

MÉTODO SIMPLIFICADO PARA ANÁLISE DINÂMICA DE RISERS E DUTOS
SUBMARINOS EM FASES PRELIMINARES DE PROJETO

João Manoel de Aro Braz

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

Orientadores: Breno Pinheiro Jacob
Fabrício Nogueira Corrêa

Rio de Janeiro
Setembro de 2016

MÉTODO SIMPLIFICADO PARA ANÁLISE DINÂMICA DE RISERS E DUTOS
SUBMARINOS EM FASES PRELIMINARES DE PROJETO

João Manoel de Aro Braz

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 CIVIL.

Examinada por:

Prof. Breno Pinheiro Jacob, D.Sc.

Prof. Fabrício Nogueira Corrêa, D.Sc.

Prof. Bianca de Carvalho Pinheiro, D.Sc.

Dr. Allan Carré de Oliveira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
SETEMBRO DE 2016

Braz, João Manoel de Aro

Método Simplificado para Análise Dinâmica de Risers e Dutos Submarinos em Fases Preliminares de Projeto / João Manoel de Aro Braz – Rio de Janeiro: UFRJ / COPPE, 2016.

XIV, 101 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Breno Pinheiro Jacob

Fabício Nogueira Corrêa

Dissertação (mestrado) – UFRJ / COPPE / Programa de Engenharia Civil, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 99-101.

1. Projeto Offshore. 2. Análise Preliminar. 3. Dutos Submarinos. I. Jacob, Breno Pinheiro et al. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Aos meus avós Mario, Rosa e Angela,
que estarão sempre no meu coração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo carinho, apoio e compreensão. Ao meu pai Gilberto, minha mãe Denise, minha irmã Maria Julia, e minha avó Carmen, que me acompanharam ao longo deste trabalho, sempre me incentivando e fornecendo o suporte necessário para que eu pudesse me concentrar nos estudos, e ao meu primo Enrico pelos ensinamentos e conselhos.

Aos orientadores deste trabalho, Breno Jacob e Fabrício Corrêa, por terem me recebido na sua equipe e confiado na minha capacidade para desenvolver este trabalho.

Aos colegas de trabalho, especialmente Bernardo Pimentel, Bruno Escodino, Daniel Coutinho, Edivaldo Delgado, Lucas Amaro, Luiza Ortiz, Marcelo Granja e Monique Alves, pelo companheirismo e amizade que fizeram do local de trabalho um ambiente descontraído e motivador.

Aos colegas de curso, Caio Brandão, Elói Araújo, João Cortina e Rodrigo Moretti, pela ajuda no aprendizado durante as aulas, e especialmente a Rodrigo Costa pela mentoria e por servir de exemplo do potencial do meio acadêmico.

Aos meus amigos, pelos momentos de alegria compartilhados que compensam as dificuldades encontradas ao longo desta jornada, entre eles: Alexander e Christopher Chow, Armando Moura, Caio Mignoli, Dilson Nakatani, Evérton Val, Guilherme Fujitaki, Juliana Coraça, Leandro Hoshiko, Leonardo Barrea, Marcos Hashimoto, Nahuel Fornes, Nathan Fernandes, Rafael Ávila, e William Tagawa. Em especial a Iza e Rafael dos Santos pelo convite para testemunhar a sua união e a Julia Stock pela ajuda no meu estabelecimento no Rio de Janeiro.

Aos vários colegas do curso de línguas CLAC por enriquecerem a minha estadia no Rio de Janeiro com cultura e diversão.

À Agência Nacional do Petróleo e à Petrobras, por meio do programa de formação de recursos humanos PRH-02 e seu coordenador, o professor Luiz Landau, pelo apoio financeiro que possibilitou a realização deste trabalho.

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

MÉTODO SIMPLIFICADO PARA ANÁLISE DINÂMICA DE RISERS E DUTOS SUBMARINOS EM FASES PRELIMINARES DE PROJETO

João Manoel de Aro Braz

Setembro / 2016

Orientadores: Breno Pinheiro Jacob
Fabrício Nogueira Corrêa

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho apresenta um método simplificado para avaliação de esforços dinâmicos em *risers* e dutos submarinos em resposta a carregamentos de ondas, bem como a sua inserção no contexto de uma metodologia de projeto de estruturas *offshore*, com o objetivo de contornar o elevado custo computacional das simulações empregadas em fases preliminares de um projeto, levando a uma economia de tempo e custos associados a ele. O método proposto é aplicado em múltiplos estudos de casos com variações paramétricas e os resultados obtidos por ele são comparados com os de um método tradicional para permitir a verificação da sua precisão e consistência. Os estudos indicam uma qualidade satisfatória para os resultados do método proposto, especialmente quando o comportamento das estruturas segue uma tendência linear.

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

SIMPLIFIED METHOD FOR DYNAMIC ANALYSIS OF RISERS AND SUBSEA
PIPES ON PRELIMINARY PROJECT STAGES

João Manoel de Aro Braz

September / 2016

Advisors: Breno Pinheiro Jacob
Fabrício Nogueira Corrêa

Department: Civil Engineering

This work presents a simplified method for assessment of dynamic stress on risers and subsea pipes in response to wave loads, as well as its insertion in the context of a methodology for projects of offshore structures, with the objective of avoiding the high computational cost of the simulations used in the preliminary stages of a project, leading to savings in time and costs associated with it. The proposed method is applied to multiple case studies with variation of parameters and the results obtained by it are compared to those of a traditional method to enable the verification of its precision and consistency. The studies indicate a satisfactory quality for the results of the proposed method, especially when the behavior of the structures follows a linear trend.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Contexto	1
1.2. Motivação e objetivo	2
1.3. Organização	2
2. CONCEITOS GERAIS DA INDÚSTRIA <i>OFFSHORE</i>	4
2.1. Estruturas de um sistema <i>offshore</i> de produção de petróleo	4
2.1.1. Unidade de produção	4
2.1.2. Ancoragem	5
2.1.3. <i>Risers</i>	6
2.1.4. <i>Pipelines</i>	7
2.2. Operação de instalação de dutos submarinos	9
2.3. Carregamento de ondas	11
2.3.1. Ondas irregulares.....	11
2.3.2. Transformada de Fourier e representação no domínio da frequência	12
2.3.3. Espectros padrão.....	15
2.3.4. RAO de movimento e resposta no domínio da frequência.....	15
2.3.5. Análises com formulação acoplada e desacoplada.....	16
3. MÉTODO SIMPLIFICADO DE ANÁLISE DE <i>RISER</i> PARA FASES PRELIMINARES DE PROJETO.....	18
3.1. Concepção de um projeto na indústria <i>offshore</i>	18
3.2. Metodologias de análise e projeto para sistemas de produção de petróleo	19
3.2.1. Metodologia desacoplada	19
3.2.2. Metodologia acoplada	19
3.2.3. Metodologia PrIAR	20
3.3. Oportunidade de melhoria	21

3.4. Proposta do método do RAO de resposta.....	22
3.4.1. Princípio de funcionamento.....	23
3.4.2. Detalhamento do procedimento.....	24
3.4.3. Influência da linearidade da estrutura.....	27
4. ESTUDOS DE CASOS	29
4.1. Ferramenta computacional	29
4.2. <i>Riser</i> em plataforma de produção de petróleo (P-55).....	29
4.2.1. Modelo numérico.....	30
4.2.2. Criação dos RAOs de resposta	34
4.2.3. Carregamentos de ondas com intensidades diversificadas	44
4.2.4. Carregamentos de ondas com incidências diversificadas.....	63
4.3. Duto submarino em balsa de lançamento (BGL-1).....	67
4.3.1. Modelo numérico.....	68
4.3.2. Criação dos RAOs de resposta	73
4.3.3. Carregamentos de ondas com intensidades diversificadas	81
4.3.4. Carregamentos de ondas com incidências diversificadas.....	90
4.3.5. Máquina de tração com funcionamento diversificado.....	93
5. CONCLUSÕES.....	97
5.1. Conclusões e recomendações do trabalho	97
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	98
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Unidades de produção de petróleo offshore [2].....	5
Figura 2.2 – Unidade flutuante e risers de produção [3]	6
Figura 2.3 - Diferentes arranjos para risers de produção [4]	7
Figura 2.4 - Pipeline submarino para transporte de óleo [5]	8
Figura 2.5 - Balsa de lançamento S-Lay [6].....	10
Figura 2.6 - Geometria de dutos em lançamentos S-Lay e J-Lay [7].....	10
Figura 2.7 - Onda Irregular [8]	11
Figura 2.8 - Onda irregular como soma de ondas regulares [8]	12
Figura 2.9 - Representação da onda irregular nos domínios do tempo e da frequência [8]	13
Figura 3.1 - Procedimento da metodologia PrIAR [26]	21
Figura 3.2 - Espectros de onda com formulação JONSWAP e ruído branco.....	25
Figura 3.3 - Resposta do riser ao carregamento de ruído branco	26
Figura 3.4 - Resposta do riser ao carregamento JONSWAP	26
Figura 4.1 - Plataforma semissubmersível P-55 [31]	30
Figura 4.2 - Visualização do modelo numérico para estudo do riser	31
Figura 4.3 - Movimentação vertical da unidade flutuante P-55	32
Figura 4.4 - Resposta dinâmica de pontos da malha do riser na região de fundo	33
Figura 4.5 - Espectros de carregamento com formulação JONSWAP	35
Figura 4.6 - Espectros de carregamento com formulação de ruído branco	35
Figura 4.7 - RAO de força axial para o riser	37
Figura 4.8 - RAO de momento fletor para o riser	37
Figura 4.9 - RAO de curvatura para o riser	37
Figura 4.10 - RAO de tensão de Von Mises para o riser.....	38
Figura 4.11 - RAO de tensão circunferencial para o riser	38
Figura 4.12 - RAO de tensão longitudinal axial para o riser.....	38
Figura 4.13 - RAO de tensão longitudinal de momento para o riser.....	39
Figura 4.14 - RAO de tensão radial para o riser.....	39
Figura 4.15 - RAO de deformação total para o riser	39
Figura 4.16 - RAO de deformação axial para o riser.....	40
Figura 4.17 - RAO de deformação transversal para o riser	40

Figura 4.18 - Série temporal da resposta dinâmica de momento fletor do riser.....	42
Figura 4.19 - Série temporal da resposta dinâmica de curvatura do riser	43
Figura 4.20 - Resposta de força axial para o riser (topo/JSh4t10)	45
Figura 4.21 - Resposta de momento fletor para o riser (topo/JSh4t10).....	45
Figura 4.22 - Resposta de curvatura para o riser (topo/JSh4t10)	46
Figura 4.23 - Resposta de tensão de Von Mises para o riser (topo/JSh4t10).....	46
Figura 4.24 - Resposta de tensão circunferencial para o riser (topo/JSh4t10)	46
Figura 4.25 - Resposta de tensão longitudinal axial para o riser (topo/JSh4t10)	47
Figura 4.26 - Resposta de tensão longitudinal de momento para o riser (topo/JSh4t10).....	47
Figura 4.27 - Resposta de tensão radial para o riser (topo/JSh4t10)	47
Figura 4.28 - Resposta de deformação total para o riser (topo/JSh4t10)	48
Figura 4.29 - Resposta de deformação axial para o riser (topo/JSh4t10).....	48
Figura 4.30 - Resposta de deformação transversal para o riser (topo/JSh4t10)	48
Figura 4.31 - Resposta de força axial para o riser (fundo/JSh4t10)	49
Figura 4.32 - Resposta de momento fletor para o riser (fundo/JSh4t10)	50
Figura 4.33 - Resposta de curvatura para o riser (fundo/JSh4t10)	50
Figura 4.34 - Resposta de tensão de Von Mises para o riser (fundo/JSh4t10).....	50
Figura 4.35 - Resposta de tensão circunferencial para o riser (fundo/JSh4t10).....	51
Figura 4.36 - Resposta de tensão longitudinal axial para o riser (fundo/JSh4t10).....	51
Figura 4.37 - Resposta de tensão longitudinal de momento para o riser (fundo/JSh4t10)	51
Figura 4.38 - Resposta de tensão radial para o riser (fundo/JSh4t10).....	52
Figura 4.39 - Resposta de deformação total para o riser (fundo/JSh4t10)	52
Figura 4.40 - Resposta de deformação axial para o riser (fundo/JSh4t10)	52
Figura 4.41 - Resposta de deformação transversal para o riser (fundo/JSh4t10).....	53
Figura 4.42 - Resposta de força axial para o riser (topo/JSh4t7)	59
Figura 4.43 - Resposta de força axial para o riser (topo/JSh4t15)	59
Figura 4.44 - Resposta de força axial para o riser (topo/JSh2t10)	60
Figura 4.45 - Resposta de força axial para o riser (topo/JSh7t10)	60
Figura 4.46 - Resposta de tensão longitudinal axial para o riser (fundo/JSh7t15).....	61
Figura 4.47 - Resposta de momento fletor para o riser por vários RAOs (topo/JSh4t15)	62
Figura 4.48 - Resposta de força axial para o riser com incidência A90 (topo/JSh4t10)	66

Figura 4.49 - Resposta de força axial para o riser com incidência A180 (topo/JSh4t10)	66
Figura 4.50 - Resposta de força axial para o riser com incidência A270 (topo/JSh4t10)	67
Figura 4.51 - Balsa de lançamento de dutos BGL-1 [32]	68
Figura 4.52 - Visualização do modelo numérico para estudo do duto	69
Figura 4.53 - Movimentação vertical da balsa BGL-1	70
Figura 4.54 - Força axial estática ao longo do duto	71
Figura 4.55 – Momento fletor estático ao longo do duto	71
Figura 4.56 – Tensão de Von Mises estática ao longo do duto	72
Figura 4.57 - RAO de força axial para o duto	74
Figura 4.58 - RAO de momento fletor para o duto	74
Figura 4.59 - RAO de curvatura para o duto	75
Figura 4.60 - RAO de tensão de Von Mises para o duto	75
Figura 4.61 - RAO de tensão circunferencial para o duto	75
Figura 4.62 - RAO de tensão longitudinal axial para o duto	76
Figura 4.63 - RAO de tensão longitudinal de momento para o duto	76
Figura 4.64 - RAO de tensão radial para o duto	76
Figura 4.65 - RAO de deformação total para o duto	77
Figura 4.66 - RAO de deformação axial para o duto	77
Figura 4.67 - RAO de deformação transversal para o duto	77
Figura 4.68 - Série temporal da resposta dinâmica de curvatura do duto	79
Figura 4.69 - Resposta de força axial para o duto (RBh2)	80
Figura 4.70 - Resposta de força axial para o duto (overbend/JSh2t10)	81
Figura 4.71 - Resposta de momento fletor para o duto (overbend/JSh2t10)	81
Figura 4.72 - Resposta de curvatura para o duto (overbend/JSh2t10)	82
Figura 4.73 - Resposta de tensão de Von Mises para o duto (overbend/JSh2t10)	82
Figura 4.74 - Resposta de tensão circunferencial para o duto (overbend/JSh2t10)	82
Figura 4.75 - Resposta de tensão longitudinal axial para o duto (overbend/JSh2t10)	83
Figura 4.76 - Resposta de tensão longitudinal de momento para o duto (overbend/JSh2t10)	83
Figura 4.77 - Resposta de tensão radial para o duto (overbend/JSh2t10)	83
Figura 4.78 - Resposta de deformação total para o duto (overbend/JSh2t10)	84
Figura 4.79 - Resposta de deformação axial para o duto (overbend/JSh2t10)	84

Figura 4.80 - Resposta de deformação transversal para o duto (overbend/JSh2t10)	84
Figura 4.81 - Resposta de momento fletor para o duto (overbend/JSh2t7).....	85
Figura 4.82 - Resposta de momento fletor para o duto (overbend/JSh2t15).....	86
Figura 4.83 - Resposta de momento fletor para o duto (overbend/JSh1t10).....	86
Figura 4.84 - Resposta de momento fletor para o duto (overbend/JSh4t10).....	86
Figura 4.85 - Resposta de tensão circunferencial para o duto (sagbend/JSh4t10)	89
Figura 4.86 - Resposta de momento fletor para o duto com incidência A90 (over/JSh2t10)	92
Figura 4.87 - Resposta de momento fletor para o duto com incidência A180 (over/JSh2t10)	92
Figura 4.88 - Resposta de momento fletor para o duto com incidência A270 (over/JSh2t10)	93
Figura 4.89 - Resposta de tensão de Von Mises para o duto com máq. de tração variada (over/JSh2t10)	95
Figura 4.90 - Resposta de tensão longitudinal axial para o duto com máq. de tração variada (over/JSh2t10).....	96
Figura 4.91 - Resposta de tensão longitudinal de momento para o duto com máq. de tração variada (over/JSh2t10).....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Características do riser ensaiado	30
Tabela 4.2 - Pontos da malha de elementos finitos do riser na região de fundo	32
Tabela 4.3- Esforços monitorados nos ensaios e suas abreviações	36
Tabela 4.4 - Áreas dos RAOs de resposta do riser	41
Tabela 4.5 - Momentos espectrais da resposta do riser (topo/JSh4t10)	54
Tabela 4.6 - Momentos espectrais da resposta do riser (fundo/JSh4t10)	55
Tabela 4.7 - Momentos espectrais da resposta do riser a vários carregamentos (topo) .	57
Tabela 4.8 - Momentos espectrais da resposta do riser a vários carregamentos (fundo)	58
Tabela 4.9 - Momentos espectrais da resposta do riser a várias incidências (topo/JSh4t10)	64
Tabela 4.10 - Momentos espectrais da resposta do riser a várias incidências (fundo/JSh4t10)	65
Tabela 4.11 - Características do duto ensaiado	69
Tabela 4.12 - Afastamento entre duto e stinger para diferentes trações.....	70
Tabela 4.13 - Áreas dos RAOs de resposta do duto	78
Tabela 4.14 - Momentos espectrais da resposta do duto a vários carregamentos (overbend).....	87
Tabela 4.15 - Momentos espectrais da resposta do duto a vários carregamentos (sagbend)	88
Tabela 4.16 - Momentos espectrais da resposta do duto a várias incidências (over/JSh2t10)	90
Tabela 4.17 - Momentos espectrais da resposta do duto a várias incidências (sag/JSh4t10)	91
Tabela 4.18 - Momentos espectrais da resposta do duto a máq. de tração variada (JSh2t10).....	94

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto

O petróleo é um recurso natural extremamente importante na sociedade moderna. Sua alta densidade energética e facilidade de transporte e armazenamento fazem dele uma importante fonte de energia e seus componentes orgânicos fornecem os insumos necessários para a fabricação de vários produtos que utilizamos cotidianamente, de polímeros a medicamentos.

A indústria petrolífera é especialmente relevante para o Brasil, representando 13% do produto interno bruto e empregando cidadãos em vários setores da cadeia de produção, de técnicos a projetistas e pesquisadores. Aqui, a produção de petróleo começou em terra (*onshore*) no início do século XX, mas desde a década de 1970 o setor marinho (*offshore*) passou a exercer um papel de destaque, sendo atualmente responsável por mais de 90% do volume produzido em território nacional [1], o que traz certos desafios associados a operações neste ambiente.

Vários componentes formam um sistema de exploração *offshore*, dentre os quais os principais são as unidades de produção, navios ou plataformas em que ocorre o processamento e armazenamento de óleo, e os dutos de escoamento, que possibilitam o transporte do óleo do reservatório à unidade de produção e finalmente a terra. Estes dutos, na forma de *risers* e *pipelines*, são notoriamente propensos a falhas estruturais, e o projeto do sistema deve ser realizado de forma a garantir a sua integridade frente aos carregamentos ambientais que atuam no local da operação.

Para tal, simulações numéricas que comumente tomam a forma de cálculos estruturais auxiliados por computadores são empregadas para avaliar antecipadamente a resposta dos dutos em diversos cenários, permitindo a seleção dos materiais e dimensões mais adequados a cada operação. Em alguns casos, porém, a quantidade de simulações necessárias para uma avaliação detalhada da resposta dos dutos pode ser muito grande, impactando no cronograma e no custo de um projeto.

A isto se soma o fato que as novas reservas de petróleo sendo descobertas atualmente se encontram em ambientes cada vez mais hostis e instáveis, já que as mais facilmente acessíveis são as primeiras a serem exploradas e exauridas. Como consequência, exigências mais severas são colocadas sobre os projetos *offshore* para garantir a segurança da operação, o que aumenta ainda mais o número de simulações

necessárias, tornando os projetos modernos extremamente dependentes de capacidade de processamento computacional.

1.2. Motivação e objetivo

Tendo em vista o gargalo que um custo computacional elevado representa na execução de um projeto *offshore*, se justifica o desenvolvimento de novas técnicas que possam mitigar o seu impacto, tornando o processo menos demorado e dispendioso.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é a criação de um método expedito capaz de fornecer estimativas simplificadas para a resposta dinâmica dos dutos submarinos a um custo computacional significativamente reduzido.

Por se tratarem de estimativas, os resultados obtidos por este método representam uma simplificação do comportamento das estruturas, de modo que elas encontrariam a sua melhor aplicação nas fases preliminares de projeto, substituindo as simulações que têm o simples propósito de selecionar os casos críticos que devem seguir para as etapas posteriores de análise mais rigorosa. Deste modo, a resposta detalhada das estruturas ainda seria fornecida pelas simulações mais complexas das fases avançadas, mas grande parte do custo computacional global do projeto seria eliminada com a substituição das numerosas simulações das fases preliminares pelo método estudado neste trabalho.

1.3. Organização

Este texto é dividido em capítulos, sendo que cada um aborda um aspecto diferente do trabalho proposto.

O capítulo 2 apresenta diversos conceitos fundamentais sobre a indústria *offshore* e as ferramentas matemáticas comumente empregadas nos seus projetos, fornecendo um embasamento para as discussões que seguirão.

O capítulo 3 apresenta em detalhes o método proposto, explicando a sua formulação e demonstrando a sua aplicação passo a passo, assim como a sua inserção no contexto das metodologias atualmente empregadas na execução de projetos *offshore*.

O capítulo 4 apresenta os estudos de casos nos quais o método proposto é aplicado, possibilitando a verificação da sua eficácia e consistência através da comparação dos seus resultados com os de outros métodos tradicionais já consagrados.

O capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho, bem como sugestões para desenvolvimentos futuros.

O capítulo 6 apresenta as referências utilizadas ao longo do texto para permitir um aprofundamento sobre os conceitos abordados.

2. CONCEITOS GERAIS DA INDÚSTRIA *OFFSHORE*

Neste capítulo serão abordados diversos conceitos relacionados à indústria *offshore*. As principais estruturas e operações da indústria serão apresentadas, seguidas de uma discussão sobre os carregamentos típicos do ambiente marinho e as suas particularidades, bem como o tratamento matemático que se aplica a eles.

As referências bibliográficas relevantes para este capítulo são as de número [2] a [25].

2.1. Estruturas de um sistema *offshore* de produção de petróleo

A produção de petróleo em mar apresenta desafios maiores do que a produção em terra, como a dificuldade em escoar o óleo produzido até as refinarias e a necessidade de maximizar o retorno do alto custo dos equipamentos necessários para perfurar abaixo de lâminas d'água. Por isto, sistemas de produção *offshore* são complexos e contam com várias componentes especializadas para este ambiente, dentre as quais as principais são apresentadas a seguir.

2.1.1. Unidade de produção

A unidade de produção é a estrutura posicionada acima do nível do mar sobre a qual se acomodam os equipamentos e a tripulação que realizam as operações. Ela é responsável por receber, tratar e escoar, de modo seguro, a produção de petróleo dos campos ligados a ela.

No início da exploração *offshore*, as lâminas d'água eram rasas, não ultrapassando algumas dezenas de metros. Isto permitiu que os primeiros modelos de unidades de produção fossem fixos, compostos por chapas planas apoiadas sobre vigas rígidas que eram fixadas no leito marinho diretamente acima das reservas de óleo.

Com o avanço da exploração e o aumento da lâmina d'água, este arranjo se tornou inviável. A quantidade de vigas necessárias para manter as plataformas estáveis aumentaria exponencialmente, alterando a rigidez das estruturas da unidade de produção e tornando-as suscetíveis ao fenômeno de ressonância com as ondas do mar, pondo em risco a segurança da operação.

A solução para este problema foi encontrada na forma de unidades flutuantes, estruturas dotadas de flutuabilidade que são posicionadas sobre as reservas de óleo e dispensam estacas rígidas para sua fixação no solo marinho.

A Figura 2.1 apresenta as principais categorias de unidades de produção utilizadas atualmente.

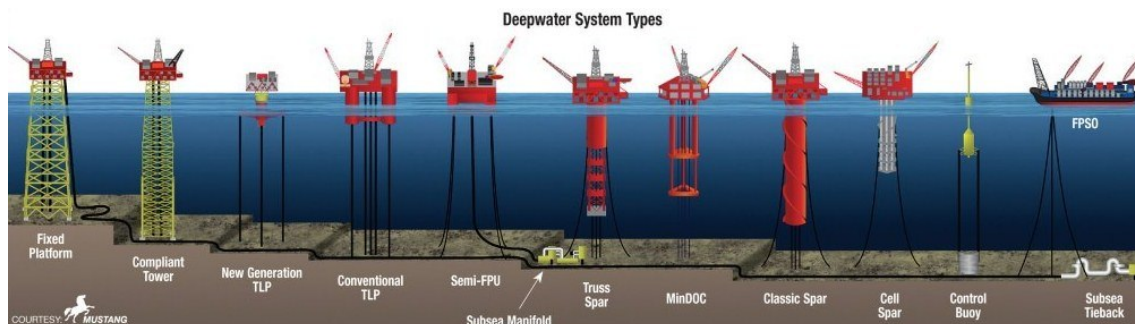


Figura 2.1 - Unidades de produção de petróleo offshore [2]

Como a exploração de petróleo no Brasil é caracterizada por águas profundas, unidades flutuantes são prevalentes na indústria nacional, especialmente as do tipo semissubmersível e FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*).

2.1.2. Ancoragem

Depois de ser implantada no local de operação, a unidade flutuante deve ser capaz de manter o seu posicionamento médio mesmo frente aos carregamentos ambientais. Para isto se utiliza um sistema de ancoragem que prende a unidade flutuante ao fundo do mar.

Este sistema consiste em linhas flexíveis, compostas por cabos de aço ou de polímeros e amarras, que ligam a plataforma a âncoras ou estacas que transferem os esforços exercidos sobre o casco ao solo marinho. Dois tipos de ancoragem podem ser estabelecidos: catenária convencional ou *taut leg*, sendo a diferença principal entre eles o raio de ancoragem exigido, menor na segunda opção.

Alternativamente, a plataforma pode fazer uso de um sistema denominado posicionamento dinâmico, no qual a sua posição é monitorada em tempo real por sinais de GPS e as suas variações são compensada pelo acionamento de propulsores. Como consequência, este sistema dispensa o uso de linhas de ancoragem.

2.1.3. Risers

Com a unidade flutuante posicionada na superfície do mar, é necessário um modo de ligá-la às reservas de petróleo localizadas no leito marinho para possibilitar a sua produção. Este papel é desempenhado pelos *risers*, tubulações pelas quais o petróleo é canalizado para ser transportado de modo controlado. A Figura 2.2 traz a representação de uma plataforma de produção de petróleo com *risers* e linhas de ancoragem.

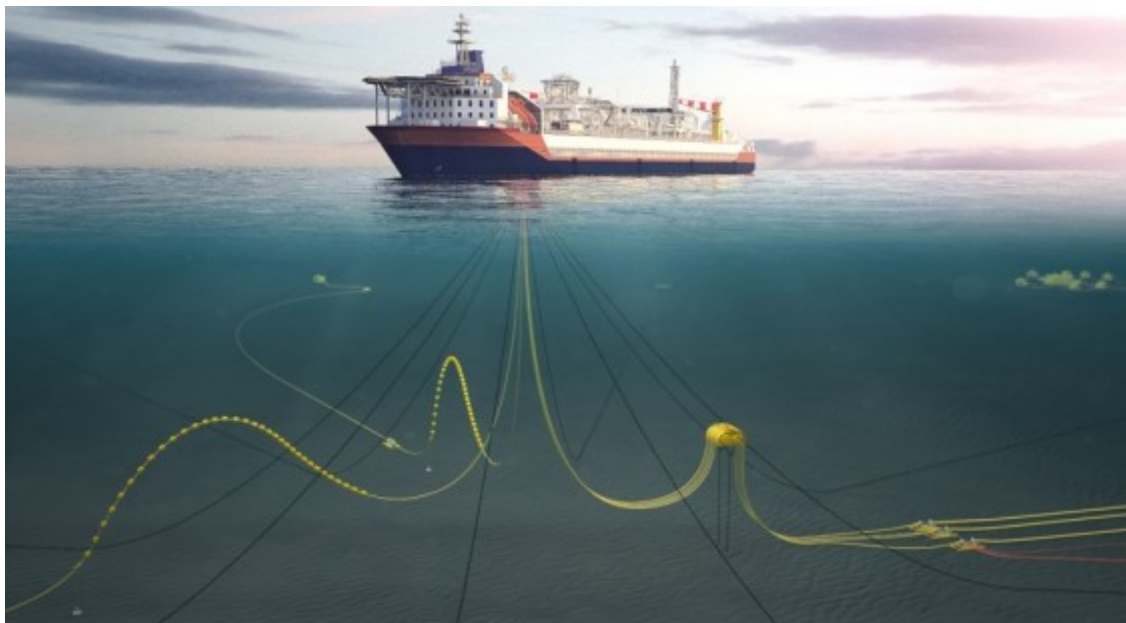


Figura 2.2 – Unidade flutuante e risers de produção [3]

O *riser* é fixado sobre a plataforma de produção e se estende em meio à água até o ponto em que toca o solo, denominado *touchdown point* (TDP), além do qual ele segue apoiado no solo até os equipamentos de controle de poço.

Cabe notar que o *riser* opera constantemente em movimentação dinâmica, causada pelos movimentos transmitidos pela unidade flutuante e pela influência de correntezas e vibrações induzidas por vórtices. Assim, o ponto que toca o solo é alterado constantemente, de modo que a *touchdown zone* (TDZ), a região que engloba todos os pontos que podem ser o TDP em diferentes momentos, é um termo mais útil na definição deste contato.

Tradicionalmente os *risers* são fabricados em aço, o que confere a eles um comportamento rígido. Como consequência, este modelo de *riser* é propenso à falha por fadiga, especialmente na região da TDZ onde se verificam mudanças acentuadas na sua curvatura e atrito com o solo quando ele se movimenta. Nos casos em que a falha por

fadiga representa um risco elevado para a operação, se costuma empregar *risers* flexíveis, compostos por diversas camadas de aço e polímero intercaladas que proporcionam uma maior flexibilidade e reduzem a suscetibilidade a falhas.

Entre a plataforma e o TDP o *riser* assume naturalmente uma forma geométrica decorrente do seu próprio peso denominada catenária, similar a uma parábola. Mas esta geometria pode ser manipulada em busca de certas vantagens. A variação mais comum conta com a instalação de boias ao longo do *riser*, geralmente próximas à TDZ, com o objetivo de conferir a ele uma maior fluviabilidade, reduzindo a movimentação transferida pela unidade flutuante e consequentemente a probabilidade de falha por fadiga. A Figura 2.3 mostra as diferentes possibilidades para os arranjos de *riser*.

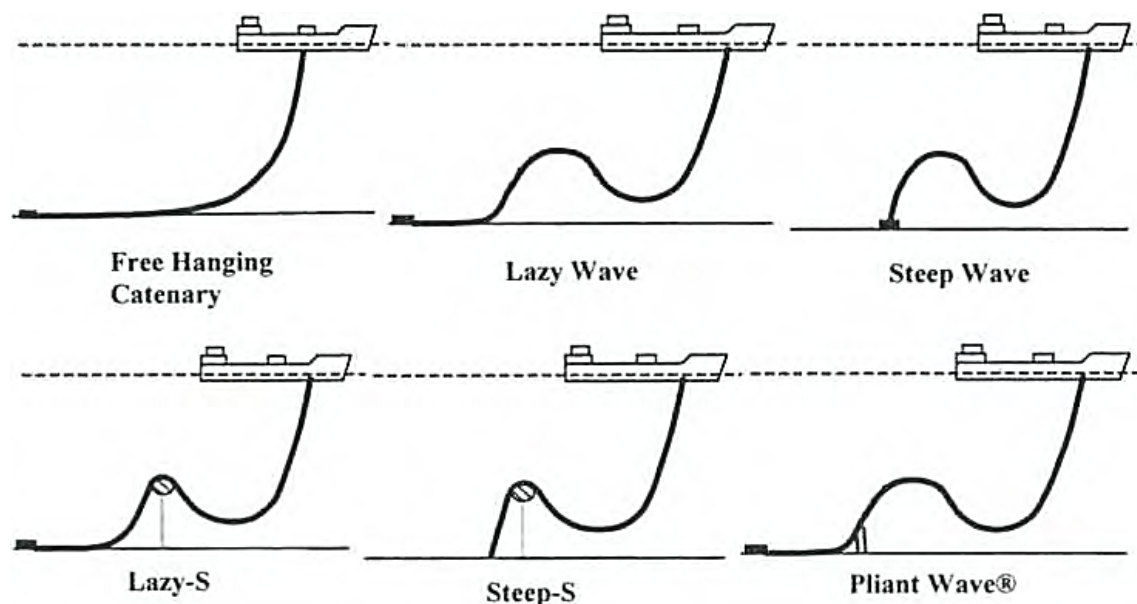


Figura 2.3 - Diferentes arranjos para risers de produção [4]

2.1.4. Pipelines

Assim como os *risers* transportam o petróleo dos reservatórios até a plataforma, os *pipelines* são as tubulações que o transportam da plataforma até a costa, onde ele pode ser refinado, distribuído e comercializado. A Figura 2.4 traz a representação de um *pipeline*.

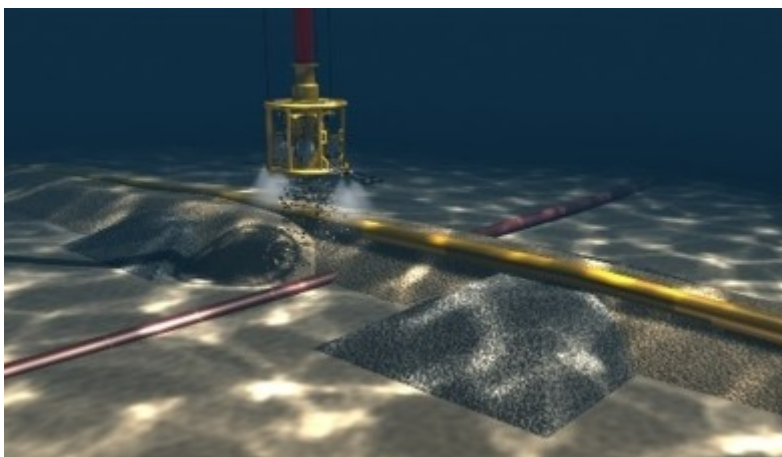


Figura 2.4 - Pipeline submarino para transporte de óleo [5]

Os *pipelines* são instalados e apoiados inteiramente sobre o solo marinho. Consequentemente, eles não sofrem o efeito dinâmico das movimentações transferidas por unidades flutuantes, o que permite que sua estrutura seja mais reforçada e pesada que a de um *riser*.

Além do duto de aço, similar aos *risers* rígidos, *pipelines* contam com várias camadas adicionais que lhes conferem mais resistência. Entre elas estão revestimentos anticorrosivos para proteção contra corrosão causada tanto pelo petróleo que escoar no seu interior quanto pelos sais do mar no seu exterior, revestimento isolante para impedir a perda de calor e a formação de material sólido dentro do duto, e revestimento de concreto para aumentar a resistência mecânica e estabilidade. Outra medida de proteção comumente adotada é o soterramento dos *pipelines* no solo marinho.

Por motivos de simplificação logística, os *pipelines* se agrupam em complexas redes com diversas linhas interconectadas que podem se estender por centenas de quilômetros e atravessar diversos campos de produção de petróleo. Varias linhas menores tendem a convergir para troncos principais que concentram o volume escoado à medida que as malhas se aproximam da costa.

Em regiões onde não é viável a construção de uma malha de *pipelines*, devido a longas distâncias ou clima desfavorável, o escoamento da produção de um campo de petróleo é feito por meio de navios aliviadores que visitam a plataformas com uma determinada frequência para descarregar o óleo produzido e transportá-lo até a costa.

2.2. Operação de instalação de dutos submarinos

Os dutos submarinos utilizados na exploração de petróleo, como os *pipelines*, geralmente são fabricados a partir da soldagem de vários segmentos de tubulação de aço em uma única linha que posteriormente deve ser instalada no local onde ela irá operar. Estes procedimentos de fabricação e instalação podem ser realizados de alguns modos distintos, com vantagens e desvantagens associadas a cada um.

O primeiro modo, mais tradicional, é o de reboque, no qual a operação de soldagem ocorre em terra, o que permite uma acomodação mais organizada para os equipamentos e os operários e traz agilidade para a montagem e a inspeção do duto. Em seguida, em uma operação separada, o duto é transportado por navios rebocadores até o seu destino e instalado. A limitação deste sistema se encontra na fase de instalação, já que os dutos podem ter grandes comprimentos ou precisarem ser deslocados por longas distâncias, dificultando a operação.

Nestes casos é preferível o sistema *S-Lay*, no qual o duto é fabricado em balsas diretamente no local em que ocorrerá a sua instalação. Para tal, estas balsas são equipadas com estações de soldagem e inspeção nas quais o duto é construído a partir de seções individuais que são fornecidas por navios de apoio. À medida que o duto é soldado, ele é lançado ao mar para ceder espaço às próximas seções, de modo que a instalação ocorre ao mesmo tempo que a construção.

Como as estações de trabalho são dispostas na posição horizontal, o duto é construído e lançado ao mar na direção paralela à lâmina d'água. Na saída da balsa ele é apoiado sobre uma estrutura treliçada denominada *stinger* que tem a função de suavizar a sua curvatura de lançamento e reduzir as tensões na estrutura. Depois do *stinger* o duto segue dentro do mar até fazer contato com o TDP, assumindo uma forma geométrica que se assemelha a um “S” que dá origem ao nome do procedimento *S-Lay*.

A Figura 2.5 traz uma balsa de lançamento *S-Lay* e o detalhe do duto apoiado sobre o *stinger* na sua saída.



Figura 2.5 - Balsa de lançamento S-Lay [6]

O sistema *S-Lay* não encontra boa aplicação em locais onde a lâmina d'água é muito profunda, já que a curvatura adquirida pelo duto ao deixar a balsa é muito acentuada, o que pode levar à sua falha. Para estes casos foi desenvolvido o sistema *J-Lay*, no qual as estações de soldagem e inspeção do duto são montadas verticalmente em uma torre. Consequentemente, o duto deixa a torre, e a balsa, de modo perpendicular à lâmina d'água, sem assumir nenhuma curvatura, o que só ocorre próximo à região do TDP, em uma configuração geométrica que lembra a letra “J”.

A Figura 2.6 traz uma comparação entre as geometrias assumidas pelo duto nos sistemas de instalação *S-Lay* e *J-Lay*.

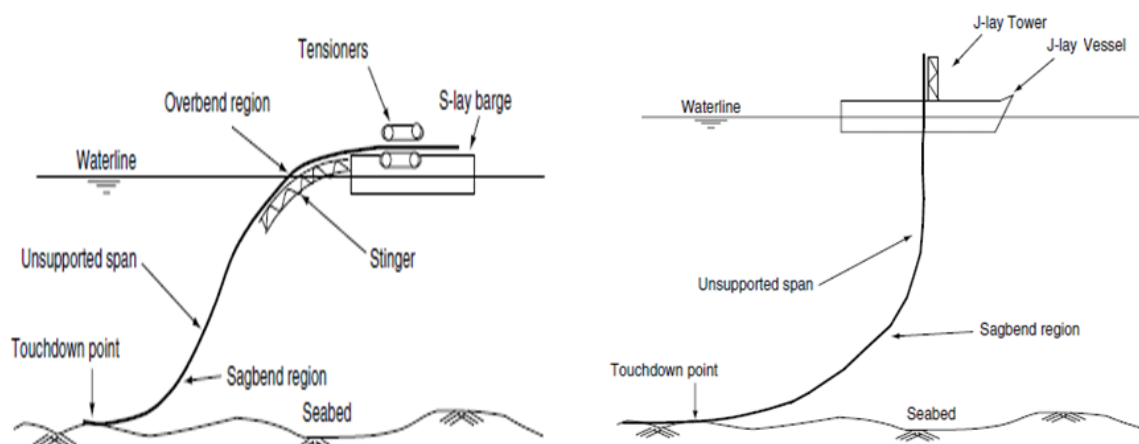


Figura 2.6 - Geometria de dutos em lançamentos S-Lay e J-Lay [7]

2.3. Carregamento de ondas

As estruturas *offshore*, durante sua operação, são sujeitas a diversos carregamentos típicos do ambiente marinho, principalmente de ventos, correntezas e ondas. Estes carregamentos têm comportamento dinâmico e aleatório, ou seja, eles variam em intensidade e direção de modo não periódico, o que faz necessário um tratamento matemático especializado para a sua caracterização e aplicação no projeto das estruturas.

As próximas seções serão dedicadas à exposição do tratamento de um destes carregamentos: o de ondas.

2.3.1. Ondas irregulares

As ondas registradas na superfície do mar não seguem o modelo de onda ideal com alturas e períodos bem definidos. Ao invés disso, sua forma varia constantemente sem repetir qualquer padrão, o que dá origem à sua classificação como irregulares. A Figura 2.7 traz o exemplo de uma destas ondas, registrada pela elevação de um ponto na superfície do mar ao longo do tempo.

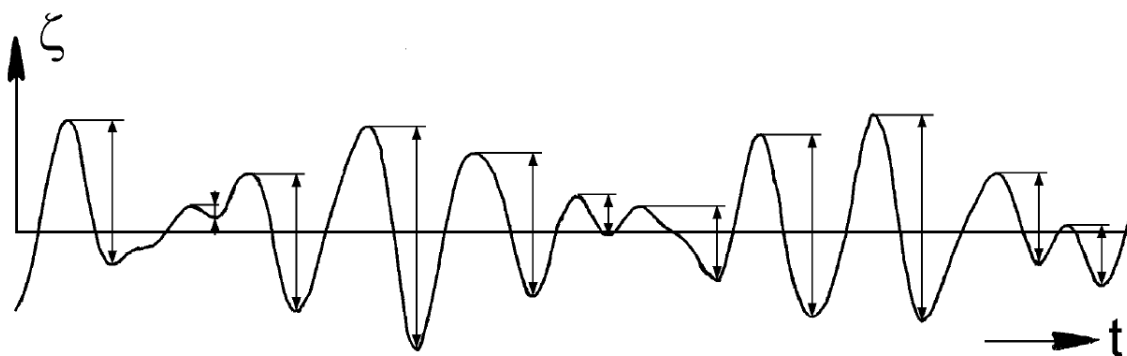


Figura 2.7 - Onda Irregular [8]

A cada cruzamento com a elevação zero a onda irregular apresenta um período e uma altura diferente, de modo que não é possível identificar um valor único e constante para estes parâmetros. Mas é possível considerar cada ciclo como uma onda individual, com um período e uma altura associados, e calcular as suas médias para caracterizar o carregamento como um todo.

Uma informação importante que pode ser obtida a partir desta onda irregular é a média de alturas do um terço de ondas com as maiores alturas. Este valor expressa a

altura média de onda que seria registrada visualmente por um observador treinado e é conhecido como altura significativa de onda (H_s), um parâmetro importante que será utilizado nas próximas seções.

2.3.2. Transformada de Fourier e representação no domínio da frequência

Qualquer onda irregular pode ser vista como uma soma linear de várias, se necessário infinitas, componentes de ondas regulares com períodos distintos, cada uma com uma altura e uma fase específica. A Figura 2.8 ilustra este princípio com uma onda irregular formada a partir de duas ondas regulares.

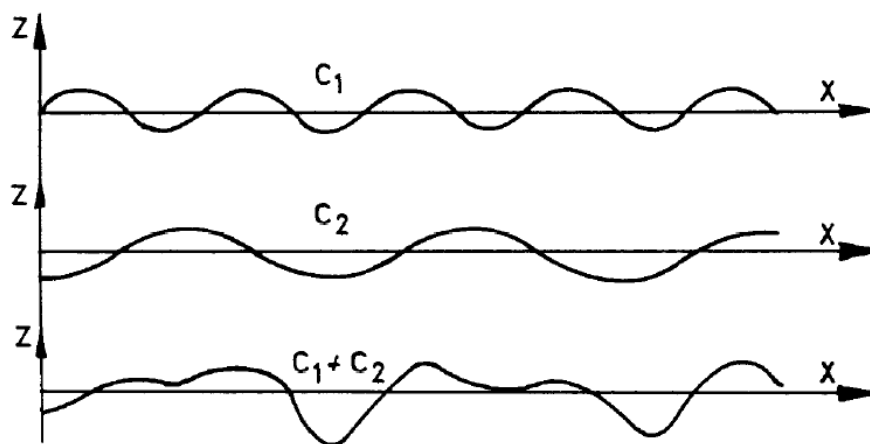


Figura 2.8 - Onda irregular como soma de ondas regulares [8]

Estas componentes podem ser obtidas a partir do sinal de onda original pelo processo conhecido como transformada de Fourier. A transformada toma os valores apresentados como função do tempo e os decompõe nas suas frequências constituintes, ou seja, ela transforma o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência.

A informação representada em cada domínio é exatamente idêntica, apenas visualizada de um modo diferente. Enquanto que no domínio do tempo a onda é representada pela sua elevação em cada instante de tempo, no domínio da frequência ela é representada pela amplitude (altura) e fase das suas componentes harmônicas em cada frequência.

A transformada de Fourier pode ser empregada através de duas formulações distintas: contínua ou discreta. A primeira se aplica a funções simbólicas enquanto que a segunda se aplica a valores discretizados. Além de ser apropriada para implementação em ferramentas computacionais, a formulação discreta é mais relevante para a análise

de ondas, já que seu registro é feito pela medição da elevação de boias no mar em intervalos de tempo regulares, portanto em séries de valores discretos. Como tal, esta é a formulação apresentada na Equação 1.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n * e^{-2\pi i k n / N} \quad (1)$$

Onde X_k é o vetor com as componentes da transformada de Fourier de x_k

x_k é o vetor com as componentes da série temporal original

N é a quantidade de componentes do vetor x_k

n e k são contadores inteiros

A transformada de Fourier fornece a amplitude das componentes harmônicas do sinal de onda irregular, mas também é possível expressar estas componentes pela sua energia ao se elevar ao quadro os valores das amplitudes. A representação da energia das componentes harmônicas ao longo das suas frequências fornece o espectro de energia da onda irregular, conforme apresentado na Figura 2.9.

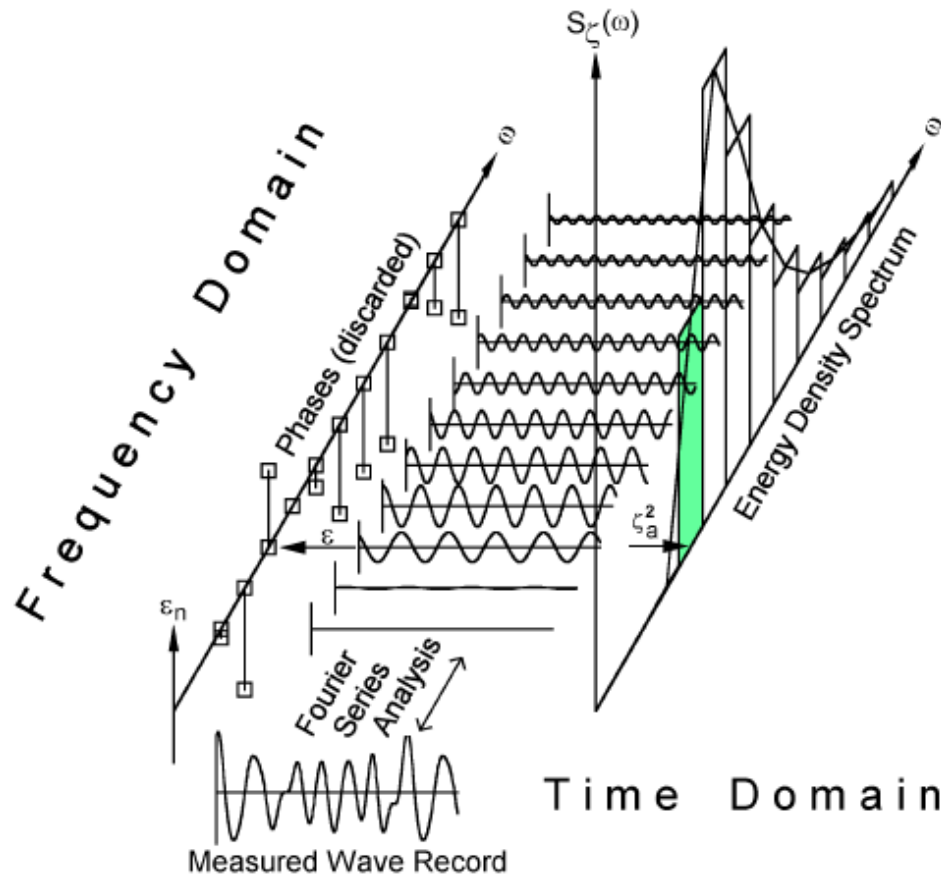


Figura 2.9 - Representação da onda irregular nos domínios do tempo e da frequência [8]

Quando o sinal da onda irregular é expresso no tempo em segundos, o espectro de energia resultante terá suas frequências expressas em Hertz. Mas é possível transformar os resultados para que eles sejam representados em graus radianos por segundo. Para tal, é necessário multiplicar as frequências do espectro pelo valor 2π e simultaneamente dividir as energias pelo mesmo valor para que se preserve a área e a energia total do espectro.

O espectro de energia fornece informações importantes sobre a onda irregular. Uma delas é o período de pico (T_p) da onda irregular, o período correspondente à frequência da maior componente de energia do espectro.

Outras informações podem ser inferidas a partir dos momentos espectrais, descrições quantitativas da forma do espectro cuja formulação é apresentada na Equação 2.

$$M_n = \int_{-\infty}^{\infty} x^n * f(x) dx \quad (2)$$

Onde M_n é o momento espectral de ordem n da função $f(x)$

n é um índice inteiro

Os momentos espectrais permitem a estimativa de diversas propriedades estatísticas da onda irregular, como variância da elevação da superfície do mar, altura significativa de onda e período de cruzamento zero, além de fornecerem parâmetros para a distribuição de probabilidades de alturas da onda.

Assim como a transformada de Fourier é utilizada para converter um sinal de onda irregular no domínio do tempo em um espectro de energia no domínio da frequência, um espectro de energia pode ser utilizado na criação de uma série temporal de onda. Para tal, basta discretizar o espectro em faixas de frequência bem definidas e somar as componentes harmônicas de cada uma com as suas respectivas amplitudes.

O único cuidado necessário é a utilização de ângulos de fase diferentes, preferivelmente aleatórios, em cada componente harmônica para evitar que a onda resultante seja periódica. Cada conjunto diferente de ângulos de fase gera uma série temporal diferente, mas todas terão as mesmas propriedades estatísticas previstas pelo espectro que as originou.

2.3.3. Espectros padrão

Um espectro padrão é uma equação que aproxima o espectro de energia de uma onda irregular a partir das suas características principais, os valores de H_s e T_p . Como os espectros padrão dependem apenas destes dois parâmetros, eles facilitam a padronização da descrição de diferentes espectros de energia e permitem a criação de espectros para uma onda irregular com H_s e T_p de interesse sem a necessidade do registro da sua série temporal para aplicação na transformada de Fourier.

Vários espectros padrão já foram propostos com diferentes formulações, sendo os mais tradicionais o de Pierson-Moskowitz e o de JONSWAP (*Joint North Sea Wave Observation Project*). No Brasil, o espectro padrão mais utilizado em projetos *offshore* é o JONSWAP, de modo que a sua formulação é apresentada na Equação 3 e suas componentes apresentadas nas Equações 4 a 6.

$$S_{\zeta}(\omega) = \alpha \frac{g^2}{2\pi^5 \omega^5} \exp \left[-1.25 \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left[-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2} \right]} \quad (3)$$

$$\gamma = \exp \left[1,0394 - 0,01966 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \right] \quad (4)$$

$$\alpha = 5,0609 \frac{H_s^2}{T_p^4} [1 - 0,287 \ln(\gamma)] \quad (5)$$

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p} \quad (6)$$

Onde $S_{\zeta}(\omega)$ é o espectro de energia da onda em função da frequência ω

g é a gravidade local

σ é uma função degrau que vale 0,07 quando $\omega < \omega_p$

0,09 quando $\omega > \omega_p$

2.3.4. RAO de movimento e resposta no domínio da frequência

A resposta das unidades flutuantes a carregamentos de ondas é obtida por modelos hidrodinâmicos complexos que estimam a pressão causada pelas ondas no

casco da unidade, geralmente em estudos de modelos em escala reduzida em tanques de prova ou em simulações de dinâmica computacional.

Uma das medidas de resposta que pode ser obtida por estes meios, denominada *Response Amplitude Operator* (RAO) de movimento, representa a movimentação resultante da unidade flutuante para a incidência de ondas regulares com altura unitária e períodos variados. Naturalmente, diferentes RAOs são obtidos para cada grau de liberdade do corpo e ângulo de incidência de onda.

Isto permite que o RAO de movimento seja posteriormente utilizado na avaliação da resposta de movimentação da mesma unidade flutuante a qualquer carregamento de ondas, assumindo a linearidade deste fenômeno, através da sua multiplicação pelo espectro de energia da onda, conforme apresentado na Equação 7.

$$S_i(\omega) = RAO_i^2(\omega) S_\zeta(\omega) \quad (7)$$

Onde $S_i(\omega)$ representa o espectro de resposta de movimentação da unidade flutuante

i representa os diversos graus de liberdade e ângulos de incidência

A vantagem da utilização de um RAO de movimento está na sua capacidade de fornecer a resposta de movimentação da unidade flutuante para qualquer carregamento de onda, enquanto que cada estudo hidrodinâmico fornece a resposta para um carregamento específico. Além disto, o processo de utilização do RAO de movimento é rápido e simples, tomando a forma de uma única operação aritmética, ao passo que os estudos hidrodinâmicos são mais complexos e demorados.

2.3.5. Análises com formulação acoplada e desacoplada

A resposta das linhas do sistema de produção, *risers* e linhas de ancoragem, a carregamentos de ondas pode ser obtida por análises com duas formulações distintas: acoplada ou desacoplada.

Nas análises desacopladas a movimentação da unidade flutuante obtida pelo seu RAO de movimento para um determinado carregamento é transferida para o topo das linhas, onde elas se conectam com a unidade flutuante, e os efeitos desta movimentação na geração de esforços nas linhas são calculados por modelos de elementos finitos.

A desvantagem desta modalidade de análise é que ela corresponde a uma simplificação, já que a presença das linhas não tem impacto sobre a movimentação da unidade flutuante, que depende somente do seu RAO de movimento. Ou seja, as partes constituintes do sistema são avaliadas separadamente, justificando a nomenclatura desacoplada. Deste modo, fenômenos importantes decorrentes da interação entre as linhas e a unidade flutuante podem acabar sendo ignorados e a resposta do sistema como um todo não ser completamente representativa do que seria esperado para aquele carregamento. Em contrapartida, como consequência das simplificações envolvidas nestas análises, elas demandam poucos recursos computacionais.

Já as análises acopladas seguem na direção oposta. As respostas de movimentação da unidade flutuante deixam de ser calculadas a partir do seu RAO de movimento e um modelo único é criado para representar o sistema de produção completo, incorporando tanto o modelo hidrodinâmico da unidade flutuante quanto o modelo de elementos finitos das linhas, sobre o qual incide o carregamento de ondas na forma da sua série temporal. Deste modo, as linhas também passam a influenciar a movimentação da unidade flutuante, alterando consequentemente os esforços que elas registram.

Como as análises acopladas consideram todos os elementos do sistema em conjunto e são capazes de representar a interação entre eles, as respostas obtidas por elas são mais precisas. Mas, como era de se esperar, seus modelos são muito mais complexos e exigem muito mais recursos computacionais.

3. MÉTODO SIMPLIFICADO DE ANÁLISE DE *RISER* PARA FASES PRELIMINARES DE PROJETO

Neste capítulo serão apresentadas as metodologias de projeto de *riser* atualmente empregadas na indústria *offshore* e suas características serão discutidas.

Em seguida será oferecida uma proposta de alteração a elas, visando seu aprimoramento, na forma de um método alternativo de análise para fases preliminares de projeto. Este método será discutido em detalhes, seus princípios de funcionamento serão explicados e sua aplicação será descrita passo a passo.

As referências bibliográficas relevantes para este capítulo são as de número [26] a [29].

3.1. Concepção de um projeto na indústria *offshore*

Um projeto na indústria *offshore*, quando relacionado à atividade petrolífera, tem por objetivo a instalação de um sistema de estruturas que permita a exploração e produção de uma reserva de óleo localizada abaixo do solo marinho, garantindo a segurança e rentabilidade da operação.

As estruturas deste sistema são escolhidas a partir da identificação de um reservatório de petróleo para permitir a sua produção com a maior eficiência possível. De modo simplificado, o tipo de unidade de produção pode ser fixo ou flutuante a depender da profundidade da lâmina d'água e o número de *risers* de produção e injeção necessários depende do volume de produção desejado e das características de densidade e viscosidade do óleo, enquanto que as linhas de ancoragem são dimensionadas para comportar todo o arranjo.

Uma vez definido o sistema mais indicado para realizar a exploração, é necessário realizar o dimensionamento de cada componente para garantir que elas resistirão aos esforços causados pelos carregamentos ambientais durante a operação. Para tal, análises que fazem uso de simulações numéricas são utilizadas para reproduzir estes carregamentos e estimar as forças, tensões e deformações geradas nos *risers* e linhas de ancoragem, permitindo identificar previamente se os esforços serão capazes de causar falhas por ultrapassar a resistência das estruturas ou por acúmulo de fadiga. Isto

permite que as componentes do sistema sejam redimensionadas até que se atinja a garantia da sua segurança operacional.

Estas análises para os *risers* e linhas de ancoragem, componentes críticos de um sistema de produção de petróleo *offshore*, são atualmente executadas seguindo diferentes metodologias, cada uma com particularidades que as conferem certas vantagens e desvantagens.

3.2. Metodologias de análise e projeto para sistemas de produção de petróleo

As principais metodologias para análise de *risers* e linhas de ancoragem serão apresentadas a seguir, com foco nos sistemas de produção que envolvem plataformas flutuantes que são os mais relevantes no cenário brasileiro.

3.2.1. Metodologia desacoplada

A metodologia desacoplada é a mais tradicional em projetos *offshore*. Nela, as simulações são realizadas através de formulações desacopladas e as análises das diferentes componentes do sistema, especialmente *risers* e linhas de ancoragem, são realizadas em etapas separadas e contam com pouca interação entre si.

Em um primeiro momento, a análise das linhas de ancoragem busca determinar os *offsets* da plataforma e a tração nas linhas em resposta a carregamentos ambientais. Posteriormente, na etapa de análise dos *risers*, estes são posicionados sobre os *offsets* do projeto de ancoragem e sua resposta é testada para novos carregamentos, que podem ser completamente diferentes dos que foram considerados anteriormente.

Na prática, a falta de interação entre os projetos de ancoragem e *risers* força cada um a se adequar às condições mais críticas do outro. Isto faz com que pelo menos um destes projetos não seja otimizado, levando a gastos desnecessários na construção do sistema.

3.2.2. Metodologia acoplada

A metodologia acoplada surgiu como uma alternativa à metodologia desacoplada ao empregar simulações com formulações acopladas, que permitem que as

análises de todas as componentes do sistema sejam realizadas simultaneamente. Como consequência, os resultados obtidos por esta metodologia são mais precisos e o projeto de cada componente do sistema é otimizado.

Infelizmente, esta metodologia traz um custo computacional muito alto, especialmente quando se considera que é necessário testar vários carregamentos ambientais para um único sistema. Deste modo, a utilização exclusiva da metodologia acoplada em um projeto se torna inviável, e ela tem melhor aproveitamento quando aplicada a poucos casos de carregamentos considerados críticos para o sucesso da operação, cujo entendimento detalhado é indispensável.

3.2.3. Metodologia PrIAR

Para contornar as desvantagens das metodologias citadas anteriormente, novas técnicas vêm sendo desenvolvidas na indústria *offshore*. Grande parte dos esforços tem sido direcionada para o aprimoramento da metodologia desacoplada, ao promover uma maior interação entre os projetos de linhas de ancoragem e *risers*, permitindo ganhos de eficiência e redução de custos em cada um.

Uma das metodologias mais completas neste sentido é a denominada Projeto Integrado Ancoragem/*Risers* (PrIAR) [26]. Esta metodologia faz uso tanto de formulações desacopladas quanto acopladas em diferentes etapas, o que a torna uma metodologia híbrida.

Ela pode ser dividida em três fases principais. Na primeira, de projeto preliminar, propostas para as configurações de *risers* e linhas de ancoragem são definidas e submetidas às primeiras análises de formulação desacoplada, através das quais são obtidos a região de operação segura para os *riser*, ou zona de operação dos *risers* (ZOR), e os *offsets* das linhas de ancoragem. Nesta fase ainda não há interação entre os projetos de *riser* e ancoragem.

Na fase intermediária esta interação é introduzida. Os resultados de ZOR e *offset* são comparados, o que permite verificar se o sistema de ancoragem atende aos limites operacionais dos *risers*. Isto possibilita que o arranjo do sistema de ancoragem seja reavaliado em busca de configurações com melhor desempenho, atendendo a critérios tanto da própria ancoragem como também do *riser*. Em seguida, os casos de carregamento são aplicados sobre o modelo, cuja resposta é obtida também por

simulações com formulação desacoplada. Em todos eles, as trações das linhas de ancoragem são revisadas e os *offsets* comparados novamente com o ZOR. Os carregamentos que causaram as respostas mais críticas no sistema são identificados.

Na fase final a resposta do sistema aos carregamentos críticos é calculada por simulações com formulação acoplada para garantir maior precisão. Com os critérios de projeto atendidos, seguem-se a análise de fadiga e a análise de instalação.

A Figura 3.1 resume o procedimento de aplicação da metodologia PrIAR.

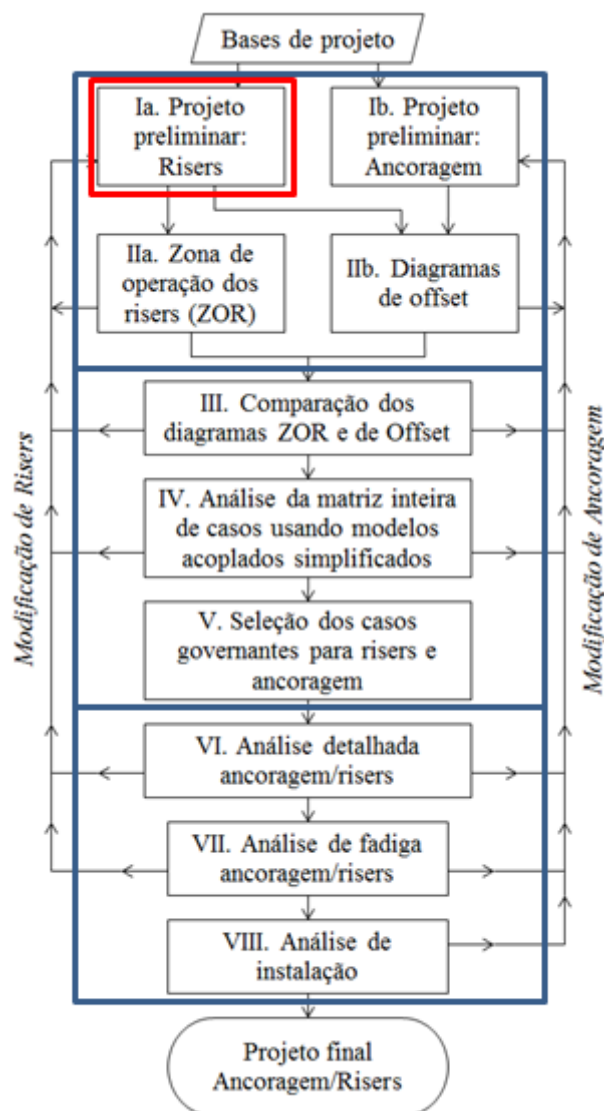


Figura 3.1 - Procedimento da metodologia PrIAR [26]

3.3. Oportunidade de melhoria

Cada metodologia apresentada trata a fase de simulações numéricas dos carregamentos ambientais de um modo diferenciado para atingir projetos mais precisos

ou mais expeditos. Mesmo assim, todas fazem uso de diversas simulações numéricas para estimar a resposta das estruturas a diversos carregamentos ambientais que o sistema projetado pode enfrentar durante a sua operação.

Como estes carregamentos ambientais que incidem sobre a unidade de produção não são constantes, nem em intensidade nem em direção, e podem variar significativamente de hora em hora no local em que a plataforma deve operar por décadas, se torna necessário o estudo de uma enorme quantidade de casos para cobrir todas as possibilidades de condições operacionais que a plataforma pode enfrentar ao longo da sua vida útil. Adicionalmente, com a exploração de petróleo avançando sobre ambientes ainda mais hostis, se fazem necessárias simulações de um número cada vez maior de diferentes combinações de carregamentos para garantir a segurança de novos projetos.

Este grande número de condições ambientais que devem ser estudadas demanda muitos recursos computacionais e inevitavelmente torna o projeto demorado e custoso. A metodologia PrIAR, por exemplo, reconhece esta questão e lida com ela ao utilizar simulações com formulação desacoplada, mais simples e rápida, em todos os carregamentos em uma fase inicial, reservando a aplicação da formulação acoplada somente para os casos que forem identificados como críticos, o que diminui a exigência computacional global do projeto. Apesar disto, a fase de análises desacopladas pode se estender excessivamente como consequência da enorme quantidade de simulações necessárias, o que cria uma oportunidade para melhorias na metodologia.

3.4. Proposta do método do RAO de resposta

Tendo em vista o elevado custo computacional exigido para a análise de um grande número de casos de carregamento e o seu impacto no andamento de um projeto de estruturas *offshore*, este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um método simplificado e expedito que acelere este processo de análise, inserido na metodologia PrIAR.

A aplicação deste método visa fornecer de modo mais rápido uma estimativa para o resultado que seria obtido para os carregamentos de ondas na fase de análise desacoplada, reduzindo assim o tempo consumido por esta etapa em um projeto. Neste sentido, o método não busca fornecer uma resposta precisa, mas somente uma

estimativa aproximada, com qualidade suficiente para permitir a identificação dos casos críticos que serão submetidos posteriormente à fase mais rigorosa de análise acoplada.

Através desta proposta o método seria empregado como um substituto à etapa Ia da metodologia PrIAR, ou, em estudos com exigências mais rígidas de precisão, como uma nova etapa que a precederia, de modo que um número menor de simulações pré-selecionadas chegue até ela.

3.4.1. Princípio de funcionamento

Conforme exposto anteriormente, análises desacopladas de sistemas *offshore* geralmente partem do RAO de movimento da unidade flutuante. Quando um caso de carregamento de ondas é aplicado sobre a plataforma, o espectro que representa este carregamento é cruzado com o RAO de movimento da plataforma para fornecer a sua movimentação resultante. Isto foi apresentado na Equação 7, que é retomada e reescrita agora na Equação 8.

$$S_m(\omega) = RAO_m^2(\omega) S_\zeta(\omega) \quad (8)$$

Esta movimentação da unidade flutuante, representada por $S_m(\omega)$, é posteriormente transferida aos *risers* através de simulações de elementos finitos que possibilitam o cálculo dos esforços resultantes na sua estrutura (forças, tensões e deformações), denominados aqui por $S_e(\omega)$.

Neste momento, duas grandezas estão definidas: um carregamento de onda representado pelo seu espectro $S_\zeta(\omega)$ e a resposta de esforços no *riser* $S_e(\omega)$ causada por ele. A Equação 7, reescrita como Equação 9, permite dividir a resposta pelo carregamento resultando em um novo RAO, desta vez não de movimentos da plataforma, mas de resposta do *riser*.

$$RAO_e^2 = \frac{S_e(\omega)}{S_\zeta(\omega)} \quad (9)$$

Este novo RAO representa a resposta de esforços do *riser* normalizada pelo carregamento que a gerou. A mesma Equação 7 permite cruzar este RAO de resposta do *riser* com qualquer espectro de ondas para se obter a resposta do *riser* ao seu carregamento, uma simples operação aritmética que dispensa a necessidade de execução de novas etapas de simulação numérica. Ou seja, uma única simulação numérica para

um carregamento de onda é necessária para criação do RAO de resposta e consequente estimação da resposta do *riser* a todos os carregamentos de onda possíveis.

Estas operações constituem o método do RAO de resposta, cuja principal vantagem está na redução drástica no número de simulações numéricas necessárias para avaliar a resposta de um *riser* a diversos carregamentos de ondas. Este método, quando incorporado na etapa Ia da metodologia PrIAR, tem o potencial para trazer economia de tempo e recursos computacionais nas fases preliminares de um projeto *offshore*.

3.4.2. Detalhamento do procedimento

A seguir, cada passo da aplicação do método do RAO de resposta será apresentado em detalhe para facilitar o seu entendimento e reprodução.

Passo 1: seleção do espectro de carregamento de onda.

Enquanto a princípio qualquer carregamento de onda pode ser utilizado para a criação do RAO de resposta, já que a resposta do *riser* será normalizada por este carregamento, é necessário ressaltar que espectros de onda específicos atuam em frequências específicas. Por exemplo, um dado espectro poderia atuar entre as frequências de 0,5 a 1,0 rad/s, o que geraria respostas no *riser* somente neste intervalo de frequências. Consequentemente, o RAO de resposta obtido deste modo não poderia ser usado na estimativa da resposta do *riser* a carregamentos que atuassem fora desta faixa.

Esta deficiência pode ser contornada com a utilização de um espectro de carregamento conhecido como ruído branco, um sinal que atua em todas as faixas de frequência com intensidade constante. Isto permite excitar todas as frequências de vibração das estruturas e garante que o RAO de resposta resultante possa ser empregado na estimativa de esforços do *riser* a qualquer carregamento de onda.

Na prática, o ruído branco não precisa atuar em todas as frequências possíveis, mas somente entre a maior e a menor frequência para quais as estruturas estudadas apresentam resposta dinâmica significativa. Por motivos que serão explicados na próxima seção, o sinal do ruído branco deve conter a mesma quantidade de energia que o espectro de ondas do estado de mar cujo impacto no *riser* se deseja estudar, o que ocorre quando os espectros de carregamento apresentam a mesma área. Por este motivo,

o valor do ruído branco deve ser calculado de modo a garantir que a sua área seja igual à do espectro de ondas desejado.

Deste modo, para estudar o efeito de um mar de fadiga ou de condições extremas pelo método do RAO de resposta, deve-se escolher um espectro que represente este estado de mar, obter a quantidade de energia contida no mesmo através do cálculo da sua área e criar um sinal de ruído branco que iguale esta energia.

A Figura 3.2 traz um espectro de ondas de formulação JONSWAP e um espectro de ruído branco gerado a partir dele.

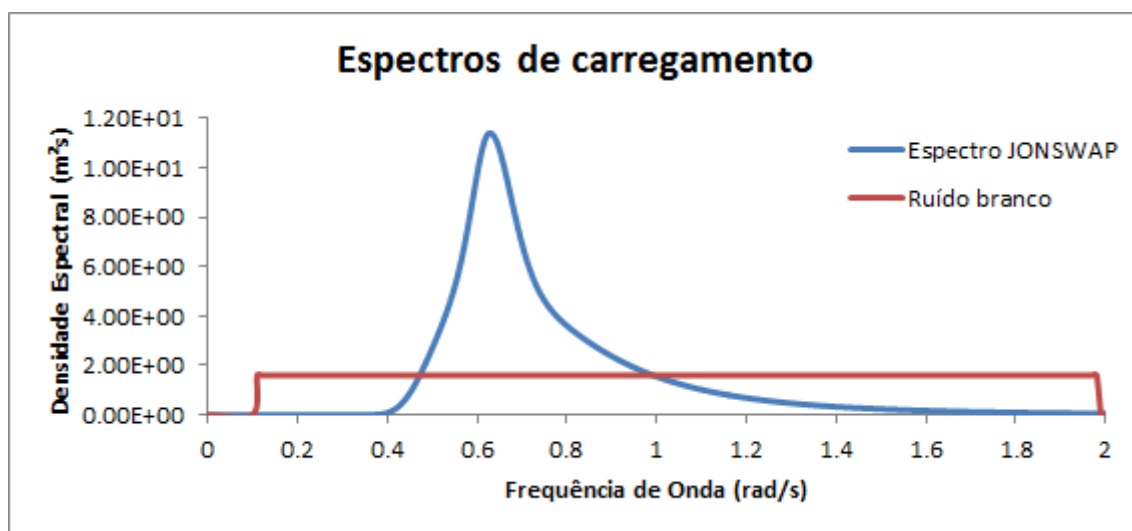


Figura 3.2 - Espectros de onda com formulação JONSWAP e ruído branco

Passo 2: obtenção do RAO de resposta

Com o ruído branco definido, ele deve ser aplicado como qualquer outro carregamento no cálculo da movimentação da unidade flutuante ao ser cruzado com o RAO de movimento desta. A movimentação da unidade flutuante é então transferida ao *riser* para se calcular as suas respostas por meio de uma simulação numérica desacoplada. Se a resposta do *riser* for calculada no domínio do tempo, se faz necessária a aplicação da transformada de Fourier para trazê-la ao domínio da frequência e dar continuidade ao procedimento. A resposta do *riser* no domínio da frequência deve então ser dividida pelo módulo do ruído branco que a gerou e a raiz quadrada destes valores calculada para gerar o RAO de resposta, de acordo com a Equação 9.

A Figura 3.3 traz a resposta do *riser* ao carregamento do ruído branco no domínio da frequência e o RAO de resposta obtido a partir dela.

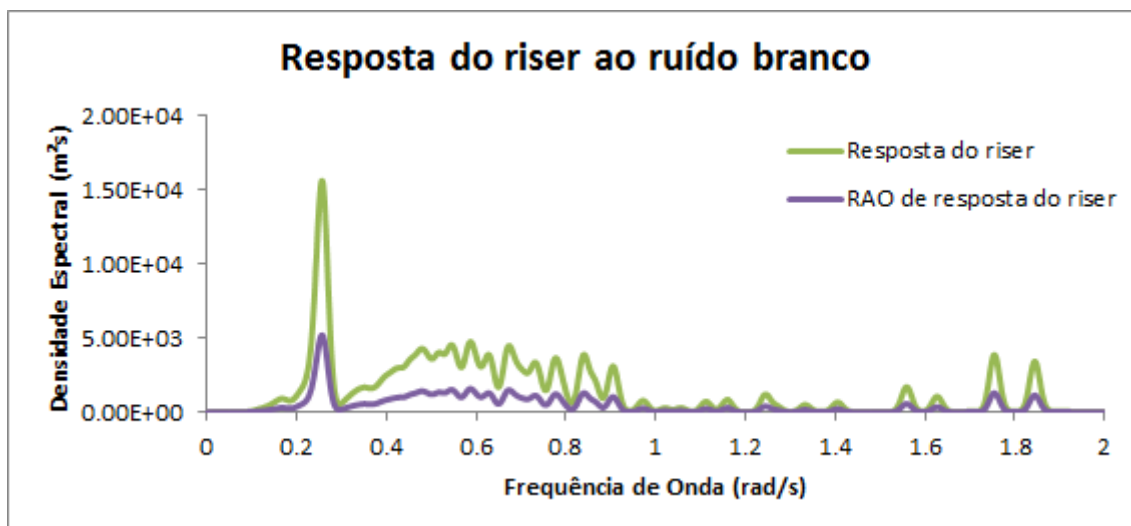


Figura 3.3 - Resposta do riser ao carregamento de ruído branco

Passo 3: Aplicação do RAO de resposta

Por fim, o RAO de resposta pode ser utilizado na obtenção de uma estimativa da resposta do *riser* a quaisquer carregamentos de ondas sem a necessidade da realização de nenhuma simulação numérica adicional. Para isto basta elevar ao quadrado os valores do RAO de resposta e multiplica-los pelo espectro de ondas do mar que se deseja estudar, novamente de acordo com a Equação 7.

A Figura 3.4 traz uma comparação entre a resposta do *riser* obtida por simulações numéricas para um espectro de carregamento JONSWAP e a estimativa obtida pelo cruzamento deste espectro com o RAO de resposta do *riser*.

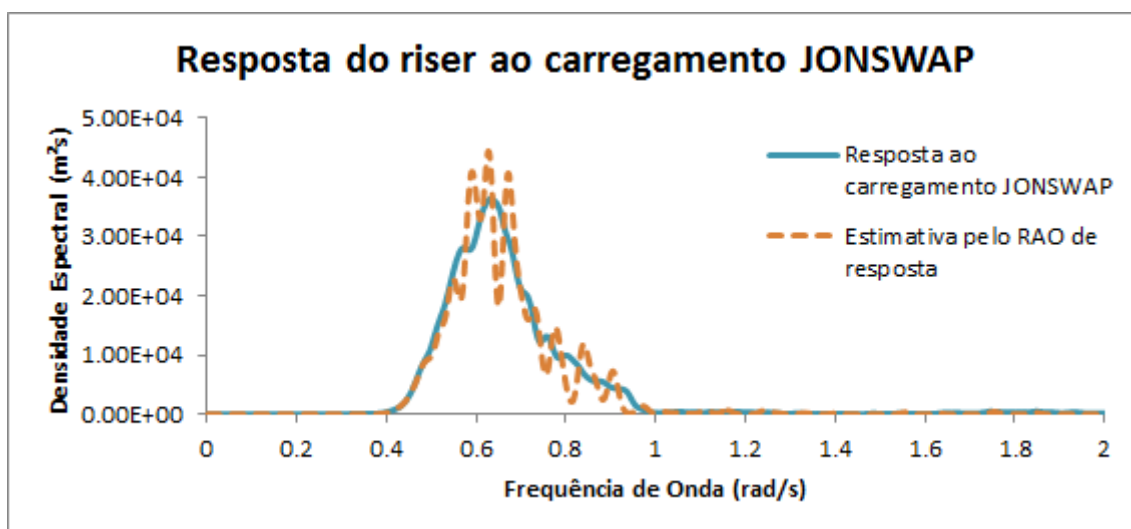


Figura 3.4 - Resposta do riser ao carregamento JONSWAP

3.4.3. Influência da linearidade da estrutura

Por fim, é importante discutir como a linearidade do comportamento da estrutura do *riser* pode influenciar na qualidade dos resultados fornecidos pelo método do RAO de resposta.

Uma função linear é aquela para qual o carregamento e a resposta sempre mantêm a mesma proporção. A Equação 10 que descreve o comportamento de uma mola ideal ajuda a demonstrar este conceito.

$$F = k * x \quad (10)$$

Onde F é força elástica na mola

k é constante elástica da mola

x é deformação na mola

Quando a deformação da mola escala linearmente com a força aplicada, o valor k é constante. Isto traz vantagens para o estudo de propriedades lineares, já que é possível realizar um único experimento onde uma força é aplicada sobre a mola e a deformação é medida, permitindo o cálculo da proporção constante k. Este valor pode então ser aplicado a outros carregamentos para se obterem as respectivas deformações sem a necessidade da realização de novos experimentos.

Se a mola fosse não linear, porém, a proporção entre carregamento e resposta, o valor k, não seria constante e mudaria a cada experimento. Assim, utilizar o valor de k obtido a partir de um par de força e deformação para calcular a deformação decorrente de outros carregamentos forneceria resultados imprecisos. Cada deformação deveria ser calculada a partir de um experimento dedicado.

A movimentação de corpos flutuantes em resposta a carregamentos de ondas é um fenômeno de tendência linear, no qual a proporção constante entre carregamento e resposta é o RAO de movimento. Consequentemente, para se obter a movimentação do corpo em resposta a um carregamento de ondas qualquer, basta multiplicar a movimentação prevista no RAO pela altura desta onda, como representado pela Equação 7.

Já a resposta de esforços nos *risers* a carregamentos de ondas, por meio da movimentação da unidade flutuante, é um fenômeno que tende a se afastar do comportamento linear. Consequentemente, a proporção entre carregamento e resposta,

representada pelo RAO de resposta do *riser*, pode não ser constante. Em outras palavras, pode não ser possível encontrar um RAO de resposta único, com diferentes carregamentos gerando RAOs distintos.

Como decorrência desta possibilidade, o procedimento que garante a melhor qualidade dos resultados é a criação de um RAO de resposta específico para cada carregamento de ondas. Isto explica a importância de se empregar na criação do RAO um ruído branco com a mesma quantidade de energia que o estado de mar que se deseja estudar, já que este é o ruído que garante a maior semelhança possível com o carregamento original, diminuindo os impactos de uma eventual não linearidade do *riser*. Em outras palavras, isto pede a criação de um RAO de resposta específico para condições operacionais de fadiga e outro distinto para condições extremas para aplicação em projeto, já que as estimativas fornecidas por cada um podem divergir.

Neste contexto, quando a resposta do *riser* se aproximar da tendência linear, todos os RAOs de resposta obtidos a partir de diferentes ruídos brancos serão muito parecidos e um único RAO poderá ser utilizado na estimativa da resposta a qualquer carregamento sem perda de qualidade dos resultados. Quando a resposta se afastar da tendência linear, porém, os RAOs de resposta gerados a partir de cada ruído serão distintos entre si e a utilização de um RAO único na estimativa da resposta a carregamentos distintos levaria a resultados imprecisos.

Apesar de RAOs de resposta específicos para cada carregamento maximizarem a qualidade das estimativas que podem ser obtidas para casos mais não lineares, os ruídos brancos que os geram nunca poderão replicar exatamente os mesmos fenômenos que os espectros de onda originais. Isto implica que a qualidade das estimativas de respostas para estes casos sempre será inferior à das estimativas para os casos mais lineares, nos quais todos os carregamentos causam, proporcionalmente, os mesmos fenômenos no *riser*. Ou seja, quanto mais linear um caso, melhor candidato ele será à aplicação do método do RAO de resposta.

Por fim, é necessário reforçar que apesar do impacto que a natureza não linear da resposta do *riser* em alguns casos pode ter sobre a qualidade das estimativas do método do RAO de resposta, ele está inserido na metodologia PrIAR no contexto da fase preliminar de projeto. Como tal, sua aplicação não busca uma resposta exata, mas sim uma aproximação que possa ser obtida de modo mais ágil, de modo que pequenas imprecisões são toleráveis.

4. ESTUDOS DE CASOS

Neste capítulo serão discutidos os estudos de casos realizados com o objetivo de aplicar e validar o método do RAO de resposta.

Dois casos de relevância para a indústria *offshore* serão apresentados: o primeiro sobre *riser* em plataforma de produção de petróleo e o segundo sobre instalação de duto submarino por uma balsa de lançamento. Cada um contará com múltiplos estudos com alterações paramétricas para avaliar a aplicabilidade do método do RAO de resposta em diferentes cenários.

Os modelos utilizados para representar cada caso no software de análise numérica serão descritos e os resultados serão apresentados e comentados em seguida.

4.1. Ferramenta computacional

Os resultados destes estudos serão obtidos através do uso de uma ferramenta computacional de cálculo numérico especializada em estruturas *offshore*, o software SITUA-Prosim [30]. Ele será utilizado na execução de análises dinâmicas com formulação desacoplada no domínio do tempo.

Os resultados fornecidos pelo SITUA-Prosim no domínio do tempo serão então transformados para o domínio da frequência por meio de transformadas de Fourier para permitir a aplicação do método do RAO de resposta.

4.2. *Riser* em plataforma de produção de petróleo (P-55)

Nesta seção será apresentado o estudo de caso do *riser* de produção em uma unidade flutuante.

Diversos carregamentos ambientais serão aplicados sobre um modelo numérico representativo deste sistema e os esforços resultantes no *riser* serão calculados tanto por simulações desacopladas quanto pelo método do RAO de resposta. Os resultados obtidos por cada um serão então comparados para possibilitar a avaliação da precisão e consistência do método do RAO de resposta.

4.2.1. Modelo numérico

A plataforma P-55 está em operação desde 31 de Dezembro de 2013 no campo de Roncador, na bacia de Campos. Ela é a maior plataforma do tipo semissubmersível em operação no Brasil, com capacidade para produção diária de 180 mil barris de petróleo e 4 milhões de metros cúbicos de gás natural. A plataforma se liga a 11 poços de produção e 6 de injeção, e a produção de petróleo é exportada por dutos submarinos. Ela é apresentada na Figura 4.1.



Figura 4.1 - Plataforma semissubmersível P-55 [31]

Como as análises serão realizadas através de formulação desacoplada, o modelo numérico representa a plataforma por meio do seu RAO de movimento, enquanto que o *riser* é representado por elementos finitos. Não são utilizadas linhas de ancoragem nem *risers* além daquele que será o foco dos estudos, um *riser* rígido cujas características são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características do riser ensaiado

Especificações do Riser			
Tipo	rígido	Diâmetro externo	8"
Forma	catenária	Diâmetro interno	6.85"
Comprimento total	4620 m	Coeficiente de Poisson	0.3
Projeção horizontal	3690 m	Módulo de elasticidade	20.8 GPa
Azimute	354.5°	Peso específico	77 kN/m ³
Ângulo de topo (vertical)	20°	Tensão de escoamento	448 MPa

A lâmina d'água tem 1800 metros e o leito marinho é plano e horizontal. Uma visualização do modelo é apresentada na Figura 4.2, na qual o posicionamento da plataforma é tal que o eixo X coincide com a direção leste e o eixo Y com a direção norte.

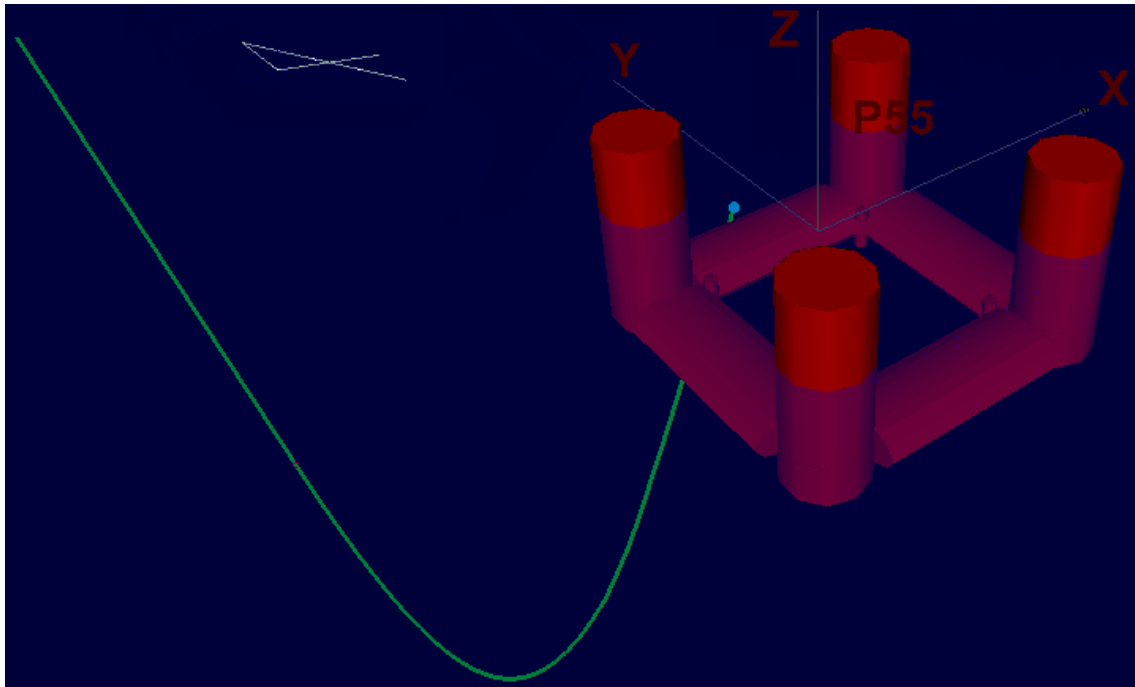


Figura 4.2 - Visualização do modelo numérico para estudo do riser

Duas regiões do *riser* serão o foco deste estudo: a região de topo, onde há a conexão do *riser* com a plataforma, e a região de fundo, onde o *riser* toca o leito marinho. Estas duas regiões registram os maiores esforços no *riser* e, como tal, geralmente são as mais importantes para verificar a integridade estrutural do projeto.

Ambas as regiões englobam grandes comprimentos do *riser*, mas como o software utilizado para as simulações fornece a resposta do *riser* em cada ponto da malha de elementos finitos ao invés de em cada região, um único ponto será escolhido como representante de cada uma.

Assim, é preciso escolher o ponto da malha que melhor representa cada região para garantir um resultado de boa qualidade. Para a região de topo basta utilizar o ponto na extremidade da malha, o mais próximo à plataforma, mas alguns cuidados são necessários para determinar o ponto que representará a região de fundo.

A princípio, o ponto da malha que melhor representa a região de fundo é aquele que registra a maior curvatura. Para o *riser* deste modelo, este ponto é apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Pontos da malha de elementos finitos do riser na região de fundo

Riser - Região de fundo		
ponto	curvatura (m^{-1})	altura (m)
290_8	1.98E-05	0.01
291_8	4.10E-05	0.01
292_8	4.67E-05	0.02
293_8	9.41E-06	0.03
294_8	4.37E-06	0.05

No entanto, este ponto 292 está a poucos centímetros do leito marinho e é necessário verificar se esta proximidade pode representar um problema frente à movimentação dinâmica da plataforma. Para tal, deve-se observar a variação da cota do ponto escolhido conforme apresentado na Figura 4.3.

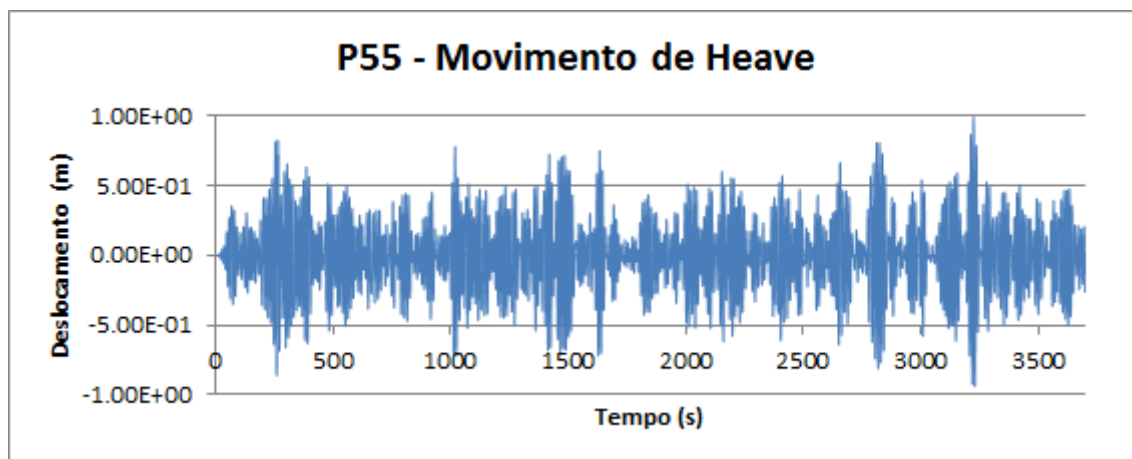


Figura 4.3 - Movimentação vertical da unidade flutuante P-55

A plataforma pode se mover quase 1 metro em altura, para cima ou para baixo, indicando que haverá momentos em que o ponto 292 pode permanecer apoiado sobre o leito marinho, situação na qual não há resposta dinâmica. Além disso, pontos muito próximos ao TDP tendem a registrar um excesso ondas de impacto decorrentes do constante movimento de elevação e queda da linha no solo, o que contamina os resultados. Assim, se faz necessária a avaliação de outros pontos da malha, mais afastados do TDP, que possam minimizar estas interferências e garantir um comportamento mais linear.

Analisando o comportamento dinâmico de uma sequência de pontos na malha é possível identificar aquele que gera a resposta mais livre de interferências. A Figura 4.4 mostra este comportamento para alguns pontos da região de fundo.

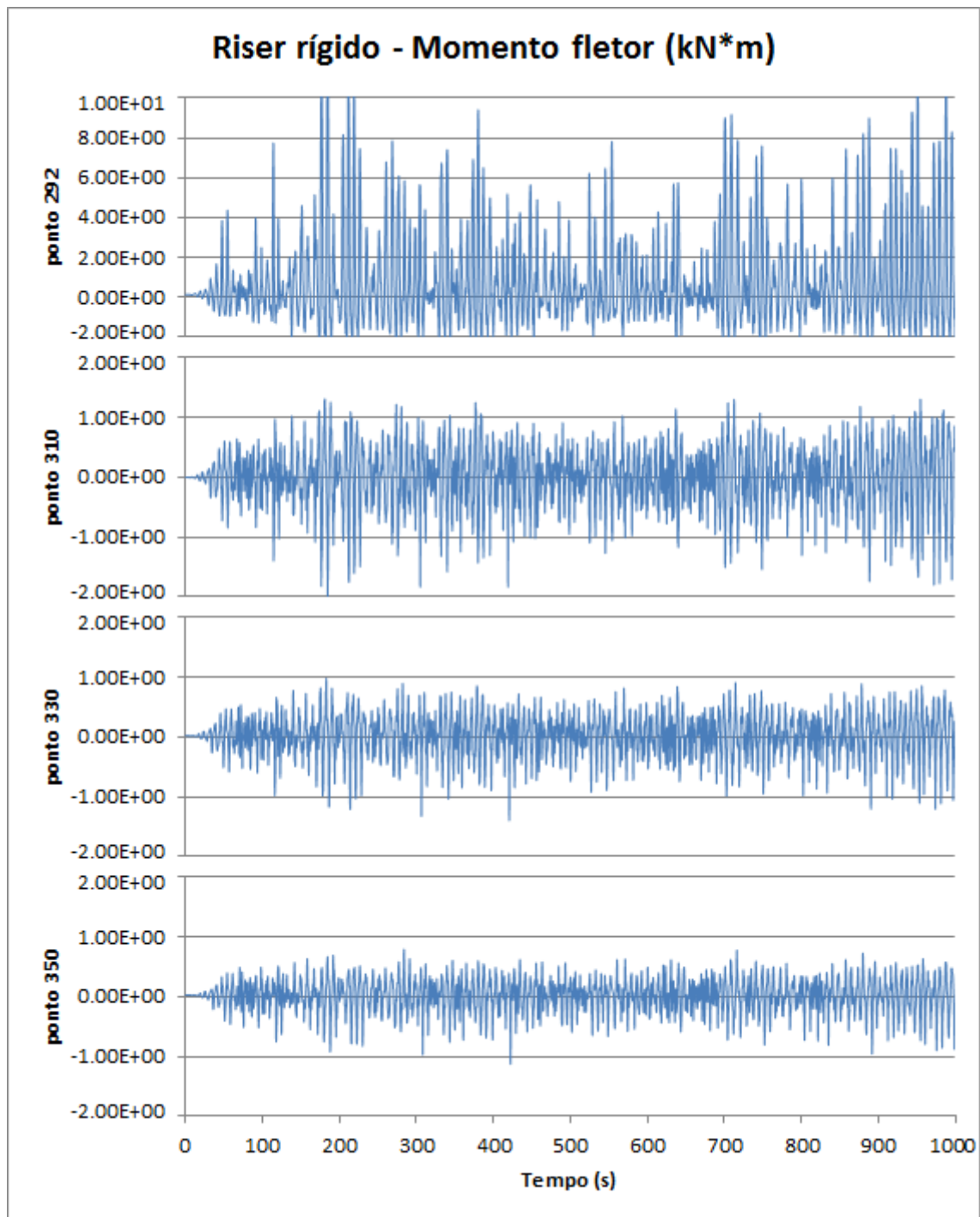


Figura 4.4 - Resposta dinâmica de pontos da malha do riser na região de fundo

O ponto 292 apresenta uma resposta claramente diferenciada dos demais, fazendo necessária inclusive uma mudança na escala do seu gráfico. Enquanto os outros pontos apresentam uma proporcionalidade entre momentos positivos e negativos, o

ponto 292 tem uma predominância de valores positivos, que também são muito maiores em módulo. Esta discrepância indica uma forte participação do contato linha-solo nos valores registrados, inviabilizando a seleção do ponto 292 como representante da região de fundo.

Os outros três pontos demonstram a mesma tendência nas suas respostas, indicando que todos seriam representativos dos fenômenos que ocorrem na região próxima ao fundo. A principal diferença entre eles é a amplitude da resposta, que diminui progressivamente com o afastamento do TDP, algo natural já que a seção suspensa do *riser* tende a sofrer menos variação dinâmica.

Entre eles, o ponto 310 aparenta apresentar ainda uma leve contaminação por ruídos de alta frequência, enquanto que o ponto 350 tem uma resposta dinâmica comparativamente fraca. O ponto 330, portanto, tem a resposta mais confiável do conjunto, garantindo resultados mais claros quando transformados para o domínio da frequência. Assim, o ponto 330, a uma altura de 18 metros a partir do leito marinho, será o representante da região de fundo do *riser* para avaliação dos esforços.

4.2.2. Criação dos RAOs de resposta

Nesta seção será apresentado o procedimento de criação dos RAOs de resposta para o *riser* na plataforma P-55 a partir de diferentes carregamentos de ondas, seguido da comparação entre os RAOs obtidos.

Ao total, nove carregamentos serão estudados, contando com variações de altura significativa e período de pico de ondas entre si, mas todos incidirão sobre o modelo com a mesma direção para garantir que os resultados sejam referentes aos mesmos fenômenos. Estes carregamentos são representados pelos seus espectros de onda, reproduzidos na Figura 4.5. As letras “JS” indicam que o carregamento segue a formulação de JONSWAP, com altura significativa seguida da letra “h” e período de pico seguido da letra “t”, em metros e segundos, respectivamente.

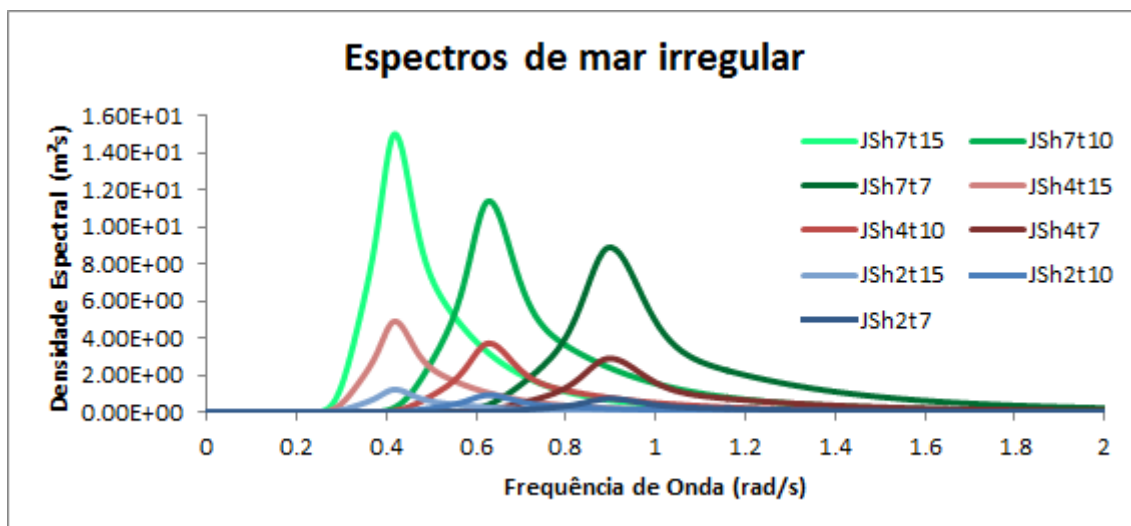


Figura 4.5 - Espectros de carregamento com formulação JONSWAP

A partir de cada um dos espectros de ondas JONSWAP foi gerado um ruído branco equivalente. Cada um deles tem um valor constante calculado para apresentar a mesma área do espectro de ondas JONSWAP correspondente, dentro do intervalo em que a plataforma apresenta resposta dinâmica significativa, aproximadamente 0,1 a 2,0 rad/s. Estes ruídos são reproduzidos na Figura 4.6, denotados pela sigla “RB” seguida dos parâmetros de ondas do carregamento JONSWAP a que cada um corresponde.

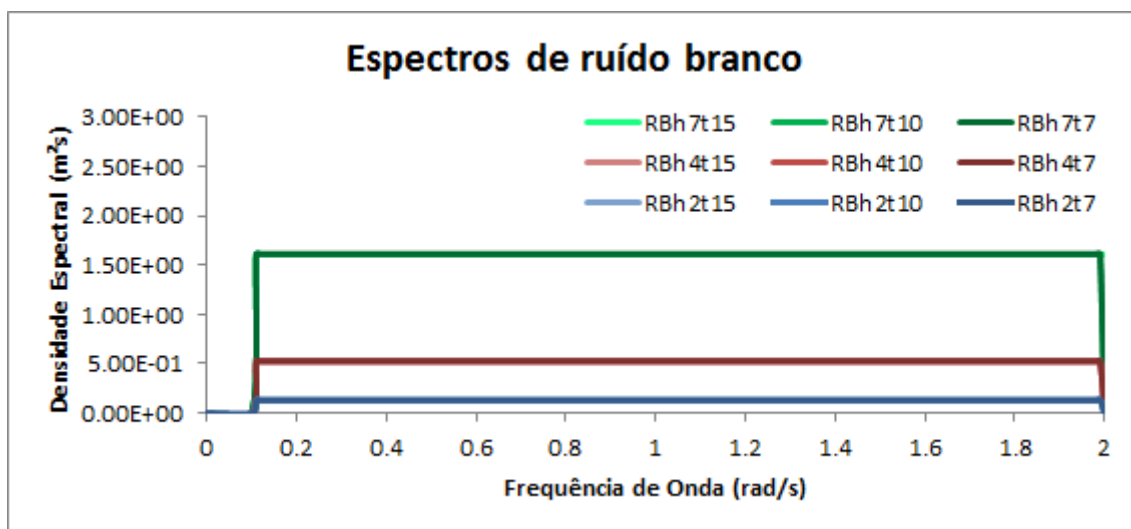


Figura 4.6 - Espectros de carregamento com formulação de ruído branco

Aqui já se nota um fenômeno importante: apesar de todos os espectros de onda JONSWAP terem formas completamente distintas, vários ruídos brancos têm a mesma forma. Isto ocorre porque o fator que define um ruído branco é a área do espectro de ondas JONSWAP correspondente, que se altera muito pouco com mudanças de período de pico de ondas, sendo majoritariamente definido pela altura significativa. Ou seja, na

prática, todos os espectros de onda JONSWAP com a mesma altura significativa de ondas têm apenas um ruído branco equivalente.

Isto já traz uma vantagem imediata para o método do RAO de resposta na forma da capacidade de representar com um único sinal de ruído branco vários carregamentos de ondas, que podem variar em período de pico desde que a altura significativa se mantenha constante. Consequentemente, são necessárias menos simulações numéricas do que no procedimento tradicional para se estimar a mesma quantidade de resultados.

Estes carregamentos serão aplicados sobre o modelo numérico para gerar a resposta do *riser*. Os esforços que serão monitorados na sua estrutura são apresentados juntamente com as suas abreviações na Tabela 4.3.

Tabela 4.3- Esforços monitorados nos ensaios e suas abreviações

Esforço	Abreviação
Força axial	FX
Momento fletor	MY
Curvatura	CR
Tensão de Von Mises (parede externa)	VME
Tensão circunferencial (parede externa)	HOE
Tensão longitudinal axial	AXI
Tensão longitudinal de momento (parede externa)	BNE
Tensão radial (parede externa)	RDE
Deformação total (parede externa)	DTE
Deformação axial	DAX
Deformação transversal (parede externa)	DME

A resposta do *riser* aos carregamentos de ruído branco é normalizada pelo valor dos ruídos para gerar os RAOs de resposta que são apresentados nas Figuras 4.7 a 4.17. Cada uma traz simultaneamente os RAOs obtidos a partir dos três ruídos brancos para possibilitar a comparação entre eles e a avaliação da sua proximidade, tanto para região de topo quanto de fundo. Nelas, o eixo da esquerda é referente à região de topo, representada pelas linhas escuras, e o eixo da direita é referente à região de fundo, representada pelas linhas claras.

Os títulos dos gráficos refletem as variáveis do caso: “P55” indica que a unidade flutuante é a plataforma P-55, “R8” indica que o *riser* é do tipo rígido e com diâmetro de 8 polegadas, “LA1800” indica que a profundidade da lâmina d’água é 1800 metros, “00” indica que a unidade flutuante não tem *offset* (valor zero) e “A0” indica que o ângulo de incidência do carregamento sobre a unidade flutuante é o azimute zero.

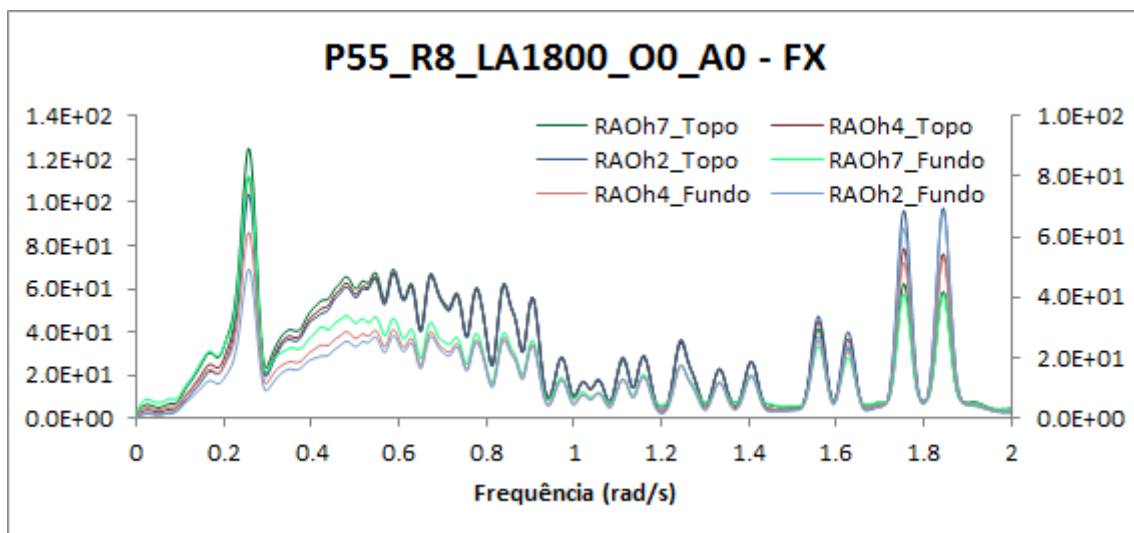


Figura 4.7 - RAO de força axial para o riser

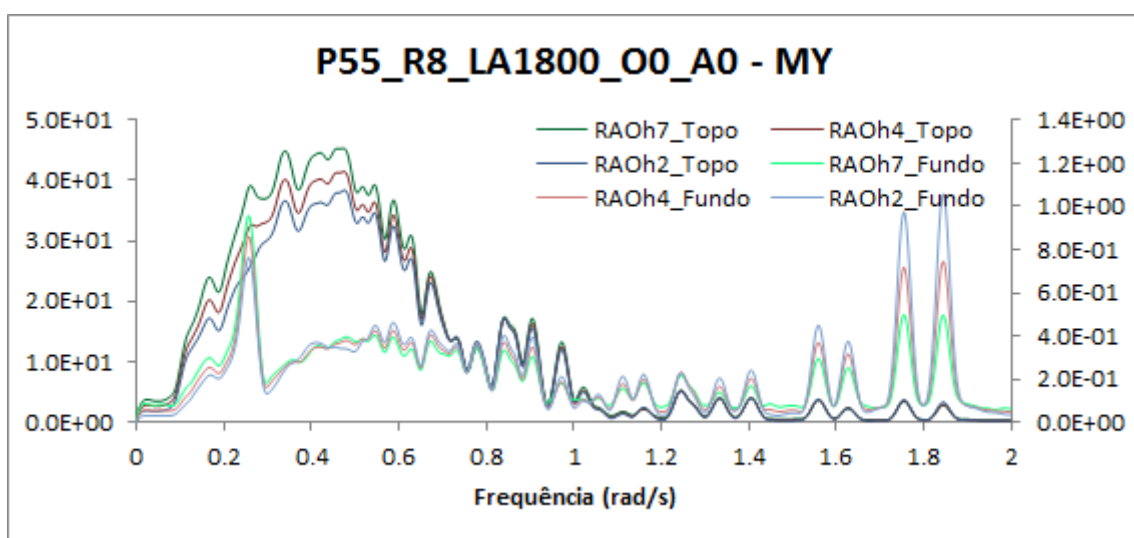


Figura 4.8 - RAO de momento fletor para o riser

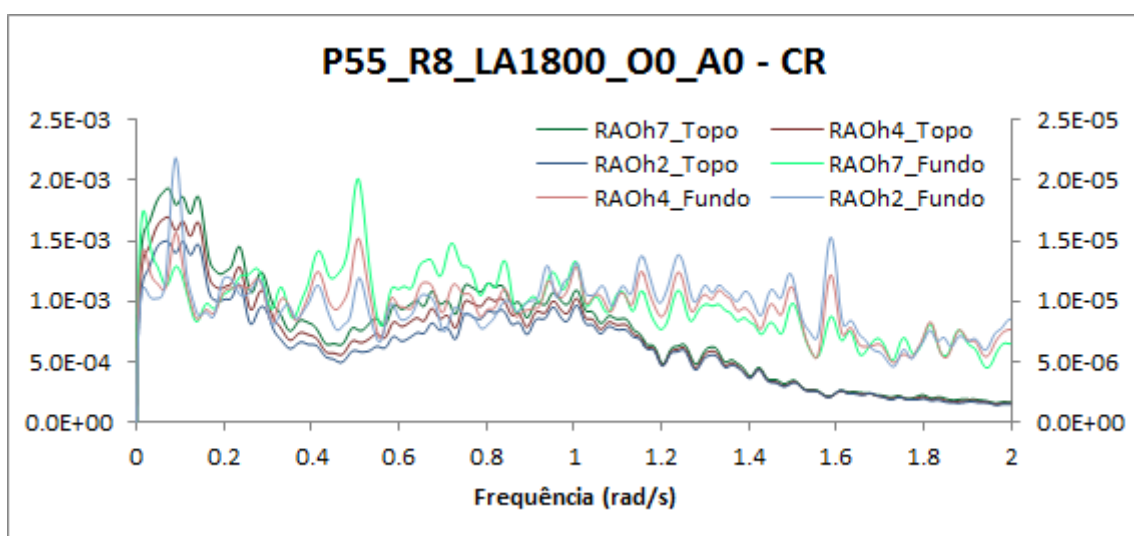


Figura 4.9 - RAO de curvatura para o riser

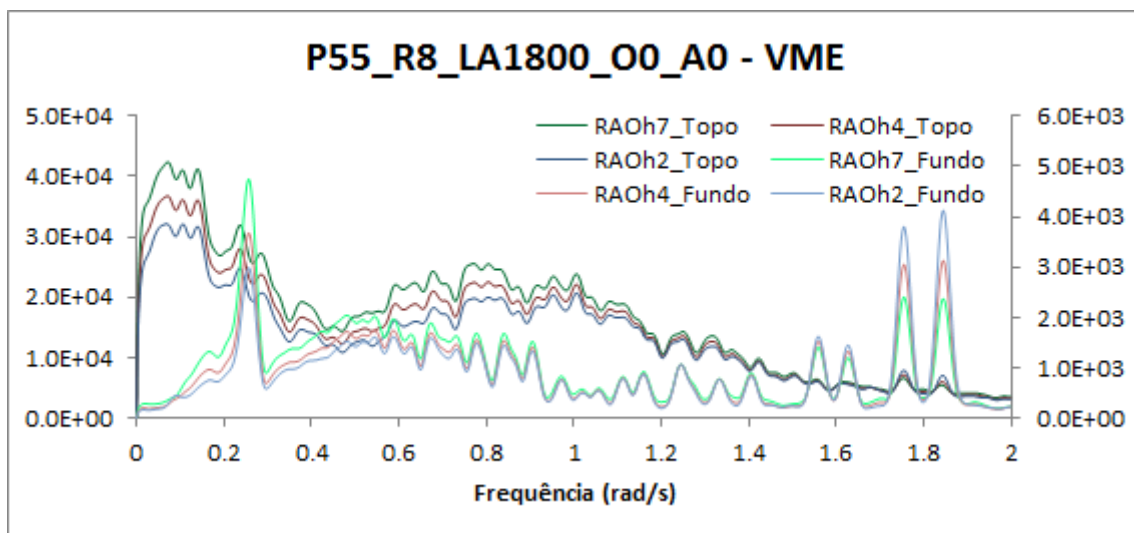


Figura 4.10 - RAO de tensão de Von Mises para o riser

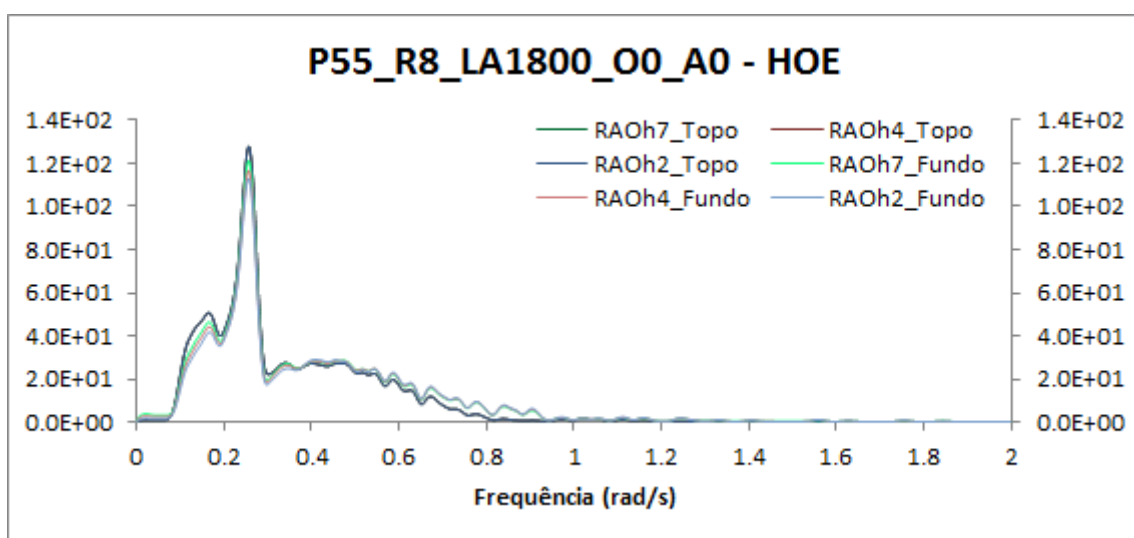


Figura 4.11 - RAO de tensão circunferencial para o riser

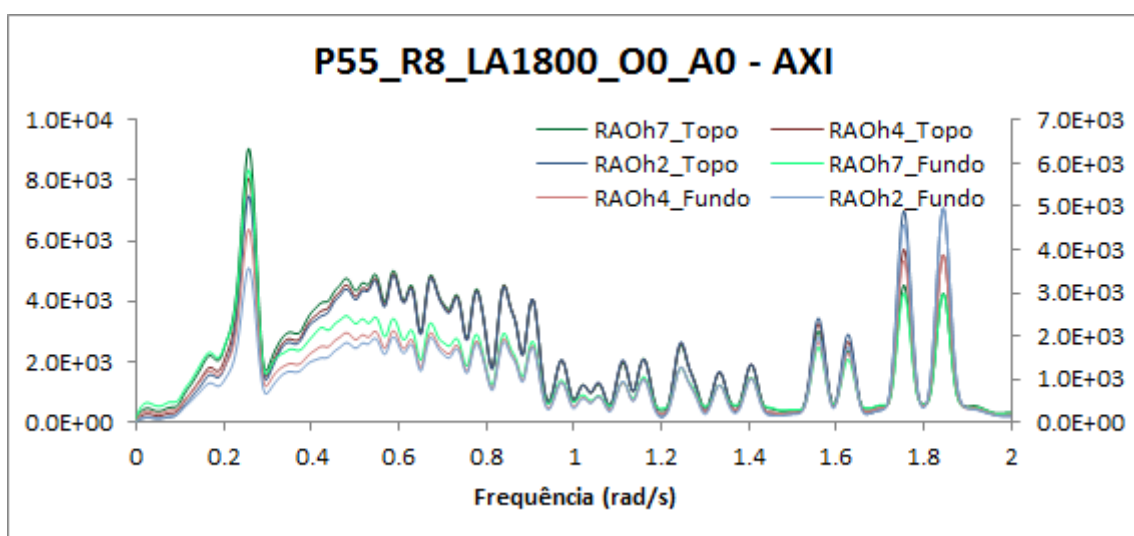


Figura 4.12 - RAO de tensão longitudinal axial para o riser

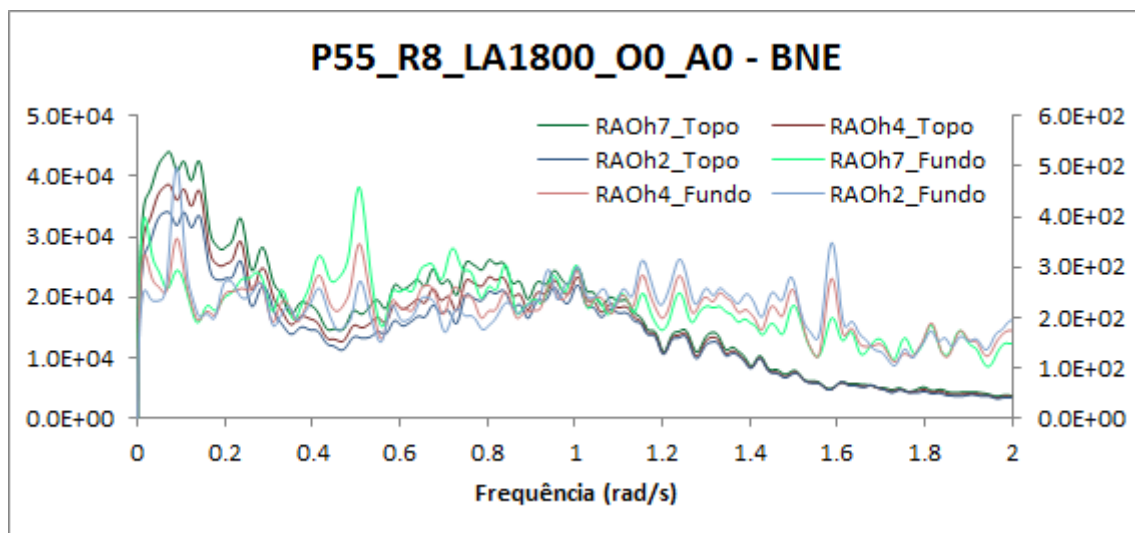


Figura 4.13 - RAO de tensão longitudinal de momento para o riser

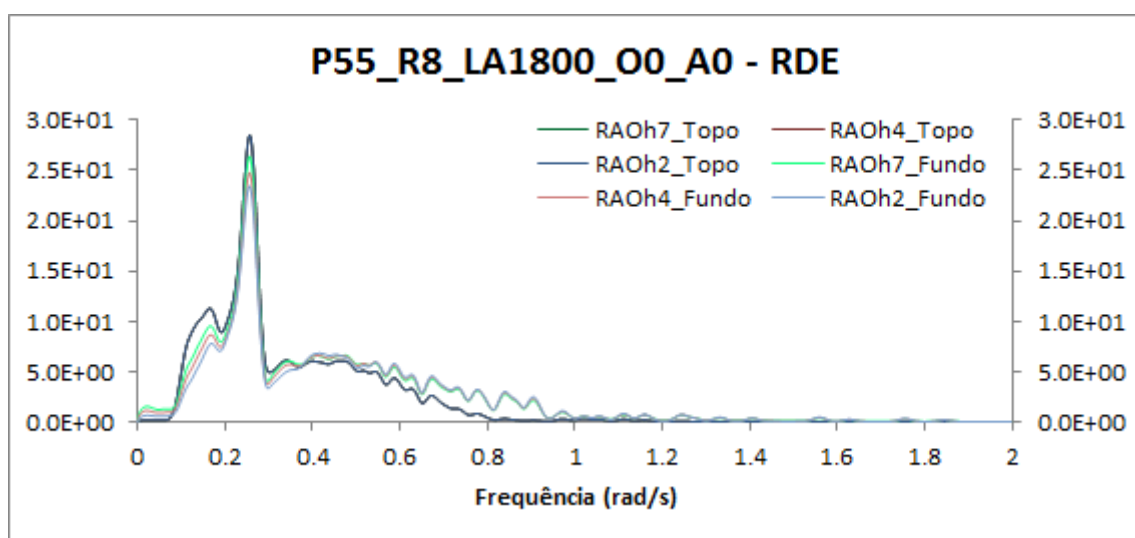


Figura 4.14 - RAO de tensão radial para o riser

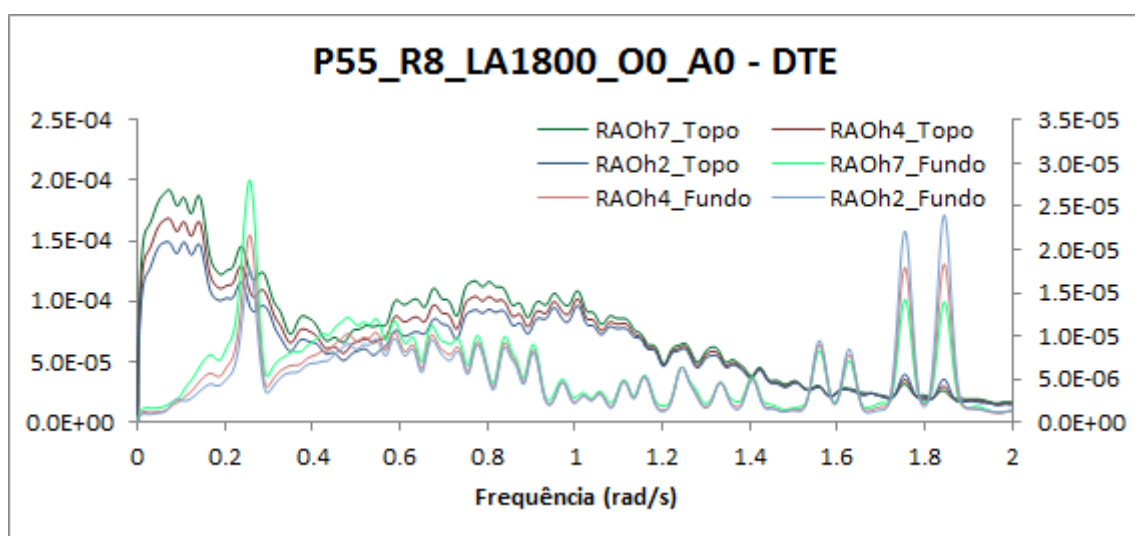


Figura 4.15 - RAO de deformação total para o riser

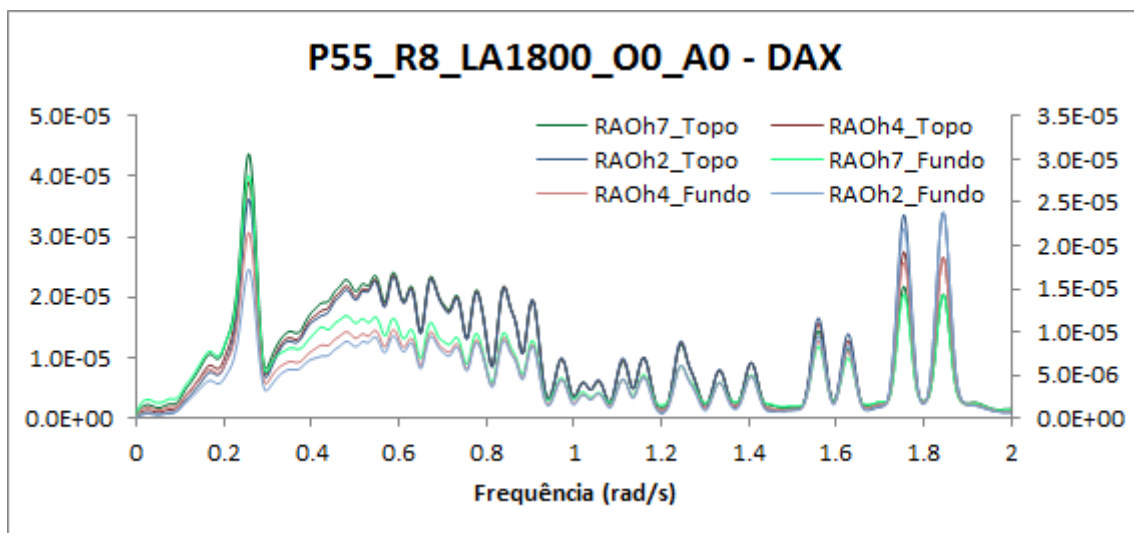


Figura 4.16 - RAO de deformação axial para o riser

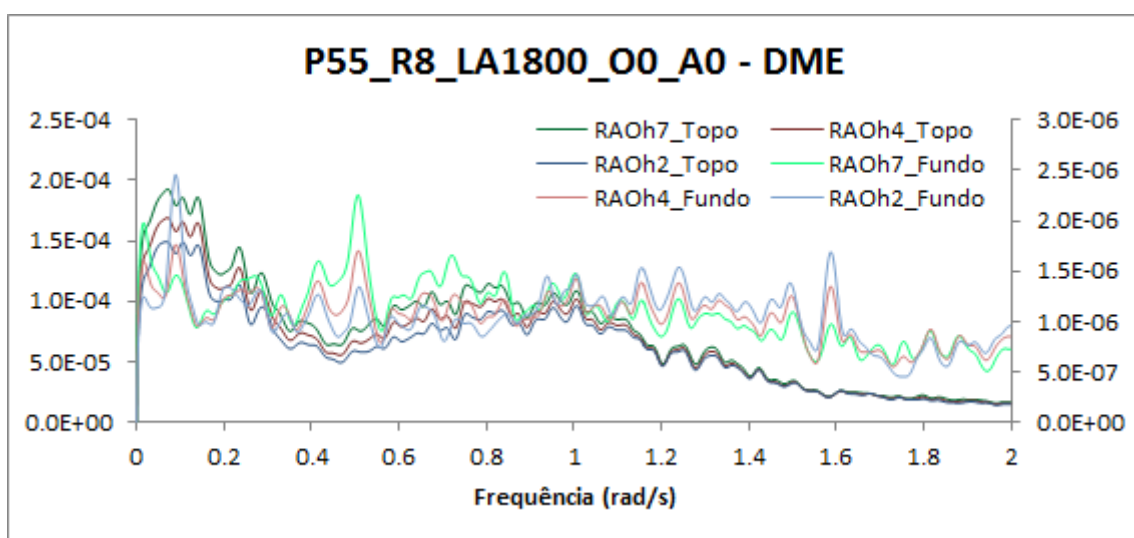


Figura 4.17 - RAO de deformação transversal para o riser

As figuras mostram que todos os RAOs de resposta de um mesmo esforço em cada região têm sempre a mesma forma, indicando que todos os carregamentos de ruído branco causam o mesmo comportamento no *riser*, podendo variar somente na proporção entre a intensidade de carregamentos e respostas de acordo com o comportamento mais ou menos linear de cada um.

Para os esforços cujos RAOs de resposta são idênticos é possível afirmar que a relação entre a intensidade do carregamento e da resposta é constante, ou seja, o comportamento é linear. Nestes casos um único RAO poderia fornecer as estimativas dos esforços no *riser* para qualquer carregamento de ondas. Alguns esforços que seguem esta tendência são tensão circunferencial e tensão radial, tanto na região de topo quanto de fundo.

Mas há também esforços para os quais os RAOs de resposta exibem um descolamento maior entre si, indicando um comportamento mais não linear e a necessidade da utilização de um RAO específico na estimativa de cada carregamento de ondas.

Para força axial, por exemplo, há uma separação entre os RAOs na região de fundo, apesar da proximidade entre eles na região de topo. A tendência em cada região se inverte para o momento fletor, com RAOs descolados na região de topo mas próximos na região de fundo. Isto mostra que a tendência de linearidade de cada esforço depende também da região onde ele é monitorado.

Para verificar quantitativamente as diferenças entre os diferentes RAOs de resposta, a área de cada um é apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Áreas dos RAOs de resposta do riser

P55_R8_LA1800_O0_A0 - RAO de resposta						
Esforço	RAOh2_Topo	RAOh4_Topo	RAOh7_Topo	RAOh2_Fundo	RAOh4_Fundo	RAOh7_Fundo
FX	4.88E+01	5.01E+01	5.24E+01	2.20E+01	2.43E+01	2.83E+01
MY	2.08E+01	2.25E+01	2.46E+01	3.50E-01	3.48E-01	3.52E-01
CR	1.05E-03	1.15E-03	1.27E-03	1.54E-05	1.52E-05	1.59E-05
VME	2.28E+04	2.51E+04	2.81E+04	1.34E+03	1.48E+03	1.72E+03
HOE	2.09E+01	2.09E+01	2.09E+01	2.11E+01	2.15E+01	2.18E+01
AXI	3.54E+03	3.64E+03	3.81E+03	1.59E+03	1.76E+03	2.06E+03
BNE	2.39E+04	2.61E+04	2.89E+04	3.50E+02	3.46E+02	3.62E+02
RDE	4.66E+00	4.66E+00	4.66E+00	4.86E+00	5.01E+00	5.16E+00
DTE	1.06E-04	1.16E-04	1.28E-04	8.01E-06	8.77E-06	1.02E-05
DAX	1.71E-05	1.75E-05	1.83E-05	7.69E-06	8.48E-06	9.91E-06
DME	1.04E-04	1.14E-04	1.26E-04	1.70E-06	1.69E-06	1.78E-06

Retomando o exemplo do momento fletor, os RAOs da região de fundo registram áreas de 0,350, 0,348 e 0,352, o que representa uma diferença de aproximadamente 1% entre cada um. Enquanto isso, os RAOs na região de topo registram áreas de 20,8, 22,5 e 24,6, proporcionalmente 1:1,08:1,18, uma diferença de até 18% entre si. Isto comprova o impacto expressivo que um comportamento não linear pode ter sobre a criação de um RAO de resposta e a importância da utilização de múltiplos RAOs nestes casos.

Apesar disto, é possível que o impacto da diferença entre os RAOs sobre a estimativa final do método seja reduzido na etapa seguinte, quando ocorre a multiplicação pelos espectros de onda. Como estes espectros têm valor nulo em largas

faixas de frequência, as diferenças entre RAOs que estiverem concentradas nestas frequências serão zeradas na operação de multiplicação, deixando de impactar a resposta final.

Adicionalmente, em alguns casos em que se verifica uma diferença entre as áreas dos RAOs de resposta, a comparação visual mostra uma boa proximidade entre eles. É o que ocorre, por exemplo, com a tensão circunferencial na região de fundo, que mostra uma variação de até 4% entre as áreas, o que sugere que pequenas diferenças nos RAOs não impedem a obtenção de bons resultados.

Por fim, é necessário explicar o comportamento problemático apresentado por alguns RAOs de resposta. Considerando que todos os carregamentos de ruído branco foram criados para atuar na faixa de 0,1 a 2,0 rad/s, era de se esperar que a resposta dos *risers* se mantivesse igualmente dentro desta faixa. Porém, alguns RAOs registram energia entre 0 e 0,1 rad/s, como é o caso da curvatura.

Isto decorre do modo como o PROSIM, o software utilizado para execução das simulações numéricas, faz o registro da série temporal dos resultados. Diferente de outros esforços, o PROSIM calcula a curvatura em módulo, eliminando os valores negativos. As Figuras 4.18 e 4.19 demonstram esta particularidade através das séries temporais de momento fletor e curvatura, respectivamente.

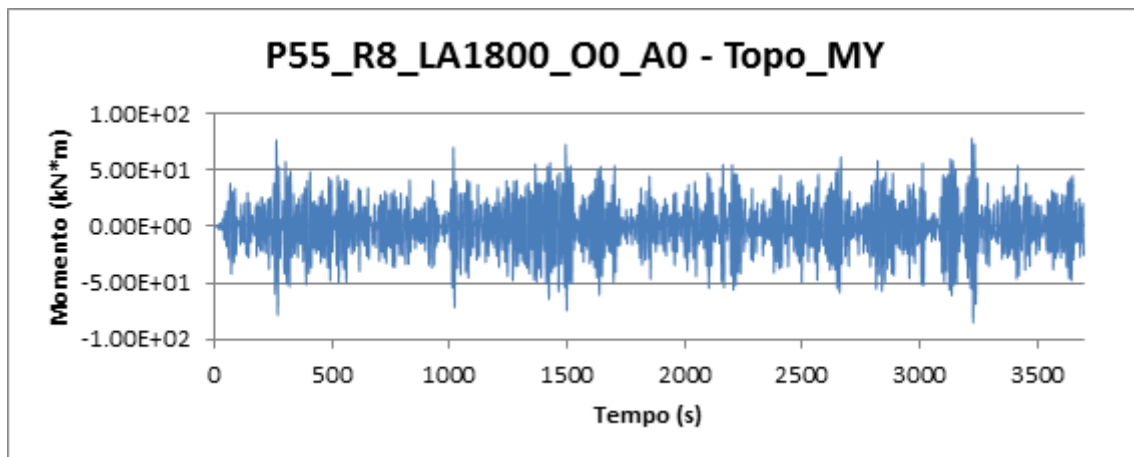


Figura 4.18 - Série temporal da resposta dinâmica de momento fletor do riser

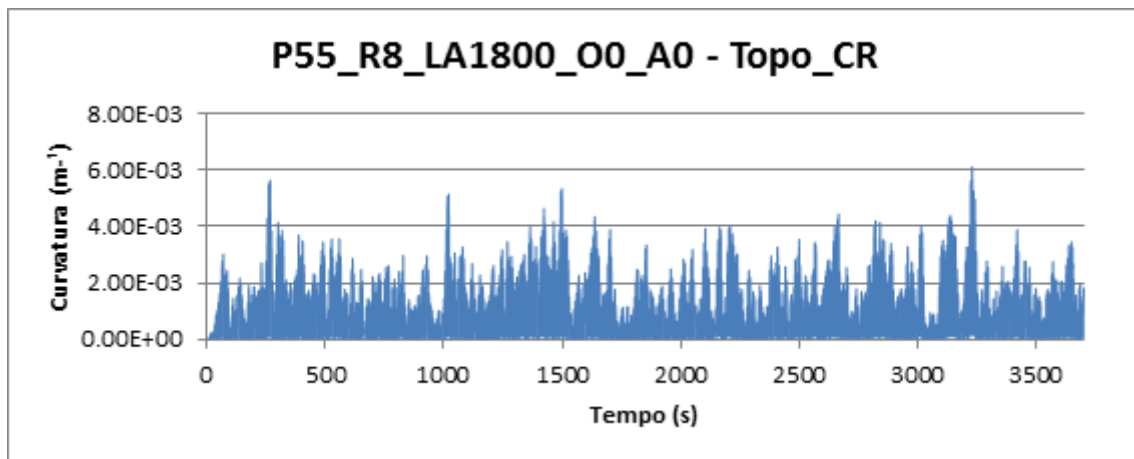


Figura 4.19 - Série temporal da resposta dinâmica de curvatura do riser

Como o *riser* tem uma curvatura estática quase nula, situações dinâmicas fazem com que ela oscile entre valores tanto positivos quanto negativos, mas como eles são registrados em módulo, parte da informação é perdida. Isto faz com que a transformação da série temporal para o domínio da frequência perca o significado físico, o que neste caso se manifestou na forma do registro de energia em frequências nas quais o *riser* não foi solicitado. Por este motivo, os RAOs de resposta de curvatura não podem ser utilizados na estimativa deste esforço no *riser*.

Contudo, isto não significa que o método do RAO de resposta não possa ser aplicado à estimativa da curvatura no *riser*, somente que ainda não será possível avaliar a qualidade do ajuste do método para este esforço devido à formulação do software de cálculo numérico empregado neste estudo.

O mesmo comportamento pode ser observado nos RAOs de resposta de tensão longitudinal de momento e deformação transversal.

A tensão de Von Mises é um caso diferente, já que ela não é uma tensão real presente na estrutura, mas sim uma espécie de média que incorpora todas as tensões em um único valor para representar uma tensão equivalente (unidimensional).

Comparando os RAOs de resposta de cada tensão na região de topo, é possível notar que eles apresentam ordens de grandeza distintas, com escalas de magnitude 10^2 , 10^3 , 10^4 , 10^1 e 10^4 para tensão circunferencial, longitudinal axial, longitudinal de momento, radial e Von Mises, respectivamente. Considerando que Von Mises representa a tensão equivalente, faz sentido que ela sofra a maior influência da tensão com maior magnitude, neste caso a tensão longitudinal de momento. Isto é reforçado pelo fato de que os RAOs destas duas tensões são muito parecidos. Ou seja, a tensão de

Von Mises está simplesmente reproduzindo o comportamento incorreto da tensão longitudinal de momento.

Considerando isto, é possível que os RAOs de tensão de Von Mises sejam de boa qualidade, já que eles parecem seguir fielmente a tendência das outras tensões, independente de cada uma estar correta ou não. De fato, isto é comprovado pelos RAOs de tensão de Von Mises na região de fundo. Nesta região os RAOs da tensão longitudinal de momento, que continuam incorretos, têm sua intensidade reduzida, fazendo com que esta tensão deixe de ser a dominante no *riser*. Com isto, a tensão de Von Mises passa a ser mais influenciada pelas outras tensões, cujos RAOs estão corretos, o que é refletido nos RAOs da própria tensão de Von Mises.

O mesmo raciocínio se aplica aos RAOs de deformação total. Isto mostra que os RAOs de resposta para estes dois esforços podem ser contaminados por componentes suas que, individualmente, tenham sido mal ajustadas, o que reforça a importância de se avaliar todos os resultados sempre em conjunto.

4.2.3. Carregamentos de ondas com intensidades diversificadas

Nesta seção será estudada a resposta do *riser* para casos de carregamentos de ondas com alturas significativas e períodos de pico diversificados atuando sobre o modelo da P-55. As estimativas obtidas pelo método do RAO de resposta serão comparadas com resultados de simulações para carregamentos de ondas com formulação JONSWAP para permitir uma avaliação da aderência entre eles.

O estudo de múltiplos carregamentos permitirá avaliar tanto a precisão quanto a consistência do método do RAO de resposta frente a variações neste parâmetro. Com isto será possível verificar se ele pode ser aplicado em qualquer cenário ou se há casos específicos em que ele demonstra os melhores resultados.

Um único carregamento será estudado inicialmente para permitir uma compreensão mais detalhada dos resultados. Este primeiro caso será o “JSh4t10”, por representar um carregamento intermediário entre os que serão estudados e por representar satisfatoriamente as condições da bacia de Campos, onde a P-55 opera.

Os resultados serão obtidos a partir de uma simulação para o carregamento “JSh4t10” e comparados com a estimativa fornecida pelo método do RAO de resposta.

Para tal, o RAO “RAOh4”, gerado especificamente para representar este carregamento a partir do ruído branco “RBh4”, será multiplicado pelo espectro de ondas “JSh4t10”, de acordo com o procedimento estabelecido para o método.

Os dois resultados representam o mesmo fenômeno e a comparação entre eles permitirá verificar a precisão do método do RAO de resposta ao fornecer uma aproximação para resposta do *riser* a este carregamento de ondas. Os espectros de resposta de ambos são apresentados simultaneamente nas Figuras 4.20 a 4.30, com foco inicialmente na região de topo do *riser*. Nelas, os resultados do carregamento JONSWAP são marcados pela linha azul sólida com legenda “Resultado_JSh4t10” enquanto que os resultados do RAO de resposta são marcados pela linha vermelha pontilhada com legenda “Resultado_RAOh4”.

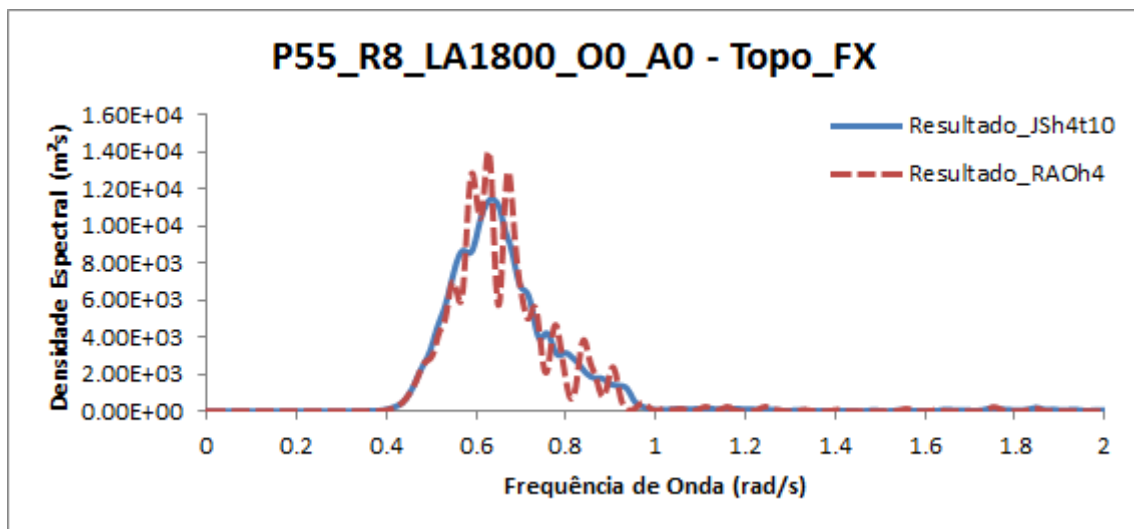


Figura 4.20 - Resposta de força axial para o riser (topo/JSh4t10)

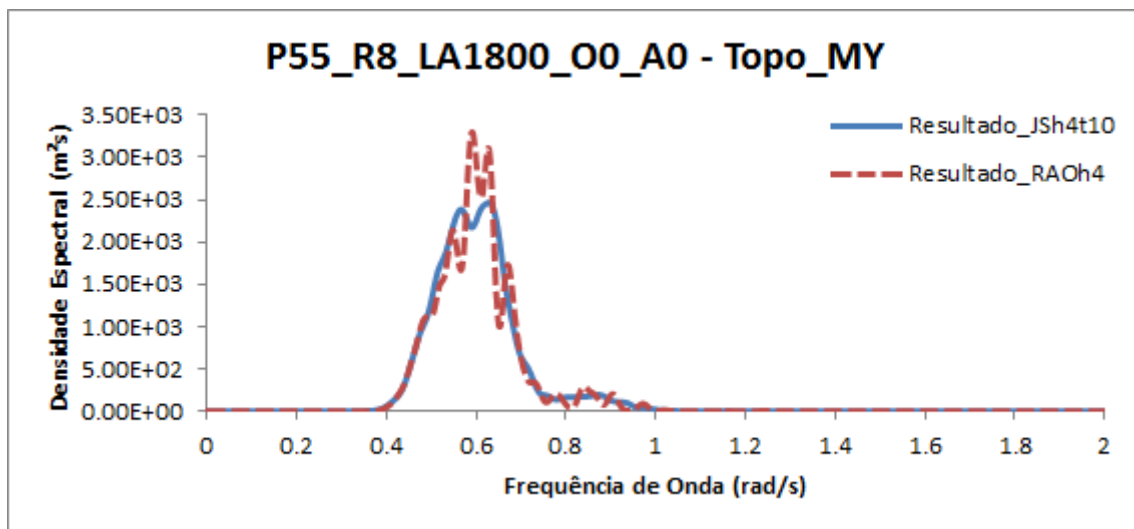


Figura 4.21 - Resposta de momento fletor para o riser (topo/JSh4t10)

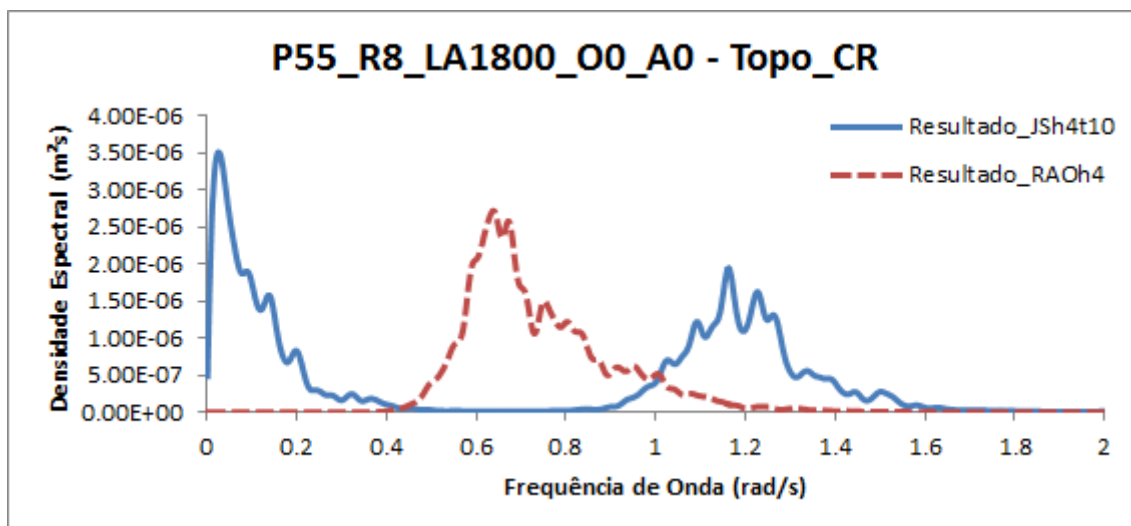


Figura 4.22 - Resposta de curvatura para o riser (topo/JSh4t10)

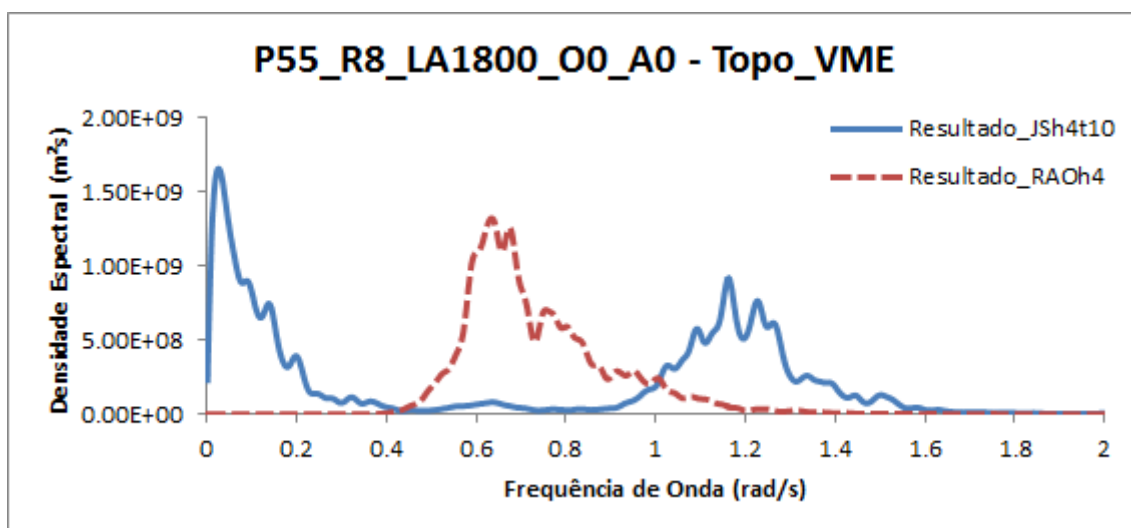


Figura 4.23 - Resposta de tensão de Von Mises para o riser (topo/JSh4t10)

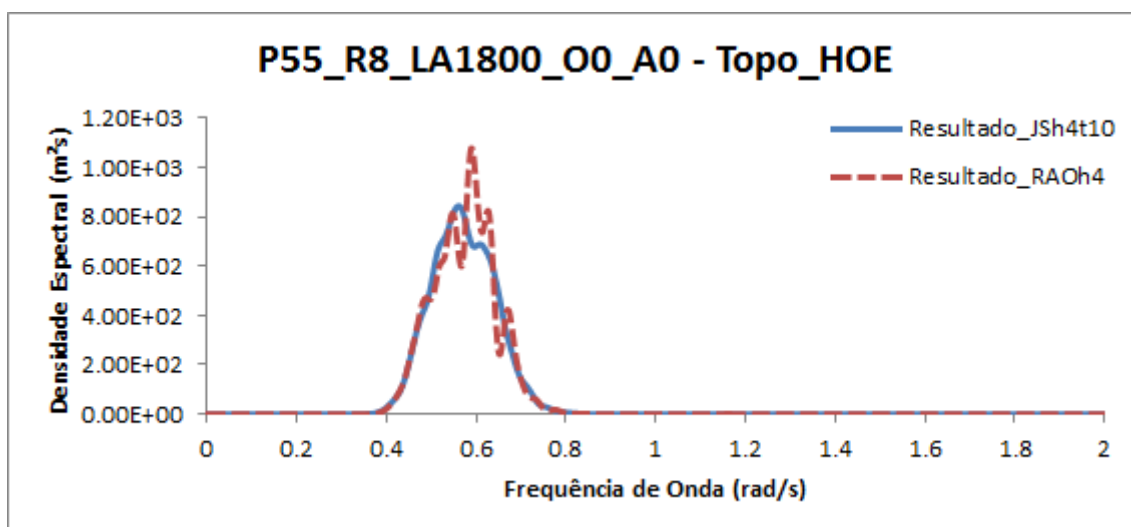


Figura 4.24 - Resposta de tensão circunferencial para o riser (topo/JSh4t10)

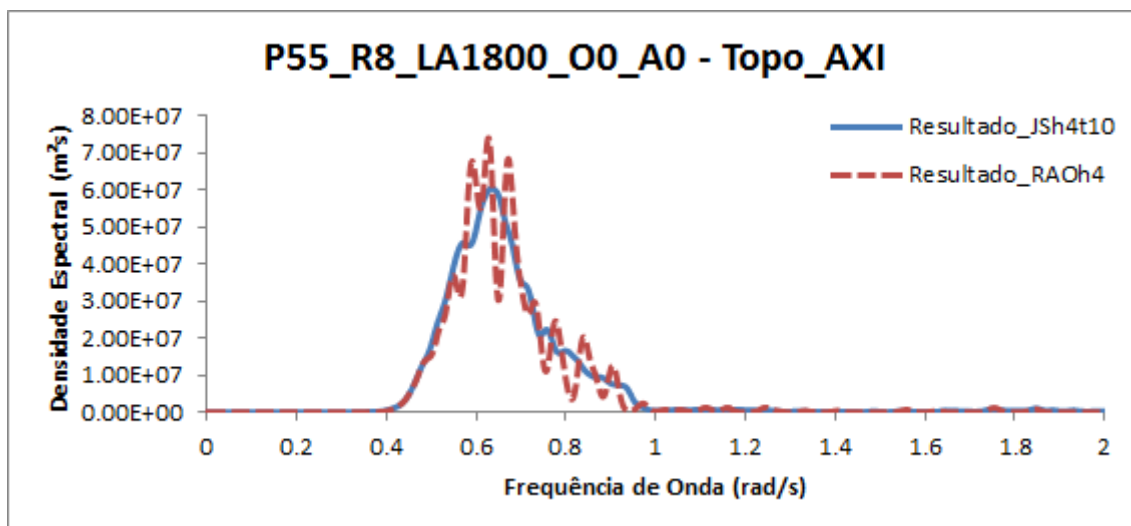


Figura 4.25 - Resposta de tensão longitudinal axial para o riser (topo/JSh4t10)

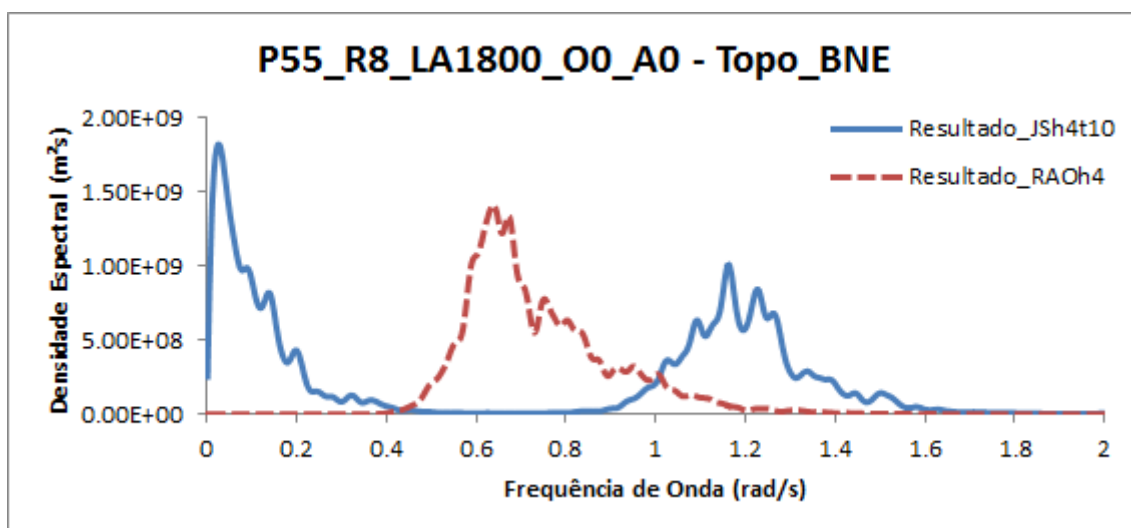


Figura 4.26 - Resposta de tensão longitudinal de momento para o riser (topo/JSh4t10)

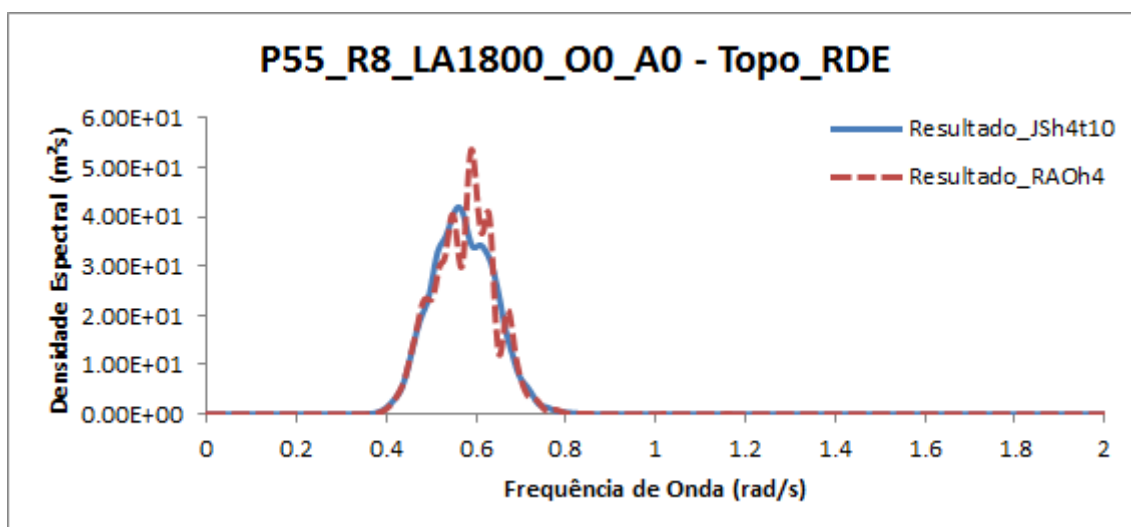


Figura 4.27 - Resposta de tensão radial para o riser (topo/JSh4t10)

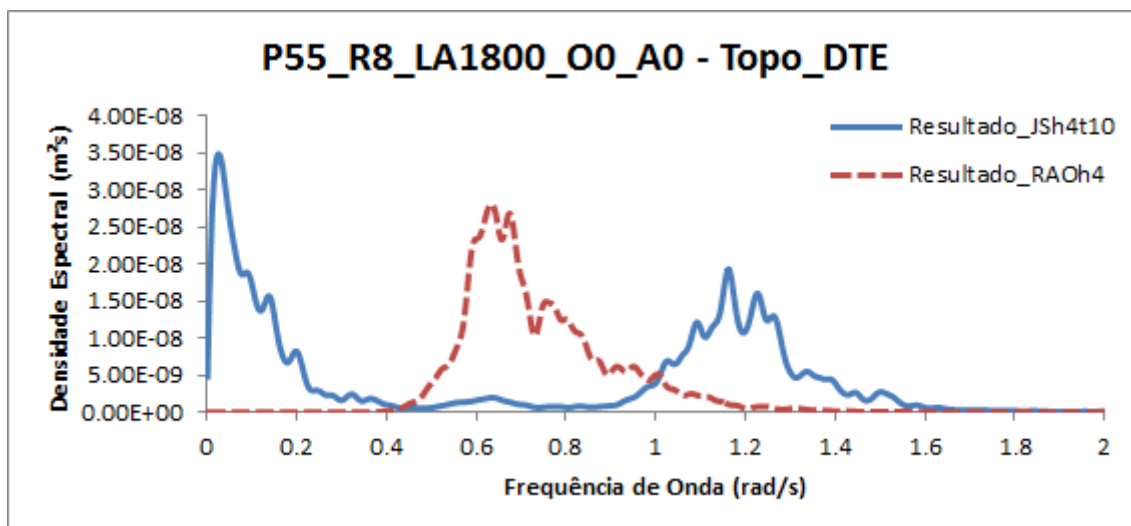


Figura 4.28 - Resposta de deformação total para o riser (topo/JSh4t10)

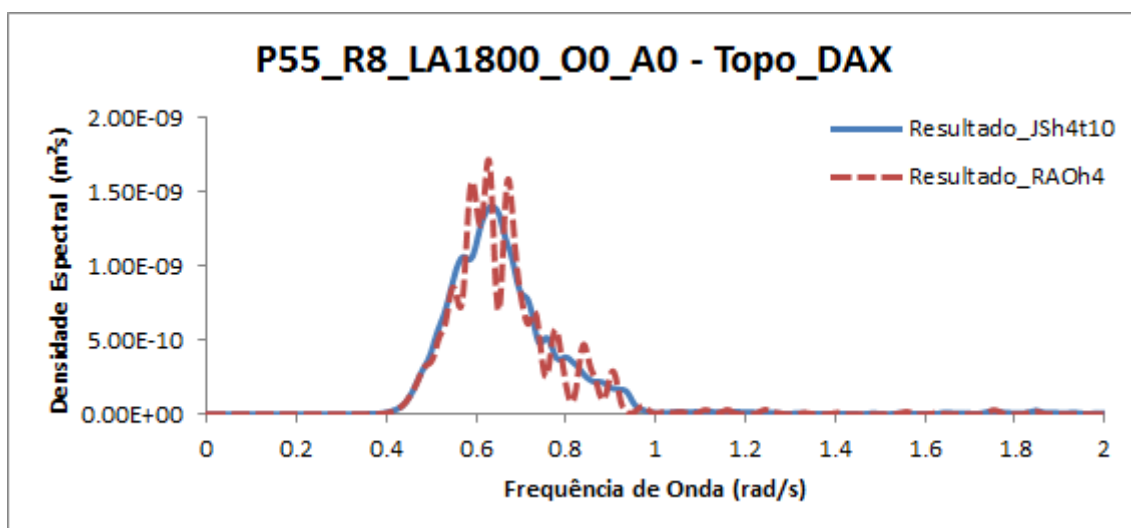


Figura 4.29 - Resposta de deformação axial para o riser (topo/JSh4t10)

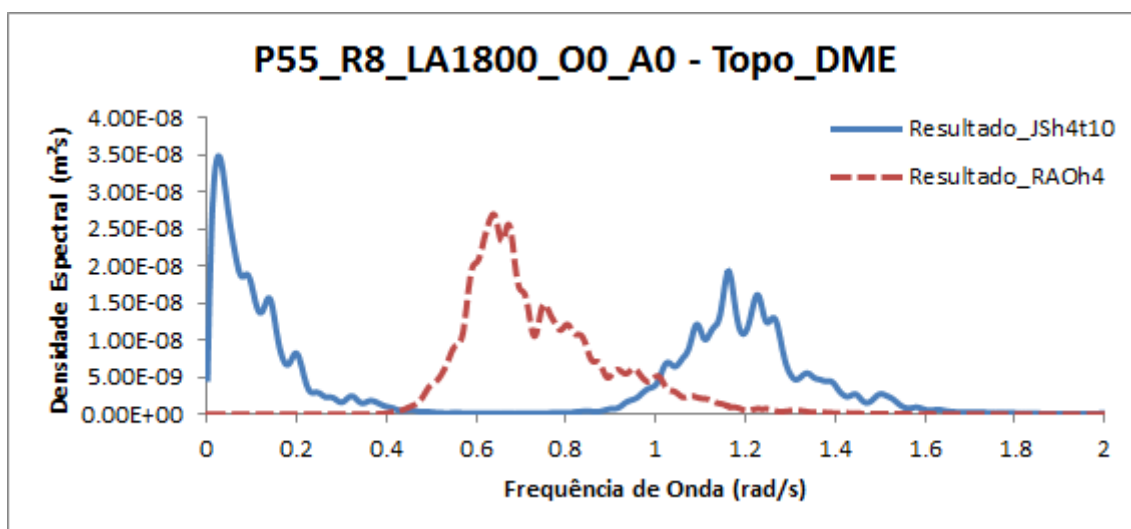


Figura 4.30 - Resposta de deformação transversal para o riser (topo/JSh4t10)

Através de uma análise visual, é possível confirmar que a estimativa fornecida pelo RAO de resposta é capaz de se aproximar do resultado obtido pela simulação completa para o carregamento de ondas. Os espectros de resposta obtidos por cada método apresentam semelhanças tanto na magnitude das suas áreas, indicando que ambos registraram uma quantidade similar de energia no *riser*, quanto na sua forma, indicando que ambos registraram os mesmos comportamentos do *riser*, como modos de vibração e concentrações de energia nas mesmas frequências.

As exceções ficam por conta dos esforços de curvatura, tensão longitudinal de momento e deformação transversal, e consequentemente tensão de Von Mises e deformação total, de acordo com o que foi exposto anteriormente.

É possível perceber a mesma distorção dos valores em módulo nos resultados da simulação do carregamento JONSWAP para estes esforços. Também nestes casos são registradas quantidades significativas de energia de resposta do *riser* em frequências que não são solicitadas pelo carregamento, indicando que estes resultados são igualmente incorretos, pelo mesmo motivo mencionado anteriormente.

Os resultados para a região de fundo do *riser* são apresentados nas Figuras 4.31 a 4.41.

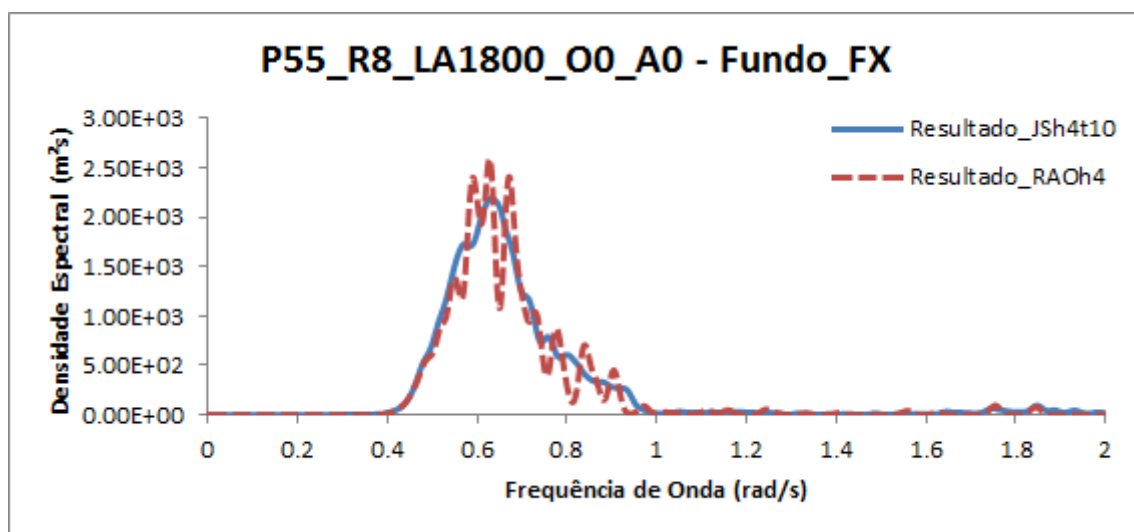


Figura 4.31 - Resposta de força axial para o riser (fundo/JSh4t10)

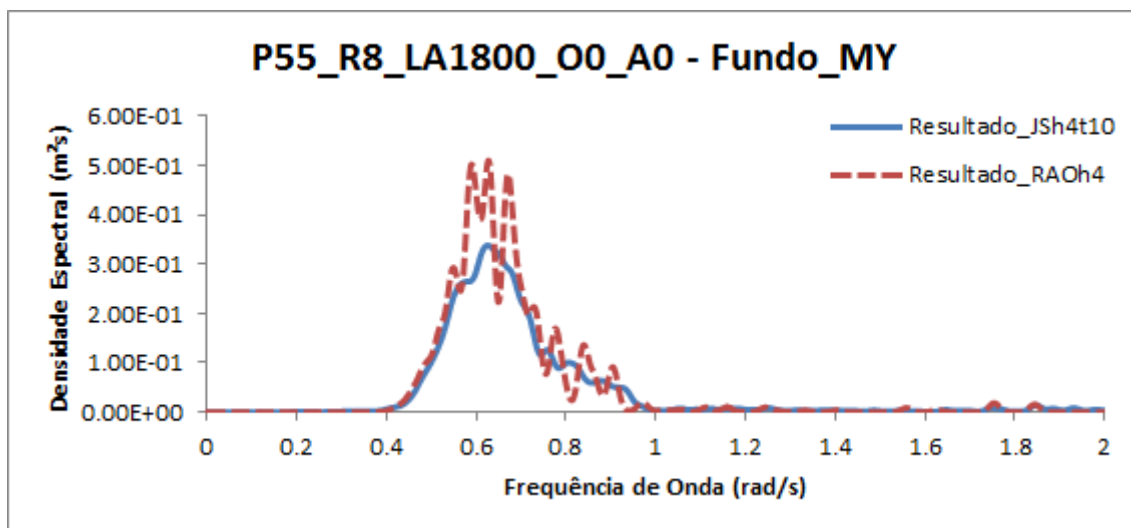


Figura 4.32 - Resposta de momento fletor para o riser (fundo/JSh4t10)

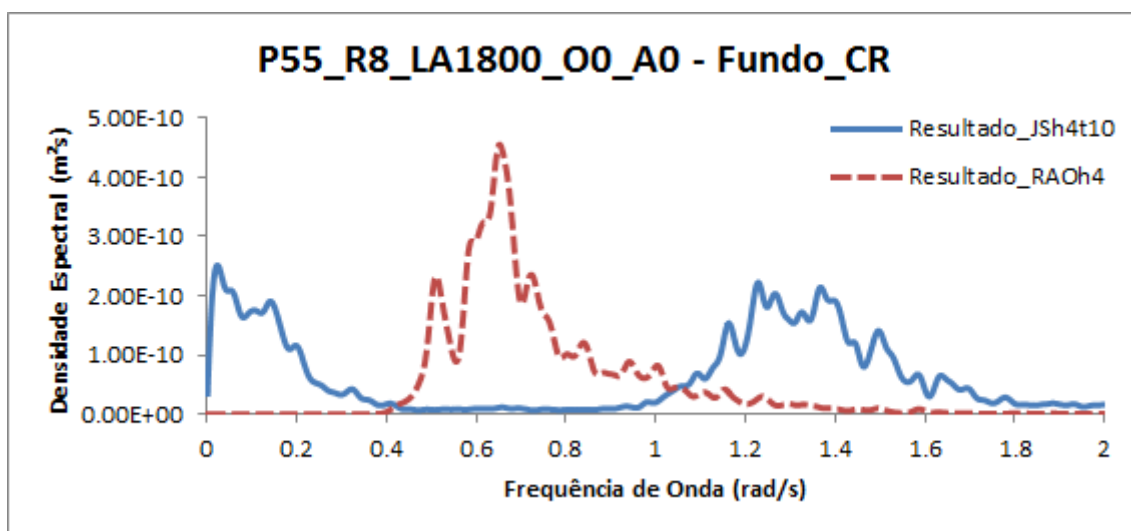


Figura 4.33 - Resposta de curvatura para o riser (fundo/JSh4t10)

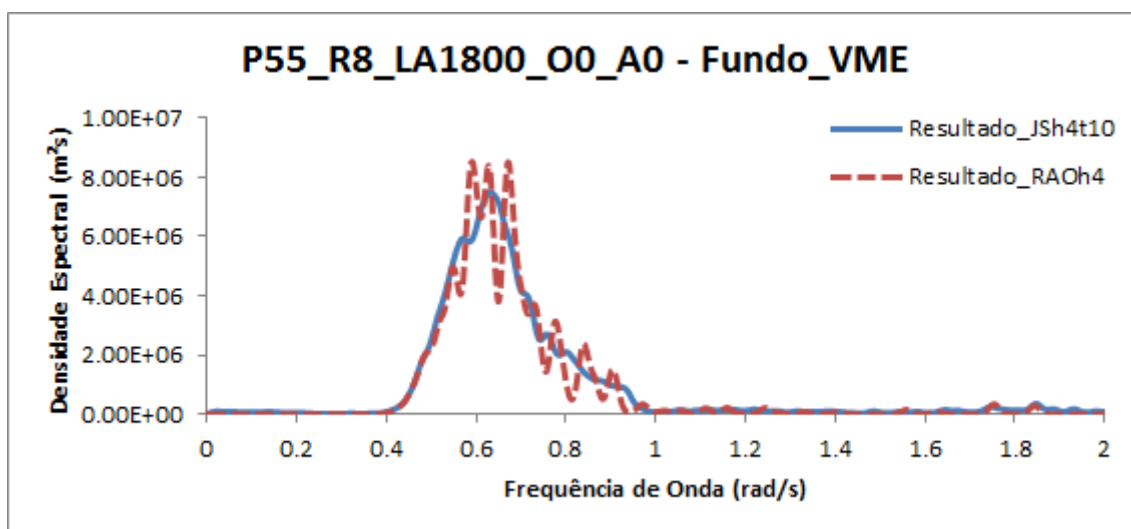


Figura 4.34 - Resposta de tensão de Von Mises para o riser (fundo/JSh4t10)

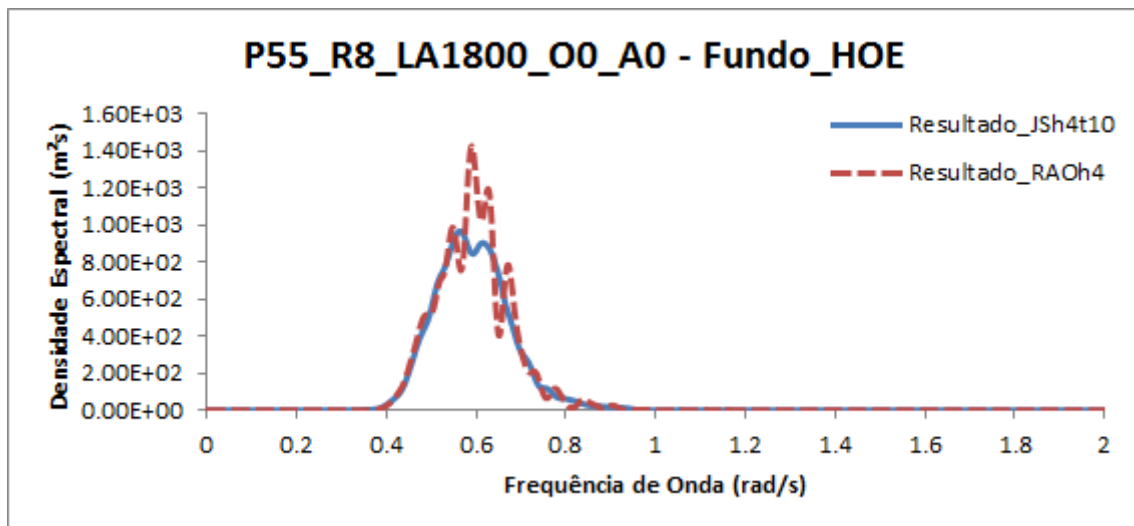


Figura 4.35 - Resposta de tensão circunferencial para o riser (fundo/JSh4t10)

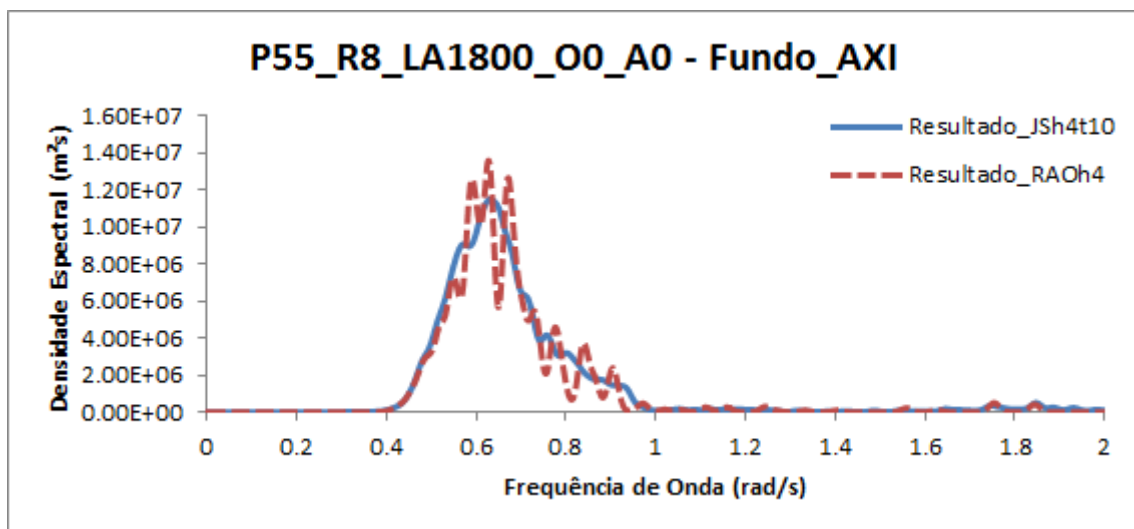


Figura 4.36 - Resposta de tensão longitudinal axial para o riser (fundo/JSh4t10)

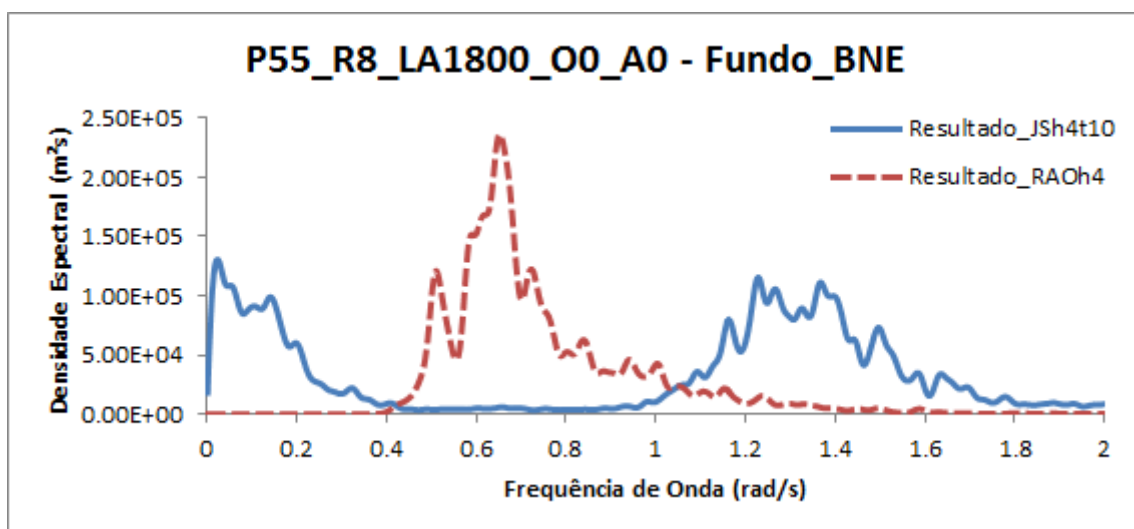


Figura 4.37 - Resposta de tensão longitudinal de momento para o riser (fundo/JSh4t10)

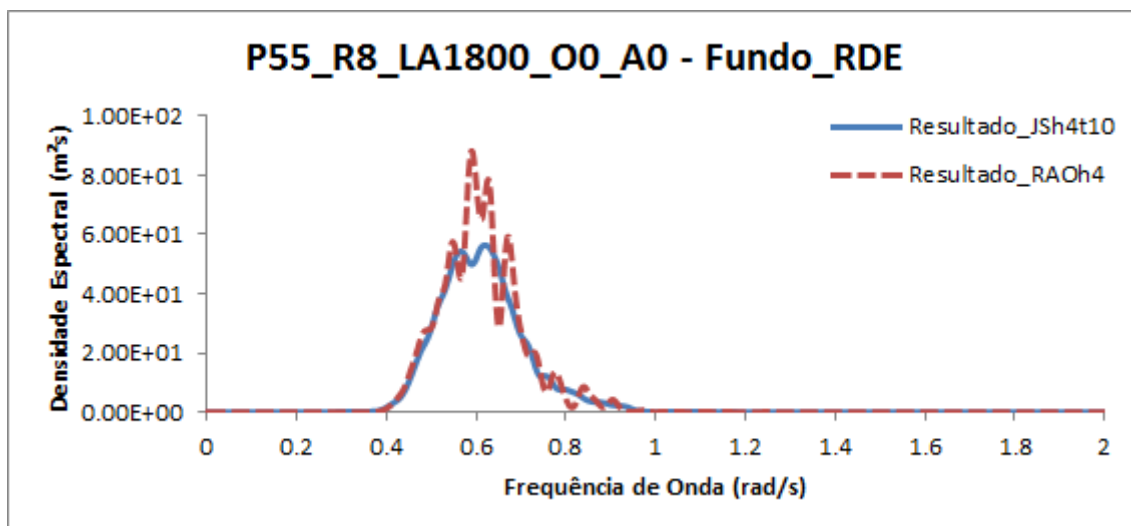


Figura 4.38 - Resposta de tensão radial para o riser (fundo/JSh4t10)

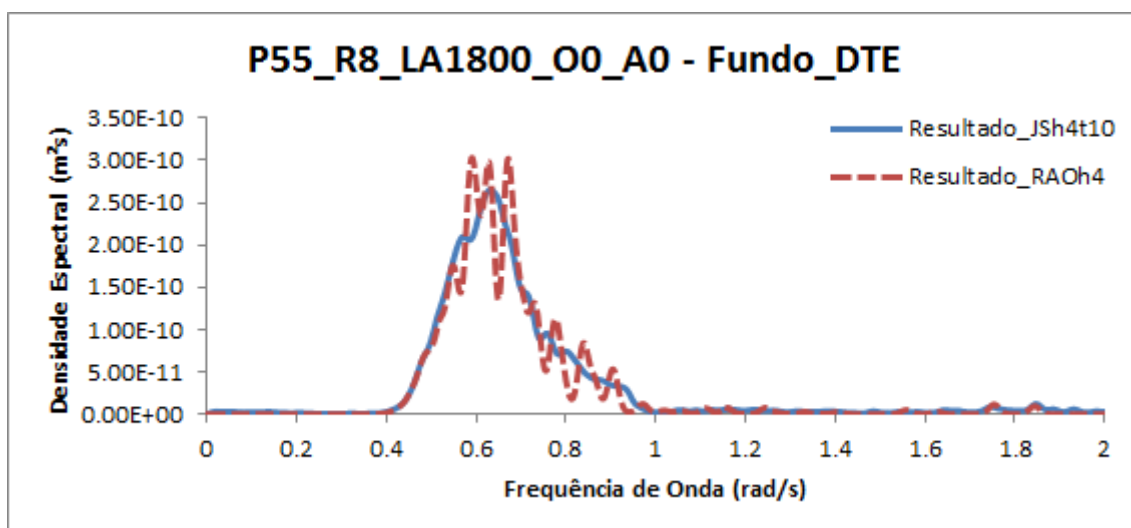


Figura 4.39 - Resposta de deformação total para o riser (fundo/JSh4t10)

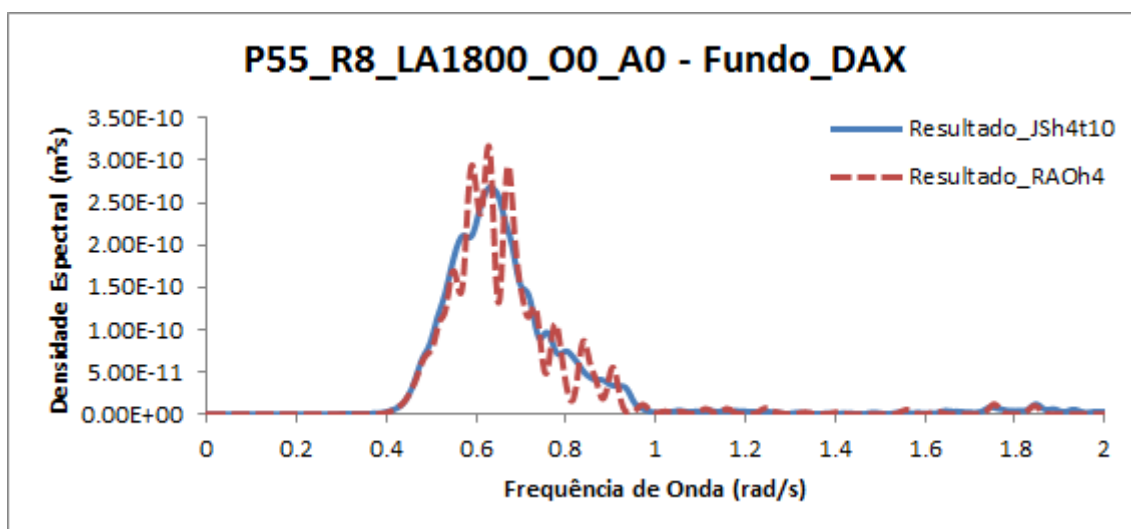


Figura 4.40 - Resposta de deformação axial para o riser (fundo/JSh4t10)

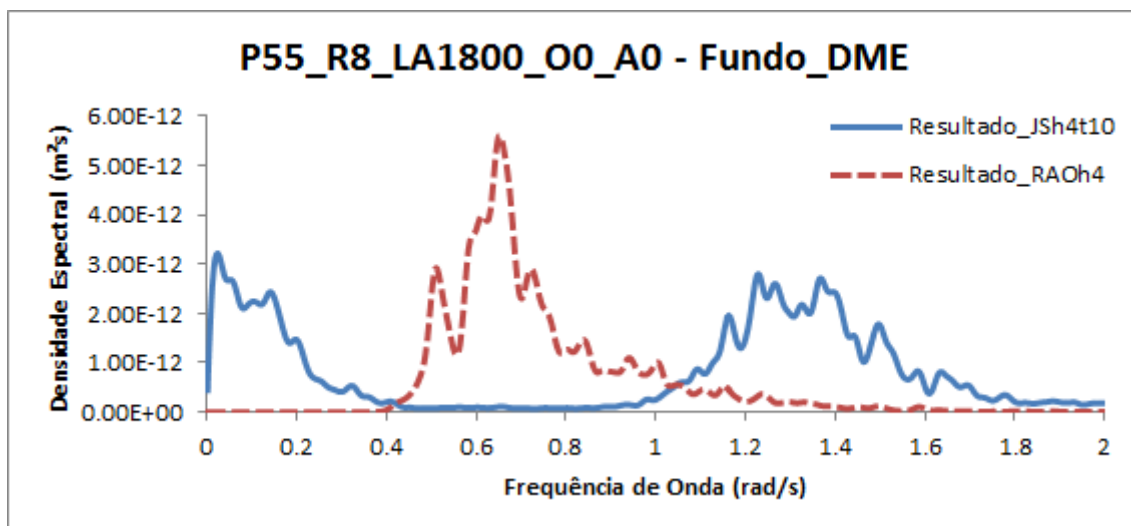


Figura 4.41 - Resposta de deformação transversal para o riser (fundo/JSh4t10)

Os resultados dos esforços monitorados na região de fundo apresentam intensidade diferente dos registradas na de topo, algo natural já que o *riser* está submetido a condições distintas em cada uma. Mesmo assim, a boa qualidade da estimativa do RAO de resposta se mantém, aparentemente, com a mesma precisão.

Tensão de Von Mises e deformação total, agora menos influenciadas pela tensão longitudinal de momento e deformação transversal, passam a mostrar uma proximidade entre os resultados obtidos por cada método consistente com os demais esforços.

Alternativamente, os espectros podem ser expressos através dos seus momentos espectrais, que são apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6. Nelas, os momentos espectrais de ordem zero a quatro são registrados nas colunas marcadas pelas siglas M0 a M4 e cada conjunto de três linhas traz os valores obtidos para os resultados do carregamento JONSWAP e do RAO de resposta, assim como a diferença percentual entre eles, para verificação da sua aderência.

Tabela 4.5 - Momentos espectrais da resposta do riser (topo/JSh4t10)

P55_R8_LA1800_O0_A0 - Topo						
Esforço	Resultado	M0	M1	M2	M3	M4
FX	JSh4t10	2.62E+03	1.77E+03	1.28E+03	1.03E+03	9.74E+02
	RAOh4	2.55E+03	1.70E+03	1.19E+03	8.94E+02	7.50E+02
Diferença %		2.64%	4.09%	7.23%	13.30%	23.01%
MY	JSh4t10	4.94E+02	2.98E+02	1.84E+02	1.18E+02	7.81E+01
	RAOh4	4.90E+02	2.96E+02	1.83E+02	1.16E+02	7.64E+01
Diferença %		0.72%	0.67%	0.85%	1.33%	2.28%
CR	JSh4t10	9.11E-07	5.99E-07	6.87E-07	8.49E-07	1.08E-06
	RAOh4	6.79E-07	5.03E-07	3.91E-07	3.22E-07	2.81E-07
Diferença %		25.42%	16.00%	43.04%	62.08%	73.87%
VME	JSh4t10	4.44E+08	2.92E+08	3.30E+08	4.05E+08	5.12E+08
	RAOh4	3.29E+08	2.43E+08	1.88E+08	1.55E+08	1.35E+08
Diferença %		25.99%	16.76%	42.97%	61.84%	73.65%
HOE	JSh4t10	1.48E+02	8.47E+01	4.92E+01	2.91E+01	1.75E+01
	RAOh4	1.51E+02	8.65E+01	5.04E+01	2.98E+01	1.79E+01
Diferença %		1.71%	2.06%	2.35%	2.51%	2.38%
AXI	JSh4t10	1.38E+07	9.36E+06	6.78E+06	5.45E+06	5.15E+06
	RAOh4	1.35E+07	8.98E+06	6.29E+06	4.73E+06	3.96E+06
Diferença %		2.65%	4.10%	7.24%	13.32%	23.04%
BNE	JSh4t10	4.73E+08	3.11E+08	3.57E+08	4.41E+08	5.59E+08
	RAOh4	3.53E+08	2.61E+08	2.03E+08	1.67E+08	1.46E+08
Diferença %		25.42%	16.00%	43.04%	62.08%	73.87%
RDE	JSh4t10	7.37E+00	4.21E+00	2.45E+00	1.44E+00	8.68E-01
	RAOh4	7.49E+00	4.30E+00	2.50E+00	1.48E+00	8.89E-01
Diferença %		1.71%	2.06%	2.35%	2.51%	2.38%
DTE	JSh4t10	9.39E-09	6.17E-09	6.98E-09	8.55E-09	1.08E-08
	RAOh4	6.99E-09	5.16E-09	4.00E-09	3.28E-09	2.87E-09
Diferença %		25.57%	16.42%	42.64%	61.58%	73.45%
DAX	JSh4t10	3.21E-10	2.17E-10	1.57E-10	1.26E-10	1.19E-10
	RAOh4	3.12E-10	2.08E-10	1.46E-10	1.09E-10	9.17E-11
Diferença %		2.65%	4.09%	7.21%	13.27%	22.97%
DME	JSh4t10	9.04E-09	5.94E-09	6.82E-09	8.42E-09	1.07E-08
	RAOh4	6.74E-09	4.99E-09	3.88E-09	3.20E-09	2.79E-09
Diferença %		25.40%	15.97%	43.02%	62.07%	73.86%

Tabela 4.6 - Momentos espectrais da resposta do riser (fundo/JSh4t10)

P55_R8_LA1800_O0_A0 - Fundo						
Esforço	Resultado	M0	M1	M2	M3	M4
FX	JSh4t10	5.20E+02	3.62E+02	2.79E+02	2.54E+02	2.87E+02
	RAOh4	4.89E+02	3.30E+02	2.39E+02	1.93E+02	1.83E+02
Diferença %		5.99%	8.65%	14.39%	24.21%	36.38%
MY	JSh4t10	8.40E-02	5.91E-02	4.60E-02	4.19E-02	4.66E-02
	RAOh4	9.89E-02	6.68E-02	4.83E-02	3.89E-02	3.68E-02
Diferença %		17.72%	13.05%	4.90%	7.17%	21.07%
CR	JSh4t10	1.33E-10	1.22E-10	1.61E-10	2.27E-10	3.30E-10
	RAOh4	1.04E-10	7.76E-11	6.30E-11	5.65E-11	5.65E-11
Diferença %		22.03%	36.33%	60.90%	75.13%	82.90%
VME	JSh4t10	1.83E+06	1.29E+06	1.02E+06	9.69E+05	1.13E+06
	RAOh4	1.72E+06	1.17E+06	8.47E+05	6.88E+05	6.55E+05
Diferença %		6.07%	9.33%	17.08%	29.04%	42.22%
HOE	JSh4t10	1.94E+02	1.15E+02	7.00E+01	4.35E+01	2.78E+01
	RAOh4	2.12E+02	1.26E+02	7.64E+01	4.73E+01	2.99E+01
Diferença %		9.17%	9.23%	9.08%	8.63%	7.65%
AXI	JSh4t10	2.74E+06	1.90E+06	1.47E+06	1.34E+06	1.51E+06
	RAOh4	2.57E+06	1.74E+06	1.26E+06	1.01E+06	9.63E+05
Diferença %		6.04%	8.72%	14.48%	24.31%	36.46%
BNE	JSh4t10	6.91E+04	6.32E+04	8.37E+04	1.18E+05	1.71E+05
	RAOh4	5.39E+04	4.03E+04	3.27E+04	2.93E+04	2.93E+04
Diferença %		22.03%	36.32%	60.90%	75.13%	82.90%
RDE	JSh4t10	1.24E+01	7.62E+00	4.81E+00	3.13E+00	2.10E+00
	RAOh4	1.41E+01	8.62E+00	5.40E+00	3.47E+00	2.29E+00
Diferença %		13.42%	13.01%	12.22%	10.94%	8.83%
DTE	JSh4t10	6.47E-11	4.53E-11	3.58E-11	3.37E-11	3.91E-11
	RAOh4	6.11E-11	4.14E-11	3.00E-11	2.43E-11	2.30E-11
Diferença %		5.54%	8.70%	16.23%	27.98%	41.11%
DAX	JSh4t10	6.37E-11	4.43E-11	3.42E-11	3.12E-11	3.52E-11
	RAOh4	5.99E-11	4.04E-11	2.92E-11	2.36E-11	2.23E-11
Diferença %		5.99%	8.69%	14.49%	24.37%	36.58%
DME	JSh4t10	1.68E-12	1.53E-12	2.02E-12	2.85E-12	4.14E-12
	RAOh4	1.28E-12	9.57E-13	7.77E-13	6.97E-13	6.97E-13
Diferença %		23.65%	37.48%	61.60%	75.54%	83.14%

A maioria dos esforços foi marcada em verde por registrar diferenças pequenas entre os resultados obtidos por cada método, enquanto que os resultados que sofrem a distorção dos valores em módulo foram marcados em vermelho porque não podem ser considerados. Tensão de Von Mises e deformação total não estão marcadas porque meramente refletem os outros resultados.

Os momentos espectrais confirmam quantitativamente a boa qualidade da estimativa do RAO de resposta observada visualmente, com a vantagem de permitir uma avaliação mais precisa. Adicionalmente, agora é possível verificar que a qualidade da estimativa do RAO de resposta na região de topo é melhor que na região de fundo.

Na região de topo, as diferenças médias para os momentos de ordem zero a quatro, respectivamente, ficam em torno de 2%, 3%, 4%, 8% e 13%, levando em conta somente as propriedades marcadas em verde. Considerando que momentos espectrais tendem a ser mais instáveis quanto maior for a sua ordem, a boa proximidade registrada para os momentos zero a dois, especialmente, comprova a boa qualidade da estimativa fornecida pelo método do RAO de resposta.

As diferenças equivalentes para a região de fundo ficam em torno de 9%, 10%, 12%, 17% e 24%. Apesar de serem maiores que as encontradas para região de topo, os seus espectros confirmam que elas ainda podem ser consideradas aceitáveis.

Com os resultados para um único carregamento de ondas detalhados, agora é possível compará-los com os dos outros casos para avaliar se o método do RAO de resposta mantém a mesma precisão na sua estimativa. Afinal, carregamentos diferenciados geram respostas diferenciadas nas estruturas, não só em intensidade mas também em modos de vibração, e é necessário confirmar que o método tem capacidade de acompanhar estas mudanças.

O mesmo procedimento que foi aplicado ao carregamento “JSh4t10” será aplicado aos demais. Os resultados serão obtidos a partir de simulações para todos os carregamentos JONSWAP e comparados com as estimativas fornecidas pelo método do RAO de resposta, através da multiplicação do RAO específico a cada carregamento pelo espectro de ondas correspondente. Por exemplo, a resposta do carregamento “JSh2t7” será obtida pela multiplicação do RAO “RAOh2” pelo espectro de ondas “JSh2t7”.

Aqui se nota a economia de custos computacionais proporcionada pelo método do RAO de resposta, já que nove simulações para carregamentos JONSWAP individuais serão substituídas por RAOs obtidos a partir de 3 simulações de ruído branco.

Os resultados são apresentados nas Tabelas 4.7 e 4.8, com cada caso em uma coluna. Por uma questão de praticidade, os resultados são representados somente pelos valores de momento espectral de ordem zero de cada caso, já que apresentar todos os

momentos exigiria uma quantidade excessiva de tabelas e dificultaria as análises. Adicionalmente, o momento de ordem zero é o mais estável e representativo, sendo suficiente para o propósito de comparação.

Tabela 4.7 - Momentos espectrais da resposta do riser a vários carregamentos (topo)

P55_R8_LA1800_O0_A0 - Topo - M0										
Esforço	Resultado	h2t7	h2t10	h2t15	h4t7	h4t10	h4t15	h7t7	h7t10	h7t15
FX	JS	3.08E+02	6.39E+02	6.36E+02	1.22E+03	2.62E+03	2.73E+03	3.71E+03	8.38E+03	9.43E+03
	RAO	2.87E+02	6.27E+02	6.29E+02	1.13E+03	2.55E+03	2.65E+03	3.45E+03	8.09E+03	8.85E+03
Diferença %		6.79%	1.89%	1.12%	7.38%	2.64%	2.97%	7.13%	3.46%	6.13%
MY	JS	2.18E+01	1.12E+02	2.73E+02	8.94E+01	4.94E+02	1.35E+03	2.87E+02	1.71E+03	5.22E+03
	RAO	2.13E+01	1.10E+02	2.54E+02	8.87E+01	4.90E+02	1.19E+03	2.92E+02	1.71E+03	4.70E+03
Diferença %		2.05%	1.08%	7.03%	0.71%	0.72%	11.86%	1.87%	0.12%	10.05%
CR	JS	3.94E-08	2.03E-07	5.36E-07	1.63E-07	9.11E-07	2.74E-06	5.30E-07	3.20E-06	1.08E-05
	RAO	1.39E-07	1.34E-07	1.04E-07	6.47E-07	6.79E-07	5.22E-07	2.35E-06	2.68E-06	2.06E-06
Diferença %		253.91%	33.96%	80.65%	297.29%	25.42%	80.93%	343.87%	16.40%	80.87%
VME	JS	1.94E+07	9.71E+07	2.54E+08	8.12E+07	4.44E+08	1.33E+09	2.68E+08	1.60E+09	5.39E+09
	RAO	6.49E+07	6.41E+07	4.95E+07	3.06E+08	3.29E+08	2.53E+08	1.14E+09	1.32E+09	1.02E+09
Diferença %		233.53%	33.98%	80.48%	277.26%	25.99%	80.98%	325.75%	17.33%	80.98%
HOE	JS	1.37E+00	3.70E+01	1.24E+02	5.48E+00	1.48E+02	4.95E+02	1.68E+01	4.54E+02	1.52E+03
	RAO	1.45E+00	3.77E+01	1.31E+02	5.81E+00	1.51E+02	5.25E+02	1.78E+01	4.61E+02	1.61E+03
Diferença %		6.11%	1.71%	6.18%	6.15%	1.71%	6.19%	6.11%	1.70%	6.19%
AXI	JS	1.63E+06	3.37E+06	3.35E+06	6.46E+06	1.38E+07	1.44E+07	1.97E+07	4.42E+07	4.98E+07
	RAO	1.52E+06	3.31E+06	3.31E+06	5.99E+06	1.35E+07	1.40E+07	1.82E+07	4.27E+07	4.67E+07
Diferença %		6.79%	1.90%	1.15%	7.38%	2.65%	3.01%	7.13%	3.47%	6.19%
BNE	JS	2.04E+07	1.06E+08	2.78E+08	8.45E+07	4.73E+08	1.42E+09	2.75E+08	1.66E+09	5.60E+09
	RAO	7.23E+07	6.97E+07	5.39E+07	3.36E+08	3.53E+08	2.71E+08	1.22E+09	1.39E+09	1.07E+09
Diferença %		253.86%	33.96%	80.65%	297.30%	25.42%	80.93%	343.83%	16.39%	80.87%
RDE	JS	6.81E-02	1.84E+00	6.15E+00	2.72E-01	7.37E+00	2.46E+01	8.34E-01	2.26E+01	7.53E+01
	RAO	7.22E-02	1.87E+00	6.53E+00	2.89E-01	7.49E+00	2.61E+01	8.85E-01	2.29E+01	8.00E+01
Diferença %		6.11%	1.71%	6.19%	6.11%	1.71%	6.19%	6.11%	1.71%	6.19%
DTE	JS	4.31E-10	2.10E-09	5.41E-09	1.78E-09	9.39E-09	2.76E-08	5.75E-09	3.30E-08	1.08E-07
	RAO	1.41E-09	1.40E-09	1.08E-09	6.49E-09	6.99E-09	5.41E-09	2.36E-08	2.73E-08	2.13E-08
Diferença %		226.43%	33.53%	79.99%	265.77%	25.57%	80.38%	309.73%	17.00%	80.35%
DAX	JS	3.78E-11	7.82E-11	7.78E-11	1.50E-10	3.21E-10	3.34E-10	4.55E-10	1.03E-09	1.15E-09
	RAO	3.52E-11	7.67E-11	7.70E-11	1.38E-10	3.12E-10	3.24E-10	4.22E-10	9.90E-10	1.08E-09
Diferença %		6.83%	1.87%	1.13%	7.45%	2.65%	2.92%	7.16%	3.43%	6.13%
DME	JS	3.90E-10	2.02E-09	5.32E-09	1.61E-09	9.04E-09	2.72E-08	5.26E-09	3.18E-08	1.07E-07
	RAO	1.38E-09	1.33E-09	1.03E-09	6.42E-09	6.74E-09	5.18E-09	2.34E-08	2.66E-08	2.05E-08
Diferença %		254.28%	33.96%	80.65%	297.84%	25.40%	80.93%	344.67%	16.35%	80.86%

Tabela 4.8 - Momentos espectrais da resposta do riser a vários carregamentos (fundo)

P55_R8_LA1800_O0_A0 - Fundo - M0										
Esforço	Resultado	h2t7	h2t10	h2t15	h4t7	h4t10	h4t15	h7t7	h7t10	h7t15
FX	JS	6.38E+01	1.14E+02	1.20E+02	2.52E+02	5.20E+02	6.37E+02	7.85E+02	1.99E+03	2.98E+03
	RAO	5.75E+01	1.09E+02	1.11E+02	2.32E+02	4.89E+02	5.54E+02	7.87E+02	1.87E+03	2.38E+03
Diferença %		9.86%	4.67%	6.86%	7.82%	5.99%	13.13%	0.31%	5.89%	20.10%
MY	JS	1.58E-02	2.57E-02	2.78E-02	5.02E-02	8.40E-02	1.03E-01	1.17E-01	2.24E-01	2.94E-01
	RAO	1.43E-02	2.75E-02	2.91E-02	4.69E-02	9.89E-02	1.12E-01	1.21E-01	2.69E-01	3.38E-01
Diferença %		9.48%	6.98%	4.53%	6.50%	17.72%	9.04%	3.31%	19.99%	15.02%
CR	JS	2.07E-11	4.26E-11	4.76E-11	6.42E-11	1.33E-10	1.74E-10	1.50E-10	3.16E-10	5.43E-10
	RAO	2.61E-11	2.26E-11	2.24E-11	9.71E-11	1.04E-10	1.11E-10	3.30E-10	4.30E-10	4.80E-10
Diferença %		26.31%	47.02%	53.08%	51.29%	22.03%	36.09%	119.34%	36.19%	11.67%
VME	JS	2.21E+05	4.00E+05	4.27E+05	8.85E+05	1.83E+06	2.27E+06	2.77E+06	6.96E+06	1.06E+07
	RAO	2.00E+05	3.76E+05	3.91E+05	8.31E+05	1.72E+06	1.94E+06	2.90E+06	6.66E+06	8.34E+06
Diferença %		9.54%	6.06%	8.37%	6.14%	6.07%	14.32%	4.67%	4.38%	21.13%
HOE	JS	5.77E+00	5.09E+01	1.33E+02	2.16E+01	1.94E+02	5.26E+02	6.10E+01	5.67E+02	1.60E+03
	RAO	5.80E+00	5.40E+01	1.44E+02	2.20E+01	2.12E+02	5.75E+02	6.24E+01	6.29E+02	1.76E+03
Diferença %		0.37%	6.23%	8.29%	1.45%	9.17%	9.27%	2.41%	11.01%	10.34%
AXI	JS	3.36E+05	6.00E+05	6.29E+05	1.33E+06	2.74E+06	3.36E+06	4.14E+06	1.05E+07	1.57E+07
	RAO	3.03E+05	5.72E+05	5.85E+05	1.23E+06	2.57E+06	2.91E+06	4.15E+06	9.85E+06	1.26E+07
Diferença %		9.88%	4.74%	6.98%	7.84%	6.04%	13.25%	0.33%	5.92%	20.19%
BNE	JS	1.07E+04	2.21E+04	2.47E+04	3.33E+04	6.91E+04	9.04E+04	7.80E+04	1.64E+05	2.82E+05
	RAO	1.36E+04	1.17E+04	1.16E+04	5.04E+04	5.39E+04	5.78E+04	1.71E+05	2.23E+05	2.49E+05
Diferença %		26.32%	47.02%	53.08%	51.29%	22.03%	36.09%	119.32%	36.20%	11.65%
RDE	JS	6.85E-01	3.38E+00	7.16E+00	2.53E+00	1.24E+01	2.80E+01	6.98E+00	3.49E+01	8.54E+01
	RAO	6.79E-01	3.65E+00	7.88E+00	2.54E+00	1.41E+01	3.13E+01	7.09E+00	4.09E+01	9.64E+01
Diferença %		0.95%	8.07%	10.10%	0.25%	13.42%	11.66%	1.63%	17.19%	12.88%
DTE	JS	7.90E-12	1.43E-11	1.51E-11	3.13E-11	6.47E-11	7.95E-11	9.72E-11	2.44E-10	3.68E-10
	RAO	7.16E-12	1.35E-11	1.39E-11	2.95E-11	6.11E-11	6.85E-11	1.02E-10	2.35E-10	2.93E-10
Diferença %		9.33%	5.77%	8.08%	5.87%	5.54%	13.82%	5.07%	3.63%	20.34%
DAX	JS	7.82E-12	1.40E-11	1.47E-11	3.09E-11	6.37E-11	7.80E-11	9.60E-11	2.43E-10	3.65E-10
	RAO	7.03E-12	1.33E-11	1.36E-11	2.84E-11	5.99E-11	6.78E-11	9.63E-11	2.29E-10	2.92E-10
Diferença %		10.16%	4.69%	7.18%	7.83%	5.99%	13.09%	0.26%	5.87%	20.06%
DME	JS	2.49E-13	5.26E-13	5.90E-13	7.92E-13	1.68E-12	2.20E-12	1.87E-12	4.02E-12	6.94E-12
	RAO	3.17E-13	2.71E-13	2.73E-13	1.20E-12	1.28E-12	1.40E-12	4.10E-12	5.38E-12	6.08E-12
Diferença %		27.34%	48.54%	53.74%	51.14%	23.65%	36.53%	119.67%	33.71%	12.30%

A primeira tendência perceptível nas tabelas é a variação do módulo dos momentos espectrais de um mesmo esforço entre casos de carregamento diferentes, mostrando que mudanças no carregamento alteram significativamente a resposta do *riser*.

Para visualizar a natureza deste impacto, alguns espectros de resposta são apresentados nas Figuras 4.42 a 4.45. Todos são referentes a um mesmo esforço, a força

axial na região de topo, para casos de carregamento que diferem do “JSh4t10” tanto em altura significativa quanto em período de pico de ondas.

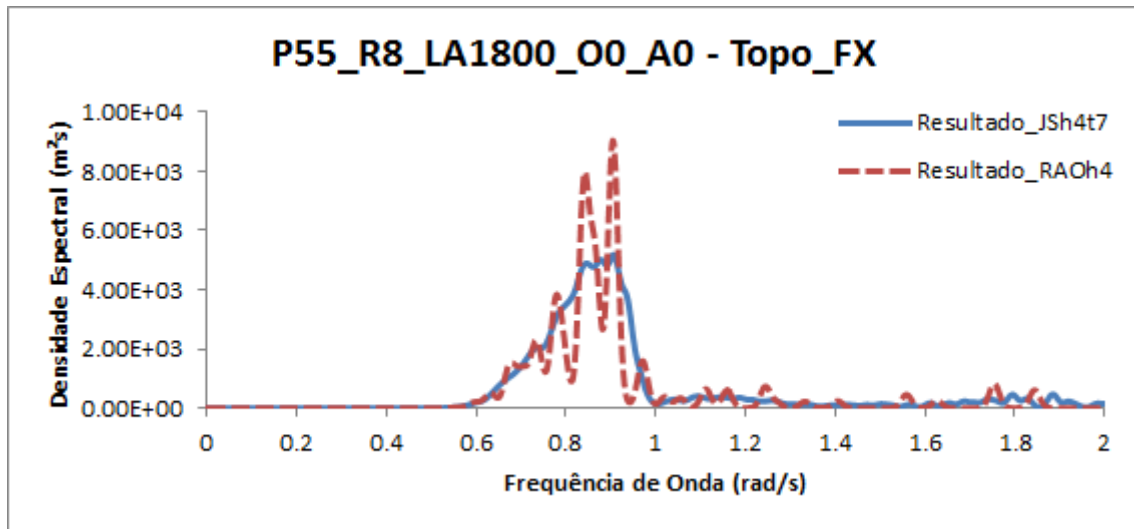


Figura 4.42 - Resposta de força axial para o riser (topo/JSh4t7)

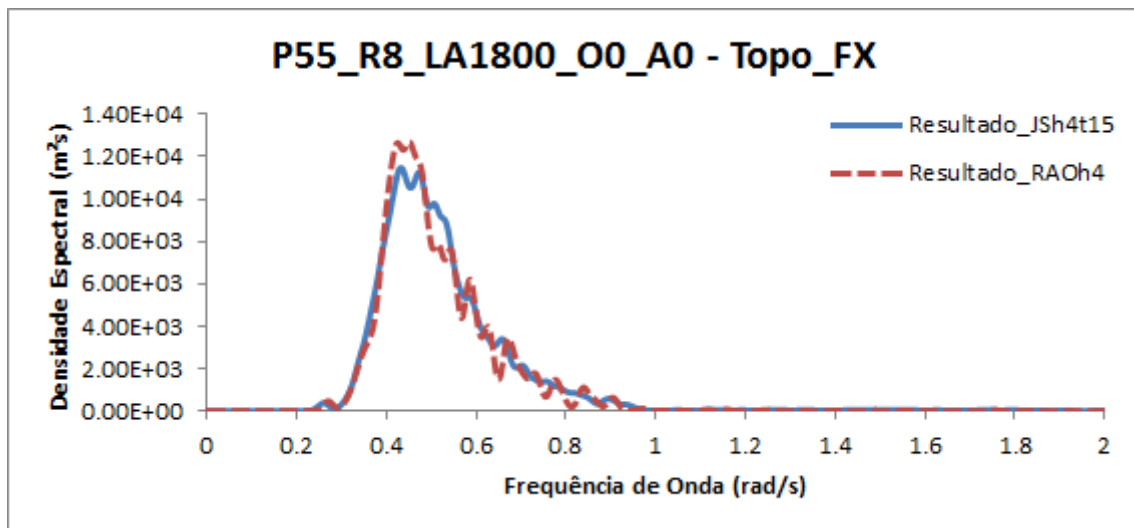


Figura 4.43 - Resposta de força axial para o riser (topo/JSh4t15)

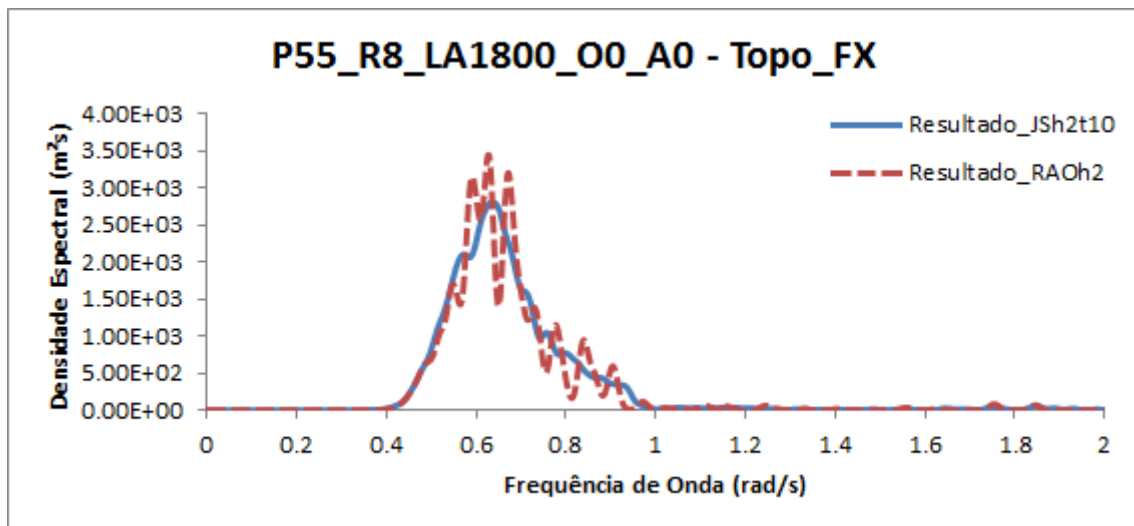


Figura 4.44 - Resposta de força axial para o riser (topo/JSh2t10)

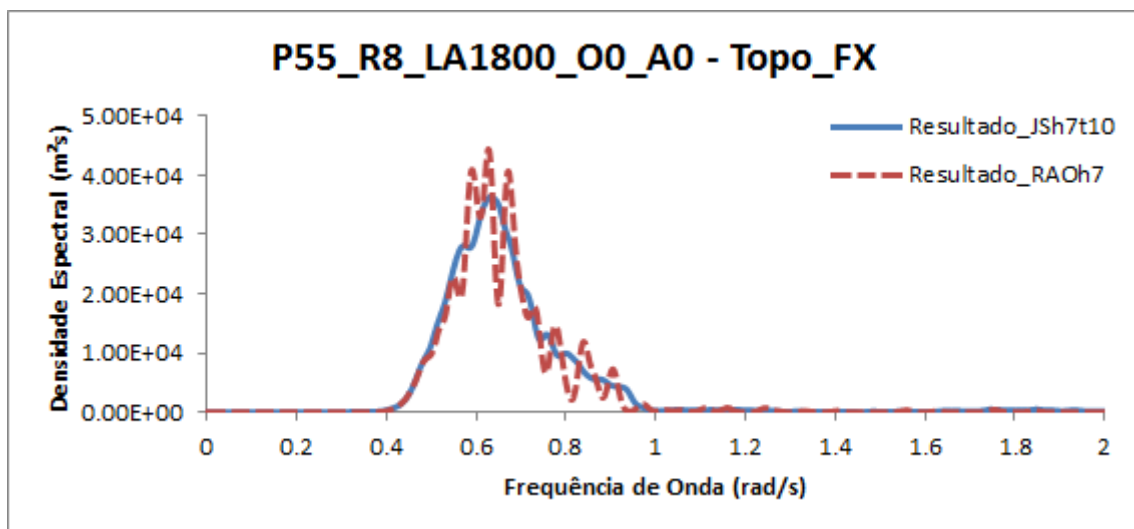


Figura 4.45 - Resposta de força axial para o riser (topo/JSh7t10)

Os espectros mostram que mudanças na altura significativa de ondas influenciam principalmente na intensidade das respostas do *riser*, enquanto mudanças no período de pico de ondas influenciam na distribuição da sua energia ao longo das frequências. Ao mesmo tempo em que os espectros mostram estas alterações nas respostas, elas também mostram que a estimativa do método do RAO de resposta tem a capacidade de se adaptar a elas.

Isto é refletido nas diferenças entre os momentos espectrais obtidos para os carregamentos JONSWAP e para o RAO de resposta, que indicam que a qualidade da estimativa obtida para cada esforço no caso “JSh4t10” se mantém em todos os casos de carregamento.

Excluindo curvatura, tensão longitudinal de momento e deformação transversal, em todos os esforços se verifica que a diferença entre os momentos espectrais obtidos por cada método se mantém próxima do alvo de 0%, mas com alguma oscilação entre os diferentes casos de carregamento. Na região de topo esta diferença mostra imprecisões com valor médio de 4%, variando entre 1% e 12%, enquanto que na região de fundo as imprecisões são um pouco maiores, mas ainda aceitáveis, com um valor médio de 8%, variando entre 1% e 21%.

Para verificar se esta oscilação é capaz de fazer com que a estimativa de algum destes esforços se torne insatisfatória, basta examinar o caso mais crítico. A maior diferença percentual registrada foi de 21% para tensão longitudinal axial na região de fundo do carregamento “JSh7t15”, cujo espectro de resposta é apresentado na Figura 4.46.

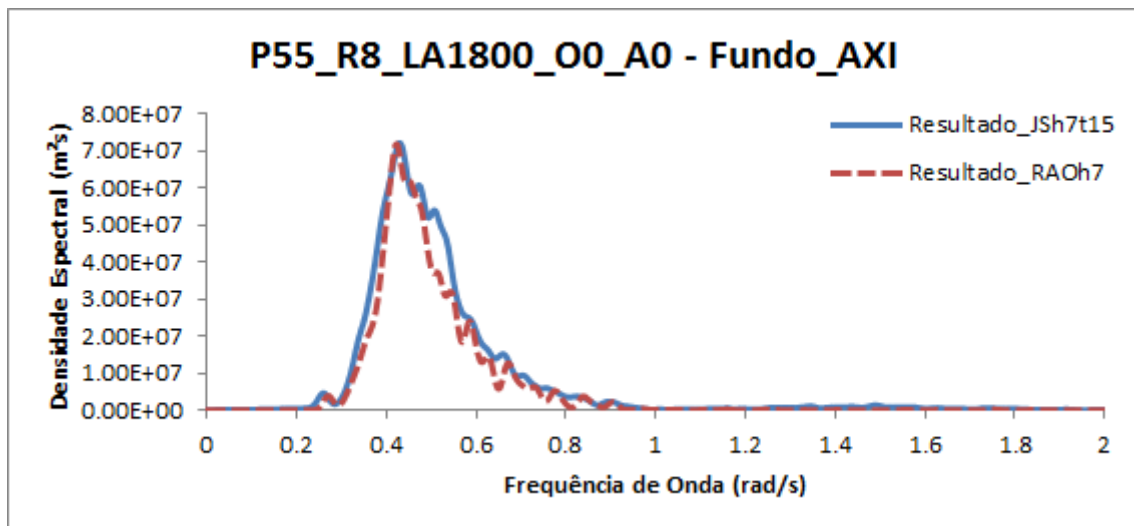


Figura 4.46 - Resposta de tensão longitudinal axial para o riser (fundo/JSh7t15)

Mesmo neste caso que apresenta a estimativa mais imprecisa pelo método do RAO de resposta, o espectro mostra que o resultado é satisfatório.

Isto comprova que, pelo menos neste cenário em que os esforços no *riser* apresentam um comportamento próximo do linear, o método do RAO de resposta tem a capacidade de ser preciso, estimando corretamente as respostas do *riser*, e consistente, com a qualidade desta estimativa se mantendo em diferentes cenários.

Os resultados apresentados até aqui mostram que as respostas dos carregamentos JONSWAP são estimadas com precisão pelo método do RAO de resposta quando são utilizados RAOs criados especificamente para cada carregamento de ondas. Agora será

verificado também se um único RAO de resposta pode fornecer estimativas precisas para todos os carregamentos.

Para tal, os três RAOs de resposta serão utilizados para estimar a resposta do *riser* a um mesmo carregamento. A comparação entre as estimativas fornecidas por cada um indicará se há uma diferença significativa entre elas. Se todas as estimativas forem próximas, fica comprovado que um único RAO pode ser utilizado.

Os RAOs de resposta utilizados serão referentes ao esforço de momento fletor na região de topo do *riser*, por terem apresentado a maior diferença entre as suas áreas. Isto garante que este é o esforço para o qual as estimativas pelos RAOs serão as mais distintas possíveis, representando o pior cenário para a utilização de um RAO único.

As estimativas fornecidas pelos diferentes RAOs de resposta são apresentadas na Figura 4.47.

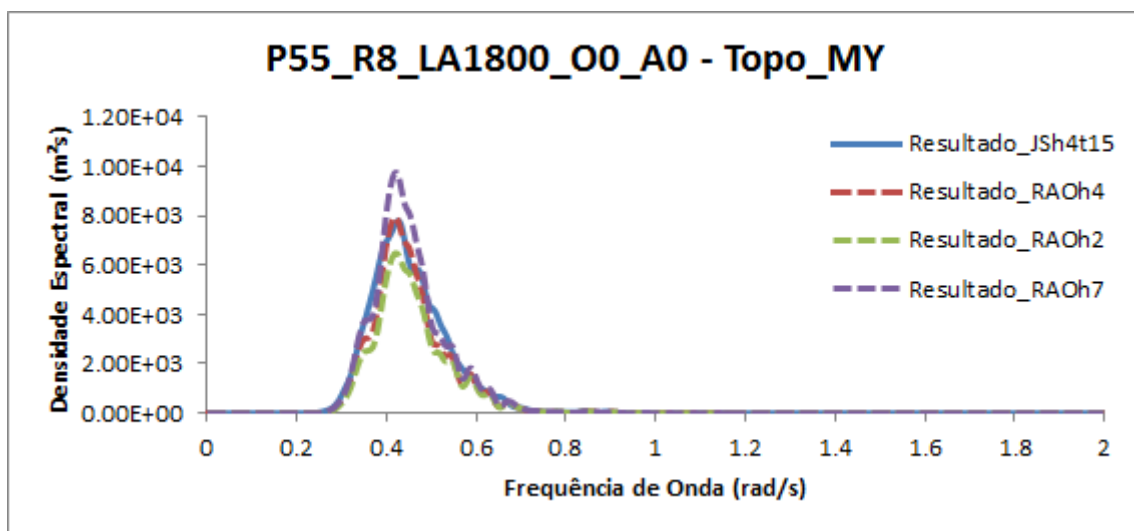


Figura 4.47 - Resposta de momento fletor para o riser por vários RAOs (topo/JSh4t15)

Enquanto a estimativa do RAO de resposta criado especificamente para representar o carregamento “JSh4t15” é claramente superior às demais, os outros RAOs foram capazes de gerar estimativas relativamente precisas.

Considerando que o método do RAO de resposta se insere no contexto de uma fase preliminar de projeto, é possível que um único RAO seja capaz de fornecer estimativas aproximadas para qualquer carregamento de ondas, dependendo do grau de exigência de cada projeto. Nestes casos, a economia de recursos computacionais e de tempo seria ainda mais pronunciada.

4.2.4. Carregamentos de ondas com incidências diversificadas

Nesta seção será estudada a resposta do *riser* para casos de carregamentos de ondas com ângulos de incidência diversificados atuando sobre o modelo da P-55.

É importante ressaltar que o RAO de movimento da plataforma P-55 é diferente para cada ângulo de incidência dos carregamentos. Consequentemente, cada RAO de resposta deve ser criado a partir de uma simulação específica para cada ângulo.

Mesmo assim, este estudo serve como extensão da seção anterior, com o propósito de verificar a precisão e consistência do método do RAO de resposta frente a alterações em novos parâmetros.

Oito casos serão estudados, cada um com incrementos de 45° no seu ângulo de incidência em relação ao anterior, completando uma volta de 360°. Os ângulos serão descritos através do seu azimute com o norte geográfico e registrados na nomenclatura de cada caso seguindo o parâmetro “A”. Todos terão o mesmo carregamento de ondas como base, o caso “JSh4t10”. Os resultados são apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.10, nas quais cada caso ocupa uma coluna.

Tabela 4.9 - Momentos espectrais da resposta do riser a várias incidências (topo/JSh4t10)

P55_R8_LA1800_OO_JSh4t10 - Topo - M0									
Esforço	Resultado	A0	A45	A90	A135	A180	A225	A270	A315
FX	JS	2.62E+03	1.67E+03	6.91E+02	1.35E+03	1.50E+03	1.33E+03	6.74E+02	1.67E+03
	RAO	2.55E+03	1.64E+03	6.90E+02	1.34E+03	1.47E+03	1.32E+03	6.73E+02	1.65E+03
Diferença %		2.64%	1.70%	0.19%	1.15%	2.39%	1.03%	0.21%	1.77%
MY	JS	4.94E+02	3.82E+02	2.92E+00	4.67E+02	4.47E+02	3.59E+02	2.36E+00	4.97E+02
	RAO	4.90E+02	3.79E+02	2.86E+00	4.82E+02	4.59E+02	3.71E+02	2.47E+00	4.95E+02
Diferença %		0.72%	0.72%	1.96%	3.20%	2.66%	3.30%	4.64%	0.52%
CR	JS	9.11E-07	1.48E-06	6.52E-07	1.31E-06	8.03E-07	1.39E-06	6.44E-07	1.39E-06
	RAO	6.79E-07	7.32E-07	5.59E-07	7.40E-07	6.83E-07	7.13E-07	5.08E-07	7.03E-07
Diferença %		25.42%	50.44%	14.28%	43.64%	15.00%	48.74%	21.21%	49.36%
VME	JS	4.44E+08	7.12E+08	3.09E+08	6.29E+08	3.86E+08	6.68E+08	3.06E+08	6.70E+08
	RAO	3.29E+08	3.51E+08	2.65E+08	3.59E+08	3.28E+08	3.47E+08	2.40E+08	3.37E+08
Diferença %		25.99%	50.74%	14.48%	42.95%	15.22%	47.96%	21.52%	49.72%
HOE	JS	1.48E+02	1.19E+02	4.95E+01	8.58E+01	6.87E+01	8.31E+01	5.04E+01	1.23E+02
	RAO	1.51E+02	1.21E+02	5.02E+01	8.71E+01	6.97E+01	8.45E+01	5.11E+01	1.25E+02
Diferença %		1.71%	1.58%	1.43%	1.60%	1.40%	1.60%	1.41%	1.58%
AXI	JS	1.38E+07	8.79E+06	3.64E+06	7.14E+06	7.94E+06	7.01E+06	3.56E+06	8.83E+06
	RAO	1.35E+07	8.64E+06	3.64E+06	7.06E+06	7.75E+06	6.94E+06	3.55E+06	8.68E+06
Diferença %		2.65%	1.70%	0.18%	1.16%	2.40%	1.03%	0.21%	1.77%
BNE	JS	4.73E+08	7.67E+08	3.38E+08	6.82E+08	4.17E+08	7.22E+08	3.34E+08	7.21E+08
	RAO	3.53E+08	3.80E+08	2.90E+08	3.84E+08	3.54E+08	3.70E+08	2.63E+08	3.65E+08
Diferença %		25.42%	50.44%	14.28%	43.64%	15.00%	48.73%	21.21%	49.36%
RDE	JS	7.37E+00	5.92E+00	2.46E+00	4.26E+00	3.42E+00	4.13E+00	2.51E+00	6.12E+00
	RAO	7.49E+00	6.01E+00	2.50E+00	4.33E+00	3.46E+00	4.20E+00	2.54E+00	6.21E+00
Diferença %		1.71%	1.57%	1.44%	1.61%	1.40%	1.60%	1.41%	1.60%
DTE	JS	9.39E-09	1.49E-08	6.56E-09	1.32E-08	8.17E-09	1.40E-08	6.48E-09	1.40E-08
	RAO	6.99E-09	7.42E-09	5.62E-09	7.60E-09	6.96E-09	7.35E-09	5.10E-09	7.14E-09
Diferença %		25.57%	50.16%	14.31%	42.31%	14.85%	47.34%	21.25%	49.15%
DAX	JS	3.21E-10	2.04E-10	8.46E-11	1.66E-10	1.84E-10	1.63E-10	8.25E-11	2.05E-10
	RAO	3.12E-10	2.01E-10	8.44E-11	1.64E-10	1.80E-10	1.61E-10	8.24E-11	2.02E-10
Diferença %		2.65%	1.73%	0.18%	1.22%	2.37%	1.03%	0.22%	1.64%
DME	JS	9.04E-09	1.47E-08	6.47E-09	1.30E-08	7.97E-09	1.38E-08	6.40E-09	1.38E-08
	RAO	6.74E-09	7.27E-09	5.54E-09	7.34E-09	6.78E-09	7.07E-09	5.04E-09	6.98E-09
Diferença %		25.40%	50.44%	14.30%	43.67%	15.00%	48.76%	21.20%	49.35%

Tabela 4.10 - Momentos espectrais da resposta do riser a várias incidências (fundo/JSh4t10)

P55_R8_LA1800_O0_JSh4t10 - Fundo - M0									
Esforço	Resultado	A0	A45	A90	A135	A180	A225	A270	A315
FX	JS	5.20E+02	3.20E+02	1.23E+02	2.52E+02	2.85E+02	2.47E+02	1.20E+02	3.23E+02
	RAO	4.89E+02	3.11E+02	1.30E+02	2.51E+02	2.79E+02	2.46E+02	1.28E+02	3.13E+02
Diferença %		5.99%	2.95%	5.58%	0.23%	2.06%	0.16%	6.19%	3.01%
MY	JS	8.40E-02	5.87E-02	2.77E-02	4.90E-02	5.30E-02	4.82E-02	2.71E-02	5.91E-02
	RAO	9.89E-02	6.86E-02	3.13E-02	5.47E-02	5.81E-02	5.42E-02	3.05E-02	6.85E-02
Diferença %		17.72%	16.75%	12.86%	11.59%	9.55%	12.40%	12.30%	15.81%
CR	JS	1.33E-10	9.58E-11	4.45E-11	7.76E-11	8.55E-11	7.65E-11	4.38E-11	9.64E-11
	RAO	1.04E-10	9.04E-11	8.73E-11	9.03E-11	8.14E-11	8.85E-11	9.11E-11	9.03E-11
Diferença %		22.03%	5.68%	96.29%	16.38%	4.84%	15.75%	108.02%	6.27%
VME	JS	1.83E+06	1.13E+06	4.37E+05	8.94E+05	1.00E+06	8.75E+05	4.26E+05	1.13E+06
	RAO	1.72E+06	1.09E+06	4.68E+05	8.82E+05	9.55E+05	8.61E+05	4.63E+05	1.10E+06
Diferença %		6.07%	2.83%	7.13%	1.38%	4.51%	1.56%	8.80%	2.83%
HOE	JS	1.94E+02	1.54E+02	7.48E+01	1.12E+02	9.56E+01	1.11E+02	7.45E+01	1.55E+02
	RAO	2.12E+02	1.67E+02	8.10E+01	1.21E+02	1.04E+02	1.21E+02	8.05E+01	1.67E+02
Diferença %		9.17%	8.50%	8.25%	8.40%	8.45%	8.53%	8.11%	8.22%
AXI	JS	2.74E+06	1.68E+06	6.48E+05	1.32E+06	1.50E+06	1.30E+06	6.32E+05	1.69E+06
	RAO	2.57E+06	1.63E+06	6.84E+05	1.32E+06	1.47E+06	1.29E+06	6.72E+05	1.64E+06
Diferença %		6.04%	2.99%	5.63%	0.25%	2.08%	0.19%	6.25%	3.05%
BNE	JS	6.91E+04	4.97E+04	2.31E+04	4.03E+04	4.44E+04	3.97E+04	2.27E+04	5.00E+04
	RAO	5.39E+04	4.69E+04	4.53E+04	4.69E+04	4.22E+04	4.60E+04	4.73E+04	4.69E+04
Diferença %		22.03%	5.68%	96.29%	16.38%	4.86%	15.76%	108.04%	6.26%
RDE	JS	1.24E+01	9.49E+00	5.31E+00	7.67E+00	7.28E+00	7.64E+00	5.13E+00	9.35E+00
	RAO	1.41E+01	1.07E+01	5.86E+00	8.47E+00	7.98E+00	8.46E+00	5.68E+00	1.05E+01
Diferença %		13.42%	12.71%	10.38%	10.38%	9.56%	10.72%	10.61%	12.39%
DTE	JS	6.47E-11	3.99E-11	1.56E-11	3.18E-11	3.55E-11	3.11E-11	1.52E-11	4.02E-11
	RAO	6.11E-11	3.90E-11	1.67E-11	3.15E-11	3.38E-11	3.07E-11	1.65E-11	3.93E-11
Diferença %		5.54%	2.30%	7.12%	1.15%	4.74%	1.24%	9.12%	2.36%
DAX	JS	6.37E-11	3.92E-11	1.51E-11	3.08E-11	3.49E-11	3.02E-11	1.47E-11	3.95E-11
	RAO	5.99E-11	3.81E-11	1.60E-11	3.07E-11	3.41E-11	3.02E-11	1.57E-11	3.83E-11
Diferença %		5.99%	2.86%	6.00%	0.29%	2.25%	0.22%	6.32%	3.02%
DME	JS	1.68E-12	1.21E-12	5.53E-13	9.67E-13	1.07E-12	9.53E-13	5.44E-13	1.21E-12
	RAO	1.28E-12	1.11E-12	1.08E-12	1.11E-12	9.98E-13	1.09E-12	1.13E-12	1.11E-12
Diferença %		23.65%	7.53%	95.01%	14.65%	6.46%	14.03%	106.76%	8.05%

Curiosamente, a simetria parcial do modelo faz com que os momentos espectrais de alguns casos com incidências de carregamento diferentes registrem valores muito próximos, indicando respostas similares.

Isto é explicado pelo modo como cada carregamento age sobre o *riser*, impondo sobre ele uma configuração geométrica específica e modificando assim os fenômenos a que ele é submetido. Por exemplo, para os ângulos de incidência 0^0 e 180^0 o *riser* se

movimenta sobre o eixo da sua catenária, se comprimindo para 0^0 e se estendendo para 180^0 , dois estados que provocam respostas distintas na sua estrutura. Já para os ângulos 90^0 e 270^0 , o *riser* se movimenta na direção perpendicular ao eixo da catenária, assumido configurações simétricas entre si. Por este motivo, o módulo dos momentos espectrais varia consideravelmente para o par de ângulos 0^0 e 180^0 , mas tem valores muito próximos para os pares 90^0 e 270^0 , 45^0 e 315^0 , e 135^0 e 225^0 . As Figuras 4.48 a 4.50 ilustram este fenômeno.

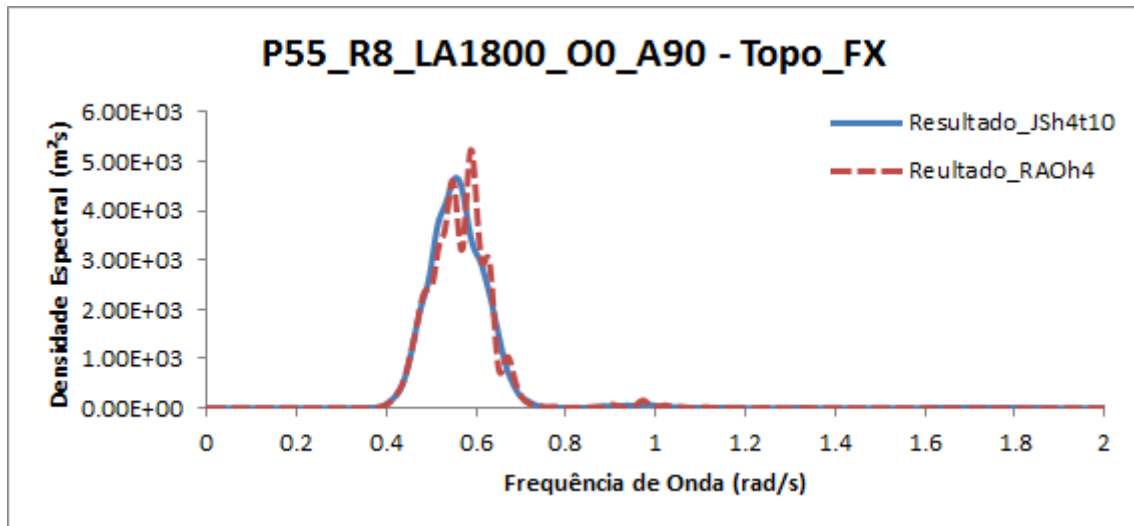


Figura 4.48 - Resposta de força axial para o riser com incidência A90 (topo/JSh4t10)

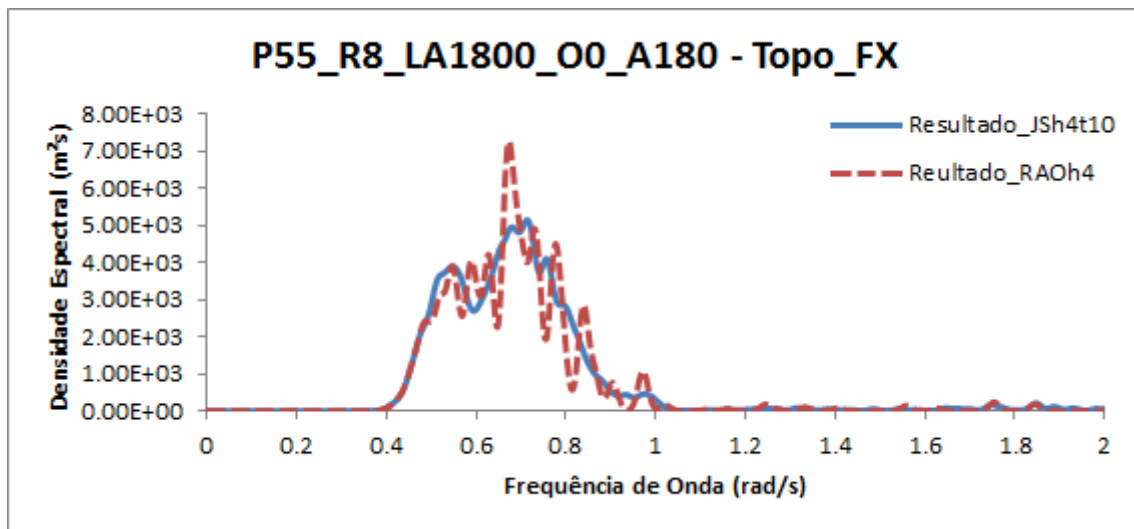


Figura 4.49 - Resposta de força axial para o riser com incidência A180 (topo/JSh4t10)

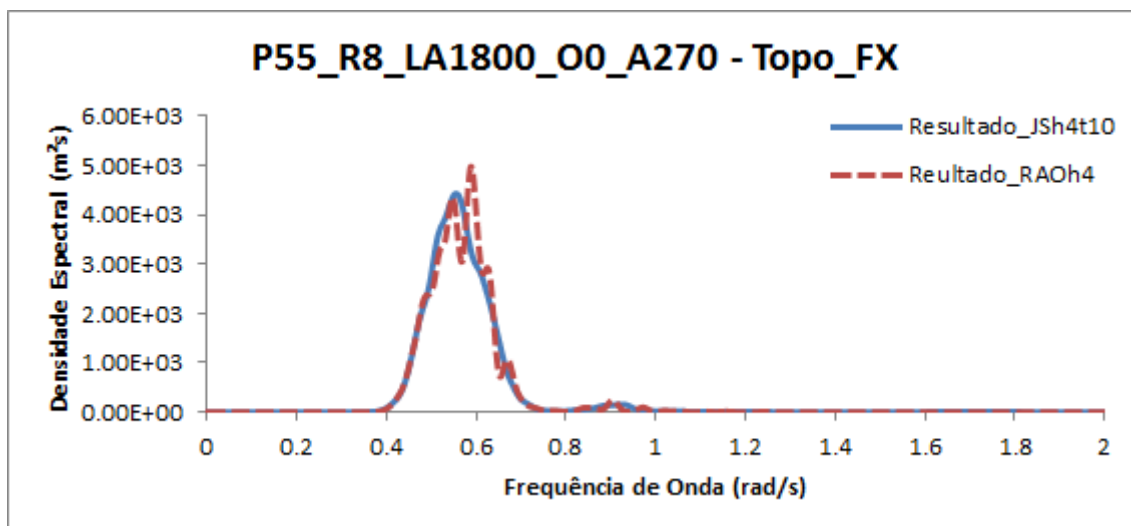


Figura 4.50 - Resposta de força axial para o riser com incidência A270 (topo/JSh4t10)

Mais uma vez os diferentes espectros mostram a capacidade do método do RAO de resposta de se adaptar às alterações provocadas por cada carregamento e fornecer estimativas com boa qualidade.

As diferenças entre os momentos espectrais mostram imprecisões da estimativa pelo método do RAO de resposta com valor médio de 2% na região de topo, variando entre 1% e 5%. Na região de fundo, o valor médio das imprecisões é de 7%, variando entre 1% e 18%. O maior erro foi de 18% para momento fletor na região de fundo para o ângulo de incidência 0°, ainda menor que o maior erro encontrado na seção anterior.

Estes resultados são compatíveis com os da seção anterior, mostrando que o método do RAO de resposta é capaz de manter precisão e consistência frente a variações no ângulo de incidência dos carregamentos de ondas.

4.3. Duto submarino em balsa de lançamento (BGL-1)

Nesta seção será apresentado o estudo de caso de dutos submarinos durante a operação da sua instalação por meio de uma balsa de lançamento.

Diversos carregamentos ambientais serão aplicados sobre um modelo numérico representativo deste sistema e os esforços resultantes no duto serão calculados tanto por simulações desacopladas quanto pelo método do RAO de resposta. Os resultados obtidos por cada um serão então comparados para possibilitar a avaliação da precisão e consistência do método do RAO de resposta.

4.3.1. Modelo numérico

A BGL-1 é uma balsa utilizada pela PETROBRAS para operações de instalação de *pipelines*. Projetada para lançamentos do tipo *S-Lay*, ela foi construída em 1977 no Japão e recentemente passou por obras de modernização, como a adoção de um sistema de posicionamento dinâmico. Atuando principalmente na bacia de Campos, a BGL-1 já realizou instalações de dutos com até 40 polegadas de diâmetro em lâminas d'água de até 1500 metros. Ela é apresentada na Figura 4.51.



Figura 4.51 - Balsa de lançamento de dutos BGL-1 [32]

O modelo numérico representa a balsa pelo seu RAO de movimento, além da geometria da rampa de lançamento e do *stinger*, ambos compostos por conjuntos de roletes sobre os quais o duto se assenta durante a operação de instalação.

A partir da máquina de tração, a rampa é composta por seis conjuntos de roletes. Os primeiros dois conjuntos contêm doze roletes em cada uma de três camadas, duas inferiores em formato “V” que apoiam o duto e uma superior que impede que o duto escape da rampa devido a movimentações bruscas da balsa. Os outros quatro conjuntos têm somente as duas camadas inferiores, cada uma com cinco roletes. Continuando a partir da rampa, o *stinger* é composto por vinte e dois pares de roletes na mesma configuração em “V”, dispostos em um arco com raio de 150 metros.

O duto, que é representado por elementos finitos, tem as suas características apresentadas na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Características do duto ensaiado

Especificações do Duto			
Tipo	rígido	Diâmetro externo	12.75"
Forma	S-Lay	Diâmetro interno	11.5"
Comprimento total	1500 m	Coeficiente de Poisson	0.3
Azimute	0°	Módulo de elasticidade	20.7 GPa
Tensão de escoamento	414 MPa	Peso específico	78.8 kN/m ³

A lâmina d'água tem 100 metros e o leito marinho é plano e horizontal. Uma visualização do modelo é apresentada na Figura 4.52 na qual o posicionamento da balsa é tal que o eixo X coincide com a direção leste e o eixo Y com a direção norte.

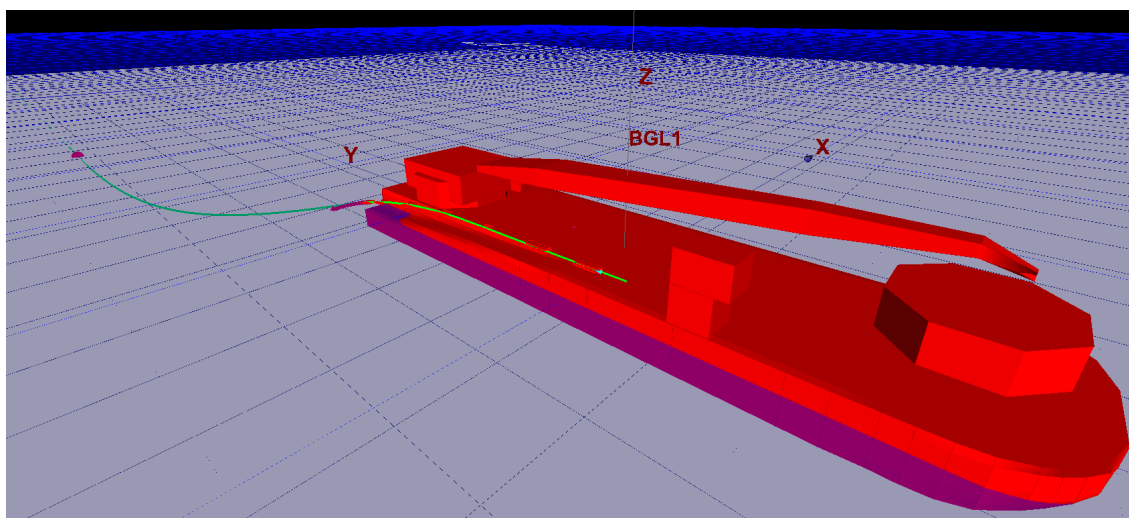


Figura 4.52 - Visualização do modelo numérico para estudo do duto

Operações de lançamento exigem a consideração de um parâmetro que não estava presente no caso do *riser*: a calibração do valor aplicado na máquina de tração para cada combinação de diâmetro de duto e lâmina d'água. Este parâmetro determina parcialmente a configuração geométrica do duto durante o lançamento, em especial a distância entre ele e o último rolete do *stinger*.

Ao deixar a balsa de lançamento, o duto assume uma curvatura acentuada que gera tensões elevadas. Mas como a curvatura do duto não pode ultrapassar a curvatura do *stinger* sobre o qual ele é apoiado, o controle da geometria do *stinger* garante que as tensões no duto, apesar de elevadas, nunca excedam o limite de resistência do material.

Em casos severos é possível que uma onda particularmente forte cause uma movimentação da balsa que leve o duto a se dobrar sobre o último rolete do *stinger*, adquirindo uma curvatura, e consequentemente tensão, maior do que a projetada. Assim, o afastamento entre o duto e o último rolete do *stinger* se torna um importante

parâmetro de controle na operação de lançamento, que é afetado diretamente pela máquina de tração. Quanto maior a tração na máquina, maior o afastamento e menores os riscos.

A prática da indústria dita que o valor da tração seja fixado de modo a manter um afastamento entre o duto e o último rolete do *stinger*, na condição estática, de cerca de 10% da movimentação vertical deste mesmo rolete quando em condição dinâmica de operação. Enquanto trações ainda maiores poderiam aumentar a margem de segurança, elas também teriam um impacto negativo ao elevar as tensões no duto. Deste modo, a tração adotada é a mínima necessária para garantir este afastamento. A variação da cota do último rolete do *stinger* é apresentada na Figura 4.53.

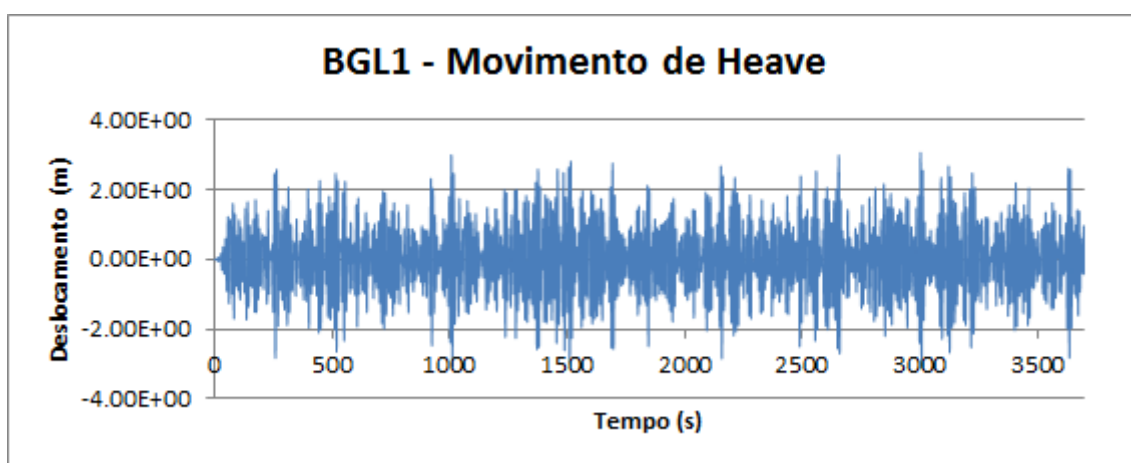


Figura 4.53 - Movimentação vertical da balsa BGL-1

A amplitude máxima esperada é de aproximadamente 6,17 metros, o que faz necessária uma distância mínima de 0,62 metros entre o duto e o último rolete. Testando diversos valores para a máquina de tração é possível encontrar o que mais se aproxima deste alvo, conforme apresentado na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Afastamento entre duto e stinger para diferentes trações

Lançamento de pipeline	
Tração na máquina (kN)	Distância duto - rolete (m)
500	0.08
600	0.23
700	0.42
800	0.60
850	0.70
900	0.80
1000	1.00

O valor de 850 kN representa a menor tração necessária para garantir um afastamento seguro entre o duto e o rolete. As Figuras 4.54 a 4.56 mostram o impacto desta tração no duto ao longo do seu comprimento. Nelas, a linha marcada como “*stinger*” representa a posição do último rolete.

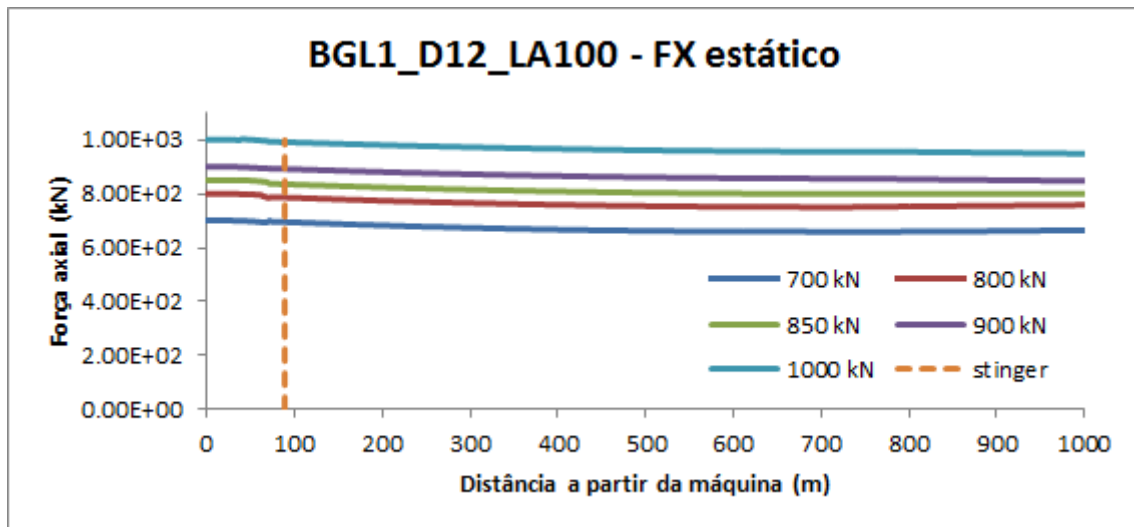


Figura 4.54 - Força axial estática ao longo do duto

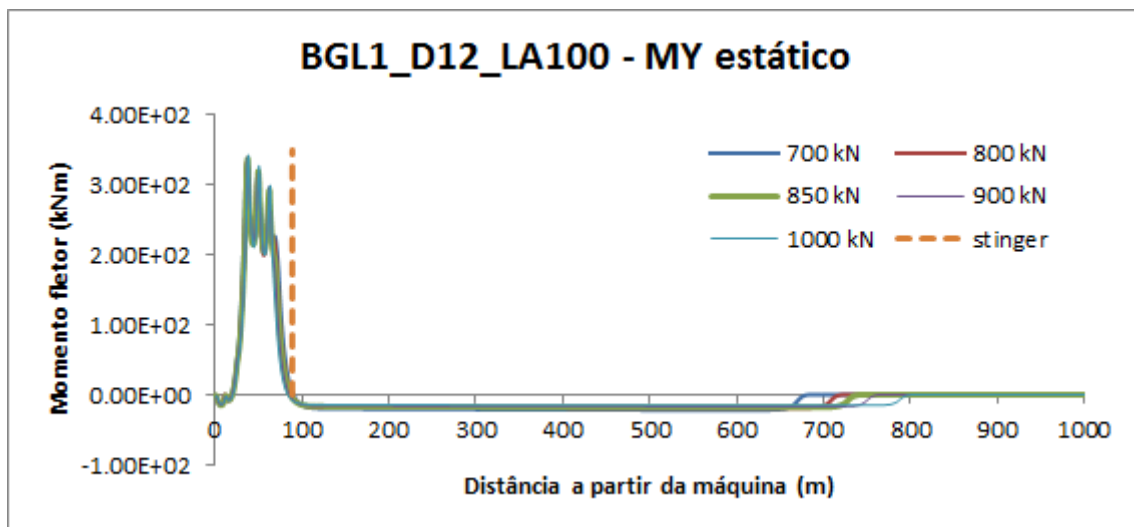


Figura 4.55 – Momento fletor estático ao longo do duto

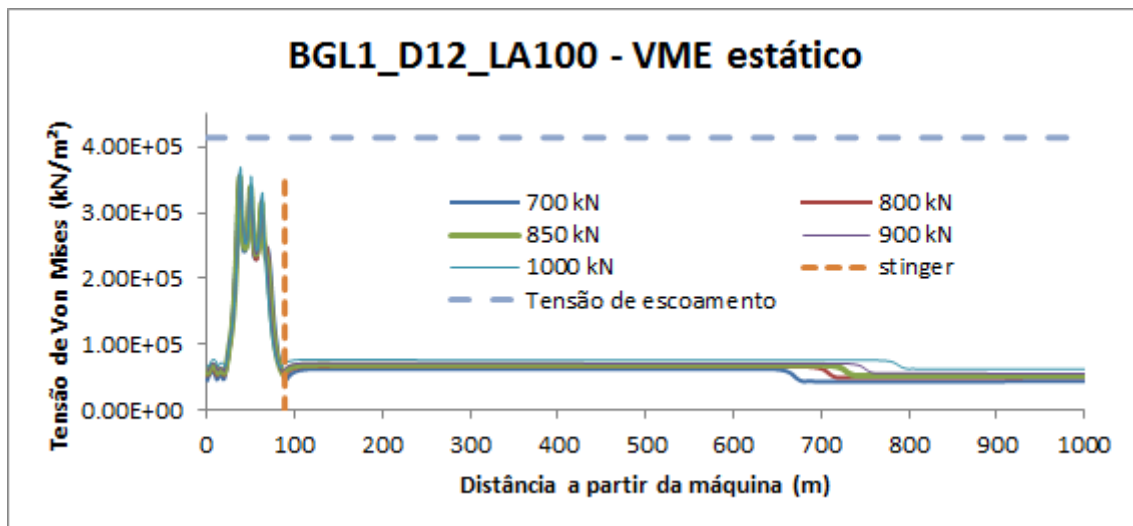


Figura 4.56 – Tensão de Von Mises estática ao longo do duto

O gráfico da tensão de Von Mises comprova que o duto está submetido a grandes esforços na rampa de lançamento e no *stinger*, atingindo valores muito próximos à tensão de escoamento do material em alguns pontos, o que reforça a importância de se manter sua geometria, e consequentemente tensão, controlada. Tensão de Von Mises e força axial também mostram que um aumento na força aplicada pela máquina de tração eleva os esforços ao longo de todo o comprimento do duto, reforçando a importância de manter este parâmetro minimizado.

Já o momento fletor mostra os locais em que a curvatura do duto se altera. A mudança de sinal na saída do *stinger* indica o ponto de inflexão do lançamento *S-Lay* e o trecho com momento nulo indica o segmento do duto que está apoiado sobre o leito marinho. Isto também permite avaliar o impacto da máquina de tração na forma que o duto assume no lançamento, com o TDP se afastando da balsa para trações maiores e o duto assumindo uma disposição mais horizontal.

Com a definição da força aplicada pela máquina de tração o modelo numérico fica completo. A partir disto se replica o procedimento utilizado no modelo do *riser* para definição dos pontos da malha do duto que serão monitorados neste estudo, dispensando sua reapresentação nesta seção. Neste estudo serão monitoradas as regiões de *overbend* e *sagbend* do duto, análogas às regiões de topo e de fundo do *riser*.

4.3.2. Criação dos RAOs de resposta

Nesta seção será apresentado o procedimento de criação dos RAOs de resposta para o duto na balsa BGL-1 a partir de diferentes carregamentos de ondas, seguido da comparação entre os RAOs obtidos.

Como a operação de lançamento ocorre em uma lâmia d'água menor do que a utilizada para a plataforma P-55, é necessário ajustar os carregamentos empregados para melhor refletir as condições deste novo caso. Os carregamentos de JONSWAP e ruído branco com altura significativa de ondas de 7 metros “h7” serão desconsiderados e em seu lugar serão incluídas ondas com altura significativa de 1 metro “h1”.

Outra particularidade do caso de lançamento é a possibilidade de atuação da máquina de tração em dois estados distintos, que alteram significativamente o comportamento do duto. Durante a operação, a máquina é calibrada para aplicar uma força axial de valor específico ao duto, o que ela pode executar através dos estados ativado ou desativado. No estado ativado, a máquina se ajusta em tempo real para compensar a força das ondas e a movimentação da balsa, minimizando a variação dinâmica das forças axiais no duto e mantendo constante a tração definida inicialmente. Já no estado desativado, não há esta compensação e as forças externas geradas pelo carregamento se somam à tração aplicada pela máquina, o que permite a variação dinâmica das forças axiais no duto.

Em condições normais de uma operação de lançamento, a máquina opera no estado ativado, tendendo a ser utilizada desativada somente em situações de exceção. Devido à maior importância deste estado nas operações de lançamento, somado ao fato que o estado desativado é análogo ao *riser* do estudo anterior e não traria informações novas, somente os RAOs de resposta referentes à máquina com estado ativado serão apresentados.

A resposta do duto aos carregamentos de ruído branco é normalizada pelo valor dos ruídos para gerar os RAOs de resposta que são apresentados nas Figuras 4.57 a 4.67. Cada uma traz simultaneamente os RAOs obtidos a partir dos três ruídos brancos para possibilitar a comparação entre eles e a avaliação da sua proximidade, tanto para região de *overbend* quanto de *sagbend*, com cada região representada em um eixo distinto. O eixo da esquerda é referente à região de *overbend*, representada pelas linhas

escuras e o eixo da direita é referente à região de *sagbend*, representada pelas linhas claras. As áreas dos RAOs são apresentadas na Tabela 4.13.

Os títulos dos gráficos refletem as variáveis do caso: “BGL1” indica que a unidade flutuante é a plataforma BGL-1, “D12” indica que o duto rígido tem diâmetro de 12,75 polegadas, “LA100” indica que a profundidade da lâmina d’água é 100 metros, “M850” indica que a tração na máquina é 850kN, sendo que “Ma” indica o estado ativado da máquina e “Md” indica o estado desativado, e “A0” indica que o ângulo de incidência do carregamento sobre a unidade flutuante é o azimuth zero.

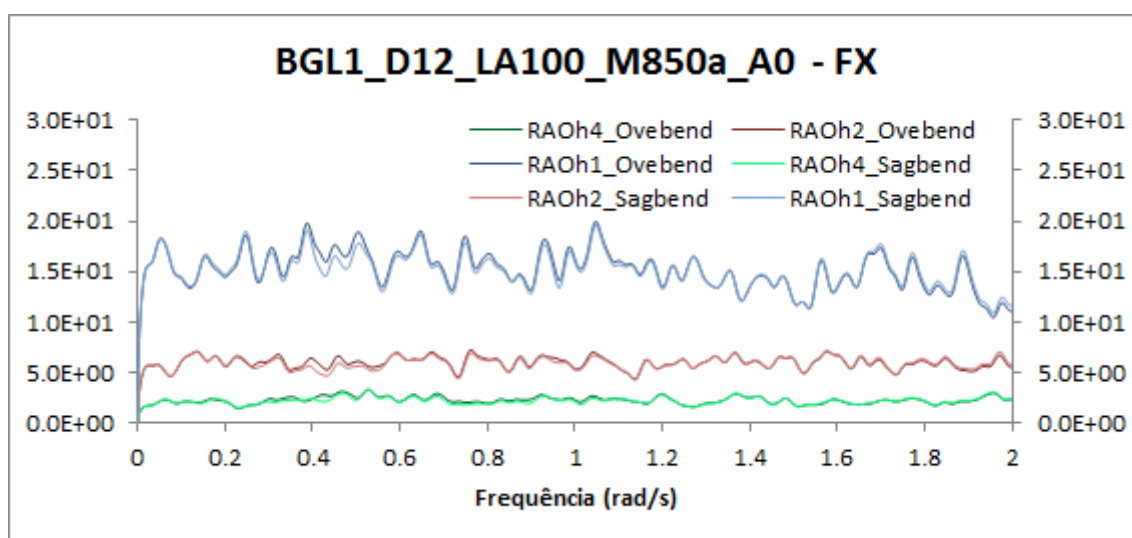


Figura 4.57 - RAO de força axial para o duto

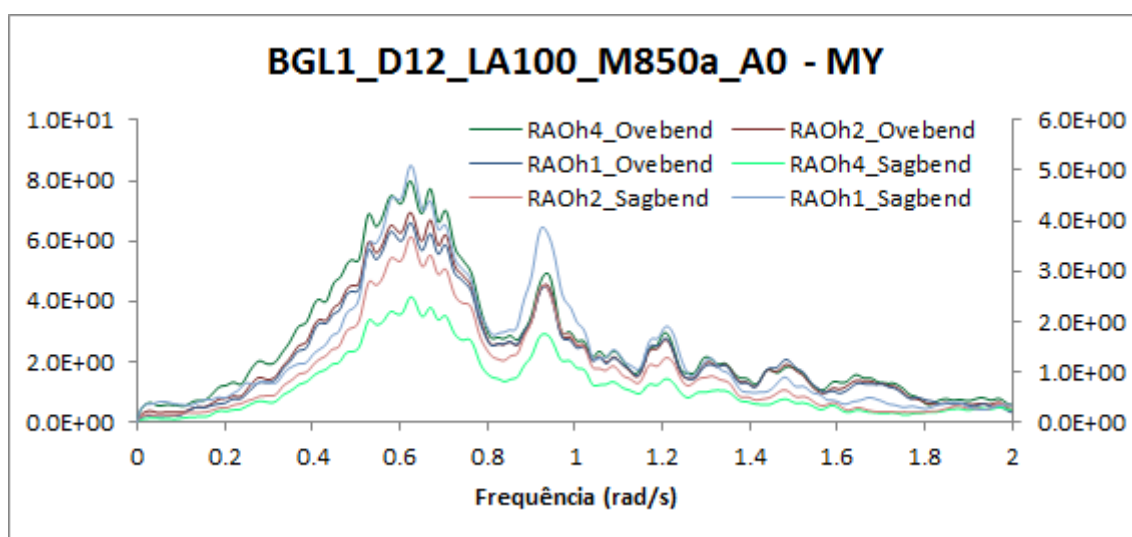


Figura 4.58 - RAO de momento fletor para o duto

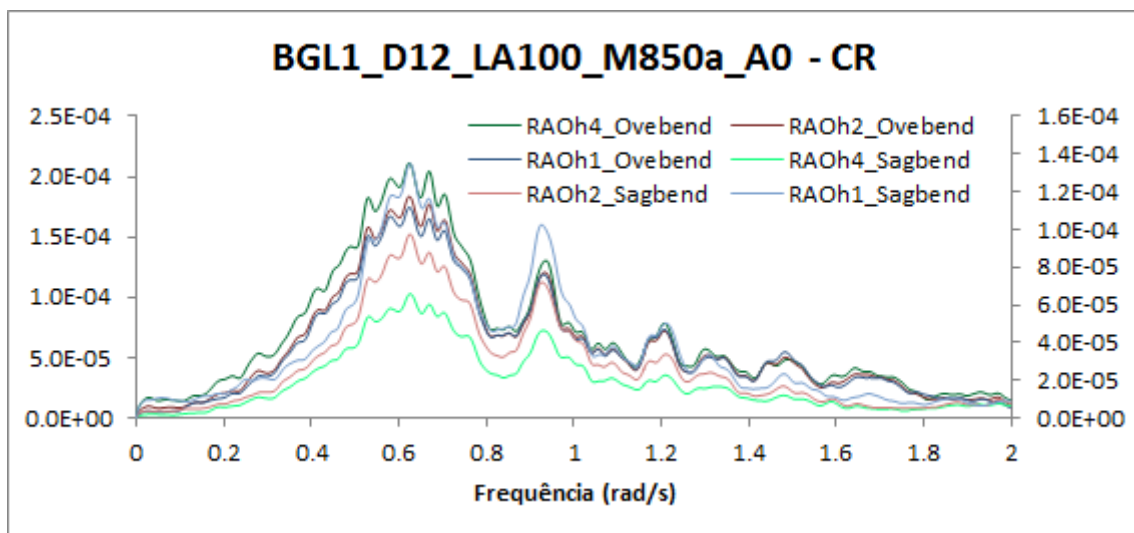


Figura 4.59 - RAO de curvatura para o duto

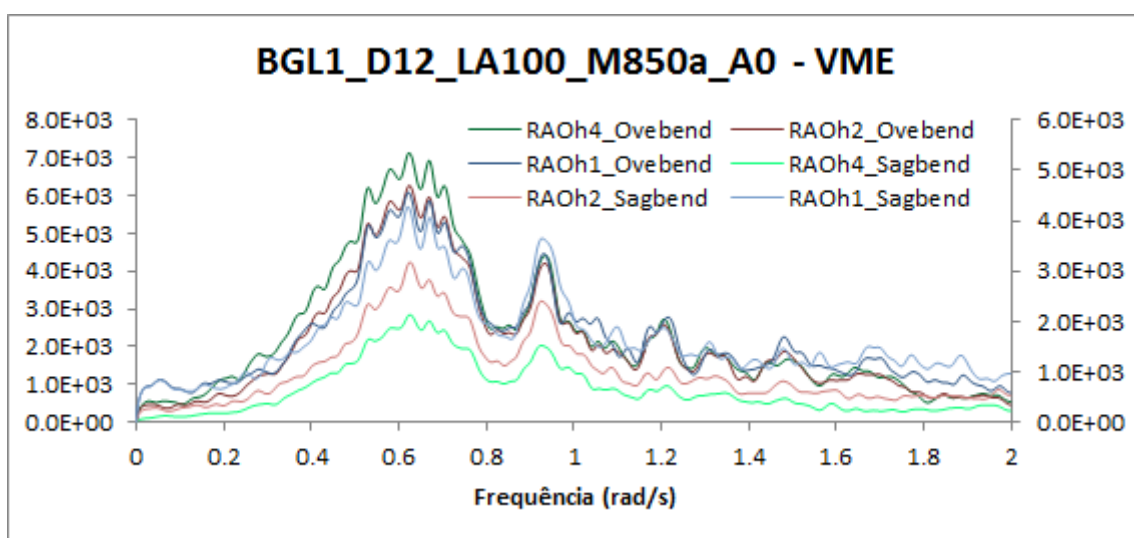


Figura 4.60 - RAO de tensão de Von Mises para o duto

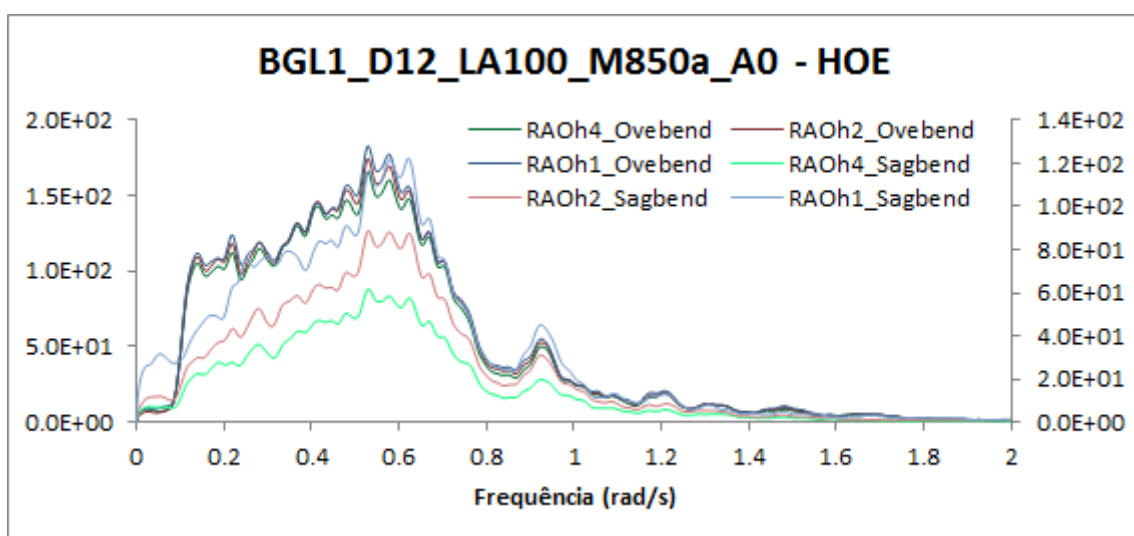


Figura 4.61 - RAO de tensão circunferencial para o duto

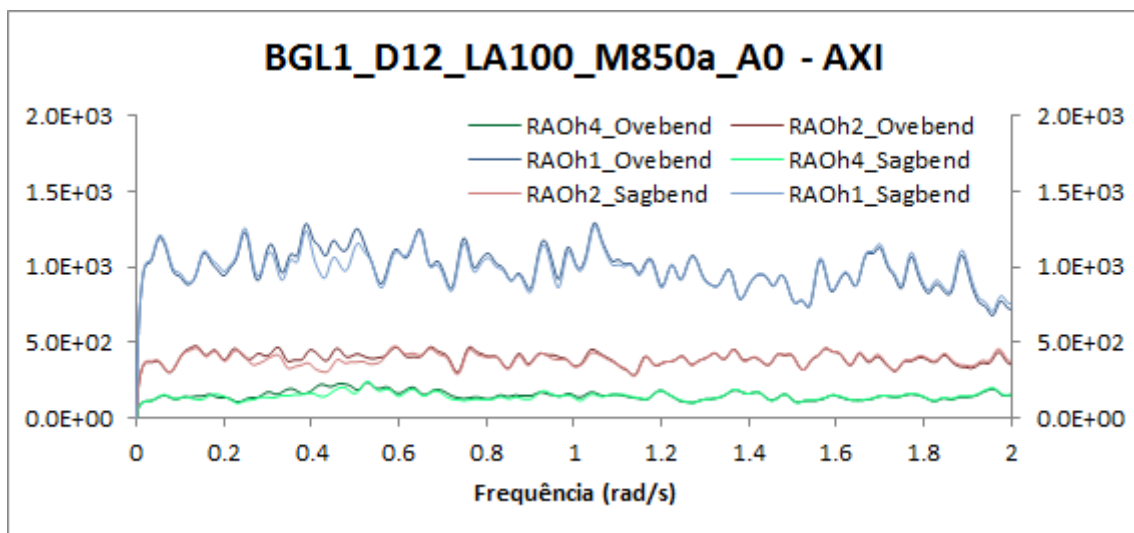


Figura 4.62 - RAO de tensão longitudinal axial para o duto

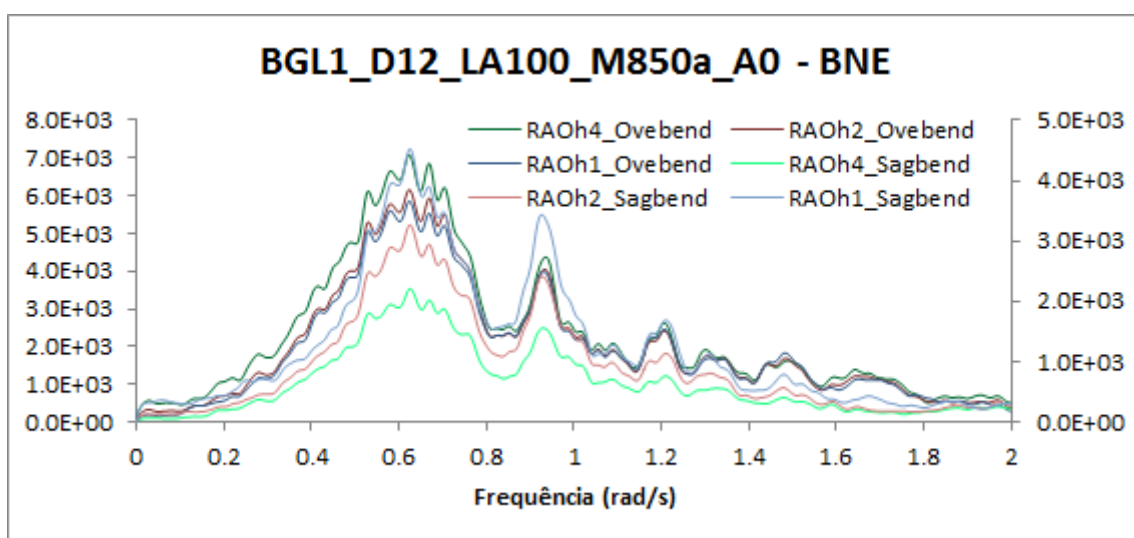


Figura 4.63 - RAO de tensão longitudinal de momento para o duto

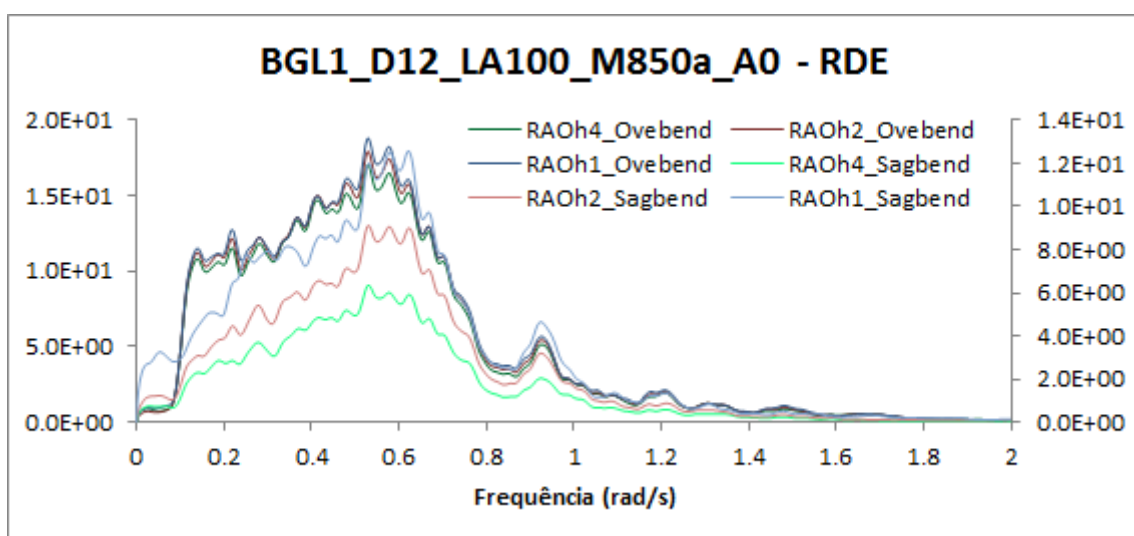


Figura 4.64 - RAO de tensão radial para o duto

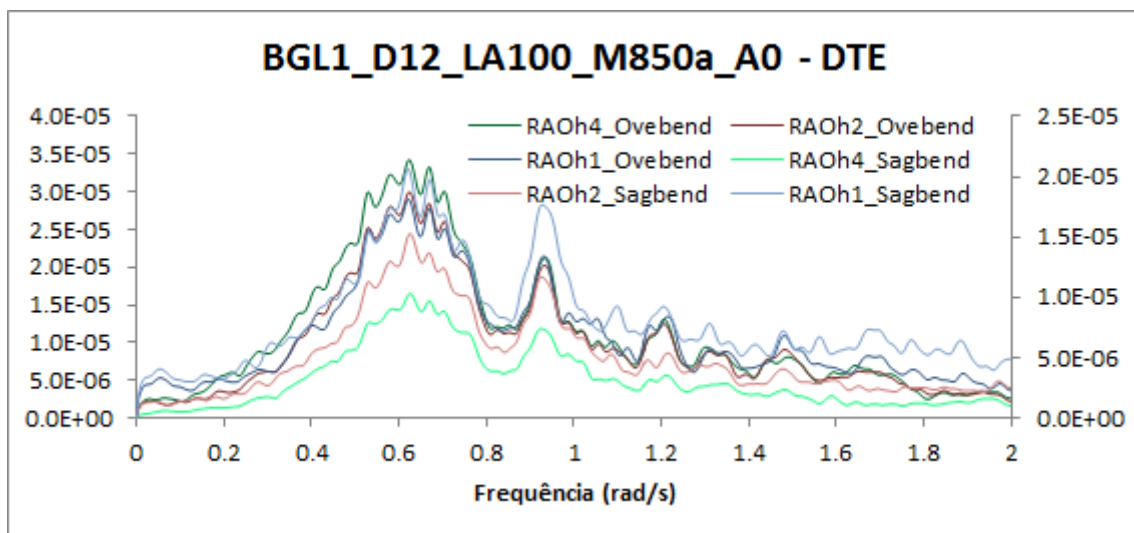


Figura 4.65 - RAO de deformação total para o duto

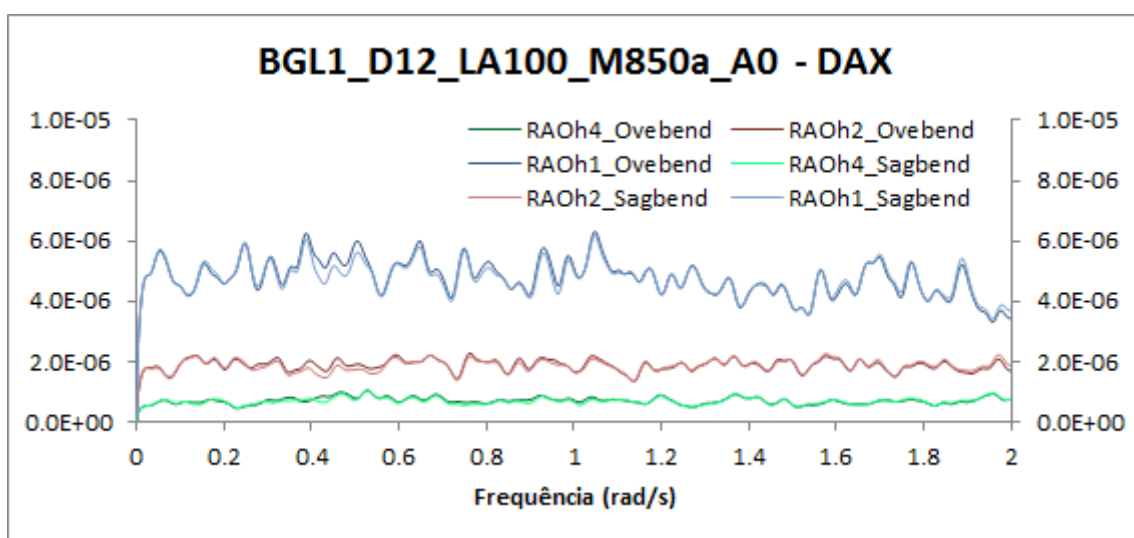


Figura 4.66 - RAO de deformação axial para o duto

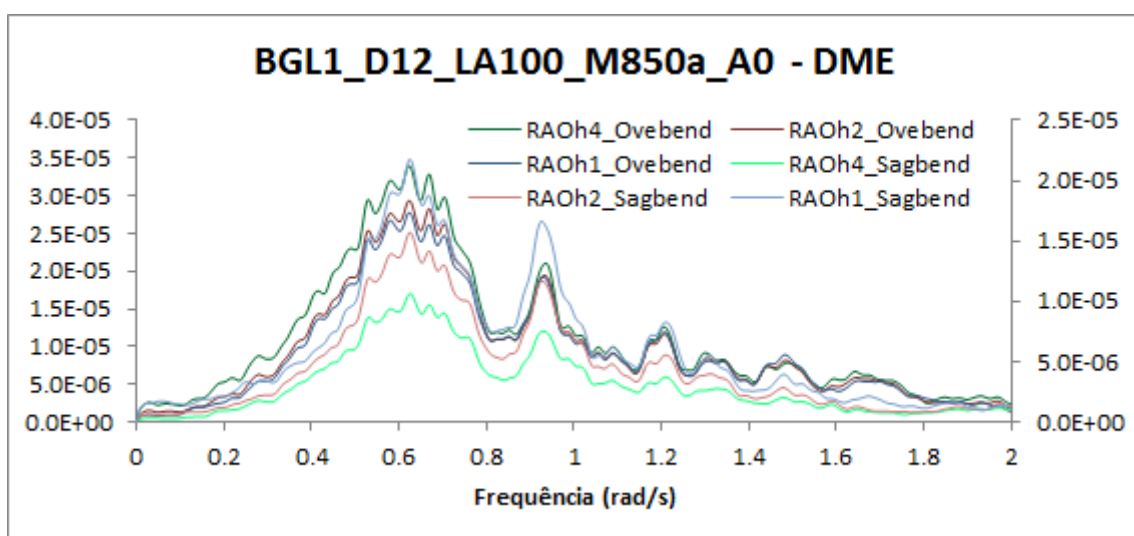


Figura 4.67 - RAO de deformação transversal para o duto

Tabela 4.13 - Áreas dos RAOs de resposta do duto

BGL1_D12_LA100_M850a_A0 - RAO de resposta						
Esforço	RAOh1_ Overbend	RAOh2_ Overbend	RAOh4_ Overbend	RAOh1_ Sagbend	RAOh2_ Sagbend	RAOh4_ Sagbend
FX	2.33E+01	9.14E+00	3.46E+00	2.29E+01	8.93E+00	3.32E+00
MY	4.03E+00	4.15E+00	4.70E+00	2.64E+00	1.97E+00	1.39E+00
CR	1.07E-04	1.10E-04	1.24E-04	6.99E-05	5.22E-05	3.67E-05
VME	3.93E+03	3.75E+03	4.23E+03	2.82E+03	1.83E+03	1.22E+03
HOE	1.01E+02	9.86E+01	9.48E+01	6.42E+01	4.64E+01	3.22E+01
AXI	1.52E+03	6.08E+02	2.35E+02	1.50E+03	5.87E+02	2.22E+02
BNE	3.58E+03	3.68E+03	4.17E+03	2.34E+03	1.75E+03	1.23E+03
RDE	1.04E+01	1.01E+01	9.75E+00	6.60E+00	4.77E+00	3.31E+00
DTE	1.88E-05	1.80E-05	2.04E-05	1.37E-05	8.88E-06	5.93E-06
DAX	7.34E-06	2.88E-06	1.09E-06	7.22E-06	2.82E-06	1.05E-06
DME	1.71E-05	1.76E-05	2.00E-05	1.13E-05	8.46E-06	5.95E-06

Os RAOs de resposta de praticamente todos os esforços apresentam uma grande separação entre si. Enquanto a maior diferença percentual entre áreas de RAOs no caso do *riser* foi de 18% para o momento fletor na região de topo, a maior diferença percentual no caso de lançamento de duto é de 99% para tensão circunferencial na região de *sagbend*. Isto indica que o comportamento do duto em lançamento é fortemente não linear, muito mais do que o do *riser* do estudo anterior, sugerindo que as estimativas obtidas pelo método do RAO de resposta para este caso terão qualidade inferior.

As exceções são os esforços de tensão circunferencial e tensão radial na região de *overbend*, para os quais os RAOs mostram uma forte proximidade, indicando um comportamento mais próximo do linear.

Outra mudança de comportamento com relação ao que foi observado no caso do *riser* diz respeito aos RAOs de resposta dos esforços de curvatura, tensão longitudinal de momento e deformação transversal, que foram calculados corretamente desta vez. Para explicar o que possibilitou esta mudança, a série temporal da resposta de curvatura do duto é apresentada na Figura 4.68.

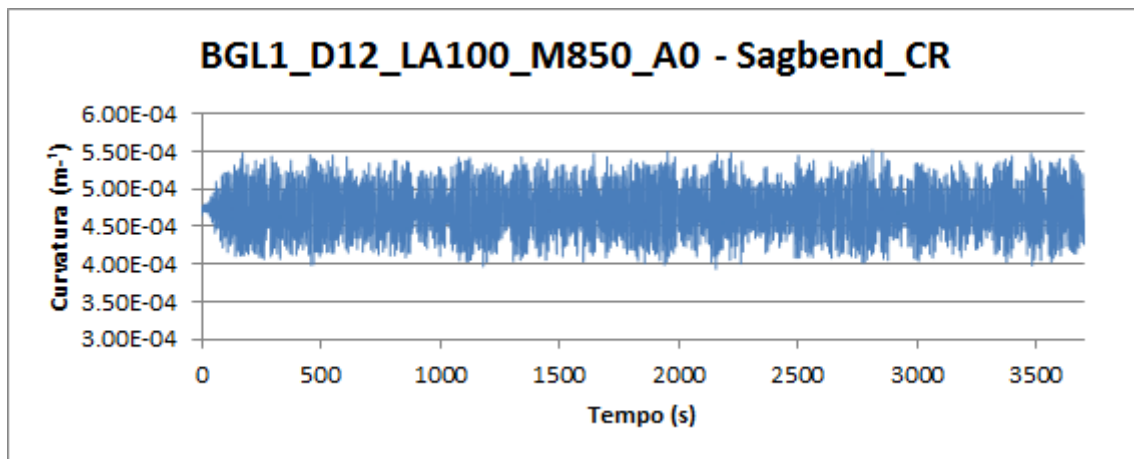


Figura 4.68 - Série temporal da resposta dinâmica de curvatura do duto

A série temporal mostra que o valor estático da curvatura no duto é muito maior do que o que foi verificado no caso do *riser*. Deste modo, quando em condição dinâmica, os valores da curvatura no duto oscilam em torno de uma média elevada, nunca assumindo valores negativos. Com isto, não há perda de informação apesar de os valores serem registrados em módulo, e a transformação da série temporal para o domínio da frequência mantém o significado físico.

Isto também indica que os esforços de curvatura, tensão longitudinal de momento e deformação transversal no caso do *riser* seriam estimados pelo RAO de resposta com a mesma qualidade registrada para os demais, casos os seus valores não fossem registrados pelos seus módulos.

Em contrapartida, os RAOs de resposta para força axial, tensão longitudinal axial e deformação axial mostram um comportamento marcadamente diferente dos demais: todos registram uma quantidade significativa de energia distribuída quase homogeneamente ao longo de todas as frequências.

Apesar da semelhança de forma entre os diferentes RAOs de resposta para um mesmo esforço, suas intensidades variam para cada carregamento de ruído branco usado na sua criação, com a maior intensidade correspondendo ao ruído branco com menos energia “RBh1”, seguida pelo ruído intermediário “RBh2” e finalmente pelo ruído com mais energia, o “RBh4”, o que parece contra intuitivo a princípio.

Isto é explicado, primeiramente, pela atuação da máquina ativada em impedir a variação dinâmica dos esforços axiais no duto, fazendo com que a resposta destes esforços a qualquer carregamento de ondas seja praticamente nula. Para demonstrar este

conceito, a resposta de força axial do duto referente aos carregamentos de ruído branco é apresentada na Figura 4.69.

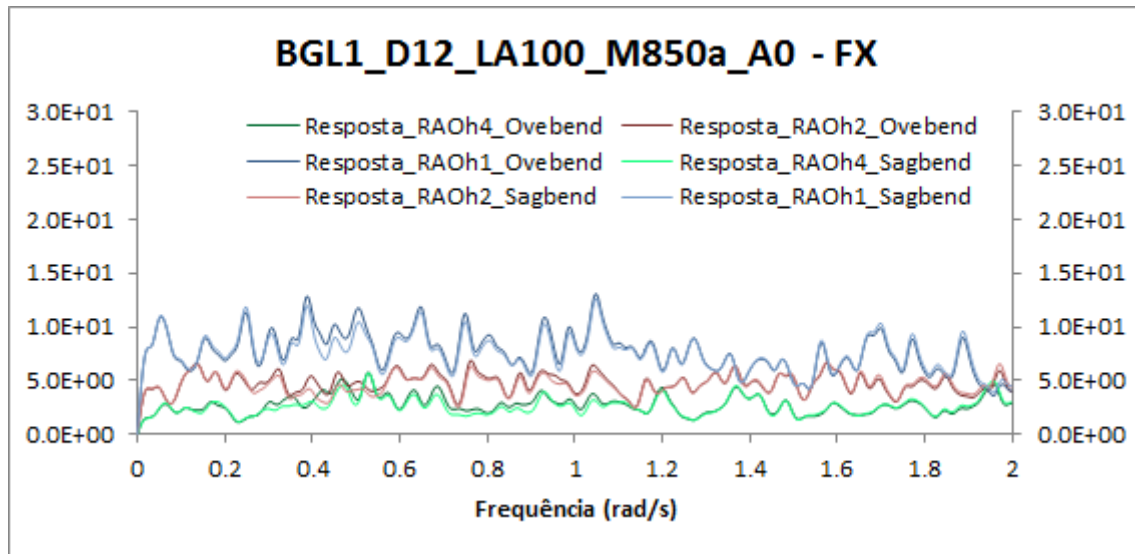


Figura 4.69 - Resposta de força axial para o duto (RBh2)

O resultado para os três casos é praticamente nulo e os valores registrados representam um resíduo numérico, cujo significado físico é a ausência de resposta para a força axial, o que explica o registro de energia na mesma proporção em todas as frequências.

Os RAOs de resposta da força axial são obtidos a partir da divisão destes resultados pelo valor do ruído que gerou cada um. Como os ruídos gerados a partir de espectros de onda com menor altura significativa têm menos energia, eles naturalmente geram resultados maiores nesta divisão, o que explica porque estes RAOs têm intensidades diferentes para cada ruído, apesar de a resposta do duto ser praticamente igual para todos.

Consequentemente, os RAOs de resposta obtidos para força axial, tensão longitudinal axial e deformação axial não podem ser utilizados na estimativa destes esforços no duto em lançamento quando a máquina de tração atuar no estado ativado. Mas isto não representa um problema porque a atuação da máquina garante que a resposta dinâmica destes esforços sempre será nula, de modo que eles não precisam ser estimados.

4.3.3. Carregamentos de ondas com intensidades diversificadas

Nesta seção será estudada a resposta do duto para casos de carregamentos de ondas com alturas significativas e períodos de pico diversificados atuando sobre o modelo da BGL-1.

Nove casos serão estudados, todos com o mesmo ângulo de incidência, que é o azimute 0° , e a máquina de tração atua sempre no estado ativado. Os resultados da região de *overbend* para um único carregamento, o “JSh2t10” são apresentados nas Figuras 4.70 a 4.80.

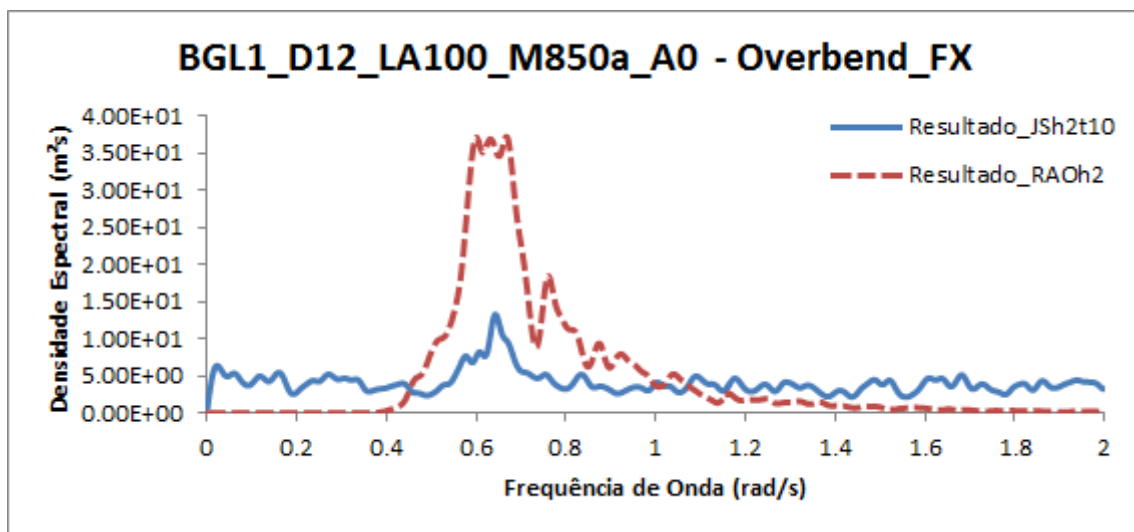


Figura 4.70 - Resposta de força axial para o duto (overbend/JSh2t10)

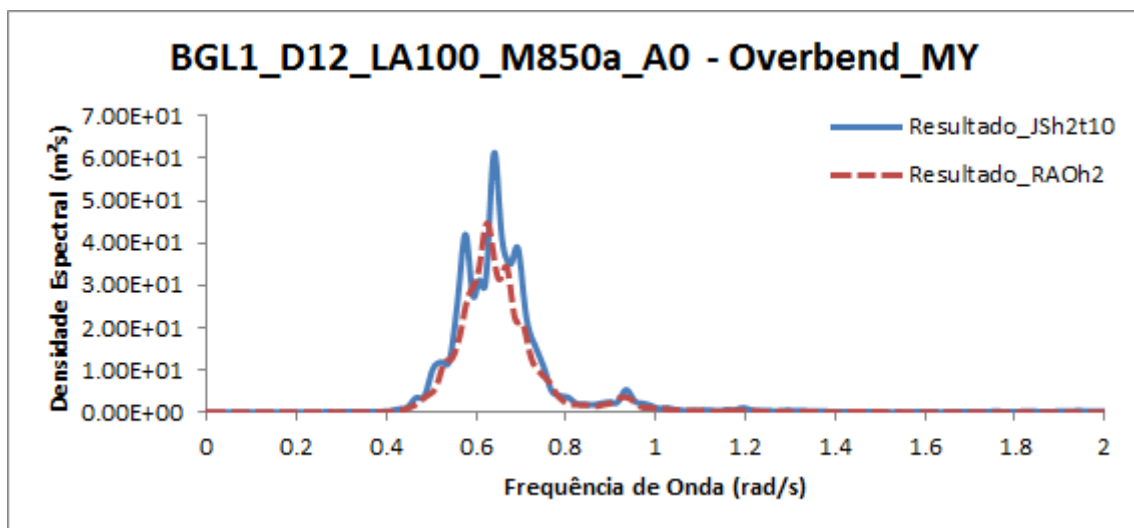


Figura 4.71 - Resposta de momento fletor para o duto (overbend/JSh2t10)

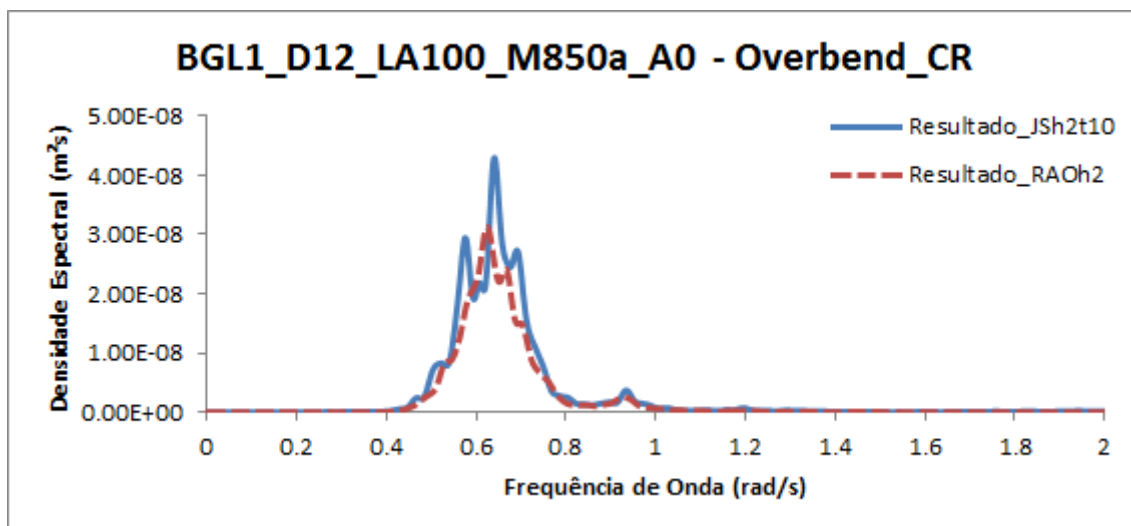


Figura 4.72 - Resposta de curvatura para o duto (overbend/JSh2t10)

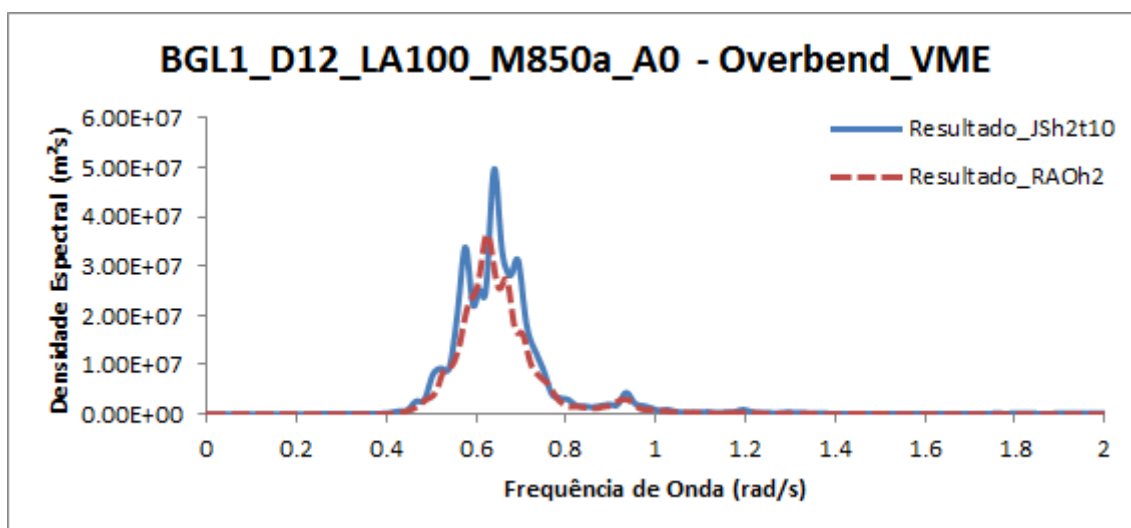


Figura 4.73 - Resposta de tensão de Von Mises para o duto (overbend/JSh2t10)

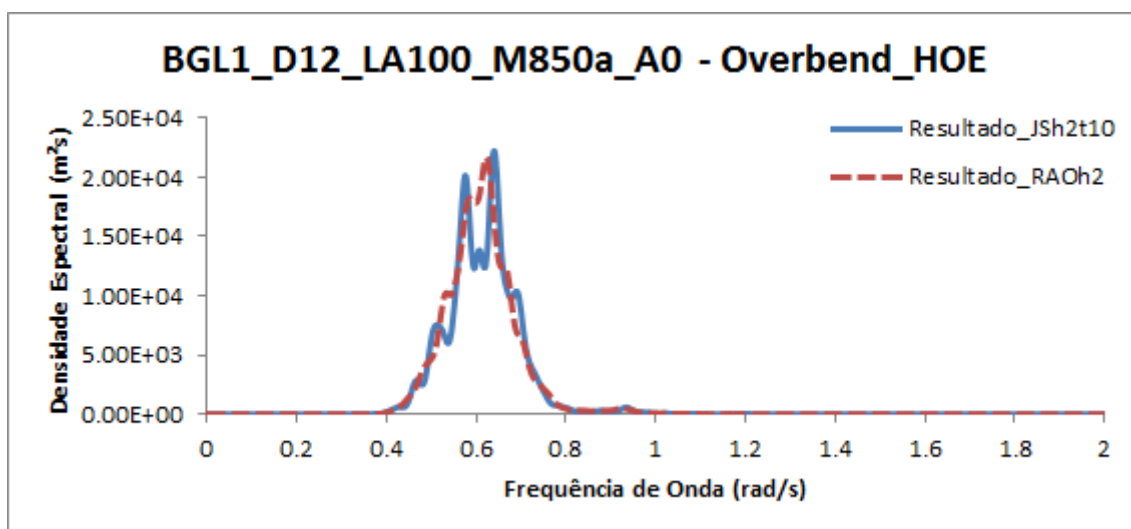


Figura 4.74 - Resposta de tensão circunferencial para o duto (overbend/JSh2t10)

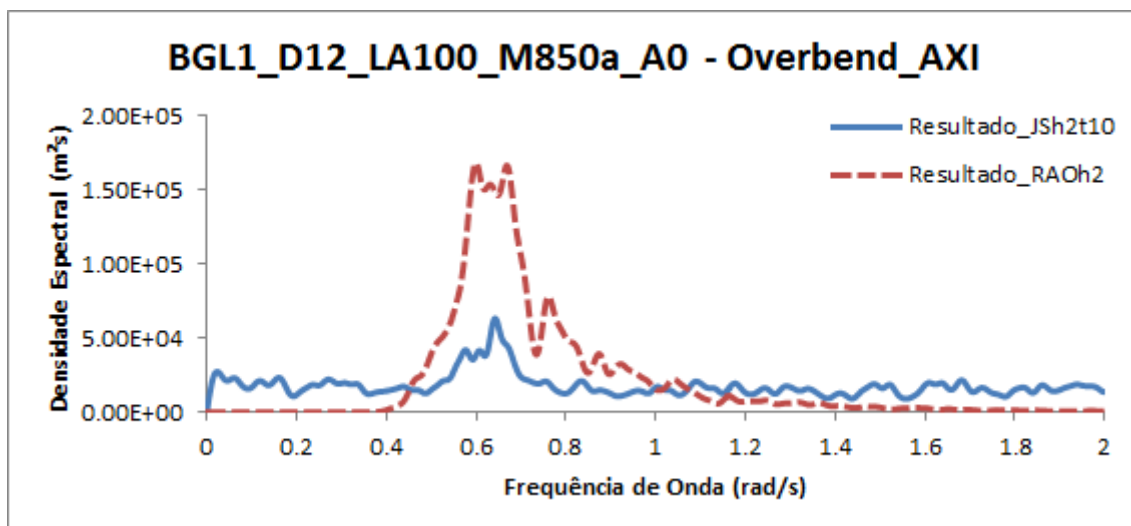


Figura 4.75 - Resposta de tensão longitudinal axial para o duto (overbend/JSh2t10)

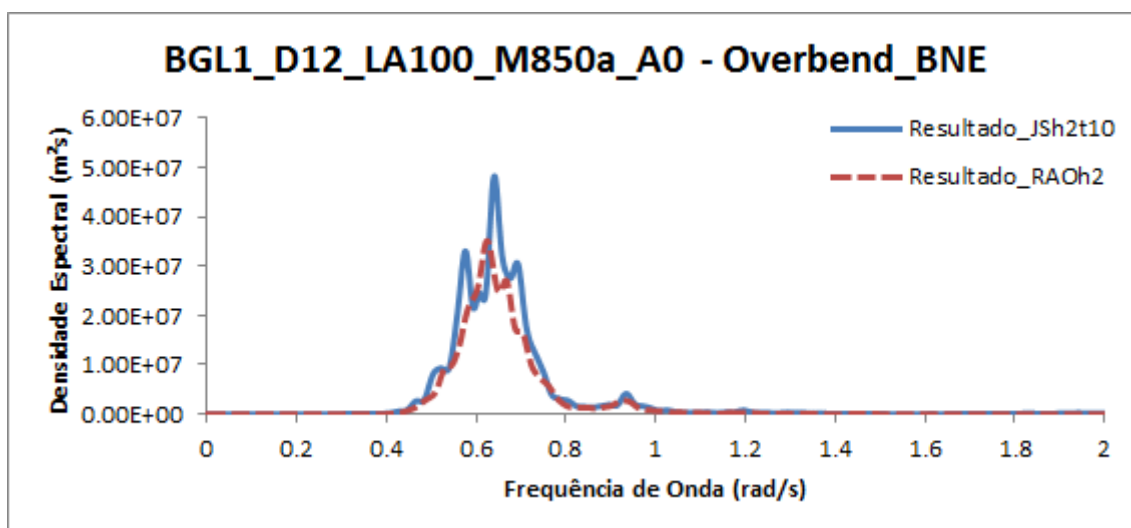


Figura 4.76 - Resposta de tensão longitudinal de momento para o duto (overbend/JSh2t10)

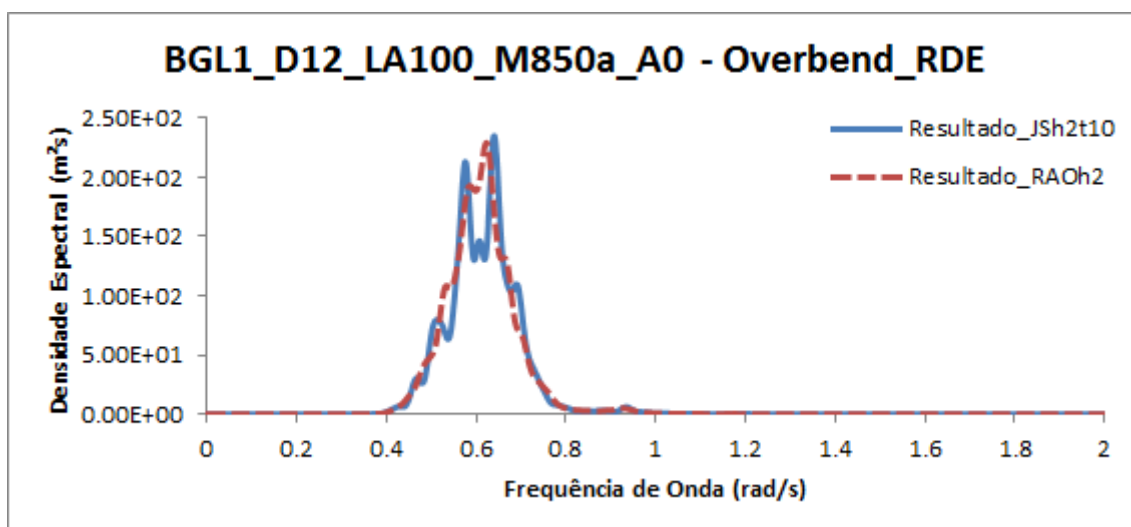


Figura 4.77 - Resposta de tensão radial para o duto (overbend/JSh2t10)

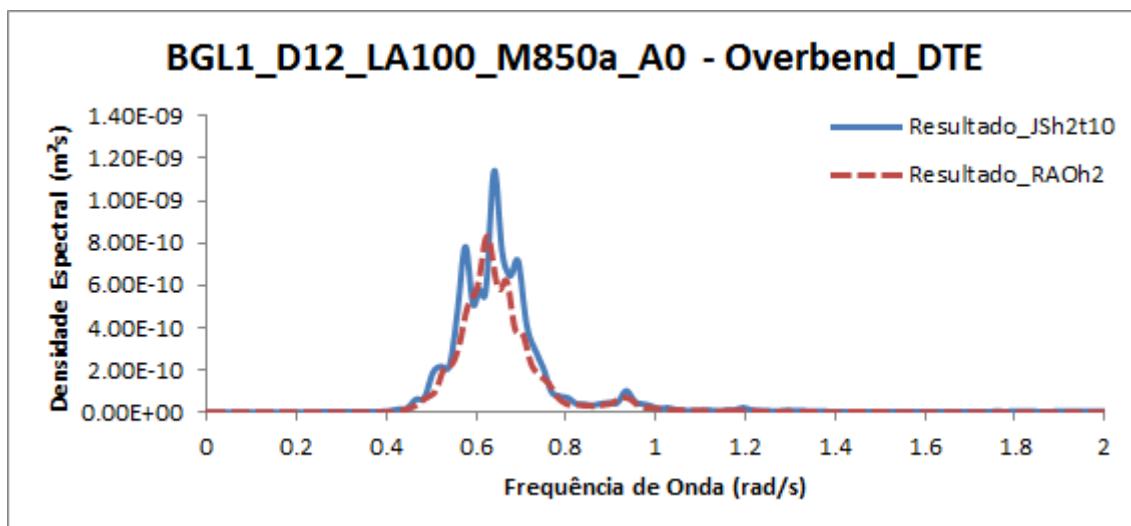


Figura 4.78 - Resposta de deformação total para o duto (overbend/JSh2t10)

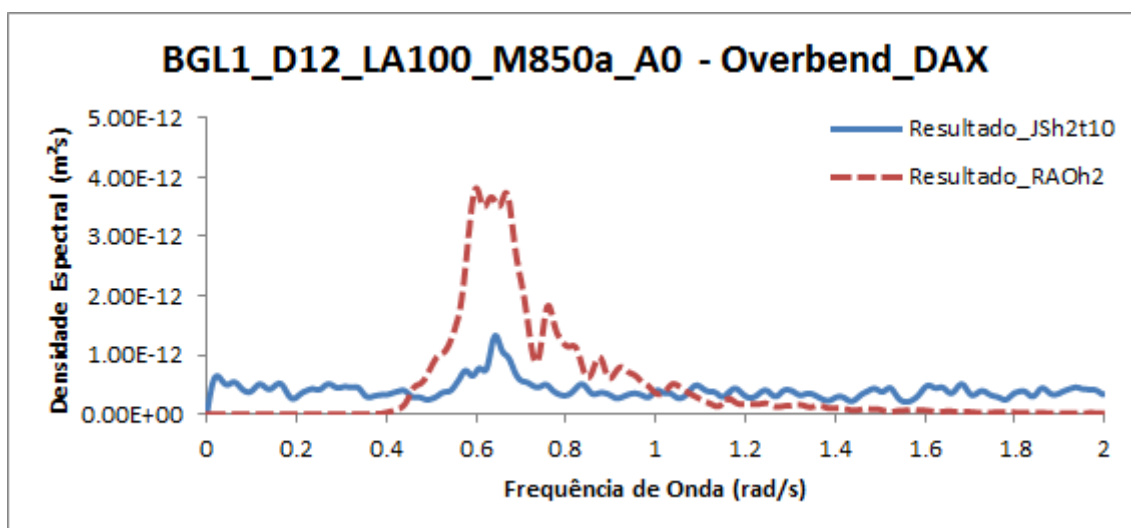


Figura 4.79 - Resposta de deformação axial para o duto (overbend/JSh2t10)

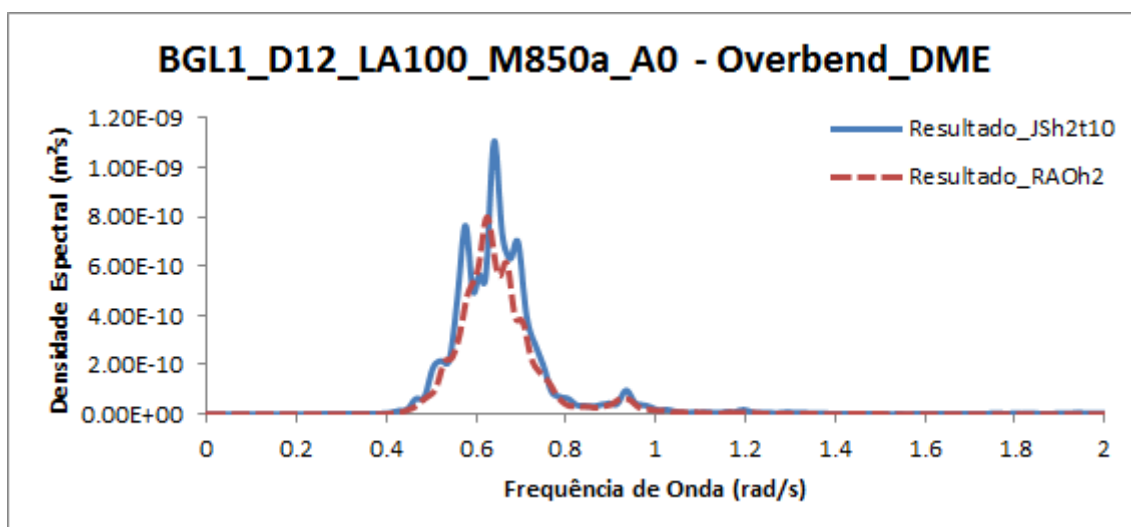


Figura 4.80 - Resposta de deformação transversal para o duto (overbend/JSh2t10)

Os resultados para os esforços na região de *sagbend* serão dispensados por apresentarem comportamentos similares aos da região de *overbend*.

A análise visual dos resultados mostra um descolamento entre os espectros de resposta obtidos por cada método. Enquanto os espectros apresentam boa equivalência de forma, com concentrações de energia nas mesmas frequências, eles aparentam divergir levemente nas suas áreas, ou seja, na quantidade de energia registrada. Isto indica que a qualidade da estimativa fornecida pelo método do RAO de resposta para o caso do duto é inferior à verificada no caso do *riser*, o que é explicado pelo comportamento fortemente não linear do duto.

Apesar disto, há uma semelhança entre os espectros obtidos por cada método, de modo que a estimativa dos RAO de resposta pode ser considerada próxima do resultado esperado. Adicionalmente, quando se considera que estas estimativas serão utilizadas em uma fase preliminar, e não avançada, de um projeto, é possível que a qualidade dos resultados seja satisfatória.

Os resultados dos esforços axiais para o carregamento JONSWAP, particularmente, registram o mesmo fenômeno verificado para os carregamentos de ruído branco, comprovando que não há sentido na aplicação do método do RAO de resposta para fornecer as suas estimativas em casos com máquina de tração ativada.

Os resultados para um mesmo esforço, momento fletor na região de *overbend*, obtidos para outros carregamentos são apresentados nas Figuras 4.81 a 4.84.

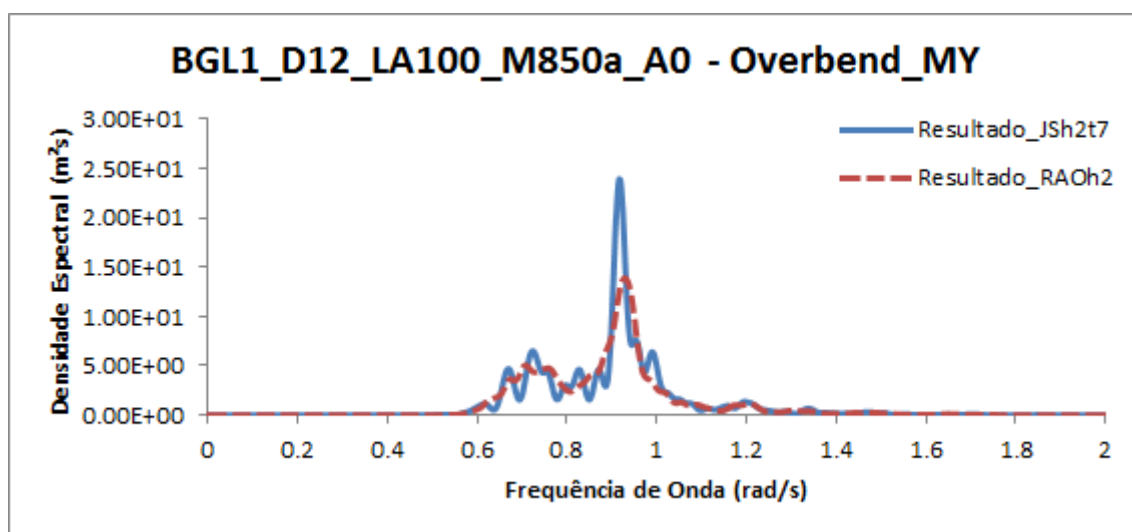


Figura 4.81 - Resposta de momento fletor para o duto (overbend/JSh2t7)

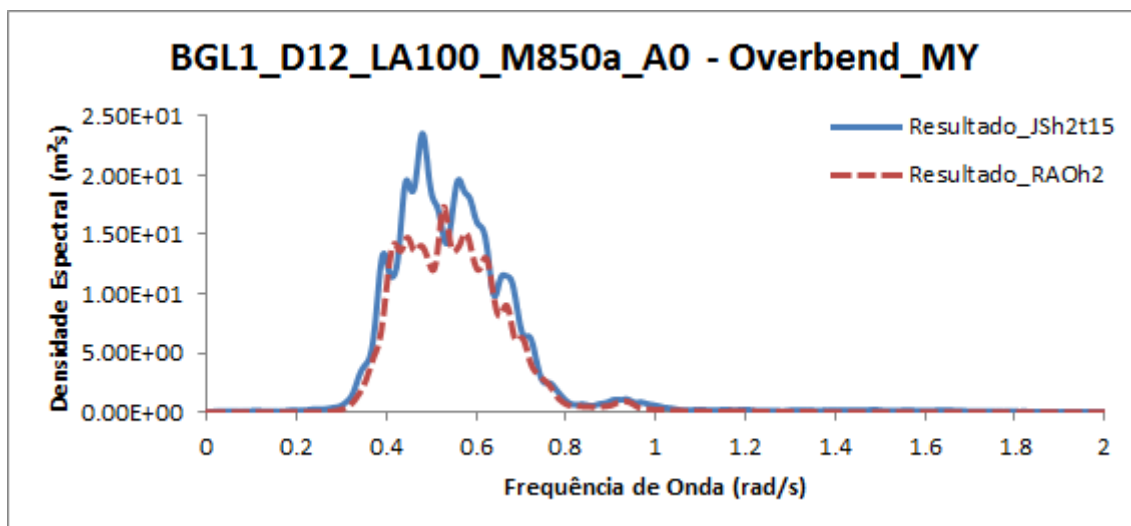


Figura 4.82 - Resposta de momento fletor para o duto (overbend/JSh2t15)

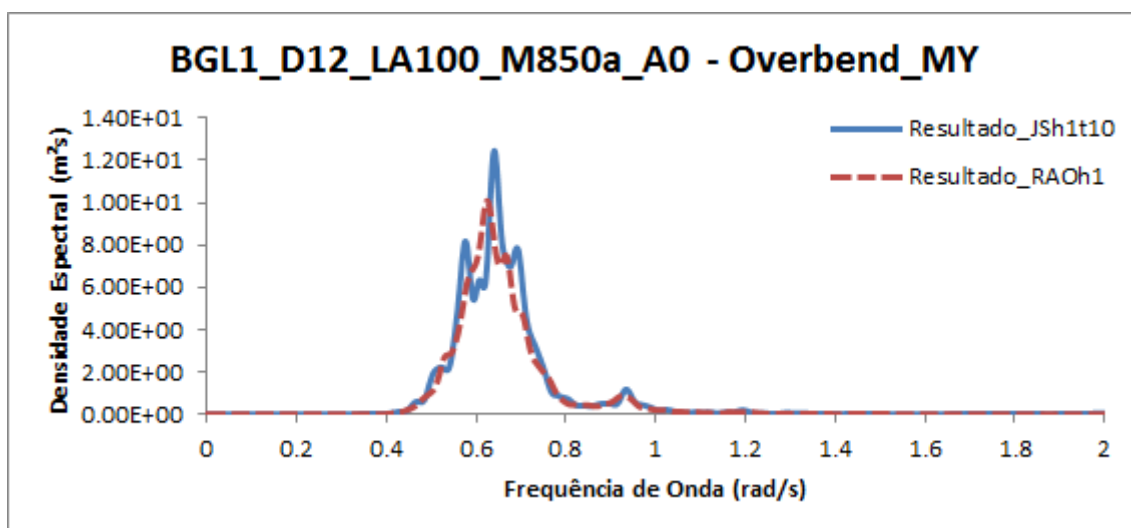


Figura 4.83 - Resposta de momento fletor para o duto (overbend/JSh1t10)

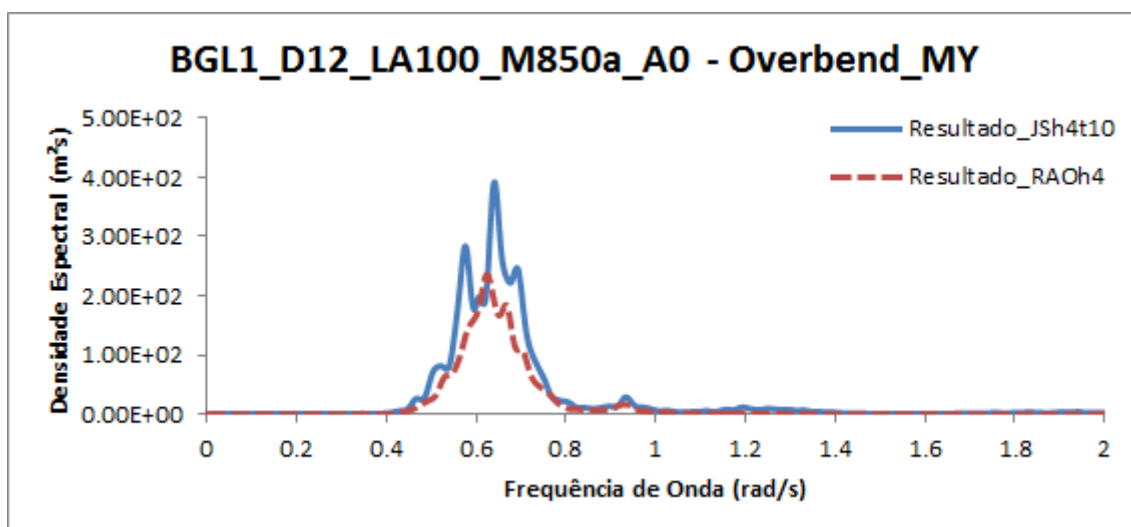


Figura 4.84 - Resposta de momento fletor para o duto (overbend/JSh4t10)

Em todos os casos se mantém a tendência de boa aproximação na forma dos espectros de resposta obtidos por cada método, mas uma diferença perceptível entre as suas áreas.

Os momentos espectrais de ordem zero das respostas do duto a todos os carregamentos são apresentados nas Tabelas 4.14 e 4.15.

Tabela 4.14 - Momentos espectrais da resposta do duto a vários carregamentos (overbend)

BGL1_D12_LA100_M850a_A0 - Overbend - M0										
Esforço	Resultado	h1t7	h1t10	h1t15	h2t7	h2t10	h2t15	h4t7	h4t10	h4t15
FX	JS	1.47E+01	1.49E+01	1.23E+01	9.17E+00	8.26E+00	7.06E+00	5.36E+00	4.96E+00	4.35E+00
	RAO	1.48E+01	1.62E+01	1.70E+01	9.06E+00	9.59E+00	9.42E+00	5.31E+00	5.98E+00	6.79E+00
Diferença %		0.22%	8.98%	38.16%	1.23%	16.08%	33.36%	0.85%	20.52%	56.23%
MY	JS	5.91E-01	1.67E+00	1.12E+00	2.43E+00	8.46E+00	5.89E+00	1.11E+01	5.60E+01	4.17E+01
	RAO	5.54E-01	1.50E+00	1.03E+00	2.29E+00	6.58E+00	4.50E+00	1.07E+01	3.62E+01	2.56E+01
Diferença %		6.24%	9.98%	8.14%	5.95%	22.20%	23.57%	3.23%	35.37%	38.61%
CR	JS	4.14E-10	1.17E-09	7.83E-10	1.70E-09	5.92E-09	4.12E-09	7.77E-09	3.65E-08	2.76E-08
	RAO	3.88E-10	1.05E-09	7.19E-10	1.60E-09	4.61E-09	3.15E-09	7.51E-09	2.39E-08	1.72E-08
Diferença %		6.34%	10.00%	8.15%	5.93%	22.19%	23.57%	3.29%	34.34%	37.65%
VME	JS	5.94E+05	1.41E+06	9.08E+05	2.09E+06	6.85E+06	4.71E+06	9.03E+06	4.18E+07	3.16E+07
	RAO	5.28E+05	1.27E+06	8.04E+05	1.91E+06	5.28E+06	3.49E+06	8.71E+06	2.74E+07	1.96E+07
Diferença %		11.17%	10.39%	11.46%	8.37%	22.89%	25.78%	3.57%	34.46%	37.87%
HOE	JS	1.13E+02	8.04E+02	1.15E+03	4.28E+02	2.98E+03	4.30E+03	1.58E+03	1.07E+04	1.56E+04
	RAO	1.08E+02	8.23E+02	1.16E+03	4.04E+02	3.12E+03	4.48E+03	1.46E+03	1.15E+04	1.68E+04
Diferença %		4.84%	2.29%	1.33%	5.51%	4.57%	4.24%	7.31%	7.48%	7.33%
AXI	JS	6.20E+04	6.36E+04	5.35E+04	3.82E+04	3.62E+04	3.28E+04	2.18E+04	2.23E+04	2.23E+04
	RAO	6.24E+04	6.91E+04	7.39E+04	3.82E+04	4.23E+04	4.52E+04	2.21E+04	2.93E+04	3.74E+04
Diferença %		0.51%	8.73%	38.15%	0.07%	16.81%	37.49%	1.31%	31.28%	67.76%
BNE	JS	4.65E+05	1.31E+06	8.80E+05	1.91E+06	6.65E+06	4.63E+06	8.73E+06	4.10E+07	3.10E+07
	RAO	4.36E+05	1.18E+06	8.08E+05	1.80E+06	5.17E+06	3.54E+06	8.44E+06	2.69E+07	1.93E+07
Diferença %		6.24%	9.99%	8.15%	5.95%	22.20%	23.57%	3.29%	34.34%	37.64%
RDE	JS	1.20E+00	8.50E+00	1.21E+01	4.52E+00	3.16E+01	4.55E+01	1.67E+01	1.13E+02	1.65E+02
	RAO	1.14E+00	8.70E+00	1.23E+01	4.27E+00	3.30E+01	4.74E+01	1.55E+01	1.21E+02	1.77E+02
Diferença %		4.84%	2.29%	1.34%	5.50%	4.57%	4.24%	7.32%	7.48%	7.33%
DTE	JS	1.36E-11	3.23E-11	2.07E-11	4.80E-11	1.58E-10	1.09E-10	2.08E-10	9.80E-10	7.47E-10
	RAO	1.22E-11	2.88E-11	1.82E-11	4.40E-11	1.21E-10	8.00E-11	2.01E-10	6.32E-10	4.56E-10
Diferença %		10.84%	10.67%	12.29%	8.33%	23.43%	26.67%	3.44%	35.46%	38.98%
DAX	JS	1.46E-12	1.48E-12	1.22E-12	9.15E-13	8.22E-13	7.02E-13	5.37E-13	4.98E-13	4.34E-13
	RAO	1.47E-12	1.61E-12	1.69E-12	8.97E-13	9.60E-13	9.41E-13	5.32E-13	5.95E-13	6.74E-13
Diferença %		0.72%	8.49%	38.65%	1.97%	16.82%	34.10%	0.92%	19.39%	55.31%
DME	JS	1.07E-11	2.99E-11	2.00E-11	4.39E-11	1.53E-10	1.07E-10	2.01E-10	9.59E-10	7.33E-10
	RAO	1.00E-11	2.68E-11	1.82E-11	4.13E-11	1.18E-10	8.08E-11	1.95E-10	6.20E-10	4.48E-10
Diferença %		6.12%	10.45%	8.87%	5.96%	22.85%	24.54%	3.23%	35.38%	38.80%

Tabela 4.15 - Momentos espectrais da resposta do duto a vários carregamentos (sagbend)

BGL1_D12_LA100_M850a_A0 - Sagbend - M0										
Esforço	Resultado	h1t7	h1t10	h1t15	h2t7	h2t10	h2t15	h4t7	h4t10	h4t15
FX	JS	1.46E+01	1.47E+01	1.18E+01	8.93E+00	8.05E+00	6.65E+00	5.08E+00	4.61E+00	4.46E+00
	RAO	1.42E+01	1.54E+01	1.54E+01	8.71E+00	9.15E+00	8.09E+00	4.74E+00	5.35E+00	5.93E+00
Diferença %		2.92%	5.18%	30.53%	2.40%	13.68%	21.53%	6.59%	16.00%	33.15%
MY	JS	3.69E-01	5.05E-01	2.88E-01	8.53E-01	1.01E+00	6.17E-01	1.62E+00	1.73E+00	1.14E+00
	RAO	3.25E-01	7.62E-01	4.00E-01	6.77E-01	1.69E+00	9.49E-01	1.23E+00	3.17E+00	1.96E+00
Diferença %		11.79%	51.09%	38.83%	20.56%	66.96%	53.91%	23.98%	83.37%	70.96%
CR	JS	2.58E-10	3.53E-10	2.02E-10	5.97E-10	7.07E-10	4.32E-10	1.13E-09	1.21E-09	8.01E-10
	RAO	2.28E-10	5.34E-10	2.80E-10	4.74E-10	1.18E-09	6.65E-10	8.62E-10	2.22E-09	1.37E-09
Diferença %		11.81%	51.12%	38.72%	20.55%	66.95%	53.95%	23.96%	83.36%	70.96%
VME	JS	3.24E+05	4.16E+05	2.60E+05	6.93E+05	7.74E+05	4.72E+05	1.25E+06	1.33E+06	8.39E+05
	RAO	3.21E+05	5.91E+05	3.61E+05	5.49E+05	1.24E+06	7.24E+05	9.75E+05	2.37E+06	1.42E+06
Diferença %		0.78%	42.23%	38.76%	20.83%	59.68%	53.28%	22.21%	77.75%	69.12%
HOE	JS	8.39E+01	2.73E+02	3.01E+02	1.65E+02	5.09E+02	6.03E+02	3.04E+02	8.43E+02	1.07E+03
	RAO	6.09E+01	4.16E+02	4.49E+02	1.25E+02	8.93E+02	1.02E+03	2.25E+02	1.63E+03	2.04E+03
Diferença %		27.43%	52.12%	49.16%	24.36%	75.33%	68.75%	25.82%	92.99%	89.53%
AXI	JS	6.23E+04	6.31E+04	5.05E+04	3.80E+04	3.54E+04	2.92E+04	2.18E+04	2.11E+04	2.15E+04
	RAO	5.99E+04	6.64E+04	6.51E+04	3.70E+04	4.09E+04	3.51E+04	2.02E+04	2.57E+04	2.88E+04
Diferença %		3.78%	5.15%	29.05%	2.68%	15.71%	20.23%	7.52%	21.98%	34.01%
BNE	JS	2.90E+05	3.97E+05	2.27E+05	6.71E+05	7.94E+05	4.85E+05	1.27E+06	1.36E+06	9.00E+05
	RAO	2.56E+05	6.00E+05	3.15E+05	5.33E+05	1.33E+06	7.47E+05	9.68E+05	2.49E+06	1.54E+06
Diferença %		11.79%	51.09%	38.83%	20.56%	66.95%	53.91%	23.98%	83.37%	70.97%
RDE	JS	8.87E-01	2.89E+00	3.18E+00	1.75E+00	5.39E+00	6.37E+00	3.21E+00	8.91E+00	1.14E+01
	RAO	6.43E-01	4.40E+00	4.75E+00	1.32E+00	9.44E+00	1.08E+01	2.38E+00	1.72E+01	2.15E+01
Diferença %		27.44%	52.12%	49.16%	24.36%	75.34%	68.75%	25.82%	92.99%	89.53%
DTE	JS	7.62E-12	9.71E-12	6.07E-12	1.64E-11	1.81E-11	1.10E-11	2.96E-11	3.11E-11	1.96E-11
	RAO	7.59E-12	1.38E-11	8.39E-12	1.30E-11	2.88E-11	1.69E-11	2.30E-11	5.54E-11	3.30E-11
Diferença %		0.39%	42.47%	38.25%	20.78%	59.49%	53.18%	22.25%	77.88%	68.60%
DAX	JS	1.45E-12	1.45E-12	1.17E-12	8.88E-13	8.02E-13	6.65E-13	5.08E-13	4.61E-13	4.46E-13
	RAO	1.42E-12	1.53E-12	1.53E-12	8.68E-13	9.18E-13	8.12E-13	4.71E-13	5.39E-13	5.95E-13
Diferença %		2.04%	5.29%	30.32%	2.28%	14.39%	22.18%	7.25%	17.06%	33.43%
DME	JS	6.79E-12	9.19E-12	5.25E-12	1.57E-11	1.84E-11	1.12E-11	2.98E-11	3.14E-11	2.08E-11
	RAO	5.98E-12	1.39E-11	7.28E-12	1.25E-11	3.07E-11	1.73E-11	2.27E-11	5.77E-11	3.56E-11
Diferença %		11.84%	51.14%	38.68%	20.54%	67.09%	53.61%	23.94%	83.63%	70.63%

A diferença entre os momentos espectrais obtidos por cada método confirma que a qualidade das estimativas do RAO de resposta para o caso do duto é inferior à das obtidas no caso do *riser*. Na região de *overbend* esta diferença mostra imprecisões com valor médio de 13%, variando entre 1% e 39%, enquanto que na região de fundo as imprecisões são maiores, com um valor médio de 50%, variando entre 12% e 93%. A exceção fica por conta dos esforços de tensão circunferencial e tensão radial na região

de *overbend*, cujos ajustes têm melhor qualidade devido ao seu comportamento mais próximo do linear.

Os espectros de resposta do esforço que registra a maior imprecisão na estimativa pelo ruído branco, tensão circunferencial na região de *sagbend* para o carregamento “JSh4t10”, são apresentados na Figura 4.85.

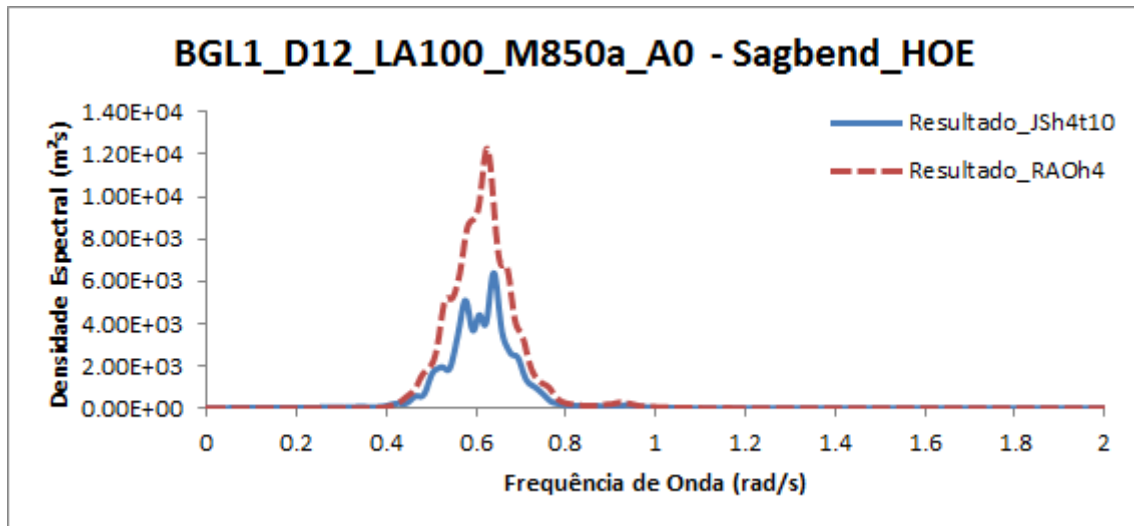


Figura 4.85 - Resposta de tensão circunferencial para o duto (sagbend/JSh4t10)

A comparação entre os espectros confirma a imprecisão considerável na intensidade da estimativa do método do RAO de resposta para este caso. Em contrapartida, as formas dos espectros não são completamente distintas. É difícil determinar se um resultado como este ainda pode ser utilizado na fase preliminar de um determinado projeto. Em último caso, isto depende do grau de exigência de cada um.

O que se pode afirmar é que em casos com estruturas cujo comportamento se afasta da tendência linear não é possível garantir incondicionalmente precisão ou consistência para o método do RAO de resposta. Enquanto que a estimativa do método para esforços em uma região pode ser considerada precisa para um carregamento, ela pode não ser considerada satisfatória para esforços em outra região ou outros carregamentos. A aplicação do método nestes casos não pode ser recomendada sem ressalvas, ficando a critério de cada projetista que deve estar familiarizado com o funcionamento do método e ciente desta limitação.

Naturalmente, ainda mais cautela seria necessária na utilização de um RAO de resposta único na estimativa de respostas a carregamentos de ondas diversificados.

4.3.4. Carregamentos de ondas com incidências diversificadas

Nesta seção será estudada a resposta do duto para casos de carregamentos de ondas com ângulos de incidência diversificados atuando sobre o modelo da BGL-1.

Oito casos serão estudados, todos referentes ao mesmo carregamento “JSh2t10” e com a máquina de tração atuando no estado ativado. Os resultados são apresentados nas Tabelas 4.16 e 4.17.

Tabela 4.16 - Momentos espectrais da resposta do duto a várias incidências (over/JSh2t10)

BGL1_D12_LA100_M850a_JSh2t10 - Overbend - M0									
Esforço	Resultado	A0	A45	A90	A135	A180	A225	A270	A315
FX	JS	8.26E+00	6.36E+00	7.32E+00	5.98E+00	5.88E+00	4.61E+00	6.66E+00	5.92E+00
	RAO	9.59E+00	9.82E+00	9.77E+00	8.36E+00	8.11E+00	7.02E+00	1.11E+01	9.71E+00
Diferença %		16.08%	54.47%	33.50%	39.75%	37.86%	52.39%	67.24%	64.12%
MY	JS	8.46E+00	1.22E+01	2.62E+01	3.05E+01	1.21E+01	1.60E+01	5.33E+00	2.39E+01
	RAO	6.58E+00	9.66E+00	1.98E+01	2.10E+01	8.97E+00	1.23E+01	3.79E+00	1.65E+01
Diferença %		22.20%	20.85%	24.30%	31.14%	25.70%	23.36%	28.87%	30.72%
CR	JS	5.92E-09	8.44E-09	1.76E-08	2.06E-08	8.44E-09	1.11E-08	3.68E-09	1.64E-08
	RAO	4.61E-09	6.73E-09	1.34E-08	1.44E-08	6.28E-09	8.54E-09	2.65E-09	1.15E-08
Diferença %		22.19%	20.27%	23.90%	30.28%	25.64%	22.76%	27.97%	29.74%
VME	JS	6.85E+06	9.70E+06	2.07E+07	2.36E+07	9.76E+06	1.27E+07	4.49E+06	1.90E+07
	RAO	5.28E+06	7.68E+06	1.61E+07	1.67E+07	7.37E+06	9.96E+06	3.40E+06	1.36E+07
Diferença %		22.89%	20.86%	22.22%	29.18%	24.54%	21.37%	24.12%	28.36%
HOE	JS	2.98E+03	3.14E+03	4.56E+03	5.81E+03	3.58E+03	3.42E+03	1.85E+03	5.24E+03
	RAO	3.12E+03	3.29E+03	4.80E+03	6.14E+03	3.76E+03	3.59E+03	1.86E+03	5.49E+03
Diferença %		4.57%	4.96%	5.22%	5.68%	4.99%	5.02%	0.55%	4.94%
AXI	JS	3.62E+04	2.87E+04	2.30E+04	2.30E+04	2.41E+04	1.83E+04	2.50E+04	2.39E+04
	RAO	4.23E+04	4.44E+04	3.26E+04	3.19E+04	3.31E+04	2.75E+04	4.36E+04	3.95E+04
Diferença %		16.81%	54.89%	41.90%	38.58%	37.25%	50.16%	74.58%	64.97%
BNE	JS	6.65E+06	9.48E+06	1.98E+07	2.32E+07	9.48E+06	1.24E+07	4.14E+06	1.84E+07
	RAO	5.17E+06	7.56E+06	1.50E+07	1.61E+07	7.05E+06	9.60E+06	2.98E+06	1.30E+07
Diferença %		22.20%	20.26%	23.90%	30.28%	25.64%	22.76%	27.99%	29.75%
RDE	JS	3.16E+01	3.31E+01	4.83E+01	6.15E+01	3.79E+01	3.62E+01	1.96E+01	5.53E+01
	RAO	3.30E+01	3.48E+01	5.08E+01	6.50E+01	3.98E+01	3.80E+01	1.97E+01	5.81E+01
Diferença %		4.57%	4.96%	5.22%	5.68%	4.99%	5.02%	0.54%	4.94%
DTE	JS	1.58E-10	2.26E-10	4.88E-10	5.47E-10	2.24E-10	2.91E-10	1.05E-10	4.43E-10
	RAO	1.21E-10	1.77E-10	3.79E-10	3.85E-10	1.68E-10	2.28E-10	8.00E-11	3.15E-10
Diferença %		23.43%	21.45%	22.21%	29.66%	24.90%	21.73%	24.10%	28.91%
DAX	JS	8.22E-13	6.38E-13	7.29E-13	5.98E-13	5.89E-13	4.62E-13	6.68E-13	5.94E-13
	RAO	9.60E-13	9.75E-13	9.76E-13	8.38E-13	8.03E-13	7.00E-13	1.10E-12	9.62E-13
Diferença %		16.82%	52.85%	33.81%	40.08%	36.33%	51.44%	64.68%	61.87%
DME	JS	1.53E-10	2.20E-10	4.65E-10	5.37E-10	2.18E-10	2.85E-10	9.74E-11	4.30E-10
	RAO	1.18E-10	1.74E-10	3.54E-10	3.71E-10	1.61E-10	2.19E-10	7.01E-11	2.99E-10
Diferença %		22.85%	20.96%	23.93%	30.76%	26.06%	23.13%	28.02%	30.34%

Tabela 4.17 - Momentos espectrais da resposta do duto a várias incidências (sag/JSh4t10)

BGL1_D12_LA100_M850a_JSh2t10 - Sagbend - M0									
Esforço	Resultado	A0	A45	A90	A135	A180	A225	A270	A315
FX	JS	8.05E+00	5.85E+00	7.00E+00	5.96E+00	5.88E+00	4.61E+00	6.63E+00	5.62E+00
	RAO	9.15E+00	8.78E+00	8.68E+00	7.88E+00	8.02E+00	6.55E+00	1.07E+01	8.82E+00
Diferença %		13.68%	49.90%	24.00%	32.08%	36.48%	42.12%	61.05%	57.06%
MY	JS	1.01E+00	1.24E+00	1.73E+00	1.55E+00	1.14E+00	1.31E+00	7.96E-01	1.47E+00
	RAO	1.69E+00	2.13E+00	2.91E+00	2.91E+00	2.01E+00	2.27E+00	1.32E+00	2.73E+00
Diferença %		66.96%	72.06%	68.64%	87.83%	75.44%	73.36%	65.79%	85.09%
CR	JS	7.07E-10	8.68E-10	1.21E-09	1.09E-09	8.01E-10	9.19E-10	5.58E-10	1.03E-09
	RAO	1.18E-09	1.49E-09	2.04E-09	2.04E-09	1.40E-09	1.59E-09	9.24E-10	1.91E-09
Diferença %		66.95%	71.91%	68.60%	87.83%	75.41%	73.24%	65.76%	85.08%
VME	JS	7.74E+05	9.38E+05	1.50E+06	1.30E+06	9.44E+05	1.08E+06	7.18E+05	1.19E+06
	RAO	1.24E+06	1.57E+06	2.50E+06	2.42E+06	1.57E+06	1.88E+06	1.07E+06	2.15E+06
Diferença %		59.68%	67.94%	66.31%	85.92%	66.24%	74.08%	49.17%	80.02%
HOE	JS	5.09E+02	4.55E+02	5.10E+02	6.19E+02	5.55E+02	4.79E+02	3.60E+02	5.90E+02
	RAO	8.93E+02	8.00E+02	8.72E+02	1.20E+03	1.01E+03	8.57E+02	6.29E+02	1.12E+03
Diferença %		75.33%	75.87%	70.86%	93.24%	82.29%	78.88%	74.54%	90.06%
AXI	JS	3.54E+04	2.60E+04	2.85E+04	2.51E+04	2.53E+04	1.94E+04	2.79E+04	2.43E+04
	RAO	4.09E+04	3.94E+04	3.53E+04	3.31E+04	3.55E+04	2.74E+04	4.60E+04	3.91E+04
Diferença %		15.71%	51.27%	23.95%	32.15%	40.40%	41.51%	64.76%	60.62%
BNE	JS	7.94E+05	9.75E+05	1.36E+06	1.22E+06	9.00E+05	1.03E+06	6.26E+05	1.16E+06
	RAO	1.33E+06	1.68E+06	2.29E+06	2.29E+06	1.58E+06	1.79E+06	1.04E+06	2.15E+06
Diferença %		66.95%	71.97%	68.58%	87.79%	75.44%	73.22%	65.79%	85.07%
RDE	JS	5.39E+00	4.81E+00	5.39E+00	6.54E+00	5.87E+00	5.06E+00	3.81E+00	6.24E+00
	RAO	9.44E+00	8.46E+00	9.22E+00	1.26E+01	1.07E+01	9.06E+00	6.65E+00	1.19E+01
Diferença %		75.34%	75.87%	70.86%	93.24%	82.30%	78.87%	74.54%	90.07%
DTE	JS	1.81E-11	2.19E-11	3.52E-11	3.05E-11	2.20E-11	2.53E-11	1.68E-11	2.79E-11
	RAO	2.88E-11	3.69E-11	5.85E-11	5.68E-11	3.67E-11	4.41E-11	2.50E-11	5.02E-11
Diferença %		59.49%	68.02%	66.11%	86.30%	66.39%	74.20%	49.42%	79.84%
DAX	JS	8.02E-13	5.83E-13	6.98E-13	5.93E-13	5.90E-13	4.56E-13	6.65E-13	5.60E-13
	RAO	9.18E-13	8.75E-13	8.60E-13	7.83E-13	7.97E-13	6.57E-13	1.05E-12	8.72E-13
Diferença %		14.39%	49.96%	23.16%	32.10%	34.99%	44.12%	57.68%	55.61%
DME	JS	1.84E-11	2.26E-11	3.16E-11	2.83E-11	2.08E-11	2.40E-11	1.45E-11	2.69E-11
	RAO	3.07E-11	3.89E-11	5.32E-11	5.32E-11	3.66E-11	4.15E-11	2.40E-11	4.98E-11
Diferença %		67.09%	72.02%	68.58%	87.92%	75.63%	73.25%	65.77%	85.19%

Mais uma vez os esforços de tensão circunferencial e tensão radial na região de *overbend* foram estimados com boa precisão pelo método do RAO de resposta devido ao seu comportamento próximo do linear.

Excluindo estes dois esforços, as diferenças entre os momentos espectrais mostram imprecisões das estimativas pelo método do RAO de resposta com valor médio

de 26% na região de *overbend*, variando entre 20% e 31%. Na região de *sagbend*, o valor médio das imprecisões é de 74%, variando entre 66% e 88%.

Apesar de as estimativas do RAO de resposta não apresentarem boa precisão, já que as diferenças entre os momentos espectrais obtidos por cada método se afastaram do alvo de 0%, elas tiveram uma consistência para os diferentes ângulos de incidência maior do que a verificada anteriormente para diferentes intensidades de carregamento.

Os momentos espectrais mostram respostas diferentes do duto para cada ângulo de incidência do carregamento, indicando que não há nenhuma simetria significativa neste modelo. Para ilustrar as diferenças entre as respostas, os espectros de resposta de momento fletor na região de *overbend* para alguns ângulos são apresentados nas Figuras 4.86 a 4.88.

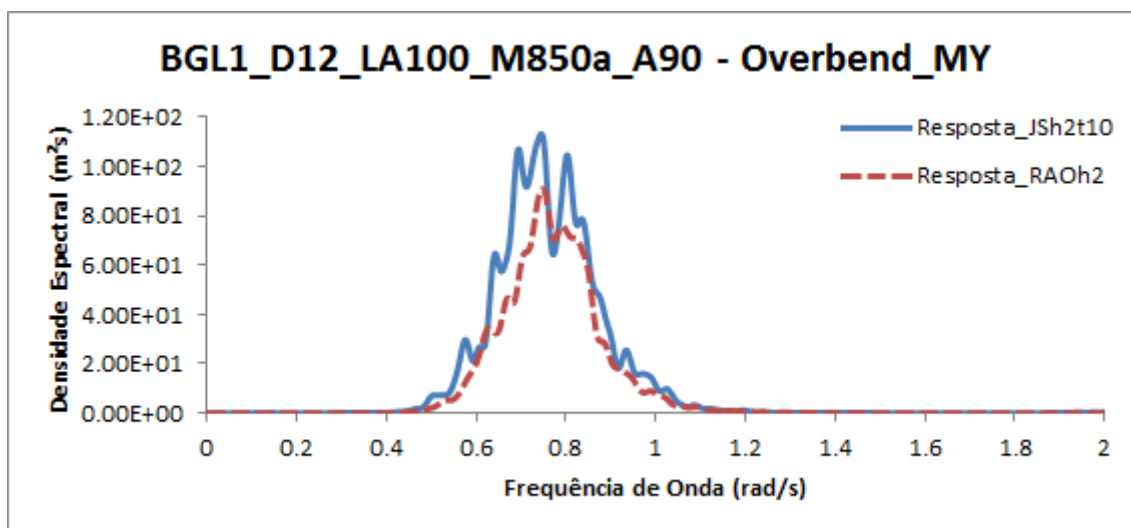


Figura 4.86 - Resposta de momento fletor para o duto com incidência A90 (over/JSh2t10)

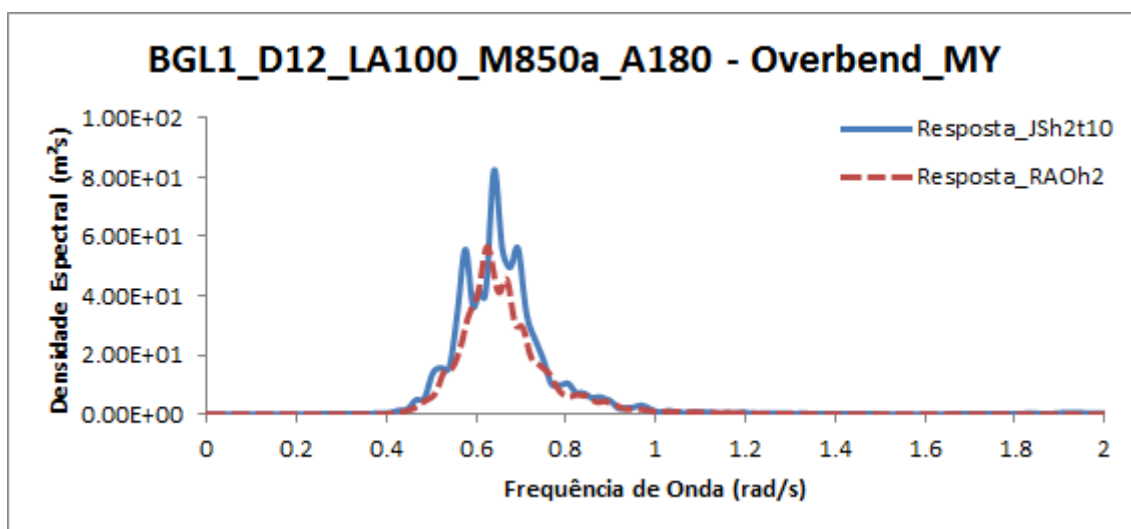


Figura 4.87 - Resposta de momento fletor para o duto com incidência A180 (over/JSh2t10)

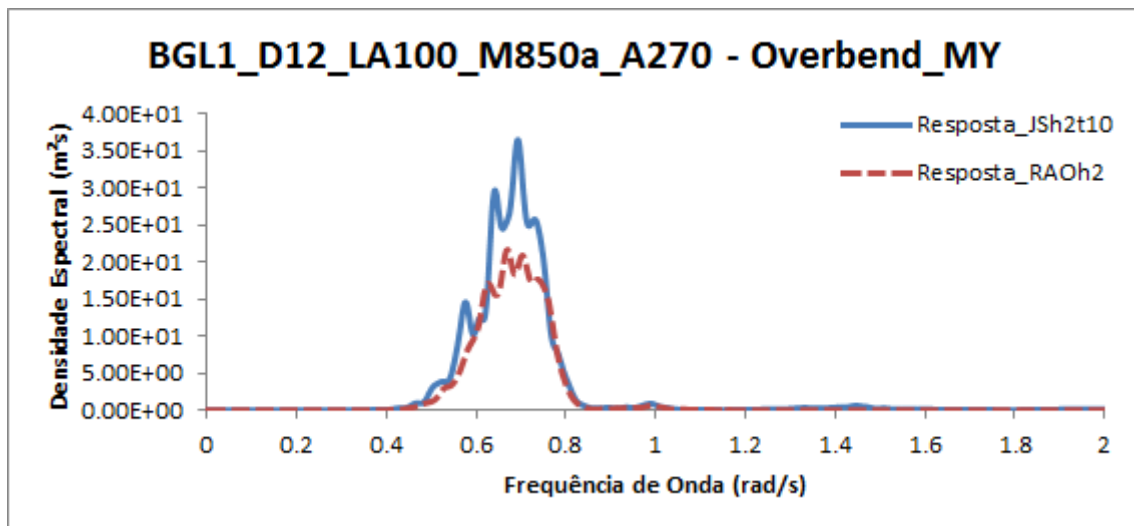


Figura 4.88 - Resposta de momento fletor para o duto com incidência A270 (over/JSh2t10)

4.3.5. Máquina de tração com funcionamento diversificado

Nesta seção será estudada a resposta do duto para os diferentes modos de atuação da máquina de tração, os estados ativado e desativado.

Um único carregamento será estudado, o caso “JSh2t10” com ângulo de incidência (azimute) 0°. Os resultados são apresentados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 - Momentos espectrais da resposta do duto a máq. de tração variada (JSh2t10)

BGL1_D12_LA100_M850_A0_JSh2t10 - M0					
Esforço	Resultado	Overbend_Ma	Sagbend_Ma	Overbend_Md	Sagbend_Md
FX	JS	8.26E+00	8.05E+00	1.57E+04	1.54E+04
	RAO	9.59E+00	9.15E+00	1.39E+04	1.36E+04
Diferença %		16.08%	13.68%	11.57%	11.78%
MY	JS	8.46E+00	1.01E+00	7.68E+00	4.15E+00
	RAO	6.58E+00	1.69E+00	6.79E+00	3.94E+00
Diferença %		22.20%	66.96%	11.66%	5.26%
CR	JS	5.92E-09	7.07E-10	5.38E-09	2.91E-09
	RAO	4.61E-09	1.18E-09	4.75E-09	2.76E-09
Diferença %		22.19%	66.95%	11.66%	5.24%
VME	JS	6.85E+06	7.74E+05	7.87E+07	6.77E+07
	RAO	5.28E+06	1.24E+06	6.33E+07	5.92E+07
Diferença %		22.89%	59.68%	19.51%	12.53%
HOE	JS	2.98E+03	5.09E+02	3.70E+03	1.80E+03
	RAO	3.12E+03	8.93E+02	3.81E+03	1.75E+03
Diferença %		4.57%	75.33%	3.01%	2.89%
AXI	JS	3.62E+04	3.54E+04	6.67E+07	6.51E+07
	RAO	4.23E+04	4.09E+04	5.89E+07	5.75E+07
Diferença %		16.81%	15.71%	11.57%	11.77%
BNE	JS	6.65E+06	7.94E+05	6.04E+06	3.27E+06
	RAO	5.17E+06	1.33E+06	5.34E+06	3.10E+06
Diferença %		22.20%	66.95%	11.66%	5.26%
RDE	JS	3.16E+01	5.39E+00	3.92E+01	1.90E+01
	RAO	3.30E+01	9.44E+00	4.03E+01	1.85E+01
Diferença %		4.57%	75.34%	3.01%	2.89%
DTE	JS	1.58E-10	1.81E-11	1.83E-09	1.59E-09
	RAO	1.21E-10	2.88E-11	1.47E-09	1.39E-09
Diferença %		23.43%	59.49%	19.53%	12.57%
DAX	JS	8.22E-13	8.02E-13	1.56E-09	1.52E-09
	RAO	9.60E-13	9.18E-13	1.38E-09	1.34E-09
Diferença %		16.82%	14.39%	11.58%	11.78%
DME	JS	1.53E-10	1.84E-11	1.38E-10	7.71E-11
	RAO	1.18E-10	3.07E-11	1.22E-10	7.29E-11
Diferença %		22.85%	67.09%	11.38%	5.50%

As diferenças entre os momentos espectrais mostram imprecisões das estimativas pelo método do RAO de resposta para o estado ativado da máquina com valor médio de 16% na região de *overbend* e 70% na região de *sagbend*. Já para o estado desativado da máquina a imprecisão média é de 9% na região de *overbend* e 5% na região de *sagbend*.

Os resultados mostram que, para um mesmo modelo numérico e um mesmo caso de carregamento, o método do RAO de resposta traz estimativas mais precisas para casos em que a máquina de tração atua no estado desativado do que no estado ativado. Isto indica que a máquina de tração atuando no estado ativado é responsável por introduzir parte da não linearidade da resposta do duto, piorando a qualidade das estimativas destes casos.

Infelizmente não é possível substituir as simulações de máquina atuando no estado ativado pelo estado desativado porque, como mencionado anteriormente, isto não seria representativo da operação realizada em campo. Portanto, é importante manter em mente o efeito causado pela máquina ativada no comportamento do duto ao interpretar as estimativas fornecidas pelo método do RAO de resposta nos casos de lançamento.

Os momentos espectrais também comprovam a eficácia da máquina ativada em minimizar os esforços axiais. Para a máquina desativada, a tensão longitudinal axial representa 85% da tensão de Von Mises, sendo a sua parcela dominante. Já para máquina desativada, esta parcela cai para 1%, e a tensão dominante passa a ser a tensão longitudinal de momento, representando 97% da tensão de Von Mises.

Isto é refletido nos espectros de resposta, que são apresentados nas Figuras 4.89 a 4.91. O eixo da esquerda é referente ao estado ativado da máquina e o eixo da direita ao estado desativado.

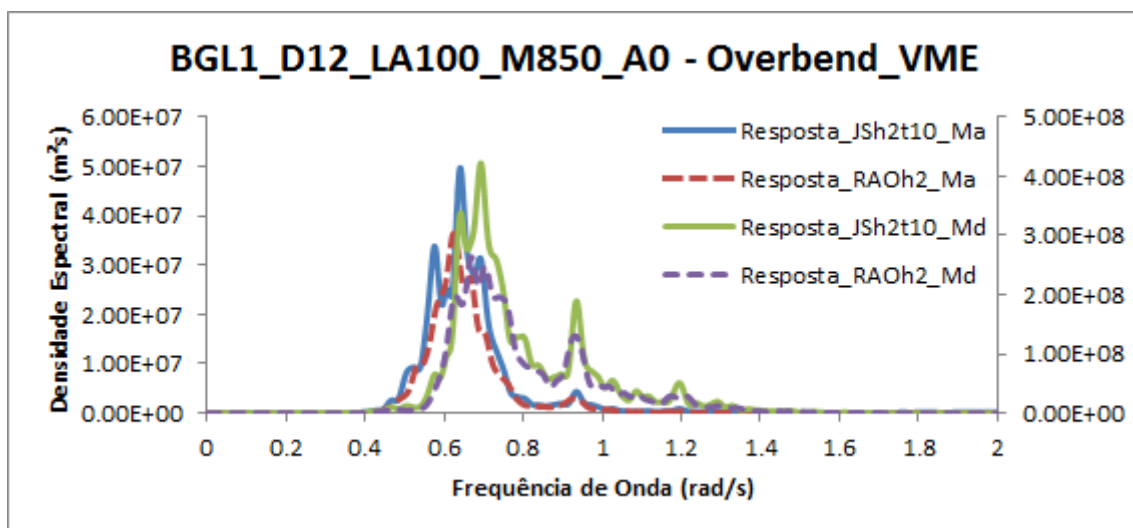


Figura 4.89 - Resposta de tensão de Von Mises para o duto com máq. de tração variada (over/JSh2t10)

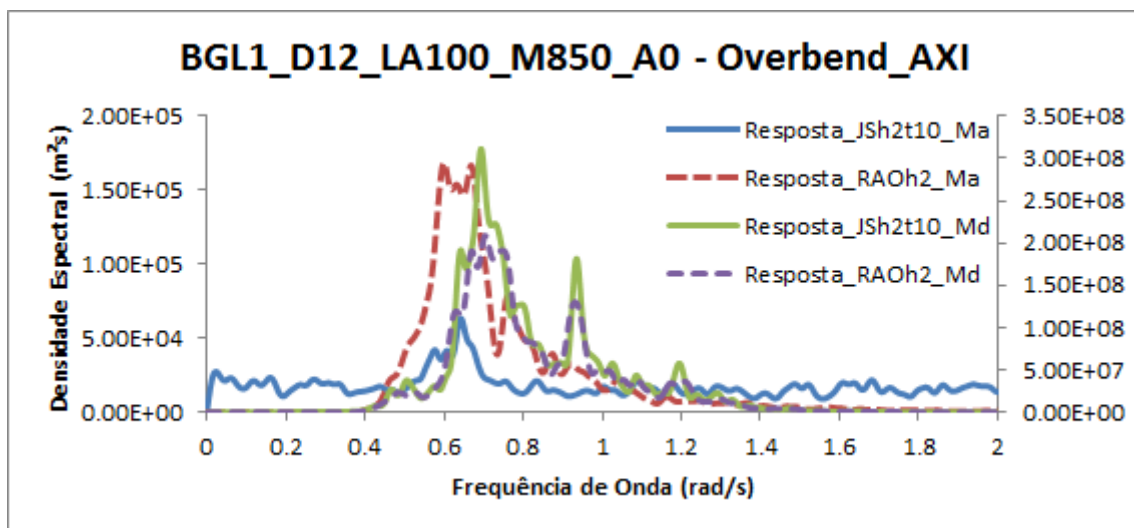


Figura 4.90 - Resposta de tensão longitudinal axial para o duto com máq. de tração variada (over/JSh2t10)

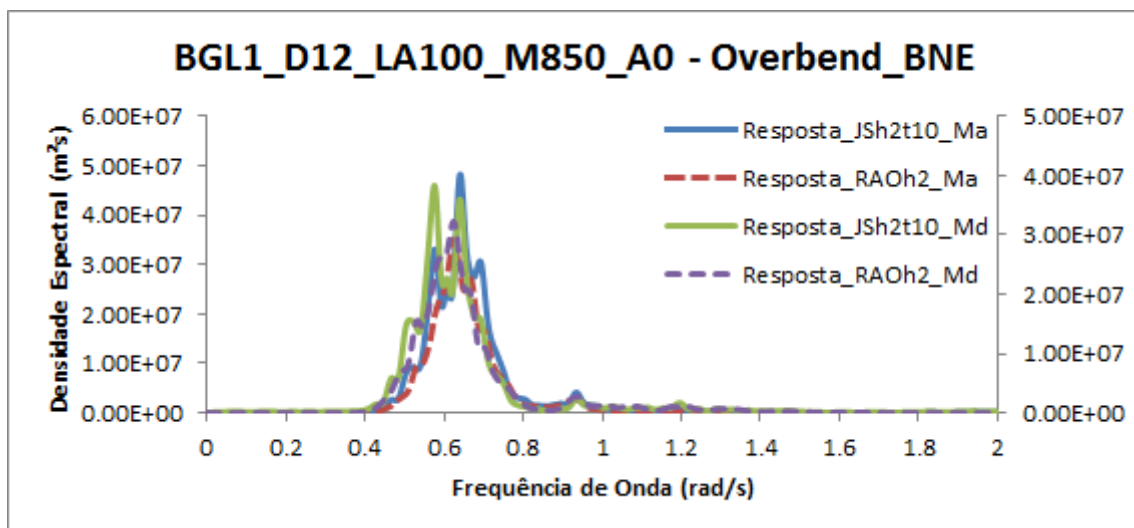


Figura 4.91 - Resposta de tensão longitudinal de momento para o duto com máq. de tração variada (over/JSh2t10)

5. CONCLUSÕES

5.1. Conclusões e recomendações do trabalho

O método do RAO de resposta se provou capaz de fornecer estimativas para o comportamento dinâmico de importantes estruturas *offshore* em diversos cenários de carregamentos de ondas.

A qualidade das estimativas obtidas pelo método variou entre os casos estudados, se mostrando fortemente dependente da linearidade do comportamento das estruturas: quanto mais linear, melhores foram as estimativas. No caso do *riser* em plataforma de produção, cujo comportamento se mostrou aproximadamente linear, o método trouxe estimativas de boa qualidade, mantendo precisão e consistência frente a variações na intensidade e incidência dos carregamentos. Já no caso do duto em balsa de lançamento, cujo comportamento se mostrou mais não linear, as estimativas tiveram sua qualidade diminuída tanto em precisão quanto em consistência.

Esta dependência da linearidade é uma característica intrínseca ao método que sempre deve ser levada em consideração para definir quais casos são bons candidatos à sua aplicação.

Em ambos os casos estudados o método trouxe economia de recursos computacionais, demandando a realização de uma quantidade de simulações numéricas menor que a abordagem tradicional, na qual uma simulação é realizada para cada caso de carregamento. Isto foi possível porque nas simulações necessárias para criação dos RAOs foram empregados ruídos brancos, que têm a capacidade de representar diversos espectros de onda em um único sinal.

Economias ainda mais expressivas podem ser obtidas através da utilização de um único RAO para gerar as estimativas de resposta a diversos carregamentos, mas esta abordagem só pode ser recomendada em casos que apresentam comportamento fortemente linear.

Em função destas características, o método do RAO de resposta se apresenta como uma ferramenta importante em fases de análise preliminar de um projeto, não sendo adequado para substituir as simulações mais detalhadas e precisas de um projeto final. Neste papel ele é capaz de estimar de modo simples e rápido as respostas de estruturas a diferentes carregamentos, permitindo a verificação da sua adequação às

exigências e a identificação dos casos mais críticos que devem ser levados adiante para as etapas de análise mais rigorosa.

Por fim, como sugestão para simplificar a aplicação do método a um projeto *offshore*, se recomenda a substituição dos RAOs de resposta para cada carregamento de onda específico por apenas dois: um para ondas representativas de condições operacionais de fadiga e outro para condições operacionais extremas, cada um gerado a partir de um ruído branco adequado. Deste modo, a resposta das estruturas a estas duas importantes condições de projeto poderiam ser estimadas com mais simplicidade.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

O método do RAO de resposta pode ser expandido para fornecer estimativas mais abrangentes do comportamento das estruturas *offshore*.

Neste estudo o método foi aplicado na estimativa da resposta das estruturas a carregamentos de ondas, exclusivamente. Mas carregamentos de correnteza e vento são igualmente importantes no ambiente *offshore*, podendo causar esforços com a mesma magnitude que os carregamentos de ondas. Assim, um avanço importante para o método seria a sua adaptação a estas diferentes categorias de carregamentos, fazendo com que a sua estimativa represente os fenômenos causados por todos eles nas estruturas, o que levaria a uma análise mais completa de cada caso.

Outra sugestão de melhoria diz respeito à definição das regiões de monitoramento dos esforços. Neste estudo as respostas das estruturas foram medidas apenas em um ponto, tanto na região de topo quanto de fundo, cujo comportamento pode não ser representativo da região como um todo. Logo, uma melhor estimativa dos fenômenos que ocorrem em cada região poderia ser obtida através do registro da resposta da região inteira, ao invés de um único ponto, para criação do RAO de resposta, ou mesmo pela composição de um RAO equivalente para a região a partir dos RAOs de múltiplos pontos situados nela.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: 2015**, disponível em <www.anp.gov.br/?dw=78135>, acesso em março de 2016.
- [2] Offshore Magazine Online, **2015 Deepwater Solutions & Records for Concept Selection**, disponível em <<http://www.offshore-mag.com/content/dam/offshore/print-articles/volume-75/05/0515-DeepwaterPoster040815ADS.pdf>>, acesso em março de 2016.
- [3] 4subsea, **Flexible Pipe Engineering**, disponível em <<http://www.4subsea.com/services/flexible-risers/system-engineering>>, acesso em março de 2016.
- [4] BAI, Y., BAI, Q., **Subsea Engineering Handbook**, 1ª edição, 2012, Gulf Professional Publishing.
- [5] Your Industry News, **Shell Group Chooses Subsea Pipelines over FPSO for Offshore Perdido Development**, disponível em <http://www.yourindustrynews.com/news_item.php?newsID=237>, acesso em março de 2016.
- [6] Offshoreenergytoday.com, **Business Guide**, disponível em <<http://www.offshoreenergytoday.com/semac-1-to-begin-ichthys-pipelay-ops-soon>>, acesso em março de 2016.
- [7] OLADIMEJI, J.O., OSSIA, C.V., OKOLI, J.U., **On the Structural Integrity of S-Lay Method of Pipeline Installation**, American Journal of Mechanical Engineering, v. 4, n. 4, pp. 124-130, 2016.
- [8] JOURNÉE, J.M.J., MASSIE, W.W., **Offshore Hydromechanics**, 1ª edição, 2001, Delft University of Technology, disponível em <<http://www.shipmotions.nl/DUT/LectureNotes/OffshoreHydromechanics.pdf>>.
- [9] HYNE, N.J., **Nontechnical Guide to Petroleum Geology, Exploration, Drilling & Production**, 3ª edição, 2012, PennWell
- [10] LEFFER, W.L., PATTAROZZI, R., STERLING, G., **Deepwater Petroleum Exploration & Production: A Nontechnical Guide**, 2ª edição, 2011, PennWell.

- [11] CHAKRABARTI, S.K., **Handbook of Offshore Engineering**, 1ª edição, 2005, Elsevier Science.
- [12] CHAKRABARTI, S.K., **Hydrodynamics of Offshore Structures**, 1ª edição, 2003, WIT Press.
- [13] NAESS, A., MOAN, T., **Stochastic Dynamics of Marine Structures**, 1ª edição, 2012, Cambridge University Press.
- [14] WILSON, J.F., **Dynamics of Offshore Structures**, 2ª edição, 2002, John Wiley & Sons.
- [15] FALTINSEN, O.M., **Sea Loads on Ships and Offshore Structures**, 1ª edição, 1993, Cambridge University Press.
- [16] DEAN, G.R., DALRYMPLE, R.A., **Water Wave Mechanics for Engineers & Scientists**, 1ª edição, 1991, World Scientific Publishing.
- [17] SARPKAYA, T., **Wave Forces on Offshore Structures**, 1ª edição, 2010, Cambridge University Press.
- [18] ANG, A.H-S., TANG, W.H., **Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Volume I**, 1ª edição, 1975, John Wiley & Sons.
- [19] ANG, A.H-S., TANG, W.H., **Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Volume II**, 1ª edição, 1984, John Wiley & Sons.
- [20] NEWLAND, D.E., TANG, W.H., **An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis**, 3ª edição, 2005, Dover Publications.
- [21] RAO, S.S., **Mechanical Vibrations**, 5ª edição, 2010, Pearson.
- [22] BATHE, K.J., **Finite Element Procedures**, 1ª edição, 1996, Prentice Hall.
- [23] HUGHES, T.J.R., **The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis**, 1ª edição, 2000, Dover Publications.
- [24] COOK, R.D., MALKUS, D.S., PLESHA, M.E., WITT, R.J., **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**, 4ª edição, 2001, John Wiley & Sons.
- [25] KREIDER, D.L., KULLER, G.K., OSTBERG, D.R., PERKINS, F.W., **An Introduction to Linear Analysis**, 1ª edição, 1996, Addison-Wesley Publishing Company.

- [26] GIRÓN, A.C., **Projeto Integrado de Sistemas de Ancoragem e Risers em Plataformas Flutuantes de Produção de Petróleo**, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2013.
- [27] LIMA, D.A., **Avaliação de Formulações de Análise e Metodologias de Projeto de Sistemas de Ancoragem de Plataformas Offshore Considerando Aspectos do Projeto de Risers**, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2011.
- [28] SENRA, S.F., **Metodologias de Análise e Projeto Integrado de Sistemas Flutuantes para Exploração de Petróleo Offshore**, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2004.
- [29] BRANDÃO, C.S., **Geração de Estados de Mar Equivalentes para Análises Preliminares de Sistemas de Risers**, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2016.
- [30] JACOB B.P., BAHIANSE R.A., CORREA F.N., JACOVAZZO B.M., **Parallel Implementations of Coupled Formulations for the Analysis of Floating Production Systems, Part I: Coupling Formulations**, Ocean Engineering, v. 55, pp. 206-218, 2012.
- [31] Petróleo Brasileiro S.A., **Fatos e Dados**, disponível em <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/nove-plataformas-que-vaio-ampliar-a-producao-de-petroleo-no-brasil.htm>>, acesso em março de 2016.
- [32] Shipspotting.com, **Photo Gallery**, disponível em <<http://www.shipspotting.com/gallery/photo.php?lid=1671285>>, acesso em março de 2016.