RAUL DOTTA

ESTUDO DE APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS NUMÉRICAS AO PROBLEMA DE RESSONÂNCIA DE ONDAS NA OPERAÇÃO DE ALÍVIO LADO A LADO

São Paulo

2017

RAUL DOTTA

ESTUDO DE APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS NUMÉRICAS AO PROBLEMA DE RESSONÂNCIA DE ONDAS NA OPERAÇÃO DE ALÍVIO LADO A LADO

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

São Paulo

2017

RAUL DOTTA

ESTUDO DE APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS NUMÉRICAS AO PROBLEMA DE RESSONÂNCIA DE ONDAS NA OPERAÇÃO DE ALÍVIO LADO A LADO

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

Área de Concentração: Engenharia Naval e Oceânica Hidrodinâmica de Sistemas

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Nicolaos Simos

São Paulo

Este exemplar foi revisado e corrigido em relaç responsabilidade única do autor e com a anuê	ção à versão original, sob ncia de seu orientador.
São Paulo, de	de
Assinatura do autor:	
Assinatura do orientador:	

Catalogação-na-publicação

Dotta, Raul

Estudo de Aplicação de Ferramentas Numéricas ao Problema de Ressonância de Ondas na Operação de Alívio Lado a Lado / R. Dotta -- versão corr. -- São Paulo, 2017.

117 р.

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

1.Ressonância de Ondas no Vão entre Duas Embarcações 2.Operação de Alívio Lado a Lado 3.Comportamento no Mar 4.Modos de Ressonância I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II.t.

Aos meus pais, Elbio e Cecilia, e aos meus irmãos, Victor e Luciana, por tudo o que me ensinaram.

À Kamila, por todo o seu amor, apoio e paciência ao longo desta jornada.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer ao Prof. Alexandre Nicolaos Simos pela orientação e paciência ao longo do desenvolvimento desta dissertação, mantendo a motivação e fornecendo o suporte teórico necessário, possibilitando a conclusão deste trabalho.

Agradeço ao laboratório TPN e ao Prof. Kazuo Nishimoto por disponibilizar os dados provenientes dos ensaios e o espaço necessário para o desenvolvimento da pesquisa. À Capes pela confiança atribuída na concessão da bolsa de estudos, fundamental para a realização deste estudo.

Agradeço a todos os amigos do laboratório TPN, presentes diariamente na minha vida acadêmica e profissional. Aos amigos Rafael Watai, Felipe Ruggeri, Edgard Malta e Daniel Vieira, por contribuírem de forma significativa no desenvolvimento deste trabalho, fornecendo o apoio necessário para solucionar os diversos obstáculos ao longo desta jornada. Às grandes amizades feitas na época da graduação Thiago Peternella, Rodrigo Schiller, Pedro Mello e Dennis Gambarine, sempre presentes em bons momentos. Aos amigos Rodrigo Lavieri, Guilherme Rossetti e Rafael Máximo por todo suporte recebido em diversos projetos desenvolvidos ao longo dos últimos anos no Laboratório TPN.

Aos demais amigos do Poli Rugby que possibilitaram minha participação em um grupo incrível que tem sido muito importante na minha vida pessoal e profissional.

Aos amigos de longa data André, Maycon, João, Thaís e Natalia por sua confiança e por sempre compartilharem bons momentos desde os tempos do colégio.

Aos meus pais Elbio e Cecilia, minha Vó Mitue e meus irmãos Victor e Luciana, sou eternamente grato por sempre acreditarem no meu potencial e fornecerem o apoio necessário para que cada vez mais eu me torne uma pessoa melhor. Por fim, agradeço imensamente à minha namorada Kamila, por seu companheirismo, apoio, amor e bondade durante todos esses anos e por estar sempre presente me motivando em todos os momentos e, principalmente, nesta jornada.

Resumo

Este trabalho apresenta uma abordagem numérica com base em ensaios experimentais previamente realizados, direcionada ao problema de ressonância do campo de ondas em operações de alívio lado a lado (side by side). Os efeitos dessas interferências hidrodinâmicas são responsáveis por alterar drasticamente o campo de ondas em regiões de confino, gerando amplificação nos movimentos de primeira ordem e trazendo risco à operação. Este fenômeno está presente em diversas áreas da exploração e produção offshore e vem sendo o principal objeto de estudo nos últimos anos, principalmente em operações de alívio lado a lado, nos quais existe uma grande preocupação de colisão, rompimento dos cabos e integridade estrutural das defensas, devido à proximidade dos cascos.

Neste contexto, devido à complexidade do problema, a modelagem numérica utilizada para interpretar o fenômeno de ressonância em *softwares* comerciais deve ser realizada com cautela, sendo que a utilização direta desta ferramenta gera amplificações equivocadas da superfície ressonante uma vez que esta resolução tem como base a teoria potencial. As diferenças observadas durante a comparação entre ensaios numéricos e experimentais são causadas em virtude da negligência na avaliação da dissipação de parte da energia das ondas ressonantes provocadas devido aos efeitos como viscosidade, vorticidade e turbulência do escoamento.

Com o objetivo de analisar corretamente este fenômeno por meio de ensaios numéricos, uma maneira consiste na inclusão de adaptações no modelo para atingir os resultados desejáveis. Estas adaptações consistem na implementação de métodos artificiais, tais como os chamados "Modos Generalizados" e "Praias Numéricas", aplicados à região entre as embarcações com o intuito de amortecer as elevações irrealistas da superfície.

Sendo assim, este trabalho abordará o problema de ressonância de ondas, investigando o desempenho de duas ferramentas numéricas para a sua predição, o WAMIT (*Wave Analysis Massachusetts Institute of Technology*) e o TDRPM (*Time Domain Rankine Painel Method*). Os resultados serão

comparados com dados obtidos em um conjunto de ensaios em escala reduzida, realizado previamente no laboratório Tanque de Provas Numérico da USP (TPN). Dessa forma, o estudo dos fenômenos de ressonância será discutido, principalmente, em seu aspecto numérico, visando à verificação do desempenho do WAMIT e do TDRPM.

Palavras-chave: Ressonância no vão. Alívio lado a lado. Comportamento no mar. Modos de ressonância.

Abstract

This work presents a numerical study based on previously conducted experimental studies, focused on the problem of resonance of the wave field in operations involving multi-body. The hydrodynamic interferences effects are responsible for drastically changing the wave field in confine regions, generating amplification of first order movements and bringing operational risk. This phenomenon is present in several areas of offshore exploration and production and has been the main object of study in recent years, mainly in side-by-side offloading operations, in which there is a great concern due to the risk of mooring lines breaking, damages to the fenders and also collision.

In this context, due to the complexity of the problem, the numerical modeling used to evaluate the resonance phenomenon in commercial software becomes unsuitable, generating erroneous amplifications of the resonant surface since it is based on the potential theory. The differences observed during the comparisons between numerical and experimental tests are caused by negligence in the evaluation of the dissipation of part of the resonant wave energy caused by viscosity, vorticity and flow turbulence effects.

In order to correctly analyze this phenomenon through numerical tests, one way is to include adaptations on the model to achieve the desired results. These adaptations consist of the implementation of artificial methods, such as "Generalized Modes" and "Numerical Damping Zones", applied to the region between the vessels in order to damp the unrealistic elevations of the surface.

Thus, this study will approach the problem of gap wave resonance, investigating the performance of two numerical tools for its prediction, WAMIT (Wave Analysis Massachusetts Institute of Technology) and TDRPM (Time Domain Rankin Panel Method). The results will be compared with data obtained from a set of small scale tests previously performed at the Numerical Test Tank of USP laboratory (TPN). Therefore, the study of resonance phenomena will be discussed, mainly, in its numerical aspect, in order to verify the performance of WAMIT and TDRPM.

Keywords: Gap resonance. Side-by-side offloading. Seakeeping. Piston Mode.

Lista de Figuras

Figura 3.1 - Exempto de maina para os modelos WANT	.33
Figura 3.2 - Pontos para o estudo da elevação da superfície livre no WAMIT.	34
Figura 3.3 - Representação gráfica para os seis primeiros polinômios	de
Chebyshev	36
Figura 3.4 - Representação da malha 3D utilizada no TDRPM para a superf	ície
livre e vão	39
Figura 3.5 - Representação da malha 3D utilizada no TDRPM para os corpos	39
Figura 3.6 - Representação das embarcações e regiões de amortecimento	40
Figura 4.1 - Calibrador Hidrodinâmico do Tanque de Provas Numérico (C	CH-
TPN)	42
Figura 4.2 - Wave Probe utilizado nos ensaios	43
Figura 4.3 - Arranjo dos Wave Probes fixos no modelo do FLNG	44
Figura 4.4 - Posições de fixação dos Wave-Probes no FLNG (escala real)	44
Figura 4.5 - Câmera do sistema de rastreamento óptico da Qualisys	46
Figura 4.6 - Definição do ângulo de incidência de ondas	48
Figura 4.7 - Maquete eletrônica das embarcações durante o processo de al	ívio
lado a lado	51
Figura 4.8 - Arranjo dos modelos numéricos isolados: (a) FLNG e (b) Alivia	dor
	52
Figura 4.9 - Esquema de amarração no tanque de provas	53
Figura 4.10 - ISO-FLNG-050%-180°	55
Figura 4.10 - ISO-FLNG-050%-180° Figura 4.11 - ISO-ALIV-000%-180°	55 56
Figura 4.10 - ISO-FLNG-050%-180° Figura 4.11 - ISO-ALIV-000%-180° Figura 4.12 - Arranjo lado a lado com amarração simplificada	55 56 57
Figura 4.10 - ISO-FLNG-050%-180° Figura 4.11 - ISO-ALIV-000%-180° Figura 4.12 - Arranjo lado a lado com amarração simplificada Figura 4.13 - Dimensões das linhas do arranjo do modelo lado a lado	55 56 57 58
Figura 4.10 - ISO-FLNG-050%-180° Figura 4.11 - ISO-ALIV-000%-180° Figura 4.12 - Arranjo lado a lado com amarração simplificada Figura 4.13 - Dimensões das linhas do arranjo do modelo lado a lado Figura 4.14 - Modelo ensaiado no tanque de provas (vista de topo)	55 56 57 58 59
Figura 4.10 - ISO-FLNG-050%-180° Figura 4.11 - ISO-ALIV-000%-180° Figura 4.12 - Arranjo lado a lado com amarração simplificada Figura 4.13 - Dimensões das linhas do arranjo do modelo lado a lado Figura 4.14 - Modelo ensaiado no tanque de provas (vista de topo) Figura 4.15 - Modelo ensaiado no tanque de provas (vista traseira)	55 56 57 58 59 59
Figura 4.10 - ISO-FLNG-050%-180° Figura 4.11 - ISO-ALIV-000%-180° Figura 4.12 - Arranjo lado a lado com amarração simplificada Figura 4.13 - Dimensões das linhas do arranjo do modelo lado a lado Figura 4.14 - Modelo ensaiado no tanque de provas (vista de topo) Figura 4.15 - Modelo ensaiado no tanque de provas (vista traseira) Figura 4.16 - Defensas do tipo Yokohama	55 56 57 58 59 59 60
Figura 4.10 - ISO-FLNG-050%-180° Figura 4.11 - ISO-ALIV-000%-180° Figura 4.12 - Arranjo lado a lado com amarração simplificada Figura 4.13 - Dimensões das linhas do arranjo do modelo lado a lado Figura 4.14 - Modelo ensaiado no tanque de provas (vista de topo) Figura 4.15 - Modelo ensaiado no tanque de provas (vista traseira) Figura 4.16 - Defensas do tipo Yokohama Figura 4.17 - Esquema de posicionamento das defensas	55 56 57 58 59 59 60 61
Figura 4.10 - ISO-FLNG-050%-180° Figura 4.11 - ISO-ALIV-000%-180° Figura 4.12 - Arranjo lado a lado com amarração simplificada Figura 4.13 - Dimensões das linhas do arranjo do modelo lado a lado Figura 4.14 - Modelo ensaiado no tanque de provas (vista de topo) Figura 4.15 - Modelo ensaiado no tanque de provas (vista traseira) Figura 4.16 - Defensas do tipo Yokohama Figura 4.17 - Esquema de posicionamento das defensas Figura 4.18 - Curva de reação da defensa pneumática 4500x9000 (0.5 kPa).	55 56 57 58 59 60 61 61
Figura 4.10 - ISO-FLNG-050%-180° Figura 4.11 - ISO-ALIV-000%-180° Figura 4.12 - Arranjo lado a lado com amarração simplificada Figura 4.13 - Dimensões das linhas do arranjo do modelo lado a lado Figura 4.14 - Modelo ensaiado no tanque de provas (vista de topo) Figura 4.15 - Modelo ensaiado no tanque de provas (vista traseira) Figura 4.16 - Defensas do tipo Yokohama Figura 4.17 - Esquema de posicionamento das defensas Figura 4.18 - Curva de reação da defensa pneumática 4500x9000 (0.5 kPa) . Figura 4.19 - Defensas usadas nos ensaios experimental	55 56 57 58 59 60 61 61 62

Figura 4.21 - Arranjo do modelo final ensaiado no tanque de provas do TPN
(vista em perspectiva)63
Figura 4.22 - Comparação dos RAOs de movimento para o caso SBS 050-000-
180-FLNG
Figura 4.23 - Comparação dos RAOs de movimento para o caso SBS 050-000-
180-ALIV
Figura 4.24 - Representação da região de ressonância nos RAOs de
movimento do Aliviador67
Figura 5.1 - RAO de elevação da superfície para um ponto no centro do vão. 71
Figura 5.2 - Influência da elevação na superfície livre nos movimentos das
embarcações72
Figura 5.3 - Características da elevação da superfície no vão, 1° período de
ressonância75
Figura 5.4 - Características da elevação da superfície no vão, 4° período de
ressonância75
Figura 5.5 - Características da elevação da superfície no vão, 5° período de
ressonância76
Figura 5.6 - Características da elevação da superfície no vão, 6° período de
ressonância76
Figura 5.7 - RAOs de elevação dos Wave Probes
Figura 5.8 - Dimensões e geometrias importadas no WAMIT
Figura 5.9 - Localização dos períodos estudados, no RAO do ponto central do
vão83
Figura 5.10 - Recuperação dos perfis com 3 modos de vibração ativos
Figura 5.11 - Recuperação dos perfis com 5 modos de vibração ativos
Figura 5.12 - Recuperação dos perfis com 7 modos de vibração ativos
Figura 5.13 - Recuperação dos perfis com 16 modos de vibração ativos 84
Figura 5.14 - Calibração do amortecimento dos modos generalizados ativos
mediante comparação com medidas dos Wave Probes no vão
Figura 5.15 - Comparação dos RAOs dos Wave Probes calibrados a partir dos
perfis de ressonância
Figura 5.16 - Exemplo do processamento da série temporal do Wave Prove 4
obtidos através do TDRPM

Figura 5.17 - Comparação dos RAOs de elevação no vão para a calibração do Figura 5.18 - Comparação dos RAOs de elevação no vão para a calibração do Figura 5.19 - Comparação dos RAOs de elevação no vão para a calibração do Figura 5.20 - Comparação dos RAOs dos perfis amortecidos para o melhor Figura 5.21 - Influência do amortecimento no WAMIT nos RAOs de movimento Figura 5.22 - Influência do amortecimento no TDRPM no caso SBS-FLNG-050-Figura 5.23 - Influência do amortecimento no TDRPM no caso SBS-FLNG-050-ALIV-000-180. Comprimento amortecimento de 120 m 101 Figura 5.24 - Influência do amortecimento no TDRPM no caso SBS-FLNG-050-ALIV-000-180. Comprimento amortecimento de 240 m 102 Figura 5.25 - Arranjo das linhas de ancoragem fixadas no FLNG e no tanque de Figura 5.26 - Arranjo de linhas SBS que conectam os dois modelos...... 105 Figura 5.27 - Arranjo das defensas localizada entre as embarcações 105 Figura 5.28 - RAOs de variação da distância para as linhas do tanque...... 107 Figura 5.29 - RAOs de variação da distância para as linhas do SBS...... 107 Figura 5.30 - RAOs de variação da distância para as defensas...... 107 Figura 5.31 - RAOs de variação da distância para as linhas do tanque com Figura 5.32 - RAOs de variação da distância para as linhas do SBS com amortecimento......109 Figura 5.33 - RAOs de variação da distância para as defensas com

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 - Posição dos Wave Probes em relação ao eixo de coordenadas do
FLNG 45
Tabela 4.2 - Características principais das embarcações estudadas. Dados em
escala real47
Tabela 4.3 - Características das ondas irregulares 49
Tabela 4.4 - Características das ondas regulares 50
Tabela 4.5 - Características das linhas. Escala do modelo
Tabela 4.6 - Posição das linhas e defensas. Escala Real
Tabela 4.7 - Características do modelo de linhas entre as embarcações 60
Tabela 5.1 - Estimativa dos períodos dos modos de ressonância a partir da
formulação teórica73

Lista de Símbolos

FLNG	Floating Liquefied Natural Gas
LCG	Posição longitudinal do centro de gravidade
VCG	Posição vertical do centro de gravidade
TCG	Posição transversal do centro de gravidade
Desloc	Deslocamento da embarcação
LOA	Comprimento total da embarcação
В	Boca
D	Pontal
RAO	Response Amplitude Operator
SBS	Side by side
ISO	Isolado
Carreg.	Carregamento
Тр	Período de pico de onda
Т	Período
Hs	Altura significativa de onda
Н	Altura de onda
KB	Distância da quilha ao centro de flutuação
К	Rigidez da mola
IRR	Onda do tipo Irregular
REG	Onda do tipo regular
lxx	Inércia em relação ao eixo x
lyy	Inércia em relação ao eixo y
lzz	Inércia em relação ao eixo z
ω _{tn}	Frequência dos modos de ressonância transversal
ω_{ln}	Frequência dos modos de ressonância longitudinal
ω_0	Frequência do modo pistão
n	Enésimo modo de ressonância
S	Largura do vão
g	Aceleração da gravidade
Т	Calado
l	Comprimento do <i>moonpool</i>
b	Comprimento da zona de amortecimento

$T_n(x)$	Enésimo polinômio de Chebyshev
f(x)	Expansão de Chebyshev
a_n	Coeficientes para a expansão de Chebychev
L _{dz}	Distância a partir da origem das coordenadas globais até o início da região de amortecimento
v(x, y)	Função que define a característica amortecimento de uma determinada região no TDRPM
<i>x</i> , <i>y</i> e <i>z</i>	Coordenadas globais
t	Тетро
αω	Amortecimento externo aplicado à região da superfície livre no TDRPM
λ	Comprimento da onda
$f_r(t)$	Função rampa
T_r	Tempo de rampa

Sumário

R	esu	Imo)		/
A	bst	rac	:t		X
L	ista	ı de	• Fi	guras	XII
L	ista	ı de	e Ta	ibelas	XV
L	ista	ı de	e Sí	mbolos>	(VI
S	uma	áric)	X\	/111
1	I	Intr	odu	ção	20
2	(Objetivos			
3	I	Re۱	/isã	o Bibliográfica	25
	3.1	I	Re	ssonância de Ondas	25
	3.2	2	Mé	todos Numéricos de Análise	29
	3.3 Modelagem WAMIT		delagem WAMIT	33	
	3.4	1	Мо	delagem TDRPM	37
4	I	Ens	saio	s Experimentais	42
	4.1	I	Ins	trumentação	43
	4	4.1.	.1	Medição da Elevação da Superfície Livre	43
	4	4.1.	2	Medição dos Movimentos dos Modelos	45
	4.2	2	Co	ndições Ensaiadas	47
	4.3	3	Arr	anjo dos Modelos	51
	4	4.3.	.1	Modelos Isolados	52
	4	4.3.	2	Modelos Lado a Lado	57
	4.4	1	Co	mportamento das Embarcações	64
5	I	Res	sulta	ados e Discussões	69
	5.1	I	Ele	vação da Superfície Livre	71
	Į	5.1.	.1	RAO dos Wave Probes	78

	5.2 Ca	llibração da Elevação	82	
	5.2.1	Elevação no Domínio da Frequência	82	
	5.2.2	Elevação no Domínio do Tempo	89	
	5.3 Efe	eitos das Ressonâncias de Ondas nos Movimentos		
	5.3.1	Movimentos no Domínio da Frequência		
	5.3.2	Movimentos no Domínio do Tempo		
5.4 Efeitos da Ressonância no Arranjo de Linhas				
	6 Conclu	JSÕES	111	
	7 Referê	èncias	114	

1 Introdução

No ramo de exploração e produção de óleo e gás *offshore*, o desenvolvimento de novas tecnologias para aumentar a eficiência e a produção de recursos fez com que surgissem as plataformas do tipo FLNG (*Floating Liquefied Natural Gas*) para exploração de gás natural. Neste tipo de plataforma, o processo de alívio é considerado como sendo uma das partes críticas do processo de produção de gás para o qual existem dois tipos de operação de alívio que podem ser realizadas, em *tandem* ou lado a lado.

Em razão da natureza criogênica do processo de transferência de carga entre o FLNG e o navio Aliviador, existe a necessidade de realizar esta operação de alívio com as embarcações posicionadas lado a lado (*side by side* ou contra bordo), onde a distância entre os costados ou vão entre as embarcações é relativamente pequeno, evitando perdas térmicas por transferência de calor devido a um possível contato dos mangotes com a água. Outro ponto relevante está ligado ao alto custo dos mangotes por conta de seu isolamento térmico, onde uma menor distância entre os *manifolds* favorece uma economia monetária significativa.

Nesta condição existe a possibilidade de amplificação dos movimentos das embarcações em condições operacionais de mar, gerada a partir da interação entre as unidades e as condições ambientais, tais como vento, correnteza e, principalmente, ondas. Durante o processo de alívio lado a lado, fenômenos de ressonância associados à incidência de ondas podem trazer problemas para este tipo de operação, como apresentado por (Buchner & Van Dijk, 2001). Nessa situação, as ondas incidentes são amplificadas no vão entre as embarcações e o perfil de onda muda drasticamente em função das características geométricas do conjunto. Este fenômeno desempenha um papel importante nas forças induzidas pelas ondas e, consequentemente, na dinâmica do sistema como um todo, afetando diretamente o comportamento das embarcações e a dinâmica das defensas e linhas de amarração, podendo resultar, inclusive, na colisão dos corpos em condições extremas.

Este fenômeno tem impacto direto em projetos relacionados às operações de alívio lado a lado, como o dimensionamento do conjunto de amarração e determinação das cargas limites das linhas e defensas, que devem ser capazes de suportar os picos de amplitudes dos movimentos, sem que ocorra falha. Com relação à operação, este fenômeno desempenha um papel fundamental na determinação das condições limites para a realização da operação e no cálculo da disponibilidade do processo de alívio, a partir das condições ambientais da região de operação. Dessa forma, é fundamental que compreensão е а predição deste fenômeno sejam realizadas а adequadamente.

Uma das formas de investigar os efeitos de ressonância é por meio de modelos numéricos que resolvam os problemas de interação hidrodinâmica entre corpos flutuantes e ondas. Em aplicações *offshore,* no estudo de problemas que não envolvem navios com velocidade de avanço, há uma utilização generalizada da teoria potencial no domínio da frequência, através de programas como o WAMIT[®], WADAN[®], AQWA[®] e DIFFRAC[®], necessários para identificar as amplitudes dos movimentos em relação aos períodos de onda incidentes. As vantagens destas ferramentas estão na sua eficiência para representar o estado estacionário das cargas hidrodinâmicas e movimentos com baixo esforço computacional. Para as análises apresentadas ao longo deste trabalho, foi escolhido o WAMIT (Wamit, 2015) como uma das ferramentas de estudo para analisar este fenômeno, devido à maior afinidade de utilização pelo laboratório.

No entanto, a aplicação deste tipo de ferramenta para mensurar os impactos dos efeitos de ressonância nos movimentos das embarcações se torna uma tarefa difícil, na qual é fundamental que não ocorram erros nas estimativas, já que estes erros têm impacto direto no cálculo dos movimentos e das forças das linhas e defensas. Do ponto de vista da engenharia, existe um problema na correta modelagem e reprodução numérica desse fenômeno em vista do comportamento da superfície livre entre as embarcações, no qual a resolução por este método resulta em amplificações equivocadas da superfície ressonante em períodos operacionais de mar onde é observada a presença

21

deste fenômeno, uma vez que esta resolução tem como base a teoria potencial.

Estas amplificações estão ligadas às limitações do método utilizado, nas quais os fatores de dissipação de energia através de efeitos como viscosidade, vorticidade e turbulência tem influência na amplitude das ondas e, consequentemente, nas forças de primeira ordem, o que os modelos numéricos que utilizam a teoria potencial não são capazes de reproduzir. Isso torna necessária a inclusão de termos dissipativos para corrigir a elevação na região entre as unidades através de métodos de amortecimento, como a introdução de *lids (superfícies)* nesta região, como apresentado por (Huijsmans, et al., 2001), por meio de *lid* rígido, ou *lid* flexível associada aos termos de amortecimento linear, (Newman, 2004).

Neste contexto, pesquisas recentes realizadas no laboratório TPN (Tanque de Provas Numérico) da USP vêm desenvolvendo um novo método para a predição do comportamento em ondas de sistemas multicorpos com problemas de radiação e difração de ondas. Esta ferramenta computacional, chamada de TDRPM (*Time Domain Rankine Painel Method*), é baseada na aplicação das chamadas fontes de Rankine ao método de elementos de contorno (Watai, 2015) e, diferente do WAMIT, seu equacionamento se dá no domínio do tempo. Este procedimento vem sendo apontado por diversos pesquisadores como um dos mais promissores dentro dessa abordagem, uma vez que permite um tratamento simplificado para emular os efeitos dissipativos de energia na elevação da superfície livre no vão.

Diferente do WAMIT, que aplica os chamados "Método dos Modos Generalizados", que introduz um terceiro corpo (*lid*) nesta região, com o objetivo de amortecer as elevações devido à ressonância de ondas, o TDRPM apresenta uma abordagem mais simplifica, na qual são inseridas zonas de amortecimento conhecidas como "Praias Numéricas" ("*Numerical Damping Zones*"), que consistem na inclusão de termos dissipativos de energia diretamente na condição da superfície livre. Dessa forma, a vantagem do TDRPM está na introdução, de maneira simplificada, da correção da elevação da superfície no vão.

No entanto, a calibração destes fatores para ambos os métodos, necessita da utilização de ensaios físicos. Com esse intuito, foram disponibilizados dados provenientes de ensaios recentes realizados no Calibrador Hidrodinâmico do Tanque de Provas Numérico (CH-TPN). Estes ensaios consistem na caracterização do comportamento de duas embarcações posicionadas lado a lado representando as condições reais de um processo de alívio entre uma plataforma do tipo FLNG, com comprimento de 450 m e deslocamento de 277 m e deslocamento de 103.991 m³, levando em consideração diversas condições de carregamento, diferentes mares e conjunto de amarrações equivalente.

Os ensaios apresentam uma série de informações coletadas, como apresentado em (Rocha, et al., 2015), nos quais os dados relacionados aos movimentos das embarcações e elevação da superfície no vão foram utilizados como paradigma para o presente estudo. Já as análises preliminares do comportamento hidrodinâmico e da superfície livre constataram a presença dos fenômenos de ressonância de ondas nos movimentos de primeira ordem, em períodos entre 5 e 10 segundos, condições consideradas ideais de mar para a realização deste tipo de operação.

Com base no que foi exposto acima, este projeto de pesquisa propõe a investigação do fenômeno de ressonância de ondas em casos envolvendo operações de alívio lado a lado por meio da aplicação dos métodos numéricos TDRPM e WAMIT, tendo como objetivo principal a verificação do desempenho do emprego destas ferramentas.

2 Objetivos

O presente trabalho de pesquisa tem como objetivo principal a investigação dos efeitos hidrodinâmicos da ressonância de ondas em operações de alívio lado a lado, principalmente, em seu aspecto numérico.

Neste estudo será realizada uma verificação do uso das ferramentas TDRPM, desenvolvida no laboratório TPN, e WAMIT, com o intuito de avaliar o desempenho dos métodos em problemas de ressonância de ondas presentes em operação de alívio lado a lado, nos quais o foco principal será concentrado nas análises dos movimentos de primeira ordem, elevação da superfície livre no vão e forças no conjunto de amarrações.

Para tanto, este mestrado tem como objetivos os seguintes estudos:

- 1. Caracterizar as faixas de períodos nos quais estão presentes os efeitos de ressonância, a partir dos ensaios numéricos e experimentais.
- Investigar a influência das elevações da superfície livre, devido aos efeitos de ressonância, nos movimentos das embarcações.
- Investigar as imprecisões devido à utilização dos modelos numéricos na estimativa das elevações de onda e movimentações dos modelos.
- Investigar os parâmetros que influenciam na inclusão dos métodos para a correção das elevações irrealistas e a posterior calibração dos seus fatores a fim de reproduzir o comportamento físico obtido nos ensaios experimentais.
- Analisar as forças no conjunto de amarração, considerando a influência da aplicação dos métodos de amortecimento em comparação com os resultados experimentais, avaliando as imprecisões numéricas e como a correta modelagem afeta estas forças.

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Ressonância de Ondas

O processo de alívio lado a lado apresenta grande complexidade em vista das interações hidrodinâmicas entre os corpos e o campo de ondas incidentes. Nesta condição, é importante compreender a hidrodinâmica da operação para projetar e planejar a realização deste processo, selecionando adequadamente os equipamentos necessários, estabelecendo o estado de mar limite e a disponibilidade da transferência em que podem ser realizados. Por esta razão, é necessário ter a capacidade de prever o comportamento do campo de ondas e as forças geradas sobre os corpos.

Neste tipo de operação estão presentes os fenômenos de ressonância, gerados a partir da excitação do fluido devido às características geométricas e ao posicionamento dos corpos em relação à incidência de ondas, o que produz radiação por meio da movimentação das embarcações e difração das ondas nas geometrias, gerando os efeitos de ressonância na região de confino em certos períodos de mar. Segundo (Molin, 2001), este fenômeno pode ser separado em duas partes relacionadas à movimentação transversal e longitudinal do campo de ondas no vão. A primeira, devido à oscilação transversal das ondas entre os costados, é parecida com os efeitos de *sloshing* presente em tanques de carga líquida de unidades flutuantes, ocasionados devido à movimentação da carga no interior dos tanques. A segunda, e mais importante quando considerado grandes comprimentos e pequenas larguras do vão, são os efeitos de ressonância provenientes da propagação das ondas na direção do comprimento do vão.

Durante a propagação das ondas ao longo do comprimento do vão, a condição do primeiro modo de ressonância, conhecido como Modo Pistão ou "*Pumping Mode*", tem atraído muita atenção dos pesquisadores, em vista da presença das maiores amplificações e forças de ondas, quando comparado com outros modos de ressonância. Nesta condição, a água no interior do vão movimentase verticalmente de forma semelhante a um corpo rígido, causando grandes

problemas para o comportamento do sistema devido à presença de picos nas forças e nos movimentos de primeira ordem.

É comum neste tipo de fenômeno encontrar um comportamento, em termos de movimentação e elevação de onda no vão, que coincide com a faixa de mar operacional. Durante este tipo de operação, os corpos apresentam alterações em seu comportamento em regime de ondas, dificultando a previsão e realização deste tipo de operação. De acordo com (Molin, 2001), os períodos de ressonância são diretamente dependentes da largura do vão e do calado dos navios.

Para determinar, de forma analítica, os períodos em que ocorrem as ressonâncias de onda, (Lewandowski, 2008) apresenta formas analíticas para as estimativas das frequências ω_{tn} dos modos de ressonância transversal que correspondem rigorosamente às ondas estacionárias no vão, considerando a resolução para modelos 2-D e geometrias semelhantes e condição de águas profundas, sendo calculada pela seguinte expressão:

$$\omega_{tn} = \sqrt{\frac{n \pi g}{S}}$$
 , $n = 1, 2, ...$ Eq. (1)

Onde n é associado ao enésimo modo, S é a largura do vão e g é a aceleração da gravidade.

Sobre a condição do modo pistão, uma simples estimativa é proposta por (Bunnik, et al., 2009), assumindo uma situação 2-D onde uma coluna d'água movendo-se para cima e para baixo. Uma limitação desta estimativa é o fato da largura do vão não ser considerada neste equacionamento. Nesta condição, a frequência do Modo Pistão é estimada por meio da seguinte expressão:

$$\omega_0 = \sqrt{g \over T}$$
 Eq. (2)

Onde T é o calado e g é a aceleração da gravidade. No entanto, a aplicação deste equacionamento para problemas reais de alívio lado a lado se torna inadequada em vista dos diferentes calados e larguras do vão. Contudo, é possível realizar estimativas preliminares considerando algumas hipóteses. A aplicação destas equações analíticas mostra que as frequências das

ressonâncias transversais, para este problema, estão presentes abaixo de 3 segundos, indicando que este efeito tem pouca influência no comportamento das embarcações, devido a apresentar pequenas amplitudes de ondas nesta faixa de mar.

Considerando a geometria do vão, (Molin, 2001) apresentou uma formulação analítica baseada na análise tridimensional do escoamento em um moonpool retangular, investigando os modos naturais de oscilação da superfície livre internas deste moonpool, sob a suposição de profundidade infinita, comprimento e boca da barcaça infinita e movimentação fixa. A equação abaixo representa a formulação analítica para calcular as frequências de Modo Pistão e dos demais modos de ressonância longitudinais, respectivamente:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{T + Sf_3(S/l)}}$$
 Eq. (3)

$$f_{3} = \frac{1}{\pi} \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{l}{b} \right) + \frac{l}{b} \sinh^{-1} \left(\frac{b}{l} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{b}{l} + \frac{l^{2}}{b^{2}} \right) - \frac{1}{3} \left(1 + \frac{l^{2}}{b^{2}} \right) \sqrt{\frac{l^{2}}{b^{2}}} + 1 \right\}$$
 Eq. (4)
$$\omega_{ln}^{2} \approx g \lambda_{n} \frac{1 + J_{n} \tanh \lambda_{n} T}{1 + J_{n} \tanh \lambda_{n} T}$$
 Eq. (5)

$$g_{ln}^2 \approx g\lambda_n \frac{1 + J_n \tanh \lambda_n T}{J_n + \tanh \lambda_n T}$$
 Eq. (5)

$$J_n = \frac{2}{n\pi^2 r} \left\{ \int_0^1 \frac{r^2}{u^2 \sqrt{u^2 + r^2}} \left[1 + (u - 1)\cos(n\pi u) - \frac{\sin(n\pi u)}{n\pi} \right] du + \frac{1}{\sin\theta_0 - 1} \right\}$$
 Eq. (6)

Onde r = S/l, $tan\theta_0 = r^{-1}$, l é o comprimento do moonpool e $\lambda_n = n\pi/l$.

No entanto, o problema estudado não se enquadra na hipótese desta teoria, já que esta resolução não considera a radiação devido à movimentação dos corpos e às diferentes dimensões para as embarcações. Desta forma, com a aplicação desta formulação é esperado que ocorram algumas discrepâncias na comparação entre as frequências experimentais e numéricas com as analíticas. Apesar disso, a formulação pode ser utilizada de forma criteriosa, considerando faixas de variação dos parâmetros, a fim de obter uma estimativa preliminar das frequências de ressonância, como será discutido mais adiante.

Considerando a ressonância de onda, podemos citar duas condições principais que influenciam no comportamento deste fenômeno. A primeira está ligada ao efeito de sombra de ondas, presente em qualquer cálculo de difração com interações hidrodinâmicas. A presença de corpos adjacentes afeta as forças hidrodinâmicas, tanto no corpo que recebe diretamente a incidência de ondas quanto no corpo abrigado. Em problema de difração envolvendo múltiplos corpos, um dos corpos atua como quebra-mar, enquanto os outros agem como corpo abrigado. Já em problemas de radiação, o corpo exposto às condições ambientais age como fonte de produção de onda para o outro corpo, como apresentado por (Hong, et al., 2005).

A segunda condição está na dissipação de parte das energias das ondas devido aos efeitos viscosos, como o atrito, separação do escoamento no bojo e turbulência, que em certas condições geram um amortecimento da ressonância, reduzindo as amplificações do campo de ondas na região do vão. Como apresentado no estudo de (Kristiansen & Faltinsen, 2012), no qual foram realizadas investigações experimentais e numéricas com três diferentes bojos, constatando a influência das geometrias na elevação das ressonâncias de ondas. Sobre este trabalho, o autor afirma que estes efeitos explicam a discrepância na comparação dos resultados numéricos e experimentais, geralmente observados em modelos que utilizam a teoria potencial.

3.2 Métodos Numéricos de Análise

Na avaliação das características hidrodinâmicas de operações de alívio lado a lado, um aspecto chave é a análise das forças e movimentos das embarcações devido aos efeitos de ressonância de onda. A utilização de ferramentas de predição torna-se necessária, na fase de concepção, para calcular a amplitude desses modos de ressonância e identificar, com precisão, os períodos de ondas nos quais ocorrem os movimentos de maior amplitude. Estas informações são importantes para determinar os limites operacionais, disponibilidade da realização da operação e forças no arranjo de amarração.

Em aplicações offshore há uma utilização generalizada da teoria potencial para estudo de interação fluido-estrutura. Esta formulação implica em escoamento irrotacional e incompressível, assim como fluido invíscido e homogêneo. Esta teoria é aplicada geralmente para o Problema de Valor de Contorno (BVP - *boundary value problems*) linearizado no domínio da frequência por meio da utilização de Método de Elementos de Contorno (painéis). Esses métodos numéricos resolvem a equação de Laplace (conservação de massa) com condições de contorno de impermeabilidade e de funções de Green específicas de acordo com o domínio/problema estudado, sendo que várias delas podem ser vistas em (Wehausen, 1960). Uma das vantagens desses métodos está na eficiência computacional quando comparados com aqueles que resolvem o problema com fluido real utilizando abordagem RANSE/DNS/LES.

Um dos *softwares* comerciais mais conhecidos com a utilização deste método é o WAMIT (*Wave Analysis Massachusetts Institute of Technology*), (Wamit, 2015), o qual é baseado no método de painéis tridimensionais e considera a condição de superfície livre como sendo linear. Seus resultados são apresentados no domínio da frequência na forma de funções de transferência, ou Operadores de Amplitude de Resposta (RAO – *Response Amplitude Operator*), tanto para o movimento quanto para a elevação da superfície livre.

A aplicação desta ferramenta ao problema em estudo apresenta limitações em vista dos efeitos de ressonância no vão, no qual são superestimadas as elevações da superfície, assim como os movimentos dos corpos em torno das

frequências de ressonância. Uma das razões está ligada a limitação numérica do método em negligenciar os efeitos viscosos, por exemplo, provocados pelo amortecimento proporcionado pela separação do escoamento no bojo, turbulência e atrito, como apresentado por (Kristiansen & Faltinsen, 2012). Consequentemente, as forças e movimentos de primeira ordem das embarcações aumentam durante as predições numéricas. A fim de suprimir as elevações irrealistas das ondas ressonantes obtidas através destes métodos numéricos, têm sido desenvolvidos vários mecanismos de supressão destas elevações.

Uma abordagem formula um método de supressão das elevações irrealistas por meio da inclusão de um *lid* na superfície livre. Este *lid* consiste em uma superfície, sem volume e sem inércia, que introduz amortecimentos artificiais diretamente na superfície livre, ou no caso do problema de ressonância de onda, através de sua aplicação na região do vão entre as embarcações. Para recuperar o comportamento ressonante no vão, (Huijsmans, et al., 2001) e (Buchner & Van Dijk, 2001) usaram um simples método baseado na inclusão de um *lid* rígido e fixo ao longo do comprimento do vão, onde é aplicada uma condição sem o escoamento vertical nesta região. A principal desvantagem desta abordagem é que a forma do perfil de ondas no vão e as propriedades de propagação são perdidas.

(Chen, 2005) e (Pauw, et al., 2007) reduziram as elevações de ressonância na região de confino aplicando o método de supressão que introduz forças de amortecimento diretamente nas condições de contorno da superfície livre, onde os resultados numéricos foram comparados com ensaios experimentais em termos de elevação de onda e respostas de primeira ordem. A maior vantagem deste método está na inclusão de apenas um valor para o fator de amortecimento nesta região.

Já (Bunnik, et al., 2009) utilizou o *lid* rígido para remover as frequências ressonantes aplicando o método de amortecimento artificial não apenas no vão, mas também dentro das embarcações. Como resultado deste estudo, as frequências de ressonância foram corrigidas em comparação com os resultados experimentais.

Em (Newman, 2003) foi utilizado um *lid* flexível, que inclui o chamado Método dos Modos Generalizados como um conjunto de funções base dos polinômios de Chebyshev para modelar o *lid*. Nesta modelagem, o *lid* é capaz de tomar a forma dos modos de ressonância e permite que as alturas de ondas, nesta região, sejam controladas pela imposição de fatores de amortecimento para cada modo de vibração.

Em (Kristiansen & Faltinsen, 2012), os autores utilizaram uma abordagem de decomposição do domínio, que combina a teoria de escoamento potencial e CFD para analisar o problema de ressonância no vão em 2D. Já na investigação tridimensional apresentada em (Molin, 2009) foram realizadas com diferentes bojos de barcaças arredondadas e quadradas. Nos dois casos foram realizados ensaios numéricos e experimentais, e os resultados concluíram novamente que a separação do escoamento no bojo de barcaças/navios explica a discrepância de resposta ressonante de pico observada nos métodos potenciais lineares.

Outra abordagem para o estudo do fenômeno está na análise de interações hidrodinâmicas entre múltiplos corpos no domínio do tempo, como apresentado por (Buchner & Van Dijk, 2001), (Naciri, et al., 2007), (Zhao, et al., 2013) e (Koo & Kim, 2005). Esta abordagem é usada em muitos casos quando a análise é acoplada envolvendo não apenas os corpos, mas também as linhas de ancoragem e defensas. Nestes artigos, os cálculos numéricos são baseados na utilização de equações de Cummins (Cummins, 1962), em que coeficientes hidrodinâmicos no domínio da frequência são utilizados como dados de entrada para obter os resultados no domínio do tempo.

Em (Watai, 2015) foi desenvolvido um método de painéis baseados em fontes de Rankine para obtenção dos resultados no domínio do tempo, chamado de TDRPM (*Time Domain Rankine Panel Method*). Este método foi aplicado a um sistema simplificado que envolve múltiplos corpos em configuração lado a lado e apresentou boa aderência dos resultados quando comparado aos ensaios experimentais, (Watai, et al., 2015). Esta nova ferramenta emprega uma abordagem simplificada e eficaz para a implementação do amortecimento na região do vão, por meio da inclusão de zonas de amortecimento conhecidas

como "Praias Numéricas", que consistem na inclusão de termos dissipativos de energia diretamente na condição da superfície livre. Esta ferramenta mostra ser adequada para o estudo do fenômeno de ressonância de ondas no vão entre embarcações posicionadas lado a lado em vista da facilidade da inclusão desta condição, como apresentado no estudo (Dinoi, 2016), no qual foi estudado a interações hidrodinâmicas entre duas embarcações em configuração lado a lado, variando os parâmetros do vão e calados das embarcações.

Sendo assim, será realizada uma verificação da aplicação das ferramentas, WAMIT e TDRPM, no estudo dos fenômenos de ressonância, que afetam o comportamento das embarcações durante o processo de alívio lado a lado, em condições reais de operação.

3.3 Modelagem WAMIT

O WAMIT, (Wamit, 2015), utiliza a teoria potencial aplicada à resolução do Problema de Valor de Contorno (BVP - *boundary value problems*) linearizado no domínio da frequência por meio da utilização de Método de Elementos de Contorno (painéis) para o estudo de problemas considerando a interação entre fluido-estrutura. Esses métodos numéricos resolvem a equação de Laplace (conservação de massa) com condições de contorno de impermeabilidade e de funções de Green específicas de acordo com o domínio/problema estudado.

Para a modelagem do sistema no programa WAMIT foi considerado o arranjo das embarcações em condição de alívio lado a lado. As geometrias foram criadas através do programa CAD (*Computer Aided Design*) e representam as partes submersas dos corpos, necessárias para a simulação no WAMIT, como apresentado na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Exemplo de malha para os modelos WAMIT

Um modelo no WAMIT consiste em uma série de arquivos que contém as informações necessárias para que o programa resolva o problema. Basicamente, devemos fornecer as seguintes informações ao programa:

- A malha da superfície molhada de cada corpo na situação de equilíbrio hidrostático;
- 2. A matriz de massa-inércia do sistema;
- 3. Amortecimento externo;
- 4. Rigidez externa;

- 5. Períodos das ondas regulares e incidências analisadas;
- 6. Os parâmetros de configuração que dependem do tipo da simulação.

Os modelos gerados neste trabalho utilizam o método de discretização de painéis de ordem maior (*Higher Order*) para melhorar a resolução da geometria, de acordo com (Wamit, 2015). Também foram realizadas análises de convergência dos resultados para determinar o tamanho de cada célula das malhas utilizadas com o objetivo de garantir uma convergência numérica apropriada dos resultados.

Para as análises de elevação da superfície livre na região ao redor das embarcações e no vão foram criados pontos de monitoramento cobrindo toda essa extensão, como representado na Figura 3.2. Na região do vão e de entrada do campo de ondas existe uma densidade maior de pontos para obter melhor resolução dos perfis de elevação analisados. Dessa forma, os dados processados no WAMIT serão utilizados para verificação da elevação máxima em regime estacionário necessário para o estudo da ressonância no vão.



Figura 3.2 - Pontos para o estudo da elevação da superfície livre no WAMIT

As inércias dos modelos foram calibradas de acordo com as características reais das embarcações e para cada condição de carregamento estudada, como apresentado na seção 4.2. Também foram considerados os amortecimentos dos movimentos obtidos nos ensaios, principalmente para o movimento de *Roll*.

As análises foram realizadas na faixa de períodos de ondas regulares entre 3 e 30 segundos contabilizando um total de 220 períodos, sendo esta discretização

necessária para a identificação dos períodos em que os modos de ressonância no vão entre as embarcações ocorrem.

Como o WAMIT não apresenta a modelagem da superfície livre, a inclusão de termos dissipativos para a correção das elevações irrealistas da superfície livre no vão se torna mais complicada. Sendo assim, é necessária a introdução de um corpo ou superfície, sem propriedades de inércia ou volume, mas com propriedades de amortecimento para emular os efeitos viscosos da ressonância. Dessa forma, será introduzido um *lid* flexível na região do vão entre as embarcações, como apresentado em (Newman, 2003), que utiliza o chamado Método dos Modos Generalizados como um conjunto de funções base dos Polinômios de Chenbyshev. Este método modela o *lid* para obter o formato dos modos de ressonância e corrigir as elevações irrealistas, devido à negligência da teoria potencial em representar adequadamente os efeitos viscosos, a partir de variáveis de amortecimento para cada modo de vibração que compõem os modos de ressonância deste fenômeno.

O método permite ajustar o comportamento das embarcações e a elevação da superfície por meio de propriedades de "amortecimento extra" para cada um dos modos de vibração do *lid*. Dessa maneira, para a calibração foram realizadas análises para se determinar um número adequado de modos de vibrações ativos e significativos para representar as respostas ressonantes do sistema, e posterior calibração dos seus amortecimentos com base nos resultados experimentais, como será apresentado mais adiante.

A medição da elevação da superfície livre nesta região, para a comparação com os ensaios experimentais, pode ser realizada através de dois métodos. O primeiro por meio da pressão ou da elevação da superfície em um determinado ponto do domínio, e o segundo, através da utilização dos polinômios de Chebyshev (configurado a partir do parâmetro IGENMDS=20 nos arquivos do WAMIT) para a composição dos modos de ressonância, definidos por:

$$T_{0}(x) = 1$$

$$T_{1}(x) = x$$
Eq. (7)
$$T_{n+1}(x) = 2xT_{n}(x) + T_{n-1}(x)$$

A seguir está a representação gráfica dos polinômios de Chebyshev para os seis primeiros polinômios no intervalo $-1 \le x \le 1$ que representam os modos de vibração que compõe cada modo de ressonância.





$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n T_n(x)$$
 Eq. (8)

Os polinômios de Chebyshev formam uma base ortogonal que implica que os coeficientes a_n podem ser facilmente determinados por meio da aplicação de um produto interno.
3.4 Modelagem TDRPM

A versão atual do TDRPM utiliza a mesma teoria potencial do WAMIT, contudo, sua resolução apresenta-se no domínio do tempo. Com o intuito de resolver os Problemas dos Valores de Contorno (BVP - *Boundary Value Problems*), o TDRPM adota o Método dos Elementos de Contorno (painéis) de ordem menor e usa fontes de Rankine como Função de Green.

Além disso, a fim de evitar que as ondas irradiadas e difratadas alcancem os limites da superfície livre e reflitam de volta para as posições dos corpos, (Watai, 2015) aplicou o conceito de zona de amortecimento numérica, primeiramente proposto por (Israeli & Orszag, 1981), no qual estas zonas são incluídas próximo à fronteira do limite da superfície livre nas chamadas "Praias Numéricas" ("*Numerical Damping Zones*"). Esta zona de amortecimento numérica funciona de forma semelhante à abordagem do *lid* de amortecimento, no entanto um termo de dissipação é incluído nas condições de contorno de uma região da superfície livre. Existem diversas variantes do método que podem ser observadas na literatura, tais como as aplicadas em (Prins, 1995), (Bunnik, 1999), (Boo, 2002),(Shao, 2010), entretanto nesta formulação foi utilizada a seguinte definição (Zhen, et al., 2010):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial t} - v(x, y)\eta \quad em \ z = 0 \quad e \quad \sqrt{x^2 + y^2} > L_{dz}$$
 Eq. (9)

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -g\eta - v(x,y)\phi \quad em \ z = 0 \quad e \quad \sqrt{x^2 + y^2} > L_{dz}$$
 Eq. (10)

Em que L_{dz} é a distância a partir da origem das coordenadas globais até o início da região de amortecimento e v(x, y) é uma função que define a característica de dissipação desta região, descrita por:

$$v(\mathbf{x},\mathbf{y}) = a\omega \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2} - L_{dz}}{b\lambda}\right)^2$$
 Eq. (11)

Onde *a* define a intensidade de dissipação e *b* o comprimento da zona de amortecimento. Nesta região os valores foram ajustados a partir de ensaios experimentais de tal forma a evitar a ocorrência de ondas refletidas que podem prejudicar a resolução do problema. Em geral, observa-se que a zona de

amortecimento precisa ter um tamanho mínimo de um comprimento de onda, b = 1, enquanto que a intensidade deve ser ajustada de forma que permita uma dissipação progressiva e suave das ondas. Zonas de amortecimento com grandes valores de *a* (ou seja, $a \ge 3$) podem comportar-se como uma parede fixa.

Com relação à modelagem da malha, este método exige que a superfície de contorno seja discretizada em um número finito de painéis quadrangulares ou triangulares. Para isso, a modelagem deste problema foi realizada através de malhas divididas em três grupos principais. O primeiro grupo apresenta as malhas das geometrias das embarcações estudadas, nas quais estão representadas as geometrias submersas por meio de painéis quadrangulares, sendo criados 914 painéis para o FLNG e 1600 painéis para o Aliviador. A determinação do número de painéis foi realizada a partir de análises de convergência dos resultados.

No segundo grupo estão os elementos que compõem a superfície livre representada por painéis quadrangulares dentro de uma região circular. As dimensões desta região dependem diretamente do comprimento das ondas simuladas e, devido às limitações de memória para o processamento numérico, a região deve ter um diâmetro máximo e um número razoável de painéis, sendo assim, esta região apresenta diâmetro de 2000 metros e 5570 painéis. Outro ponto importante é o comprimento desta região designada para a praia numérica necessária para dissipar a energia das ondas e evitar reflexões nas fronteiras do domínio computacional. Para melhorar a convergência numérica, a malha da superfície livre apresenta um refinamento, apresentando na região dos corpos uma maior densidade de painéis.

O terceiro grupo representa a região do vão entre as embarcações e demanda um refinamento maior da malha para representar com precisão os efeitos de ressonância de ondas, e para esta região foram criados 984 painéis. Outra característica é que a malha da superfície livre foi concebida para permitir uma transição suave entre a região do vão e a superfície livre exterior. A representação da malha para este modelo pode ser observada na Figura 3.4 e Figura 3.5, nas quais é apresentada uma visão geral da malha da superfície livre e da malha da geometria submersa das embarcações, respectivamente.



Figura 3.4 - Representação da malha 3D utilizada no TDRPM para a superfície livre e vão



Figura 3.5 - Representação da malha 3D utilizada no TDRPM para os corpos

Para as condições de ensaio foram utilizadas ondas regulares com períodos variando de 5 a 10 segundos, região onde os efeitos de ressonância de ondas são mais visíveis. As condições de carregamento, incidência de onda e posição dos corpos são as mesmas utilizadas nos ensaios experimentais, apresentado na seção 4.2.

Com o objetivo de garantir uma evolução estável da solução até a obtenção de um estado estacionário e evitar períodos transitórios longos sem nenhum interesse físico para esta análise, o método numérico considera o uso de uma função de rampa $f_r(t)$, como mostrado na Eq. (12).

$$f_r(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi t}{T_r}\right) \right] & se \ t \le T_r \\ 1 & se \ t > T_r \end{cases}$$
Eq. (12)

Onde T_r é o tempo de rampa que é definido como um múltiplo do período de onda característico envolvido nas simulações.

Para estudar a região de amortecimento foram determinados três tamanhos para o comprimento da praia numérica empregada para modelar a superfície livre no vão entre os navios, e uma largura fixada em 8 metros, seguindo as características apresentadas a seguir e observadas na Figura 3.6:

- 240 m (comprimento da área molhada do Aliviador)
- 120 m (comprimento do corpo paralelo)
- 60 m (corpo paralelo reduzido)



Figura 3.6 - Representação das embarcações e regiões de amortecimento

A partir da equação Eq. (11), utilizada para o amortecimento do limite da fronteira do domínio é possível a aplicação desta condição de amortecimento em qualquer região da superfície livre que compreenda o domínio do modelo numérico. Dessa maneira, é possível incluir as chamadas Praias Numéricas na região entre as embarcações para o amortecimento das elevações da superfície livre devido ao fenômeno de ressonância de ondas através da função v(x, y) que define a característica de dissipação desta região.

Nesta condição, a função de amortecimento aplicada a esta região do vão é dada pela Eq. (13), onde x e y variam dentro dos limites das regiões em estudo apresentadas na Figura 3.6

$$v_{g}(x, y) = a\omega$$
 Eq. (13)

Já os valores de amortecimento $(a\omega)$ empregados são constantes ao longo do comprimento desta região, onde foram considerados quatro valores de amortecimento para o estudo, como apresentado a seguir:

- Sem amortecimento
- Amortecimento 0.0156 [1/s]
- Amortecimento 0.0313 [1/s]
- Amortecimento 0.0625 [1/s]

Para a simulação foram considerados 70 ciclos de ondas para cada período estudado. Este tempo é necessário para que a série temporal dos movimentos e elevação na superfície passe do regime transitório para o regime permanente.

4 Ensaios Experimentais

Para o desenvolvimento do estudo foram disponibilizados os dados provenientes de ensaios experimentais realizados no laboratório TPN, com o objetivo de caracterizar o processo de alívio executado com as embarcações posicionadas lado a lado, como apresentado em (Nishimoto, et al., 2012). Durante os ensaios foram coletadas diversas informações, contudo, para o presente estudo foram tomadas como paradigma as informações de comportamento em ondas das embarcações, elevação da superfície livre no vão e forças no conjunto de amarração.

Os ensaios foram realizados no Calibrador Hidrodinâmico do Tanque de Provas Numérico da USP (CH-TPN). O CH-TPN tem dimensões de 14 metros de comprimento por 14 metros de largura e 4 metros de profundidade, possui um conjunto de 148 flaps responsáveis pela geração e absorção de ondas. A Figura 4.1 mostra uma visão geral do tanque em que é possível identificar os flaps em amarelo, posicionados no contorno do tanque e a ponte móvel em azul, acima do tanque. Outras características específicas do tanque estão disponíveis em (Mello, et al., 2013).



Figura 4.1 - Calibrador Hidrodinâmico do Tanque de Provas Numérico (CH-TPN) Os ensaios em tanque de provas foram realizados com modelos em escala 110:1. As características dos modelos, o arranjo de linhas e defensas será apresentado adiante, assim como as instrumentações empregadas para a medição dos dados de movimento e elevação.

4.1 Instrumentação

4.1.1 Medição da Elevação da Superfície Livre

Para a medição da elevação da superfície livre foram utilizados medidores capacitivos chamados de Wave Probes, ver Figura 4.2. Este equipamento foi utilizado para a calibração da incidência de ondas nos modelos e medição da elevação da superfície livre entre as embarcações.



Figura 4.2 - Wave Probe utilizado nos ensaios

Para a medição da elevação da superfície livre no vão entre as embarcações foi alocado um conjunto de sete Wave Probes a boreste do modelo do FLNG, como apresentado na Figura 4.3.



Figura 4.3 - Arranjo dos Wave Probes fixos no modelo do FLNG

Estes instrumentos estão fixados no casco do FLNG a uma distância de 11.0 milimetros do seu costado (escala do modelo). Estes equipamentos pesam cerca de 180 gramas. Além disso, os Wave Probes apresentam boa resposta nos testes de calibração estático e dinâmico, mostrando uma correlação de 0.9999.



Figura 4.4 - Posições de fixação dos Wave-Probes no FLNG (escala real)

As posições dos Wave Probes são apresentadas na Tabela 4.1 e estão descritas em relação aos eixos de coordenadas do FLNG, localizado no plano de simetria (plano xz), na quilha e à meia-nau da embarcação.

	х	У
	[m]	[m]
Wave Probe 1	138.40	-41.71
Wave Probe 2	93.33	-41.71
Wave Probe 3	48.23	-41.71
Wave Probe 4	3.13	-41.71
Wave Probe 5	-41.97	-41.71
Wave Probe 6	-87.07	-41.71
Wave Probe 7	-132.20	-41.71

Tabela 4.1 - Posição dos Wave Probes em relação ao eixo de coordenadas do FLNG

A fixação dos Wave Probes no costado do modelo FLNG acarreta na influência das medições da superfície livre pela participação ativa do movimento do modelo nessa oscilação. Isto é, os resultados medidos nos sensores de onda representam a elevação da superfície livre em relação ao sistema de coordenadas do FLNG. Portanto, a comparação dos resultados experimentais com os obtidos numericamente foi realizada em função da elevação relativa no vão.

4.1.2 Medição dos Movimentos dos Modelos

A medição dos movimentos dos modelos nos seis graus de liberdade foi realizada por meio do sistema óptico Qualisys, composto por quatro câmeras de vídeo e cinco alvos passivos posicionados em cada um dos modelos. Dessa forma, são registradas as séries temporais dos movimentos dos dois corpos flutuantes em relação aos seus respectivos centros de gravidade (CG).

Além disso, para manter os erros de medição inferiores a 0.5 mm foram realizadas calibrações periódicas no conjunto de câmeras para corrigir eventuais erros de calibragem no sistema. A Figura 4.5 mostra uma câmara Qualisys.

Para facilitar o processamento dos dados, a série temporal dos movimentos foi sincronizada com os Wave Probes e com gerador de ondas do tanque de provas.



Figura 4.5 - Câmera do sistema de rastreamento óptico da Qualisys

4.2 Condições Ensaiadas

Foram realizados dois tipos de ensaios. O primeiro está relacionado aos ensaios com as embarcações isoladas para verificação da calibração dos modelos e validação com WAMIT. Já o segundo foi realizado para o estudo do fenômeno de ressonância com as duas embarcações posicionadas lado a lado. As principais características das embarcações são apresentadas na Tabela 4.2.

	Carreg.	LCG ¹	VCG ²	TCG	Calado	Desloc.	LOA	В	D	lxx	lyy	lzz	КВ
		[m]	[m]	[m]	[m]	[m ³]	[m]	[m]	[m]	[t.m ²]	[t.m ²]	[t.m ²]	[m]
	15%	-13.7	23.0	0.0	12.2	431108				4.4E+08	6.2E+09	6.2E+09	6.2
FLNG	50%	-13.1	18.5	0.0	16.6	591683	450	81	38	4.2E+08	8.6E+09	8.7E+09	8.4
	90%	-12.5	20.9	0.0	22.0	788593				4.7E+08	1.1E+10	1.1E+10	11.1
Aliviador	0%	1.1	12.9	0.0	9.5	79568	777	12	26	2.0E+07	3.3E+08	3.4E+08	5.0
Anviauor	100%	2.7	16.3	0.0	12.0	103991	277	277 45	45 20	2.3E+07	5.2E+08	3.4E+08	6.4

Tabela 4.2 - Características principais das embarcações estudadas. Dados em escala real

¹ Valores medidos em relação a meia nau e positivo na direção da proa

² Valores medidos em relação a quilha e positivo para cima

Neste estudo foram consideradas duas configurações de carregamento. A primeira com o FLNG com carregamento parcial de 50% e o Aliviador totalmente carregado (100% de carregamento) e a segunda com o FLNG com carregamento parcial de 50% e o Aliviador em condição de lastro (0% de carregamento). As inércias dos modelos foram calibradas de acordo com as características reais das embarcações.

Durante a caracterização dos fenômenos de ressonância foram realizados ensaios numéricos e experimentais considerando apenas a influência da incidência de ondas no comportamento das embarcações e na movimentação da superfície livre na região do vão. Com esse propósito foram utilizadas ondas regulares e irregulares, abrangendo uma faixa de período de ondas de 3 a 25 segundos. Para as incidências de onda foi definido o sistema de coordenadas apresentado na Figura 4.6 e foram considerados 5 ângulos com incidências de través, proa e bochecha (090°, 165°, 180°, 195° e 270°).



Figura 4.6 - Definição do ângulo de incidência de ondas

Devido à grande quantidade de dados obtidos durante os ensaios e como o foco deste estudo está no comportamento das embarcações em condições reais de alívio, foi escolhido utilizar apenas os dados provenientes da incidência de onda de proa (180°), já que esta condição está próxima das condições ideais para a realização do processo de alívio. Com relação aos carregamentos, foi escolhida a condição com o FLNG com carregamento parcial de 50% e o Aliviador em condição de lastro (0% de carregamento), já que o objetivo deste estudo está na verificação dos métodos numéricos, nos quais não há necessidade de estudar mais de uma condição.

Para as ondas irregulares foram calibradas quatro ondas com períodos diferentes. Cada uma foi dividida em três segmentos de 1 hora na escala real para compor uma unidade de três horas de estado de mar. Cada segmento de onda tem uma semente diferente para a mudança de fase e a criação de séries temporais utilizando o método de fase aleatória. A seguir são apresentadas as características das ondas irregulares ensaiadas na condição de escala real.

Ondo	Тр	Hs	Duração
	[s]	[m]	[h]
IRR 01 - seg. 001	10	4.8	1
IRR 01 - seg. 002	10	4.8	1
IRR 01 - seg. 003	10	4.8	1
IRR 02 - seg. 001	12	5.2	1
IRR 02 - seg. 002	12	5.2	1
IRR 02 - seg. 003	12	5.2	1
IRR 03 - seg. 001	14	5.3	1
IRR 03 - seg. 002	14	5.3	1
IRR 03 - seg. 003	14	5.3	1
IRR 04 - seg. 001	16	4.5	1
IRR 04 - seg. 002	16	4.5	1
IRR 04 - seg. 003	16	4.5	1

Tabela 4.3 - Características das ondas irregulares

As ondas regulares selecionadas para os ensaios cobrem uma faixa de períodos de 7 a 21 segundos com duas alturas de onda diferentes, 2 e 4 metros de altura (*H*). Na Tabela 4.4 são apresentadas as características das ondas regulares utilizadas nos ensaios experimentais.

Onda Tp		Н	Onda	Тр	Н
	[S]	լայ		[S]	լայ
Regular 01	7.0	4	Regular 27	7.0	2
Regular 02	8.0	4	Regular 28	8.0	2
Regular 03	9.0	4	Regular 29	9.0	2
Regular 04	10.0	4	Regular 30	10.0	2
Regular 05	10.5	4	Regular 31	10.5	2
Regular 06	11.0	4	Regular 32	11.0	2
Regular 07	11.5	4	Regular 33	11.5	2
Regular 08	12.0	4	Regular 34	12.0	2
Regular 09	12.5	4	Regular 35	12.5	2
Regular 10	13.0	4	Regular 36	13.0	2
Regular 11	13.5	4	Regular 37	13.5	2
Regular 12	14.0	4	Regular 38	14.0	2
Regular 13	14.5	4	Regular 39	14.5	2
Regular 14	15.0	4	Regular 40	15.0	2
Regular 15	15.5	4	Regular 41	15.5	2
Regular 16	16.0	4	Regular 42	16.0	2
Regular 17	16.5	4	Regular 43	16.5	2
Regular 18	17.0	4	Regular 44	17.0	2
Regular 19	17.5	4	Regular 45	17.5	2
Regular 20	18.0	4	Regular 46	18.0	2
Regular 21	18.5	4	Regular 47	18.5	2
Regular 22	19.0	4	Regular 48	19.0	2
Regular 23	19.5	4	Regular 49	19.5	2
Regular 24	20.0	4	Regular 50	20.0	2
Regular 25	20.5	4	Regular 51	20.5	2
Regular 26	21.0	4	Regular 52	21.0	2

Tabela 4.4 - Características das ondas regulares

4.3 Arranjo dos Modelos

O arranjo dos modelos estudados consiste de duas embarcações posicionadas lado a lado durante o processo de alívio entre o FLNG e o Aliviador, como apresentado na maquete eletrônica na Figura 4.7. A seguir serão apresentadas as características das embarcações e o arranjo dos ensaios.



Figura 4.7 - Maquete eletrônica das embarcações durante o processo de alívio lado a lado Para a análise dos fenômenos de ressonância, os modelos foram estudados em duas configurações. Na primeira, os modelos foram ensaiados isoladamente e comparados com os resultados numéricos através do programa WAMIT, tendo o propósito de verificar se as inércias e formato dos cascos estão condizentes com os modelos propostos. Já na segunda configuração, os modelos foram posicionados em condição de alívio lado a lado com o objetivo de estudar os fenômenos de ressonância de ondas no vão entre as embarcações.

4.3.1 Modelos Isolados

No estudo das embarcações isoladas, o arranjo do sistema de amarração compreende um conjunto de 4 linhas que fixam o modelo no tanque. As linhas estão fixadas no costado do modelo na altura do centro de gravidade de modo a apresentar menor influência possível nos movimentos das embarcações, sendo que duas linhas estão conectadas na popa do modelo e duas na proa, e estas linhas apresentam um ângulo de 90° entre elas. Na Figura 4.8 é apresentado o arranjo dos modelos.



Figura 4.8 - Arranjo dos modelos numéricos isolados: (a) FLNG e (b) Aliviador

No tanque, as linhas que fixam o FLNG estão a uma altura paralela à linha d'água e têm um comprimento total de 8.3 m cada. No Aliviador, as linhas são fixadas no nível do piso do tanque formando um ângulo de 5° com a linha d'água e têm um comprimento total de 10.3 m cada. As linhas são fixadas nos cantos do tanque por meio de molas com o objetivo de simular a rigidez projetada das linhas, como mostrado na Figura 4.9 no arranjo do tanque.



Figura 4.9 - Esquema de amarração no tanque de provas

O projeto de amarração do modelo compreende um sistema de amarração horizontal diferente dos sistemas reais do tipo turret, que são verticais. Contudo, os sistemas de amarração têm como objetivos limitar o passeio, suportar as máximas trações devido às condições de ondas e não influenciar nos movimentos de primeira ordem das embarcações.

Para a ancoragem dos modelos no tanque de provas foram utilizadas molas e linhas rígidas de baixa densidade. As características do conjunto linha-mola resultante, tanto para o FLNG quanto para o Aliviador, são apresentadas na Tabela 4.5.

	FLNG	Aliviador	Unidade
Restauração	45.37	9.11	[N/m]
Pré-Tração	25.0	10.0	[N]
Densidade	0.01	0.01	[N/m]

Tabela 4.5 - Características das linhas. Escala do modelo

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais, para ondas regulares e irregulares, foram devidamente processados para a obtenção das respostas de movimento no formato de RAO (*Response Amplitude Operator*), que apresenta as amplitudes de resposta em função do período de onda incidente, considerando uma altura de onda unitária.

Com o objetivo de facilitar a identificação dos resultados foi proposta uma nomenclatura para identificar cada caso. Para os resultados com os modelos isolados, a identificação dos casos é dada por:

ISO-[embarcação]-[carregamento]-[ângulo de incidência de onda]

Para os resultados com modelos configurados na posição lado a lado, a nomenclatura é dada por:

SBS–FLNG–[carregamento]–ALIV–[carregamento]–[ângulo das ondas]-[resultados referentes à embarcação]

As comparações apresentadas a seguir são importantes para validar os modelos numéricos e obter uma base de comparação com as embarcações acopladas para determinar as mudanças no comportamento das embarcações. Para o FLNG são apresentados, na Figura 4.10, os RAOs de movimentos do modelo isolado com carregamento de 50% e incidência de onda de proa a 180°, onde a nomenclatura para este caso é ISO-FLNG-050-180. Neste caso estão representados os movimentos de *Surge, Heave e Pitch*, pois os outros movimentos são nulos.





Para o Aliviador, são apresentados os RAOs de movimento do modelo isolado para a embarcação em condição de lastro e incidência de onda de proa a 180°, na qual a nomenclatura para este caso é ISO-ALIV-000-180. Os resultados são apresentados na Figura 4.11 e estão descritos apenas os movimentos não nulos, tanto para os ensaios experimentais quanto para os numéricos.





No geral, os resultados obtidos nos ensaios experimentais para o FLNG e Aliviador apresentaram boa aderência em comparação à teoria potencial, o que atesta que o modelo numérico está reproduzindo de forma adequada o comportamento das duas embarcações.

4.3.2 Modelos Lado a Lado

No estudo da condição lado a lado, devido à medição da elevação da superfície no vão ser realizada por meio de Wave Probes posicionados ao longo do comprimento das unidades, foi adotada uma distância de 8 metros entre as embarcações para evitar que os instrumentos fossem danificados. Contudo, as características das defensas foram mantidas.

Os modelos a serem ensaiados em condições de lado a lado apresentam um conjunto de linhas e defensas simplificado em relação à realidade. O sistema de amarração utilizado para ancorar as embarcações no tanque de provas é o mesmo do FLNG isolado. Já o Aliviador é fixado apenas por amarras ligadas ao FLNG. Estas linhas que conectam as duas embarcações são divididas em dois grupos, as linhas longitudinais e as linhas transversais. Estas linhas têm a função de restringir os movimentos no plano da superfície livre e promover condições para a realização do alívio através dos mangotes conectados entre as duas embarcações.

Para as linhas, foi proposto um arranjo ortogonal, composto por duas linhas longitudinais e duas linhas transversais que atuam externamente ao vão, como mostrado na Figura 4.12. Este novo arranjo divide as linhas em duas direções de atuação, separando as componentes de força que atuam entre as embarcações nas direções ao longo dos eixos x e y.



Figura 4.12 - Arranjo lado a lado com amarração simplificada

Para este ensaio foram posicionadas quatro defensas acima da linha d'água e na região onde os costados são paralelos ao comprimento, de forma a não interferir na elevação da superfície livre nesta região. A seguir são mostradas as posições das linhas e defensas em relação ao eixo local de cada unidade.

	FLNG	FLNG	FLNG	Aliv	Aliv	Aliv
	Feirlead	Feirlead	Feirlead	Anchor	Anchor	Anchor
	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]
Linhas Trans vt	156.0	-40.0	38.0	144.0	0.0	26.0
Linhas Trans ré	-156.0	-40.0	38.0	-144.0	0.0	26.0
Linhas Long vt	198.0	-70.2	38.0	144.0	0.0	26.0
Linhas Long ré	-198.0	-70.2	38.0	-144.0	0.0	26.0
Defensa vt 1	59.0	-44.5	27.0	59.0	21.5	19.9
Defensa ré 1	-48.0	-44.5	27.0	-48.0	21.5	19.9
Defensa vt 2	23.4	-44.5	27.0	23.4	21.5	19.9
Defensa ré 2	-12.3	-44.5	27.0	-12.3	21.5	19.9

Tabela 4.6 - Posição das linhas e defensas. Escala Real 1

A seguir, na Figura 4.13, é apresentado o esquema dos modelos para a realização dos ensaios em condição de alívio lado a lado no tanque de provas, enquanto que na Figura 4.14 e Figura 4.15 estão representadas as vistas de topo e traseira dos modelos ensaiados. Além disso, na Figura 4.14 é possível identificar os Wave Probes, defensas e fins de curso utilizados para a proteção dos Wave Probes em condições extremas de mar.



Figura 4.13 - Dimensões das linhas do arranjo do modelo lado a lado



Figura 4.14 - Modelo ensaiado no tanque de provas (vista de topo)



Figura 4.15 - Modelo ensaiado no tanque de provas (vista traseira) A seguir, na Tabela 4.7, são apresentadas as características das linhas transversais e longitudinais entre as embarcações utilizadas nos ensaios.

	Linhas Transversais	Linhas Longitudinais	Unidade
K do modelo	78	48	[N/m]
Pré-tração do modelo	0.5	0.45	[N]
Comprimento	0.29	0.48	[m]

Tabela 4.7 - Características do modelo de linhas entre as embarcações

As defensas utilizadas em operações de alívio lado a lado com embarcações de grande porte, como as embarcações envolvidas neste estudo, são do tipo Yokohama de dimensões 4.5 x 9.0 metros (Figura 4.16). Operações *offshore* deste tipo utilizam, normalmente, cerca de quatro defensas do tipo Yokohama e duas outras menores chamadas de *baby fenders*, utilizadas para evitar as colisões de popa e proa, como mostrado no esquema da Figura 4.17.



Figura 4.16 - Defensas do tipo Yokohama



Figura 4.17 - Esquema de posicionamento das defensas

As defensas deste tipo apresentam a seguinte curva de reação demonstradas na Figura 4.18. A máxima deformação que defensas deste tipo suportam é cerca de 60% do diâmetro inicial (ou 2.7 metros de compressão).



Figura 4.18 - Curva de reação da defensa pneumática 4500x9000 (0.5 kPa) Com o intuito de representar estes elementos nos ensaios, foram confeccionadas defensas com formato de tronco de pirâmide compostas por espuma de baixa densidade, como mostrado na Figura 4.19. Estas defensas apresentam dimensões 70x30x73 mm (a x b x h).



Figura 4.19 - Defensas usadas nos ensaios experimental

Para a caracterização das defensas foram realizados ensaios de compressão e descompressão, e os resultados são mostrados na Figura 4.20. A partir dos resultados é possível observar o comportamento de histerese das defensas projetadas, contudo, sua atuação está próxima à defensa do tipo Yokohama.



Figura 4.20 - Comparação de resposta das defensas

No estudo de ressonância observado em testes com períodos de ondas abaixo de 10 segundos, nos quais os movimentos de primeira ordem das embarcações são relativamente pequenos, foi tomado como hipótese que o comportamento das defensas e linhas não apresenta influências significativas no comportamento das embarcações e elevação da superfície livre. Dessa forma, durante o estudo não houve necessidade da modelagem do sistema de amarração nas análises realizadas nos modelos numéricos. Por fim, é apresentado na Figura 4.21, o arranjo dos modelos ensaiados no calibrador hidrodinâmico do laboratório TPN.



Figura 4.21 - Arranjo do modelo final ensaiado no tanque de provas do TPN (vista em perspectiva)

4.4 Comportamento das Embarcações

Na análise do comportamento das embarcações durante a operação de alívio, devido à grande quantidade de dados obtidos nos ensaios experimentais foi escolhida a configuração que compreende as seguintes características de carregamento, FLNG com 50% do carregamento (SBS-050-000-180-FLNG) e Aliviador em condição de lastro (SBS-050-000-180-ALIV) e em condições de incidência de onda de proa a 180°. Estas condições representam uma situação típica deste tipo de operação. Nestas condições, são apresentados os RAOs de movimento para o FLNG e Aliviador, como pode ser visto na Figura 4.22 e na Figura 4.23, respectivamente. No entanto, como há poucos ensaios com ondas regulares na faixa de interesse, as comparações envolverão sempre o conjunto completo de resultados.



Figura 4.22 - Comparação dos RAOs de movimento para o caso SBS 050-000-180-FLNG



Figura 4.23 - Comparação dos RAOs de movimento para o caso SBS 050-000-180-ALIV Nos casos envolvendo ressonância de movimento, é razoável esperar uma diferença entre os ensaios de onda irregular e regular, nos quais há um tempo maior para os efeitos atingirem um regime permanente. Deve-se notar que as diferenças são mais significativas nas faixas de ressonância de *Roll* dos modelos em períodos de 10 a 15 segundos.

No geral, os resultados do WAMIT apresentaram uma aderência razoável com as medições, exceto para o movimento de *Roll*, que apresenta discrepâncias significativas com os resultados experimentais. Isto é causado basicamente pelo sistema de amarração presente nos ensaios experimentais e inexistente nos modelos numéricos. Dessa forma, devido à existência de linhas e defensas nos ensaios experimentais, a comparação com os resultados numéricos só pode ser realizada considerando a hipótese de pequenas amplitudes dos movimentos das embarcações, o que de fato é razoável em períodos de onda

abaixo de 10 segundos, nos quais são observados os fenômenos de ressonância no vão. Nessa condição, a influência do conjunto de amarração nas respostas de movimento de primeira ordem das embarcações é mínima.

Outro ponto importante nesta comparação está relacionado com os picos de movimentos observados em períodos entre 6.5 e 8.0 segundos, atribuídos à presença de efeitos de ressonância de onda no vão entre as embarcações, os quais são mais visíveis nos movimentos do Aliviador, como apresentado em detalhe na comparação da Figura 4.24, que destaca apenas esta região.



Figura 4.24 - Representação da região de ressonância nos RAOs de movimento do Aliviador

Estas discrepâncias nos movimentos são causadas, principalmente, pelos efeitos viscosos, separação do escoamento no bojo e turbulência em virtude da propagação das ondas no vão, as quais os métodos numéricos potenciais não são capazes de reproduzir. Nessa condição, as ondas incidentes são amplificadas e o perfil de onda muda drasticamente em função das características do sistema. Isto desempenha um papel importante nas forças induzidas pelas ondas e, consequentemente, na dinâmica do sistema como um todo. Estes resultados confirmam a necessidade de implementação de adaptações para emular os efeitos de amortecimento que limitam a altura de ondas no vão e seus efeitos sobre as embarcações.

Do ponto de vista da engenharia, este é um aspecto crucial por dois motivos. Primeiro, as operações reais serão realizadas com ondas menores e, portanto, períodos mais baixos, porém devido à presença visível dos efeitos de ressonância de ondas no vão, nesta faixa de mar, são geradas grandes movimentações do sistema. E, segundo, os erros nas previsões de movimento das embarcações implicarão em erros significativos nas cargas das amarras e defensas, o que pode comprometer o uso das ferramentas de predição para análise da viabilidade da operação de transbordo utilizando este método.

Desse modo, para a melhor compreensão dos efeitos da ressonância serão realizadas análises com base nas duas ferramentas numéricas selecionadas (WAMIT e TDRPM), com o objetivo de verificar a aderência de seus resultados nas medições de ondas e movimentos das embarcações. Através destas comparações será verificada também a necessidade de refinamento dos modelos numéricos e, com isso, serão apresentadas recomendações para a preparação dos mesmos.

5 Resultados e Discussões

De forma a obter uma representação adequada dos efeitos de ressonância, os dados experimentais e numéricos foram processados com o intuito de que os resultados apresentados estejam na escala real e no formato de RAO (*Response Amplitude Operator*), facilitando a interpretação desse fenômeno na dinâmica das elevações da superfície livre e movimentação das embarcações.

Devido à grande quantidade de dados provenientes dos ensaios, apenas uma condição de carregamento e incidência de onda foi considerada, já que o foco deste estudo se concentra na verificação da aplicação das duas ferramentas numéricas. A condição estudada compreende incidência de onda de proa (180°) e condição de carregamento parcial para o FLNG (50% da carga) e Aliviador em condição de lastro (000% de carga), representando uma situação típica deste tipo de operação.

A partir da seção anterior, onde foram realizadas comparações dos movimentos das embarcações nos quais foram constatados os efeitos de ressonância no vão e a discrepância na comparação experimental com as predições numéricas, esta seção apresenta a seguinte organização, com foco na verificação das ferramentas numéricas WAMIT (domínio da frequência) e TDRPM (domínio do tempo) no estudo do fenômeno de ressonância de ondas no vão entre duas embarcações:

Primeiramente, na seção 5.1, foram realizadas análises sobre os efeitos relativos à elevação da superfície livre, com foco principal no vão formado entre as duas embarcações, considerando os dados provenientes dos Wave Probes nas análises dos perfis de cada modo de ressonância e períodos em que são observados.

A seguir, na seção 5.2, foram aplicadas e discutidas as metodologias empregadas para a correção das elevações irrealistas, observadas nas comparações numéricas e experimentais, por meio da utilização do Método dos Modos Generalizados, para o WAMIT e método da inclusão das Praias Numéricas, para o TDRPM.

Já na seção 5.3 serão analisados os efeitos da calibração das elevações da superfície livre nos movimentos das embarcações.

Por fim, na seção 5.4, será apresentada a influência dos efeitos de ressonância, com e sem a calibração da superfície livre, nas linhas do conjunto de ancoragem e amarração.

5.1 Elevação da Superfície Livre

O estudo inicial de ressonância de ondas na região do vão entre as embarcações foi realizado com o auxílio do programa WAMIT, tendo como objetivo a caracterização dos efeitos em relação aos períodos das ondas incidentes. Os resultados obtidos foram processados para a obtenção dos RAOs de elevação da superfície, ver Figura 5.1, na qual é apresentada a resposta de elevação para o ponto no centro do vão e à meia-nau das embarcações. Como podem ser observados, estes efeitos estão presentes em períodos abaixo de 9 segundos, nos quais são observadas as maiores amplitudes.





movimento das embarcações apresentadas na comparação da Figura 5.2. Nesta região estão presentes os primeiros modos de ressonância.



Figura 5.2 - Influência da elevação na superfície livre nos movimentos das embarcações De acordo com (Molin, 2001) e (Bunnik, et al., 2009), estes efeitos de ressonância podem ter duas origens ligadas à movimentação das ondas na transversal, na direção da largura do vão, e na longitudinal, na direção do comprimento do vão. Estes autores apresentam formulações analíticas para identificar as frequências dos modos de ressonância nas duas direções a partir das equações (1) e (2) para os modos transversais e equações (3) e (5) para os modos longitudinais, aplicados em problemas simplificados em operações de múltiplos cascos.

A utilização das equações (1) e (2) para os modos transversais indica que os modos de ressonância estão presentes abaixo de períodos de 3 segundos, o que era esperado por causa da pequena largura do vão em comparação com o comprimento do vão, como mostrado em (Molin, 2001), indicando que este
efeito tem pouca influência no comportamento das embarcações, devido à presença de pequenas amplitudes de ondas nesta faixa de mar.

Considerando as formulações para os modos longitudinais, a aplicação deste equacionamento para problemas reais de alívio lado a lado se torna inadequada, em vista das diferentes premissas adotadas pelo autor, na qual foram consideradas geometrias idênticas, calados e comprimentos iguais e movimentos fixos para as embarcações, com o intuito de simplificar a resolução do problema. Contudo, as formulações podem ser utilizadas neste problema, desde que sejam considerados os erros das estimativas, que neste caso tem como objetivo definir uma região onde estão presentes os períodos de ressonância e não um valor exato. Dessa maneira, foi realizada uma análise de sensibilidade para os períodos do modo pistão e demais modos, como apresentado na Tabela 5.1. Nesta estimativa foram considerados dois comprimento reduzido do aliviador, além de dois calados diferentes, considerando um calado médio, entre as duas embarcações, e o calado somente do aliviador, que é o menor entre os dois.

Config.	l [m]	S [m]	T med [m]	P0 [s]	Pl1 [s]	Pl2 [s]	PI3[s]
1	120.0	8.0	9.5	7.90	7.18	6.49	5.89
2	120.0	8.0	13.0	8.59	7.64	6.76	6.05
3	240.0	8.0	9.5	8.47	8.04	7.62	7.22
4	240.0	8.0	13.0	9.21	8.70	8.18	7.67

Tabela 5.1 - Estimativa dos períodos dos modos de ressonância a partir da formulação teórica

Na Tabela 5.1 I é o comprimento do vão, S é a largura, T med é o calado médio, P0 é o período do modo pistão e Pln são os demais modos de ressonância. A análise dessa estimativa indica que os efeitos de ressonância longitudinal do vão apresentam maior influência nos movimentos das embarcações, pois estão presentes em condições de mar operacional e que os parâmetros de comprimento do corpo paralelo e menor calado entre as duas embarcações apresentaram os períodos dos modos de ressonância mais próximos dos observados nos ensaios experimentais.

A partir do processamento dos resultados do WAMIT foi possível estudar o comportamento do campo de ondas na região onde as embarcações estão localizadas, como apresentado na Figura 5.3 a Figura 5.6, para os primeiros modos de ressonância. Nestas figuras estão representados os campos de ondas em toda região e a comparação entre os resultados experimentais e numéricos para o perfil de onda no vão em função do período da onda incidente.

Um ponto importante, observado na Figura 5.3, é a presença do primeiro modo de ressonância conhecido como Modo Pistão ou "*Pumping Mode*", em vista da presença das maiores amplificações e forças de ondas no vão, quando comparado com outros modos de ressonância. Nesta condição, a água no interior do vão movimenta-se verticalmente de forma semelhante a um corpo rígido, causando grandes problemas para o comportamento do sistema devido à presença de picos nas forças e movimentos de primeira ordem.



Figura 5.3 - Características da elevação da superfície no vão, 1º período de ressonância



Figura 5.4 - Características da elevação da superfície no vão, 4º período de ressonância



Figura 5.5 - Características da elevação da superfície no vão, 5º período de ressonância



Figura 5.6 - Características da elevação da superfície no vão, 6º período de ressonância

Os resultados mostram que não existe simetria popa/proa para os perfis de elevação e que os perfis de elevação da superfície livre obtidos numericamente para os perfis do 1° e 4° períodos de ressonância apresentam formato similar aos observados nos ensaios experimentais. Contudo, as amplitudes das elevações apresentam discrepâncias que refletem a tendência do método numérico em superestimar as elevações. Como os perfis do 5° e 6° períodos de ressonância apresentam picos e cavas próximos, a construção, a partir dos 7 Wave Probes, não apresentou resolução suficiente para recuperar o perfil de elevação para estes períodos. Se forem consideradas as elevações máximas, ainda é necessário o amortecimento das elevações. Assim, para a calibração das elevações da superfície serão utilizados os perfis entre o 1° e 4° período de ressonância, que apresentam uma boa recuperação dos perfis de elevação.

5.1.1 RAO dos Wave Probes

Outra forma de avaliar a elevação da superfície é por meio dos RAOs dos Wave Probes, nos quais, para que a comparação dos resultados numéricos e experimentais fosse possível, os ensaios numéricos foram pós-processados com o propósito de se adequarem às elevações relativas medidas pelos Wave Probes fixos ao costado do FLNG. Portanto, os resultados serão apresentados em relação ao sistema de coordenadas fixo ao FLNG. Dessa forma, as elevações de onda obtidas nas posições de cada Wave Probe no TDRPM e WAMIT foram processadas para apresentar os resultados em relação ao sistema de coordenadas para apresentar os resultados em relação ao sistema de coordenadas para apresentar os resultados em relação ao sistema de coordenadas para apresentar os resultados em relação ao sistema de coordenadas para apresentar os resultados em relação ao sistema de coordenadas para apresentar os resultados em relação ao sistema de coordenadas local, conforme demonstrado na equação Eq. (14):

$$RAO_{rel}(i) = RAO_{FS}(i) + (RAO(3) - D_{long}(i) * RAO(5) + D_{trans}(i) * RAO(4))$$
 Eq. (14)

Onde:

 $RAO_{rel}(i)$ - RAO relativo do Wave Probe *i*; $RAO_{FS}(i)$ - RAO da superfície livre da água na posição do Wave Probe *i*; RAO(i) - RAO do grau de liberdade i do FLNG; $D_{long}(i)$ - distância do Wave Probe *i* em relação ao plano transversal que contem o LCG do FLNG; $D_{trans}(i)$ - distância do Wave Probe *i* em relação ao plano longitudinal que contém o TCG do FLNG.

Por meio deste processamento, os resultados podem ser comparados, como mostrado na Figura 5.7, na qual são apresentados os resultados experimentais e os resultados do WAMIT. Neste caso, o Wave Probe 1 está localizado a vante da embarcação, enquanto que o Wave Probe 7 está localizado a ré.



Figura 5.7 - RAOs de elevação dos Wave Probes

Neste resultado é possível observar, no Wave Probe 4, localizado no centro do vão, amplificações de cerca de 50% das elevações do método numérico em comparação ao experimental, na região entre 6.5 e 8.0 segundos, onde estão localizados os primeiros modos de ressonância. Ainda nesta região, os Wave Probes 3 e 5, que estão adjacentes ao centro do vão e ainda no corpo paralelo, também apresentam amplificações que chegam a triplicar as elevações. Já o Wave Probe 2, localizado na região de afunilamento na proa do aliviador, apresentam algumas amplificações de cerca de 50% e o Wave Probe 6, localizado na popa, não apresenta amplificação significativa.

Assim como a comparação dos perfis de elevação do vão, estes resultados também indicam a superestimação das elevações, o que demonstra que os resultados obtidos no domínio da frequência necessitam da introdução de algum método de supressão das elevações irrealistas por meio de adaptações, como a inclusão de *lid*, conforme apresentado por (Huijsmans, et al., 2001), (Newman, 2004), (Pauw, et al., 2007), (Bunnik, et al., 2009), entre outros.

Atualmente, tem sido desenvolvido um grande número de métodos aplicados aos códigos numéricos potenciais no domínio da frequência para emular os efeitos viscosos no vão entre as embarcações. Contudo, a introdução de um amortecimento na superfície livre no vão é mais simples e direta na solução usando fontes de Rankine no domínio do tempo, por conta da imposição da condição de superfície livre do fluido, a qual pode ser trabalhada para incluir o efeito de dissipação de energia de onda no decorrer da sua programação. É o caso do TDRPM (Wamit, 2015), que apresenta a modelagem das chamadas "Praias Numéricas" implementadas em qualquer região da superfície livre, mas empregada, principalmente, na fronteira do domínio do fluido, como apresentado na seção 3.4.

Sendo assim, como principal interesse de estudo será verificada, na próxima seção, a utilização das ferramentas numéricas WAMIT e TDRPM no estudo do fenômeno de ressonância de ondas em operações de alívio lado a lado. E devido às amplificações dos picos nos movimentos das embarcações terem origem em consequência das elevações de ondas no vão, o processo de calibração será realizado, primeiramente, para a correção das elevações de

ressonância de onda e posterior estudo da influência nos movimentos das embarcações.

5.2 Calibração da Elevação

Neste item serão aplicados e analisados os dois métodos de supressão das elevações irrealistas decorrentes dos modelos numéricos, por meio da utilização dos chamados Método dos Modos Generalizados e Método das Praias Numéricas aplicadas às ferramentas de predição WAMIT (domínio da frequência) e TDRPM (domínio do tempo), respectivamente.

A metodologia de calibração consiste em corrigir as elevações da superfície, devido aos efeitos de ressonância de onda no vão, através de dois procedimentos. O primeiro, amortecendo a elevação a partir dos RAOs dos perfis de onda, considerando o primeiro e segundo modo de ressonância. E o segundo, corrigindo a elevação a partir dos RAOs dos Wave Probes.

5.2.1 Elevação no Domínio da Frequência

O modelo para estudo do amortecimento das elevações e movimentações no WAMIT compreende as geometrias submersas de cada embarcação, além do *lid* para a implementação do amortecimento das elevações irrealistas do vão, como apresentado na Figura 5.8. O *lid* não apresenta volume e massa, sendo apenas a modelagem de uma superfície fictícia, sobre o qual se pode adicionar efeitos de amortecimento externo e restauração. O *lid* utilizado para esta modelagem apresenta comprimento de 200 metros e largura de 8 metros, no qual essas dimensões foram definidas a partir de modelos apresentados na literatura, em que apresentam uma convergência para estes valores.



Figura 5.8 - Dimensões e geometrias importadas no WAMIT

A utilização dos modos generalizados apresenta duas características importantes que devem ser levadas em consideração durante a modelagem no WAMIT. A primeira está relacionada ao número de modos de vibração implementados no *lid*, já que este número deve ser suficiente para que a superfície deste corpo consiga recuperar os padrões de elevação da superfície livre. Outra condição importante, considerada neste modelo, consiste na necessidade de liberar os seis graus de movimento do *lid*, onde foram realizados testes que mostraram a correta reprodução dos perfis de ressonância, apenas nesta condição.

A recuperação desta condição de modelagem está apresentada nos RAOs na Figura 5.10 a Figura 5.13, nas quais são comparados os perfis para três períodos de ressonância, 7.85, 7.35 e 7.125 segundos, ver Figura 5.9, da esquerda para a direita, respectivamente. Para esta análise, foram considerados a ativação de 3 a 16 modos de vibração longitudinais no WAMIT. Vale ressaltar, que o número total dos modos de vibração longitudinais e transversais ativos, utilizados nesse método, é realizado através da variável NEWMDS, onde a primeira metade deste valor representa o número de modos de vibração longitudinais ativos e a segunda metade os modos transversais.



Figura 5.9 - Localização dos períodos estudados, no RAO do ponto central do vão



Figura 5.13 - Recuperação dos perfis com 16 modos de vibração ativos

Com o aumento do número dos modos de ressonância ativos observou-se que os perfis convergem rapidamente até a ativação de sete modos, e a utilização de mais modos apresentaram poucas mudanças na recuperação dos perfís. Sendo assim, os resultados apontam a necessidade da utilização de sete modos de vibração longitudinais para recuperar o perfil de elevação de forma adequada sem a necessidade de um grande número de modos de vibração ativos, o que diminui significativamente o tempo de processamento.

A segunda característica importante está relacionada ao valor de amortecimento destes modos de vibração. Já para o amortecimento, foi utilizado um mesmo valor para todos os modos de vibração ativos e movimentos do *lid*, de maneira a simplificar esta etapa de calibração. Durante esta etapa de calibração foi observado que amortecer os movimentos do *lid* contribuem para a convergência dos resultados, mostrando ser um fator importante na aplicação deste método.

Para determinar um valor adequado de amortecimento para os modos de vibração ativos, a fim de corrigir as elevações de acordo com os resultados experimentais, foram implementados amortecimentos com valores entre 500 e 2000 [N.s/m], como apresentado na Figura 5.14.



Figura 5.14 - Calibração do amortecimento dos modos generalizados ativos mediante comparação com medidas dos Wave Probes no vão

Esta metodologia mostra que a utilização dos modos generalizados para a correção das elevações irrealistas, observadas na aplicação dos métodos numéricos potenciais, é viável. Para este caso, os resultados com um amortecimento de 1000 [N.s/m] apresentaram uma aderência razoável com os resultados experimentais. Vale ressaltar, que não existe um valor de amortecimento único capaz de ajustar igualmente bem as amplificações medidas experimentalmente, indicando que uma calibração mais adequada deve ser realizada com amortecimentos dependentes dos períodos de onda e variáveis ao longo do vão.

Outra forma de observar o comportamento da superfície na região do vão é por meio dos RAOs de cada um dos Wave Probes localizados entre as embarcações. Na Figura 5.15 é apresentada a comparação da condição calibrada com os resultados experimentais.



Figura 5.15 - Comparação dos RAOs dos Wave Probes calibrados a partir dos perfis de ressonância

No geral, há uma melhora na previsão das amplitudes, embora algumas discrepâncias ainda persistam. No entanto, apesar da calibração ter sido realizada principalmente para três perfis de ressonância, os demais modos também foram amortecidos, assim como os movimentos também foram, como será apresentado adiante. Antes, porém, serão discutidos os procedimentos de calibração do amortecimento para o código TDRPM, no domínio do tempo.

5.2.2 Elevação no Domínio do Tempo

No estudo do comportamento de duas embarcações posicionadas lado a lado, (Watai, 2015) empregou testes de verificação do uso da nova ferramenta TDRPM nas avaliações dos movimentos das embarcações e elevações da superfície livre, nas quais foram observados bons resultados nas comparações com os ensaios experimentais e numéricos. No caso em estudo, por outro lado, há evidências de discrepâncias também nos movimentos, o que torna a correção dos efeitos ressonantes ainda mais relevante, como apresentado nesta seção.

Para estudar a região de amortecimento foram determinados três tamanhos para o comprimento da praia numérica empregada para modelar a superfície livre no vão entre os navios. O primeiro, de maior comprimento, apresenta tamanho de 240 metros e corresponde ao comprimento total da área molhada do Aliviador. O segundo compreende o comprimento de 120 metros, correspondente ao tamanho do corpo paralelo deste mesmo navio. Já o último, corresponde a um comprimento reduzido, equivalente a 60 metros.

A inclusão da Praia Numérica na região entre as embarcações foi realizada através da função v(x,y), onde x e y variam dentro dos limites das regiões de amortecimento, como apresentada na seção 3.4, e quando aplicada vai apresentar a seguinte formulação:

$$v(x, y) = a\omega$$
 Eq. (15)

Já os valores de amortecimento $(a\omega)$ empregados são constantes ao longo do comprimento desta região, onde foram considerados quatro valores de amortecimento para o estudo que variam entre 0 e 0.0625 [1/s].

No estudo da influência do amortecimento na elevação da superfície livre no vão foram comparados os resultados obtidos pelos Wave Probes nos ensaios experimentais com os obtidos numericamente através do TDRPM. Nesta comparação também são apresentados os resultados referentes ao WAMIT sem amortecimento do vão, apenas para a verificação da aderência com o TDRPM, quando o amortecimento é nulo.

Para cada condição de amortecimento $(a\omega)$ é realizado o processamento numérico, considerado apenas a parte da série temporal em regime permanente, curva vermelha apresentada na Figura 5.16, para um exemplo de elevação dos Wave Probes.



Figura 5.16 - Exemplo do processamento da série temporal do Wave Prove 4 obtidos através do TDRPM Os resultados finais são apresentados na forma de RAOs de elevação da superfície, a partir do devido processamento deste trecho da série temporal. A

seguir, na Figura 5.17, são apresentadas as comparações dos RAOs de elevação da superfície nos pontos de monitoramento para a região de amortecimento com comprimento igual a 240 metros.



Figura 5.17 - Comparação dos RAOs de elevação no vão para a calibração do amortecimento no TDRPM para o comprimento igual a 240 m

Da mesma forma que os estudos baseados no domínio da frequência, é possível observar que a aderência dos resultados não é uniforme ao longo de todo o vão quando se emprega um valor de amortecimento único ao longo do comprimento da praia numérica. Na comparação dos RAOs dos Wave Probes, fica demonstrado que o perfil de elevação da onda ressonante não está sendo corretamente reproduzido. Contudo, a curva que melhor adere aos resultados experimentais apresenta valor de amortecimento ($a\omega$) igual a 0.0156 [1/s].

A seguir, na Figura 5.18, são apresentadas as comparações dos RAOs de elevação da superfície nos pontos de monitoramento para a região de amortecimento com comprimento igual a 120 metros.



Figura 5.18 - Comparação dos RAOs de elevação no vão para a calibração do amortecimento no TDRPM para o comprimento igual a 120 m

Para estes resultados, é possível observar que a aplicação de um único valor de amortecimento, ao longo deste comprimento de região entre as embarcações, não é suficiente para corrigir as amplificações simultaneamente.

Contudo, a curva que melhor adere aos resultados experimentais apresenta valor de amortecimento ($a\omega$) igual a 0.0313 [1/s].

A seguir, na Figura 5.19, são apresentadas as comparações dos RAOs de elevação da superfície nos pontos de monitoramento para a região de amortecimento com comprimento igual a 60 metros.



Figura 5.19 - Comparação dos RAOs de elevação no vão para a calibração do amortecimento no TDRPM para o comprimento igual a 60 m

O amortecimento da região, com comprimento de 60 metros apresentou boa aderência para o amortecimento com valor igual a 0.0625 [1/s] em todos os Wave Probes, diferente dos outros comprimentos de região amortecida que mostraram a necessidade de diferentes valores para o amortecimento de cada Wave Probe. No entanto, o mesmo não é observado para os movimentos das embarcações, como será visto na próxima seção.

Outra forma de observar os efeitos de amortecimento está na comparação dos perfis dos modos de ressonância, como apresentado na Figura 5.20, na qual são apresentadas as comparações dos perfis para os melhores valores de amortecimento obtidos para cada comprimento de região.



Figura 5.20 - Comparação dos RAOs dos perfis amortecidos para o melhor valor de amortecimento de cada comprimento de região

Para o amortecimento da região os resultados mostram que o melhor amortecimento do vão não é constante ao longo do comprimento e que os valores dos coeficientes são dependentes do tamanho da região amortecida.

É importante destacar, por fim, que os resultados observados para a elevação da superfície no vão não são inesperados, dado que o fenômeno físico (ou seja, a dissipação de energia no escoamento) não está sendo corretamente reproduzido pelo modelo numérico. O uso de uma praia numérica com amortecimento linear e constante dificilmente seria capaz de reproduzir todas as nuances do fenômeno ressonante. No entanto, é importante ressaltar que o emprego deste método simplificado parece ser suficiente para corrigir as distorções introduzidas pelos métodos potenciais na previsão dos movimentos dos navios e, consequentemente, das cargas nos elementos de amarração, como será apresentado a seguir. Estes resultados evidenciam, portanto, a relevância prática do método. A grande questão, obviamente, permanece sendo como encontrar uma maneira de prever o amortecimento necessário para diferentes configurações geométricas do problema.

Como complemento do estudo da influência dos efeitos de ressonância nas elevações do vão entre as embarcações, serão apresentados, a seguir, a influência da implementação dos Modos Generalizados e da Praia Numérica nas respostas de movimentos das embarcações.

5.3 Efeitos das Ressonâncias de Ondas nos Movimentos

Nesta seção serão analisados os efeitos da emulação do amortecimento de ondas nos movimentos das embarcações por meio da aplicação das ferramentas de predição WAMIT (domínio da frequência) e TDRPM (domínio do tempo).

Sendo assim, a partir da calibração dos modelos numéricos para a correção das elevações da superfície livre na região entre as embarcações, serão avaliados os efeitos nos RAOs de movimentos das embarcações na região onde foram observadas as amplificações devido aos efeitos de ressonâncias.

Os resultados serão apresentados para os movimentos de *Sway*, *Heave* e *Roll*, nos quais são observados os efeitos de ressonância para as duas embarcações. Nesta comparação serão aplicados os amortecimentos calibrados através da elevação da superfície, de modo a verificar se o método de correção da elevação da superfície é adequado também para corrigir os movimentos das embarcações.

5.3.1 Movimentos no Domínio da Frequência

A correção dos movimentos por meio da implementação dos modos generalizados no WAMIT, considerando a ativação de 7 modos de vibração e amortecimento de 1000 [N.s/m] calibrado por meio dos perfis de elevação da superfície livre, está apresentada na Figura 5.21, na qual podem ser observados os RAOs de movimento para as duas embarcações onde são observados os efeitos de ressonância.



Figura 5.21 - Influência do amortecimento no WAMIT nos RAOs de movimento para o casoSBS-FLNG-050-ALIV-000-180

Os resultados demonstram uma boa aderência das adaptações feitas no modelo numérico no WAMIT, utilizando a metodologia de calibração através da correção dos perfis de elevação da superfície no vão entre as embarcações. Por fim, é possível concluir que o modelo proposto é capaz de recuperar os movimentos das embarcações com a utilização dos modos generalizados aplicados ao WAMIT.

5.3.2 Movimentos no Domínio do Tempo

No estudo da influência dos amortecimentos nos RAOs de movimentos das duas embarcações foram consideradas as três regiões de amortecimento apresentadas anteriormente, e para cada uma delas os diferentes amortecimentos serão comparados.

Para a região com comprimento de 60 metros, que corresponde à metade do comprimento do corpo paralelo do Aliviador, são apresentadas na Figura 5.22 as comparações realizadas para a calibração dos movimentos. Os amortecimentos, para este caso, também foram comparados com os resultados experimentais do WAMIT sem amortecimento.



Figura 5.22 - Influência do amortecimento no TDRPM no caso SBS-FLNG-050-ALIV-000-180. Comprimento amortecimento de 60 m Este comprimento da região amortecida não apresentou valores de amortecimento adequados para garantir uma boa aderência aos resultados

experimentais, demonstrando a necessidade de uma região com comprimento maior para a implementação do amortecimento.

Para a região com comprimento igual a 120 metros, que corresponde ao comprimento do corpo paralelo do Aliviador, são apresentadas na Figura 5.23 as comparações realizadas para a calibração dos movimentos. Os amortecimentos, para este caso também foram comparados com os resultados experimentais do WAMIT sem amortecimento.



Figura 5.23 - Influência do amortecimento no TDRPM no caso SBS-FLNG-050-ALIV-000-180. Comprimento amortecimento de 120 m

Os resultados para este comprimento amortecido apresentaram boa aderência aos resultados experimentais quando ensaiados com valor de amortecimento igual a 0.0625 [1/s]. Este valor é diferente do valor considerado ótimo nas comparações de elevação, no qual o valor de amortecimento ($a\omega$) que melhor adere aos resultados experimentais é igual a 0.0313 [1/s].

Para a região com comprimento igual a 240 metros, que corresponde ao comprimento do corpo paralelo do Aliviador, são apresentadas na Figura 5.24 as comparações realizadas para a calibração dos movimentos. Os amortecimentos para este caso, também foram comparados com os resultados experimentais do WAMIT sem amortecimento.



Figura 5.24 - Influência do amortecimento no TDRPM no caso SBS-FLNG-050-ALIV-000-180. Comprimento amortecimento de 240 m

Para este comprimento de praia numérica, o valor de amortecimento igual a 0.0313 [1/s] apresentou a melhor aderência aos resultados experimentais, tanto para o FLNG quanto para o Aliviador. Novamente, para este comprimento de região, o valor considerado ótimo para o amortecimento nas comparações das elevações é diferente, onde o valor que melhor adere aos resultados das elevações experimentais é igual a 0.0156 [1/s].

Os resultados apresentados mostram que com o aumento do comprimento da região amortecida, o valor do coeficiente de amortecimento necessário decresce. Outro ponto importante observado está na aderência dos resultados do TDRPM sem amortecimento com o WAMIT sem amortecimento, o que atesta que os dois métodos convergem para um mesmo resultado.

Por fim, a implementação de amortecimento constante na região do vão entre as duas embarcações mostrou ser um eficiente método para atingir os movimentos reais das embarcações durante este tipo de operação. Evidentemente, resta ainda a questão da maneira como se pode estimar este amortecimento na ausência de ensaios de calibração, o que é ainda um problema a ser solucionado na literatura sobre o tema.

5.4 Efeitos da Ressonância no Arranjo de Linhas

O fenômeno de ressonância de ondas tem impacto direto em projetos relacionados às operações de alívio lado a lado, como o dimensionamento do conjunto de amarração e determinação das cargas limites das linhas e defensas, que devem ser capazes de suportar os picos de amplitudes dos movimentos, sem que ocorra falha. No entanto, este fenômeno se torna um problema relevante quando a existência dos efeitos de ressonância está localizada em períodos operacionais de mar, onde ocorre a amplificação dos movimentos e, por consequência, aumento das forças nas linhas. Desta forma, este estudo se torna importante para avaliar se o sistema de amarração é suficiente para o sucesso da operação.

Para o estudo do comportamento das linhas durante o processo de alívio lado a lado, o arranjo de linhas foi dividido em três grupos como apresentado na Figura 5.25, Figura 5.26 e Figura 5.27, nas quais estão demonstradas as identificações das linhas. O primeiro grupo representa as linhas que ancoram o FLNG ao tanque de provas. O segundo são as linhas SBS (*Side-by-Side*) que mantém as duas embarcações posicionadas lado a lado. A terceira são as defensas que evitam a colisão entre as duas embarcações.



Figura 5.25 - Arranjo das linhas de ancoragem fixadas no FLNG e no tanque de provas



Figura 5.26 - Arranjo de linhas SBS que conectam os dois modelos



Figura 5.27 - Arranjo das defensas localizada entre as embarcações

O cálculo do comportamento das linhas foi realizado com base nos movimentos de translação e rotação das embarcações, aplicado aos pontos onde estão fixadas as linhas de ancoragem. O processamento dos movimentos foi realizado a partir dos RAOs, para o WAMIT, considerando as amplitudes e fases, e através das séries temporais, para o TDRPM e ensaios experimentais. Dessa forma, foi possível obter os resultados no formato de RAOs de variação da elongação das linhas de ancoragem. Este resultado é importante para avaliar os esforços nas amarrações durante o processo de alívio lado a lado e apresenta, de forma simplificada, a avaliação das trações nas linhas e compressões nas defensas a partir da multiplicação destes RAOs pela rigidez das linhas.

Os resultados dos RAOs de variação de distância são apresentados na Figura 5.28, Figura 5.29 e Figura 5.30 para o grupo das linhas do tanque, linhas entre as embarcações e defensas, respectivamente, considerando a comparação dos dados experimentais e numéricos sem a implementação dos métodos de amortecimento.



Figura 5.28 - RAOs de variação da distância para as linhas do tanque



Figura 5.29 - RAOs de variação da distância para as linhas do SBS



Figura 5.30 - RAOs de variação da distância para as defensas

Esta primeira comparação mostra que o erro devido aos efeitos das elevações irrealistas observados na aplicação dos métodos numéricos pode duplicar as forças nas linhas, quando considerado o comportamento linear das linhas. Essa constatação indica que tanto os efeitos de ressonância quanto a imprecisão dos métodos numéricos têm um efeito importante sobre as linhas do sistema de ancoragem, já que os efeitos de ressonância são um problema que afeta diretamente este tipo de operação, pois estão presentes em condições de onda nas quais este tipo de operação é viável e usualmente realizado. Já os efeitos de amplificação tornam as predições numéricas equivocadas, resultando em erros que mostram o dobro das forças reais.

Já os resultados com os modelos numéricos calibrados estão apresentados na Figura 5.31, Figura 5.32 e Figura 5.33 para os três grupos de linhas do sistema de amarração, nos quais para o WAMIT são apresentados os resultados com a aplicação dos modos generalizados com 7 modos de vibração ativos e amortecimento de 1000 [N.s/m] e para o TDRPM são apresentados os resultados considerando a praia numérica com comprimento de 120 metros e amortecimento de 0.0625 [1/s], casos que caracterizaram melhor o ajuste dos movimentos das embarcações.


Figura 5.31 - RAOs de variação da distância para as linhas do tanque com amortecimento



Figura 5.32 - RAOs de variação da distância para as linhas do SBS com amortecimento



Figura 5.33 - RAOs de variação da distância para as defensas com amortecimento Nota-se que a implementação de amortecimento linear e constante na região do vão entre as duas embarcações é importante para se obter uma elongação mais realistas nas linhas e defensas durante este tipo de operação. As comparações demonstram uma boa aderência entre os resultados numéricos e experimentais, considerando o Método dos Modos Generalizados aplicado ao WAMIT e o Método das Praias Numéricas aplicadas ao TDRPM.

Estes resultados revelam a importância da avaliação dos efeitos viscosos do escoamento do fluido durante a propagação de ondas no vão entre as embarcações, o que tem implicação direta na predição das forças nas linhas durante as etapas iniciais de um projeto deste tipo. Evidentemente, resta ainda a questão da maneira de como se pode prever este amortecimento na ausência de ensaios experimentais, sendo ainda um problema a ser solucionado na literatura sobre o tema.

6 Conclusões

Este trabalho apresenta um estudo dos efeitos associados à ressonância de ondas observada durante o processo de alívio em configuração lado a lado, no qual foi verificada a presença desse fenômeno durante ensaios realizados em tanque de provas, com o objetivo de caracterização do comportamento das embarcações em condições reais de operação. Os ensaios experimentais mostraram a existência de ressonâncias de ondas em períodos entre 6.5 e 8.0 segundos e, quando comparados com os resultados do WAMIT, em certas condições, evidenciaram a presença de amplificações nos movimentos em cerca de três vezes o valor real. Esta diferença dos resultados pode ser explicada, principalmente, pelos efeitos viscosos, separação do escoamento e vorticidades presentes no bojo das embarcações, efeitos que não estão presentes na resolução dos métodos numéricos que utilizam a teoria potencial.

Para mitigar este problema foram discutidos alguns dos principais métodos utilizados na literatura aplicados aos modelos numéricos com o objetivo de emular os efeitos viscosos na região do vão entre as embarcações, tais como o Método dos Modos Generalizados, aplicados no presente estudo. Atualmente, com o desenvolvimento do TDRPM, passou-se a dispor de uma nova ferramenta para o estudo de operações envolvendo múltiplas embarcações, como o processo de alívio lado a lado, no qual a vantagem está na facilidade de implementação de amortecimento através das chamadas "Praias Numéricas" na região do vão entre as embarcações, demonstrando ser possível obter resultados de forma eficaz e simplificada.

Durante o estudo de implementação de amortecimento no vão, tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo, foi demonstrado, de forma geral, que as ferramentas e os seus métodos para emular os fenômenos de ressonância são capazes de representar, com certa precisão, os resultados experimentais, tanto para os movimentos das embarcações quanto para a elevação da superfície livre no vão.

O estudo do comportamento do sistema de amarração apresentou amplificações significativas nas amplitudes de elongação devido à presença dos efeitos de ressonância e imprecisões numéricas, quando comparados com os resultados experimentais. Isto indica que as ferramentas numéricas, em etapas iniciais de um projeto desse tipo, devem ser corretamente empregadas para evitar possíveis erros nas estimativas. Com relação à correta modelagem, as adaptações realizadas nos modelos numéricos mostraram-se suficientes para a correção dos RAOs de variação da elongação e, por consequência, as forças nas linhas e defensas do sistema de amarração.

Conclui-se que a utilização dos métodos numéricos WAMIT e TDRPM para representar as respostas dinâmicas em operações de alívio lado a lado, em problemas que envolvem a presença dos efeitos de ressonância de ondas, é válida. No entanto, é necessária a inclusão de métodos artificiais para a correta representação deste fenômeno, em vista das limitações dos métodos numéricos que utilizam a teoria potencial em representar os efeitos viscosos. Além disso, em estudos de problemas reais, estas ferramentas podem ser utilizadas para determinar a disponibilidade da realização do processo de alívio em vista das condições ambientais da região de operação e condições limites de estado de mar, considerando critérios de operabilidade reais para uma operação segura.

Como recomendações para futuros trabalhos podemos citar duas vertentes. A primeira, considerando a inexistência de métodos para a previsão do comportamento do fenômeno de ressonância, sendo necessária a realização de ensaios experimentais para a calibração dos modelos numéricos. Nesta linha de pesquisa, devido à facilidade de implementação do amortecimento através do TDRPM, o estudo da inclusão de amortecimento variável ao longo do comprimento, através da utilização de uma função do tipo a(x), se torna atrativo. Esta linha de pesquisa tem como objetivo a melhoria da aderência das curvas de resposta de movimento e elevação, já que no presente estudo foi de amortecimentos variáveis ao apontada a necessidade longo do comprimento do vão e dependentes do período de onda incidente. Outra linha de pesquisa relevante está em estudar os impactos das imprecisões numéricas dos métodos potenciais no cálculo da disponibilidade da realização deste tipo

de operação, levando em consideração os casos reais, envolvendo características do arranjo de linhas e condições ambientais.

Como segunda vertente temos os estudos com o objetivo de gerar um critério que permita prever o amortecimento necessário considerando diferentes configurações de embarcações e diferentes características do vão, sem a necessidade de realização de ensaios experimentais. Nesta linha, estudos que utilizam métodos baseados na dinâmica de fluidos reais mostram ser os mais promissores na caracterização deste fenômeno.

7 Referências

Boo, S.Y. Linear and nonlinear irregular waves and forces in a numerical wave tank. **Ocean Engineering** v. 29 p. 475–93, 2002.

Buchner, B.; Dijk, A. V.; de Wilde, J.J. Numerical multiple-body simulations of side-by-side mooring to a FPSO. In Proceedings of the 21st ISOPE Conference p. 343-353, 2001.

Bunnik, T., Pauw, W. e Voogt, A. Hydrodynamic analysis for side-by-side offloading. In Proceedings of the 19th ISOPE Conference, 2009.

Bunnik, T.H.J. Seakeeping calculations for ships, taking into account the nonlinear steady waves. **Thesis (PhD) - Technische Universiteit Delft**, 1999.

Chen, X.B. Accurate computation of second-order low-frequency loads. **In19th National Conference on Hydrodynamics end 7th National Congress on Hydrodynamics**, China, 2005.

Choi, Y.R.; Hong, S.Y. An analysis of hydrodynamic interaction of floating multibody using higher-order boundary element method. **In Proceedings of the 12th ISOPE Conference**, ISOPE-I-02-309, Kitakyushu, Japan , 2002.

Clauss, G. F.; Dudek, M.; Testa, D. Gap effects at side by side LNG-transfer operations. In Proceedings of the 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE 2013-10749, Nantes, 2013.

Cummins, W. The impulsive response function and ship motions. **Department** of the Navy David Taylor Model Basin, Hamburg, 1962.

Dinoi, P. Analysis of wave resonant effects in-between offshore vessels arranged side-by-side. Thesis (PhD) - Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Madrid, 2016.

Fournier, J.R.; Naciri, M.; Chen, X.B. Hydrodynamics of two side-by-side vessels, experiments and numerical simulations. In Proceedings of the 16th ISOPE Conference, San Francisco, USA, 2006.

Hong, S.Y; Kim, J.H.; Cho, Y.R.; Kim, Y.S. Numerical and experimental study on hydrodynamic interaction of side-by-side moored multiple vessels. **Ocean Engineering**, v. 32 p. 783–801, 2005.

Hong, S.Y; Choi, Y.R. Responses of a barge-mounted platform in wave and current. **In Proceedings of the 9th ISOPE Conference** ISOPE-99-09-4-283, Montréal, Canada, 1999.

Huijsmans, R.H.M., Pinkster, J.A. e Wilde, J.J. Diffraction and radiation of waves around side by side moored vessels. **In Proceedings of the 11th ISOPE Conference**, p. 406-412, Cupertino, Italy, 2001.

Israeli, M.; Orszag, S.A. Approximation of radiation boundary conditions. **Journal of Computational Physics**, v. 41 p. 115-135, 1981.

Kodan, N. The motions of adjacent floating structures in oblique waves. **Journal of energy resources technology**, v. 106 p. 199-205, New Orleans, 1984.

Koo, B.; Kim, M. Hydrodynamic interactions and relative motions of two floating platforms with mooring lines in side-by-side offloading operation. **Applied Ocean Research**, v. 27 p. 292-310, 2005.

Kristiansen, T.; Faltinsen, M. Gap resonance analyzed by a new domaindecomposition method combining potential and viscous flow DRAFT. **Applied Ocean Research**, v. 34 p. 198-208, 2012.

Lee D.H. e Choi H.S. FPSO, The motion behavior of shuttle tanker connected to a turret-moored. **Third International Conference on Hydrodynamics**, 1998.

Lewandowski, E.M. Multi-vessel seakeeping computations with linear potential theory. **Ocean Engineering**, v. 35 p. 1121-1131, Washington, DC, 2008.

Lu, L.; Cheng, L.; Teng, B.; Zhao, M.. Numerical investigation of fluid resonance in two narrow gaps of three identical rectangular structures. **Applied Ocean Research**, v. 32, p. 177-190, 2010.

Malta, E., Ruggeri, F.; Mello, P.; Nishimoto, K. Semi-submersible hub platform with an internal dock model testing. In ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, San Francisco, EUA, 2014.

Mello, P.C.; Carneiro, M.L.; Tanure, E.A.; Kassab, R.P.; Adamowski, K. A control and automation system for wave basins. **In Mechatronics**, v. 23 p.94-107, 2013.

Molin, B. On the piston and sloshing modes in moonpools. -: **Journal of Fluid Mechanics**, v. 430 p. 27-50, United Kingdom, 2001.

Molin, B.; Remy, F.; Camhi, A.; Ledoux, A. Experimental and numerical study of the gap resonances in-between two rectangular barges. **In 13th Congress of Intl. Maritime Assoc. of Mediterranean IMAM 2009**, Istanbul, Turkey, 2009.

Naciri, M.; Waals, O.; de Wilde, J. Time domain simulations of side-by-side moored vessels lessons learnt from a benchmark test. In Proceeding of the OMAE 2007 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, p. 801-811, 2007.

Newman, J.N. Application of generalized modes for the simulation of free surface patches in multi body hydrodynamics. **In Proceeding of the. 4th annual WAMIT Consortium Report**, 2003.

Newman, J.N.; Lee, C.H. Numerical models in fluid-structure interaction. Southampton, 2005.

Newman, J.N.; Sclavounos, P.D. The computation of wave loads on offshore structures. In Proceeding of International Conference. on Behaviour of Offshore Structures p. 605-622, 1988.

Newman, J.N. Progress in wave load computations on offshore structures. Vancouver, Canada : In Proceedings of the 23rd International Conference Offshore Mechanics & Arctic Engineering, Vancouver, Canada, p. 20-25, 2004.

Nishimoto, K.; Cheng, L.; Malta, E.; Fucatu, C.; Vieira, D.; Dotta, R. Downtime analysis of FLNG side-by-side offloading system using coupled multi-body dynamic simulation methodology. **In Proceedings of the 2nd Marine Operations Specialty Symposium**, Singapore, 2012. Ohkusu, M. Ship motions in vicinity of a structure. **In Proceedings of the 1st International Conference on the Behaviour of Offshore Structures**, Trondheim, v. 1 p. 284-306, 1976.

Pauw, W.H.; Huijsmans, R.H.M.; Voogt, A. Advances in the hydrodynamics of side-by-side moored vessels. In ASME 2007 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, p. 597-603, 2007.

Prins, H. Time-domain calculations of drift forces and moments. **Thesis (PhD) – Tecnische Universiteit Delft**, 1995.

Rocha, T; Dotta, R.; Prata, V.; Mello, P.; Malta, E.; Nishimoto, K. .Experimental investigation on the influence of liquid cargo in floating vessels motions. **Offshore Technology Conference**, OTC-26203-MS, 2015.

Shao, Y.L. Numerical potential-flow studies on weakly-nonlinear wave-body interactions with/without small forward speeds. **Theses (PhD) - Norwegian University of Science and Technology**, Norwegian, 2010.

Stoker, J.J. Water Wave. Interscience Publishers, New York, 1957.

Tanizawa, K. A nonlinear simulation method of 3-D body motions in waves. **Journal of the Society of Naval Architects of Japan**, v. 1995 n. 178 p. 179-191, 1995.

Taylor, R.E.; Sun, L.; Taylor, P.H. Gap resonances in focused wave groups. **23rd International Workshop on Water Waves and Floating Bodies**, 2008.

Van Daalen, E.F.G. Numerical and theoretical studies of water waves and floating. **Thesis (PhD) – University of Twente**, 1993.

Wamit Inc. WAMIT User Manual 7.1. The Massachusets Institute of Technology, 2015.

Watai, R.A.; Dinoi, P.; Ruggeri, F.; Souto-Iglesias, A.; Simos, A. Rankine Time-Domain Method with Application to Side-by-Side Gap Flow Modeling. **Applied Ocean Research**, v. 50 p. 69-90, 2015. Watai, R.A. A time-domain boundary elements method for the seakeeping analysis of offshore systems. **Thesis (PhD) - Escola Politécnica da USP**, 2015.

Wehausen, J. V.; Laitone, E. V. Surface Waves. **Handbuch der Physics**, v. 9 p.446-815, Berlin 1960.

Zhao, W; Yang, J.; Hu, Z.; Tao, L. Prediction of hydrodynamic performance of an flng system in side-by-side offloading operation. **Journal of Fluids and Structures**, v. 46 p. 89-110, 2013.

Zhen, L.; Bin, T.; De-Zhi, N.; Ying, G. Wave–current interactions with threedimensional floating bodies. **Journal of Hydrodynamics**, v. 22 p. 229-240, 2010.