



AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ACOPLAMENTO DE RISERS NO
MOVIMENTO DE JOGO DE UM FPSO

Alexandre Rezende Diezel

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientadores: Murilo Augusto Vaz
Fabrício Nogueira Corrêa

Rio de Janeiro
Setembro de 2017

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ACOPLAMENTO DE RISERS NO
MOVIMENTO DE JOGO DE UM FPSO

Alexandre Rezende Diezel

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

Prof. Murilo Augusto Vaz, Ph.D.

Prof. Fabrício Nogueira Corrêa, D.Sc.

Prof. Breno Pinheiro Jacob, D.Sc.

Dr. Allan Carré de Oliveira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
SETEMBRO DE 2017

Diezel, Alexandre Rezende

Avaliação da Influência do Acoplamento de *Risers* no Movimento de Jogo de Um FPSO/ Alexandre Rezende Diezel – Rio de Janeiro: UFRJ / COPPE, 2017.

XIV, 92 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Murilo Augusto Vaz

Fabício Nogueira Corrêa

Dissertação (mestrado) – UFRJ / COPPE / Programa de Engenharia Oceânica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 86-88.

1. Análise Acoplada. 2. Projeto de *Risers*. 3. FPSO. I. Vaz, Murilo Augusto *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

Dedico este trabalho aos meus avós Wander e Solange,
pedras fundamentais da minha educação.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão aos professores Murilo Augusto Vaz e Fabricio Nogueira Corrêa, meus orientadores, pelo interesse, engajamento e assistência prestada na preparação desta dissertação.

Agradeço ao professor Breno Pinheiro Jacob, que me introduziu ao assunto de que trata esta dissertação em suas aulas e me garantiu acesso aos materiais e pessoas fundamentais.

Agradeço ao engenheiro Doutor Allan Carré de Oliveira e à PETROBRAS pelo material fornecido. Agradeço especialmente ao Allan pelos valiosos conselhos, que contribuíram significativamente para a qualidade deste texto e para a formação intelectual do autor.

Aos engenheiros Germaín Carlos Venero Lozano e Victor de Paula Gomes, caríssimos mestres, meus sinceros agradecimentos pelas palavras de coragem, suporte e orientação nas decisões cotidianas.

Agradeço ao engenheiro Hugues Gerard Corrignan, cuja influência fora determinante na escolha do assunto aqui abordado.

Agradeço aos colegas, amigos e familiares que tenham contribuído ou se interessado pelo conteúdo deste estudo e apoiado sua elaboração.

O desenvolvimento deste trabalho foi possível devido ao apoio e investimento do WOOD GROUP.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ACOPLAMENTO DE RISERS NO
MOVIMENTO DE JOGO DE UM FPSO

Alexandre Rezende Diezel

Setembro / 2017

Orientadores: Murilo Augusto Vaz
Fabrício Nogueira Corrêa

Programa: Engenharia Oceânica

Este trabalho apresenta uma comparação entre as formulações acoplada e desacoplada para simulação computacional e análise dos movimentos de jogo de um FPSO em águas profundas acoplado a um conjunto de *risers* flexíveis. Tradicionalmente, as avaliações dos movimentos do casco e do comportamento dinâmico estrutural das linhas submarinas são feitas em etapas distintas do projeto, de modo que a interação dinâmica entre os dois domínios físicos raramente é plenamente contemplada. Descrições das metodologias de análise e das teorias que regimentam os principais fenômenos envolvidos estão incluídas. Neste estudo, um conjunto de simulações utilizando ondas regulares e irregulares foram realizadas com o objetivo de quantificar tal interação. Além da variação no movimento de jogo devido aos efeitos do acoplamento, a influência na tração de topo de algumas linhas selecionadas também foi investigada. Os resultados apontam reduções bastante significativas em ambos os parâmetros, conduzindo à conclusão de que os efeitos associados ao acoplamento podem ser relevantes para o projeto.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE COUPLING OF RISERS ON THE
ROLL MOTION OF AN FPSO

Alexandre Rezende Diezel

September / 2017

Advisors: Murilo Augusto Vaz
Fabrício Nogueira Corrêa

Department: Ocean Engineering

This work presents a comparison between the coupled and uncoupled formulations for computational simulation and analysis of the roll motions of an FPSO attached to a set of flexible risers in a deep-water scenario. The evaluation of the motions of the hull and the structural dynamic behavior of the subsea lines are usually made in different steps of the design, so that the dynamic interaction between the two physical domains is rarely considered. Descriptions of the analysis methodologies and the theories associated to the physical phenomena are included. In this study, a set of simulations using regular and irregular waves were performed to quantify this interaction. Besides the variation in the roll motions due to the coupling effects, the influence in the top tensions of a few selected risers is also investigated. The results show significant reductions in both parameters studied, leading to the conclusion that coupling effects can be relevant to the riser design.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contexto e motivação	1
1.2	Objetivo e escopo.....	4
1.3	Organização do Texto	4
2	SISTEMAS DE PRODUÇÃO OFFSHORE.....	6
2.1	Introdução	6
2.2	Plataformas fixas.....	6
2.3	Plataformas flutuantes.....	7
2.4	Risers	9
2.5	Sistemas de Ancoragem.....	14
3	METODOLOGIAS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	16
3.1	Introdução	16
3.2	Sobre Análise Global de Risers	17
3.3	Metodologia desacoplada.....	19
3.4	Metodologia acoplada.....	20
4	CARREGAMENTOS AMBIENTAIS.....	23
4.1	Geral.....	23
4.2	Ondas Oceânicas de Superfície.....	23
4.2.1	Ondas Regulares e Teoria Linear de Airy	23
4.2.2	Ondas Irregulares.....	29
4.2.3	Representação Espectral	33
4.3	Correntes Marítimas	37
4.4	Vento.....	37
5	INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA E EQUAÇÕES DE MOVIMENTO	38
5.1	Introdução	38

5.2	Esforços Atuantes no Casco	38
5.2.1	Resposta da embarcação em ondas.....	38
5.2.2	Forças de segunda ordem, corrente e vento.....	43
5.3	Esforços Atuantes em Risers e Linhas de Ancoragem	43
5.3.1	Equação de Morison	43
5.3.2	Carregamento devido à pressão hidrostática	45
5.3.3	Excitação forçada devido aos movimentos do corpo flutuante	46
5.3.4	Amortecimento estrutural	46
5.4	Equações de movimento	48
5.4.1	Dinâmica do corpo flutuante	48
5.4.2	Movimento das linhas submarinas	50
6	ESTUDOS DE CASOS.....	52
6.1	Introdução	52
6.2	Sistema de produção estudado	53
6.3	Programas de Simulação.....	57
6.3.1	SITUA-PROSIM	57
6.3.2	WAMIT	57
6.4	Avaliação dos Movimentos da Embarcação	58
6.4.1	Carregamentos Ambientais.....	58
6.4.2	Embarcação sem linhas submarinas – Ondas regulares	59
6.4.3	Influência das linhas de ancoragem e risers no movimento de jogo – Ondas regulares	62
6.4.4	Variação de Amplitude das Ondas Regulares	68
6.4.5	Simulações com ondas irregulares	69
6.5	Avaliação dos esforços nos risers – Ondas irregulares.....	73
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	83
7.1	Da relevância do presente estudo.....	83

7.2	Recomendações para trabalhos futuros.....	84
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
APÊNDICE A	LINHAS DE ANCORAGEM E RISERS NO MODELO SITUA ...	89
A.1	Linhas de Ancoragem no modelo do SITUA	89
A.2	Risers no modelo do SITUA.....	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Conceito artístico de um FPSO (fonte: PETROBRAS).....	2
Figura 2 – FPSO e um arranjo numeroso de risers e seu sistema de ancoragem (fonte: OILSTATES)	3
Figura 3 – Ilustrações de plataformas do tipo jaqueta [5]	7
Figura 4 – Ilustrações de alguns conceitos de plataformas flutuantes: (a) Semi-submersível, (b) FPSO, (c) TLP e (d) Spar [5].....	9
Figura 5 – Fotografia de uma junta de riser de perfuração [16]	10
Figura 6 – Ilustração de um riser TTR [4].....	11
Figura 7 – Riser flexível e suas diversas camadas (adaptado de [30])	12
Figura 8 – Riser rígido (Fonte: Petrobras).....	13
Figura 9 – Ilustração de um riser híbrido (Fonte: Wood Group).....	14
Figura 10 – Sistema de ancoragem single point mooring do tipo Turret [5]	15
Figura 11 – Sistema de ancoragem spread mooring (Fonte: Greenstick Energy)	15
Figura 12 – Metodologia desacoplada (Adaptada de [18])	20
Figura 13 – Metodologia acoplada (Adaptada de [18]).....	21
Figura 14 – Caracterização das ondas segundo a teoria linear [5]	24
Figura 15 – Condição de contorno cinemática no leito marinho [5].....	26
Figura 16 – Condição de contorno dinâmica na superfície livre [5]	27
Figura 17 – Representação do mar irregular como sobreposição de ondas regulares [5]	30
Figura 18 – Função densidade de probabilidade gaussiana (Adaptado de [5]).....	31
Figura 19 – Função densidade de probabilidade de Rayleigh [5]	32
Figura 20 – Ajuste dos parâmetros α e β de uma distribuição de Weibull.....	33
Figura 21 – Representação espectral de um mar irregular [5].....	34
Figura 22 – Correlação domínio do tempo – domínio da frequência (Adaptado de [5])	35
Figura 23 – Variação do amortecimento em função da frequência.....	47
Figura 24 – Movimentos do corpo flutuante nos 6 graus de liberdade em torno de um ponto de referência	48
Figura 25 – Rotações em torno dos eixos no sistema de coordenadas local	49
Figura 26 – Modelo computacional conforme implementado no SITUA-Prosím	54

Figura 27 – RAO de movimento de jogo do FPSO para incidências de onda a boreste e a bombordo.....	55
Figura 28 – RAO de forças de excitação de jogo do FPSO para incidências de onda a boreste e a bombordo.....	55
Figura 29 – Sistema de coordenadas local	56
Figura 30 – Momento produzido pelas trações de topo dos risers	59
Figura 31 – Direções de propagação das ondas simuladas.....	60
Figura 32 – Comparação entre resultados utilizando as formulações desacoplada acoplada para geração do RAO de Jogo sem anexação das linhas submarinas – Incidência de onda a boreste.....	61
Figura 33 – Comparação entre resultados utilizando as formulações desacoplada acoplada para geração do RAO de Jogo sem anexação das linhas submarinas – Incidência de onda a bombordo.....	61
Figura 34 – Início da análise com incorporação das linhas submarinas – Período de 13s	62
Figura 35 – Final da análise com incorporação das linhas submarinas – Período de 13s	63
Figura 36 – Comparação de RAOs (com e sem linhas submarinas) – Incidência a Boreste	64
Figura 37 – Comparação de RAOs (com e sem linhas submarinas) – Incidência a Bombordo.....	64
Figura 38 – Assimetria de resposta devido ao acoplamento	65
Figura 39 – Deslocamento vertical de pontos nos bordos à meia nau – Incidência a Boreste	67
Figura 40 – Deslocamento vertical de pontos nos bordos à meia nau – Incidência a Bombordo.....	68
Figura 41 – Variação de Amplitude de Resposta– Ondas Regulares de Período 13s	69
Figura 42 – Movimento de jogo em mar irregular – Caso de carregamento 1.....	71
Figura 43 – Movimento de jogo em mar irregular – Caso de carregamento 2.....	71
Figura 44 – Movimento de jogo em mar irregular – Caso de carregamento 3.....	72
Figura 45 – Movimento de jogo em mar irregular – Caso de carregamento 4.....	72
Figura 46 – Risers selecionados para análise das trações de topo.....	73
Figura 47 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 1 e Linha 1.....	75
Figura 48 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 1 e Linha 2.....	75

Figura 49 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 1 e Linha 3.....	76
Figura 50 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 2 e Linha 1.....	76
Figura 51 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 2 e Linha 2.....	77
Figura 52 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 2 e Linha 3.....	77
Figura 53 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 3 e Linha 1.....	78
Figura 54 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 3 e Linha 2.....	78
Figura 55 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 3 e Linha 3.....	79
Figura 56 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 4 e Linha 1.....	79
Figura 57 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 4 e Linha 2.....	80
Figura 58 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 4 e Linha 3.....	80
Figura 59 – Espectros de Tração de Topo – Caso de carregamento 1 e Linhas 1 a 3	81
Figura 60 – Espectros de Tração de Topo – Caso de carregamento 2 e Linhas 1 a 3	81
Figura 61 – Espectros de Tração de Topo – Caso de carregamento 3 e Linhas 1 a 3	82
Figura 62 – Espectros de Tração de Topo – Caso de carregamento 4 e Linhas 1 a 3	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões principais do FPSO	54
Tabela 2 – Centro de Gravidade do FPSO	54
Tabela 3 – Propriedades hidrodinâmicas das linhas submarinas associadas à equação de Morison.....	56
Tabela 4 – Propriedades do solo elástico.....	56
Tabela 5 –Comparação de RAOs – com e sem linhas submarinas	63
Tabela 6 –Elevações do Ponto à Meia-nau a Boreste.....	66
Tabela 7 –Elevações do Ponto à Meia-nau a Bombordo.....	67
Tabela 8 –Casos de carregamento para simulações com onda irregular	69
Tabela 9 –Resultados estatísticos de módulo da amplitude de movimento de jogo para simulações com mar irregular.....	70
Tabela 10 –Extrapolação estatística para trações de topo - Weibull	74
Tabela 11 – Coordenadas das conexões de topo das linhas de ancoragem	89
Tabela 12 – Propriedades dos materiais das linhas de ancoragem	89
Tabela 13 – Propriedades dos Risers	90

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e motivação

Os primeiros descobrimentos de petróleo offshore no Brasil deram-se em águas rasas nas regiões nordeste e sudeste do país na década de 1960, e as primeiras plataformas instaladas pela Petrobras – principal operadora do país – eram fixas ao leito. Na medida em que a exploração avançou para águas progressivamente mais profundas, no início da década de 1980, a Petrobras passou a utilizar sistemas de produção flutuantes, como plataformas semi-submersíveis e navios-plataforma.

No âmbito do projeto de *risers*, um sistema de produção é visto como uma composição de três grupos de elementos: casco, linhas de ancoragem e *risers*. O casco é o elemento que fornece flutuação e suporta os equipamentos para a produção e processo; as linhas de ancoragem proveem rigidez para a manutenção da plataforma em limites seguros de deslocamento horizontal; os *risers* são dutos para comunicação entre o fundo e os equipamentos da plataforma.

No Brasil, onde as descobertas mais recentes e promissoras situam-se a distâncias que superam 250km de distância da costa e em profundidades que superam 2000m de lâmina d'água, destaca-se um conceito de sistema flutuante de produção cujas vantagens da utilização foram rapidamente reconhecidas: os FPSOs. Trata-se de uma embarcação que quase sempre apresenta o casco em formato de navio, frequentemente proveniente da conversão de petroleiros obsoletos. O nome é uma sigla do termo em inglês *Floating Production, Storage and Offloading* (Flutuante, Produção, Armazenamento e Transferência), que denuncia as principais características desse conceito.

Uma das maiores vantagens de uma plataforma do tipo FPSO é a sua grande capacidade de armazenamento de óleo. Isso dispensa a instalação de uma infraestrutura para escoamento da produção, uma vez que o produto é transferido para a costa através de navios aliviadores. Outra grande vantagem é o amplo espaço de convés disponível, que possibilita um arranjo geral mais flexível. Além disso, uma vez que o casco dessas embarcações pode ser convertido diretamente a partir de embarcações já existentes, o emprego de FPSOs possibilita uma maior agilidade no início da produção.

A Petrobras é a maior operadora de embarcações desse tipo, possuindo até 2015 um total de 29 unidades [1], e a previsão é de que esse número aumente em cerca de 20 a 30 unidades ao longo da próxima década [2]. A Figura 1 ilustra o conceito de um FPSO.



Figura 1 – Conceito artístico de um FPSO (fonte: PETROBRAS)

Se por um lado as plataformas do tipo FPSO apresentam diversas vantagens econômicas, é preciso levar em consideração que esse tipo de embarcação possui algumas desvantagens acerca de seu comportamento dinâmico quando sujeita às ações ambientais. No caso de navios convertidos, que são originalmente projetados para navegação, a operação em regime estacionário em alto mar pode levar a um comportamento dinâmico excessivo, principalmente quando a embarcação não possui recursos para ajuste do aproamento ou quando as ondas predominantes têm períodos próximos aos períodos naturais de jogo do sistema flutuante. Tal comportamento pode limitar as operações provocando paradas na produção quando ao sabor de condições ambientais muito severas. Se a incidência das ondas se der de través, condições ambientais não tão severas podem ser suficientes para exceder os limites de operação.

Por tratar-se de uma estrutura esbelta, com baixa inércia transversal em relação à longitudinal, um navio do tipo FPSO pode assumir grandes amplitudes de movimento de jogo, que, na maioria dos casos, é o responsável pelo comportamento dinâmico inadequado. Tal comportamento ocorre, principalmente, quando a unidade é submetida a ondas de través.

Quando em grande número, linhas de ancoragem e *risers* – particularmente em águas profundas e ultra profundas – são componentes muito importantes na determinação dos movimentos da embarcação, principalmente devido aos efeitos adicionais de amortecimento viscoso que essas estruturas podem prover devido ao deslocamento no

meio fluido. No caso de um FPSO, é possível um arranjo submarino que contemple mais de 60 *risers* conectados a um balcão lateral, o que torna o impacto desses componentes na movimentação da embarcação muito significativo devido ao alto momento produzido pelas forças nas conexões de topo dos *risers*.

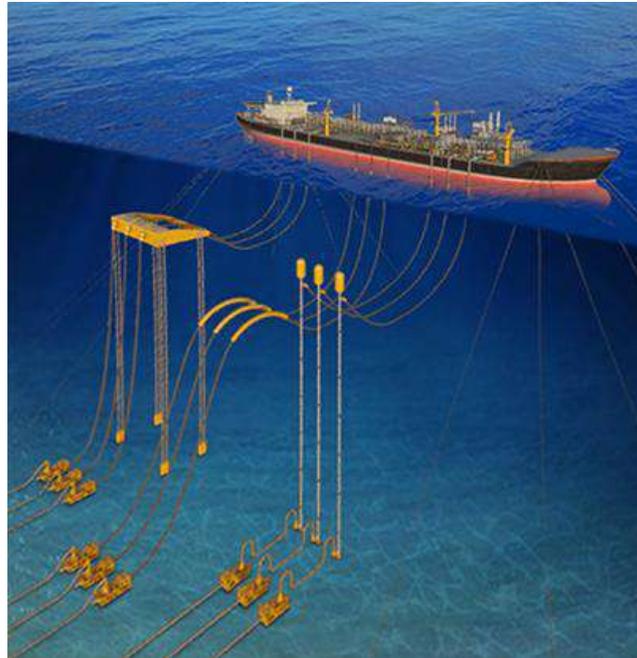


Figura 2 – FPSO e um arranjo numeroso de *risers* e seu sistema de ancoragem (fonte: OILSTATES)

A interação dinâmica entre casco, linhas de ancoragem e *risers* pode ser avaliada numericamente de diversas formas. Uma abordagem simples e muito frequentada na indústria é denominada análise desacoplada, onde a interação entre casco e linhas submarinas não é considerada ou é considerada de forma simplificada. No segundo caso, assume-se que as linhas de ancoragem e *risers* respondem aos movimentos do casco como um sistema de molas. Dessa forma, efeitos inerciais e carregamentos hidrodinâmicos nesses componentes são negligenciados e, após calculados os movimentos da embarcação, a dinâmica dos *risers* e linhas de ancoragem pode ser avaliada separadamente prescrevendo a resposta diretamente na conexão de topo.

No caso de um FPSO operante em águas profundas com um grande número de *risers*, os erros dessa abordagem podem ser muito grandes e os resultados excessivamente conservadores tanto em termos de carregamentos extremos quanto, possivelmente, em termos de fadiga, visto que unidades de produção têm vida útil de cerca de 30 anos. Uma análise totalmente acoplada que considere todos os efeitos de interação entre casco e

linhas submarinas é necessária para estimar valores mais realísticos para o projeto das linhas, potencialmente viabilizando a utilização de tal configuração em cenários como o pré-sal da bacia de Santos.

1.2 Objetivo e escopo

O objetivo deste trabalho é investigar, através de simulações computacionais, a influência dos efeitos não-lineares de amortecimento e inércia de linhas de ancoragem e *risers* no movimento de jogo de uma plataforma do tipo FPSO em águas profundas sob efeito de ondas. A embarcação em questão possui linhas de ancoragem dispostas em um sistema *spread mooring* e um balcão lateral de onde pendem 88 *risers* flexíveis, constituindo um arranjo potencialmente influente em termos de amortecimento, inércia e rigidez, semelhante ao investigado por FERREIRA et al. [20] e TAHAR et al. [23].

Formulações acoplada e desacoplada serão utilizadas para fins de comparação através de um único software de simulação dinâmica – SITUA-Prosím da Petrobras, desenvolvido pela COPPE/UFRJ [13]. Adicionalmente, a influência da incorporação dos efeitos não-lineares de amortecimento e inércia das linhas submarinas ao movimento da embarcação na resposta estrutural dos *risers* também será avaliada, investigando a possível relevância de tais considerações no projeto desses componentes.

O capítulo 6 apresenta um estudo comparativo entre as metodologias acoplada e desacoplada aplicadas a um FPSO em águas profundas com sistema de amarração *spread mooring* e *risers* flexíveis, semelhante ao visto em [19] e [20]. Em [19], a influência do acoplamento no movimento de jogo foi brevemente avaliada através de um teste de decaimento. O estudo aqui apresentado explora extensamente o assunto aplicado ao movimento de jogo, que é particularmente relevante para o caso de FPSOs.

1.3 Organização do Texto

O **Capítulo 1** apresentou uma breve introdução ao assunto tratado nessa dissertação. O texto conduz o leitor por uma contextualização histórica e econômica, tratando das características da indústria de exploração de óleo marítimo no Brasil. O problema do acoplamento entre unidade flutuante e linhas submarinas nas simulações computacionais é introduzido, explicando os porquês da relevância deste trabalho e os objetivos propostos.

No **Capítulo 2**, uma descrição dos principais conceitos de plataformas de produção, *risers* e linhas de ancoragem é apresentada. As principais aplicações, vantagens e

desvantagens da utilização de cada conceito são brevemente explicadas para a ambientação do leitor. Uma seleção de ilustrações representativa das embarcações e equipamentos descritos no capítulo foi incluída.

O **Capítulo 3** apresenta as principais metodologias para análise global de *risers* utilizadas na indústria. Uma descrição do papel das simulações computacionais nesse contexto é apresentada.

O **Capítulo 4** trata dos carregamentos ambientais preponderantes no sistema de produção no ambiente marinho. Descrições dos conceitos físicos estão incluídas. As formulações matemáticas utilizadas para modelagem das forças resultantes na estrutura, e dos movimentos da embarcação e das linhas submarinas induzidos por tais forças no âmbito das simulações computacionais estão explicadas no **Capítulo 5**.

O **Capítulo 6** apresenta um estudo conduzido com a finalidade de avaliar a influência da presença das linhas de ancoragem e *risers* no movimento de joga da embarcação, que é o objetivo último deste trabalho. Está presente uma descrição detalhada do sistema modelado matematicamente. Aos resultados seguem comentários do autor, relacionando os efeitos apreciados à teoria e à literatura quando pertinente.

As conclusões do estudo à luz dos resultados vistos no **Capítulo 6** assim como as recomendações para trabalhos futuros, estão presentes no **Capítulo 7** desta dissertação. Além da sugestão do que seria uma continuação razoável do presente estudo do ponto de vista do autor, foram sugeridas outras frentes de estudo em função dos efeitos que esta dissertação deixou de contemplar.

2 SISTEMAS DE PRODUÇÃO OFFSHORE

2.1 Introdução

Sistemas de produção são compostos, essencialmente, de três grupos de elementos: casco, *risers* e linhas de ancoragem. O casco é o elemento que fornece flutuação e suporta os equipamentos para a produção e processo; os *risers* são dutos para comunicação entre o fundo e os equipamentos da plataforma; as linhas de ancoragem proveem rigidez para a manutenção da plataforma em limites seguros de deslocamento.

Neste capítulo consta uma breve descrição dos principais conceitos de sistemas de produção existentes e utilizados para o desenvolvimento de campos de produção de petróleo no mar. É notável a diversidade de soluções criadas para vencer as mais extremas forças da natureza – cada conceito fora criado conforme as necessidades e tecnologias disponíveis à época da sua concepção.

2.2 Plataformas fixas

As primeiras plataformas construídas para exploração e produção de petróleo no mar eram grandes e robustas edificações rígidas e fixas ao leito marítimo. Esse tipo de estrutura ainda é empregado na indústria, mas restrito a profundidades relativamente baixas. A viabilidade de projetos de plataformas fixas é restrita a uma lâmina d'água de cerca de 300m. A baixas profundidades, os períodos naturais são baixos e distantes dos períodos associados às ondas oceânicas de superfície, favorecendo a viabilidade técnica dos projetos.

Plataformas do tipo jaqueta, que constam de grandes estruturas metálicas reticuladas, são o tipo de plataforma fixa mais amplamente utilizado em águas rasas. Uma ilustração desse conceito pode ser vista na Figura 3.

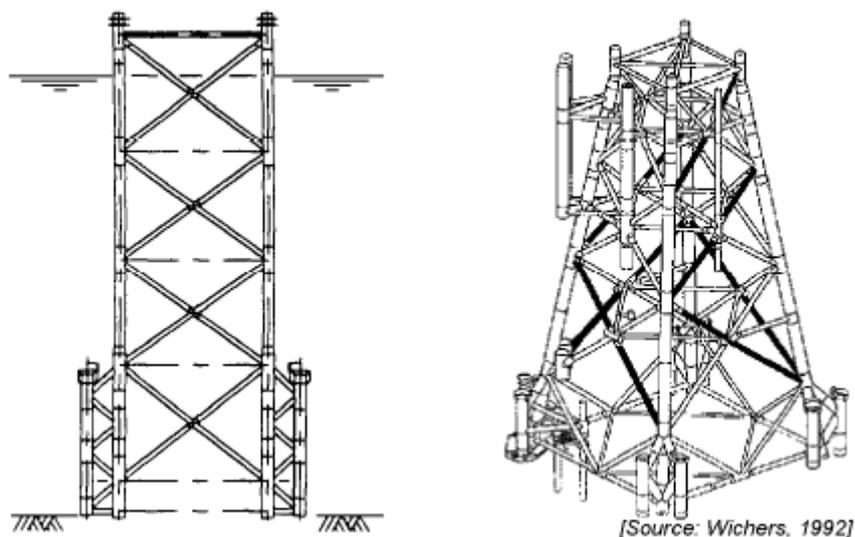


Figura 3 – Ilustrações de plataformas do tipo jaqueta [5]

Mais detalhes sobre plataformas fixas podem ser vistos em [5] e [6].

2.3 Plataformas flutuantes

Unidades flutuantes são empregadas em ambientes marinhos onde as profundidades são tais que impeçam a viabilidade de plataformas fixas. Águas profundas desafiam técnica e financeiramente os projetos de plataformas fixas, onde as unidades flutuantes surgem como alternativa imediata. Uma breve descrição dos principais conceitos de plataformas flutuantes utilizadas na indústria *offshore* será apresentada a seguir.

Plataformas semi-submersíveis: São embarcações cujo casco é uma composição de colunas e pontões, que produzem empuxo suficiente para garantir a flutuação da plataforma. As colunas sustentam os conveses, que ficam completamente externos ao ambiente marinho. Uma das principais vantagens desse conceito de embarcação é o fato de que a área de linha d'água é relativamente pequena, tornando a estrutura mais transparente às forças produzidas pelas ondas. Essas embarcações, no entanto, não têm capacidade de armazenamento, de modo que todo o óleo produzido necessita ser imediatamente escoado por *pipelines* ou para unidades de armazenamento.

Plataformas flutuantes de produção, armazenamento e alívio (FPSO): FPSOs constam de estruturas monocasco de grandes dimensões, normalmente em forma de navio – e frequentemente utilizam cascos aproveitados de petroleiros obsoletos. Possuem planta de processo integrada ao convés e têm capacidade de armazenamento em compartimentos

destinados para esta finalidade. Essa característica torna o emprego das plataformas FPSO bastante atraente em campos muito distantes da costa, onde a instalação de uma infraestrutura de escoamento é dificilmente viável devido ao alto custo envolvido. Uma desvantagem desse tipo de embarcação é, no entanto, a grande área exposta às ondas e sua inércia transversal relativamente baixa, o que torna a plataforma bastante influenciável pelas ondas – especialmente as de través.

Plataformas de pernas atirantadas (TLP): São plataformas flutuantes presas ao fundo por tendões tracionados devido a um excesso de empuxo do casco, e que restringem maior parte do movimento da estrutura. À exceção de seu peculiar sistema de ancoragem, as TLPs são bastante semelhantes às plataformas semi-submersíveis. A quase ausência de movimento vertical da embarcação permite a instalação do sistema de controle da cabeça de poço no convés ao invés do leito, reduzindo custos e facilitando a manutenção. A extensão da utilização das TLPs a lâminas d'água muito profundas é evitada, pois um comprimento aumentado dos tendões tende a deslocar os períodos naturais da estrutura perigosamente na direção dos períodos de onda mais frequentes.

Plataformas Spar: São estruturas flutuantes verticalmente longas permanentemente lastradas na base, o que confere ao sistema bastante estabilidade hidrostática. O alongamento da estrutura resulta em uma pequena área de exposição aos carregamentos ambientais, o que reduz significativamente os movimentos da plataforma e permite a instalação de uma árvore de natal seca, tal como as TLPs. O casco também possui tanques para armazenamento de óleo e serve de abrigo aos *risers*, estendendo a vida a fadiga desses componentes. Embora sejam um conceito caro, *Spars* podem poupar gastos devido ao aumento da produtividade – essas plataformas incorporam as atividades de perfuração e intervenção do poço, permitindo maior continuidade das operações.

Os quatro conceitos aqui apresentados estão ilustrados na Figura 4.

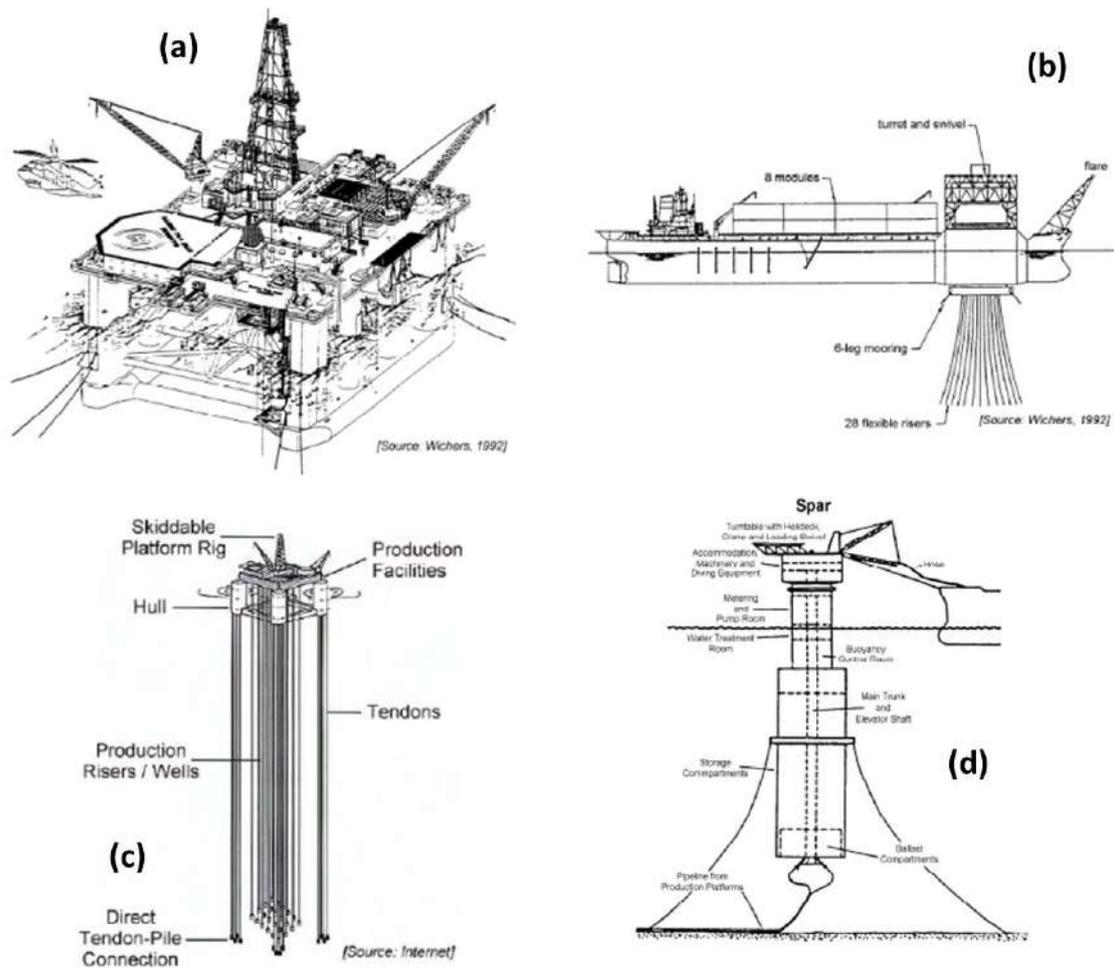


Figura 4 – Ilustrações de alguns conceitos de plataformas flutuantes: (a) Semi-submersível, (b) FPSO, (c) TLP e (d) Spar [5]

Mais detalhes sobre plataformas flutuantes podem ser vistos em [5] e [6].

2.4 Risers

Risers são essencialmente dutos que conectam e comunicam a plataforma, na superfície marinha, ao poço ou a equipamentos no leito. Dentre as principais aplicações de *risers* na indústria, destacam-se as seguintes:

- Transportar fluido entre o poço e o sistema flutuante para produção, injeção ou perfuração;
- Transferir fluido do sistema flutuante ao *pipeline* para exportação;
- Guiar ferramentas de perfuração ou *workover* para dentro do poço.

Os tipos e características dos sistemas de *risers* variam em função da aplicação, profundidade e condições ambientais. Segue uma breve descrição dos principais tipos existentes e utilizados na indústria:

Risers de perfuração: São *risers* tracionados no topo de cerca de 21” de diâmetro nominal e equipados com linhas periféricas para controle do poço. Abrigam a broca sob condições seguras durante a perfuração e retornam o fluido de perfuração do poço para a embarcação. É comum a utilização de módulos com flutuadores constituídos de espuma sintética para acrescentar empuxo ao sistema e aliviar o sistema de tracionamento da embarcação, como pode ser visto na Figura 5, além de um sistema de compensação de movimento vertical da embarcação para garantir a estabilidade do *riser* e impedir que cargas mecânicas sejam transferidas do *riser* para o *drillfloor*.



Figura 5 – Fotografia de uma junta de *riser* de perfuração [16]

Risers tracionados no topo (TTR): O conceito de *riser* tracionado no topo, ilustrado na Figura 6, consiste em um duto vertical suportado pela embarcação através de um sistema de tracionadores, de modo a manter uma movimentação vertical em limites aceitáveis. São tipicamente utilizados em plataformas do tipo Spar e TLPs, que possuem pouca movimentação vertical. Se aplicados em outros tipos de plataforma, é necessário um sistema de compensação de movimento vertical (ou elevação). São comumente aplicados a perfuração, produção, injeção ou exportação.

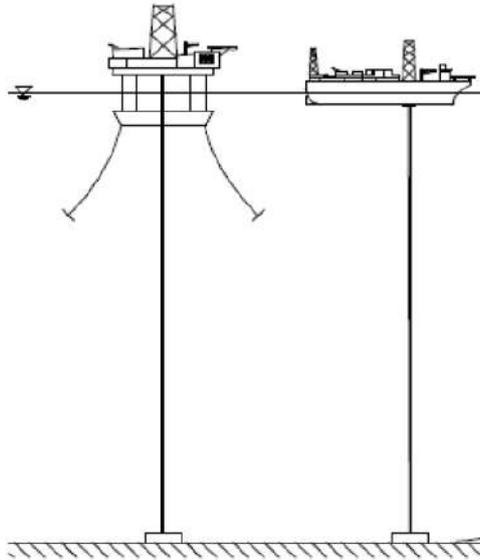


Figura 6 – Ilustração de um riser TTR [4]

Risers flexíveis: São amplamente empregados para fins de produção e exportação. As funções mecânicas são distribuídas em diferentes camadas na parede do riser. Tipicamente, a estrutura consiste em uma carcaça metálica interna, para resistência ao colapso, um revestimento plástico para contenção do fluido, uma câmara de aço para resistência à tensão circunferencial, armaduras de aço para resistir a carregamentos axiais e um revestimento plástico externo para vedação ao ambiente marinho. A flexibilidade mecânica desse conceito dispensa a instalação de um sistema de compensação, pois a estrutura é complacente aos movimentos da embarcação. É um conceito muito versátil e pode ser aplicado a diversos tipos de embarcações. A Figura 7 ilustra um segmento de riser flexível e suas diversas camadas.



Figura 7 – Riser flexível e suas diversas camadas (adaptado de [30])

Risers rígidos: Em águas profundas e ultra profundas, projetos de sistemas de *risers* tornam-se tecnicamente mais desafiadores. Altas pressões externas, temperaturas de produção associados a um grande peso da estrutura do duto nessas grandes profundidades são problemas que às vezes inviabilizam a utilização de *risers* flexíveis. *Risers* rígidos são uma alternativa imediata aos *risers* flexíveis, pois podem ser fabricados com diâmetros maiores, suportar altas pressões e temperaturas e serem fabricados mais facilmente, além de serem mais baratos. São, no entanto, muito sensíveis a carregamentos ambientais, e grandes movimentos da embarcação podem resultar em problemas estruturais. Uma configuração de *riser* rígido pode ser vista na Figura 8.

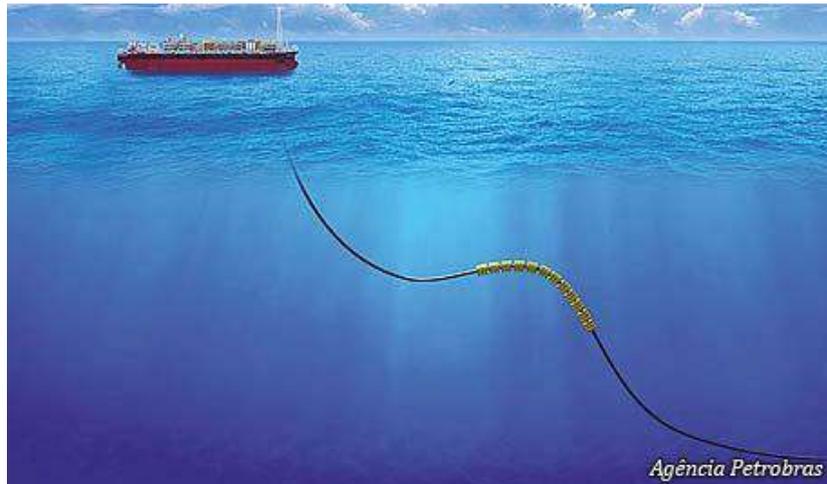


Figura 8 – Riser rígido (Fonte: Petrobras)

Risers híbridos: É um conceito composto de uma seção inferior de linha rígida sob tração e uma catenária superior de *riser* flexível denominada *jumper*. Um tanque flutuante é colocado abaixo da zona principal, sob influência de ondas, conectada ao *riser* rígido vertical, e o *jumper* é conectado desde o topo do *riser* rígido até a embarcação, como pode ser visto na Figura 9. Esse tipo de configuração é capaz de atender simultaneamente a diversos requisitos, como a necessidade de dutos de grandes diâmetros e a absorção de movimentos induzidos pela embarcação. A instalação e a fabricação são, no entanto, muito longas ou custosas.

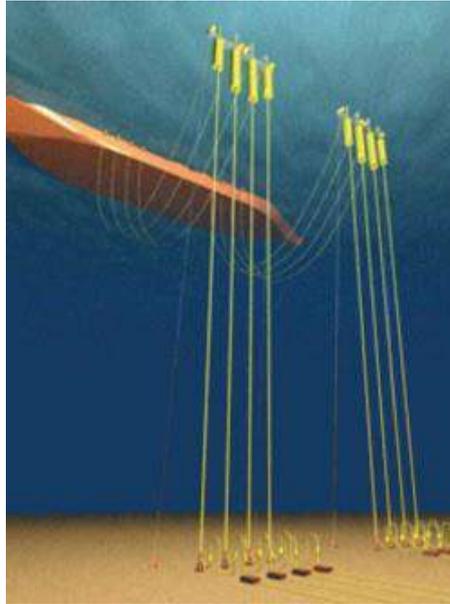


Figura 9 – Ilustração de um *riser* híbrido (Fonte: Wood Group)

Uma descrição abrangente dos principais tipos de *risers* existentes na indústria e os princípios que guiam seus projetos podem ser vistos em [16].

2.5 Sistemas de Ancoragem

Um sistema de ancoragem é um conjunto de linhas submarinas, normalmente compostas por seções de amarras ou poliéster, responsáveis pela manutenção da embarcação dentro de limites de passeio aceitáveis para o projeto estrutural dos *risers*.

A seguir, uma breve descrição dos principais conceitos de sistemas de ancoragem utilizados na indústria.

Sistema *Single Point Mooring (SPM)*: Trata-se de um sistema de ancoragem onde todas as linhas convergem para uma única região em torno da qual a plataforma tem liberdade de rotação. É uma estrutura cara e sofisticada, mas permite que a plataforma de produção altere seu aproamento em função dos carregamentos ambientais. SPMs podem ser externos à embarcação, como CALM (*Cathenary Anchor Leg Mooring*) e SALM (*Single Anchor Leg Mooring*), ou integrados ao casco, como sistemas do tipo *Turret*. A Figura 10 ilustra esse conceito.

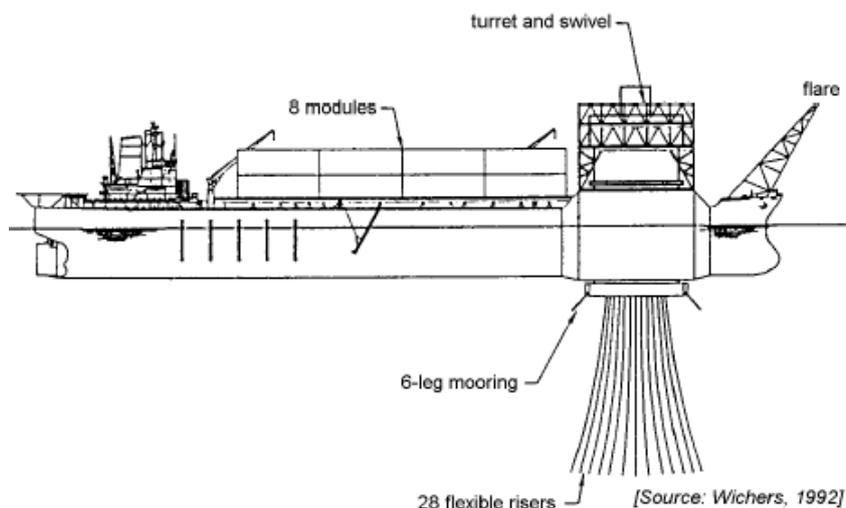


Figura 10 – Sistema de ancoragem *single point mooring* do tipo *Turret* [5]

Sistema *Spread Mooring*: É um sistema onde as linhas de ancoragem são posicionadas em torno da embarcação, sem concentração específica como no caso do sistema SPM (ver Figura 11). Esse sistema não permite controle significativo do aproamento da embarcação – o que demanda um projeto mais cuidadoso. O custo de implementação é, no entanto, muito inferior ao SPM e, por isso, esse sistema é mais amplamente utilizado.

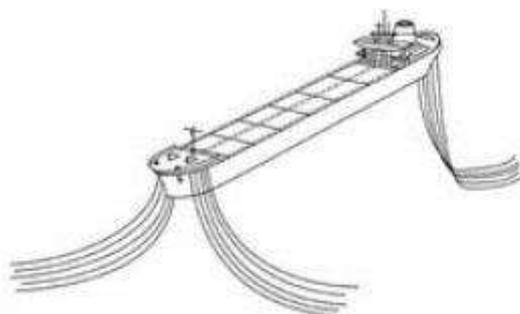


Figura 11 – Sistema de ancoragem *spread mooring* (Fonte: *Greenstick Energy*)

Descrições mais profundas e detalhadas de tipos de sistemas de ancoragem podem ser lidas em [6].

3 METODOLOGIAS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

3.1 Introdução

As ferramentas de simulação computacional têm importância notável na indústria petrolífera. Os sistemas projetados são, em geral, complexos e sujeitos a influências de esforços de diferentes naturezas, o que torna a simulação com modelos físicos em escala frequentemente inviáveis. Além disso, a impossibilidade de resolução analítica dos problemas que envolvem sistemas compostos por embarcação, *risers* e linhas de ancoragem, dado a sua complexidade, clama por uma alternativa – convenientemente atendida por técnicas de simulação numérica.

Simulações computacionais, no presente contexto, caracterizam-se pela utilização de métodos numéricos para a solução das equações que regimentam o comportamento estrutural estático ou dinâmico do sistema offshore estudado. Pode-se definir simulação computacional, então, como uma representação do comportamento estrutural de um sistema sob efeito de carregamentos, utilizando um modelo matemático resolvido através de procedimentos numéricos específicos.

Do ponto de vista do componente estrutural estudado, o modelo numérico pode ser classificado como global ou local. O primeiro tem a finalidade de descrever os comportamentos estático e dinâmico globais (isto é, de uma grande região do sistema), sem a ambição de representar esforços ou deslocamentos muito localizados na estrutura, enquanto o segundo ocupa-se de representar justamente os pormenores de uma região específica, como as concentrações de tensões causadas por uma descontinuidade geométrica em um determinado trecho.

Neste trabalho, os modelos visam representar o sistema composto por casco e linhas submarinas sob a ótica global, onde simplificações são feitas quanto à geometria e carregamentos aplicados, mas que são suficientemente representativos em termos de massa, rigidez, amortecimento e carregamentos hidrodinâmicos para a apreciação dos efeitos que aqui se querem demonstrar. Onde este texto disser respeito a simulações computacionais e análise, portanto, tratar-se-á da abordagem global.

Leituras complementares acerca de metodologias de simulação numérica para sistemas oceânicos podem ser vistos em [24], [25] e [29].

3.2 Sobre Análise Global de *Risers*

A finalidade de uma análise global é descrever os comportamentos estático e dinâmico globais do sistema estudado quando exposto a carregamentos ambientais. Um modelo matemático para a análise global deve incluir uma modelagem adequada da rigidez, amortecimento e carregamentos hidrodinâmicos associados às linhas submarinas, além da aplicação das condições de contorno adequadas. As respostas de interesse nesse tipo de análise podem ser agrupadas nas seguintes categorias, de acordo com a DNV-OS-F201 [12].

1. Forças resultantes nas seções transversais (tração efetiva, momento fletor, momento torcional);
2. Deflexões globais no *riser* (curvaturas e deformações);
3. Posicionamento global do *riser* (coordenadas, translações, distância em relação a outras estruturas, variação da região de contato com o leito, etc.);
4. Cargas de suporte em estruturas rígidas terminais (forças e momentos resultantes).

Essas informações são, quando necessário, utilizadas diretamente como carregamentos resultantes ou condições de contorno em análises mais detalhadas (locais).

Na avaliação de seu comportamento hidrodinâmico, tradicionalmente, o casco do sistema flutuante é contemplado como um corpo rígido em uma análise global. As linhas de ancoragem e *risers*, por sua vez, idealmente devem ser representadas por modelos de elementos finitos com a finalidade de obter a respostas hidrodinâmica e estrutural desses componentes com rigor.

Atualmente, um amplo repertório de ferramentas de simulação computacionais está disponível no mercado, cujos algoritmos implementados são capazes de resolver eficientemente os problemas dinâmicos não lineares que envolvem os sistemas de produção offshore.

Em uma análise global de *risers*, o casco é usualmente representado como movimentos prescritos no topo das linhas (conforme mencionado na seção 3.3) e a simulação do sistema no ambiente marinho é feita em duas etapas: estática e dinâmica. A etapa estática é sempre o primeiro passo na solução de uma análise global, realizada para a determinação do equilíbrio da configuração quando sujeita a carregamentos estáticos (peso próprio, empuxo, tração de topo, correntes marinhas e deslocamentos estáticos prescritos), aplicados a partir da configuração inicial não-deformada. A partir da solução

estática, a solução dinâmica é iniciada, onde as linhas submarinas respondem dinamicamente ao efeito de onda, corrente e, eventualmente, forças ou deslocamentos prescritos variantes no tempo.

O sistema flutuante responde à excitação forçada devido ao efeito das ondas. Os movimentos da embarcação são representados na etapa dinâmica a partir de operadores de amplitude de resposta – em inglês, *Response Amplitude Operator* (RAO) – calculados preliminarmente no domínio da frequência em uma análise anterior à análise global em um software específico para essa finalidade, como o WAMIT [14]. Os resultados dessa análise são utilizados como dados de entrada para a análise dinâmica global.

Embora existam outras técnicas, a forma mais rigorosa de avaliar a resposta da embarcação e suas linhas submarinas é através de uma análise dinâmica no domínio do tempo. Apenas dessa forma é possível contemplar as não-linearidades presentes no sistema, das quais têm particular relevância as seguintes:

- Variação de tração no tempo;
- Carregamentos hidrodinâmicos, como a parcela quadrática de forças de arrasto na equação de Morison;
- Grandes rotações no espaço tridimensional;
- Forças de contato ou fricção entre *riser* e embarcação ou devido à variação da área de contato com o leito marinho.

Os esforços computacionais empregados em análises no domínio do tempo podem ser muito significativos. No caso de análises com mar irregular, por exemplo, é necessária a simulação de um tempo longo para que a resposta do sistema seja suficientemente confiável estatisticamente. Por esse motivo, é comum a utilização de metodologias que se baseiem em algum tipo de simplificação para garantir uma maior eficiência computacional.

Em simulações de estruturas oceânicas, desvios em relação à resposta verdadeira sempre ocorrerão. Convém lembrar que o grau de incerteza será proporcional à quantidade de simplificações introduzidas na análise na tentativa de reduzir o tempo total de processamento.

Neste estudo, têm relevância duas formulações amplamente utilizadas na indústria para a análise de modelos globais:

- Formulação desacoplada; e
- Formulação acoplada.

Estas formulações podem ser utilizadas em diferentes metodologias de análise de projeto de sistemas de *risers* e ancoragem. As mais comuns são a metodologia desacoplada e acoplada descritas a seguir. Na literatura, comparações entre essas metodologias podem ser lidas em [7] e [18].

3.3 Metodologia desacoplada

Trata-se da metodologia mais tradicional e, portanto, mais presente em projetos de sistemas offshore de exploração de petróleo. A metodologia desacoplada, ilustrada pela Figura 12, emprega ferramentas computacionais baseadas em formulações onde o modelo hidrodinâmico da embarcação não leva em consideração o comportamento dinâmico não-linear das linhas.

Esta metodologia pode ser aplicada no contexto da análise de movimento do casco ou no contexto da análise estrutural das linhas. No contexto das linhas, o sistema flutuante é modelado apenas como um movimento prescrito no topo do duto ou linha de ancoragem em função das ondas enfrentadas pela embarcação. A prescrição do movimento é feita utilizando uma ferramenta numérica denominada Operador de Amplitude de Resposta (RAO), que consta de um conjunto de coeficientes que correlacionam linearmente os movimentos de primeira ordem nos seis graus de liberdade da embarcação com a amplitude da onda enfrentada.

Para a determinação de tais coeficientes, normalmente é assumido que as linhas de ancoragem e *risers* respondem aos movimentos do casco como um sistema de molas. Dessa forma, efeitos inerciais e carregamentos hidrodinâmicos nesses componentes são negligenciados e, após calculados os movimentos da embarcação, a dinâmica dos *risers* e linhas de ancoragem podem ser avaliadas separadamente prescrevendo a resposta diretamente nas conexões de topo em um modelo de elementos finitos. Muitas vezes, no entanto, a presença das linhas submarinas não é contemplada de nenhuma forma para a construção dos RAOs.

O emprego dessa metodologia demanda uma análise do movimento do casco no domínio da frequência anterior à análise das linhas submarinas para obtenção dos RAOs da embarcação, que normalmente é feita em um programa de radiação/difração como o WAMIT [14]. As simplificações inerentes à abordagem no domínio da frequência

implicam que as não-linearidades presentes no sistema não sejam consideradas de forma rigorosa na análise dos movimentos da embarcação, embora o tempo de processamento na análise das linhas submarinas utilizando a metodologia desacoplada seja relativamente baixo. Para sistemas flutuantes como FPSOs, o aumento da lâmina d'água e do número de *risers* pode produzir resultados excessivamente conservadores se uma metodologia acoplada não for empregada. [18].

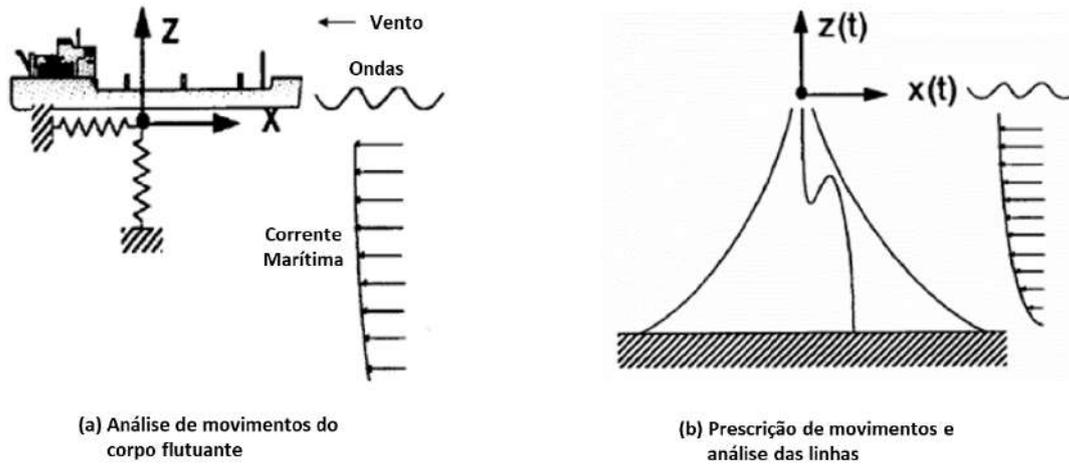


Figura 12 – Metodologia desacoplada (Adaptada de [18])

3.4 Metodologia acoplada

A metodologia acoplada, ilustrada pela Figura 13, tem o objetivo de tentar garantir melhores resultados em relação à metodologia desacoplada através de uma formulação de análise que incorpore em uma única estrutura de código de dados um modelo hidrodinâmico da unidade flutuante e um modelo estrutural, em elementos finitos, das linhas submarinas.

Nessa metodologia, pode ser empregada a formulação fracamente acoplada ou fortemente acoplada. Na primeira, o esquema de integração no tempo das equações de movimento da unidade flutuante é adaptado para, a cada instante de tempo, efetuar uma série de análises não-lineares com modelos de elementos finitos das linhas. Nestas análises, os movimentos da unidade são aplicados no topo de cada linha a cada intervalo de integração. Por sua vez, as linhas transferem forças para a unidade flutuante, ou seja, estas forças são acumuladas e aplicadas no lado direito das equações de movimento da unidade flutuante.

A eficiência computacional deste procedimento de solução é garantida pelo fato de que é gerado um sistema de equações para cada linha individualmente, e este sistema é solucionado linha por linha, reduzindo o custo computacional e a alocação de memória RAM.

Na metodologia fortemente acoplada, todas as matrizes de massa e rigidez (do casco e das linhas submarinas) são armazenadas em uma única matriz global no *software* de simulação. O casco, nesse caso, passa a ser considerado como um ponto na malha de elementos finitos representativa das linhas.

O agrupamento de todas as equações de movimento do sistema acaba por requisitar uma alta alocação de memória RAM e muito tempo de processamento de CPU, o que faz com que a metodologia fortemente acoplada seja utilizada na indústria de forma bem mais restrita que a metodologia fracamente acoplada. O trabalho realizado por BAHIENSE em [26] mostrou que, para alguns casos, os resultados das metodologias fortemente e fracamente acopladas podem se equivaler.

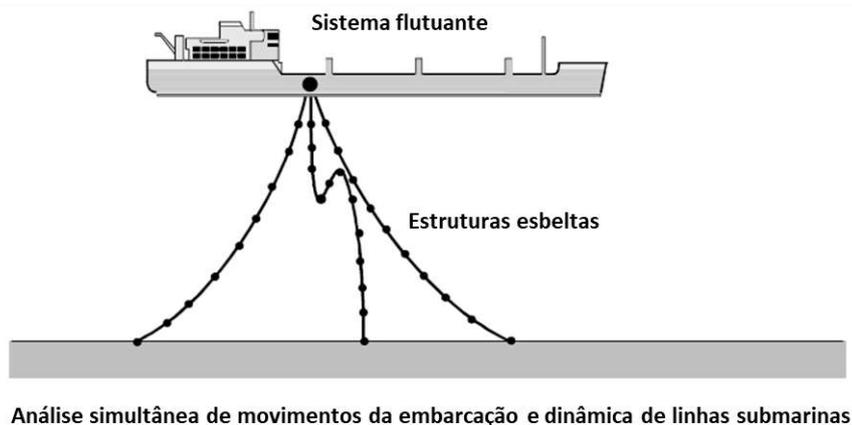


Figura 13 – Metodologia acoplada (Adaptada de [18])

De forma geral numa simulação acoplada os efeitos não-lineares dinâmicos são incluídos e as linhas de ancoragem, *risers* e embarcação influenciam-se mutuamente na solução numérica.

A solução acoplada, embora significativamente mais cara computacionalmente do que as simulações desacopladas, em geral produz resultados mais confiáveis que a solução desacoplada, pois considera não-linearidades presentes no sistema na resposta

dinâmica da embarcação, como a variação no tempo das trações de topo que, por sua vez, incorporam a parcela de amortecimento viscoso devido ao deslocamento das linhas submarinas (equação de Morison).

É esperado que a redução de conservadorismo nas respostas dos *risers* em sistemas onde as não-linearidades são importantes seja capaz de viabilizar sistemas de produção baseados em conceitos mais simples ou mais baratos.

Estudos a respeito de simulações acopladas de sistemas offshore já foram conduzidas com sucesso por diversos autores, como FERREIRA et al. [20], LOW et al. [22], GARRETT [21] e TAHAR et al. [23]. GARRETT [21] e TAHAR et al. [23] descrevem as principais considerações e procedimentos quando da utilização de formulações acopladas para a solução de problemas envolvendo *risers*, linhas de ancoragem e embarcação.

O capítulo 6 apresenta um estudo comparativo entre as metodologias acoplada e desacoplada aplicadas a um FPSO em águas profundas com sistema de amarração *spread mooring* e *risers* flexíveis, semelhante ao visto em [19] e [20]. Em [19], a influência do acoplamento no movimento de jogo foi brevemente avaliada através de um teste de decaimento. O estudo aqui apresentado explora extensamente o assunto aplicado ao movimento de jogo, que é particularmente relevante para o caso de FPSOs.

4 CARREGAMENTOS AMBIENTAIS

4.1 Geral

Estruturas oceânicas estão sujeitas a carregamentos ambientais que muitas vezes desafiam a viabilidade dos projetos. Neste capítulo estão descritos os principais fenômenos responsáveis pela imposição de esforços nas estruturas expostas ao ambiente marinho: ondas oceânicas, correntes marítimas e vento. As principais teorias aqui descritas podem ser vistas com mais detalhes em [5], [7], [8] e [9].

Este trabalho visa a apreciação do comportamento dinâmico de um FPSO, *risers* e linhas de ancoragem sujeitos apenas a carregamentos de ondas, desprezando efeitos de correntes marítimas e vento. Por esse motivo, maior ênfase será dada à descrição matemática de fenômenos associados às ondas, embora correntes e vento também tenham espaço neste capítulo.

4.2 Ondas Oceânicas de Superfície

Esta seção apresenta as principais teorias aplicadas à modelagem de ondas oceânicas em análises globais de sistemas offshore. A distinção entre os conceitos de onda regular e irregular é feita, além da aplicação da teoria linear de Airy para derivação dos campos de velocidade e pressão em função de uma onda que se propaga na superfície utilizando a teoria potencial.

4.2.1 Ondas Regulares e Teoria Linear de Airy

4.2.1.1 Definições

Uma onda oceânica cria um movimento oscilatório na superfície livre. A elevação da superfície varia em função do tempo t e do espaço x , conforme ilustrado na Figura 14. O eixo x é positivo no sentido de propagação das ondas, e o eixo z é positivo para cima. As variáveis h , ζ_a e λ são, respectivamente, lâmina d'água, amplitude e comprimento de onda. T é o período da onda.

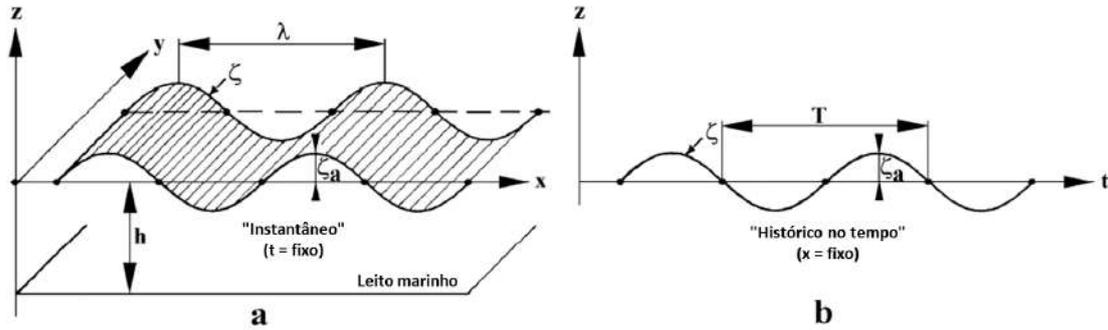


Figura 14 – Caracterização das ondas segundo a teoria linear [5]

A altura de onda pode ser definida como sendo o dobro da amplitude, ou seja:

$$H = 2\zeta_a \quad (1)$$

A elevação da superfície em função de uma onda regular senoidal que se propaga ao longo do eixo x pode ser definida como segue:

$$\zeta = \zeta_a \cos(kx - \omega t) \quad (2)$$

Onde

$k = 2\pi/\lambda$ é o número de onda; e

$\omega = 2\pi/T$ é a frequência (angular) de oscilação da onda.

4.2.1.2 Função Potencial de Velocidade

Uma função potencial $\Phi(x, y, z, t)$, associada a um escoamento irrotacional, é uma expressão matemática com a propriedade de que a componente de velocidade em uma dada direção é simplesmente a derivada da função potencial nessa direção.

$$\vec{V} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \left[\frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right]^T = \nabla \Phi_w(x, y, z, t) \quad (3)$$

Se o fluido é assumido incompressível, o potencial de velocidade satisfaz as equações de Laplace e a teoria é aplicável. Para lançar mão dessa teoria linear, é preciso assumir que a declividade da onda (H/λ) é tão pequena que os termos quadráticos dessa relação podem ser negligenciados. Dessa forma, deslocamentos, velocidades, acelerações e pressões terão uma relação linear com a elevação da superfície. A função potencial associada a uma onda oceânica tem a seguinte forma:

$$\Phi_w(x, z, t) = \varphi(z) \cdot \text{sen}(kx - \omega t) \quad (4)$$

Onde $\varphi(z)$ é uma função que será expressa de forma mais completa uma vez satisfeitas as seguintes condições:

- Condição de continuidade (Equação de Laplace);
- Condição de contorno cinemática no leito marinho;
- Condição de contorno dinâmica na superfície livre;
- Condição de contorno cinemática na superfície livre.

4.2.1.3 Condição de Continuidade

Uma vez que o fluido é homogêneo e incompressível, a condição de continuidade:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

Resulta na equação de Laplace para escoamentos potenciais:

$$\nabla^2 \Phi_w = \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial z^2} = 0 \quad (6)$$

A substituição de (4) em (6) leva à solução homogênea da seguinte equação:

$$\frac{d^2 P(z)}{dz^2} - k^2 P(z) = 0 \quad (7)$$

E a solução para $P(z)$ é da forma:

$$P(z) = C_1 e^{+kz} + C_2 e^{-kz} \quad (8)$$

Finalmente, a função potencial de onda pode ser escrita em termos de dois coeficientes desconhecidos C_1 e C_2 :

$$\Phi_w(x, z, t) = (C_1 e^{+kz} + C_2 e^{-kz}) \cdot \text{sen}(kx - \omega t) \quad (9)$$

4.2.1.4 Condição Cinemática no Leito

A condição cinemática no leito (assumido plano) afirma que a componente vertical de velocidade no leito marinho deve ser zero, de modo que não haja fluxo através da superfície do fundo.

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial z} = 0 \quad \text{em: } z = -h \quad (10)$$

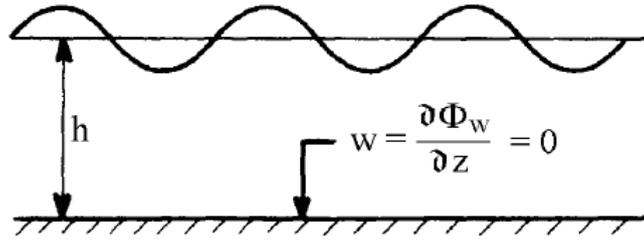


Figura 15 – Condição de contorno cinemática no leito marinho [5]

Dessa forma, a partícula do fluido pode mover-se horizontalmente no leito em um vai-e-vem harmônico – pois o campo potencial de velocidades despreza efeitos viscosos – mas não na direção vertical.

A substituição da condição de contorno na equação (9) fornece:

$$kC_1e^{-kh} - kC_2e^{+kh} = 0 \quad (11)$$

Conhecendo a relação entre C_1 e C_2 , é possível, portanto, chegar à função potencial com apenas uma variável desconhecida C , definida arbitrariamente como:

$$\frac{C}{2} = C_1e^{-kh} = C_2e^{+kh} \quad (12)$$

Substituindo (12) em (9), pode-se chegar, finalmente, a:

$$\Phi_w(x, z, t) = C \cdot \cosh k(h + z) \cdot \text{sen}(kx - \omega t) \quad (13)$$

4.2.1.5 Condição Dinâmica na Superfície Livre

A condição dinâmica na superfície livre requer que a pressão (p) a uma altura $z=\zeta$ seja, necessariamente, igual à pressão atmosférica (p_0), conforme ilustrado na figura a seguir.

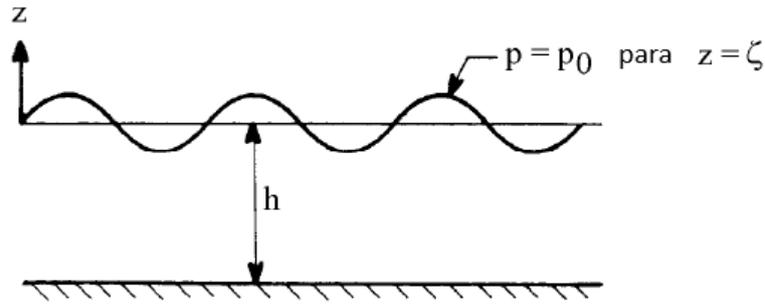


Figura 16 – Condição de contorno dinâmica na superfície livre [5]

A equação de Bernoulli para um fluido irrotacional não-estacionário é, em sua forma geral:

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) + \frac{p}{\rho} + gz = C^* \quad (14)$$

Em duas dimensões, $v=0$. Como a declividade é pequena, pode-se assumir que u e w também são pequenos. Resolvendo para $z=\zeta$, (14) se reduz a:

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + g\zeta + \frac{p_0}{\rho} - C^* = 0 \quad \text{para } z = \zeta \quad (15)$$

O valor constante $p_0/\rho - C^*$ pode ser incluído em $\partial \Phi_w / \partial t$, pois isto não influenciará as velocidades derivadas de Φ_w .

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + g\zeta = 0 \quad \text{para } z = \zeta \quad (16)$$

Resolvendo para ζ chega-se a:

$$\zeta = -\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial \Phi_w}{\partial t} \quad (17)$$

Substituindo a equação (13) na equação (17), o perfil de onda passa a ser o seguinte:

$$\zeta = \frac{\omega C}{g} \cdot \cosh kh \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (18)$$

Ou simplesmente:

$$\zeta = \zeta_a \cdot \cos(kx - \omega t), \quad \text{com } \zeta_a = \frac{\omega C}{g} \cdot \cosh kh \quad (19)$$

Finalmente, a função potencial associada a uma onda, dependendo da profundidade h , é dada pela relação:

$$\Phi_w = \frac{\zeta_a g}{\omega} \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cdot \text{sen}(kx - \omega t) \quad (20)$$

4.2.1.6 Condição Cinemática na Superfície Livre

A condição cinemática na superfície livre é tal que a velocidade vertical da partícula de fluido na superfície livre é idêntica à velocidade vertical da própria superfície livre. Matematicamente, isto traduz-se em:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} \text{ para } z = \zeta \quad (21)$$

O segundo termo é um produto de duas quantidades pequenas, pois a declividade é pequena. Assim, o produto das duas é ainda menor (segunda ordem), e podem ser negligenciados:

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial z} = \frac{dz}{dt} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \text{ para } z = \zeta \quad (22)$$

Diferenciando a equação (16), que também é válida para $z=0$, e utilizando a equação (22), chega-se à condição de contorno cinemática na superfície livre (ou condição de Cauchy-Poisson):

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial t^2} = 0 \text{ para } z = 0 \quad (23)$$

A substituição da equação (20) na equação (23) leva à conhecida relação de dispersão, que relaciona ω e k (ou, ainda, T e λ):

$$\omega^2 = g k \cdot \tanh kh \quad (24)$$

4.2.1.7 Cinemática da Partícula de Fluido e Pressão Dinâmica

A substituição da equação (24) na equação (20) leva às componentes de velocidade nas direções x e z , obtidas a partir da diferenciação do potencial de velocidade:

$$u = \frac{\partial \Phi_w}{\partial x} = \frac{dx}{dt} = \zeta_a \cdot \omega \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (25)$$

$$w = \frac{\partial \Phi_w}{\partial z} = \frac{dz}{dt} = \zeta_a \cdot \omega \cdot \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \cdot \sin(kx - \omega t)$$

A derivação da pressão conforme a teoria linear vem da linearização da equação de Bernoulli:

$$p = -\rho g z - \rho \frac{\partial \Phi_w}{\partial t} \quad (26)$$

Utilizando o potencial de velocidade da equação (20), chega-se à expressão para a pressão linearizada:

$$p = -\rho g z - \rho g \zeta_a \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (27)$$

4.2.2 Ondas Irregulares

4.2.2.1 Definições

À primeira vista, o padrão de elevação da superfície do mar pode parecer confuso, pois o comportamento das ondas oceânicas é muito irregular. Uma representação adequada desse comportamento é imaginar a elevação da superfície como uma superposição de infinitas ondas regulares de amplitudes, períodos, fases e direções de propagação diferentes. O princípio da superposição permite a predição de comportamentos irregulares complexos a partir de uma teoria simples, o que é extremamente útil na engenharia.

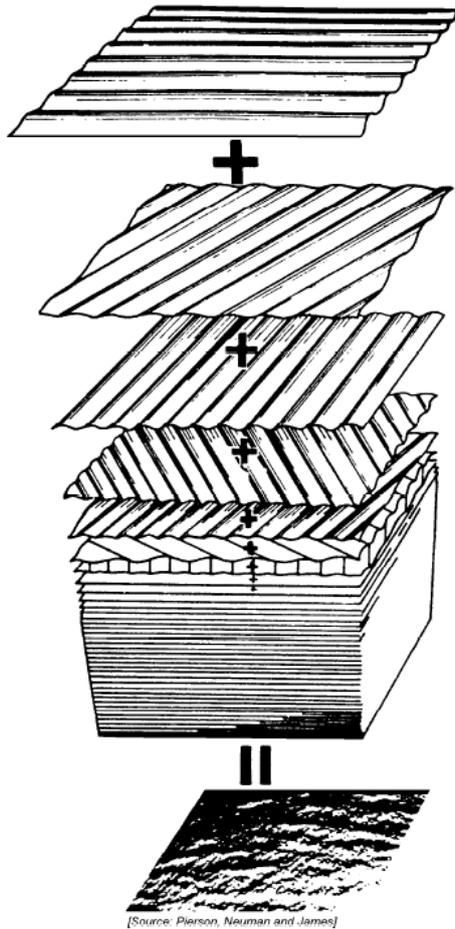


Figura 17 – Representação do mar irregular como sobreposição de ondas regulares [5]

A seguir, serão apresentadas algumas funções distribuições de probabilidade úteis para a representação do carácter aleatório das ondas oceânicas e seus efeitos.

4.2.2.2 Distribuição gaussiana

A distribuição gaussiana mostrou-se bastante adequada para representar a aleatoriedade da elevação da superfície do mar. Considerando que a elevação (ζ) tenha média zero, a função densidade de probabilidade associada é:

$$f(\zeta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left\{-\left(\frac{\zeta}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2\right\} \quad (28)$$

Onde

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \zeta_n^2}$$

é o desvio padrão da elevação da superfície.

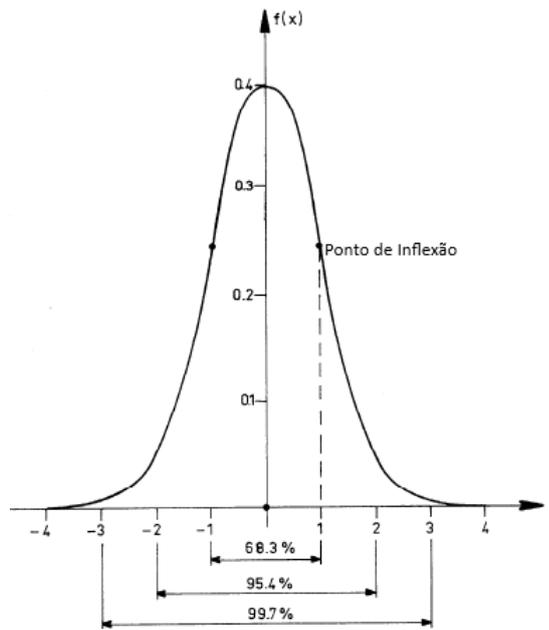


Figura 18 – Função densidade de probabilidade gaussiana (Adaptado de [5])

4.2.2.3 Distribuição de Rayleigh

Se a distribuição gaussiana tem a característica de representar bem a elevação da superfície do mar, a distribuição de Rayleigh é adequada para descrever a estatística de amplitude das ondas oceânicas. A função densidade de probabilidade associada a uma distribuição de Rayleigh das amplitudes de onda é:

$$f(\zeta) = \frac{\zeta_a}{\sigma^2} \cdot \exp \left\{ - \left(\frac{\zeta_a}{\sigma\sqrt{2}} \right)^2 \right\} \quad (29)$$

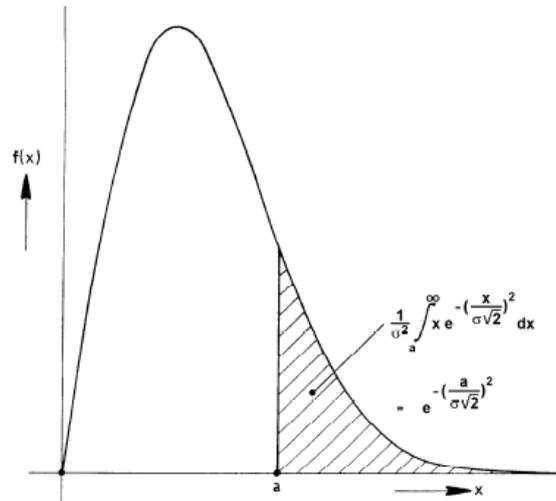


Figura 19 – Função densidade de probabilidade de Rayleigh [5]

Frequentemente é desejável conhecer a máxima elevação associada a um determinado estado de mar. Isto pode ser calculado utilizando a função cumulativa de probabilidade associada à equação (29):

$$P(H_w > H) = \int_H^{\infty} f(H_w) \cdot dH_w = \exp \left\{ -2 \left(\frac{H}{H_{1/3}} \right)^2 \right\} \quad (30)$$

Onde $H_w=2\zeta_a$ é a altura de onda e $H_{1/3}=4\sigma$ é a média associada ao maior terço das alturas nesse estado de mar.

4.2.2.4 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é amplamente utilizada em confiabilidade estrutural e outras áreas devido à sua versatilidade e relativa simplicidade. A função densidade cumulativa de probabilidade de Weibull de uma variável aleatória x é definida em termos de dois parâmetros constantes α e β é a seguinte:

$$P(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\beta} \right)^\alpha \right], \quad x > 0 \quad (31)$$

A função densidade de probabilidade associada a $P(x)$ é obtida da diferenciação da equação (31):

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta} \right)^{\alpha-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{\beta} \right)^\alpha \right], \quad x > 0 \quad (32)$$

O ajuste da distribuição a uma série de dados é feito a partir da regressão linear dos parâmetros α e β :

$$\ln \left(\ln \frac{1}{1 - P(x)} \right) = \alpha \ln x + \alpha \ln \beta \quad (33)$$

De modo que no ajuste de uma reta $y=ax+b$ para os dados da amostra,

$$\alpha = a; e$$

$$\beta = \exp(-b/a).$$

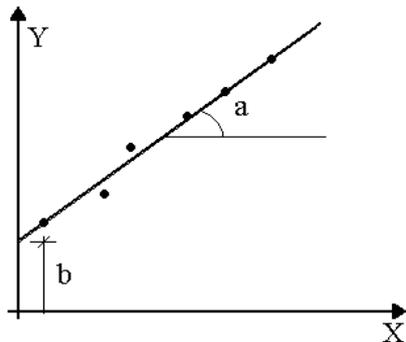


Figura 20 – Ajuste dos parâmetros α e β de uma distribuição de Weibull

4.2.3 Representação Espectral

4.2.3.1 Princípios

Uma vez que ondas irregulares podem ser representadas como uma superposição de ondas regulares senoidais, é razoável analisar as características de um sinal irregular utilizando séries de Fourier.

Uma elevação de onda que se propaga ao longo do eixo x em um mar irregular pode ser escrita como a soma de uma grande quantidade de ondas regulares:

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^N \zeta_{a_n} \cos(k_n x - \omega_n t + \varepsilon_n) \quad (34)$$

Onde, para cada componente n :

ζ_{a_n} é a amplitude da onda;

ω_n é a frequência angular associada ao período da onda;

k_n é o número de onda;

ε_n é um ângulo de fase aleatório.

Se um número suficiente de termos for considerado, é possível reproduzir qualquer sinal de elevações da superfície do mar. As amplitudes ζ_{a_n} podem ser obtidas da análise de Fourier desse sinal, cuja distribuição é suposta gaussiana.

Uma forma de expressar a distribuição das amplitudes em função das frequências é através de um espectro de onda, cuja expressão é:

$$S_{\zeta}(\omega_n) \cdot \Delta\omega = \sum_{\omega_n}^{\omega_n + \Delta\omega} \frac{1}{2} \zeta_{a_n}^2(\omega) \quad (35)$$

Onde $\Delta\omega$ é uma diferença constante entre duas frequências sucessivas. Se multiplicado por ρg , essa expressão fornece a energia total por unidade de área das ondas num intervalo $\Delta\omega$.

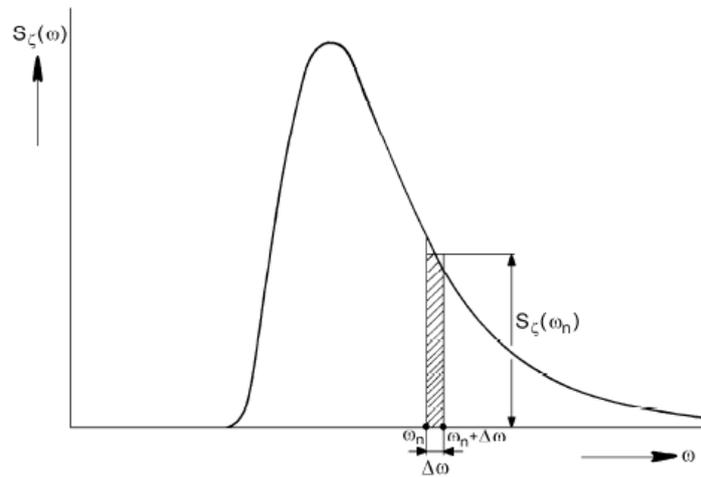


Figura 21 – Representação espectral de um mar irregular [5]

Por definição, se $\Delta\omega \rightarrow 0$, a expressão para o espectro de onda passa a ser a seguinte:

$$S_{\zeta}(\omega_n) \cdot d\omega = \frac{1}{2} \zeta_{a_n}^2 \quad (36)$$

A Figura 22, a seguir, fornece uma interpretação gráfica do espectro de onda, onde as diversas componentes de onda advindas de uma análise de Fourier do sinal irregular são transformadas em um espectro $S_{\zeta}(\omega)$ no domínio da frequência.

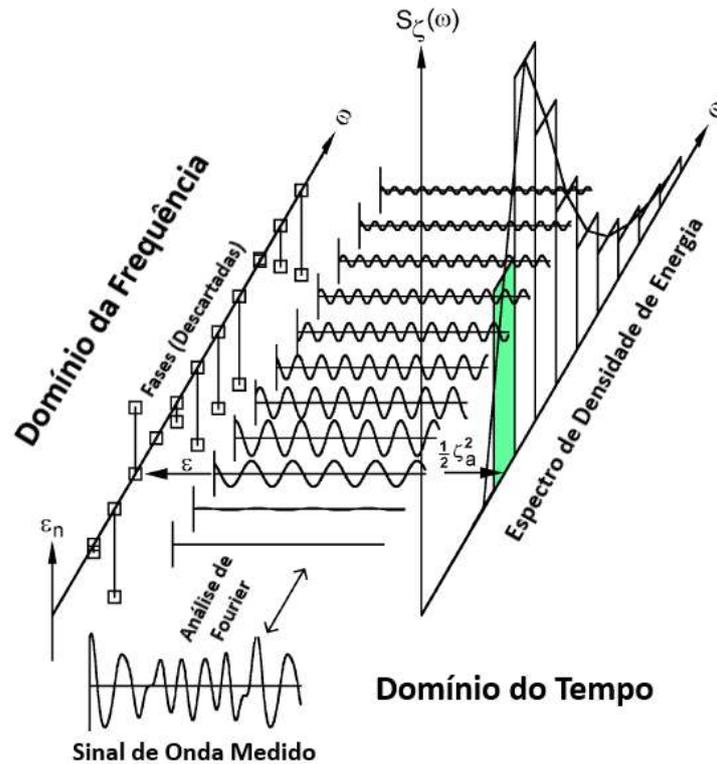


Figura 22 – Correlação domínio do tempo – domínio da frequência (Adaptado de [5])

As propriedades estatísticas do espectro podem ser extraídas calculando os momentos de área sob a curva do espectro.

$$m_{n\zeta} = \int_0^{\infty} \omega^n \cdot S_{\zeta}(\omega) \cdot d\omega \quad (37)$$

$m_{n\zeta}$ representa o momento espectral de ordem n . Isto significa que $m_{0\zeta}$ é a área sob a curva, e que $m_{1\zeta}$ e $m_{2\zeta}$ são, respectivamente, os momentos de primeira e segunda ordens. O cálculo de $m_{0\zeta}$ fornece a variância da elevação da superfície do mar, de modo que o desvio padrão é:

$$\sigma_{\zeta} = \sqrt{m_{0\zeta}} \quad (38)$$

Outras propriedades importantes são:

$$H_{1/3} = 4 \cdot \sqrt{m_{0\zeta}} \quad (39)$$

$$T_z = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m_{0\zeta}}{m_{2\zeta}}} \quad (40)$$

$H_{1/3}$ e T_z são, respectivamente, a altura significativa de onda e o período de cruzamento zero.

A forma do espectro pode ser descrita por formulações bem definidas – assunto que já foi extensamente explorado na literatura. A seguir, serão apresentadas algumas formulações típicas bastante utilizadas na indústria.

4.2.3.2 Espectro de Bretschneider

O espectro de Bretschneider é uma das formulações mais antigas. Foi formulado para mares totalmente desenvolvidos, embora tenha se provado também adequado à representação mares parcialmente desenvolvidos. Sua formulação matemática é como segue:

$$S_{\zeta(\omega)} = \frac{173 \cdot H_{1/3}^2}{T_1^4} \cdot \omega^{-5} \cdot \exp \left\{ \frac{-692}{T_1^4} \cdot \omega^{-4} \right\} \quad (41)$$

O espectro Bretschneider é uma derivação do espectro de Pierson-Moskowitz. A formulação original para mares totalmente desenvolvidos poder ser obtida utilizando uma relação fixa entre altura significativa de onda e período médio:

$$T_1 = 3.86 \cdot \sqrt{H_{1/3}} \quad (42)$$

4.2.3.3 Espectro JONSWAP

O espectro apresentado por Hasselmann et al. em 1973, após análise de dados coletados durante o Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), em 1968 e 1969, consta de uma formulação adequada para a representação de ondas costeiras geradas por vento.

$$S_{\zeta(\omega)} = \frac{320 \cdot H_{1/3}^2}{T_p^4} \cdot \omega^{-5} \cdot \exp \left\{ \frac{-1950}{T_p^4} \cdot \omega^{-4} \right\} \gamma^A \quad (43)$$

Onde

γ é o fator de pico (=3.3 na proposição original)

$$A = \exp \left\{ - \left(\frac{\frac{\omega}{\omega_p} - 1}{\sigma \sqrt{2}} \right)^2 \right\};$$

T_p e ω_p são, respectivamente, período e frequência angular associados ao pico de energia do espectro;

σ é uma função degrau de ω , de modo que: $\sigma = \begin{cases} 0.07, & \text{se } \omega < \omega_p \\ 0.09, & \text{se } \omega > \omega_p \end{cases}$

O espectro JONSWAP é, assim como o espectro Bretschneider, uma modificação do espectro Pierson-Moskowitz, e seu emprego é muito frequente em projetos na costa sul-americana.

4.3 Correntes Marítimas

Correntes marítimas correspondem em geral à maior parcela de contribuição a ambos os carregamentos estático e dinâmico nos *risers*. A importância relativa do carregamento de correntes aumenta proporcionalmente à profundidade do mar. A velocidade e a direção do perfil de corrente podem ser causadas pelo vento, variação de maré, circulação oceânica ou diferença de salinidade.

O vetor soma de todos os componentes da corrente em elevações específicas desde o leito até a superfície do mar descreve o perfil de velocidade e direção para uma determinada localização. A velocidade e a direção da corrente normalmente não são alteradas rapidamente com o tempo e, assim, podem ser tratadas como invariantes para cada estado de mar estudado. Esses perfis podem ser gerados utilizando uma formulação baseada em dados específicos do local ou por relações empíricas.

Matematicamente, o efeito das correntes traduz-se em esforços nos *risers* como uma função quadrática utilizando a formulação de Morison, que será descrita oportunamente.

4.4 Vento

Ventos são fenômenos de natureza randômica, que possuem grandes flutuações de velocidade e direção. É comum que estudos meteorológicos apresentem as velocidades do vento média em um certo período de tempo – usualmente de 1 a 60 minutos, e a uma elevação padrão de 10m a cima da linha d'água.

As forças e momentos totais experimentados por uma estrutura exposta ao vento são devidas a efeitos viscosos (arrasto) ou efeitos potenciais (força de sustentação). Na literatura, várias formulações empíricas estão disponíveis para determinação da velocidade do vento, tal como em [5] e em [8].

5 INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA E EQUAÇÕES DE MOVIMENTO

5.1 Introdução

Este capítulo apresentará como os carregamentos ambientais descritos no capítulo 4 se traduzem em forças nas estruturas oceânicas. O capítulo apresenta as teorias para o cálculo de forças na embarcação (grandes estruturas) e em linhas submarinas (estruturas esbeltas) separadamente, pois em análises globais os dois domínios requerem um tratamento matemático diferenciado.

5.2 Esforços Atuantes no Casco

5.2.1 Resposta da embarcação em ondas

Uma estrutura oscilando em ondas excitada harmonicamente e em regime permanente responde na mesma frequência que a onda que a excita. A hidrodinâmica desse problema é normalmente separada em dois sub-problemas, conforme descrito em [8]:

1. Forças hidrodinâmicas devido à excitação produzida pelas ondas como se a estrutura fosse fixa, isto é, independentes de seu movimento no meio fluido. Essa parcela é composta pela força de Froude-Krylov e pelas forças e momentos de difração;
2. Forças e momentos resultantes no corpo flutuante quando a estrutura é forçada a oscilar em uma determinada frequência. Essa parcela hidrodinâmica é composta pela massa adicionada, amortecimento e restauração hidrostática.

Devido à hipótese da linearidade, as parcelas 1 e 2 podem ser somadas para obter as forças hidrodinâmicas totais. A equação de movimento da embarcação segundo essas premissas é a seguinte, exemplificada pelo movimento de elevação (isto é, na direção local z):

$$(m + a)\ddot{z} + b\dot{z} + cz = F_{FK} + F_D \quad (44)$$

Onde

m é a massa da embarcação

a é a massa adicionada na direção z

b é o coeficiente de amortecimento

c é a rigidez (restauração hidrostática)

F_{FK} e F_D são, respectivamente, as forças de Froude-Krylov e de difração.

Uma descrição dos principais termos envolvidos no cálculo das forças e movimentos da embarcação será feita a seguir.

5.2.1.1 Massa adicionada e amortecimento

Os carregamentos de massa adicionada e amortecimento são forças hidrodinâmicas resultantes da oscilação harmônica do corpo rígido no meio fluido em regime permanente. O movimento forçado resulta em oscilações de pressão na superfície do corpo, cuja integração fornece as forças e momentos resultantes.

Sejam $F_{1..6}$ as forças e momentos resultantes no corpo oscilante e $\eta_{1..6}$ as translações e rotações, pode-se associar os carregamentos de massa adicional e amortecimento da seguinte forma:

$$F_k = -A_{kj} \frac{d^2 \eta_j}{dt^2} - B_{kj} \frac{d\eta_j}{dt} \quad (45)$$

Onde A_{kj} e B_{kj} são, respectivamente, os coeficientes de massa adicional e de amortecimento. Existem um total de 36 coeficientes de massa adicional e 36 coeficientes de amortecimento. As funções A_{kj} e B_{kj} são dependentes da forma do casco, frequência de oscilação e da velocidade de avanço, se houver.

Para determinar o movimento do fluido e do campo de pressões, pode-se lançar mão das derivações feitas na Seção 4.2.1. As mesmas condições de contorno são aplicáveis, com a adição de uma condição de radiação no infinito e de que a velocidade do fluido que se move nas imediações do casco possui a mesma velocidade do casco.

5.2.1.2 Restauração hidrostática

Para movimentos de corpo rígido de pequenas amplitudes, a força de restauração hidrostática comporta-se aproximadamente como aquela produzida por uma mola linear. Uma embarcação flutuando no meio fluido possui forças de restauração apenas nas direções dos movimentos de elevação, jogo e arfagem. As seguintes relações são válidas para os coeficientes de restauração hidrostática segundo Journée [5] e Faltinsen [8]:

$$\text{Elevação:} \quad c_{zz} = \rho g A_{WP} \quad (46)$$

$$\begin{aligned}
\text{Jogo:} \quad c_{\varphi\varphi} &= \rho g \nabla \cdot \overline{GM}_T \\
&= \rho g \nabla (z_B - z_G) + \rho g \iint_{A_{WP}} y^2 ds \\
\text{Arfagem:} \quad c_{\theta\theta} &= \rho g \nabla \cdot \overline{GM}_L \\
&= \rho g \nabla (z_B - z_G) + \rho g \iint_{A_{WP}} x^2 ds
\end{aligned}$$

Onde A_{WP} é a área no plano de flutuação; ∇ é o deslocamento da embarcação; z_G e z_B são, respectivamente, as coordenadas verticais dos centros de gravidade e de carena; \overline{GM}_T e \overline{GM}_L são as alturas metacêntricas transversal e longitudinal.

5.2.1.3 Forças de excitação

As forças de excitação tratadas nessa seção são aquelas induzidas pela incidência ondas considerando a embarcação imóvel. Os efeitos de pressão podem ser divididos em dois:

1. Força induzida por um campo de pressões não perturbado, isto é, que negligencia interferência da presença do casco no campo de pressões;
2. Força de alteração no campo de pressões devido à presença do casco.

O primeiro efeito é conhecido como força de Froude-Krylov, onde as forças de onda atuantes numa estrutura são calculadas através da integração das pressões na área sobre a qual a onda atua. Uma premissa importante é de que a estrutura em questão deve ser pequena em relação ao comprimento de onda, de modo que a presença da estrutura não interfira significativamente no campo de pressões gerados pela propagação da onda oceânica. Por esse motivo, para a devida aplicação da teoria de Froude-Krylov a situações práticas, é preciso fazer as devidas correções em função da alteração do escoamento devido à presença da estrutura.

A pressão dinâmica atuante no corpo flutuante devido à passagem da onda, conforme a teoria linear, pode ser expressa pela equação apresentada na seção 4.2.1.7:

$$p = -\rho g z - \rho g \zeta_a \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (47)$$

A pressão calculada em um determinado ponto da superfície submersa atua normalmente à superfície nesse ponto, e a força total na estrutura em uma direção é dada pela integração da componente de pressão nessa direção. As expressões para as forças e momentos resultantes podem ser escritas da seguinte forma:

$$\begin{aligned}\vec{F} &= - \iint_S (p \cdot \vec{n}) \cdot dS \\ \vec{M} &= - \iint_S p \cdot (\vec{n} \times \vec{r}) \cdot dS\end{aligned}\tag{48}$$

O termo dS representa um elemento infinitesimal de área da superfície submersa. O termo \vec{n} é o vetor normal à superfície dS e \vec{r} é o vetor posição da superfície dS .

O segundo efeito é conhecido como força de difração, que é significativo quando a estrutura é demasiado grande em relação ao comprimento de onda. Nesse caso, as ondas incidentes sobre a estrutura sofrem uma dispersão significativa e o efeito deve ser considerado no cálculo das forças de onda sobre o corpo flutuante.

O cálculo para as forças de difração é feito de forma semelhante ao cálculo dos componentes de massa adicionada e amortecimento: é preciso resolver um problema de valor de contorno para o potencial de velocidades. Nessa condição de contorno, a derivada normal ao corpo do potencial de velocidade de difração deve ser oposta e da mesma magnitude da velocidade normal do sistema não perturbado. Mais detalhes sobre a dedução das forças de difração podem ser vistos em [5].

O cálculo das forças de excitação para formas gerais de cascos normalmente é feito utilizando métodos numéricos, onde é realizada a integração das forças de pressões de Froude-Krylov e de difração. Se a informação de interesse for apenas as forças de excitação, dispensando o conhecimento sobre a distribuição de pressões, é possível lançar mão das relações de Haskind descritas em [17].

Existem, ainda, efeitos associados à viscosidade. Quando relevantes (como no caso do movimento de jogo de um FPSO), os coeficientes de amortecimento associados às forças viscosas precisam ser obtidos de ensaios experimentais e inseridos separadamente no *software* para o cálculo da resposta dinâmica.

5.2.1.4 Função de Transferência

Utilizando novamente o exemplo do movimento de elevação conforme apresentado na equação (44), é assumido que a resposta a uma onda regular no regime permanente é também harmônica:

$$z = z_a \cos(\omega t + \varepsilon_{z\zeta}) \quad (49)$$

A divisão da elevação z pela amplitude ζ_a da onda que produziu tal elevação configura o que é denominada função de transferência, pois relaciona diretamente a resposta da embarcação à onda incidente.

$$H_z(\omega) = \frac{z}{\zeta_a} = \frac{z_a}{\zeta_a} \cos(\omega t + \varepsilon_{z\zeta}) \quad (50)$$

A função $H_z(\omega)$ é também conhecida como *Response Amplitude Operator* (RAO), ou Operador de Amplitude de Resposta, em português. RAOs são amplamente empregados pela indústria para a realização de simulações desacopladas, onde considera-se que os efeitos não-lineares produzidos pela dinâmica dos *risers* e linhas de ancoragem não têm influência significativa nos movimentos da embarcação (ver seção 3.3).

5.2.1.5 Resposta em ondas irregulares

O conceito de espectro de energia de ondas foi definido na seção 4.2.2. Analogamente, pode-se produzir um espectro de movimentos da embarcação, exemplificado abaixo para o movimento de elevação:

$$\begin{aligned} S_z(\omega)d\omega &= \frac{1}{2} z_a^2(\omega) \\ &= \left[\frac{z_a}{\zeta_a} \right]^2 \cdot \frac{1}{2} \zeta_a^2(\omega) \\ &= H_z^2(\omega) \cdot S_\zeta(\omega) \cdot d\omega \end{aligned} \quad (51)$$

Essa dedução relaciona o espectro de movimento da embarcação à função de transferência e ao espectro de energia do mar.

$$S_z(\omega) = H_z^2(\omega) \cdot S_\zeta(\omega) \quad (52)$$

Por tratar-se de uma resposta linear, as propriedades estatísticas relacionadas aos momentos espectrais descritas anteriormente são igualmente válidas para o espectro de resposta da embarcação.

5.2.2 Forças de segunda ordem, corrente e vento

Este trabalho ocupa-se apenas da investigação dos efeitos derivados dos movimentos de primeira ordem. Forças de onda de segunda ordem, corrente e vento não serão levados em consideração, mas descrições detalhadas de como considerar matematicamente essas forças em um modelo computacional podem ser vistas em [5] e [8].

5.3 Esforços Atuantes em Risers e Linhas de Ancoragem

5.3.1 Equação de Morison

Carregamentos hidrodinâmicos em estruturas esbeltas podem ser aproximados utilizando a equação de Morison, expressas em termos da velocidade relativa entre fluido e estrutura e suas acelerações. Os vetores velocidade e aceleração podem ser encontrados considerando as contribuições dos efeitos de onda e corrente marítima como uma superposição linear.

As forças hidrodinâmicas são decompostas nas suas componentes normal e tangencial, e são calculadas de forma independente. Dessa forma, os vetores velocidade e aceleração também são decompostos em componentes normal e tangencial em relação à estrutura submersa.

As equações de Morison foram originalmente concebidas para descrever as forças horizontais de onda incidentes em uma coluna vertical que se estende desde o fundo até acima da superfície livre. Trata-se de uma formulação muito utilizada para calcular as forças de um fluxo sobre um corpo esbelto, isto é, com dimensão transversal característica (D) pequena em relação ao comprimento de onda (λ). Um critério prático consiste em verificar se a seguinte relação é atendida:

$$\frac{D}{\lambda} < 0,2 \quad (53)$$

Considera-se que a força de onda é composta pela soma de duas parcelas:

1. Uma parcela de arrasto associada a efeitos viscosos, que é proporcional ao quadrado da velocidade do fluido em relação ao corpo;
2. Uma parcela inercial proporcional às acelerações do fluido e do corpo.

A equação de Morison para as componentes normal e tangencial de seções circulares pode ser expressa da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 f_n &= \frac{1}{2} \rho C_D^n D_h |v_n - \dot{r}_n| (v_n - \dot{r}_n) + \rho \frac{\pi D_b^2}{4} C_M^n \dot{v}_n - \rho \frac{\pi D_b^2}{4} (C_M^n - 1) \ddot{r}_n \\
 f_t &= \frac{1}{2} \rho C_D^t D_h |v_t - \dot{r}_t| (v_t - \dot{r}_t) + \rho \frac{\pi D_b^2}{4} C_M^t \dot{v}_t - \rho \frac{\pi D_b^2}{4} (C_M^t - 1) \ddot{r}_t
 \end{aligned}
 \tag{54}$$

Onde:

- f_n Força por unidade de comprimento na direção normal
- f_t Força por unidade de comprimento na direção tangencial
- ρ Massa específica do meio fluido
- D_b Diâmetro equivalente da seção transversal para descrição do empuxo resultante
- D_h Diâmetro hidrodinâmico
- v_n, \dot{v}_n Velocidade e aceleração do fluido na direção normal
- \dot{r}_n, \ddot{r}_n Velocidade e aceleração da estrutura na direção normal
- C_D^n, C_M^n Coeficientes de arrasto e inércia na direção normal
- v_t, \dot{v}_t Velocidade e aceleração do fluido na direção tangencial
- \dot{r}_t, \ddot{r}_t Velocidade e aceleração da estrutura na direção tangencial
- C_D^t, C_M^t Coeficientes de arrasto e inércia na direção tangencial

Na implementação no modelo de elementos finitos, os dois primeiros termos são incluídos no vetor de carregamento externo, enquanto o último (massa adicional) é incluído na matriz de massa.

Considera-se que a equação de Morison é um método semi-empírico, pois as parcelas de arrasto e inércia são influenciadas por coeficientes adimensionais (C_D e C_M), que devem ser calibrados a partir de resultados experimentais. Para a análise de *risers*, é

comum a utilização valores do coeficiente de arrasto C_D entre 0,7 e 1,2. Para o coeficiente de inércia C_M , um valor igual a 2 é assumido. A parcela $(C_M - 1)$ muitas vezes é denominada coeficiente de massa adicional (C_A), e está associada à inércia adicionada ao sistema devido ao deslocamento de fluido junto ao corpo.

É evidente que as equações consideram que a resposta do *riser* está alinhada com a direção do fluxo incidente. Isto quer dizer que a formulação de Morison omite efeitos de sustentação e forças associadas ao movimento oscilatórios, por exemplo.

Os carregamentos hidrodinâmicos expressos pela equação de Morison são uma grande fonte de não linearidades na resposta das linhas submarinas.

5.3.2 Carregamento devido à pressão hidrostática

Os carregamentos nos *risers* devido às pressões interna e externa são, normalmente, expressos em termos da tração efetiva. Trata-se da tração axial calculada em qualquer ponto do *riser* considerando apenas a tração de topo e o peso aparente da estrutura e de seus conteúdos. O conceito de tração efetiva é quase sempre empregado para verificação da susceptibilidade de um *riser* à flambagem nos ambientes estudados. É boa prática na indústria evitar que a tração efetiva em qualquer ponto da linha assuma valores negativos. Esse conceito é descrito em detalhes em [15], cuja expressão é a seguinte:

$$T_e = T_w - A_i P_i + A_e P_e \quad (55)$$

Onde:

T_e é a tração efetiva

T_w é a tração verdadeira na parede do duto (isto é, a tensão axial resultante da integração da tensão axial na seção transversal do duto)

A_i e A_e são as áreas interna e externa da seção transversal

P_i e P_e são as pressões interna e externa.

A formulação da tração efetiva é muito conveniente para a implementação computacional, pois favorece a eficiência e a estabilidade da solução.

5.3.3 Excitação forçada devido aos movimentos do corpo flutuante

O movimento do sistema flutuante impõe deslocamentos nos *risers* e linhas de ancoragem. Tais deslocamentos aumentam os esforços nos dutos, que podem ser críticos em alguns casos.

Os movimentos das conexões de topo podem ser avaliados de diversas formas como, por exemplo, utilizando formulações acopladas ou desacopladas. Uma discussão mais detalhada sobre esse assunto pode ser vista no Capítulo 3.

5.3.4 Amortecimento estrutural

O modelo de amortecimento estrutural mais comumente utilizado em análises globais de *risers* é o modelo de Rayleigh, descrito pela formulação abaixo:

$$\mathbf{C} = \alpha_1 \mathbf{M} + \alpha_2 \mathbf{K} \quad (56)$$

A equação descrita acima representa a matriz global de amortecimento (\mathbf{C}) como uma combinação linear das matrizes de massa (\mathbf{M}) e rigidez (\mathbf{K}). Os escalares α_1 e α_2 são denominados coeficientes de amortecimento proporcionais à massa e à rigidez, respectivamente.

A taxa de amortecimento estrutural do sistema (ξ) pode então ser expressa em termos dos coeficientes α_1 e α_2 e da frequência de resposta (ω) da seguinte forma:

$$\xi = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_1}{\omega} + \alpha_2 \omega \right) \quad (57)$$

O gráfico abaixo mostra como as parcelas de amortecimento dependentes da massa e da rigidez variam em função da frequência de resposta do sistema.

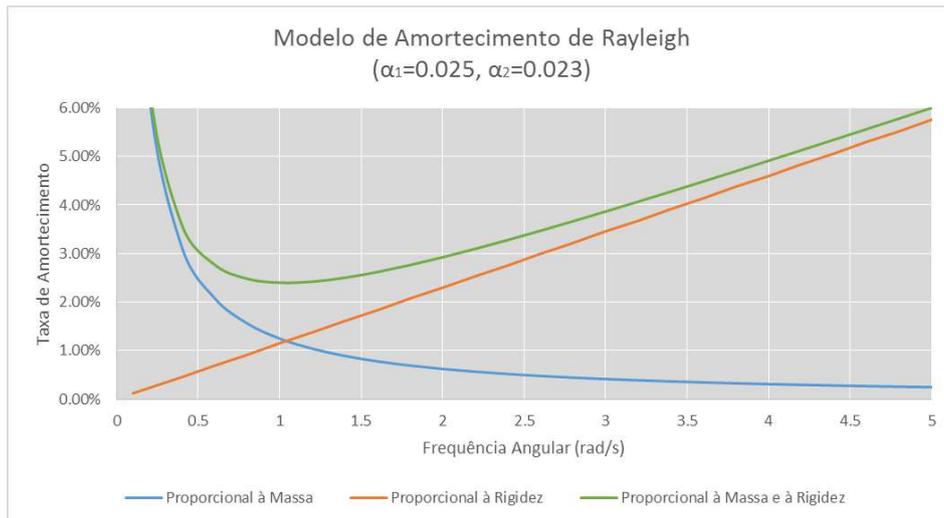


Figura 23 – Variação do amortecimento em função da frequência

A fração de amortecimento dependente da massa assume valores muito grandes para períodos de resposta muito pequenos. Em um sistema sujeito a excitações de primeira e segunda ordens, por exemplo, os coeficientes de amortecimento deveriam ser escolhidos cuidadosamente para não resultar em uma taxa de amortecimento estrutural excessiva, o que comprometeria a qualidade da resposta simulada. Por esse motivo, é comum negligenciar a parcela de amortecimento dependente da massa para estruturas sujeitas a grandes deslocamentos do corpo flutuante, sobrando apenas a parcela dependente da rigidez [12].

$$\xi = \alpha_2 \frac{\omega}{2} \quad (58)$$

O coeficiente de amortecimento proporcional à rigidez, por sua vez, aumenta linearmente com a frequência. Em aplicações práticas, o coeficiente α_2 é escolhido de modo a fornecer valores realistas de amortecimento na frequência dominante. No caso de sistemas sujeitos a excitações na frequência da onda e de baixa frequência, o coeficiente de amortecimento proporcional à rigidez será escolhido em função da excitação na frequência da onda (tipicamente o período de pico no espectro de energia de elevação do mar). Essa abordagem é considerada realista, pois não é esperada uma contribuição significativa de amortecimento estrutural em movimentos de baixa frequência.

5.4 Equações de movimento

5.4.1 Dinâmica do corpo flutuante

Em dinâmica de corpos flutuantes, a embarcação é quase sempre representada como um corpo rígido, pois as deformações da estrutura são muito pequenas em relação às translações e rotações do corpo como um todo. Essa simplificação permite que todo o movimento da embarcação seja expresso em termos de translações e rotações em relação a um ponto de referência. A Figura 24, a seguir, apresenta a nomenclatura dos movimentos oscilatórios de um navio excitado por ondas para os seus 6 graus de liberdade em torno de um sistema de coordenadas locais (X, Y, Z):

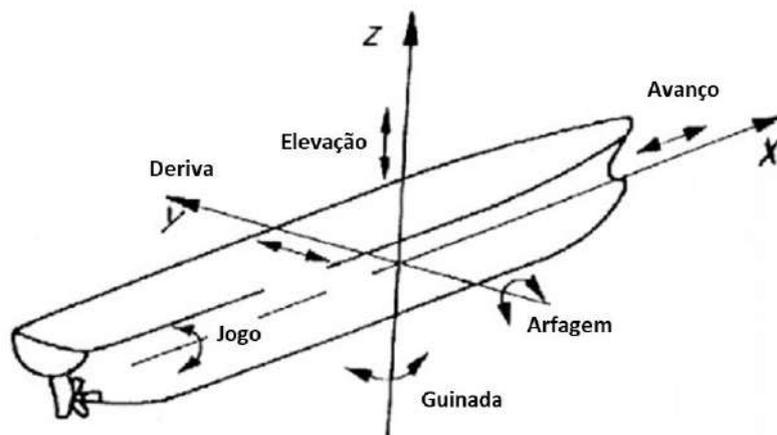


Figura 24 – Movimentos do corpo flutuante nos 6 graus de liberdade em torno de um ponto de referência

Os movimentos do corpo flutuante podem ser expressos em termos de coordenadas locais (ou estruturais, em um sistema fixo ao corpo) e globais (em relação a um referencial inercial externo ao corpo). A relação entre os dois sistemas de coordenadas, considera-se que a translação do casco em termos de coordenadas globais é a própria translação da origem do sistema (X, Y, Z). A rotação da embarcação é a variação angular dos eixos do sistema estrutural em relação ao sistema global, que pode ser expressa em termos dos ângulos de Euler, doravante denominados α , β e γ .

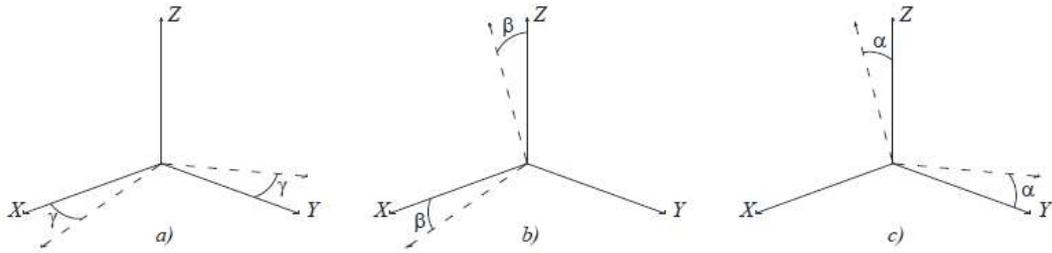


Figura 25 – Rotações em torno dos eixos no sistema de coordenadas local

Os ângulos α , β e γ representam os giros em relação aos eixos locais X (jogo), Y (arfagem) e Z (guinada). A transformação de coordenadas de um ponto no sistema global para o sistema de coordenadas local pode ser feita como segue:

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = \mathbf{A} \begin{Bmatrix} x - \Delta x \\ y - \Delta y \\ z - \Delta z \end{Bmatrix} \quad (59)$$

Onde:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \alpha & \sin \beta \cos \alpha & -\sin \alpha \\ -\sin \beta \cos \gamma + \cos \beta \sin \alpha \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma + \sin \beta \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \gamma \\ \sin \beta \sin \gamma + \cos \beta \sin \alpha \cos \gamma & -\cos \beta \sin \gamma + \sin \beta \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \gamma \end{bmatrix}$$

Os vetores de coordenadas nos sistemas global e local podem ser representados pelos símbolos \mathbf{x} e \mathbf{X} , respectivamente. O vetor $\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{Bmatrix}$ representa as translações no espaço. A matriz \mathbf{A} é ortonormal, de modo que a sua inversa é igual à sua transposta. A transformação inversa à equação (59), ou seja, a expressão das coordenadas do ponto em termos de coordenadas globais é:

$$\mathbf{x} = \mathbf{u} + \mathbf{A}^T \mathbf{X} \quad (60)$$

A expressão para o vetor de velocidades $\boldsymbol{\omega}$ no sistema global pode ser feita em termos das derivadas no tempo dos ângulos de Euler, definidos como vetor $\boldsymbol{\theta}$.

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{B} \cdot \frac{d\boldsymbol{\theta}}{dt} \quad (61)$$

Onde:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & \cos \gamma & \cos \alpha \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma \end{bmatrix}$$

A transformação inversa a (61) dá-se a partir da seguinte relação:

$$\frac{d\boldsymbol{\theta}}{dt} = \mathbf{B}^{-1} \cdot \boldsymbol{\omega} \quad (62)$$

A segunda lei de Newton pode ser expressa em termos de vetores \mathbf{f} (forças externas) e \mathbf{m} (momentos), como segue:

$$\mathbf{f} = \frac{d}{dt}(\mathbf{M}\mathbf{v})$$

$$\mathbf{m} = \frac{d}{dt}(\mathbf{I}\boldsymbol{\omega}) \quad (63)$$

Onde as matrizes de massa (\mathbf{M}) e inércia (\mathbf{I}) são, respectivamente:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{11} & -J_{12} & -J_{13} \\ -J_{21} & I_{22} & -J_{23} \\ -J_{31} & -J_{32} & I_{33} \end{bmatrix}$$

5.4.2 Movimento das linhas submarinas

Os componentes linhas de ancoragem e *risers* são corpos esbeltos cuja descrição matemática do comportamento estrutural é de natureza altamente não-linear. As principais fontes de não-linearidades presentes no sistema são:

- Variação da tração no tempo;
- Carregamentos hidrodinâmicos, como a parcela quadrática de forças de arrasto na equação de Morison;
- Grandes rotações no espaço tridimensional;
- Forças de contato ou fricção entre *riser* e embarcação ou devido à variação da área de contato com o leito marinho.

O modelo matemático que representa o comportamento estrutural e hidrodinâmico das linhas submarinas é um problema de valor inicial e de contorno constituído por um sistema de equações diferenciais parciais que descrevem as equações de movimento. A solução do problema é feita empregando métodos numéricos de discretização no espaço e no tempo.

A discretização espacial do problema visa converter as equações diferenciais parciais em equações diferenciais ordinárias, de resolução mais simples. O emprego de

métodos numéricos é feito quando a solução analítica é impossível ou ao menos muito difícil. O método dos elementos finitos consiste na divisão do meio físico contínuo em regiões finitas, de pequena dimensão em relação ao todo. Cada elemento resultante da subdivisão do meio físico deve ser suficientemente pequeno para a apreciação das deformações na estrutura. O equilíbrio é estabelecido para cada uma dessas pequenas regiões, e sua integração para a solução de todo o sistema leva em conta a interação entre elementos. Para a modelagem de *risers* e linhas de ancoragem em simulações associadas a análises globais, dois tipos de elementos são utilizados: elementos de pórtico e elementos de treliça.

Os elementos de treliça têm em cada nó três graus de liberdade de translação. Essa propriedade faz com que esses elementos sejam adequados para a representação de linhas de rigidez flexional negligenciável, como linhas de ancoragem constituídas de amarras ou poliéster.

Elementos de pórtico possuem seis graus de liberdade de cada nó: três de translação e três de rotação. Esse tipo de elemento representa também a rigidez flexional das linhas, sendo mais adequado para a representação dos *risers*.

A discretização no tempo, por sua vez, é feita dividindo o espaço temporal em intervalos pequenos de integração. Cada intervalo de tempo Δt deve ser suficientemente pequeno para capturar todos os efeitos de interesse para a análise. A solução do problema dinâmico no tempo requer a solução da equação diferencial representativa do movimento da estrutura, descrita abaixo:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (64)$$

Onde \mathbf{M} , \mathbf{C} e \mathbf{K} são, respectivamente, as matrizes de massa, amortecimento e rigidez. Os termos $\ddot{\mathbf{u}}(t)$, $\dot{\mathbf{u}}(t)$ e $\mathbf{u}(t)$ são os vetores de acelerações, velocidades e deslocamentos. O vetor $\mathbf{F}(t)$ representa as forças resultantes na estrutura.

A solução da Equação (64) requer o emprego de um método específico, como o método de Newton-Raphson, que é amplamente utilizado para a resolução de problemas não-lineares. Mais detalhes sobre o método do elementos finitos e métodos de solução podem ser vistos em [11], [24], [25] e [13].

6 ESTUDOS DE CASOS

6.1 Introdução

Este trabalho propõe-se a investigar a relevância da influência do acoplamento de *risers* e linhas de ancoragem na resposta movimento de jogo de uma embarcação do tipo FPSO. Nesta seção, serão descritos os pormenores do estudo de caso conduzido a fim de quantificar tais efeitos.

Descrições dos softwares e do modelo numérico utilizados estão incluídos e serão apresentadas mais adiante. A metodologia aqui empregada consta de três etapas:

1. Avaliação da compatibilidade das respostas de jogo comparando as respostas de movimento geradas pelos RAOs de movimentos e de forças desconsiderando a presença das linhas submarinas;
2. Simulações com ondas regulares – Análises acoplada considerando a presença das linhas submarinas; e
3. Simulações com ondas irregulares – Análises acoplada e desacoplada.

O primeiro passo consistirá em verificar a compatibilidade entre as soluções utilizando as formulações acoplada e desacoplada sem contemplar a presença das linhas. Um RAO de movimentos será gerado a partir da análise acoplada e confrontado com a curva proveniente do software de radiação/difração. O objetivo é verificar se o programa de análise acoplada é capaz de reproduzir no domínio do tempo o mesmo comportamento linearizado previsto nos RAOs de movimento, fornecendo credibilidade à simulação acoplada. Isto garantirá, na parcela que diz respeito somente ao casco da embarcação, contribuições aproximadamente idênticas ao sistema – conhecimento importante quando houver comparação entre as metodologias acoplada e desacoplada quando as linhas submarinas forem consideradas.

Análises acopladas considerando as linhas submarinas serão conduzidas sem fazer qualquer alteração na posição do centro de gravidade da embarcação. Isto visa demonstrar o surgimento de banda em função do deslocamento do centro de gravidade do sistema quando da incorporação das linhas submarinas e o quanto afeta a banda da embarcação.

Para gerar um RAO de movimentos com a influência das linhas submarinas passível de comparação com os casos anteriores, o centro de gravidade da embarcação será deslocado de modo a compensar possíveis inclinações iniciais (trim e banda) que possam ter surgido da anexação lateral dos *risers* ao casco, simulando uma compensação

com lastro. Além das séries temporais de movimento de jogo das condições simuladas, as séries de elevações de um ponto no balcão lateral à meia-nau serão comparadas com o objetivo de identificar variações no translado do topo das linhas submarinas.

Finalmente, simulações utilizando ondas irregulares serão realizadas para comparação de parâmetros estatísticos do movimento do casco, além dos esforços a que os *risers* flexíveis estariam sujeitos, como tração de topo.

Em todo o curso do texto, a metodologia utilizada e os resultados obtidos serão descritos em detalhes.

6.2 Sistema de produção estudado

O objetivo deste trabalho é investigar a influência das linhas submarinas no desempenho dinâmico da embarcação quando submetida a carregamentos ambientais – em particular sob efeito das ondas oceânicas. Assim, o estudo foi conduzido baseado em um modelo computacional com capacidade de reproduzir um sistema físico com características que evidenciem tais efeitos.

O sistema em questão é constituído de uma embarcação do tipo FPSO com um balcão a bombordo de onde pendem 88 *risers* flexíveis em catenária. A lâmina d'água é de 790m de profundidade e o sistema de ancoragem consta de 18 linhas arranjadas em *spread mooring*, o que concede à plataforma uma pequena liberdade de passeio em torno da posição central. As principais dimensões da embarcação estão listadas na Tabela 1 e as coordenadas do centro de gravidade na Tabela 2.

Somente a condição da embarcação em seu calado mais leve foi estudada, pois o pequeno deslocamento e níveis de amortecimento viscoso reduzidos devido ao baixo volume submerso compõe uma situação ideal para a apreciação da influência das linhas submarinas no movimento de jogo da embarcação.

A Figura 26 ilustra o arranjo do FPSO e suas linhas submarinas conforme modelado no SITUA-PROSIM.

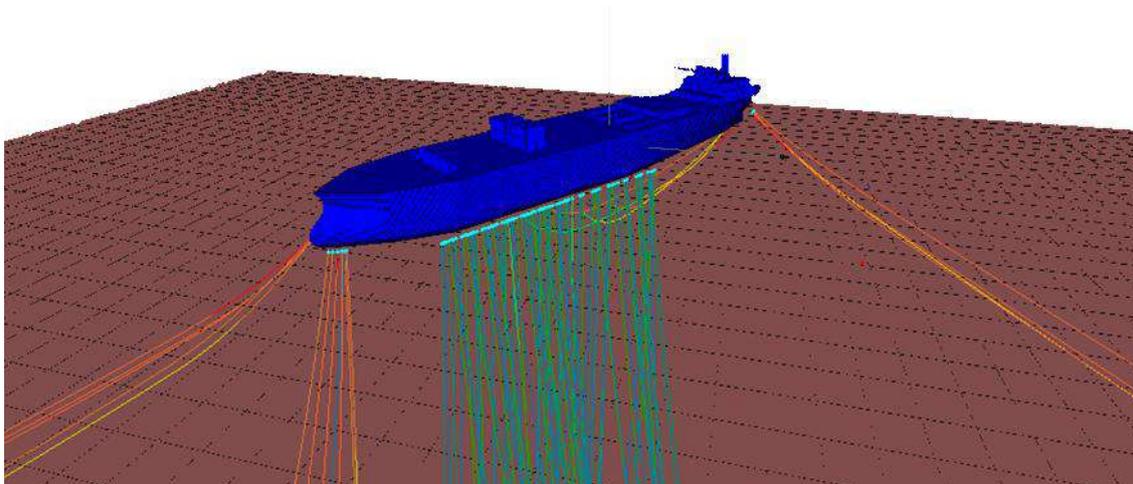


Figura 26 – Modelo computacional conforme implementado no SITUA-Prosím

Tabela 1 – Dimensões principais do FPSO

Dimensão	Valor em escala real
Comprimento	320,0 m
Boca	54,5 m
Pontal	27,0 m
Calado	8,0 m
Deslocamento	1,1E+05 ton
Inércia em x	4,8E+07 ton.m ²
Inércia em y	9,6E+08 ton.m ²
Inércia em z	9,6E+08 ton.m ²

Tabela 2 – Centro de Gravidade do FPSO

Propriedade	Valor em escala real
LCG em relação à meia-nau, positivo à vante	8,9 m
TCG (m) em relação à linha de centro, positivo a bombordo	0,0 m
VCG (m) em relação à linha de base, positive para cima	17,8 m

Os coeficientes que ditam a resposta da embarcação em ondas foram obtidos a partir de um software de radiação/difração para análise dos esforços das ondas sobre o casco. A Figura 27 e a Figura 28 apresentam as características do movimento de jogo da plataforma através de seus RAOs de movimento e de forças para incidências de onda a bombordo e a boreste.

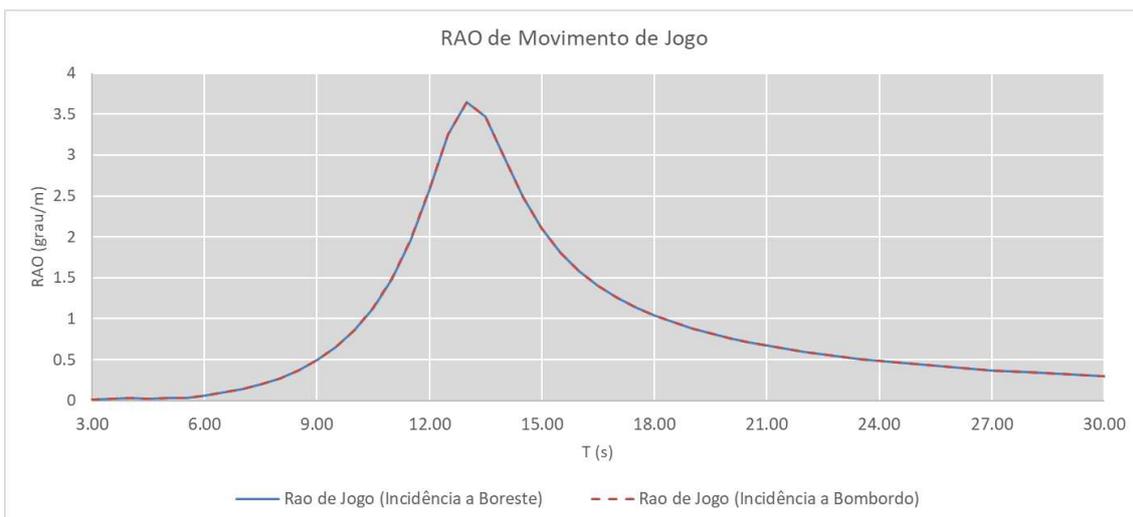


Figura 27 – RAO de movimento de jogo do FPSO para incidências de onda a boreste e a bombordo

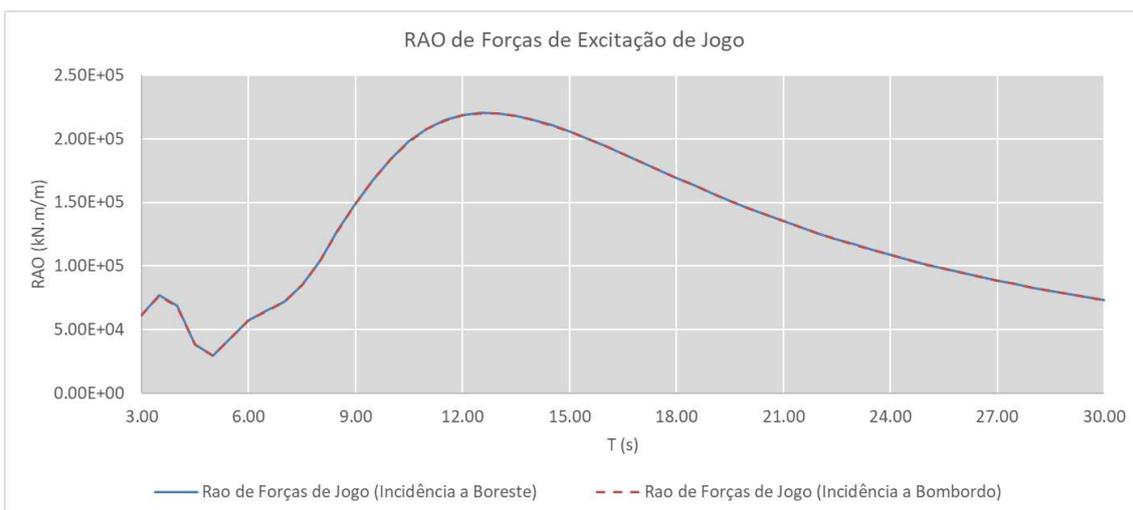


Figura 28 – RAO de forças de excitação de jogo do FPSO para incidências de onda a boreste e a bombordo

Na Figura 27 e na Figura 28, observa-se simetria entre as respostas quando a incidência da onda se dá em qualquer um dos bordos – o que é perfeitamente razoável, visto que o casco é simétrico em relação à linha de centro.

As posições das conexões de topo das linhas submarinas com relação a um ponto na quilha à meia-nau e suas propriedades físicas estão listadas da Tabela 11 à Tabela 13, no APÊNDICE A. As propriedades hidrodinâmicas associadas à equação de Morison (Seção 5.3.1) de todas as linhas submarinas estão listadas na Tabela 3. A Figura 29 ilustra o sistema de coordenadas local para uma melhor interpretação dessas informações.

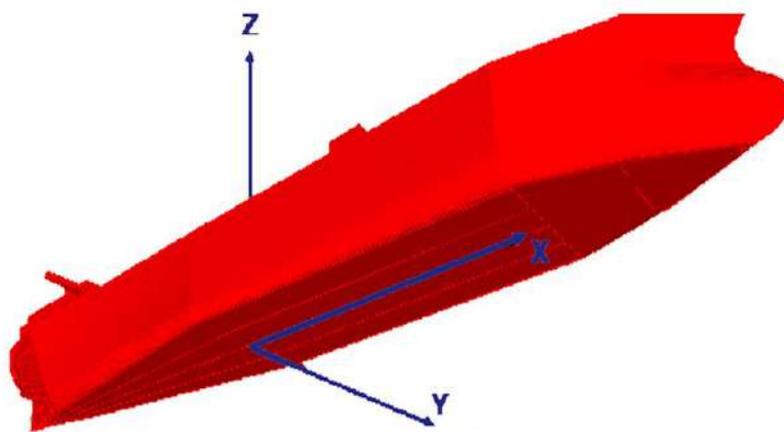


Figura 29 – Sistema de coordenadas local

Tabela 3 – Propriedades hidrodinâmicas das linhas submarinas associadas à equação de Morison

Material	CM	CDN	CDL	CA
Amarra	3,7	2,4	0	1,0
Poliéster	2,0	1,2	0	1,0
Riser Flexível	2,0	1,2	0	1,0

No modelo proposto, o solo é considerado plano, com propriedades elásticas (lineares) e friccionais (atrito de Coulomb). O contato entre solo e risers é modelado atualizando a matriz de rigidez das linhas nos locais apropriados. As propriedades do solo aplicadas a todas as linhas submarinas são idênticas e estão listadas na Tabela 4:

Tabela 4 – Propriedades do solo elástico

Propriedade	Valor
Limite elástico axial	0,03m
Limite elástico transversal	0,2m
Coefficiente de atrito axial	0,3
Coefficiente de atrito transversal	0,5
Rigidez vertical	600kN/m/m

6.3 Programas de Simulação

6.3.1 SITUA-PROSIM

Para realização das simulações foi utilizado o software SITUA-PROSIM [13], de propriedade da Petrobras e desenvolvido pelo Laboratório de Métodos Computacionais e Sistemas Offshore (LAMCSO) do Programa de Engenharia Civil da COPPE-UFRJ. Trata-se de uma ferramenta computacional com capacidade de resolver problemas dinâmicos através das formulações acoplada ou desacoplada.

O software incorpora, em uma única estrutura de código e de dados, um modelo hidrodinâmico para a representação do casco da unidade flutuante e um modelo de elementos finitos para a representação da dinâmica estrutural das linhas de ancoragem e *risers* sob ação de carregamentos funcionais (peso próprio) e ambientais (ondas, correnteza e vento).

De posse desses recursos, o SITUA-PROSIM dispõe de capacidade para calcular os movimentos do corpo flutuante considerando a interação não-linear entre os esforços atuantes no casco e o comportamento estrutural e hidrodinâmico global das linhas submarinas. Durante as simulações, a cada passo do processo de integração no tempo das equações de movimento do casco, as forças no topo produzidas pela solução dos modelos de elementos finitos de todas as linhas somam-se aos carregamentos devido a onda, vento e correnteza, produzindo uma interação mútua entre ambos os domínios.

Para a análise dos movimentos do caso, o SITUA-PROSIM incorpora uma formulação de difração/radiação da teoria potencial (ver Seção 5.2.1). É possível, ainda prescrever os movimentos em função das ondas através da utilização de RAOs de movimento.

6.3.2 WAMIT

O WAMIT, acrônimo de *Wave Analysis MIT*, é um programa de radiação/difração baseado no método dos painéis [14] desenvolvido pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). É amplamente empregado para análise linear da interação entre um corpo flutuante e as ondas oceânicas, sendo considerado um *benchmark* em sua categoria. Neste trabalho, os coeficientes que ditam a resposta da embarcação em termos de forças e amplitudes de movimento foram obtidos a partir do WAMIT.

O WAMIT tem a capacidade de calcular, dentre outras, as seguintes propriedades:

- Coeficientes de restauração hidrostática;
- Coeficientes de massa adicionada e amortecimento;
- Forças de excitação e momentos utilizando as relações de Haskind ou por integração direta das pressões;
- Amplitudes e fases de movimento do corpo flutuante;

6.4 Avaliação dos Movimentos da Embarcação

6.4.1 Carregamentos Ambientais

Estruturas oceânicas estão sujeitas à ação de carregamentos ambientais, sendo as mais significativas em intensidade – e, portanto, mais relevantes para o projeto – as seguintes:

- Ondas, que são responsáveis por maior parte do movimento oscilatório do sistema flutuante (Seção 4.2);
- Corrente marítima, que atua simultaneamente no casco e nas linhas de ancoragem (Seção 4.3);
- Vento, atuante somente na parcela do sistema flutuante exposta à atmosfera (Seção 4.4).

No caso das ondas, que são o principal carregamento de interesse deste trabalho, sua representação em simulações numéricas pode dar-se de duas formas:

- Onda regular; e
- Onda irregular.

Ondas regulares constam de um método determinístico, onde o comportamento do mar é representado por um único trem de ondas com altura e período fixos. Ondas irregulares, por sua vez, simulam a natureza aleatória do comportamento das ondas no oceano, constando de uma superposição de diversas ondas regulares de diferentes alturas, períodos e fases aleatórias geradas de acordo com um algoritmo que leva em consideração um espectro de energia típico do mar a ser representado. Mais detalhes sobre a representação matemática de ondas regulares e irregulares podem ser lidas na Seção 4.2.

Para a avaliação dos movimentos da embarcação, ondas regulares de diferentes períodos foram simuladas junto ao sistema para construção do RAO de resposta da embarcação com e sem influência das linhas. O principal interesse consistiu em avaliar a

resposta dinâmica do movimento de jogo da embarcação em torno de sua ressonância para ondas de través, isto é, incidindo perpendicularmente à linha de centro do navio.

Em uma etapa posterior do trabalho serão utilizadas ondas irregulares para verificações de resultados mais realistas, não dependentes apenas da influência de um único período de excitação. Nessa etapa, serão avaliados também os esforços no topo dos *risers*.

Efeitos de carregamentos de correnteza e vento não são escopo deste trabalho, pois julga-se que a maior influência do amortecimento viscoso das linhas submarinas no movimento da embarcação dê-se nos movimentos de primeira ordem— particularmente no movimento de jogo, visto que as conexões de topo dos *risers* estão dispostas linear e paralelamente à linha de centro do navio, a bombordo. Tal arranjo garante que o momento de jogo produzido pelas forças na conexão dos *risers* com a embarcação seja o maior possível, tal como ilustrado na Figura 30. O índice M_R e T_R indicam, respectivamente, momentos e trações associados aos *risers*.

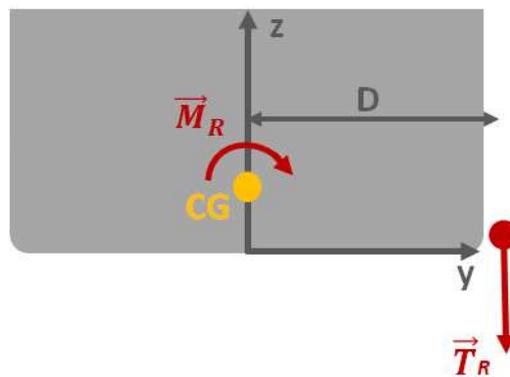


Figura 30 – Momento produzido pelas trações de topo dos *risers*

6.4.2 Embarcação sem linhas submarinas – Ondas regulares

Preliminarmente à condução do estudo sobre o efeito da presença das linhas submarinas no movimento de jogo, foi incluída uma etapa de verificação da compatibilidade entre as soluções utilizando as formulações acoplada e desacoplada conforme interpretadas pelo SITUA-PROSIM. Foram realizadas, nessa fase, análises que desprezam a presença das linhas, focalizando o estudo sobre o movimento do casco isolado da contribuição de outros elementos estruturais do sistema.

Ondas regulares (determinísticas) de amplitude unitária foram simuladas no domínio do tempo para um conjunto de períodos em torno da ressonância do movimento

de jogo da embarcação para incidências a bombordo e a boreste. O cálculo do RAO de movimento é feito dividindo o valor da amplitude de resposta em regime permanente pelo valor da amplitude da onda. No caso de uma onda de amplitude unitária, o valor da resposta é o próprio RAO. O tempo de duração das simulações utilizando as formulações acoplada e desacoplada foi de 1000s, onde somente os últimos 100s foram utilizados para produzir o RAO, de modo a desprezar efeitos transientes.

A Figura 31 ilustra as direções de carregamento de onda em relação à embarcação simuladas ao longo deste estudo.

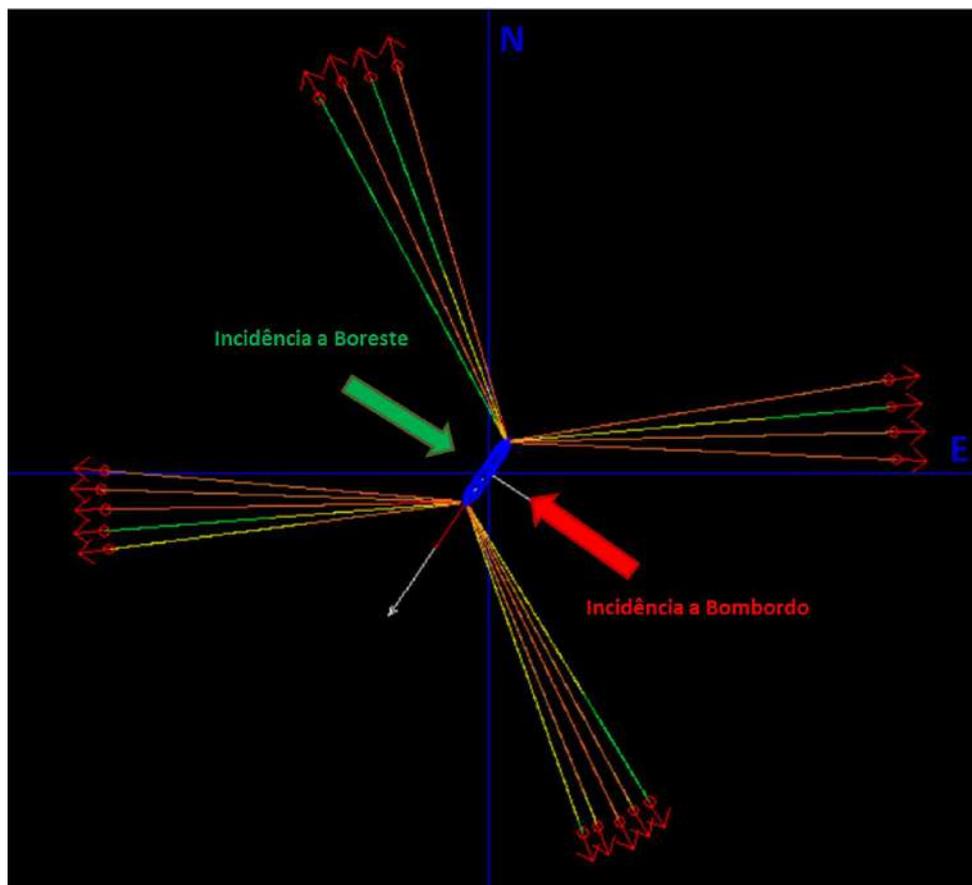


Figura 31 – Direções de propagação das ondas simuladas

A Figura 32 e a Figura 33 apresentam, respectivamente, os gráficos de RAO para incidências de onda a boreste e a bombordo. As respostas foram produzidas para períodos de 9s a 18s, sendo 13s o período de ressonância do movimento de jogo do FPSO. Observa-se quase nenhuma diferença entre os resultados produzidos para as duas formulações, demonstrando a capacidade do SITUA-PROSIM de interpretar corretamente os

coeficientes oriundos do programa de radiação/difração. Tal resultado revela, também, a compatibilidade entre dados de entrada que alimentam os dois tipos de solução – condição imprescindível para o êxito do presente estudo. É evidente, ainda, a identidade entre as respostas quando da incidência da onda a 90 ou 270 graus em relação à proa, visto que o casco é simétrico em relação à linha de centro.

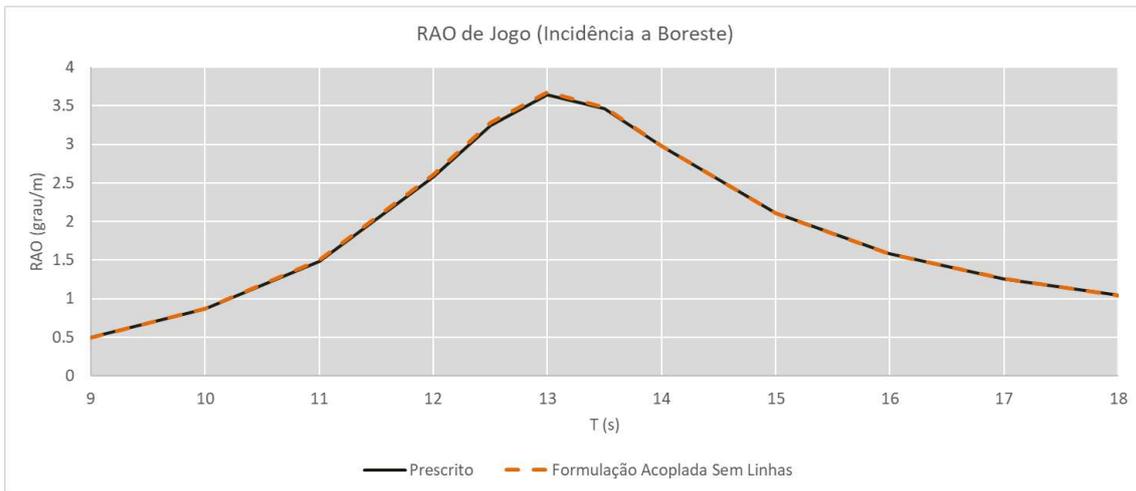


Figura 32 – Comparação entre resultados utilizando as formulações desacoplada acoplada para geração do RAO de Jogo sem anexação das linhas submarinas – Incidência de onda a boreste

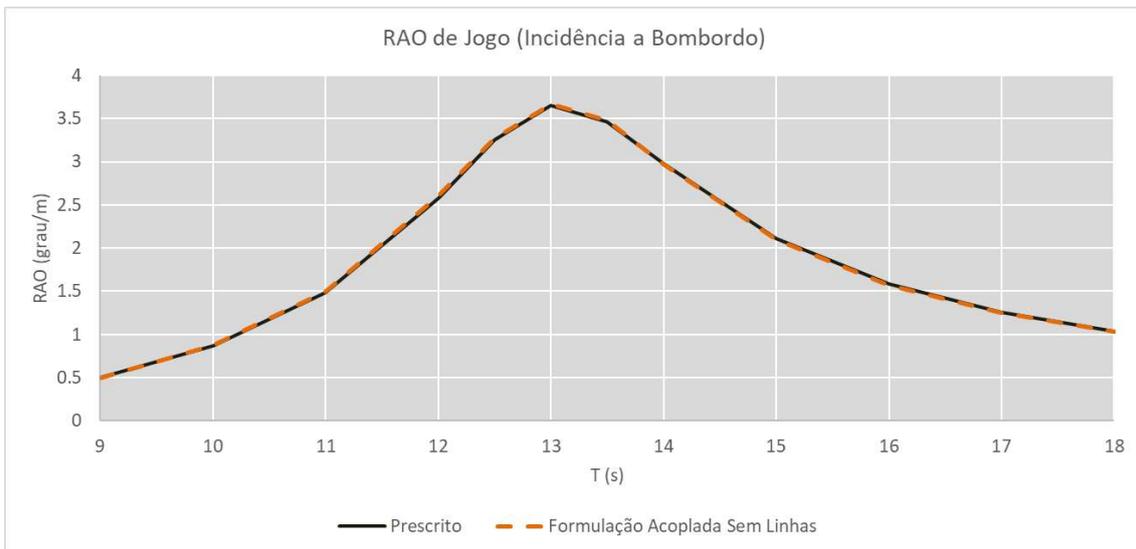


Figura 33 – Comparação entre resultados utilizando as formulações desacoplada acoplada para geração do RAO de Jogo sem anexação das linhas submarinas – Incidência de onda a bombordo

6.4.3 Influência das linhas de ancoragem e *risers* no movimento de jogo – Ondas regulares

Nesta etapa, a solução do modelo de elementos finitos representativo dos *risers* e linhas de ancoragem foi incorporado às análises utilizando a formulação acoplada. Nenhuma alteração foi feita a respeito do centro de gravidade da embarcação, de modo que a presença de uma estrutura anexada ao casco deve produzir um momento adicional que leve a uma condição de equilíbrio diferente da original. A Figura 34 apresenta os 100 primeiros segundos da série temporal de movimento de jogo para ondas regulares de período de 13s e altura unitária incidentes em ambos os bordos da embarcação. Observa-se que o navio se desloca para fora de sua posição de equilíbrio inicial, balançando num período aproximadamente igual ao período natural de jogo (cerca de 13s), dominando o início da análise, onde o efeito da influência das ondas quase não é apreciável devido à aplicação gradual do carregamento ao longo do tempo de rampa.

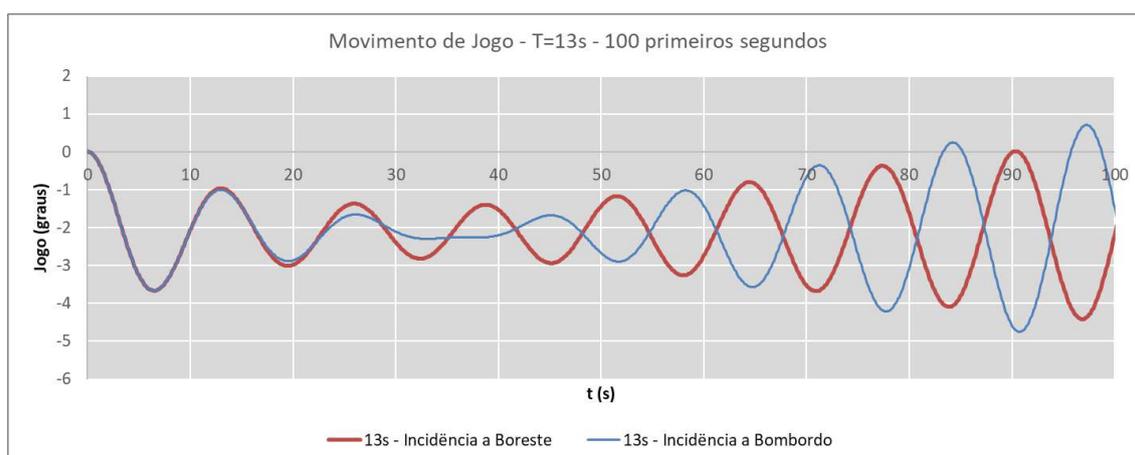


Figura 34 – Início da análise com incorporação das linhas submarinas – Período de 13s

A Figura 35 apresenta o gráfico para os últimos 100s de simulação desse mesmo caso, onde observa-se que o movimento de jogo oscila em torno de um valor de aproximadamente -2,1 graus de inclinação, correspondente à banda permanente devida ao momento produzido pelo peso dos *risers* (queda a bombordo, onde o balcão lateral está posicionado).

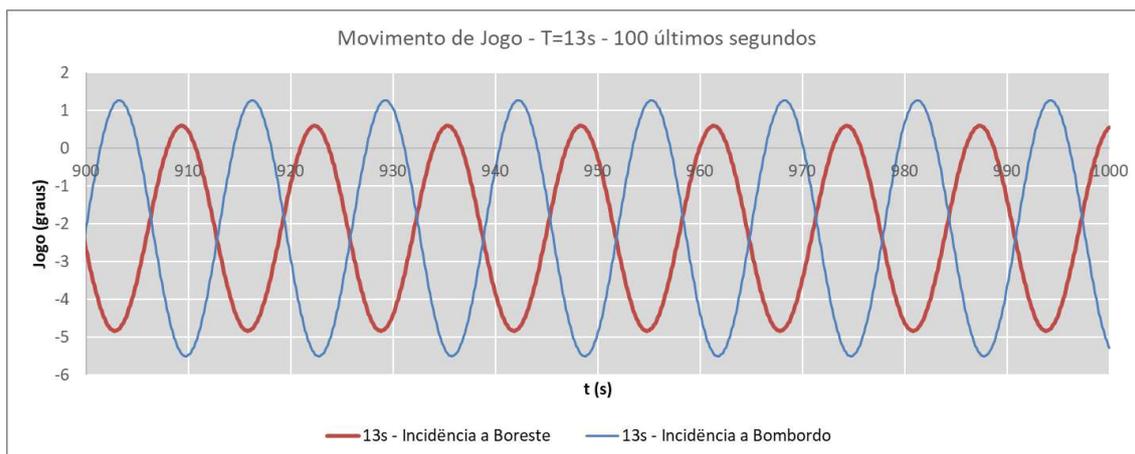


Figura 35 – Final da análise com incorporação das linhas submarinas – Período de 13s

Sabendo que uma condição de equilíbrio com banda permanente não é adequada à operação do FPSO, foi necessário deslocar o centro de gravidade de modo a reequilibrar o sistema agora composto por embarcação, linhas de ancoragem e risers. Como os risers pendem de um balcão lateral a bombordo, o equilíbrio deu-se ao deslocar o centro de gravidade 60cm na direção oposta, isto é, a boreste.

Com a embarcação equilibrada, uma nova rodada de simulações foi executada. Dessa vez, no entanto, o objetivo é registrar as variações de amplitude e assimetria das respostas de jogo devidas à presença dos risers e das linhas de ancoragem anexados ao casco. Um RAO foi produzido de forma semelhante àquele do item 6.4.2, simulando ondas regulares de amplitude unitária numa faixa de períodos de 9s a 18s – uma margem em torno do período de ressonância de movimento de jogo, a 13s. Os resultados foram comparados com a resposta do casco sem as linhas submarinas, conforme ilustrado na Figura 36 e na Figura 37 e tabelados na Tabela 5.

Tabela 5 – Comparação de RAOs – com e sem linhas submarinas

T (s)	RAO de Movimento de Jogo (graus/m)					
	Sem Linhas Submarinas		Com Linhas Submarinas		Variação	
	Inc. Boreste	Inc. Bombordo	Inc. Boreste	Inc. Bombordo	Inc. Boreste	Inc. Bombordo
9,0	0,49	0,49	0,50	0,38	2,2%	-22,4%
10,0	0,87	0,87	0,85	0,73	-1,8%	-15,8%
11,0	1,50	1,50	1,38	1,35	-7,9%	-10,1%
12,0	2,60	2,60	2,22	2,34	-14,6%	-9,9%
12,5	3,28	3,27	2,69	2,88	-18,0%	-12,1%
13,0	3,68	3,67	2,96	3,16	-19,5%	-13,8%

T (s)	RAO de Movimento de Jogo (graus/m)					
	Sem Linhas Submarinas		Com Linhas Submarinas		Variação	
	Inc. Boreste	Inc. Bombordo	Inc. Boreste	Inc. Bombordo	Inc. Boreste	Inc. Bombordo
13,5	3,48	3,48	2,86	3,05	-17,8%	-12,3%
14,0	2,98	2,97	2,51	2,70	-15,7%	-9,2%
15,0	2,11	2,10	1,81	1,99	-14,0%	-4,9%
16,0	1,58	1,57	1,36	1,52	-13,7%	-3,5%
17,0	1,26	1,25	1,08	1,21	-13,8%	-3,3%
18,0	1,04	1,04	0,90	1,00	-13,9%	-3,6%

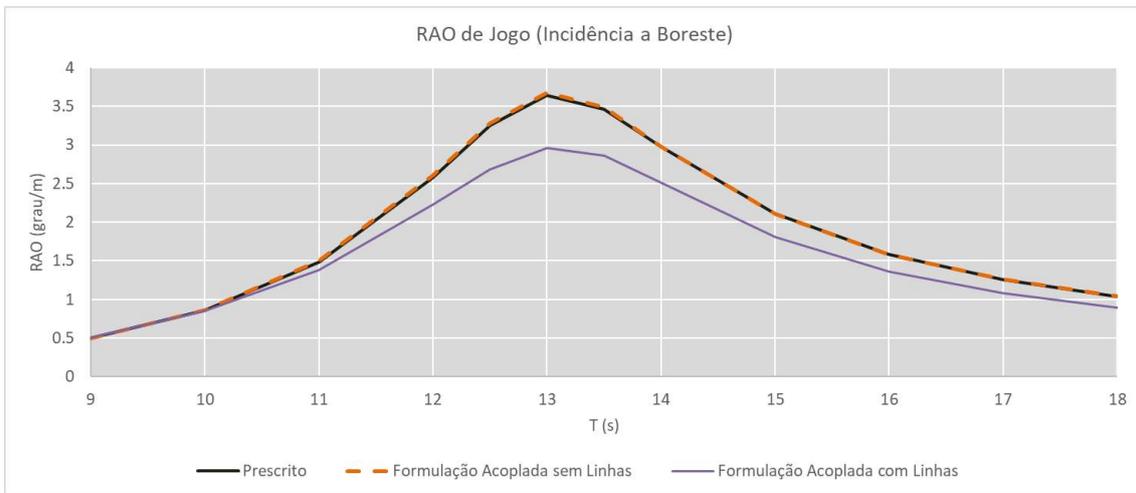


Figura 36 – Comparação de RAOs (com e sem linhas submarinas) – Incidência a Boreste

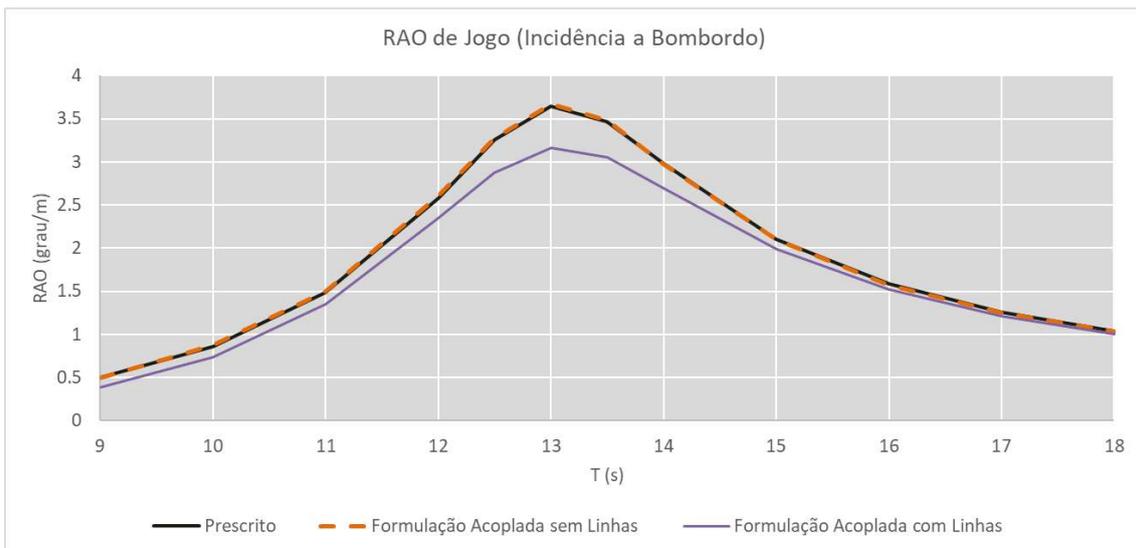


Figura 37 – Comparação de RAOs (com e sem linhas submarinas) – Incidência a Bombordo

Verifica-se pouca diferença nas respostas nas faixas de períodos mais afastados da ressonância. Uma redução significativa nas amplitudes de movimento de jogo é apreciável em torno da ressonância, onde as maiores velocidades de movimento produzem uma maior força de amortecimento viscoso ao deslocar os *risers*, tornando o efeito mais expressivo.

Uma assimetria de resposta em função do sentido de propagação das ondas é verificada. Tal efeito é esperado, pois o centro de gravidade da embarcação fora deslocado para fora da linha de centro, produzindo uma interação dinâmica assimétrica com as linhas submarinas. O encontro fora de fase ou de magnitudes diversas dos momentos associados à variação da tração nos *risers* e da intensidade e direção carregamento de onda produzirá, necessariamente, uma interação assimétrica. A Figura 38 ilustra esse efeito, onde \vec{M}_R e \vec{M}_W são, respectivamente, os momentos associados à tração de topo dos *risers* (\vec{T}_R) e à onda incidente. O termo \vec{M}_P , aproximadamente constante, é o momento associado ao peso da embarcação aplicado fora da linha de centro, sempre positivo.

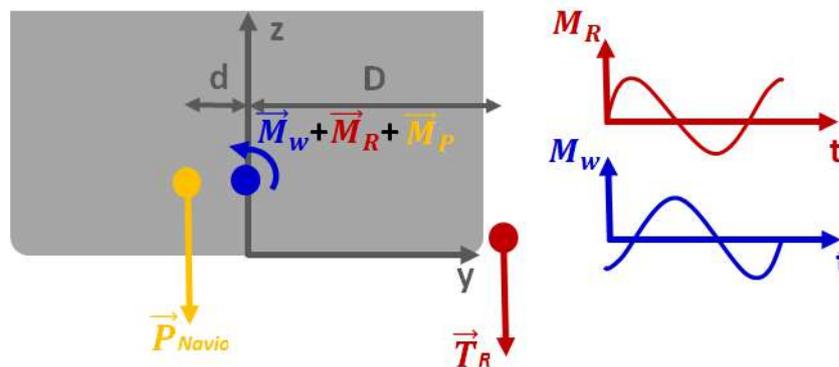


Figura 38 – Assimetria de resposta devido ao acoplamento

Para um período de excitação de 13s e para ondas de amplitude unitária, o acoplamento do caso às linhas quando da incidência a boreste produziu uma redução de 0,72 graus (19,5%) no movimento oscilatório de jogo. No caso da incidência de ondas a bombordo, a redução foi de 0,51 graus (13,8%). A incidência em ambas as direções sugere que o amortecimento dos *risers* se faz mais evidente justamente na faixa de períodos mais importante em se tratando de eventos extremos: em torno da ressonância.

Complementarmente aos gráficos de RAO do movimento de jogo da embarcação, foi verificada a variação da elevação de dois pontos situados nos bordos do FPSO: um a bombordo e outro a boreste, ambos na altura do balcão e à meia nau. Os resultados podem

ser apreciados na Figura 39 e na Tabela 6, para ondas de incidência a boreste, e na Figura 40, para ondas de incidência a bombordo. É importante mencionar que não houve alteração significativa das amplitudes de movimento de elevação devido ao acoplamento, sendo as alterações nos resultados majoritariamente influenciadas pelo movimento de jogo.

Tal como no movimento de jogo, a redução do movimento na faixa de maior amplitude, entre 12 e 14s, é significativa – particularmente a bombordo, de onde pendem os *risers*. A redução chegou a 19,2% no ponto a bombordo quando a onda de período de 13s incide a boreste. A incidência de uma onda de igual período a bombordo levou ainda a uma redução de 15,7% na amplitude de movimento. Tais resultados corroboram a expectativa de que a redução na amplitude de jogo levaria necessariamente a uma redução também significativa no movimento dos pontos de conexão com os *risers*.

Tabela 6 –Elevações do Ponto à Meia-nau a Boreste

T (s)	Elevação Máxima (m)					
	Sem Linhas Submarinas		Com Linhas Submarinas		Variação	
	Inc. Boreste	Inc. Bombordo	Inc. Boreste	Inc. Bombordo	Inc. Boreste	Inc. Bombordo
9,0	0,98	0,76	0,99	0,79	1,2%	3,0%
10,0	1,11	1,06	1,15	1,07	3,7%	1,3%
11,0	1,14	1,39	1,22	1,39	6,6%	0,3%
12,0	1,50	1,82	1,49	1,77	-1,0%	-2,6%
12,5	1,93	1,97	1,77	1,88	-8,1%	-4,7%
13,0	2,34	1,90	2,05	1,79	-12,7%	-5,6%
13,5	2,44	1,52	2,15	1,50	-11,7%	-0,9%
14,0	2,31	1,11	2,08	1,18	-10,1%	6,2%
15,0	1,94	0,67	1,80	0,79	-7,2%	18,1%
16,0	1,67	0,61	1,58	0,70	-5,6%	15,7%
17,0	1,50	0,66	1,43	0,73	-4,7%	10,3%
18,0	1,38	0,72	1,32	0,78	-3,9%	7,0%

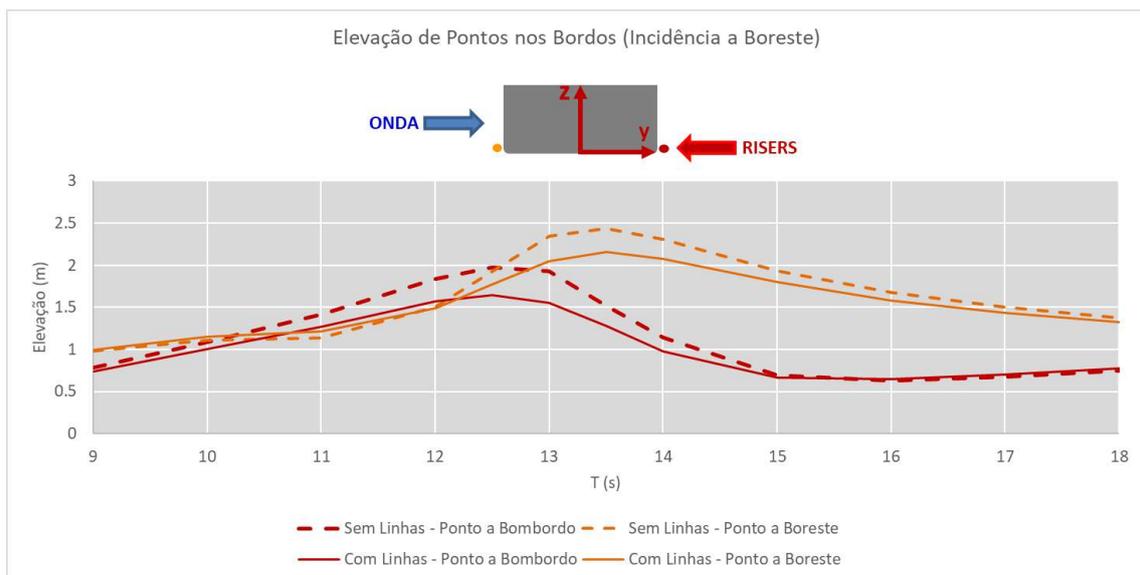


Figura 39 – Deslocamento vertical de pontos nos bordos à meia nau – Incidência a Boreste

Tabela 7 –Elevações do Ponto à Meia-nau a Bombordo

T (s)	Elevação Máxima (m)					
	Sem Linhas Submarinas		Com Linhas Submarinas		Variação	
	Inc. Boreste	Inc. Bombordo	Inc. Boreste	Inc. Bombordo	Inc. Boreste	Inc. Bombordo
9,0	0,79	1,00	0,74	0,92	-6,3%	-8,7%
10,0	1,08	1,13	1,00	1,02	-7,8%	-10,1%
11,0	1,41	1,17	1,27	1,03	-9,8%	-11,3%
12,0	1,84	1,53	1,57	1,33	-14,7%	-12,8%
12,5	1,97	1,93	1,65	1,67	-16,7%	-13,2%
13,0	1,93	2,37	1,56	2,00	-19,2%	-15,7%
13,5	1,52	2,44	1,28	2,13	-15,6%	-12,6%
14,0	1,14	2,33	0,98	2,09	-13,9%	-10,5%
15,0	0,69	1,96	0,66	1,84	-4,3%	-5,8%
16,0	0,63	1,70	0,65	1,63	3,0%	-4,0%
17,0	0,68	1,52	0,71	1,47	4,1%	-3,3%
18,0	0,75	1,40	0,77	1,36	3,4%	-2,9%

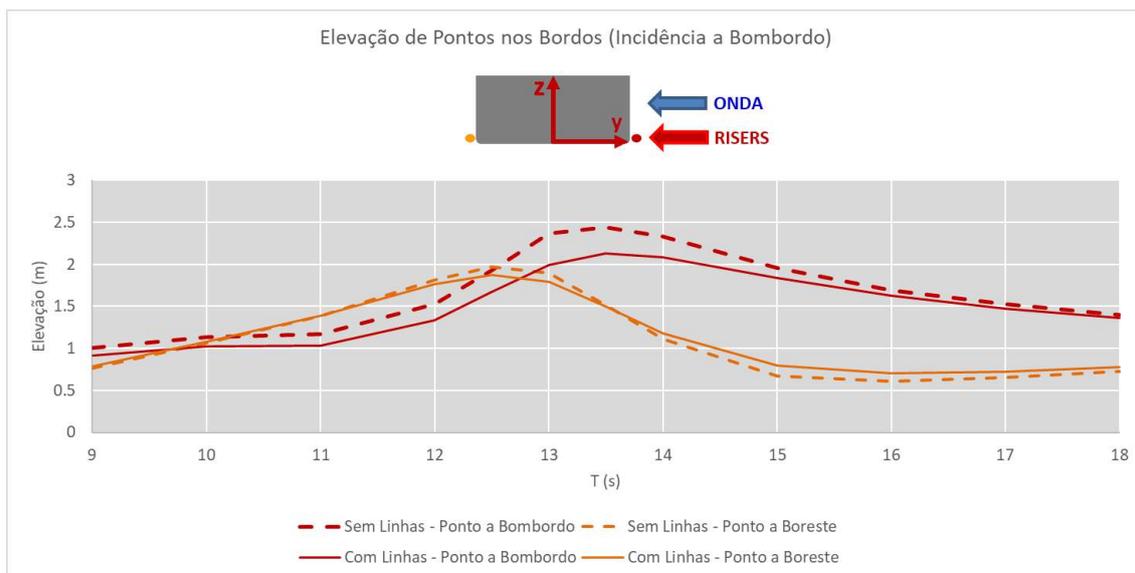


Figura 40 – Deslocamento vertical de pontos nos bordos à meia nau – Incidência a Bombordo

6.4.4 Variação de Amplitude das Ondas Regulares

A análise da variação da resposta em função do período de excitação demonstrou que a redução da amplitude do movimento de jogo devido ao amortecimento adicional fornecido pelas linhas de ancoragem e *risers* é maior em torno do período de ressonância. Cabe agora avaliar a variação da amplitude do movimento de jogo em função da amplitude da onda e, para isso, foram simuladas ondas regulares de 2 a 6m de altura (ou de 1 a 3m de amplitude). Todas as simulações que produziram esse conjunto de resultados incorporam linhas de ancoragem e *risers*, e o período de excitação para todos os casos foi 13s.

Os resultados podem ser apreciados na Figura 41, onde vê-se claramente que, embora o amortecimento viscoso adicionado ao sistema devido à incorporação dos *risers* ao casco seja de natureza não-linear, isto não foi suficiente para distorcer o caráter linear da relação entre amplitude de movimento e amplitude de onda de forma significativa. Prepondera aqui a linearidade em relação às amplitudes de onda das aproximações do WAMIT para os efeitos de difração, restauração hidrostática e forças de excitação.

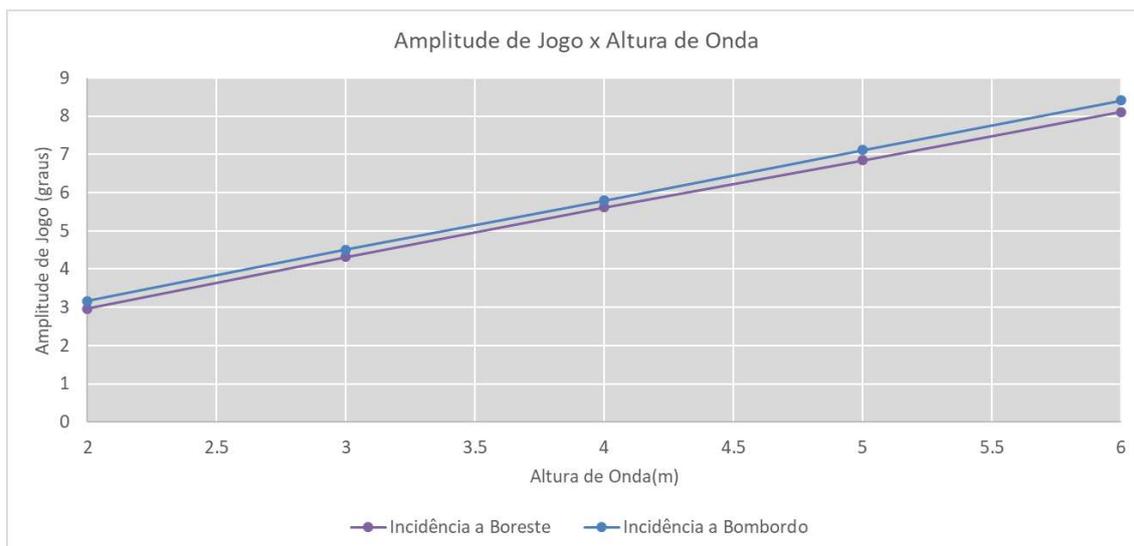


Figura 41 – Variação de Amplitude de Resposta– Ondas Regulares de Período 13s

6.4.5 Simulações com ondas irregulares

Nesta etapa do trabalho, foram utilizadas ondas irregulares para a verificação de resultados mais realistas e compatíveis com a experiência de operação em campo do FPSO, não dependentes apenas da influência de um único período de excitação. As análises foram simuladas para uma duração de 1000s. Isto normalmente não é suficiente para capturar as máximas amplitudes de onda registradas ao longo da duração de uma tempestade, mas ainda assim poderá fornecer resultados significativos para este estudo (um estado de mar típico tem duração de cerca de 3h)..

Sabendo que a embarcação ancorada não pode alterar seu aproamento, foram simuladas duas combinações Hs-Tp utilizando um espectro representativo das bacias de Campos e Santos com direções dominantes de 90 e 270 graus em relação à proa (tal como foi feito nos casos com ondas regulares). Os dois estados de mar simulados correspondem, aproximadamente, a condições anuais mais prováveis para duas direções ambientais distintas. Ei-las explícitas na Tabela 8.

Tabela 8 –Casos de carregamento para simulações com onda irregular

Caso de Carregamento	Hs (m)	Tp (s)	Bordo de Incidência
Caso 1	6,0	13,5	Boreste
Caso 2	6,0	13,5	Bombordo
Caso 3	4,5	9,0	Boreste
Caso 4	4,5	9,0	Bombordo

Os casos 1 e 2 foram escolhidos para que tivessem períodos de pico aproximadamente coincidentes com o período de ressonância de jogo da embarcação, além do fato de que as alturas de onda são relativamente grandes na direção associada a esses casos. Os casos 3 e 4 são menos severos e de período de pico mais distantes da ressonância, mas que merecem igual atenção, posto que o sistema físico estará sujeito às mais diversas solicitações ambientais ao longo de sua vida útil.

As séries de movimento para os 1000s de mar irregular simuladas estão apresentadas desde a Figura 42 à Figura 45. A Tabela 9 apresenta resultados estatísticos para o movimento de jogo nessas simulações. Observam-se reduções significativas em todos os casos, com destaque para os casos 1 e 4, com reduções máximas de 1,53 graus e 0,46 graus (ou 18,7% e 19,1%), respectivamente.

Tais resultados demonstram que a influência do amortecimento dos *risers* e linhas de ancoragem no movimento de jogo é um efeito relevante em condições diversas de operação, com destaque, inclusive, em estados de mar cuja concentração de energia encontra-se longe do período de ressonância de jogo do FPSO.

Tabela 9 – Resultados estatísticos de módulo da amplitude de movimento de jogo para simulações com mar irregular

Caso de Carregamento	Parâmetro	Movimento de Jogo (graus)		
		Desacoplada	Acoplada	Diferença (%)
Caso 1	Média	2,60	2,07	-20,3%
	Máximo	8,19	6,66	-18,7%
Caso 2	Média	2,59	2,11	-18,5%
	Máximo	8,16	6,91	-15,3%
Caso 3	Média	0,60	0,56	-6,5%
	Máximo	2,47	2,37	-4,3%
Caso 4	Média	0,60	0,50	-16,6%
	Máximo	2,41	1,95	-19,1%

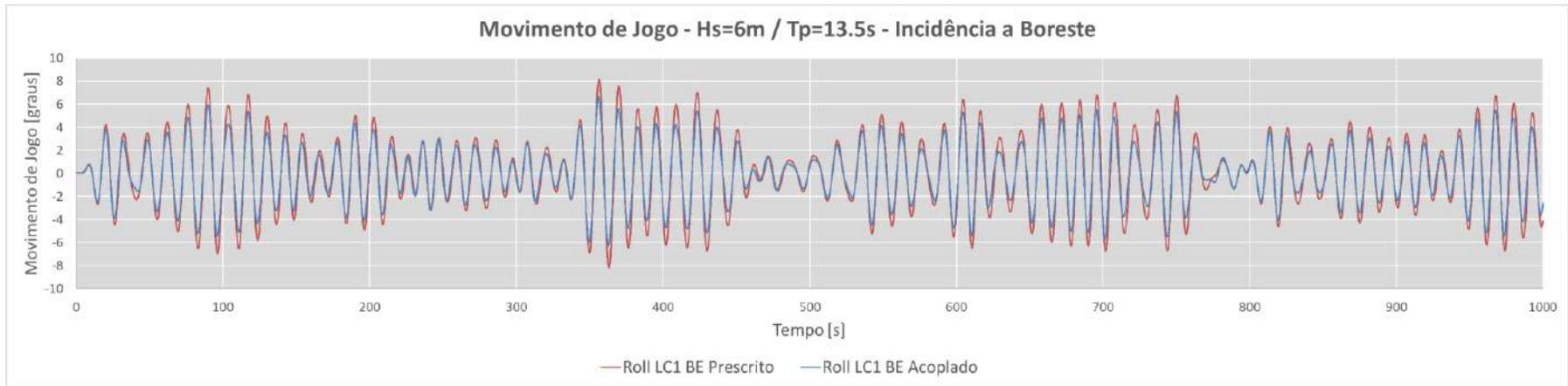


Figura 42 – Movimento de jogo em mar irregular – Caso de carregamento 1

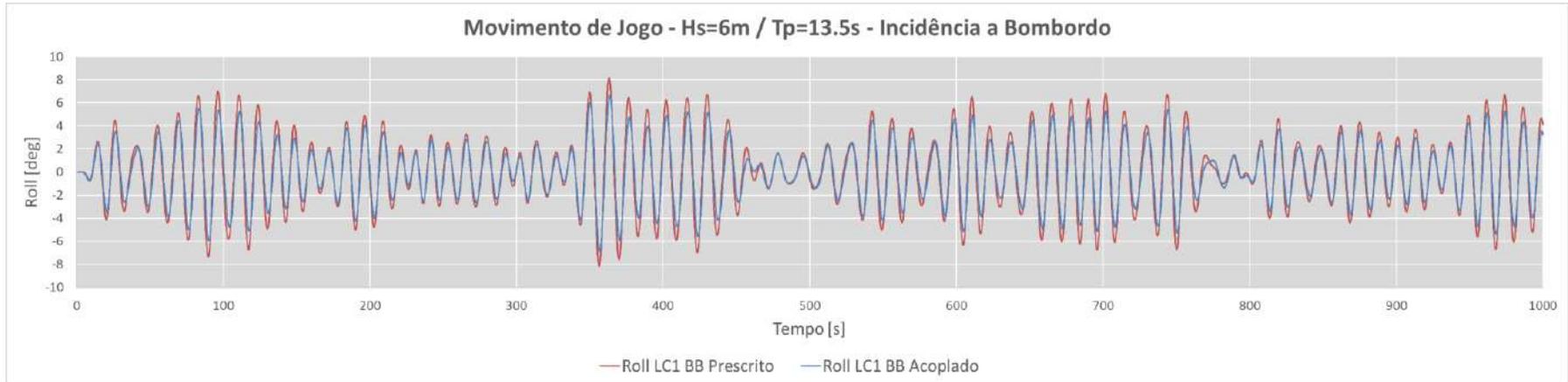


Figura 43 – Movimento de jogo em mar irregular – Caso de carregamento 2

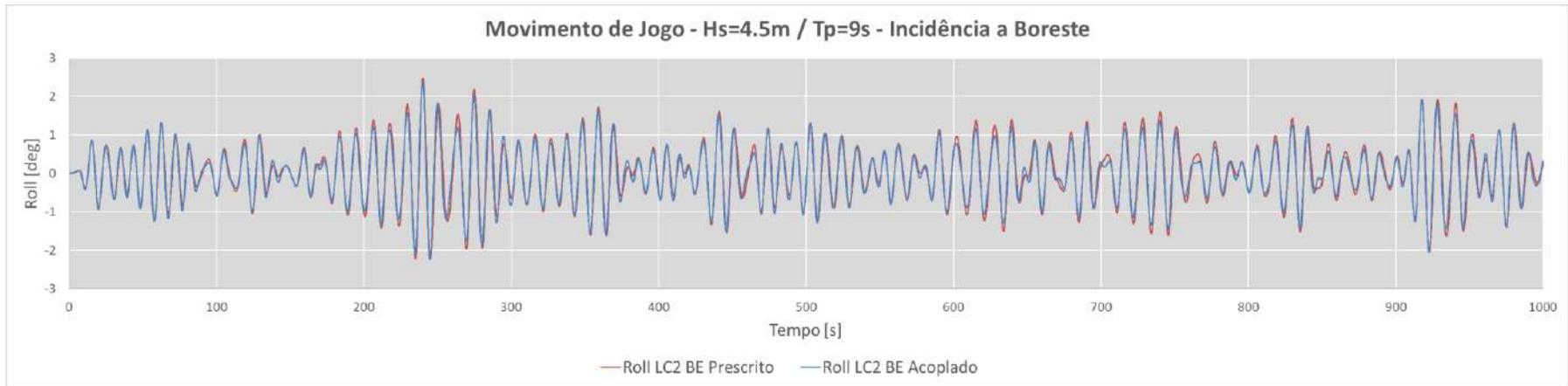


Figura 44 – Movimento de jogo em mar irregular – Caso de carregamento 3

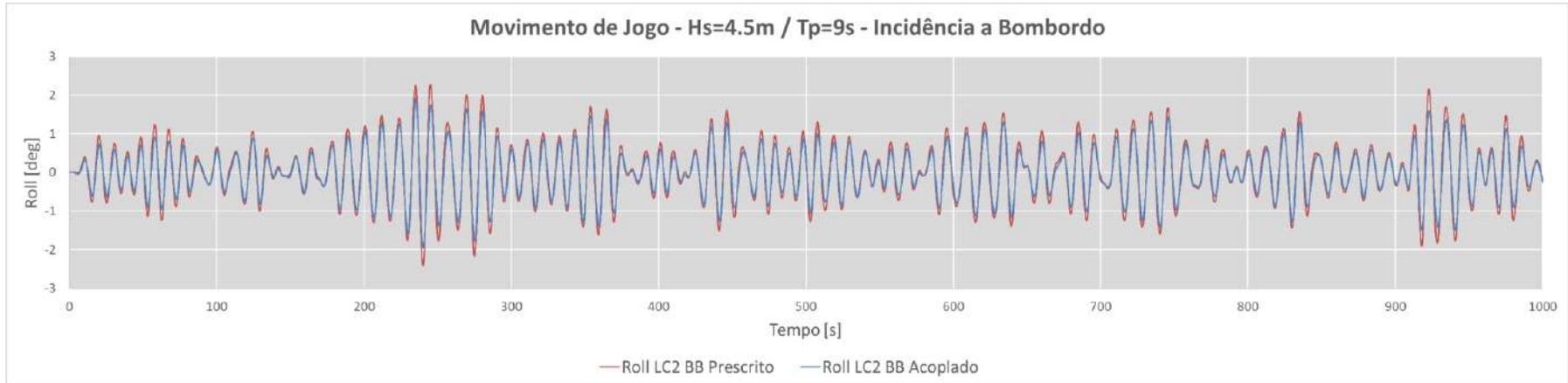


Figura 45 – Movimento de jogo em mar irregular – Caso de carregamento 4

6.5 Avaliação dos esforços nos *risers* – Ondas irregulares

As simulações do Item 6.4.5 foram estudadas além do que diz respeito exclusivamente ao movimento de jogo. Nesta seção, a análise visa a observação do comportamento das trações de topo nos *risers*. Para essa finalidade, foram escolhidas três linhas posicionadas em pontos diferentes ao longo do balcão lateral: uma à vante, uma a meio-balcão e uma à ré, que correspondem aos *risers* 83, 38 e 4, respectivamente, cujas coordenadas e propriedades foram apresentadas anteriormente na Tabela 13. A Figura 46 apresenta visualmente a localização dos *risers* selecionados.

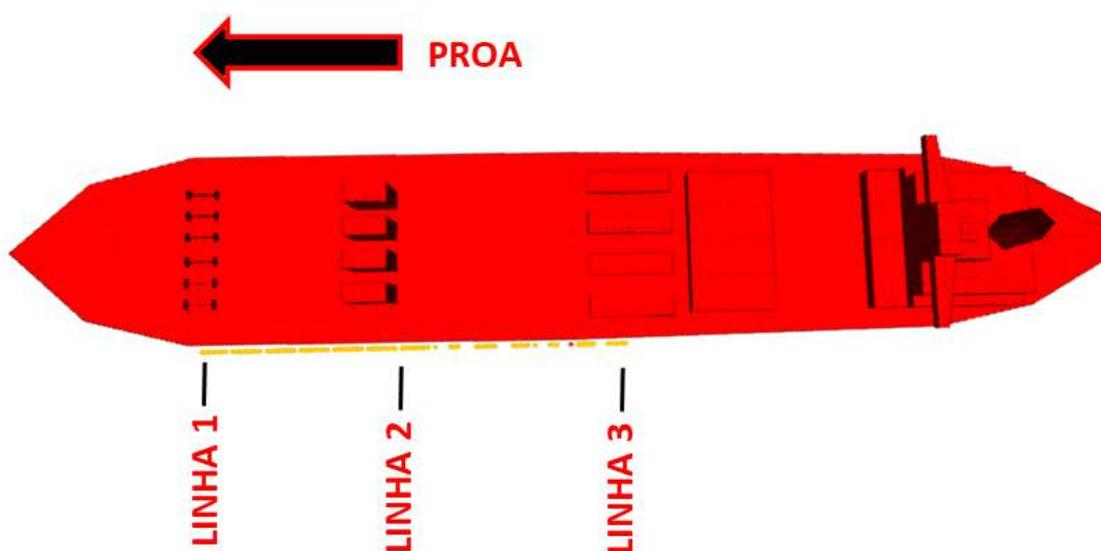


Figura 46 – *Risers* selecionados para análise das trações de topo

As séries no tempo das trações de topo para os três *risers* nas simulações acoplada e desacoplada dos casos de carregamento 1 a 4 estão apresentadas da Figura 47 à Figura 58. Como as análises foram feitas com simulações de apenas 1000s de duração, é conveniente ajustar uma função probabilística para estipular máximos prováveis para durações maiores, como 3600s e 10800s.

A Tabela 10 apresenta uma extrapolação estatística para obtenção dos máximos prováveis nos os estados de mar da Tabela 8. Foi usada aqui uma distribuição de Weibull 4.2.2.4, que é amplamente empregada em confiabilidade estrutural devido à sua versatilidade e boa representatividade de valores máximos locais de momento e tração em teoria de extremos [12].

Os resultados apontam uma redução significativa nas trações de topo para todos os *risers* em todas as circunstâncias estudadas quando há acoplamento entre linhas submarinas e casco. As maiores reduções deram-se nos casos de carregamento 1 e 2, com ondas de maior amplitude e período de pico mais próximo ao período natural de jogo da embarcação. Em particular quando as ondas incidem a bombordo, a redução chegou a 21.7% na Linha 3 em estados de mar de 3h de duração, corroborando a ideia de que a redução do movimento de jogo da embarcação provoca também uma redução significativa nos esforços nos *risers* acoplados ao sistema flutuante.

Da Figura 59 à Figura 62 estão representados os espectros suavizados de tração de topo para os quatro casos de carregamento, onde observa-se claramente que os valores são reduzidos quando um acoplamento efetivo entre *risers*, linhas de ancoragem e embarcação é considerado.

Tabela 10 –Extrapolação estatística para trações de topo - Weibull

Caso de carregamento	Riser	Máxima tração provável [kN]					
		Desacoplada		Acoplada		Diferença	
		3600s	10800s	3600s	10800s	3600s	10800s
Caso 1	Linha 1	596.0	642.4	576.0	623.9	-3.35%	-2.88%
	Linha 2	221.9	243.9	200.5	214.9	-9.65%	-11.87%
	Linha 3	433.9	488.1	381.9	412.1	-11.99%	-15.58%
Caso 2	Linha 1	642.1	716.8	600.4	642.2	-6.49%	-10.41%
	Linha 2	236.6	255.2	207.1	219.9	-12.46%	-13.84%
	Linha 3	475.1	541.4	395.0	423.9	-16.85%	-21.70%
Caso 3	Linha 1	502.2	534.2	479.7	500.9	-4.48%	-6.24%
	Linha 2	183.5	193.4	175.5	183.3	-4.35%	-5.23%
	Linha 3	343.4	367.5	320.7	333.8	-6.61%	-9.16%
Caso 4	Linha 1	552.8	599.1	518.1	551.4	-6.27%	-7.96%
	Linha 2	195.9	210.8	187.6	198.3	-4.22%	-5.94%
	Linha 3	368.7	398.7	353.4	381.3	-4.14%	-4.38%

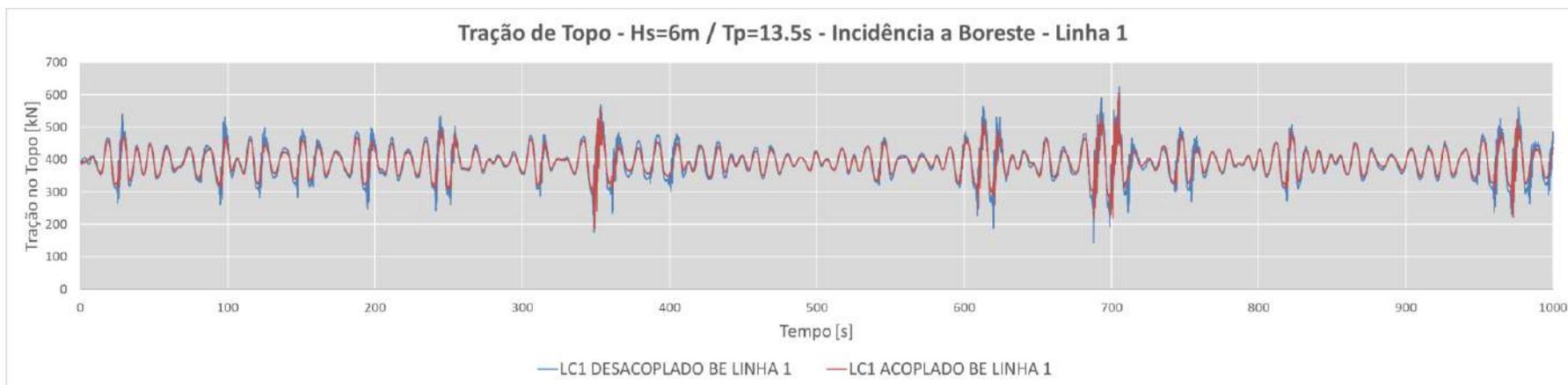


Figura 47 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 1 e Linha 1

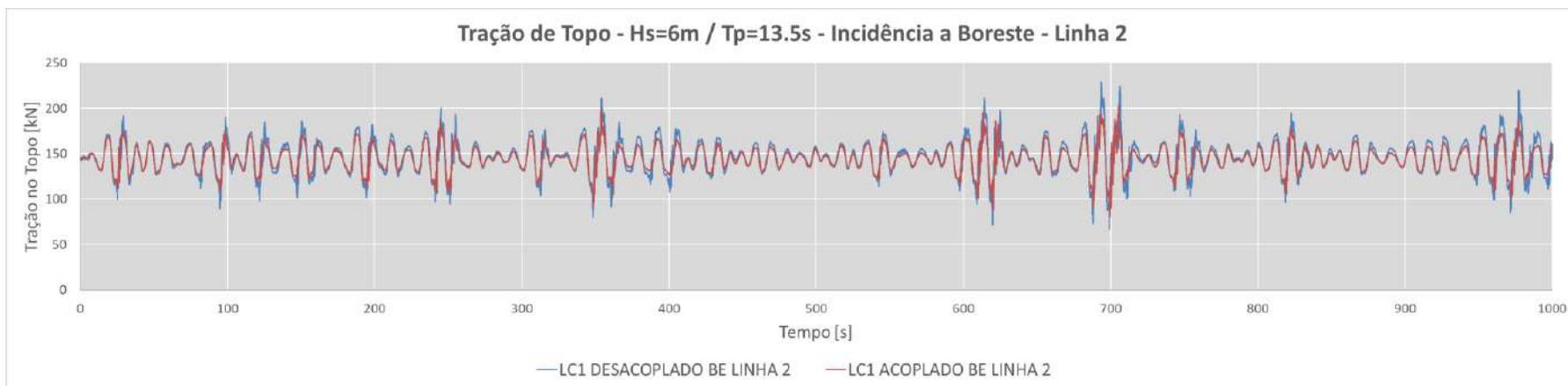


Figura 48 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 1 e Linha 2

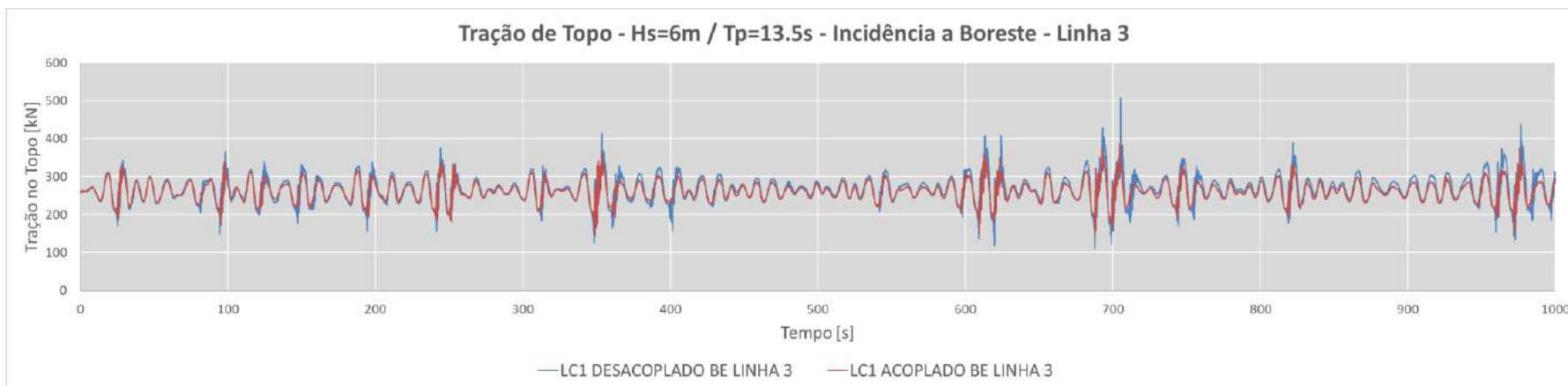


Figura 49 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 1 e Linha 3

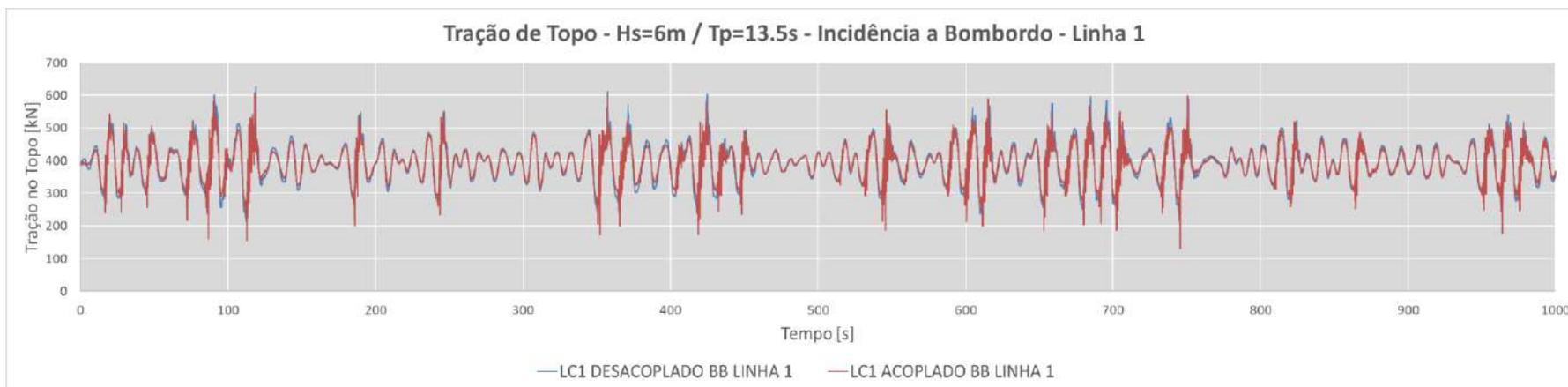


Figura 50 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 2 e Linha 1

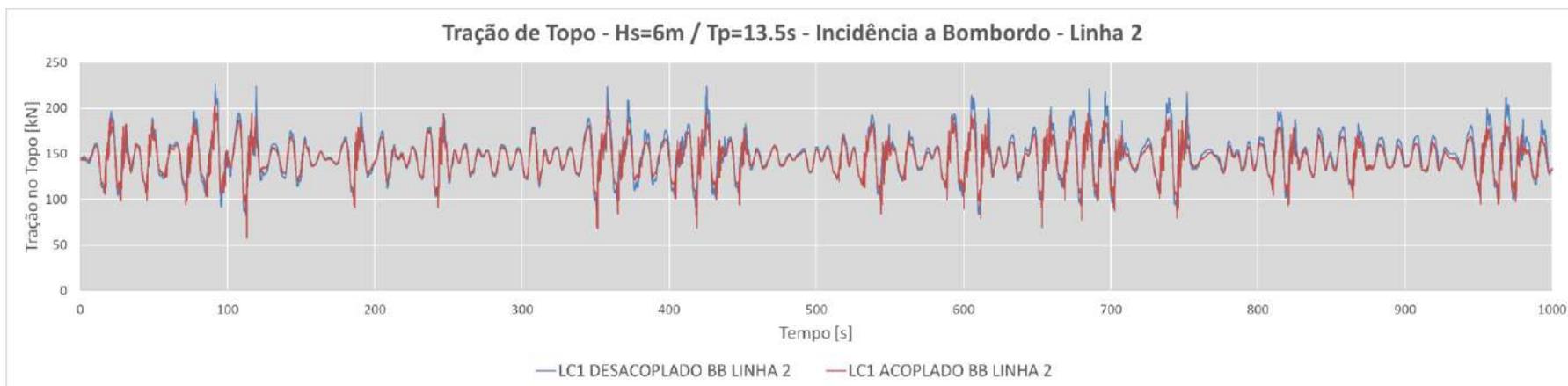


Figura 51 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 2 e Linha 2

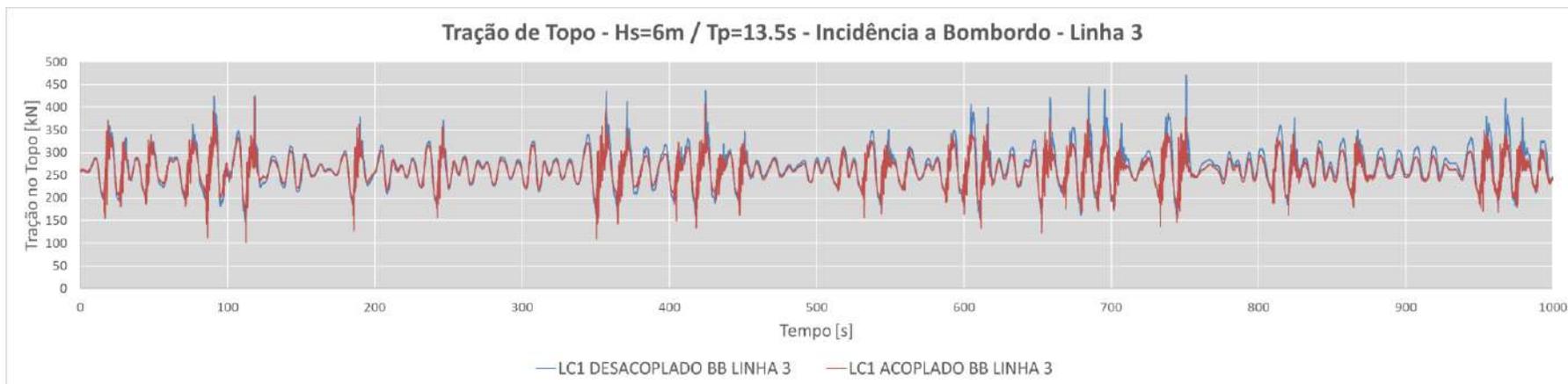


Figura 52 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 2 e Linha 3



Figura 53 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 3 e Linha 1

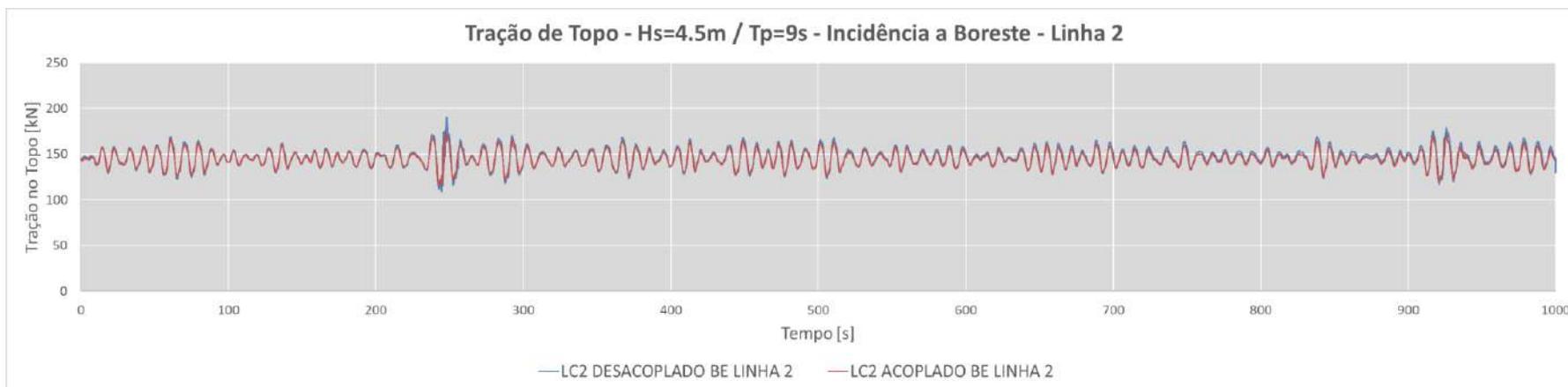


Figura 54 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 3 e Linha 2

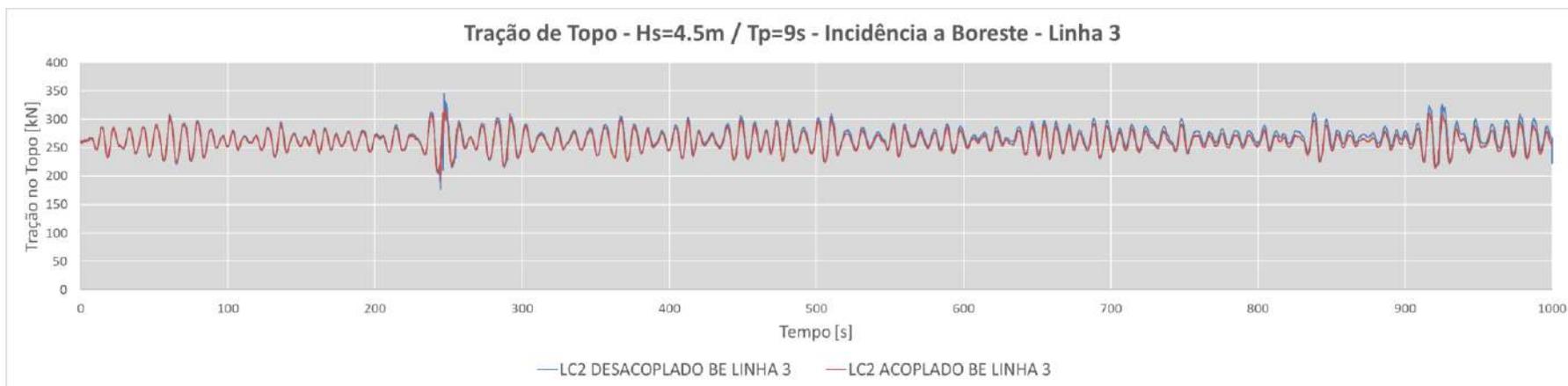


Figura 55 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 3 e Linha 3

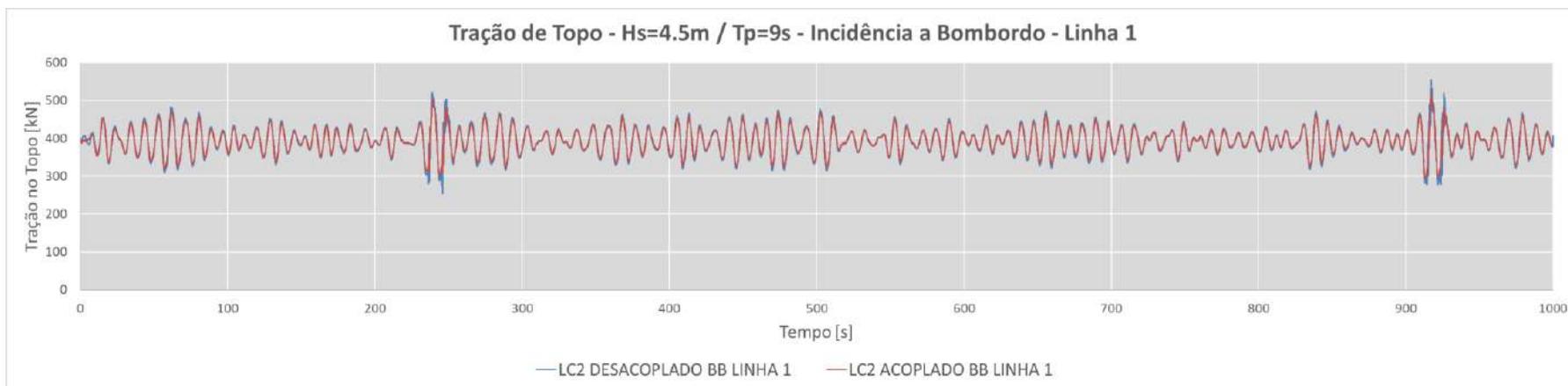


Figura 56 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 4 e Linha 1

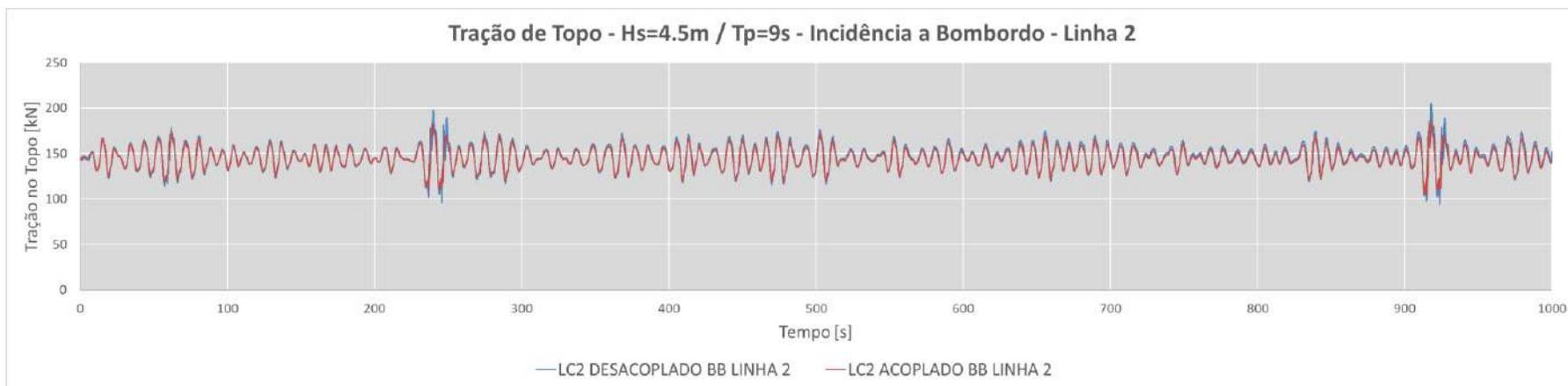


Figura 57 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 4 e Linha 2

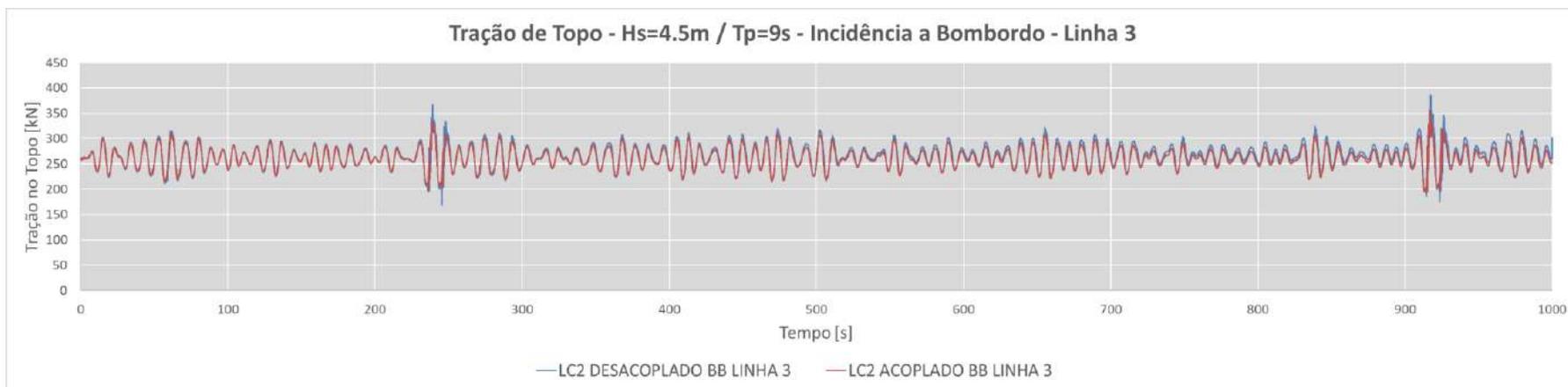


Figura 58 – Trações de topo em mar irregular – Caso de carregamento 4 e Linha 3



Figura 59 – Espectros de Tração de Topo – Caso de carregamento 1 e Linhas 1 a 3

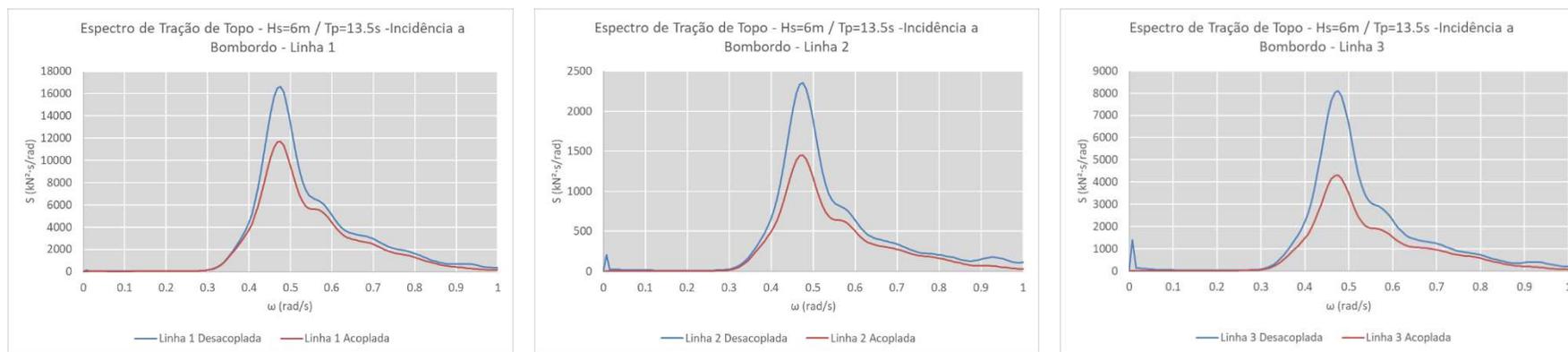


Figura 60 – Espectros de Tração de Topo – Caso de carregamento 2 e Linhas 1 a 3



Figura 61 – Espectros de Tração de Topo – Caso de carregamento 3 e Linhas 1 a 3



Figura 62 – Espectros de Tração de Topo – Caso de carregamento 4 e Linhas 1 a 3

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 Da relevância do presente estudo

Este trabalho propôs-se a investigar a relevância da influência de *risers* e linhas de ancoragem na resposta de jogo de uma embarcação do tipo FPSO. Foram utilizados modelos numéricos representativos de um sistema de produção operante na costa brasileira, em águas profundas. Simulações desacopladas e acopladas foram realizadas considerando ondas regulares de diferentes amplitudes e períodos, além de ondas irregulares a representar dois estados de mar associados a duas condições anuais típicas das bacias de Campos e Santos. A direção de propagação das ondas foi de 90 ou 270 graus em relação à proa para todas as ondas simuladas.

Ao acoplar os *risers* ao balcão lateral a bombordo, observa-se imediatamente a produção de uma banda de 2,1 graus, o que evidencia um momento significativo já na condição estática. Foi necessária uma correção do centro de gravidade da embarcação, tendo este sido deslocado de 0,6m para fora da linha de centro em direção a boreste a fim de reequilibrar o sistema para uma condição com banda igual a zero, simulando uma operação de lastragem.

As simulações acopladas com ondas regulares produziram pouca diferença de resposta de jogo em períodos afastados da ressonância, além de uma evidente assimetria de resposta em função da direção de propagação das ondas (se em direção a bombordo ou a boreste). Em períodos mais próximos à ressonância, no entanto, a redução na resposta de jogo provou-se muito significativa, tendo atingido reduções de 19,5% e 13,8% quando a incidência das ondas se dá a boreste e a bombordo, respectivamente. A observação do movimento vertical de um ponto no balcão lateral a meia-nau também evidenciou uma redução significativa, tendo sido de 19,2% e 15,7% para incidências a boreste e a bombordo, respectivamente.

Uma sensibilidade de variação da amplitude de onda utilizando ondas regulares no período natural de jogo do FPSO também apontou que, embora o amortecimento viscoso adicionado ao sistema devido à incorporação dos *risers* à embarcação seja de natureza não-linear, isto não foi suficiente para distorcer significativamente o caráter linear da relação entre amplitude de movimento e amplitude de onda. Esta conclusão sugere que a geração de um

RAO de movimentos que leve em consideração o efeito do acoplamento pode ser possível para algumas metodologias – ao menos para estruturas com características semelhantes ao sistema aqui estudado.

A simulação de estados de mar anuais típicos das bacias de Campos e Santos utilizando ondas irregulares também registrou, em todos os casos simulados, reduções significativas tanto da amplitude do movimento de jogo do FPSO quanto das trações de topo de três *risers* localizados em posições bastante distintas ao longo do balcão lateral. Observam-se reduções de até 18,7% no movimento de jogo nos estados de mar mais agressivos. As trações de topo para esses casos reduziram de até 21,7%. Tais resultados demonstram que a influência do amortecimento dos *risers* e linhas de ancoragem no movimento de jogo e nas trações de topo é um efeito relevante em condições diversas de operação, inclusive em estados de mar cuja concentração de energia encontra-se longe do período de ressonância de jogo do FPSO.

De forma geral, os resultados demonstraram que, para o sistema estudado, a redução da amplitude de movimento do FPSO e das trações de topo dos *risers* pode ser bastante significativa quando um acoplamento efetivo entre embarcação e linhas submarinas é modelado. Isto sugere uma possibilidade de projetos estruturais menos robustos no futuro, ou a viabilização de arranjos submarinos mais simples e baratos para sistemas de produção.

7.2 Recomendações para trabalhos futuros

Este trabalho contemplou a influência do acoplamento de *risers* e linhas de ancoragem no movimento de jogo de um FPSO. Apenas a condição da embarcação em seu calado mais leve foi estudada, uma vez que as propriedades inerciais e efeitos de amortecimento associados ao movimento do casco são menores nessa condição, deixando espaço para o amortecimento associado ao movimento das linhas submarinas fazer-se mais evidente. Além disso, o período natural de jogo para essa condição também é relativamente baixo e aproximadamente igual ao período de pico das piores ondas anuais nas bacias de Campos e Santos. Para a completeza do estudo, caberia avaliar tal efeito também em situações da embarcação operando em calados maiores. Outra avaliação possível seria contemplar a influência do acoplamento em outros graus de liberdade além do movimento

de jogo, bem como outras direções de propagação das ondas, que excitassem a embarcação de diferentes maneiras. Embora condições de calados maiores e outros graus de liberdade tendam a ser menos influenciados pelo efeito do acoplamento, o efeito cumulativo na fadiga ou mesmo em carregamentos extremos em projetos muito restritos pode ser significativo.

Neste estudo foi visto apenas o caso de um FPSO operante em águas profundas, a 790m de lâmina d'água. É esperado que *risers* mais longos, instalados a profundidades maiores aumentem significativamente a parcela de amortecimento associado a efeitos viscosos. Apenas *risers* flexíveis em catenária foram vistos. Outras configurações, como *lazy wave*, que têm comprimento de linha ainda maiores poderiam fornecer também um amortecimento adicional. A metodologia de investigação da influência do acoplamento aqui empregada poderia ser conduzida para outros tipos de sistemas flutuantes, como semi-submersíveis.

Efeitos de carregamentos de corrente, vento e movimentos de segunda ordem, que deslocassem a embarcação significativamente fora de sua posição central também não foram vistos. Resta espaço, também, para a avaliação de uma condição acidental, como, por exemplo, com o casco avariado ou linhas de ancoragem rompidas.

Finalmente, uma extensão natural do estudo seria avaliar o impacto da redução da amplitude do movimento de jogo devido ao acoplamento no dano por fadiga dos *risers*, já que este estudo se ocupou apenas de carregamentos extremos. O trabalho de SENRA em [27] comparou resultados de fadiga de análises acopladas e desacopladas para o caso de uma plataforma semi-submersível com *risers* rígidos em catenária. Esse estudo poderia ser estendido para outras embarcações e outros arranjos de *risers*.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Petrobras é a maior operadora de plataformas flutuantes do mundo. Disponível em: <www.brasil.gov.br>. Acesso em 22/02/2016.
- [2] Preparando a demanda por FPSOs. Disponível em: <www.sinaval.org.br>. Acesso em 22/02/2016.
- [3] Tipos de plataformas (Infográfico). Disponível em: <www.petrobras.com.br>. Acesso em 10/09/2016.
- [4] DIKDOGMUS, H., “Riser concepts for deep waters”, *Norwegian University of Science and Technology*, 2012.
- [5] JOURNÉE, J. M. J., MASSIE W. W., “Offshore hydromechanics”, 1ª edição, *Delft University of Technology*, 2001.
- [6] CHAKRABARTI, S. K., “Hydrodynamics of offshore structures”, 1ª edição, *Computational Mechanics Publications*, 1984.
- [7] CHAKRABARTI, S. K., “Theory and practice of hydrodynamics and vibration:”, 1ª edição, *World Scientific Publishing*, 2002.
- [8] FALTINSEN, O. M., “Sea loads on ships and offshore structures”, 2ª edição, *Cambridge University Press*, 1993.
- [9] NEWMAN, J. N., “Marine Hydrodynamics”, 1ª edição, *MIT Press*, 1977.
- [10] RAO, S. S., “Mechanical vibrations”, 5ª edição, *Pearson*, 2010.
- [11] BATHE, K. J., “Finite Element Procedures”, 2ª edição, K. J. Bathe, Watertown, MA, 2014.
- [12] Offshore Standard DNV-OS-F201, “Dynamic Risers”, *Det Norske Veritas*, 2010.
- [13] Programa SITUA/PROSIM, “Manual teórico”, Programa de Engenharia Civil da COPPE – UFRJ, 2006.
- [14] Programa WAMIT, “WAMIT Theory Manual” Department of Ocean Engineering - Massachusetts Institute of Technology, 1995.

- [15] SPARKS, C. P., “The influence of tension, Pressure and weight on pipe and riser deformations and stresses”, *Transactions of the ASME* Vol. 106, p.46-54, 1984.
- [16] SPARKS, C. P., “Fundamentals of marine riser mechanics: basic principles and simplified analyses”, 1ª edição, *PennWell*, 2007.
- [17] NEWMAN, J. N., “The exciting forces on fixed bodies in waves”, *Journal of ship research*, p.10-17, 1962.
- [18] ORMBERG, H., LIE, H., STANSBERG, C. T., “Coupled analysis of offshore floating systems”, *WIT Transactions on State-of-the-art in Science and Engineering* 18, p. 389-429, 2005.
- [19] CAIRE, M., SCHILLER, R. V., “The effect of coupled dynamic analysis of floater motions on the mooring and riser system response of an FPSO”, *Marine Systems & Ocean Technology* Vol. 7 No. 2, p. 95-106, 2012.
- [20] FERREIRA, M. D., DE OLIVEIRA, M. C., CARVALHO, R. C., SPHAIER, S. H., “Asymmetric FPSO roll response due to the influence of lines arrangement”, *OMAE* 2012, 2012.
- [21] GARRETT, D. L., “Coupled analysis of floating production systems”, *Ocean Engineering* 32, p. 802-816, 2005.
- [22] LOW, Y. M., LANGLEY, R. S., “Time and frequency domain coupled analysis of deepwater floating production systems”, *Applied Ocean Research* 28, p. 371-385, 2007.
- [23] TAHAR, A., Kim, M. H., “Hull/mooring/riser coupled dynamic analysis and sensitivity study of a tanker-based FPSO”, *Applied Ocean Research* 25, p.367-382, 2004.
- [24] CORRÊA, F. N., “Ferramentas computacionais para análise acoplada de sistemas offshore”, Programa de Engenharia Civil, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- [25] GIRÓN, A. R. C., “Projeto integrado de sistemas de ancoragem e risers em plataformas flutuantes de produção de petróleo”, Programa de Engenharia Civil, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

- [26] BAHIENSE, R. A., “Implementação e avaliação de uma metodologia fortemente acoplada para análise de sistemas flutuantes offshore”, Programa de Engenharia Civil, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
- [27] SENRA, S. F., “Metodologias de análise e projeto integrado de sistemas flutuantes para exploração de petróleo offshore”, Programa de Engenharia Civil, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.
- [28] DE MENEZES, F. G T., “Acoplamento hidrodinâmico estrutural de sistemas flutuantes multicorpos para produção e escoamento de petróleo e gás”, Programa de Engenharia Civil, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.
- [29] LIMA, D. A., “Avaliação de uma nova metodologia híbrida de projeto integrado de sistemas de ancoragem e risers em unidades flutuantes offshore”, Programa de Engenharia Civil, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- [30] PÉRONNE, S., IZARN, C., ESTRIER, P., CARO, O., LEROY, J., CHARLIAC, D., “Flexible pipe hysteretic bending behavior comparison with experimental characterization and finite element method”, OMAE 2015, 2015.

APÊNDICE A LINHAS DE ANCORAGEM E RISERS NO MODELO SITUA

A.1 Linhas de Ancoragem no modelo do SITUA

As linhas de ancoragem conforme modeladas no SITUA/PROSIM para os estudos de casos do Capítulo 6 estão apresentadas abaixo. A Tabela 11 apresenta as coordenadas das conexões de topo de todas as linhas, enquanto a Tabela 12 apresenta suas propriedades mecânicas.

Tabela 11 – Coordenadas das conexões de topo das linhas de ancoragem

Linha de Ancoragem	Xlocal	Ylocal	Zlocal	Azimute
	(m)	(m)	(m)	(graus)
L. Ancoragem 1	156,4	9,9	3,0	-53,3
L. Ancoragem 2	154,9	10,8	3,0	-55,9
L. Ancoragem 3	153,4	11,8	3,0	-59,4
L. Ancoragem 4	151,9	12,7	3,0	-62,3
L. Ancoragem 5	150,4	13,5	3,0	-65,1
L. Ancoragem 6	-146,1	7,1	7,0	-121,4
L. Ancoragem 7	-148,4	6,1	7,0	234,6
L. Ancoragem 8	-150,6	5,2	7,0	230,9
L. Ancoragem 9	-152,9	4,2	7,0	226,9
L. Ancoragem 10	-152,9	-4,2	7,0	129,8
L. Ancoragem 11	-150,6	-5,2	7,0	125,7
L. Ancoragem 12	-148,4	-6,1	7,0	121,6
L. Ancoragem 13	-146,1	-7,1	7,0	117,8
L. Ancoragem 14	150,4	-13,5	3,0	61,0
L. Ancoragem 15	151,9	-12,7	3,0	58,0
L. Ancoragem 16	153,4	-11,8	3,0	54,9
L. Ancoragem 17	154,9	-10,8	3,0	51,5
L. Ancoragem 18	156,4	-9,9	3,0	48,5

Tabela 12 – Propriedades dos materiais das linhas de ancoragem

Material	De	EA	EI	GJ	p (seco)	p (molhado)	Brk. Load
	(mm)	(kN)	(kN.m ²)	(kN.m ²)	(kN/m)	(kN/m)	(kN)
Amarra	114,0	771137,0	0,0	0,0	2,75	2,22	12420,0
Poliéster	212,0	216801,0	0,0	0,0	0,31	0,08	12753,0

A.2 Risers no modelo do SITUA

A Tabela 13 apresenta as coordenadas das conexões de topo e propriedades mecânicas de todos os *risers* modelados nos estudos de caso apresentado no Capítulo 6'.

Tabela 13 – Propriedades dos Risers

<i>Riser</i>	De (mm)	Di (mm)	EA (kN)	EI (kN.m ²)	GJ (kN.m ²)	p (kN/m)	Xlocal (m)	Ylocal (m)	Zlocal (m)	Azimute (graus)
Riser 1	230,2	154,0	428397,0	13,6	667,0	0,88	-17,8	29,3	0,3	117,3
Riser 2	129,0	0,0	75000,0	8,9	134,0	0,28	-16,6	29,3	0,3	117,2
Riser 3	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	-15,5	29,3	0,3	117,2
Riser 4	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	-14,3	29,3	0,3	235,0
Riser 5	129,0	0,0	75000,0	8,9	134,0	0,28	-13,1	29,3	0,3	235,0
Riser 6	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	-11,9	29,3	0,3	235,0
Riser 7	101,6	0,0	75000,0	36,0	61,1	0,19	-7,2	29,3	0,3	-122,0
Riser 8	233,1	152,4	399530,0	27,7	439,5	0,81	-6,0	29,3	0,3	-122,0
Riser 9	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	-4,9	29,3	0,3	-121,0
Riser 10	129,0	0,0	75000,0	8,9	134,0	0,28	-3,7	29,3	0,3	-121,0
Riser 11	230,2	154,0	428397,0	13,6	667,0	0,88	-2,5	29,3	0,3	-121,0
Riser 12	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	4,6	29,3	0,3	-118,0
Riser 13	129,0	0,0	75000,0	8,9	132,4	0,28	5,7	29,3	0,3	-118,0
Riser 14	230,2	154,0	428397,0	13,6	667,0	0,88	6,9	29,3	0,3	-118,0
Riser 15	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	11,6	29,3	0,3	-115,0
Riser 16	129,0	0,0	75000,0	8,9	132,4	0,28	14,0	29,3	0,3	-115,0
Riser 17	230,2	152,4	478041,0	13,6	590,0	0,85	15,2	29,3	0,3	-115,0
Riser 18	230,2	154,0	428397,0	13,6	667,0	0,88	16,3	29,3	0,3	111,3
Riser 19	129,7	0,0	358000,0	7,2	76,0	0,28	17,5	29,3	0,3	111,3
Riser 20	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	18,7	29,3	0,3	111,3
Riser 21	233,1	152,4	399530,0	27,7	439,5	0,81	24,6	29,3	0,3	109,3
Riser 22	101,6	0,0	75000,0	36,0	61,1	0,19	25,8	29,3	0,3	109,3
Riser 23	129,0	0,0	75000,0	8,9	132,4	0,28	26,9	29,3	0,3	-113,0
Riser 24	237,8	152,4	350649,0	28,9	761,0	0,88	28,1	29,3	0,3	-113,0
Riser 25	233,1	152,4	399530,0	27,7	439,5	0,81	29,3	29,3	0,3	107,3
Riser 26	101,6	0,0	75000,0	36,0	61,1	0,19	30,5	29,3	0,3	107,3
Riser 27	230,2	154,0	428397,0	13,6	667,0	0,88	36,4	29,3	0,3	105,3
Riser 28	101,6	0,0	75000,0	36,0	61,1	0,19	37,5	29,3	0,3	105,3
Riser 29	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	38,7	29,3	0,3	105,3
Riser 30	297,2	203,2	743040,0	78,3	1251,3	1,29	43,4	29,3	0,3	104,3
Riser 31	101,6	0,0	75000,0	36,0	61,1	0,19	45,8	29,3	0,3	104,3

Riser	De	Di	EA	EI	GJ	p	Xlocal	Ylocal	Zlocal	Azimute
	(mm)	(mm)	(kN)	(kN.m ²)	(kN.m ²)	(kN/m)	(m)	(m)	(m)	(graus)
Riser 32	101,6	0,0	75000,0	36,0	61,1	0,19	47,0	29,3	0,3	-107,0
Riser 33	233,1	152,4	399530,0	27,7	439,5	0,81	48,1	29,3	0,3	-107,1
Riser 34	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	49,3	29,3	0,3	102,3
Riser 35	129,0	0,0	75000,0	8,9	134,0	0,28	50,5	29,3	0,3	102,3
Riser 36	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	51,7	29,3	0,3	102,3
Riser 37	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	52,8	29,3	0,3	-105,0
Riser 38	129,0	0,0	75000,0	8,9	134,0	0,28	54,0	29,3	0,3	-105,0
Riser 39	230,2	154,0	428397,0	13,6	667,0	0,88	56,4	29,3	0,3	-105,1
Riser 40	230,2	154,0	428397,0	13,6	667,0	0,88	57,6	29,3	0,3	100,2
Riser 41	129,0	0,0	75000,0	8,9	134,0	0,28	58,7	29,3	0,3	100,3
Riser 42	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	59,9	29,3	0,3	100,3
Riser 43	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	61,1	29,3	0,3	-103,0
Riser 44	129,0	0,0	75000,0	8,9	134,0	0,28	62,2	29,3	0,3	-103,0
Riser 45	230,2	154,0	428397,0	13,6	667,0	0,88	62,4	29,3	0,3	-103,1
Riser 46	233,1	152,4	399530,0	27,7	439,5	0,81	63,4	29,3	0,3	98,2
Riser 47	101,6	0,0	75000,0	36,0	61,1	0,19	64,6	29,3	0,3	98,3
Riser 48	101,6	0,0	75000,0	36,0	61,1	0,19	67,0	29,3	0,3	-101,0
Riser 49	233,1	152,4	399530,0	27,7	439,5	0,81	68,2	29,3	0,3	-101,1
Riser 50	230,2	154,0	428397,0	13,6	667,0	0,88	69,3	29,3	0,3	-115,0
Riser 51	129,0	0,0	75000,0	8,9	134,0	0,28	70,5	29,3	0,3	-115,0
Riser 52	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	71,7	29,3	0,3	-115,0
Riser 53	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	72,9	29,3	0,3	-98,0
Riser 54	129,0	0,0	75000,0	8,9	134,0	0,28	74,0	29,3	0,3	-98,0
Riser 55	230,2	154,0	428397,0	13,6	667,0	0,88	75,2	29,3	0,3	-98,1
Riser 56	230,2	154,0	428397,0	13,6	667,0	0,88	77,6	29,3	0,3	95,3
Riser 57	129,0	0,0	75000,0	8,9	134,0	0,28	78,8	29,3	0,3	95,2
Riser 58	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	79,9	29,3	0,3	95,3
Riser 59	101,6	0,0	75000,0	36,0	61,1	0,19	81,1	29,3	0,3	-96,1
Riser 60	297,2	203,2	743040,0	78,3	1251,3	1,29	82,3	29,3	0,3	-96,1
Riser 61	230,2	154,0	428397,0	13,6	667,0	0,88	83,5	29,3	0,3	93,3
Riser 62	129,0	0,0	75000,0	8,9	134,0	0,28	84,6	29,3	0,3	93,2
Riser 63	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	85,8	29,3	0,3	93,3
Riser 64	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	88,2	29,3	0,3	-94,1
Riser 65	129,0	0,0	75000,0	8,9	134,0	0,28	89,4	29,3	0,3	-94,1
Riser 66	230,2	154,0	428397,0	13,6	667,0	0,88	90,5	29,3	0,3	-94,0
Riser 67	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	91,7	29,3	0,3	91,2
Riser 68	129,0	0,0	75000,0	8,9	134,0	0,28	92,9	29,3	0,3	91,3

<i>Riser</i>	De	Di	EA	EI	GJ	p	Xlocal	Ylocal	Zlocal	Azimute
	(mm)	(mm)	(kN)	(kN.m ²)	(kN.m ²)	(kN/m)	(m)	(m)	(m)	(graus)
Riser 69	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	94,1	29,3	0,3	-93,0
Riser 70	101,6	0,0	75000,0	36,0	61,1	0,19	95,2	29,3	0,3	-93,0
Riser 71	230,2	154,0	428397,0	13,6	667,0	0,88	96,4	29,3	0,3	-93,0
Riser 72	230,2	154,0	428397,0	13,6	667,0	0,88	98,8	29,3	0,3	88,2
Riser 73	129,0	0,0	75000,0	8,9	134,0	0,28	100,0	29,3	0,3	88,2
Riser 74	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	101,1	29,3	0,3	88,3
Riser 75	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	102,3	29,3	0,3	-89,1
Riser 76	129,0	0,0	75000,0	8,9	134,0	0,28	103,5	29,3	0,3	-89,0
Riser 77	230,2	154,0	428397,0	13,6	667,0	0,88	104,7	29,3	0,3	-89,0
Riser 78	230,2	154,0	428397,0	13,6	667,0	0,88	105,8	29,3	0,3	84,2
Riser 79	129,0	0,0	75000,0	8,9	134,0	0,28	107,0	29,3	0,3	84,2
Riser 80	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	109,4	29,3	0,3	84,2
Riser 81	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	110,6	29,3	0,3	-81,1
Riser 82	129,0	0,0	75000,0	8,9	134,0	0,28	111,7	29,3	0,3	-81,1
Riser 83	230,2	154,0	428397,0	13,6	667,0	0,88	112,9	29,3	0,3	-81,1
Riser 84	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	114,1	29,3	0,3	81,2
Riser 85	129,0	0,0	75000,0	8,9	134,0	0,28	115,3	29,3	0,3	81,2
Riser 86	168,0	101,6	321339,0	4,2	128,0	0,50	116,4	29,3	0,3	81,2
Riser 87	356,5	241,3	1157760,0	74,0	2593,6	2,12	148,5	4,6	-1,5	23,0
Riser 88	103,5	0,0	218946,0	3,7	100,0	0,21	148,5	4,6	-1,5	7,0