de sua posição média inicial, estabelecendo uma nova posição média de equilíbrio que dependerá fundamentalmente da direção de propagação das ondas que a atingem. Esta deriva é resultado da ação de uma força induzida pelas ondas sobre a embarcação e que, embora de baixa magnitude se comparada às forças que a fazem oscilar nas frequências de ondas, tem um valor médio no tempo que é não-nulo. Esta força encontra equivalente também no caso de um navio que se desloca com determinada velocidade de avanço em ondas; haverá neste caso uma força hidrodinâmica média resultante da ação destas ondas e, no caso de esta força apresentar uma componente não nula em sentido contrário ao avanço da embarcação, esta será sentida como um acréscimo de resistência (daí a chamada *resistência adicional em ondas*).

No contexto dos sistemas *offshore*, em geral ancorados por mais de um ponto para impor certa limitação às variações de aproamento, as forças médias de deriva se fazem sentir da mesma forma; impondo uma carga sobre o sistema de ancoragem e alterando a posição média da estrutura flutuante, deslocando-a no sentido de propagação das ondas. No entanto, dado que o sistema de ancoragem impõe forças de restauração às translações no plano horizontal e à guinada do corpo, definindo para os passeios da plataforma um sistema dinâmico com frequências próprias de oscilação, além da força média, as forças induzidas em baixas frequências passam a ter contribuições relevantes nesta dinâmica. Isto se dá porque, embora de pequena magnitude se comparadas às demais forças de ondas, estas forças podem sintonizar as frequências ressonantes do sistema amarrado, amplificando seus movimentos. E as amplificações proporcionadas por tais ressonância são, em geral, intensas, dado que os amortecimentos associados a estes passeios no plano horizontal costumam ser bastante baixos. Aos passeios ressonantes que o sistema realiza nestas condições dá-se o nome de *derivas-lentas* (ou, em inglês, *slow-drifts*). Em termos do projeto destes sistemas, tanto as forças de deriva média com as de deriva-lenta representam cargas importantes sobre a ancoragem e devem ser consideradas quando de seu dimensionamento.

As forças em questão não variam de forma linear com a amplitude da ondas que as originam e, como será discutido com mais detalhes na próxima seção, essa natureza não-linear impõe dificuldades consideráveis para a sua previsão. Não obstante, no caso particular dos sistemas *offshore* de águas profundas, caso que abrange a quase totalidade dos sistemas flutuantes de produção em operação no Brasil, veremos que essa dificuldade intrínseca geralmente pode ser atenuada ao se tirar proveito de certas características da resposta de deriva-lenta que são comuns aos sistemas ancorados em grandes profundidades. Com isso, desde finais da década de 1970, os estudos acerca deste problema hidrodinâmico permitiram definir uma metodologia para o

cálculo destas forças que logo se difundiu e passou a formar parte do ferramental básico à disposição dos projetistas destes sistemas. Os procedimentos para a modelagem numérica do problema de deriva dos sistemas em águas profundas possibilitavam, através de uma série de aproximações calcadas em suas características dinâmicas, estimativas de forças relativamente expeditas, baseadas exclusivamente na solução de um problema de valor de contorno *linearizado*. E, na verdade, ainda possibilitam, já que estes métodos continuam a ser empregados de maneira usual no projeto dos sistemas de ancoragem em águas profundas. Nesse caso particular, podemos afirmar que a base teórica de modelagem das forças e a metodologia de solução numérica são, já há algum tempo, bem estabelecidas<sup>1</sup>.

Embora sua consequência prática mais evidente se note nos movimentos que o corpo flutuante realiza no plano horizontal, as forças médias e em baixa frequência não se restringem a esse plano. Os efeitos se estendem igualmente às forças verticais e também aos momentos de *roll* e *pitch*, que contribuem para os movimentos verticais do casco do sistema flutuante. No entanto, para os dois tipos de sistema em aplicação no Brasil, as semi-submersíveis e os FPSOs, nenhum efeito relevante destas forças havia sido evidenciado na dinâmica do plano vertical destes sistemas até pouco tempo atrás. Foi somente a partir de inícios da década de 2000 que os primeiros casos significativos de movimentos ressonantes lentos verticais passaram a ser observados em ensaios em tanque de provas. As razões para isso serão discutidas com mais detalhes na próxima seção, mas decorrem basicamente de alterações de projeto sofridas pelas novas concepções de semi-submersíveis e FPSOs, especialmente no que se refere aos seus períodos próprios de oscilação. O aumento destes períodos propiciou reduções consideráveis das possíveis ressonâncias induzidas pelas forças que agem nas frequências de ondas, mas, por outro lado, levou a um aumento dos efeitos hidrodinâmicos não-lineares nestas ressonâncias, a ponto de torná-los “visíveis” em tanques de provas. O resultado líquido deste balanço é certamente positivo em termos de projeto, mas o caráter inédito do problema associado a estes movimentos ressonantes lentos no plano vertical trouxe preocupações. Primeiramente porque, ao contrário de seus equivalentes no plano horizontal, não havia à disposição dos projetistas ferramentas que permitissem antever os efeitos destas forças não-

---

<sup>1</sup>Neste ponto, é preciso dizer que a dificuldade prática que existe para se verificar os resultados desses modelos em tanques de provas ainda hoje faz com que se levantem certas dúvidas esporádicas acerca dos métodos e de seus limites de aplicação. Essas questões serão abordadas mais adiante neste capítulo. Todavia, no que tange a modelagem das forças hidrodinâmicas de deriva média e deriva-lenta, a consistência das aproximações empregadas em águas profundas já conta com um respaldo de verificações considerável e sua validade raramente é tema de debates hoje em dia.

lineares nos movimentos verticais. Em segundo lugar, porque algumas das aproximações frequentemente empregadas nos problemas de deriva tinham sua validade comprometida neste caso, exigindo que um estudo mais aprofundado do problema estabelecesse uma nova metodologia adequada para o cálculo destas forças. E, por fim, contribuía para essas preocupações o fato de que não havia ainda clareza sobre a relevância que estes movimentos poderiam ter sobre toda a gama de aspectos associados ao comportamento no mar destes sistemas e suas consequências práticas em termos de projeto.

Tendo em vista os aspectos apresentados acima, a pesquisa descrita neste capítulo centra-se na modelagem dos movimentos ressonantes no plano vertical, embora boa parte das discussões e dos resultados possam ser aplicados igualmente aos problemas de deriva no plano horizontal. O problema específico das derivas-lentas no plano horizontal será discutido apenas na seção final deste capítulo, quando se faz alusão ao estudo de uma plataforma flutuante para turbinas eólicas, um tema com o qual me envolvi recentemente e que, como se verá, guarda considerável distância dos sistemas de produção de óleo e gás aos quais se destina a maior parte dos estudos aos que, aqui, farei referência.

### 3.1 Aspectos Teóricos e Computacionais

A determinação das forças de baixa frequência se baseia em uma aproximação, até segunda-ordem, do problema de valor de contorno não-linear que representa o comportamento em ondas de uma estrutura fixa ou flutuante. Nesta seção, procurarei apresentar algumas das principais dificuldades associadas à solução numérica deste problema de contorno e, conseqüentemente, à previsão das forças de segunda-ordem. Antes, porém, uma ressalva: Não caberia, aqui, discorrer sobre os detalhes da construção deste BVP ou dos modelos teóricos normalmente empregados para equacionar e resolver o problema matemático em seus diferentes graus de aproximação. Estes são tópicos que demandariam um espaço incompatível com as finalidades deste texto e que podem ser facilmente encontrados na literatura especializada da área de hidrodinâmica marítima. Ao contrário, nesta seção pretendo discutir apenas alguns aspectos pontuais dos métodos numéricos para obtenção das forças de deriva, limitando-me àqueles que são, de fato, imprescindíveis para uma melhor compreensão da importância dos resultados obtidos nesta linha de pesquisa. Sugerirei, no decorrer do texto, algumas referências bibliográficas complementares através das quais se pode formar uma visão mais completa do problema matemático e dos modelos de solução teóricos e numéricos.

Por razões associadas principalmente à capacidade de processamento numérico típica disponível à época, os códigos de *seakeeping*, que passaram a se desenvolver principalmente a partir de finais da década de 1970, privilegiaram uma abordagem baseada na solução do problema de contorno através de Métodos de Elementos de Contorno (em inglês, *Boundary Elements Method*, BEM) realizada no domínio-da-frequência. Neste caso, o problema de contorno consiste basicamente na determinação dos potenciais de velocidade que representam a perturbação *em regime* que a presença da estrutura causa sobre um campo de ondas regular que incide sobre a mesma. Em termos da modelagem do problema para fins de subsequente solução por aproximações numéricas, a dificuldade principal reside no tratamento das não-linearidades do BVP. Estas, por sua vez, decorrem da imposição das condições de contorno apropriadas sobre as fronteiras móveis do problema (a própria superfície do mar e a superfície da estrutura em questão, quando esta é livre para se mover), as quais garantem, basicamente, que não haja fluxo hidrodinâmico através das mesmas. O método usualmente empregado para se lidar com tal não-linearidade consiste na aplicação de uma técnica de perturbação ao problema, expandindo todas as suas variáveis em séries de potências; os valores originais de cada variável aproximado, agora, por uma somatória de termos de diferentes ordens de magnitude<sup>2</sup>. Assim, por exemplo, se definem as componentes de diferentes ordens do potencial de velocidades e do campo de pressão do escoamento, bem como para as demais incógnitas do problema, como os deslocamentos  $X$  do corpo flutuante:

$$\begin{aligned}\phi &= \phi^{(0)} + \epsilon\phi^{(1)} + \epsilon^2\phi^{(2)} + \dots \\ p &= p^{(0)} + \epsilon p^{(1)} + \epsilon^2 p^{(2)} + \dots \\ X &= X^{(0)} + \epsilon X^{(1)} + \epsilon^2 X^{(2)} + \dots\end{aligned}\tag{3.1}$$

O parâmetro de perturbação ( $\epsilon$ ) é uma medida da declividade<sup>3</sup> da onda incidente, considerada, como condição necessária para a convergência do processo, como sendo de pequena magnitude. Mediante a aplicação desta técnica, o BVP original pode ser decomposto em uma série ordenada de problemas de contorno *lineares*, na qual as soluções obtidas para os problemas de menor ordem servem como “forçantes” dos problemas de ordem superior. Além desta expansão, normalmente considera-se uma expansão adicional ba-

<sup>2</sup>Este procedimento foi originalmente proposto por Stokes para a solução do problema de ondas planas progressivas não-lineares e, por esta razão, a ele normalmente se refere como “Expansão de Stokes”. Detalhes sobre o emprego da técnica podem ser encontrados, por exemplo, em Stoker (1957).

<sup>3</sup>Razão entre amplitude e comprimento de onda.

seada na hipótese de pequenos deslocamentos do corpo flutuante. Mediante esta suposição e a hipótese já considerada de pequenas amplitudes de ondas é possível aproximar ainda mais a solução do problema, aplicando as condições de contorno não sobre as posições instantâneas das fronteiras móveis (desconhecidas *a priori*), mas sim sobre suas posições médias. Este segundo passo é também bastante conveniente para a solução numérica do problema, já que permite, em última instância, que se trabalhe com uma modelagem baseada em malhas numéricas fixas. A construção do BVP que representa o problema de comportamento em ondas de estruturas *offshore* (portanto, desprovidas de velocidade de avanço) e a aplicação desta técnica de perturbação com a subsequente definição dos problemas de primeira e segunda-ordem podem ser encontradas, por exemplo, em Pinkster (1980).

As forças de deriva sobre o corpo flutuante são obtidas mediante a integração do campo de pressão de segunda-ordem ( $p^{(2)}$ ) sobre a superfície molhada (média) do mesmo. Estas forças podem ser representadas pela soma de duas parcelas distintas, a primeira sendo resultado da contribuição do potencial de velocidades de segunda-ordem (chamemos de  $F_p^{(2)}$ ) e a segunda correspondendo a termos quadráticos da solução de primeira-ordem ( $F_q^{(2)}$ ):

$$F^{(2)} = F_p^{(2)} + F_q^{(2)} \quad (3.2)$$

Em se tratando das forças de deriva-média, constantes no tempo, a primeira componente resulta necessariamente nula (ver, por exemplo, Pinkster (1980)), e isso significa que o cálculo destas forças de segunda-ordem pode ser efetuado com base exclusivamente na solução do problema linear. De fato, durante muitos anos após o lançamento dos códigos pioneiros, a solução de primeira-ordem era a única solução fornecida pelos pacotes comerciais de *seakeeping* disponíveis no mercado e, assim, as estimativas das forças de segunda-ordem se restringiam às suas componentes médias no tempo.

As parcelas de baixa frequência (ou forças de deriva-lenta) surgem quando se considera a interação entre pares de ondas incidentes com frequências distintas ( $\omega_1, \omega_2$ ). Neste caso, haverá não apenas a contribuição das componentes quadráticas de primeira-ordem com frequências ( $\omega_2 - \omega_1$ ), mas também uma parcela de força decorrente da ação do potencial de segunda ordem ( $\phi^{(2)}$ ) que oscila nesta mesma frequência. É na determinação desta última (a parcela  $F_p^{(2)}$ ) que reside a grande dificuldade associada ao cômputo das forças de deriva-lenta, e as razões para isso podem ser compreendidas facilmente: Para a solução numérica do problema de contorno linear, os códigos lançam mão das *funções de Green* do problema (as chamadas *fontes pulsantes*, ver p.ex. Wehausen and Laitone (1960)), através das quais se pode restringir o domínio de aproximação numérica à superfície do(s) corpo(s) em estudo. Em outras

palavras, como estas funções garantem *a priori* a satisfação das condições nas demais fronteiras (fundo, superfície-livre e campo distante), apenas a superfície do corpo deve ser discretizada através de painéis. Por outro lado, estas mesmas funções de Green não satisfazem a condição não-homogênea de superfície-livre que caracteriza o problema de contorno de segunda-ordem, o que faz com que esta superfície também tenha que ser considerada na solução numérica. Essa exigência, por sua vez, normalmente implica em um considerável aumento das dimensões do sistema algébrico a ser resolvido, com consequente impacto no tempo de processamento requerido para a solução numérica.

Estas dificuldades associadas à solução do problema de segunda-ordem motivaram a proposição de algumas aproximações para o cálculo das forças de deriva-lenta, dentre as quais certamente a mais difundida é aquela hoje conhecida como *Aproximação de Newman* (Newman, 1974). Neste trabalho, Newman argumenta que, para casos em que as diferenças de frequência ( $\delta\omega$ ) sejam pequenas, é possível aproximar-se as forças de deriva-lenta de problemas em águas profundas a partir dos valores das forças de deriva média obtidas para as duas diferentes frequências em questão. A aproximação proposta por Newman pode ser traduzida matematicamente pela seguinte expressão<sup>4</sup>:

$$F^{(2)}(\omega_1, \omega_2) \cong D(\omega_1 + \delta\omega/2) \quad (3.3)$$

Na expressão acima,  $D$  denota a força de deriva-média, a qual é obtida como solução do problema de primeira-ordem na frequência  $(\omega_1 + \delta\omega/2)$ .

A aproximação em 3.3 possui um erro da ordem de  $(\delta\omega)^2$ . É tanto melhor, portanto, quanto menores forem os valores das diferenças de frequência para as quais devem ser calculadas as forças de deriva-lenta. Em geral, para o problema de deriva-lenta de sistemas *offshore* ancorados em águas profundas essa aproximação resulta bastante adequada, já que a necessária complacência dos sistemas de amarração garantem, nesse caso, períodos naturais de excursão altos, tipicamente na faixa dos 100 aos 200 segundos. Além disso, os amortecimentos associados à dinâmica ressonante dos *slow-drifts* é, via-de-regra, bastante baixo, o que faz com que a resposta possa ser considerada de *banda-estreita*. Dessa forma, representando bem as forças de deriva-lenta para períodos em torno dos períodos naturais do sistema ancorado, a aproximação de Newman garante uma estimativa adequada das forças hidrodinâmicas na faixa de frequências efetivamente relevante para a dinâmica ressonante do sistema.

Embora a verificação dos *slow-drifts* em tanques de provas esteja sempre

<sup>4</sup>Diferentes variantes desta aproximação foram propostas na literatura, cada qual aportando pequenas modificações na forma de cálculo.

sujeita a fatores de imprecisão relativamente altos<sup>5</sup>, com o passar do tempo a comparação entre as previsões teóricas e os resultados experimentais obtidos para diferentes sistemas *offshore* comprovou que a aproximação de Newman representava, em termos de engenharia, um modelo adequado para o tratamento do problema de deriva-lenta. Com isso, passou a ser incorporada de forma corriqueira na análise dinâmica dos sistemas em águas profundas e se tornou uma ferramenta bastante útil no dimensionamento da ancoragem destes sistemas.

Cabe também ressaltar que, além da aproximação de Newman, outras propostas destinadas a simplificar o cálculo das forças de segunda-ordem também são empregadas frequentemente em projetos, e muitas vezes já se encontram incorporadas a pacotes computacionais destinados à simulação dinâmica dos sistemas *offshore*. Uma delas é a aproximação proposta por Pinkster (1980). Diferentemente da aproximação de Newman, esta parte de uma consideração sobre os efeitos do potencial de segunda-ordem, argumentando que os efeitos de difração deste potencial podem, na maioria dos casos, ser considerados pequenos face àqueles resultantes da ação direta de seu campo de velocidades não-perturbado. A grande vantagem aqui é que, admitida esta hipótese, é possível obter-se uma expressão analítica deste potencial, eliminando, mais uma vez, a necessidade de solução numérica do problema de contorno de segunda-ordem.

Como resultado destes e de outros estudos sobre a origem e a modelagem matemática das forças de deriva, em finais da década de 1990 já se podia contar com um procedimento consolidado para se lidar com o problema de *slow-drifts* de sistemas ancorados em águas profundas, e este procedimento era (e continua sendo) empregado rotineiramente nos projetos de seus sistemas de ancoragem. As limitações deste procedimento eram conhecidas. Sabia-se, por exemplo, das dificuldades que acarretavam os estudos de sistemas em águas de menor profundidade, quando a solução numérica passava a ser muito mais exigente e a maioria das aproximações perdia sua validade. No contexto nacional de exploração e produção de petróleo, entretanto, este tipo de aplicação quase não tinha relevância prática. Nos projetos nacionais, todos para águas profundas, as dúvidas quanto aos procedimentos ressurgiram a partir da observação experimental de um comportamento dinâmico inesperado de alguns dos cascos das novas gerações de sistemas flutuantes de produção: a excitação de movimentos ressonantes de *heave*, *roll* e *pitch*.

O início dos anos 2000 marcou o desenvolvimento de uma nova geração de

---

<sup>5</sup>Dentre estes fatores se incluem, por exemplo, as dúvidas sobre o amortecimento viscoso do sistema, a influência espúria de ondas refletidas nas extremidades do tanque, entre outras.

plataformas semi-submersíveis projetadas pela Petrobrás. As características dessa nova geração já foram discutidas no Capítulo 1, e distinguem-se principalmente pelos grandes volumes de deslocamento e calados de seus cascos. Durante o processo de desenvolvimento destas novas plataformas, no intuito de dessintonizar os períodos ressonantes de movimento da faixa de frequências de ondas do mar, os projetistas chegaram a testar protótipos com períodos naturais de *roll* e *pitch* de quase 80 segundos (uma mudança considerável, se considerarmos que os valores típicos para as plataformas semi-submersíveis até então situavam-se na faixa dos 25 segundos). O resultado desse aumento significativo de período próprio nos movimentos de *roll* previstos para uma destas plataformas pode ser apreciado através da Figura 3.1, abaixo. Nela, são apresentados trechos simultâneos de dois registros realizados durante um ensaio em tanque de provas com um modelo em escala reduzida do casco. A série temporal superior corresponde ao registro da altura de onda medida no tanque, enquanto o registro inferior apresenta o movimento de *roll* do modelo medido durante o mesmo intervalo de tempo (todos os valores já se encontram convertidos para a escala real). A discrepância nos períodos típicos de oscilação é notável. Enquanto as ondas apresentam um período típico na casa dos 10 segundos<sup>6</sup>, os movimentos de *roll* claramente apresentam, além de oscilações nesta mesma faixa de períodos, outras de amplitude bastante maior que ocorrem em períodos muito mais altos. Estas últimas refletem os movimentos ressonantes induzidos por efeitos hidrodinâmicos de segunda-ordem. Têm, portanto, a mesma origem das excursões de deriva-lenta discutidas até então, mas, neste caso, estão associadas a forças hidrodinâmicas verticais.

Ao se extrair destas séries temporais seus espectros de potência, a dessintonia entre a faixa de energia de ondas e a distribuição de energia dos movimentos fica ainda mais clara, como se pode notar na Figura 3.2. Nesta figura, o espectro de energia das ondas (curva  $S_1$ , aqui multiplicada por um fator de  $10E-4$  para fins de comparação visual) é sobreposto ao espectro de potência obtido a partir do registro de movimentos de *roll*. É fácil perceber que, neste caso, a energia de movimentos na ressonância (frequência natural de  $0.08\text{rad/s}$  na escala real) é inclusive maior do que aquela relativa aos movimentos de primeira-ordem.

Para uma melhor compreensão do problema, a Figura 3.3, extraída de Pinkster (1980), sobrepõe o espectro de energia de ondas de um determinado estado de mar e seu espectro de energia de grupo. Este último é uma grandeza importante na análise dos movimentos de baixa-frequência, pois corresponde à energia associada aos chamados *grupos de onda*, ou seja, a energia que se

---

<sup>6</sup>O estado de mar ensaiado nesse caso correspondia a um espectro de JONSWAP com período de pico de 14 segundos.

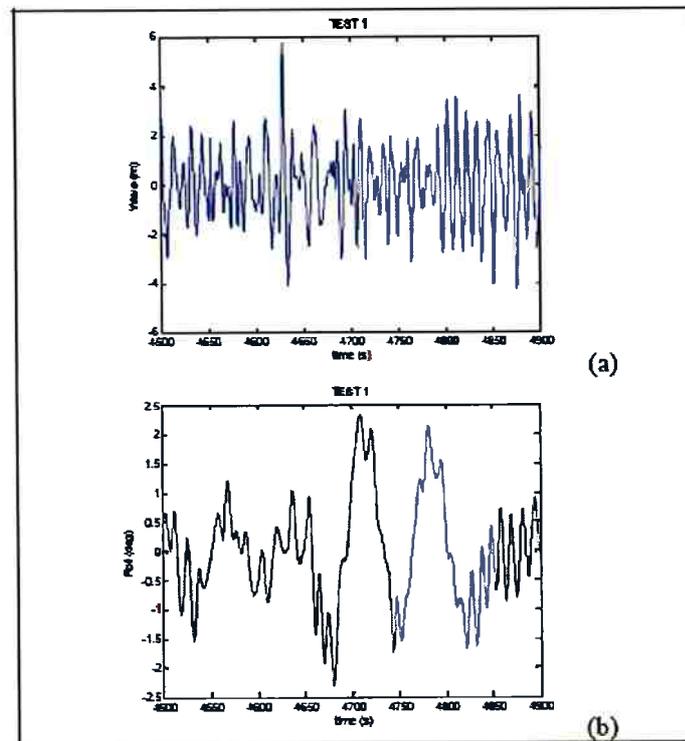


Figura 3.1: Trechos simultâneos de registros de ondas (a) e de movimento de *roll* (b) obtidos em ensaio com modelo de plataforma semi-submersível. Figura extraída de Simos et al. (2008)

propaga com as modulações que caracterizam as interações entre as diferentes componentes de ondas do espectro de mar e que oscilam com as diferenças de frequência ( $\delta\omega = \omega_i - \omega_j$ ). Na figura é possível perceber a distribuição característica de energia deste espectro, crescente à medida que a frequência  $\delta\omega$  dos grupos diminui.

Evidentemente, ao se atuar no sentido de afastar as frequências de ressonância da faixa de energia das ondas mediante um aumento dos períodos próprios de oscilação do sistema flutuante, obtém-se, como efeito colateral, uma excitação ressonante de segunda-ordem associada à energia dos grupos de ondas, e que será tanto maior quanto maior for este período natural. Nessa tentativa, salvaguardados todos os demais aspectos de projeto associados à definição dos períodos próprios, a tarefa do projetista é encontrar o melhor balanço entre a resposta do sistema em primeira e segunda-ordem, buscando reduzir da melhor maneira possível os movimentos e acelerações do sistema flutuante.

No caso do projeto de plataforma discutido acima, dado o relativo in-

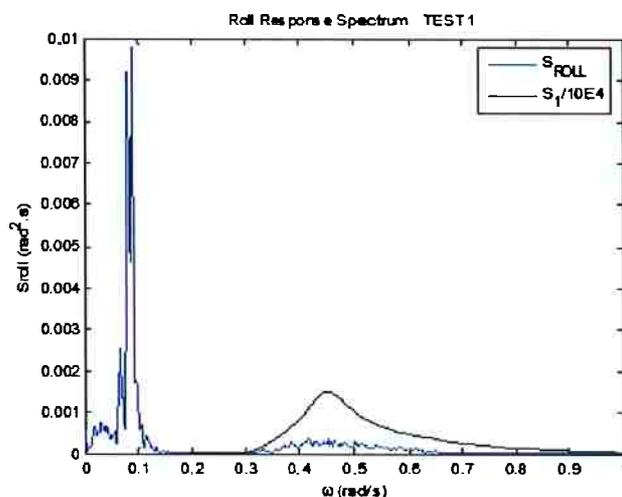


Figura 3.2: Sobreposição dos espectros de ondas e de movimento de roll correspondentes aos registros da Figura 3.2. Figura extraída de Simos et al. (2008)

ditismo dos efeitos ressonantes em *roll/pitch* e na ausência de ferramentas de projeto que incorporassem de forma fácil estes efeitos, chegou-se a testar configurações com períodos naturais que claramente extrapolavam os valores ideais, e cujos movimentos, excitados em segunda-ordem por grupos de ondas de maior energia, acabavam sofrendo consideráveis ampliações ressonantes. Embora estes efeitos fossem difíceis de se antever em projeto, suas consequências resultavam bastante claras assim que a configuração em questão era submetida aos primeiros ensaios em tanque de provas, como se pode perceber pelos resultados da Figura 3.1.

Logo após os primeiros testes, os projetistas destes sistemas trataram de reduzir os valores dos períodos naturais, chegando-se então a valores que permitiam soluções de compromisso melhores entre a redução dos movimentos de primeira-ordem e a excitação dos movimentos de segunda. Tipicamente, as versões finais de projeto destas novas semi-submersíveis apresentam períodos de movimentos de *roll* e *pitch* em uma faixa entre 30 e 40 segundos. Ainda assim, as dificuldades experimentadas para o ajuste destes valores pôs em evidência a carência de métodos e ferramentas de projeto que permitissem ao projetista prever, de forma confiável, os movimentos lentos de segunda-ordem desde as primeiras etapas de concepção do casco. Ademais, mesmo com a redução dos períodos naturais, estes sistemas experimentarão ao longo de sua operação movimentos de segunda-ordem com amplitudes comparáveis àquelas esperadas nas frequências de ondas, e isso impôs a necessidade adi-

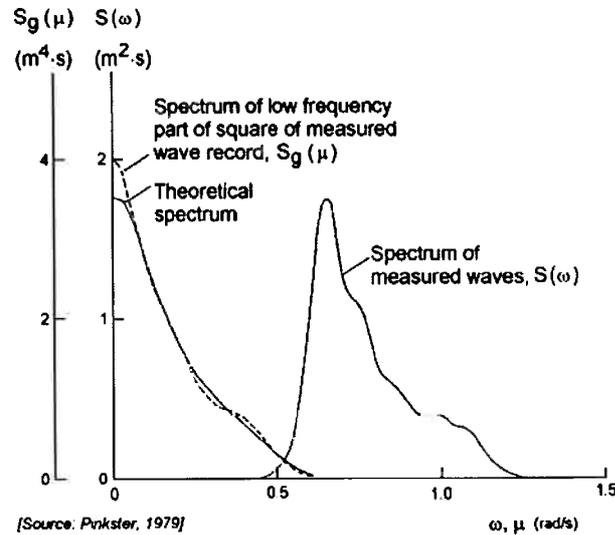


Figura 3.3: Representação de espectro de energia de ondas e espectro de grupo de determinado estado de mar. Figura extraída de Pinkster (1980)

cional de se verificar o impacto que estes movimentos poderiam ter sobre os demais aspectos de projeto da plataforma e de seus subsistemas, em particular sobre o dimensionamento do conjunto de *risers* e linhas de amarração.

No entanto, ao contrário do que ocorria com os modelos para previsão dos *slow-drifts*, cujos métodos de cálculo já se encontravam bem estabelecidos e para os quais aproximações teóricas já validadas permitiam procedimentos expeditos para sua consideração em projeto, o mesmo não se podia dizer para os movimentos ressonantes no plano vertical. A diferença entre os valores característicos de períodos naturais nos dois problemas era gritante, o que, por si só, já punha em dúvida a validade de aproximações como a aproximação de Newman para o estudo destes movimentos. Além disso, apenas pouco tempo antes haviam sido lançados os primeiros programas comerciais de *seakeeping* que dispunham de módulos de segunda-ordem para uma análise completa das forças de baixa frequência, incluindo efeitos de radiação e difração do potencial de segunda-ordem. A dificuldade intrínseca dessa modelagem numérica (com a necessária discretização da superfície-livre), a falta de experiência com os códigos computacionais e os elevados tempos de processamento requeridos pelas análises de segunda-ordem tornavam premente um melhor entendimento do fenômeno e a definição de métodos e aproximações que pudessem aumentar a confiabilidade das análises e, sempre que possível, simplificar e acelerar os procedimentos de projeto.

Todas estas demandas constituíram a motivação para um estudo detalhado dos movimentos ressonantes lentos de novos sistemas flutuantes (incluindo aí também os novos FPSOs, os quais passavam por um processo de projeto análogo visando reduzir seus movimentos de *roll*), cujas principais contribuições serão apresentadas na próxima seção.

## 3.2 Principais Contribuições

O ponto de partida dos estudos realizados sobre este tema foi um conjunto de ensaios de comportamento no mar das plataformas Petrobrás P51/P52 executados no tanque oceânico do laboratório *Marintek* em Trondheim, Noruega. As plataformas em questão tinham características bastante similares e representavam a nova geração de cascos recém-projetada pela Petrobrás. Os ensaios, através dos quais os movimentos ressonantes em *heave*, *roll* e *pitch* foram evidenciados pela primeira vez, consistiram basicamente em ensaios de ondas irregulares com medição de movimentos dos modelos por sistema óptico. As excursões horizontais dos modelos em escala-reduzida haviam sido restritas por sistemas com diferentes graus de complexidade: fundeados com um sistema de ancoragem truncado<sup>7</sup>, com um sistema simplificado composto por molas horizontais (emerso) e até mesmo com modelo livre, desprovido de qualquer restrição no plano horizontal. Além disso, parte dos ensaios havia sido executada tanto na presença como na ausência de um sistema equivalente de *risers*.

Todas estas variações garantiram um cenário bastante propício para as verificações de projeto que os ensaios almejavam, gerando uma base experimental através da qual se podia avaliar a influência de diversos aspectos de ancoragem e dos *risers* sobre os movimentos da plataforma. Entretanto, no que se refere especificamente às ressonâncias de segunda-ordem em *heave*, *roll* ou *pitch*, a base de comparação consistia exclusivamente de medições de movimentos em ondas irregulares. Como os movimentos ressonantes não haviam sido antecipados, tampouco foram executados ensaios simplificados que buscassem reproduzir condições mais controladas e variações sistemáticas destinadas a um estudo mais aprofundado do fenômeno. Dentre estes ensaios, poderíamos destacar os testes de movimentos em ondas bicromáticas, cuja execução permitiria avaliar a resposta em diferentes pares de frequências de ondas e não requereria qualquer mudança em termos de concepção dos mode-

---

<sup>7</sup>Método de compensação das diferenças de profundidade entre o tanque de provas e a ancoragem real, através do qual emprega-se um modelo de ancoragem submerso conectado a um sistema de molas horizontais, na tentativa de reproduzir as características de rigidez da ancoragem real.

los de ancoragem. Outros ensaios interessantes, embora tecnicamente mais difíceis, correspondem aos testes em ondas bi-cromáticas com modelo fixo (cativo), para medição direta de forças sobre o casco<sup>8</sup>. O problema em se dispor exclusivamente de ensaios de movimentos para uma verificação indireta das forças hidrodinâmicas é que, por se tratar de um fenômeno ressonante, estes movimentos são fortemente dependentes do amortecimento do sistema dinâmico. Estes, por sua vez, são dominados por efeitos viscosos ausentes dos modelos numéricos de previsão das forças hidrodinâmicas e, portanto, também devem ser avaliados com base nas medidas de movimentos dos ensaios. Essa dificuldade exigiu a adoção de procedimentos complementares para se reduzir os efeitos das incertezas associadas ao amortecimento viscoso na comparação entre os resultados teóricos e experimentais.

Dado que o paradigma experimental era composto basicamente por registros de movimentos em ondas irregulares, a metodologia adotada para este estudo adotou como referência os espectros de potência dos movimentos medidos experimentalmente e parâmetros estatísticos associados aos mesmos. Se chamarmos de  $\mu$  a diferença de frequências entre as componentes dos espectros de mar ( $\mu = \delta\omega$ ), o espectro de resposta em baixa-frequência de um determinado movimento (denotado aqui pelo índice  $\alpha$ ) pode ser calculado com base no espectro de energia das forças de segunda-ordem:

$$S_{\alpha}(\mu) = |H_{\alpha}(\mu)|^2 S_{F,\alpha}(\mu) \quad (3.4)$$

Na equação acima, a função  $H_{\alpha}$  representa a função de transferência que associa os movimentos às forças de excitação hidrodinâmica e pode ser calculada sem maiores dificuldades com base nos resultados da análise hidrostática do casco e do problema de radiação de primeira-ordem (cálculo das massas adicionais e amortecimento de radiação do corpo) para as diferentes frequências de interesse. O espectro de forças de baixa-frequência, por sua vez, pode ser obtido mediante cruzamento com o espectro de energia de grupo das ondas do mar (ver, p.ex., Pinkster (1980)):

$$S_{F,\alpha}(\mu) = 8 \int S(\omega)S(\omega + \mu)|T_{\alpha}(\omega, \omega + \mu)|^2 d\omega \quad (3.5)$$

A função  $T_{\alpha}(\omega, \omega + \mu)$  é a chamada função de transferência bi-quadrática

---

<sup>8</sup>A maior dificuldade aqui certamente reside na diferença de magnitude entre as forças de ondas em primeira e segunda-ordem, o que exige uma instrumentação de medida de forças capaz de suportar elevadas cargas nas frequências de ondas e com grande resolução de medição, para permitir uma leitura precisa das forças de baixa frequência. Um exemplo bastante interessante de medida direta de forças de segunda-ordem será apresentado na próxima seção, quando do estudo das derivas-lentas de uma turbina eólica flutuante.

(*quadratic transfer function*, qtf) das forças de baixa-frequência e, como discutido acima, em princípio deve ser obtida mediante a solução numérica do problema de contorno para cálculo do potencial de segunda-ordem<sup>9</sup>.

A complexidade desta modelagem computacional exigiu, primeiramente, a definição de um procedimento apropriado que garantisse uma convergência numérica adequada dos resultados. Neste processo, diversos parâmetros associados à solução computacional foram avaliados, como a geometria da malha numérica de superfície-livre e o emprego das aproximações assintóticas que o programa utiliza para representação do potencial de segunda-ordem no campo-distante (WAMIT, 2006). Ademais, buscando reduzir o esforço computacional envolvido, duas possíveis aproximações da solução do problema de contorno foram testadas: a primeira desconsidera os efeitos quadráticos de primeira-ordem na condição de superfície-livre de segunda-ordem, resolvendo apenas sua parte homogênea; a segunda, mais radical, desconsidera completamente a contribuição do potencial de segunda-ordem nas qtfs, restando apenas a parcela quadrática ( $F_q^{(2)}$ , equação 3.2). Em ambos os casos, estas aproximações eliminam a necessidade de se resolver numericamente a condição de contorno sobre a superfície-livre média do mar, simplificando consideravelmente os cálculos.

A posterior comparação com os resultados experimentais mostrou que a desconsideração total dos efeitos associados ao potencial de segunda-ordem acarretava erros consideráveis e, assim, essa aproximação foi descartada. Por outro lado, comprovou que um cálculo aproximado do potencial de segunda-ordem baseado na solução da condição homogênea de superfície-livre produzia bons resultados e que esta hipótese poderia, então, ser incorporada aos procedimentos de cálculo dos movimentos ressonantes destas plataformas semi-submersíveis. A vantagem, neste caso, não se limitava ao tempo de processamento necessário para esses cálculos. Ao prescindir da necessidade de se gerar uma malha numérica para superfície-livre média, um importante fator de imprecisão na modelagem numérica era eliminado.

A validade do emprego da aproximação de Newman (equação 3.3) também foi estudada. Além de também prescindir da solução na superfície-livre, já que as forças de deriva-média podem ser obtidas diretamente da solução linear, a aproximação de Newman possibilitaria uma redução considerável do

---

<sup>9</sup>Para fins deste estudo, a solução numérica dos problemas de primeira e segunda-ordem foi sempre obtida através do código comercial WAMIT®, um dos poucos códigos disponíveis que permitem executar a solução numérica dos problemas de radiação/difração de segunda-ordem. Cabe ressaltar, porém, que tal escolha foi pautada também em outro aspecto importante: A EPUSP, através do laboratório TPN, participa do desenvolvimento do código WAMIT já há alguns anos, tendo, por esta razão, acesso ao seu código-fonte, além de participação nos fóruns de discussão sobre o programa.

número de problemas a resolver (cada par de frequências considerado pressupõe a solução de um problema de segunda-ordem e dois de primeira). Os resultados, no entanto, comprovaram que a aproximação, neste caso, não levava a resultados aceitáveis. Isto já era esperado em função dos baixos períodos naturais dos movimentos (de cerca de 24 segundos para *heave* e pouco mais de 30 segundos para *roll* e *pitch*) e também pela relevância previamente observada dos efeitos associados ao potencial de segunda-ordem.

Por outro lado, com base em algumas considerações acerca das características da resposta dinâmica do sistema, propôs-se o emprego de uma aproximação do espectro de forças<sup>10</sup> que permitia uma redução semelhante no número de casos a analisar e que, ao contrário da aproximação de Newman, se mostrou bastante eficaz. A ideia básica por trás desta aproximação consiste no fato de que, se um sistema tem uma função de resposta de banda-estreita (o que ocorre, em geral, para sistemas pouco amortecidos), a resposta ressonante é dominada pela forçante que oscila na frequência natural do sistema. Nesse caso, então, é razoável aproximar o espectro de forças por um espectro constante (ou *espectro de ruído-branco*) cujo valor é dado pelo valor que o espectro original apresenta na frequência natural do sistema<sup>11</sup>. O emprego desta aproximação, por sua origem chamada de aproximação de *ruído-branco*, ao problema dos movimentos ressonantes de segunda-ordem em ondas pode ser traduzida na seguinte expressão:

$$S_{F,\alpha}(\mu) \cong (cte) = 8 \int S(\omega)S(\omega + \omega_n)|T_\alpha(\omega, \omega + \omega_n)|^2 d\omega \quad (3.6)$$

Através da equação acima é possível perceber que o cômputo das forças de segunda-ordem não mais necessita ser feito para todos os pares de frequências do espectro, mas apenas para aqueles em que  $(\omega_2 - \omega_1 = \omega_n)$ , propiciando, assim como a aproximação de Newman, uma redução significativa de esforço computacional. No entanto, ao deslocar o foco do cálculo para a frequência de ressonância e permitir a incorporação plena dos efeitos do potencial de segunda-ordem nas forças hidrodinâmicas, a aproximação de ruído-branco não incorre nos mesmos erros decorrentes da aproximação de Newman.

O trabalho de Matos et al. (2011), reproduzido no Anexo E, apresenta, de forma sistemática, os procedimentos numéricos adotados para a modelagem do problema de segunda-ordem da plataforma P52, as aproximações analisadas para a solução dos problemas de contorno e para o cálculo das qtf's, e as comparações entre resultados teóricos e experimentais.

<sup>10</sup>Aqui devo agradecer as sugestões do Professor José Augusto P. Aranha, atualmente no Depto. de Engenharia Mecânica da EPUSP.

<sup>11</sup>A ideia não é nova, e pode ser encontrada em livros clássicos de vibração de sistemas mecânicos, como o de Crandall and Mark (1963).

Os gráficos apresentados na Figura 3.4, abaixo, foram extraídos deste trabalho. Eles apresentam, à esquerda, os valores da matriz de qtf do momento de *pitch* da plataforma para ondas de proa. Os eixos coordenados representam as frequências das componentes de ondas. Assim, os valores na diagonal principal ( $\mu = 0$ ) indicam os momentos médios ( $D(f_i = f_j)$ ) para amplitudes unitárias das componentes de ondas, os quais seriam empregados para cálculo do espectro de momento segundo a aproximação de Newman. Além da diagonal principal, a figura reforça a reta paralela que representa a diferença de frequência correspondente ao período natural de *pitch* (neste caso, de 31,5 segundos). Os valores de qtf sobre esta reta são aqueles empregados na aproximação de ruído-branco ( $T_5(\omega, \omega + \omega_n)$ ) e, supondo que a hipótese de resposta de banda estreita seja válida, correspondem aos valores de momento dominantes no cálculo da resposta ressonante. É possível perceber que há uma considerável diferença entre os valores de momento sobre as duas bandas de frequências, com valores maiores sobre a reta que marca a frequência natural. A relevância desta diferença fica ainda mais evidente ao se cruzar os valores de qtf com o espectro de grupo de ondas de um dos mares para os quais a plataforma foi ensaiada. Esse resultado é apresentado no gráfico à direita, que representa a distribuição de energia do espectro de momento de *pitch* para esta condição de mar. É evidente que há um pico de energia pronunciado sobre a faixa de frequências no entorno da frequência natural e que, portanto, uma correta previsão do momento de excitação de segunda-ordem nessa banda de frequências é essencial para a análise dos movimentos ressonantes.

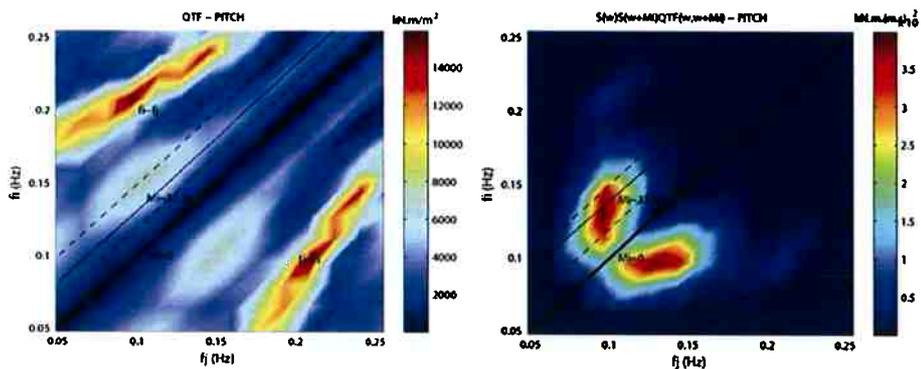


Figura 3.4: QTF de *pitch* (esquerda) e distribuição de energia do espectro de momento de *pitch* de segunda-ordem para determinada condição de mar (direita). Figuras extraídas de Matos et al. (2011)

Esses resultados, por si só, já indicavam claramente que a aproximação

de Newman subestimaria de forma considerável a resposta ressonante em *pitch*, como, de fato, viria a ser comprovado mediante comparação entre os espectros de resposta teóricos e experimentais (ver, p.ex., a Fig.22c do Anexo E). Para a mesma condição de mar considerada nos resultados da figura anterior, uma comparação entre o espectro de resposta obtido a partir dos movimentos medidos nos ensaios e os espectros teóricos estimados a partir de diferentes aproximações é apresentada na Figura 3.5, a seguir. Os valores teóricos foram obtidos através de um cálculo empregando a matriz de qtf “completa” (faixa de frequências delimitada pelas retas tracejadas na figura anterior) com a função de resposta ( $H_5(\mu)$ ) calculada considerando-se os seis graus-de-liberdade do sistema dinâmico (NUM.6alfa) ou apenas o grau-de-liberdade de *pitch* (NUM.1alfa) e, neste último caso, fazendo-se uso também da aproximação de Ruído-Branco (*White-Noise*). Em todos os casos, a qtf de *pitch* foi calculada através do programa WAMIT sem incorporar os efeitos quadráticos forçantes de superfície-livre, ou seja, sem recorrer a uma solução numérica da condição de superfície.

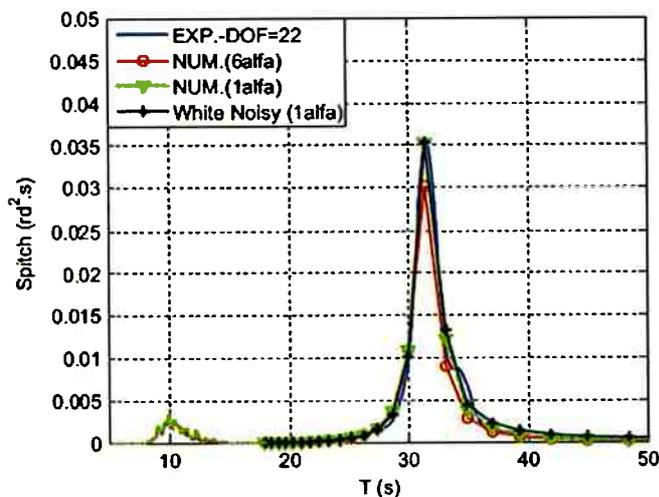


Figura 3.5: Espectro de movimento de *pitch* da plataforma P52. Comparação entre resultados experimentais e teóricos. Figura extraída de Matos et al. (2011)

Os resultados da Figura 3.5 refletem as principais contribuições do estudo. Através deles, é possível perceber que a resposta ressonante de 2ª ordem em *pitch* pode ser muito bem reproduzida com o emprego da aproximação de ruído-branco, sem a necessidade de se recorrer a um mapeamento das qtfs para todas as combinações de frequência de ondas. Como as análises reali-

zadas neste estudo consideraram, na maioria dos casos,  $N = 25$  frequências de ondas na análise dos espectros (um número que pode ser considerado típico para o estudo desse problema), a estimativa de movimentos pela matriz completa de qtfs exigiu a solução de  $N(N - 1)/2 = 300$  problemas de segunda-ordem, número que pôde ser reduzido a apenas  $N = 25$  casos com a abordagem de ruído-branco. Ademais, os resultados da Figura 3.5 também atestam que um cálculo das qtfs que despreze a influência dos termos forçantes de superfície-livre garante uma estimativa de movimentos adequada para este tipo de estrutura flutuante, evitando assim a necessidade de modelagem de uma malha de superfície-livre. Isso, além de reduzir o tempo de processamento requerido ainda mais, diminui consideravelmente a sensibilidade dos resultados a eventuais problemas de convergência na modelagem numérica. Todos os resultados apresentados acima se referem aos movimentos de *pitch* da plataforma (e se estendem diretamente aos movimentos de *roll*, dada a simetria da mesma). Conclusões similares foram obtidas também nas análises de segunda-ordem dos movimentos de *heave* (ver Anexo E).

A significativa redução de esforço computacional conseguida com esta abordagem torna factível a previsão dos movimentos ressonantes em ondas destas plataformas desde as primeiras etapas de projeto. Além disso, com base nos modelos propostos por este estudo, um procedimento de cálculo dos movimentos verticais de segunda-ordem foi implementado no simulador dinâmico TPN e validado mediante comparação com as séries temporais de movimentos medidas nos ensaios. Através desta ferramenta, é possível extrapolar o problema dos movimentos ressonantes para a escala-real, simulando a influência de outros efeitos, como correnteza, vento e efeitos dos sistemas reais de ancoragem e *risers* sobre a resposta dinâmica da plataforma.

Em outubro de 2007, a plataforma P52 (vista na Figura 3.6, a seguir) foi instalada no campo de Roncador, na Bacia de Campos. Isso permitiu estender o estudo mediante a execução de medidas de campo. Para tanto, a plataforma foi instrumentada com um sensor MRU (*Motion Reference Unit*) capaz de medir os movimentos do casco nos seus seis graus-de-liberdade. Medições simultâneas de velocidade e direção de vento foram feitas na mesma plataforma, e os dados ambientais foram complementados com medidas de ondas (por varredura de radar) e de correnteza realizadas por sensores localizados em plataformas próximas. Com base neste conjunto de dados foi possível fazer uma verificação (até onde sei, inédita) dos modelos de movimentos verticais induzidos por forças de ondas de segunda-ordem mediante comparação com resultados obtidos em campo. Os procedimentos técnicos adotados para o tratamento dos dados monitorados e os resultados da comparação com os modelos teóricos foram apresentados em Matos et al. (2010), artigo reproduzido também no Anexo F deste trabalho.



Figura 3.6: Vista da plataforma semi-submersível P52. Figura extraída de Matos et al. (2010)

Este trabalho traz duas contribuições que, a meu ver, merecem destaque: Primeiramente, atesta que a plataforma real é sujeita a movimentos ressonantes de *roll* e *pitch* induzidos por forças de segunda-ordem com amplitudes comparáveis às dos movimentos nas frequências de ondas. A Figura 3.7, abaixo, ilustra este fato apresentando as amplitudes significativas de primeira e segunda ordens calculadas a partir dos registros de movimentos de *roll* da plataforma realizados durante o mês de Junho de 2008.

A segunda contribuição importante foi a de mostrar que os efeitos de direcionalidade das ondas do mar têm um papel decisivo no cômputo dos movimentos e não podem ser ignorados em uma análise de dados obtidos em escala-real. Na Figura 3.8 são apresentadas duas representações de um dos espectros de mar medidos por varredura de radar durante o período de monitoramento. A figura à direita indica também o aproamento da plataforma, que tem sua proa apontando para a direção Norte. É possível perceber o considerável espalhamento direcional da energia de ondas.

A incorporação dos efeitos de direcionalidade de ondas no cálculo do espectro de forças/momentos de baixa-frequência exige a solução de um número ainda maior de problemas de segunda-ordem, já que a variação na direção de propagação das componentes de onda ( $\theta$ ) também deve ser considerada, o que pode ser traduzido, de forma discreta, na seguinte somatória:

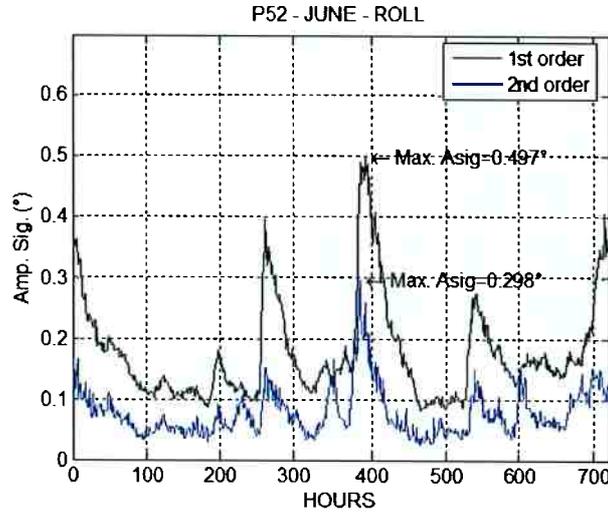


Figura 3.7: Amplitudes significativas de *roll* de 1a e 2a ordens estimados com base nos registros de movimentos da plataforma P52 durante o mês de junho de 2008. Figura extraída de Matos et al. (2010)

$$S_{F,\alpha}(\mu) = 8 \sum_l \sum_k \sum_j S(\omega_j, \theta_k) S(\omega_j + \mu, \theta_l) |T_\alpha(\omega_j, \theta_k; \omega_j + \mu, \theta_l)|^2 \delta\omega \delta\theta \quad (3.7)$$

Através dos resultados da Figura 3.9 é possível perceber o bom grau de aderência alcançado na comparação entre o espectro dos movimentos de *roll* medidos durante o período de atuação do mar representado na Figura 3.8 (curva em azul) e aquele estimado por um modelo teórico cujo espectro de forças de segunda-ordem é baseado na Equação 3.7.

Por fim, e como já mencionado anteriormente, estudos referentes a movimentos ressonantes de *roll* de novos projetos de plataformas FPSO também foram realizados. Seguindo um processo similar ao verificado para as plataformas semi-submersíveis, durante o projeto das plataformas da nova geração de FPSOs, sistemas com períodos naturais de *roll* bastante elevados foram testados, no intuito de dessintonizar a ressonância deste movimento dos períodos típicos de mar, um dos maiores problemas referentes à dinâmica dos FPSOs convencionais. Assim, este processo também levou ao ensaio de protótipos que resultaram submetidos a consideráveis movimentos ressonantes de *roll*, os quais viriam a constituir excelentes paradigmas para a verificação de modelos teóricos para previsão dos momentos de segunda-ordem.

Dada a similaridade com as análises apresentadas acima para o caso das

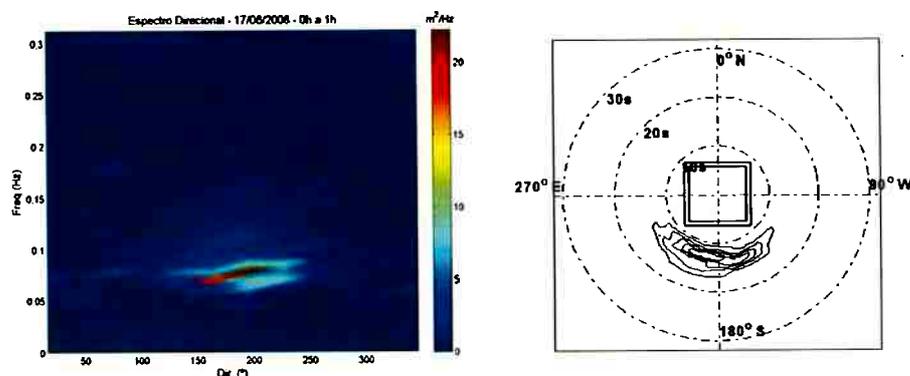


Figura 3.8: Representações de um dos espectros de ondas medidos nas proximidades da plataforma P52. Figuras extraídas de Matos et al. (2010)

semi-submersíveis, evitarei alongar desnecessariamente as discussões sobre a metodologia e os resultados obtidos neste caso. Devo ressaltar, porém, uma contribuição relevante obtida durante o estudo dos FPSOs, relativa a uma proposta de modificação da aproximação de ruído-branco original (Equação 3.6). De fato, a comparação com resultados de ensaios em tanque de provas mostrou que a aproximação original, embora ainda garantisse bons resultados em todos os casos analisados, apresentava um grau de discrepância maior com os resultados obtidos com uma faixa de frequências mais ampla da qtf de *roll*, se comparado ao caso das semi-submersíveis. Isto ocorria principalmente para os casos estudados nos quais o navio apresentava calados mais baixos, próximos ao calado de lastro do sistema. Matsumoto (2010)<sup>12</sup> mostra, então, que uma mudança de visão com respeito às hipóteses da aproximação de ruído-branco permite reduzir bastante estas discrepâncias. A alteração consiste em aproveitar a condição de banda-estreita da resposta ressonante para supor que a mesma permite admitir um modelo de força (qtf) constante, ao invés do modelo de espectro de força constante que caracteriza a aproximação original<sup>13</sup>. A grande vantagem com esta alteração é que, com ela, a variação do espectro de grupo de ondas em baixa-frequência pode ser incorporada de maneira direta, sem maiores dificuldades. Esta modificação se traduziria, então, na seguinte expressão:

<sup>12</sup>A referência procede de um trabalho de doutoramento em andamento no momento da redação deste texto. Espero que os resultados aqui mencionados sejam publicados em breve.

<sup>13</sup>Se formos um pouco mais estritos, mediante esta alteração deveríamos abandonar então a denominação “ruído-branco” e substituí-la por algo como “aproximação de função bi-quadrática de força constante.”.

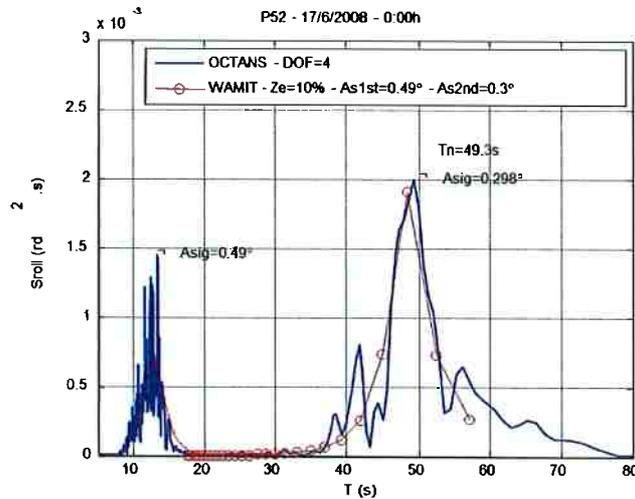


Figura 3.9: Comparação entre espectros de resposta em *roll* da plataforma P52: teórico (em vermelho) e estimado a partir dos movimentos medidos (em azul). Figura extraída de Matos et al. (2010)

$$S_{F,\alpha}(\mu) \cong 8 \int S(\omega)S(\omega + \mu)|T_{\alpha}(\omega, \omega + \omega_n)|^2 d\omega \quad (3.8)$$

A Figura 3.10 apresenta uma comparação entre os espectros de momento calculados com a matriz de qtf “completa” (curva em azul) e com a aproximação 3.8 para uma determinada condição de mar com o navio a meia-carga (calado intermediário) e incidência de ondas por través. Para fins de comparação, a figura apresenta ainda a função de transferência de resposta para força unitária (em negro). A vantagem da alteração proposta fica clara ao lembrar que a aproximação de ruído-branco original pressupõe que o espectro de forças tenha um valor constante correspondente àquele calculado na frequência de pico da função de transferência.

Em linhas gerais, o trabalho de Matsumoto (2010) mostra que uma metodologia similar àquela proposta para as semi-submersíveis também produz bons resultados no estudo dos movimentos ressonantes lentos de *roll* dos FP-SOs. Em particular, atesta que a aproximação de ruído-branco continua a garantir resultados satisfatórios neste caso, e que os mesmos podem ser ainda mais aprimorados com a modificação proposta em 3.8.

Mais recentemente, Rezende et al. (2013) também adotaram esta mesma aproximação e chegaram a conclusões similares no estudo dos movimentos ressonantes de *roll* de um sistema FLNG (*Floating Liquified Natural Gas*) em fase de projeto.

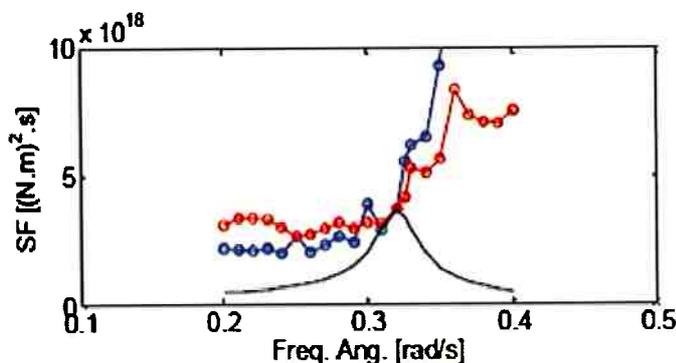


Figura 3.10: Comparação entre espectros de momento de *roll* de segunda ordem de um FPSO: calculado com qtf completa (azul) e com a aproximação 3.8 (vermelho). Figura extraída de Matsumoto (2010)

### 3.3 Um Estudo Recente sobre Turbinas Eólicas Flutuantes

Recentemente, tive a oportunidade de dedicar-me ao estudo do problema de deriva-lenta de um turbina eólica flutuante (*Floating Wind Turbine*, FWT), oportunidade esta que surgiu durante minha estadia junto à *Universidad Politécnica de Madrid* entre os anos de 2012 e 2013. A inclusão deste estudo para a conclusão deste capítulo que trata de problemas associados a efeitos de segunda ordem de ondas me pareceu interessante por diversas razões: Primeiramente, porque trata de um tipo de estrutura flutuante que, em geral, segue as concepções básicas de casco dos sistemas *offshore* de produção de petróleo e gás, mas que, principalmente em virtude de suas menores dimensões, apresenta particularidades que vêm exigindo uma reavaliação dos modelos hidrodinâmicos propostos para a sua representação. Um segundo motivo foi a possibilidade de apresentar aqui um problema recente associado às ressonâncias de deriva-lenta de uma plataforma, um tópico que, como mencionei anteriormente, já raramente suscita novos desenvolvimentos em se tratando de plataformas *offshore* em águas profundas. Por fim, devo mencionar também o caráter inédito que o estudo deste tipo de sistema apresenta no contexto da engenharia *offshore* nacional, um aspecto que considero um atrativo adicional.

Por diversas razões, dentre as quais se encontram a relativa escassez de novas áreas para implementação de campos de geração eólica em terra, problemas ambientais associados à operação das turbinas (ruído, interferências com a fauna), entre outros, já há alguns anos vêm-se trabalhando na Eu-

ropa na viabilização de campos eólicos *offshore* como uma alternativa para se expandir o potencial de geração de energia desta modalidade. Com este intuito, diversos projetos de Pesquisa e Desenvolvimento têm sido financiados através de programas da União Europeia e o interesse da indústria certamente aumentou com o recente lançamento de dois protótipos em escala-real, as plataformas *Hywind*, na Noruega, e *Windfloat* em Portugal.

Um panorama atual sobre o estágio dos projetos de FWT pode ser encontrado, por exemplo, na análise realizada por Maine (2012). Através deste e de outros trabalhos é possível perceber que as estruturas propostas para a sustentação das turbinas eólicas são, via de regra, versões reduzidas dos principais tipos de cascos empregados para a produção de óleo e gás; já que a redução dos movimentos em ondas é um dos requisitos fundamentais destes novos sistemas, aí se encontram, sobretudo, as plataformas do tipo semi-submersível, TLP e SPAR. Assim, a migração do conhecimento adquirido acerca da hidrodinâmica destes conceitos para o estudo destas novas aplicações foi um processo, por assim dizer, natural. No entanto, as dimensões reduzidas destas novas plataformas em comparação com suas “irmãs” empregadas na exploração de petróleo tornou necessária uma verificação dos modelos hidrodinâmicos normalmente utilizados para a análise destas últimas. Em linhas gerais, pode-se afirmar que, dadas as menores dimensões características destas estruturas frente às amplitudes e comprimentos típicos das ondas do mar, os efeitos viscosos no escoamento ao redor das mesmas se tornam proporcionalmente mais importantes. Por esta razão, o emprego de simulações em domínio-do-tempo baseadas em modelos de Morison de parte ou da totalidade das estruturas destas plataformas passou a ser relativamente comum em seus projetos.

A plataforma que foi alvo do estudo mencionado nesta seção é do tipo semi-submersível. Seu casco é composto por três colunas verticais de diâmetro de 7,0 metros dispostas em configuração triangular e conectadas por um sistema de *braces*. Na base de cada coluna há um *heave plate* de 20 metros de diâmetro, cujo principal objetivo é o de aumentar a massa adicional e os amortecimentos do casco. O calado de operação é de aproximadamente 15 metros, o que confere à plataforma um deslocamento de aproximadamente 2450 toneladas, e a plataforma está sendo projetada para operar em uma lâmina d'água de aproximadamente 100 metros. Uma representação gráfica da geometria da plataforma com a turbina eólica de 1.5 MW é apresentada na Figura 3.11.

A motivação para o estudo foi de ordem prática. A empresa responsável por seu projeto enfrentava problemas para dimensionar o sistema de amarração da plataforma, composto por três linhas de ancoragem em catenária. A razão para isso residia na dificuldade de modelagem numérica do casco para



Figura 3.11: Representação gráfica da Turbina Eólica Flutuante Hiprwind. Figura extraída de López-Pavón et al. (2013)

o cômputo das qtfs da plataforma. Análises feitas por diferentes fontes haviam resultado em discrepâncias significativas nos valores destas qtfs, com impacto relevante no dimensionamento da ancoragem. Ademais, como os períodos naturais dos passeios horizontais eram estimados na casa dos 50 a 70 segundos, havia a dúvida se o emprego da aproximação de Newman forneceria resultados razoáveis neste caso e a possível influência de efeitos viscosos sobre estas forças também era um fator de preocupação.

Para avaliar com maior segurança estas questões, propus a execução de uma série de ensaios com um modelo em escala-reduzida da plataforma em ondas bi-cromáticas. Estes ensaios seriam feitos com a estrutura fixa em ondas, emulando, portanto, apenas o problema de difração de ondas. O intuito, com isso, era o de tentar fazer medidas diretas das forças de segunda-ordem sobre a estrutura, obtendo assim medidas experimentais das qtfs para diferentes pares de frequências de ondas. Evidentemente, esse procedimento não permite captar todos os efeitos de segunda-ordem que têm influência sobre as forças hidrodinâmicas no caso em que a plataforma está livre para oscilar, já que parte destes efeitos decorre dos próprios movimentos do casco. No entanto, o mesmo permite uma medida direta de força que independe de efeitos de amortecimento ou de variação nas restaurações de amarração, os quais sempre estão presentes quando se procura estimar as forças de deriva com base em modelos fundeados e são de difícil quantificação. O procedimento proposto, contudo, apresentava uma elevada dificuldade técnica relacionada à instrumentação, já que requeria o emprego de células de carga ou

dinamômetros capazes de suportar as elevadas cargas de primeira-ordem e ainda assim fornecer leituras de elevada resolução que permitissem quantificar adequadamente as oscilações de baixa-frequência, de magnitude muito menor. Por esta razão, medidas de segunda-ordem em modelos fixos são bastante raras na literatura e muitas vezes se restringem a seus valores médios.

Os ensaios foram executados no *Canal de Ensayos Hidrodinámicos de El Pardo*, em Madrid, instituto que conta com um tanque de ondas de grandes dimensões (150m x 30m x 5m). Sabendo-se das dificuldades associadas às medidas de força, fez-se uso de um dinamômetro de alta resolução<sup>14</sup> normalmente empregado pelo laboratório para medidas que exigem grande precisão, como em ensaios de modelos de veleiros que disputam a famosa *America's Cup*. A Figura 3.12 apresenta uma fotografia do modelo da plataforma conectado ao dinamômetro durante os testes.



Figura 3.12: Vista de montagem do modelo da FWT para ensaios em ondas bi-cromáticas. Figura extraída de López-Pavón et al. (2013)

Os resultados obtidos com os ensaios foram excelentes, permitindo uma identificação bastante confiável<sup>15</sup> das forças de deriva-lenta. Esses resultados serviram então como paradigma para previsões numéricas da qtf, as quais

<sup>14</sup>O instrumento utilizado foi um dinamômetro de seis graus-de-liberdade Kempf&Remmers modelo R-50, com células de carga de 7,5kN e um desvio médio de leitura inferior a  $\pm 0,15\%$ .

<sup>15</sup>A estimativa das amplitudes de força de segunda-ordem foi feita através de dois métodos distintos: por um ajuste de mínimos-quadrados sobre o sinais de força no domínio-do-tempo e mediante uma análise espectral dos mesmos. Em ambos os casos os valores obtidos foram muito próximos, sendo o maior desvio registrado inferior a 13%.

foram obtidas mediante modelagem no programa WAMIT. Uma descrição detalhada dos ensaios e da construção do modelo numérico é fornecida em López-Pavón et al. (2013), artigo que compõe o Anexo G do presente texto. A título de ilustração, a Figura 3.13, extraída do referido artigo, apresenta uma comparação entre os valores de qtf de baixa-frequência estimados a partir dos ensaios e aqueles calculados através do programa WAMIT (considerando a solução completa de segunda-ordem) e também fazendo uso da aproximação de Newman, neste último caso empregando as forças de deriva-média obtidas com o mesmo modelo numérico. Os resultados correspondem a um conjunto de ensaios de ondas bi-cromáticas com diferença de frequência constante e igual a  $\delta\omega = 0,15$  rad/s, bastante próxima à frequência própria de deriva do sistema.

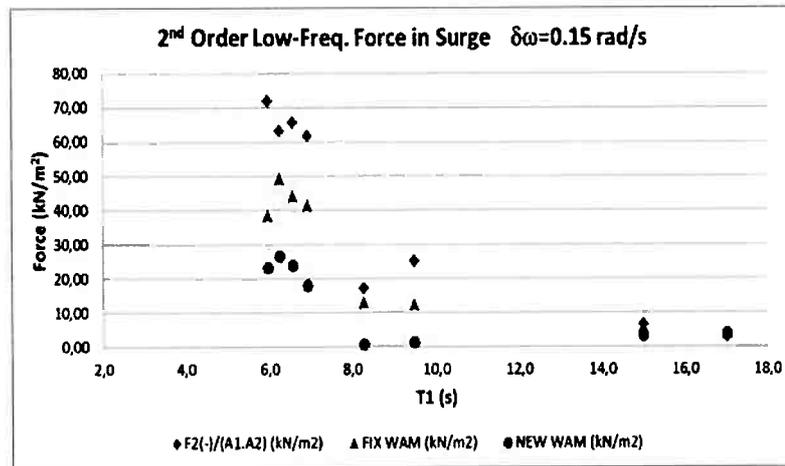


Figura 3.13: Valores de qtf de baixa-frequência para ensaios com ondas bi-cromáticas e  $\delta\omega = 0,15$  rad/s. Resultados experimentais (em azul), obtidos com modelo completo de 2a ordem (em vermelho) e através da Aprox. de Newman (em verde). Valores em escala-real. Figura extraída de López-Pavón et al. (2013)

Através dos resultados acima é possível perceber que o emprego da aproximação de Newman, mais uma vez, fica severamente comprometido em função dos altos valores de frequência-diferença. Os valores numéricos obtidos com o modelo completo de segunda-ordem seguem mais de perto os resultados experimentais, mas, mesmo neste caso, as qtf obtidas numericamente tendem a subestimar as forças medidas nos ensaios, especialmente em se tratando da zona de maior difração de ondas (baixos períodos). Estas discrepâncias podem ser um indício das limitações da modelagem potencial para o escoamento caracterizado por valores altos do número de Keulegan-

Carpenter (KC) do escoamento em torno de diversos elementos estruturais da plataforma.

Um dos principais resultados do estudo é o de apontar a carência de uma melhor avaliação dos modelos de força de deriva geralmente adotados para estas plataformas de dimensões reduzidas. Deve-se ressaltar, porém, que as discrepâncias observadas nestes ensaios de difração, embora importantes, não significam necessariamente que um modelo potencial de segunda-ordem não seja capaz de garantir resultados aceitáveis para o projeto destes sistemas. Primeiramente, é importante observar que a faixa de períodos de ondas relevante depende da energia dos espectros de grupo de ondas, que em geral reduz a relevância das forças em períodos muito baixos. Ademais, os ensaios com a estrutura fixa intensificam as forças na região de difração; com o modelo livre para oscilar, estas forças certamente serão reduzidas, o que pode também levar a uma melhor previsão das mesmas através dos modelos numéricos. Estes aspectos, porém, carecem ainda de uma verificação mais objetiva que permita quantificar os efeitos dos movimentos do casco sobre as forças de segunda-ordem e compará-las às estimativas numéricas.

Assim, com o objetivo de estender a análise hidrodinâmica, um novo conjunto de ensaios está programado para o ano de 2013 e deve ser executado no tanque oceânico da *École Centrale de Nantes*, na França. Nesta campanha estão previstos, além de novos testes com a estrutura fixa, ensaios com modelo fundeado em ondas bi-cromáticas e irregulares. Estes últimos permitirão estimativas das forças através do registro das trações no fundeio, além de uma avaliação indireta baseada no monitoramento dos movimentos ressonantes do sistema. Os resultados obtidos até o momento e o novo conjunto de dados que será coletado em Nantes devem fornecer um panorama bastante detalhado do problema de deriva-lenta destas estruturas flutuantes e, dessa forma, propiciar uma avaliação mais segura dos métodos disponíveis para sua previsão em projeto.



## Capítulo 4

# Um Método para Inferência de Ondas a partir dos Movimentos de Sistemas Ancorados

As medidas de campo realizadas para o estudo dos movimentos ressonantes da plataforma P52 apresentadas no Capítulo 3 revelam a importância que o monitoramento destes sistemas em escala real muitas vezes adquire para a verificação e validação de modelos de previsão. Outro problema prático já citado anteriormente e que vem suscitando levantamentos de dados de campo mais detalhados diz respeito aos movimentos de *roll* dos sistemas FPSO em configuração *turret*. Neste caso, o principal interesse recai na caracterização das estatísticas conjuntas de ondas, vento e correnteza que induzem a um alinhamento desfavorável do navio com as ondas e, conseqüentemente, movimentos de jogo de elevadas amplitudes.

Neste tipo de monitoramento, normalmente a parte mais complexa do ponto de vista técnico corresponde à medição das condições ambientais atuantes sobre o sistema, especialmente no que se refere à correnteza marítima e às condições de ondas. Com respeito à primeira, a dificuldade técnica se encontra sobretudo no fato de que, geralmente, não apenas a correnteza próxima à superfície influencia o comportamento do sistema, mas sim todo o perfil de correnteza em profundidade atuante sobre as linhas de ancoragem e *risers* que conectam o casco ao leito oceânico. No que diz respeito às ondas do mar, por sua vez, existem vários instrumentos de medição destinados a seu monitoramento, porém, quando o objetivo consiste em medições de longo prazo em locais com profundidade acima de 1000 metros, todos estão sujeitos a problemas que dificultam seu emprego e sua manutenção.

As boias oceanográficas eram, até pouco tempo atrás, a única opção para medidas de ondas de longo prazo e são, ainda hoje, consideradas o instru-

mento mais confiável para se realizar tais medições. Em regiões de águas profundas, no entanto, seu emprego é bastante complicado. Mais do que um problema de instalação, a grande dificuldade consiste na manutenção destes equipamentos. De acordo com relatos feitos por pessoal da Petrobrás e da Marinha do Brasil, não são raros os casos de perda, depredação e inclusive de furto de boias oceanográficas (ver, por ex., Nunes (2009)). Por este motivo, manter um número mínimo de boias fazendo o monitoramento das principais zonas da Bacia de Campos sempre se mostrou um desafio.

Nos últimos vinte anos, a técnica de inferência das condições de ondas por meio de radares foi aprimorada e incorporada a vários pacotes comerciais destinados ao monitoramento das condições meteoceanográficas a bordo de navios e plataformas. A grande vantagem deste sistema, se comparado às boias, é o fato de se tratar de uma tecnologia embarcada, o que facilita sobremaneira a instalação e a manutenção dos instrumentos. Diversos pacotes deste tipo foram instalados recentemente em plataformas na Bacia de Campos. Na prática, contudo, as medições de radar são também sujeitas a um considerável número de dificuldades operacionais, quer sejam de ordem técnica (como a interferência das condições meteorológicas locais nas leituras) ou de calibração/manutenção do equipamento, que frequentemente impedem um monitoramento ininterrupto das condições de ondas em intervalos de tempo mais longos de registro.

Tendo em vista estas dificuldades, a EPUSP iniciou no ano 2000 uma linha de pesquisa cujo principal objetivo é o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de ondas baseado nos movimentos de navios ancorados, como, por exemplo, as plataformas FPSO. A ideia, em si, não era nova. Já havia grupos trabalhando no desenvolvimento de método semelhante para navios em curso, embora estes ainda apresentassem poucos resultados. O principal trabalho, assim, foi o de adaptar a técnica ao caso das plataformas, especialmente os FPSOs, os quais são sujeitos a grandes variações de carga e calado que modificam continuamente as características de sua resposta em ondas. Esta linha de pesquisa, da qual participo desde o seu início, já passou por diversas fases, desde uma análise de viabilidade baseada apenas em simulações numéricas até verificações mediante ensaios em escala reduzida e, mais recentemente, através de dados de monitoramento em escala real. Atualmente, já se dispõe de um sistema composto por instrumentos de medição e *software* de inferência de ondas desenvolvido para se comunicar com os sistemas de controle dos FPSOs da Petrobrás e que já passou por alguns primeiros testes de campo.

A principal vantagem da inferência por movimentos do casco reside na simplicidade da instrumentação necessária. Para a estimativa do espectro direcional de ondas basta o uso de uma base inercial composta por ace-

lerômetros e *rate-gyros* convencionais (e a informação da direção de aproamento do navio, que no caso de sistemas com aproamento variável, como os *turrets*, pode ser obtida da bússola giroscópica já instalada na plataforma). Esta instrumentação, leve e compacta, pode ser instalada em qualquer acomodação interna do navio, é muito pouco sensível a interferências externas e praticamente não requer qualquer esforço de manutenção, se comparada, por exemplo, aos sistemas de radar. O método, porém, é sujeito a uma limitação bastante óbvia: só é capaz de estimar as ondas que efetivamente produzam uma resposta dinâmica significativa do navio. Perdem-se, assim, componentes de ondas curtas, de alta frequência, que são basicamente difratadas pelo casco do navio sem causar movimentos importantes nestas frequências de oscilação. Em outras palavras, em seu papel de sensor de ondas, o navio filtra as componentes de alta frequência para as quais não há resposta dinâmica. Obviamente, portanto, o objetivo almejado com este sistema não é o de competir com os demais métodos de medição, mas sim o de fornecer uma previsão complementar, com a vantagem de que esta é, em princípio, tanto mais confiável quanto mais severas forem as condições de mar; deve-se ressaltar que é exatamente nestes momentos que as estimativas de ondas se fazem mais necessárias e que os demais instrumentos de medição experimentam maiores dificuldades técnicas (este aspecto voltará a ser discutido, em maiores detalhes, ao final deste capítulo).

Cada um dos métodos mencionados acima busca fornecer uma estimativa confiável do espectro direcional de ondas que está agindo no local no instante da medição. Aqui, a capacidade de distinguir condições de mares cruzados (compostos pela combinação de distintos espectros com diferentes períodos de pico e direções médias) é o fator que impõe as maiores dificuldades técnicas. Sujeitos a erros de medição, os sistemas recorrem a diferentes métodos de inferência estatística buscando minimizar os erros associados à estimativa destes espectros. Métodos como o *Método da Máxima Verossimilhança* ou o *Método da Máxima Entropia* (ver, p. ex., Ochi (1998)) são dois exemplos das técnicas de inferência comumente empregadas com esta finalidade. Para o monitoramento *in situ* das condições instantâneas de onda, a velocidade de estimação passa a ser um aspecto crítico. Técnicas que levam a problemas de minimização não-lineares e exigem, assim, considerável esforço computacional, veem sua aplicação prejudicada. Nos estudos prévios que realizamos acerca da medição de ondas por movimentos de navios, um método de inferência baseado em uma abordagem Bayesiana do problema se mostrava o mais promissor e, após extensos estudos de comparação, foi selecionado como base para o sistema que desenvolvemos na EPUSP. Não, porém, sem uma série de estudos adicionais que proporcionaram um melhor entendimento das particularidades e limitações do método e que levaram à

proposição de modificações que contribuíram para melhorar seu desempenho enquanto estimador de ondas.

## 4.1 O Modelo de Inferência Estatística e os Procedimentos de Medição

O problema em questão corresponde ao problema inverso do estudo convencional de comportamento em ondas de uma estrutura flutuante. Neste último, conhecidas as condições de ondas (definidas por seu espectro de energia  $S(\omega, \theta)$ ) e a função de transferência dos movimentos do navio (RAOs), é possível obter, mediante uma análise dinâmica linear, os espectros de resposta deste navio quando sujeito a tais condições de ondas. Aqui, no sentido contrário, partimos do conhecimento dos movimentos do navio para estimar as condições de ondas que os originaram. A transposição é mais uma vez baseada nos RAOs, que fazem agora o papel da função de resposta do sensor de ondas, e a análise também pressupõe, portanto, que a dinâmica do navio possa ser bem representada por um modelo linear.

As medidas de aceleração do navio e suas velocidades angulares são obtidas através da base inercial e convertidas em sinais de movimento de um ponto selecionado do casco considerando os seis graus-de-liberdade do navio. A partir destes registros temporais, são obtidos os espectros de movimento deste ponto. Para que seja possível obter uma estimativa da direção de incidência de onda, porém, conhecer os espectros de potência de cada movimento não é suficiente, pois, além da informação de distribuição em frequência da energia dos movimentos nos diferentes graus-de-liberdade, é necessário conhecer também informações acerca das fases entre os mesmos. Para tanto, trabalha-se com a matriz completa dos chamados *espectros de potência cruzados* de movimentos:

$$\phi_{ij}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} x_i(t)x_j(t + \tau)d\tau \right] e^{-i\omega t} dt \quad (4.1)$$

A relação entre os espectros cruzados de movimento e o espectro de energia de ondas procurado se dá através cruzamento deste último com os operadores de resposta do navio, considerando as diferentes direções de ondas, na forma:

$$\phi_{ij}(\omega) = \int_{-\pi}^{\pi} RAO_i(\omega, \theta) RAO_j^*(\omega, \theta) S(\omega, \theta) d\theta \quad (4.2)$$

As expressões 4.1 e 4.2 permitem, então, buscar uma solução  $S(\omega, \theta)$  que

minimize a diferença entre os espectros cruzados obtidos a partir das medidas de movimento do navio e aqueles calculados mediante o cruzamento da mesma com os RAOs do navio, supostamente conhecidos. Em forma discreta, isto poderia ser feito, frequência a frequência, através da minimização do valor do seguinte funcional que representa o erro quadrático entre as diferentes estimativas dos espectros cruzados<sup>1</sup>:

$$J(\mathbf{x}) = |\mathbf{B} - \mathbf{A}\mathbf{x}|^2 \quad (4.3)$$

onde a matriz  $\mathbf{B}$  representa a matriz dos espectros cruzados obtidos segundo 4.1,  $\mathbf{A}$  é uma matriz que contém os valores dos RAOs nas diferentes direções do navio e o vetor  $\mathbf{x}$  representa o vetor de valores do espectro de ondas nas diferentes direções  $\theta_k$  para a frequência considerada.

Na prática, porém, a análise é sujeita a erros de medida e é sabido que uma estimação baseada exclusivamente na minimização do erro quadrático 4.3 não produz bons resultados. Faz-se necessária a inclusão de algum tipo de informação adicional acerca do espectro de ondas procurado de forma a limitar o espectro de possíveis soluções e, assim, tornar a estimativa mais robusta. Para alguém habituado a trabalhar com os espectros de ondas do mar, provavelmente a primeira ideia que lhe ocorre para orientar esse processo é fazer uso das formas parametrizadas de espectro que são comumente adotadas em oceanografia para a representação das condições de mar com diferentes características. De fato, este foi um dos primeiros procedimentos testados no decorrer deste projeto de pesquisa e alguns resultados preliminares, baseados em simulações numéricas, foram apresentados em Tannuri et al. (2003) (este artigo é apresentado como Anexo H deste texto). Para tanto, a parametrização de espectro escolhida foi aquela proposta por Hogben and Cobb (1986). Este procedimento, porém, apresenta uma série de desvantagens em sua implementação e logo se mostrou pouco eficiente. Primeiramente, para que o método seja capaz de prever condições cruzadas de mar, requer um número relativamente alto de parâmetros independentes (o modelo adotado requeria oito parâmetros para a reprodução de mares com até dois picos de energia, ou bimodais). Além disso, a abordagem paramétrica conduz a um processo de otimização não linear, que exige um elevado esforço de processamento numérico e, conseqüentemente, tempos de estimação relativamente altos, o que prejudica sua aplicação como um método de previsão das condições instantâneas de ondas. Posteriormente, testes do método baseados em medidas feitas em tanque de provas mostraram que o mesmo também se mostrava frequentemente sujeito a sérias dificuldades de convergência numérica, o que,

---

<sup>1</sup>Maiores detalhes acerca da construção do sistema matricial e dos métodos de minimização empregados podem ser encontrados no Anexo I.

por fim, nos levou a descartar a abordagem paramétrica e a avaliar métodos alternativos de solução.

O modelo de inferência estatística finalmente adotado foi baseado no método proposto originalmente por Iseki and Ohtsu (2000). Este método recorre a uma abordagem Bayesiana do problema, cujo processo de inferência estatística consiste em buscar o evento de maior probabilidade dentro do espaço das possíveis soluções considerando-se a existência de certo conhecimento prévio acerca do evento procurado. A influência que esta informação *a priori* tem sobre o processo de decisão é a marca da estatística Bayesiana. Para o problema em questão, a única informação prévia disponível a respeito do espectro de ondas causador dos movimentos do navio se refere ao fato de que o mesmo goza de certas características de suavidade em termos da variação de sua energia. O modelo proposto por Iseki and Ohtsu (2000) “impunha” tal suavidade apenas com respeito à variação da energia nas diferentes direções de propagação de ondas (ou seja, em termos da função de espalhamento direcional do espectro) e, assim, o processo de estimação de  $S(\omega, \theta)$  podia ser realizado de forma independente para cada frequência de onda considerada no espectro. Posteriormente, Nielsen (2008) sugeriu que certo grau de suavidade fosse também considerado em relação à variação em frequência do espectro (isto é, em termos do espectro de potência de ondas), argumentando que tal consideração produzia efeitos benéficos adicionais no processo de estimação. Esta versão modificada corresponde à versão atualmente implementada em nosso algoritmo de inferência. Em termos matemáticos, com a inclusão (Bayesiana) da informação prévia acerca da suavidade do espectro em direção e frequência, o processo de inferência recai então na minimização do seguinte funcional<sup>2</sup>:

$$J(\mathbf{x}) = |\mathbf{B} - \mathbf{A}\mathbf{x}|^2 + \mathbf{x}^T (u_1^2 \mathbf{H}_1 + u_2^2 \mathbf{H}_2 + u_3^2 \mathbf{H}_3) \mathbf{x} \quad (4.4)$$

Vários comentários importantes devem ser feitos com respeito à equação acima. Primeiramente, é preciso esclarecer que as matrizes  $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2$  são matrizes facilmente construídas a partir da aproximação por diferenças finitas das segundas derivadas do espectro de ondas ( $\mathbf{x}$ ) em direção e frequência, respectivamente. Os parâmetros escalares  $u_1, u_2$  que multiplicam estas matrizes controlam o grau de suavidade que é imposto no processo de estimação. Através deles se dá o compromisso entre a suavidade do espectro de ondas obtido e a redução do erro entre os movimentos medidos e os movimentos calculados pelo modelo dinâmico linear. Estes parâmetros entram como novas

<sup>2</sup>A suavidade do espectro é representada a partir de uma aproximação de diferenças finitas das derivadas segundas do espectro em direção e frequência. Detalhes podem ser obtidos no Anexo I.

variáveis do processo e, na linguagem dos modelos de inferência Bayesianos, são denominados *hiperparâmetros*. Outro aspecto a ressaltar diz respeito ao fato de que a expressão 4.4 difere do funcional proposto por Nielsen (2008) em virtude do último termo, ausente no modelo proposto em tal referência. A inclusão deste terceiro fator de ponderação se mostrou necessária por uma razão bastante óbvia: os RAOs do navio apresentam sempre valores virtualmente nulos acima de uma determinada frequência de ondas, já que ondas muito curtas em relação às dimensões características do navio não induzem forças capazes de excitar a dinâmica da embarcação. Dessa forma, acima de uma determinada frequência limite  $\omega_H$ , temos um sensor (navio) cuja função de resposta às ondas que queremos medir é virtualmente nula. Nestas frequências, é claro, qualquer solução (espectro de ondas) é, portanto, possível. O termo  $\mathbf{x}^T \mathbf{H}_3 \mathbf{x}$  mede a energia do espectro nas zonas de frequência onde os RAOs do navio são considerados nulos<sup>3</sup>. A inclusão deste terceiro termo, portanto, visa apenas evitar acréscimos espúrios de energia de ondas nestas faixas de frequências.

Por fim, um último comentário: O modelo Bayesiano que leva à expressão 4.4 do funcional  $J(\mathbf{x})$  a ser minimizado supõe a maximização da chamada distribuição de probabilidades *a posteriori*, que é representada pelo produto entre a chamada distribuição *a priori* (que contém a informação prévia acerca do espectro) e a *função de verosimilhança* do problema (ver, p. ex., Iseki and Ohtsu (2000)). No processo de solução, contudo, resta equacionar a questão dos hiperparâmetros. Em princípio, valores ótimos destes parâmetros devem ser identificados para cada processo de estimação (isto é, para cada medida de onda realizada). Para a definição destes valores ótimos, Iseki and Ohtsu (2000) e Nielsen (2005) adotam um Critério Bayesiano de Informação (*Akaike's Bayesian Information Criteria*, ABIC). No entanto, é na implementação deste critério que reside o maior fator de complexidade matemática. Ademais, a consideração deste critério como proposta por Nielsen (2005) torna o processo de estimação demasiadamente moroso para fins de obtenção de medidas que sirvam para informar as condições momentâneas de ondas atuantes no local. Em face destes problemas, propusemos uma abordagem alternativa, simplificada, segundo a qual os valores dos hiperparâmetros são calibrados previamente e entram, portanto, como valores *conhecidos* no processo de estimação. A validade desta proposta foi comprovada através de uma extensa análise de sensibilidade dos melhores valores destes parâmetros em função das características das ondas que se busca identificar e do sensor (na-

<sup>3</sup>Na prática, verificou-se que uma consideração idêntica deveria ser feita para a zona de frequências muito baixas, quando os valores dos RAOs dos movimentos angulares são também muito pequenos. Detalhes são apresentados no Anexo I.

vio) empregado para tanto (maiores detalhes sobre esse processo serão apresentados na próxima seção). A relevância prática desta mudança de abordagem é considerável; uma vez pressuposto que os valores destes parâmetros são conhecidos *a priori*, resta um processo de otimização que leva à solução de um sistema algébrico linear, cujo processamento matemático é bastante veloz. Contudo, além dos aspectos práticos, consequências importantes do ponto de vista da fundamentação teórica também podem ser apontadas: de fato, para o leitor que observa pela primeira vez o funcional definido pela expressão 4.4, o processo de estimação pode ser imediatamente compreendido como a busca de uma solução de compromisso que apresente, por um lado, um baixo erro com respeito aos espectros de resposta levantados pelos registros de movimento do navio, e que, por outro, mantenha certa grau de suavidade com respeito à variação de energia em frequência e direção. Soluções com variações abruptas de energia em direção ou frequência são penalizadas (e os fatores de penalização são controlados justamente pelos parâmetros  $u_1$  e  $u_2$ ), assim como soluções que apresentem energia muito grande em faixas de frequências nas quais o navio não responde e que, portanto, estão além dos limites de estimação (e, nesse caso, o fator de penalização corresponde ao parâmetro  $u_3$ ). Pretendo dizer, com isso, que uma vez que se admite que os valores destes parâmetros podem ser definidos previamente (independentemente de considerações acerca da origem desta informação), a compreensão do processo de inferência estatística que empregamos prescinde do conhecimento de todo o arcabouço lógico Bayesiano sobre o qual foi construída a expressão 4.4. A passagem entre a expressão 4.3 e a expressão 4.4 pode ser entendida como o incremento de um método de penalizações com respeito a soluções que desrespeitam certas imposições de suavidade ou que apresentam valores considerados exagerados em faixas de ondas que o sensor utilizado não pode medir com suficiente acurácia. Por esta mesma razão, neste texto dispensaremos considerações mais profundas acerca da abordagem estatística Bayesiana e de detalhes quanto às hipóteses e formulação do critério ABIC. O leitor interessado em obter mais informações sobre estes tópicos tem nos trabalhos já citados de Iseki and Ohtsu (2000) e Nielsen (2008) um bom ponto de partida. Em Nielsen (2005) também podem ser encontrados detalhes com respeito à implementação matemática do critério ABIC.

Nas próximas seções, procuro descrever com maiores detalhes as principais contribuições de nosso trabalho ao problema de inferência de ondas por movimentos de navios. Estas abrangem diferentes aspectos do problema. Incluem considerações que vão desde a seleção do melhor conjunto de movimentos para a estimação e uma análise de sensibilidade a erros de caracterização do navio/sensor, até modificações visando garantir um desempenho computacional adequado e a geração de uma base de dados experimental (tanto em

escala reduzida como em escala real) que foi de importância primordial para a validação dos processos e a verificação dos métodos empregados.

## 4.2 Principais Contribuições ao Desenvolvimento do Método e Resultados Obtidos

O artigo Tannuri et al. (2003) apresenta alguns dos primeiros resultados concretos obtidos neste tema de pesquisa, ainda com a adoção de um método de inferência baseado na parametrização do espectro. Este artigo pode ser consultado no Anexo H do presente texto. A contribuição mais relevante contida neste trabalho, certamente, é a que se refere à seleção da base de movimentos mais adequada para se proceder à inferência estatística. De fato, induzidos pela analogia com o caso de estimação de ondas por boias oceanográficas, os primeiros trabalhos que propuseram a inferência a partir de navios presumiam empregar, sem maiores considerações a respeito, uma trinca de movimentos normalmente adotadas nas medidas de boias, a saber, o movimento de translação vertical e dois movimentos angulares em torno de eixos cartesianos horizontais (ou seja, os movimentos de *heave*, *pitch* e *roll*). No entanto, embora essa opção seja apropriada para o caso das boias, que não apresentam resposta dinâmica própria significativa com respeito às elevações de ondas, o mesmo não é verdade em se tratando dos navios. O problema reside principalmente no movimento de *roll*, cuja resposta, como é sabido, apresenta forte caráter não linear com respeito às amplitudes de ondas. Este comportamento decorre do fato de o navio, ao jogar, dissipar pouca energia por irradiação de ondas e, conseqüentemente, estar sujeito a um amortecimento pequeno (se comparado, por exemplo, aos movimentos de *heave* e *pitch* do navio) e dominado por efeitos de origem viscosa do escoamento. Uma vez que a frequência natural de *roll* dos navios está geralmente situada dentro da faixa de frequências de energia significativa das ondas do mar, a resposta ressonante em *roll*, pouco amortecida e com amortecimento dominado por efeitos viscosos, explica o caráter não-linear da função de transferência associada a este movimento. Ademais, por estar sujeito a uma força de restauração hidrostática mais branda, o movimento de *roll* resulta mais sensível a erros nas estimativas de distribuição de peso do casco e da posição vertical de seu centro de gravidade. Para quantificar os erros que poderiam ser introduzidos no método de inferência por uma modelagem linear da dinâmica do movimento de *roll* do navio sujeita a imprecisões na estimativa dos dados inerciais do navio, uma análise de sensibilidade foi executada. Para tanto, supôs-se que discrepâncias da ordem de  $\pm 10\%$  no carregamento pressuposto

do navio (que, lembrando, ao tratar-se de um FPSO, varia continuamente no decorrer do tempo), pudessem ser considerados típicos para o processo de estimação. Dessa forma, através de simulações numéricas foi possível avaliar as variações do espectro estimado face a erros nos RAOs do navio (por exemplo, calculando os movimentos impostos ao navio por um espectro de ondas conhecido quando este apresentava um carregamento de 90% do máximo e, em um segundo passo, procurando estimar o mesmo espectro de ondas considerando estes movimentos pré-computados e um RAO “equivocado”, referente a uma carga de 100% ou 80% da máxima). Mostrou-se, com isso, que o maior fator de erro na estimação provinha, de fato, da imprecisão na modelagem do movimento de *roll*. Esta conclusão é fácil de se compreender ao se observar as variações das funções de transferência dos movimentos de *roll* e *pitch* do FPSO considerado no artigo para diferentes condições de carregamento (80%, 90% e 100% da carga máxima) apresentadas na Figura 4.1. Nesse caso, as curvas de RAO de *roll* foram geradas para uma condição de ondas de través, enquanto as de *pitch* se referem a ondas de proa.

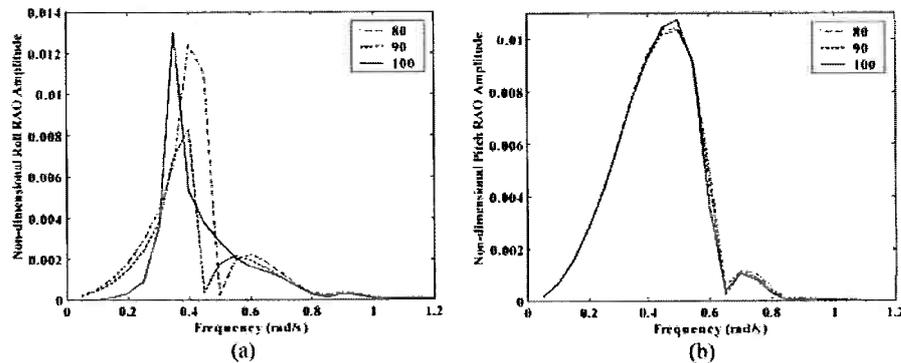


Figura 4.1: RAOs de *roll* (a) e *pitch* (b) do FPSO analisado para diferentes condições de carregamento. Figura extraída de Tannuri et al. (2003)

Na figura acima é fácil observar que, enquanto a função de resposta de *pitch* se mantém praticamente inalterada, o RAO de *roll* sofre uma considerável mudança frente às variações de carga, com alteração do período natural de movimento e dos fatores de amplificação da resposta ressonante. Ademais, deve-se considerar que erros nas condições de operação do navio não são o único fator de incerteza quanto ao movimento de *roll*. Para a descrição linear da resposta dinâmica, faz-se necessária a hipótese de um modelo linear para o amortecimento de *roll*, ou seja, um momento proporcional à velocidade angular e cujo fator de proporcionalidade seja constante, independentemente das amplitudes de ondas e de movimento. Porém, dada

a natureza eminentemente não-linear deste amortecimento, é um fato bem conhecido do estudo de comportamento de navios no mar que a inposição deste modelo é um dos fatores de imprecisão mais importantes associados à solução deste problema em domínio da frequência. Além do fato de a força de amortecimento depender significativamente da amplitude de movimento em *roll*, a quantificação deste amortecimento para o navio em escala real é sempre problemática.

Uma vez discutidos os problemas práticos associados à modelagem da resposta do navio em *roll*, em Tannuri et al. (2003) argumentamos que não havia porque insistir na manutenção da trinca de movimentos *heave-pitch-roll*. De fato, como os movimentos nos seis graus-de-liberdade do navio podem ser medidos sem maiores problemas do ponto de vista técnico, dispõe-se de uma base de informação redundante para a estimação de ondas. Pode-se, simplesmente, substituir o movimento de *roll* pelo movimento de *sway* (que carrega consigo as mesmas informações acerca da direção de ondas com respeito ao plano central do navio), sendo que este não apresenta ressonâncias na faixa de frequências de ondas do mar e sua função de resposta, assim como os RAOs de *pitch* ilustrados na Figura 4.1, é pouco sensível a erros de modelagem do navio. Com base nestas considerações, passamos a adotar, desde então, a base *heave-pitch-sway* como referência para a estimativa de ondas.

A validade da proposta foi demonstrada através de simulações numéricas e também mediante uma primeira base de comparação experimental. Esta foi composta de ensaios que haviam sido previamente realizados no tanque de provas do IPT com um modelo de um navio FPSO da Petrobrás. Embora o número de ensaios disponíveis fosse bastante pequeno e envolvesse apenas condições de onda de cristas-longas (sem espalhamento direcional) e unimodais, os dados obtidos através destes ensaios permitiram uma primeira verificação do método de inferência. Os movimentos do modelo medidos nos ensaios em ondas irregulares foram empregados para se estimar os espectros de energia que caracterizavam tais ondas e estes, por sua vez, foram comparados com os espectros de energia obtidos a partir da leitura de elevação de onda feita no tanque por intermédio de *wave-probes*. Para estas condições de mar um tanto restritas (ao menos em termos de espalhamento direcional e modalidade), o método de inferência baseado na parametrização prévia do espectro mostrou-se capaz de fornecer bons resultados. A Figura 4.2, a seguir, ilustra a comparação dos valores de altura significativa de ondas estimadas através dos movimentos do navio e pelas leituras de ondas no tanque (consideradas, aqui, como paradigma experimental).

Outra contribuição relevante deste trabalho foi a definição de um período de pico de espectro mínimo, ou, digamos, um *período de corte*, abaixo do qual as estimativas baseadas na leitura de movimentos de um navio VLCC

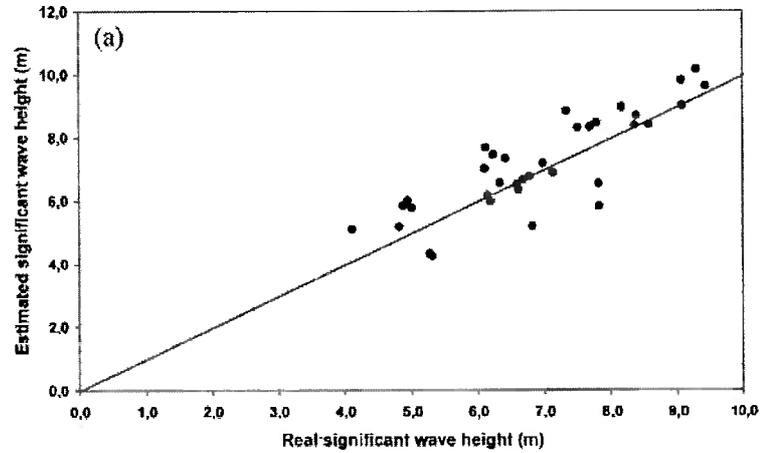


Figura 4.2: Comparação entre valores de altura significativa de ondas estimadas por movimentos do modelo (eixo vertical) e por leitura de provetas de ondas (eixo horizontal). Figura extraída de Tannuri et al. (2003)

(tipo de casco de petroleiro que serve de base para a maioria dos FPSOs em operação) não pode ser feita com uma precisão que possa ser considerada aceitável. Este período foi definido com base em um extenso conjunto de simulações numéricas nas quais as condições de ondas e de carga do navio foram variadas de forma sistemática e os erros na estimação foram computados. Como resultado, concluiu-se que o período de corte típico correspondia a um valor de período de pico de energia do espectro de cerca de 7,0 segundos. Mares com períodos inferiores a estes têm suas ondas basicamente difratadas pelo casco sem impor a este um movimento significativo e são, portanto, naturalmente filtradas do processo de inferência.

O trabalho considerou também algumas simulações numéricas de mares bimodais (condições de mares cruzados). Em todos os casos, inclusive nas análises dos ensaios feitos no IPT, os resultados obtidos com o modelo paramétrico (que considerava oito parâmetros independentes para a estimação dos casos bimodais) se mostraram um pouco superiores aos obtidos com a implementação de uma primeira versão do modelo Bayesiano, à época ainda baseada no modelo original de Iseki and Ohtsu (2000).

O seguinte passo importante da pesquisa consistiu na realização de um conjunto grande de ensaios com modelos em escala que permitisse uma primeira validação experimental efetiva do método. Para tanto, dois sistemas de características bastante distintas foram escolhidos como base para as medições: um navio FPSO convencional e uma balsa-guindaste (a balsa BGL-1 da Petrobrás, que pode ser observada na Figura 4.3, a seguir). A in-

tenção era justamente a de inferir os ganhos que se pode obter com a redução do período de corte de ondas quando a medição é baseada em sistemas de menor porte (já que estes respondem melhor a ondas mais curtas). Os ensaios destes modelos foram executados no tanque oceânico do laboratório LabOceano da COPPE/UFRJ. A configuração do tanque (de formato retangular com área de superfície de aproximadamente 40m x 30m) e a flexibilidade na geração de ondas proporcionada por seu sistema de geração multi-segmentado permitiu que diferentes incidências de ondas e condições de mar fossem emuladas. Dentre estas, incluíram-se condições de mar unimodal com diferentes níveis de espalhamento direcional e condições de mares cruzados. Para a medição em tanque destas condições de ondas com espalhamento direcional, e conseqüente geração do paradigma experimental, foi necessário o desenvolvimento de uma instrumentação específica, da qual o laboratório ainda não dispunha. O sistema de medição adotado foi baseado no arranjo proposto por Stansberg (2008) e consistia de sete *wave-probes*, dispostos em uma configuração geométrica apropriada. O desenvolvimento e os testes de validação desta instrumentação foram apresentados em Tannuri et al. (2007).



Figura 4.3: Vista da balsa-guindaste e lançamento BGL-1. Figura extraída de Tannuri et al. (2012)

Os artigos Simos et al. (2010) e Tannuri et al. (2012), reproduzidos como Anexos I e J deste trabalho, apresentam, respectivamente, os resultados obtidos com os ensaios do modelo de FPSO e da balsa-guindaste BGL-1.

A análise dos resultados com mares direcionais e cruzados mostrou que o método paramétrico apresentava sérias dificuldades de convergência numérica e, por esta razão, a abordagem foi descartada em favor do modelo Bayesiano. Com respeito a este último, a versão proposta por Nielsen (2008), com

suavização do espectro tanto em direção como em frequência, foi adotada. A inferência passou a ser feita então sobre a minimização do funcional  $J(\mathbf{x})$  na forma apresentada pela expressão 4.4, acima. A base de movimentos adotada para a estimação passou a incorporar também os movimentos de *surge* e *yaw*, já que os testes indicaram que a inclusão destes promovia uma ligeira melhora dos resultados de estimação, sem impactar de forma relevante o tempo de processamento necessário.

Em Simos et al. (2010), uma primeira proposta de calibração prévia dos hiperparâmetros foi apresentada, baseada em uma análise de sensibilidade da estimação a variações destes parâmetros. Com isso, pela primeira vez, foi adotada a abordagem de estimação com hiperparâmetros pré-definidos. A comparação dos resultados deste procedimento com aqueles obtidos mediante emprego do critério ABIC para alguns casos selecionados indicou que, embora este último permitisse, em certos casos, uma reprodução mais fiel do espalhamento direcional da energia de ondas, o impacto sobre a previsão dos parâmetros estatísticos globais (altura significativa, período de pico e direção média das ondas) resultava, em geral, pequeno. Esta observação aliada ao elevado custo computacional de implementação matemática do critério ABIC serviram como justificativa para a aplicação da nova abordagem<sup>4</sup>.

Resultados muito bons foram obtidos, na grande maioria dos casos, ao se comparar as estimativas baseadas nos movimentos do modelo FPSO com os espectros de ondas calibrados no tanque por intermédio dos sensores de ondas. Boa aderência foi observada tanto para casos de espectros unimodais, como para testes com mares cruzados. Os resultados serviram para comprovar as previsões feitas anteriormente com respeito ao período de corte. De fato, medidas de ondas cujo período de pico de espectro se situava próximo ou abaixo de 7,0 segundos não puderam ser obtidas com precisão razoável. Neste contexto, situações bastante interessantes foram identificadas, como a condição ilustrada pelos resultados da Figura 4.4, a seguir. Neste caso, trata-se de um ensaio com o modelo de navio em condição de lastro submetido a um mar cruzado composto pela superposição de dois espectros uni-direcionais, o primeiro com período de pico próximo a 5 segundos, representando um *mar local* com ondas de pequena amplitude, e o segundo com períodos mais longos e período de pico cerca dos 12 segundos. Esta segunda componente representa um mar de *swell*, com períodos de onda mais longos. Essa condição de mares cruzados (*mar local* + *swell*) é uma das condições preponderantes na Bacia de Campos, e os dados destes espectros foram baseados, de fato, em

---

<sup>4</sup>Posteriormente, Iseki (2011) observou também que o emprego do critério ABIC não garantia sempre a definição do par de hiperparâmetros que resulta no menor erro de estimação.

medições de ondas realizadas nesta região. O espectro calibrado em tanque é apresentado em (c) e o espectro estimado pelos movimentos em (b) (espectro de potência) e (d) (mapa de espalhamento de energia). Através de uma comparação entre as diferentes figuras é possível perceber que o espectro correspondente ao mar local, de menor período, não pôde ser identificado pelo método baseado em movimentos, que apresenta como resultado apenas uma estimativa do espectro de mar de *swell*. Por apresentar período de pico abaixo do período de corte definido pelo navio, o espectro de mar local é "filtrado" pelo navio/sensor e, portanto, se encontra fora dos limites de estimação do método.

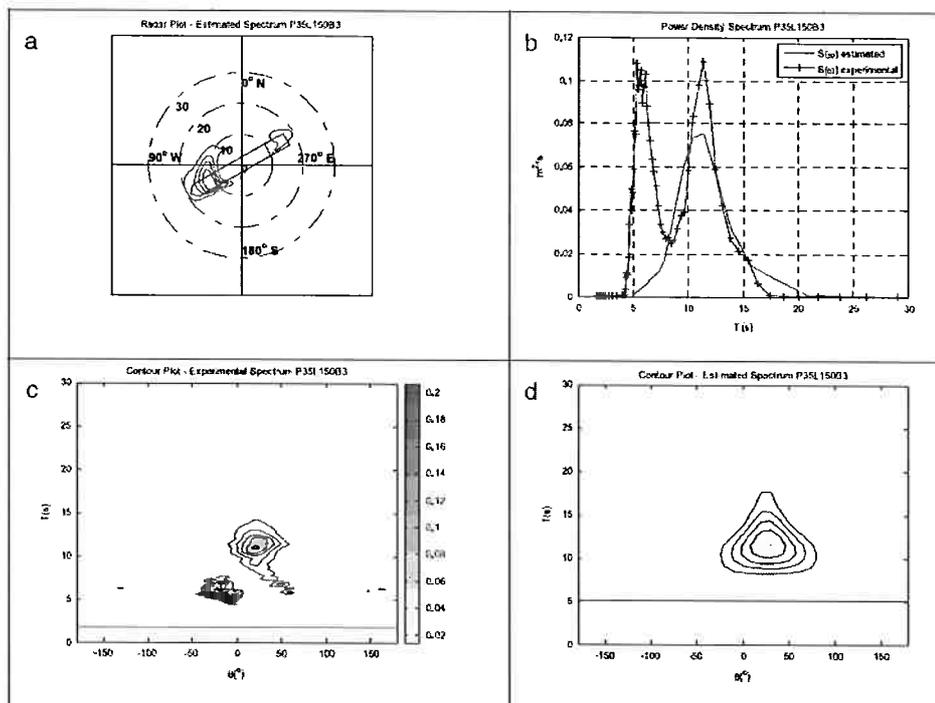


Figura 4.4: Condição de mar cruzado ensaiada no tanque do LabOceano com modelo de FPSO; (b) espectro de potência e (a),(d) mapas de contorno de energia estimados pelo método de movimentos; (c) mapa de contorno obtido por análise dos sinais de *wave probes*. Figura extraída de Simos et al. (2010)

Os mesmos estados de mar foram ensaiados com o modelo da balsa-guindaste e os resultados foram discutidos em Tannuri et al. (2012) (Anexo J). A manutenção das mesmas condições de ondas para os testes com os dois modelos distintos permitiu uma confrontação direta dos resultados. Em linhas gerais, foi possível mostrar que as estimativas são mais precisas, via de regra, quando obtidas a partir da balsa, uma vez que a mesma responde

de forma mais intensa às ondas. Usando o mesmo método de inferência adotado para a análise do mar cruzado ilustrado na Figura 4.4, acima, a estimativa feita a partir dos movimentos da balsa leva a resultados significativamente melhores, permitindo inclusive recuperar o espectro de mar local de alta frequência que anteriormente não foi “sentido” pelo FPSO. A Figura 4.5, a seguir, ilustra os resultados, mostrando que o espectro bimodal pôde ser estimado com boa precisão. Uma comparação entre as Figuras 4.5 e 4.4 evidencia o maior alcance da inferência de ondas quando realizada a bordo do modelo de menor de porte.

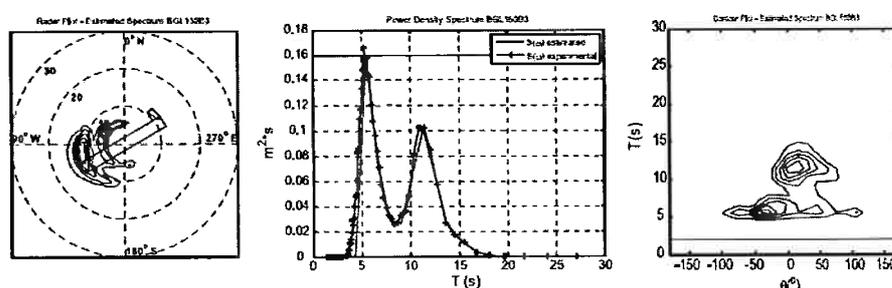


Figura 4.5: Condição de mar cruzado ensaiada no tanque do LabOceano com modelo da balsa BGL-1; mapas de espalhamento de energia e espectro de potência (gráfico central). Figura extraída de Tannuri et al. (2012)

Em seu conjunto, as análises baseadas nos testes realizados no tanque oceânico permitiram refinar os algoritmos de inferência e comprovar as hipóteses mais importantes adotadas no processo de estimação. Mais recentemente, o mesmo conjunto de resultados experimentais serviu também como referência para novos estudos. Destaco, em especial, o trabalho apresentado por Bispo (2011) como resultado de seu mestrado junto ao Depto. de Engenharia Naval da EPUSP. Neste trabalho, foi proposto um método sistemático para a calibração prévia dos parâmetros  $u_1, u_2$  que controlam a suavidade do espectro no modelo Bayesiano. Embora certas análises de sensibilidade já houvessem sido realizadas como base para a calibração destes parâmetros, o estudo em questão considerou um número maior de variáveis que podem influenciar esta calibração e um conjunto muito mais extenso de condições de mar com diferentes características. Além disso, empregou o simulador dinâmico TPN como base para a previsão dos movimentos do navio em diferentes condições de carga para obter previsões mais realistas de movimentos que incorporassem, por exemplo, as variações de aproamento do navio que ocorrem no decorrer de um intervalo de medição. Um resumo dos principais resultados alcançados neste trabalho pode também ser encontrado em Bispo et al. (2012). A título de ilustração, a Figura 4.6, extraída desta última re-

ferência, apresenta um mapa de variação dos erros obtidos entre os espectros estimados e os espectros teóricos para diferentes valores dos hiperparâmetros. Estes resultados foram obtidos para uma das condições de mar avaliadas no estudo de sensibilidade e considerando três calados diferentes do navio (de plena carga, calado intermediário e calado de lastro).

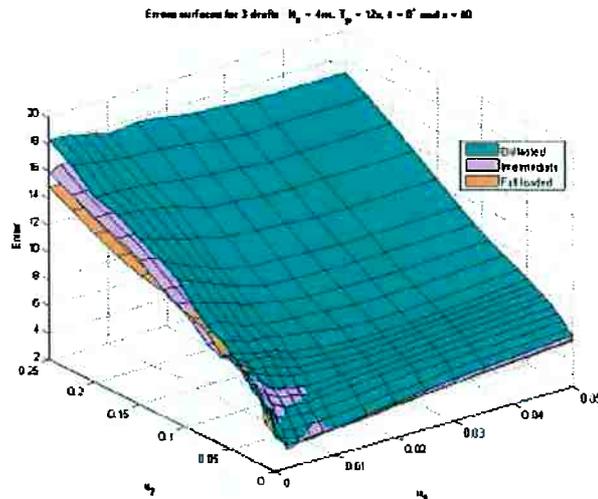


Figura 4.6: Mapas de variação de erro de estimação para diferentes valores dos hiperparâmetros do modelo bayesiano. Figura extraída de Bispo et al. (2012)

Uma análise conjunta deste tipo de mapeamento realizado para diferentes condições de ondas permitiu comprovar, mais uma vez e agora de forma sistemática, que o parâmetro que exerce maior influência sobre os erros de estimação é o parâmetro que controla a suavidade do espectro com respeito à direção de ondas (único parâmetro adotado no modelo Bayesiano original). Mais importante, porém, foi a possibilidade de se estabelecer um procedimento de quantificação destes parâmetros baseado em duas medidas disponíveis *a priori* no momento de cada estimação: o período médio dos movimentos verticais do navio e o calado em que o mesmo se encontra. Como resultado deste estudo, propõe-se um método de calibração no qual os valores dos hiperparâmetros são definidos antes de cada processo de inferência do espectro de ondas a partir destas duas informações.

Simultaneamente ao trabalho de Bispo, passou-se a desenvolver um *software* dotado de interface gráfica que, em sua versão atual, permite ao usuário observar os dados instantâneos de estimação, registrar e recuperar resultados de medidas anteriores e controlar determinados parâmetros de controle da estimação. A interface deste *software* foi definida em conjunto com pesquisa-

dores da área de oceanografia da Petrobrás, aproveitando a experiência deste grupo no trabalho com bancos de dados extensos de condições ambientais. As principais características do programa computacional foram apresentadas em Simos et al. (2012) e a Figura 4.7, a seguir, extraída desta referência, ilustra sua interface gráfica. O código foi desenvolvido considerando todos os protocolos de conexão necessários com o sensor de movimentos e com o sistema de monitoramento de carga do navio. Através deste último, recebe-se a informação instantânea do carregamento de todos os tanques da embarcação, a partir da qual se determina o calado do navio para a calibração dos hiperparâmetros e seleção dos RAOs correspondentes para o processo de inferência de ondas.



Figura 4.7: Ilustração da interface gráfica do *software* de monitoramento de ondas. Figura extraída de Simos et al. (2012)

Hoje dispõe-se, assim, de um pacote computacional preparado para a leitura de dados a bordo das plataformas FPSO que operam na Bacia de Campos. A preparação deste sistema é feita previamente, antes da instalação a bordo, e baseada na modelagem numérica da plataforma através do simulador dinâmico do TPN e dos critérios de calibração definidos em Bispo et al. (2012). O passo seguinte da pesquisa, naturalmente, consistiu em uma campanha de monitoramento de longo prazo a bordo de uma destas plataformas com o emprego simultâneo de um sistema de medição de ondas alternativo, cujos resultados servissem como base de comparação. Este é um dos assuntos discutidos na próxima seção.

### 4.3 Estágio Atual da Pesquisa e Novos Tópicos de Investigação

Recentemente, ou mais precisamente, ao final do mês de maio de 2012, concluiu-se uma campanha de monitoramento contínuo de ondas de nove meses de duração a bordo de uma plataforma FPSO em operação na Bacia de Campos. Durante estes nove meses, estimativas de ondas foram obtidas pelo sistema de inferência por movimentos a cada 30 minutos, de forma praticamente ininterrupta. Os resultados desta campanha foram apresentados em Tannuri et al. (2013), artigo também incorporado a este texto como Anexo (ver Anexo K). A maior dificuldade enfrentada neste trabalho residiu na obtenção de medidas por um sistema alternativo que proporcionasse estimativas simultâneas de ondas na mesma região, com o intuito de servir como base de comparação de resultados. A opção de se instalar uma boia nas vizinhanças da plataforma foi rapidamente descartada pelo pessoal técnico da Petrobrás que deu suporte ao trabalho<sup>5</sup>. Optou-se, então, pelo emprego do sistema de varredura por radar disponível na plataforma. Contudo, problemas de interferência na leitura deste sistema verificados posteriormente e questões associadas à manutenção do equipamento impediram o levantamento destes dados. Não se pode deixar de observar que, de forma um tanto irônica, estas dificuldades de certa forma ratificam alguns dos problemas normalmente associados à operação de boias e radares de medição de ondas que, desde o princípio, serviram como motivação para o desenvolvimento do método apresentado neste trabalho.

A solução finalmente encontrada para se garantir uma base de comparação mínima para os resultados da campanha foi o emprego de estimativas de ondas fornecidas pela NOAA, a agência meteorológica norte-americana, para um setor do Atlântico Sul que inclui a Bacia de Campos. Esta medida, no entanto, não é uma medida “local”. É obtida através de um modelo numérico de previsão (um modelo de *hindcast*) que considera informações meteorológicas

<sup>5</sup>Neste ponto, vale destacar que uma primeira verificação dos resultados do método de inferência por movimentos baseada em dados obtidos em escala-real foi realizada entre os anos de 2006 e 2007 e os resultados apresentados em Simos et al. (2007). Nesta ocasião, aproveitou-se uma campanha de monitoramento que havia sido realizada previamente em um dos FPSOs da Petrobrás. Durante essa campanha, havia sido instalada uma boia em uma posição próxima à plataforma, para servir como base para as medidas de ondas. Essa boia, no entanto, permaneceu em sua posição por pouco mais de uma semana, quando então se despreendeu e derivou. Foi localizada meses depois próximo a uma praia do litoral carioca. Por esta razão, embora dispuséssemos de dados simultâneos de movimentos e carregamento do navio que abrangiam um intervalo de vários meses, a comparação resultou limitada a um período de poucos dias, por falta de uma medida de referência para verificação dos resultados.

coletadas por diversas fontes em diferentes pontos do globo para atualizar continuamente suas estimativas e definir a progressão no tempo das condições de onda previstas. Este modelo faz parte do programa chamado *WavewatchIII* e seus resultados são disponibilizados *on-line* no *website* da agência<sup>6</sup>. As informações às que se tem acesso incluem um mapa do espectro de ondas global e sua subdivisão em até cinco espectros de onda componentes, para os quais são fornecidos seus parâmetros estatísticos principais (altura significativa, período de pico e direção média). Além do fato de as medidas apresentadas pela NOAA não serem provenientes de um sistema comparável ao sistema de inferência a bordo do FPSO, um outro fator de preocupação quanto ao emprego destes dados correspondia à resolução relativamente baixa do sistema na área do Atlântico Sul (para o qual as informações estatísticas de ondas são consideradas representativas para grandes áreas de superfície oceânica). No entanto, a posterior comparação dos dados mostrou, em linhas gerais, uma excelente aderência entre os resultados obtidos com os dois métodos.

A Figura 4.8, por exemplo, ilustra a variação da altura significativa de ondas (medida global) prevista pelo método de movimentos e pelo modelo da NOAA ao longo dos nove meses de monitoramento. É importante destacar que, nesta comparação, apenas os espectros de ondas com períodos de pico acima de oito segundos foram considerados na composição dos resultados. Esta estratégia teve como objetivo uma comparação mais consistente, dado que o sistema por movimentos não permite a inferência de espectros com períodos abaixo do período de corte que já havia sido definido nas primeiras fases de desenvolvimento do método. Além da boa correlação entre as duas séries de medidas, outros aspectos interessantes foram discutidos neste trabalho. Por exemplo, através dos resultados da figura é possível identificar o caráter sazonal das condições marítimas, com ondas de maior altura ocorrendo de forma mais frequente durante o período de inverno e a prevalência de condições mais amenas durante os meses de verão.

Além dos resultados apresentados acima para a altura de ondas, comparações foram feitas também para as estimativas de período e direção média global de ondas e também para cada uma das distintas componentes do espectro. Para tanto, um sistema de identificação e separação de espectros foi implementado para reproduzir o padrão adotado pela NOAA (maiores detalhes podem ser encontrados no Anexo K).

Em linhas gerais, os resultados obtidos com esta primeira campanha de monitoramento em campo apresentaram resultados bastante satisfatórios, os

---

<sup>6</sup><http://polar.ncep.noaa.gov/waves>, endereço eletrônico consultado entre os meses de Agosto de 2011 e Maio de 2012.

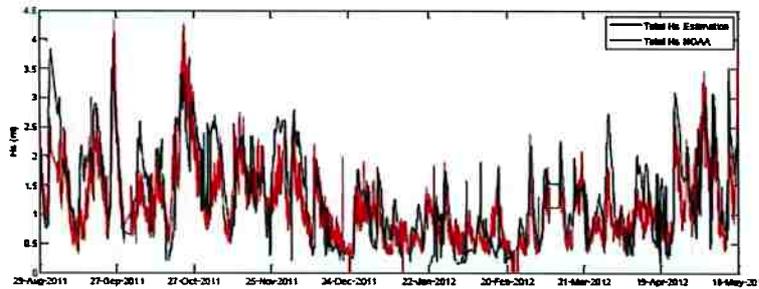


Figura 4.8: Comparação entre as medidas de altura significativa de ondas feitas a bordo de um FPSO e dados fornecidos pela NOAA. Figura extraída de Tannuri et al. (2013)

quais servirão também para o estudo de possíveis refinamentos e aprimoramentos futuros do sistema. Nesse sentido, um primeiro aspecto suscitado por este trabalho foi a possível consideração de informações acerca do histórico das medições nas estimativas instantâneas realizadas no decorrer do monitoramento contínuo. Em outras palavras, pode-se pensar no uso dos dados de evolução de ondas contidos nas estimativas progressas como informação auxiliar para o processo de inferência estatística no instante atual. Este tipo de re-alimentação, empregado no modelo de progressão da NOAA, deve auxiliar a reduzir a rápida flutuação observada em alguns parâmetros, principalmente no que se refere à direção de ondas. Este é um dos tópicos de pesquisa sobre o qual se está trabalhando no momento e que podem propiciar futuras melhorias do processo de estimação.

Outros tópicos de investigação também estão sendo avaliados. Dentre estes, destaco dois: O primeiro diz respeito ao possível emprego de medidas de vento (normalmente disponíveis através do anemômetro instalado nas plataformas) como informação auxiliar para a inferência de ondas. Esta possibilidade decorre da forte correlação entre a direção de vento no local e as ondas geradas nas proximidades do ponto de medição. O segundo tópico corresponde ao emprego do sistema de inferência para medições a bordo de plataformas semi-submersíveis, e esta proposta merece algumas considerações adicionais: De fato, desde o início do estudo descartamos a possibilidade de se usar este tipo de plataforma como base de medição pelo simples (e óbvio) motivo de que as mesmas são projetadas com o intuito de apresentar baixas amplitudes de movimentos em ondas. Assim sendo, não serviriam como bons sensores de ondas. No entanto, uma abordagem diferente do problema nos foi recentemente apresentada<sup>7</sup>. O objetivo principal desta abordagem é garantir

<sup>7</sup>Devo esta consideração ao oceanógrafo Borge Kvingedal, da empresa norueguesa de

medições precisas apenas nas condições mais severas de ondas. Neste caso, submetidas à ação de ondas de grande amplitude, as boias oceanográficas perdem eficiência de medição. Nesta mesma situação, porém, as plataformas semi-submersíveis passam a apresentar movimentos relevantes e podem, então, representar uma boa base de medição complementar aos outros sistemas disponíveis. Na continuação desta linha de pesquisa estão previstos, portanto, simulações numéricas e testes em tanque com modelos reduzidos de plataformas semi-submersíveis para uma avaliação da viabilidade técnica desta proposta. Caso a mesma seja comprovada, esta nova aplicação pode ampliar ainda mais o campo de aplicação deste tipo de sistema de inferência de ondas, convertendo-o em um método auxiliar interessante também para o monitoramento ambiental de outras bacias oceânicas de exploração de óleo e gás nas quais as plataformas tipo FPSO não estão presentes.

# Referências Bibliográficas

- Abkowitz, M., 1964. Lectures on ship hydrodynamics, steering and manoeuvrability. Tech. Rep. Hy 5, Hydro Og Aerodynamisk Laboratorium, Lyngby, Denmark.
- Bispo, I. B. S., 2011. Aprimoramento de método para inferência de espectro de ondas a partir de movimentos de sistemas oceânicos. Master's thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Bispo, I. B. S., Simos, A. N., Tannuri, E. A., da Cruz, J. J., 2012. Motion-based wave estimation by a bayesian inference method: a procedure for redefining the hyperparameters. In: Proc. of the 22nd Int. Offshore and Polar Eng. Conf. ISOPE2012. ISOPE, Rhodes, Grécia, paper 2012TPC0117.
- Boris, J. P., Book, D. L., 1973. Flux-corrected transport. i: Shasta, a fluid transport algorithm that works. Journal of Computational Physics 11, 38–69.
- Clarke, D., Gedling, P., Hine, G., 1982. The application of manoeuvring criteria in hull design using linear theory. Proc. of The Royal Inst. of Naval Arch., 45–68.
- Crandall, H. S., Mark, W. D., 1963. Random Vibration in Mechanical System. Academic Press, New York, USA.
- Furtado, A. T., 1996. A trajetória tecnológica da petrobras na produção offshore. Revista Espacios 17 (3), consultado em 27 de novembro de 2012. URL <http://www.revistaespacios.com/a96v17n03/32961703.html>
- Hirt, C. V., Nichols, B. D., 1981. Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries. Journal of Computational Physics 39 (20), 201–225.
- Hoerner, S. F., 1965. Fluid dynamic drag. Author's Publ., New Jersey, USA.

- Hogben, N., Cobb, F. C., 1986. Parametric modelling of directional wave spectra. In: Proc. 18th Offshore Tech. Conf. Houston, Texas.
- Hooft, J. P., 1994. The cross-flow drag on a manoeuvring ship. *J. Contemp. Phys.* 21 (3), 329–334.
- Illuminati, C., Tannuri, E. A., Matos, V. L. F., Simos, A. N., 2009. Current wake effects on dp system of a shuttle tanker. In: Proc. 28th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Eng. OMAE2009. ASME, Honolulu, Hawaii, USA.
- Iseki, T., 2011. A study on akaike's bayesian information criterion in wave estimation. In: Proc. 30th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Eng. OMAE2011. ASME, Rotterdam, Holanda.
- Iseki, T., Ohtsu, K., 2000. Bayesian estimation of directional wave spectra based on ship motions. *Cont Engng Pract* 8, 215–219.
- Jones, R. T., 1946. Properties of low-aspect-ratio pointed wings at speeds below and above the speed of sound. NACA Rept. 835.
- Leite, A. J. P., 1997. Forças de corrente em petroleiros e bifurcação do equilíbrio em sistemas tipo turet. Master's thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Leite, A. J. P., Aranha, J. A. P., Umeda, C., de Conti, M. B., 1998. Current forces in tankers and bifurcation of equilibrium of turret systems: hydrodynamic model and experiments. *Applied Ocean Research* (20), 145–156.
- López-Pavón, C., Watai, R. A., Ruggeri, F., Simos, A. N., Souto-Iglesias, A., 2013. Influence of wave-induced second-order forces in semi-submersible fowt mooring design. In: Proc. 32nd Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Eng. OMAE2013. ASME, Nantes, França.
- Maine, 2012. Floating offshore wind foundations: Industry consortia and projects in the united states, europe and japan. Overview rept., Maine Int. Consulting LLC.
- Matos, V. L. F., Ribeiro, E. O., Simos, A. N., Sphaier, S. H., 2010. Full-scale measurements and theoretical predictions of 2nd order pitch and roll slow motions of a semi-submersible platform. In: Proc. 29th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Eng. OMAE2010. ASME, Xangai, China.

- Matos, V. L. F., Simos, A. N., Sphaier, S. H., 2011. Second-order resonant heave, roll and pitch motions of a deep-draft semi-submersible: theoretical and experimental results. *Ocean Engineering* 38, 2227–43.
- Matsumoto, F. T., 2010. Modelagem de movimentos de segunda-ordem nos movimentos de roll de plataformas tipo fpso. Texto apresentado para qualificação de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Newman, J. N., 1974. Second order, slowly varying forces on vessels in irregular waves. *Proc. Int. Symp. Dynamics of Marine Vehicles and Struct. in Waves*, 182–186.
- Nielsen, U. D., May 2005. Estimation of directional wave spectra from measured ship responses. Ph.D. thesis, Section of Coastal, Maritime and Structural Engineering, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, Denmark.
- Nielsen, U. D., 2008. Introducing two hyperparameters in bayesian estimation of wave spectra. *Probabilistic Engineering Mechanics* (23), 84–94.
- Nishimoto, K., Fucatu, C. H., Masetti, I. Q., 2002. Dynasim: A time domain simulator of anchored fpso. *Journal of Offshore Mech. and Arctic Eng.* 124 (4), 203–211.
- Nunes, L. M. P., Março 2009. Análise ambiental estatística multi-variada para uso em atividades offshore. Ph.D. thesis, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Obokata, J., 1987. On the basic design of single point mooring systems (1st report). *J. of the Soc. of Naval Arch. of Japan* 161, 183–195.
- Ochi, M., 1998. *Ocean waves. The stochastic approach*. Cambridge Univ Press.
- Ortiz Neto, J. B., Dalla Costa, A. J., 2007. A petrobrás e a exploração de petróleo offshore no brasil: um approach evolucionário. *Revista Brasileira de Economia* 61 (1), 95–109.
- Papoulias, F. A., Bernitsas, M. M., 1988. Autonomous oscillations, bifurcations and chaotic response of moored vessels. *Journal of Ship Research* 32 (3), 220–228.
- Pasin, J. A. B., 2002. Indústria naval do brasil: Panorama, desafios e perspectivas. *Revista do BNDES* 9 (18), 121–148.

- Pinkster, J. A., 1980. Low frequency second order wave exciting forces on floating structures. Ph.D. thesis, Delft Univ. Tech.
- Rezende, F. C., Oliveira, A. C., Chen, X., Menezes, F., 2013. A comparison of different approximations for computation of second order roll motions for a flug. In: Proc. 32nd Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Eng. OMAE2013. ASME, Nantes, França.
- Simos, A. N., 2001. Modelo hidrodinâmico heurístico para análise de navios amarrados sujeitos à ação de correnteza. Ph.D. thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Simos, A. N., Pesce, C. P., Bernitsas, M. M., Cohen, S. B., 2002. Hydrodynamic model induced differences in spm post pitchfork bifurcation paths. *Journal of Offshore Mech. and Arctic Eng.* 124, 174–178.
- Simos, A. N., Sparano, J. V., Aranha, J. A. P., Matos, V. L. F., 2008. 2nd order hydrodynamic effects on resonant heave, pitch and roll motions of a large-volume semi-submersible platform. In: Proc. 27th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Eng. OMAE2008. ASME, Estoril, Portugal.
- Simos, A. N., Sparano, J. V., Tannuri, E. A., Matos, V. L. F., 2007. Directional wave spectrum estimation based on a vessel 1st order motions: field results. In: Proc. of the 17th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. ISOPE2007. ISOPE, Lisboa, Portugal, pp. 1938–44.
- Simos, A. N., Tannuri, E. A., da Cruz, J. J., Queiroz Filho, A., Bispo, I. B. S., Carvalho, R. C. A., 2012. Development of an on-board wave estimation system based on the motions of a moored fpso: comissioning and preliminary validation. In: Proc. 31th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Eng. OMAE2012. ASME, Rio de Janeiro, Brasil.
- Simos, A. N., Tannuri, E. A., Pesce, C. P., Aranha, J. A. P., 2001. A quasi-explicit hydrodynamic model for the dynamic analysis of a moored fpso under current action. *Journal of Ship Research* 45 (4), 289–301.
- Simos, A. N., Tannuri, E. A., Sparano, J. V., Matos, V. L. F., 2010. Estimating wave spectra from the motions of moored vessels: Experimental validation. *Applied Ocean Research* (32), 191–208.
- Stansberg, C. T., 2008. On the fourier series decomposition of directional wave spectra. In: Proc. of the 8th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. ISOPE1998. ISOPE, Montreal, Canada, pp. 227–233.

- Stoker, J. J., 1957. *Water waves*. Interscience, New York.
- Takashina, J., 1986. Ship manouvering motion due to tugboats and its mathematical model. *J. of the Soc. of Naval Arch. of Japan* 160, 93-104.
- Tannuri, E. A., Bispo, I. B. S., Simos, A. N., Queiroz Filho, A., da Cruz, J. J., Carvalho, R. C. A., 2013. Development of an on-board wave estimation system based on the motions of a moored fpo: Preliminary assessments from a field campaign. In: *Proc. 32nd Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Eng. OMAE2013*. ASME, Nantes, França.
- Tannuri, E. A., de Mello, P. C., Sales Jr, J. S., Simos, A. N., Matos, V. L. F., 2007. Estimation of directional wave spectrum using a wave-probe array. In: *Proc. of 3rd Int. Workshop on Applied Offshore Hydrodynamics*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Tannuri, E. A., Simos, A. N., Leite, A. J. P., Aranha, J. A. P., 2001. Experimental validation of a quasi-explicit hydrodynamic model: Fishtailing instability of a single-point moored tanker in rigid-hawser configuration. *Journal of Ship Research* 45 (4), 302-314.
- Tannuri, E. A., Simos, A. N., Sparano, J. V., Matos, V. L. F., 2012. Motion-based wave estimation: Small-scale tests with a crane-barge model. *Marine Structures* (28), 67-85.
- Tannuri, E. A., Sparano, J. V., Simos, A. N., da Cruz, J. J., 2003. Estimating directional wave spectrum based on stationary ship motion measurements. *Applied Ocean Research* (25), 243-261.
- van Manem, J. D., van Oossanen, P., 1988. *Principles of Naval Architecture*. Ch.5 - Resistance. The Society of Naval Arch. and Marine Eng.
- WAMIT, 2006. *WAMIT User Manual Versions 6.3,6.3PC,6.3S,6.3S-PC*. MA, USA.
- Wehausen, J. V., Laitone, E. V., 1960. Surface waves. *Enciclopedia of Physics* 9.
- Zalesak, S. T., 1979. Fully multi-dimensional flux corrected transport algorithm for fluid flow. *Journal of Computational Physics* 31, 335-362.