



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
Faculdade de Engenharia Mecânica

**RODRIGO BATISTA TOMMASINI**

# **Influência da velocidade de lançamento na instalação de equipamentos submarinos**

CAMPINAS  
2018

**RODRIGO BATISTA TOMMASINI**

# **Influência da velocidade de lançamento na instalação de equipamentos submarinos**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na área de Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Renato Pavanello

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO Rodrigo Batista Tommasini E ORIENTADO PELO PROF. DR. Renato Pavanello.

CAMPINAS

2018

**Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s):** Não se aplica.

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

Tommasini, Rodrigo Batista, 1989-  
T598i      Influência da velocidade de lançamento na instalação de equipamentos  
submarinos / Rodrigo Batista Tommasini. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Renato Pavanello.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade  
de Engenharia Mecânica.

1. Engenharia submarina. 2. Estruturas offshore. 3. Cabos submarinos. 4.  
Dinâmica não-linear. I. Pavanello, Renato, 1959-. II. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Influence of the payout speed on the installation of subsea  
equipment

**Palavras-chave em inglês:**

Subsea engineering

Offshore structures

Subsea cables

Nonlinear dynamics

**Área de concentração:** Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

**Titulação:** Mestre em Engenharia Mecânica

**Banca examinadora:**

Renato Pavanello [Orientador]

Leonardo de Oliveira Carvalho

Celso Kazuyuki Morooka

**Data de defesa:** 09-04-2018

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO**

# **Influência da velocidade de lançamento na instalação de equipamentos submarinos**

Autor: Rodrigo Batista Tommasini

Orientador: Renato Pavanello

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

**Prof. Dr. Renato Pavanello, Presidente**  
**DMC/FEM/UNICAMP**

**Prof. Dr. Celso Kazuyuki Morooka**  
**DEP/FEM/UNICAMP**

**Dr. Leonardo de Oliveira Carvalho**  
**TES/PDDP/CENPES/Petrobras**

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 09 de abril de 2018.

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer ao meu professor orientador Renato Pavanello pelo suporte técnico, motivação e, sobretudo, por ter sido como um amigo durante todos os anos em que trabalhamos juntos.

À minha família, em especial à minha esposa Leah e aos meus filhos Benjamin e Giuseppe, por terem me apoiado e incentivado em todos os momentos durante o longo caminho até a conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos Pestana, Maxwell e Calazans, por terem me ensinado com muito entusiasmo como instalar equipamentos submarinos em situações das mais diversas possíveis.

Aos meus amigos da TES, especialmente do Grupo de Integridade e Equipamentos Convencionais, Rene, Pozzani, Leonardo Barros e Leonardo Carvalho, pelos diversos momentos de descontração ao longo do período que trabalhamos juntos.

A todas as outras pessoas que direta ou indiretamente me ajudaram a concluir este trabalho.

Muito obrigado a todos vocês.

## Resumo

Um modelo de um grau de liberdade é apresentado para avaliar um sistema cabo-equipamento representando operações de instalação e recuperação de equipamentos submarinos. O modelo é construído a partir das Equações de Lagrange. O comprimento do cabo é considerado variável com o tempo, a influência da massa do cabo é incluída na análise e a força hidrodinâmica atuando no equipamento é modelada pela equação de Morrison. A equação não linear do movimento resultante é integrada ao longo do tempo através de um algoritmo preditor-corretor de Newmark. Os resultados mostram que o modelo proposto apresenta resultados acurados em comparação com modelos tradicionais de elementos finitos e simplificados quando não se considera velocidade de lançamento/recuperação. Além disso, o modelo descreve uma variação nas cargas estáticas e dinâmicas atuando no cabo e no equipamento à medida que a velocidade de lançamento/recuperação é alterada. Finalmente, é apresentada a diferença na janela operacional para um dado cenário em função da alteração da velocidade de lançamento/recuperação.

## **Abstract**

A one degree of freedom system is presented to model the dynamics of a cable-mass system representing a subsea equipment installation/recovery operation. The model is constructed using Lagrange's equations. The length of the cable is considered to be variable with time, the influence of the cable's mass is included in the analysis and the hydrodynamic force acting on the equipment is modeled by Morrison's equation. The resulting nonlinear equation of motion is integrated over the time domain via a predictor-corrector Newmark's algorithm. The results show that the proposed model gives accurate solutions in comparison with traditional finite element and simplified models when considering no payout speed and it describes a variation on the static and dynamic loads acting on the cable and on the equipment as the payout/recovery speed is changed. Finally, it is presented the difference of the operational weather window as the payout/recovery speed is modified for a given scenario.

## Lista de Ilustrações

Figura 1.1: Árvore de Natal Molhada típica (Petrobras: Fatos e Dados, 2015). .....	23
Figura 1.2: Manifold submarino típico (TecPetro, 2014). .....	23
Figura 1.3: Estação de processamento submarino típico (PetroNotícias, 2013). .....	24
Figura 1.4: Instalação de equipamento submarino por sonda com <i>riser</i> rígido. ....	25
Figura 1.5: Instalação de equipamento submarino por múltiplas lingas. ....	25
Figura 1.6: Instalação direta com cabo. ....	26
Figura 1.7: Instalação de equipamento submarino por transferência de carga submarina. ....	27
Figura 1.8: Instalação de equipamentos submarinos pelo método da roldana. ....	27
Figura 1.9: Método pendular para instalação de equipamentos submarinos. ....	28
Figura 1.10: Instalação de equipamentos submarinos utilizando uma boia lastreável. ....	29
Figura 3.1: Fluxograma das etapas necessárias para definição da janela de instalação de equipamentos submarinos. ....	45
Figura 3.2: Onda regular e parâmetros de análise. ....	47
Figura 3.3: Elevação da superfície do mar ao longo do tempo. ....	48
Figura 3.4: Exemplo de espectro de energia de onda. ....	50
Figura 3.5: Comparação entre espectro de mar de PM e JONSWAP para $H_s = 2m$ e $T_p = 6s$ . ....	52
Figura 3.6: Divisão do espectro em intervalos de área igual. ....	53
Figura 3.7: Movimentos de corpo rígido de uma embarcação. ....	54
Figura 3.8: Exemplo para o <i>RAO</i> (amplitude) de uma embarcação. ....	56
Figura 3.9: Sistema simplificado de um grau de liberdade com comprimento fixo de cabo suspenso. ....	59
Figura 3.10: Cabo discretizado em elementos. ....	63
Figura 3.11: Modelo considerado para a análise com comprimento variável. ....	70

Figura 3.12: Função rampa para condições de contorno na pré-simulação. ....	77
Figura 4.1: Altura significativa do sinal no domínio do tempo em função do número de termos senoidais para um espectro de JONSWAP com $H_s = 2,0 m$ e $T_p = 8 s$ . ....	85
Figura 4.2: Período médio calculado a partir do sinal no domínio do tempo em função do número de termos senoidais para um espectro de JONSWAP com $H_s = 2,0 m$ e $T_p = 8 s$ . ....	85
Figura 4.3: Valor máximo da série, máximo mais provável e máximo com 5% de risco de excedência em função do número de termos senoidais para um espectro de JONSWAP com $H_s = 2,0m$ e $T_p = 8 s$ . ....	86
Figura 4.4: Influência do período de pico do espectro na convergência do período médio do sinal no domínio do tempo. ....	87
Figura 4.5: Comparação da resposta da embarcação obtida no modelo proposto e no Orcaflex. Foi considerada uma onda com $H_s = 2,0 m$ e $T_p = 8 s$ .....	88
Figura 4.6: Desvio relativo entre a análise no domínio do tempo e espectral para o valor máximo com 5% de risco de excedência. Foi considerada uma onda com $H_s = 2,0m$ . ....	89
Figura 4.7: Amplitude do RAO de deslocamento vertical da embarcação no ponto de içamento. ....	91
Figura 4.8: Espectro de densidade de energia da onda incidente ( $H_s = 2,0m$ , $T_p = 9s$ ) e da resposta da embarcação.....	91
Figura 4.9: Resposta da embarcação em função do tempo para onda com $H_s = 2 m$ , $T_p = 11 s$ . ....	93
Figura 4.10: Comparação entre o MEF-CF e os resultados obtidos pelo software Orcaflex para um sinal senoidal como excitação do sistema. ....	95
Figura 4.11: Comparação dos resultados obtidos entre o modelo proposto em elementos finitos e o software Orcaflex para uma excitação irregular.....	96
Figura 4.12: Análise de convergência avaliando a influência da quantidade de elementos nos esforços atuantes no cabo de instalação. ....	97
Figura 4.13: Comparação dos resultados obtidos entre os modelos considerando uma excitação senoidal com amplitude de 0,3 metros. a-b) Período de excitação de 5 segundos. c-d) Período de excitação de 9 segundos. e-f) Período de excitação de 13 segundos. ....	99

Figura 4.14: Período de ressonância do sistema em função da profundidade do equipamento. .....	100
Figura 4.15: Comparação dos resultados obtidos entre o MEF-CF e MS-CV considerando uma excitação senoidal com amplitude de 0,3 metros, período de 9 segundos e 200 metros de comprimento.....	101
Figura 4.16: Comparação dos resultados obtidos entre o MEF-CF e MS-CV considerando uma excitação senoidal com amplitude de 0,3 metros, período de 9 segundos e 1500 metros de comprimento.....	102
Figura 4.17: Comparação dos resultados obtidos entre o MEF-CF e MS-CV considerando uma excitação irregular com amplitude significativa de aproximadamente 0,3 metros, período de pico de 9 segundos e 200 metros de comprimento.....	103
Figura 4.18: Dinâmica do sistema considerando velocidade de lançamento igual a 1 m/s sem excitação oceânica. ....	106
Figura 4.19: Dinâmica do sistema considerando velocidade de recuperação de cabo igual a 1 m/s sem excitação oceânica.....	107
Figura 4.20: Influência da velocidade de (a) lançamento e de (b) recuperação na carga estática no equipamento para diversos coeficientes de arrasto. ....	108
Figura 4.21: Comparação da resposta do sistema para uma velocidade de lançamento baixa ( $V_c = -0,01 \text{ m/s}$ ) com a resposta obtida a partir de uma análise com comprimento fixo. .	109
Figura 4.22: Esforços no sistema para onda regular com amplitude de 0,3 metros e período de 9 segundos: a-b) $V_c = -0,1 \text{ m/s}$ ; c-d) $V_c = -0,33 \text{ m/s}$ ; e-f) $V_c = -0,67 \text{ m/s}$ .....	110
Figura 4.23: Esforços no sistema para onda regular com amplitude de 0,3 metros e período de 9 segundos: a-b) $V_c = 0,1 \text{ m/s}$ ; c-d) $V_c = 0,33 \text{ m/s}$ ; e-f) $V_c = 0,67 \text{ m/s}$ . ....	111
Figura 4.24: Força no equipamento na região de transiente dinâmico. ....	112
Figura 4.25: Força dinâmica no equipamento ao longo da profundidade para diversas velocidades de lançamento e para onda regular com amplitude de 0,3 metros e período de 9 segundos. ....	112
Figura 4.26: Dinâmica do sistema considerando velocidade de lançamento de cabo $V_c = -1,0 \text{ m/s}$ e excitação oceânica regular com amplitude 0,3 metros e período 9 segundos. ..	113

Figura 4.27: Esforços no sistema para onda irregular com amplitude significativa de aproximadamente 0,3 metros e período médio de 9 segundos: a-b)  $V_c = -0,1 \text{ m/s}$ ; c-d)  $V_c = -0,33 \text{ m/s}$ ; e-f)  $V_c = -0,67 \text{ m/s}$  e g-h)  $V_c = -1,0 \text{ m/s}$  ..... 115

Figura 4.28: Esforços no sistema para onda irregular com amplitude significativa de aproximadamente 0,3 metros e período médio de 9 segundos: a-b)  $V_c = 0,1 \text{ m/s}$ ; c-d)  $V_c = 0,33 \text{ m/s}$ ; e-f)  $V_c = 0,67 \text{ m/s}$  e g-h)  $V_c = 1,0 \text{ m/s}$ ..... 116

Figura 4.29: Dinâmica do sistema considerando velocidade de lançamento de cabo  $V_c = -1,0 \text{ m/s}$  e excitação oceânica irregular com amplitude significativa de aproximadamente 0,3 metros e período médio de 9 segundos. .... 117

Figura 4.30: Influência da velocidade na disponibilidade da embarcação. (a) Instalação de equipamento. (b) Recuperação de equipamento ..... 120

## Lista de Tabelas

Tabela 1.1: Dados geométricos típicos para equipamentos submarinos.....	24
Tabela 3.1: Diagrama de ocorrência em porcentagem para Bacia de Campos (NASCIMENTO, 2014).....	53
Tabela 4.1: Comparação dos resultados obtidos a partir de espectros de densidade de energia com os parâmetros de referência utilizados para construção do espectro.....	83
Tabela 4.2: Comparação dos resultados obtidos a partir de espectros de densidade de energia com os resultados obtidos a partir de análise no domínio do tempo. ....	90
Tabela 4.3: Comparação dos resultados obtidos para os valores máximos na análise no domínio do tempo. ....	92
Tabela 4.4: Parâmetros de análise para verificação do MEF-CF. ....	94
Tabela 4.5: Parâmetros de análise para comparação de modelos.....	98
Tabela 4.6: Modos de vibração axial obtidos pelo MEF-CF considerando 3000 metros de cabo suspenso. ....	104
Tabela 4.7: Parâmetros de análise considerados para avaliação do MS-CV.....	105
Tabela 4.8: Parâmetros de análise considerados para construção da janela operacional.....	118
Tabela 4.9: Janela de operação para análise com comprimento fixo.....	119

## Lista de Abreviaturas e Siglas

AHC	<i>Active Heave Compensation</i> (Compensação Ativa de <i>Heave</i> )
AHTS	<i>Anchor Handling Tug and Supply Vessel</i> (Barco de Reboque e Suporte)
ANM	Árvore de Natal Molhada
BOB	<i>Braid Optimized for Bending</i> (Trança otimizada para flexão)
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Fluidodinâmica computacional)
DISH	<i>Deepwater Installation of Subsea Hardware</i> (Instalação de Equipamentos Submarinos em Águas Profundas)
FRDS	<i>Fiber Rope Deployment System</i> (Sistema de Instalação com Cabo Sintético)
HMPE	<i>High Modulus Polyethylene</i> (Polietileno de Alta Densidade)
iVOF	<i>Improved Volume of Fluid Method</i> (Método Aprimorado de Volume de Fluido)
LCP	<i>Liquid Crystal Polymer</i> (Polímero de Cristal Líquido)
LDA	Distância entre o solo marinho e a superfície do mar
JIP	<i>Joint Industry Project</i> (Projeto Industrial Conjunto)
ROV	<i>Remotely Operated Vehicle</i> (Veículo Operado Remotamente)

## Lista de Variáveis

$a$	Fator de risco para determinação de valor máximo de uma série aleatória
$A$	Área transversal do cabo de instalação
$A_p$	Área projetada do equipamento na direção vertical
$\mathbf{B}$	Matriz de derivadas das funções de interpolação
$C$	Coefficiente de amortecimento equivalente
$C_a$	Coefficiente de massa adicional
$C_d$	Coefficiente de arrasto
$c$	Velocidade de propagação da onda
$D$	Diâmetro de referência
$g$	Aceleração gravitacional
$E$	Módulo de elasticidade do cabo de instalação
$f_{at}$	Fator de forma para rampa de pré-simulação
$F$	Força
$F_{din}$	Força dinâmica no cabo de instalação
$F_{eq}$	Força no ponto de conexão do cabo com o equipamento
$F_{est}$	Força estática no cabo de instalação
$F_{hid}$	Força hidrodinâmica
$F_{top}$	Força no topo do cabo de instalação
$H$	Altura de onda
$H_s$	Altura significativa de onda
$H_{max}$	Altura significativa de onda máxima mais provável
$Heave$	$RAO$ referente ao movimento de <i>heave</i> da embarcação
$h$	Função que representa o movimento do ponto de içamento

$j = \sqrt{-1}$	Unidade imaginária
$\mathbf{K}$	Matriz de rigidez global
$\mathbf{K}^{el}$	Matriz de rigidez de um elemento
$k$	Rigidez axial do cabo de instalação
$L$	Comprimento suspenso total do cabo de instalação
$l$	Comprimento de um elemento de cabo
$\mathbf{M}$	Matriz de massa global
$\mathbf{M}^{el}$	Matriz de massa de um elemento
$M_{add}$	Massa adicional do equipamento submarino
$M_{cabo}$	Massa do cabo de instalação
$M_{eq}$	Massa do equipamento submarino
$M_s$	Massa do sistema considerando influência da massa do cabo
$M_v$	Massa virtual do sistema
$m_l$	Massa por unidade de comprimento do cabo
$m_i$	$i$ -ésimo momento de área de um espectro de densidade de energia
$N$	Número de termos para uma série
$\mathbf{N}$	Matriz das funções de interpolação
$N_T$	Número total de cruzamentos ascendentes com o zero
$N_\zeta$	Número total de elevações
$PI_x, PI_y, PI_z$	$RAOs$ de deslocamento do ponto de içamento da embarcação
$P\{ \}$	Probabilidade de um dado evento ocorrer
$p$	Função densidade de probabilidade
$Pitch$	$RAO$ referente ao movimento de $pitch$ da embarcação
$Q$	Força nodal

$Q^{el}$	Vetor de força nodal em um elemento
$q^{el}$	Vetor de força distribuída em um elemento
$r$	Rampa para condições de contorno na pré-simulação
$R$	Resposta da embarcação no domínio do tempo
$RAO$	<i>Response Amplitude Operator</i> (Operador de Resposta em Amplitude)
$RAO_v$	$RAO$ de velocidade
$RAO_a$	$RAO$ de aceleração
$Roll$	$RAO$ referente ao movimento de <i>roll</i> da embarcação
$S$	Espectro de densidade de energia
$S_{PM}$	Espectro de densidade de energia de Pierson-Moskowitz
$S_J$	Espectro de densidade de energia de JONSWAP
$S_R$	Espectro de densidade de energia referente à resposta da embarcação
$S_\zeta$	Espectro de densidade de energia referente à altura de onda
$Surge$	$RAO$ referente ao movimento de <i>surge</i> da embarcação
$Sway$	$RAO$ referente ao movimento de <i>sway</i> da embarcação
$SWL$	Carga máxima de trabalho do cabo de instalação
$t$	Tempo
$t_{serie}$	Tempo de amostragem da série estatística
$t_{pre}$	Tempo de pré-simulação
$T$	Período
$T_z$	Período médio de cruzamento com o zero
$T_p$	Período de pico de energia de um espectro
$u, v, w$	Deslocamentos genéricos nas direções positivas do sistema de coordenada
$U, V, W$	Amplitude dos deslocamentos genéricos $u, v, w$
$V_c$	Velocidade de lançamento de cabo

$\mathbb{V}$	Volume do equipamento submarino
$\mathbf{w}^{el}$	Vetor dos deslocamentos nodais de um elemento
$x, y, z$	Sistema de coordenadas
$x_p, y_p, z_p$	Cotas do ponto de içamento ao centro de gravidade da embarcação
$Yaw$	$RAO$ referente ao movimento de $yaw$ da embarcação
$Z$	Variável auxiliar
$\alpha$	Movimento de rotação qualquer da embarcação
$\beta$	Ângulo entre a direção de propagação da onda e o eixo $x$ positivo
$\gamma$	Parâmetro de forma adimensional
$\delta$	Parâmetro do algoritmo de Newmark
$\varepsilon$	Deformação
$\epsilon$	Tolerância do algoritmo de Newton-Raphson
$\zeta$	Elevação da onda
$\zeta_a$	Amplitude da onda
$\zeta_{max}$	Amplitude de onda máxima mais provável
$\zeta_s$	Amplitude significativa da onda
$\eta$	Parâmetro do algoritmo de Newmark
$\theta$	Fase da onda
$\lambda$	Comprimento de onda
$\mu$	Viscosidade dinâmica
$\xi$	Fator de amortecimento
$\rho$	Massa específica da água do mar
$\varrho$	Coefficiente de influência da massa do cabo
$\sigma$	Desvio padrão de uma variável aleatória
$\sigma_{zz}$	Tensão axial de um elemento

$\tau$	Parâmetro de largura espectral
$\varphi$	Diferença de fase entre a embarcação e a onda incidente
$\phi$	Diferença de fase entre o equipamento e o ponto de içamento
$\psi$	Função de interpolação
$\omega$	Frequência angular
$\omega_n$	Frequência angular de ressonância do sistema
$\omega_p$	Frequência angular de pico de energia
$\Delta$	Variação de uma dada variável
$\Lambda$	Fator de frequência
$\Psi$	Resíduo
$\Omega_e$	Domínio de um elemento de cabo
$a, b, c$	Variáveis auxiliares para resolução de equação de segundo grau
$\ell$	Variável auxiliar para avaliação de comprimento de cabo
$Z$	Variável auxiliar para cálculo do deslocamento do equipamento
$\  \quad \ $	Norma de um vetor
$( \quad )_i$	Índice representando um dado nó para um sistema discretizado
$( \quad )^n$	Índice representando um dado instante de tempo discretizado
$( \quad ) \dot{\quad}$	Derivada no tempo de uma dada variável
$( \quad ) \ddot{\quad}$	Segunda derivada no tempo de uma dada variável
$( \quad ) \underline{\quad}$	Previsão de uma dada variável

# Sumário

1.	Introdução .....	22
1.1	Equipamentos Submarinos Típicos .....	22
1.2	Métodos de Instalação de Equipamentos Submarinos.....	24
1.2.1	Sonda com <i>riser</i> rígido.....	24
1.2.2	Múltiplas lingas .....	25
1.2.3	Instalação direta com cabo .....	26
1.2.4	Transferência de carga submarina .....	26
1.2.5	Método da roldana .....	27
1.2.6	Método pendular .....	27
1.2.7	Boia lastreável .....	28
1.3	Sistemas de Compensação de <i>Heave</i> .....	29
1.3.1	Compensadores ativos de <i>heave</i> .....	29
1.3.2	Compensadores passivos de <i>heave</i> .....	30
1.4	Etapas de Análise.....	30
1.5	Desafios da Instalação de Equipamentos Submarinos.....	31
1.6	Objetivo .....	32
1.7	Descrição da Dissertação .....	32
2.	Revisão bibliográfica.....	34
2.1	Métodos e Exemplos de Instalações de Equipamentos Submarinos .....	34
2.2	Desenvolvimento de Sistemas de Instalação Baseados em Cabos Sintéticos .....	35
2.3	Metodologias de Análise.....	38
2.4	Compensadores de Heave .....	41

2.5	Metodologias para Avaliação de Cabos com Comprimento Variável.....	42
2.6	Discussão.....	43
3.	Metodologias de análise para instalação de equipamentos submarinos.....	45
3.1	Ondas Superficiais Oceânicas .....	46
3.1.1	Ondas regulares .....	46
3.1.2	Ondas irregulares .....	47
3.1.3	Espectros de Energia da Onda .....	49
3.1.4	Espectros de Energia Padrão .....	50
3.1.5	Determinação da série temporal irregular a partir do espectro .....	52
3.1.6	Diagrama de ocorrência .....	53
3.2	Dinâmica de Embarcações .....	54
3.2.1	Movimentos de uma embarcação .....	54
3.2.2	RAO ( <i>Response Amplitude Operator</i> ).....	55
3.2.3	Translação do RAO .....	56
3.2.4	Resposta da embarcação para mar irregular.....	57
3.3	Forças Hidrodinâmicas .....	58
3.4	Modelo Simplificado com Comprimento Fixo (MS-CF) .....	59
3.5	Modelo em Elementos Finitos com Comprimento Fixo (MEF-CF) .....	63
3.6	Modelo Simplificado com Comprimento Variável (MS-CV).....	69
3.7	Método de Newmark Preditor-Corretor.....	74
3.8	Modelagem Estatística .....	79
3.9	Modelagem no Orcaflex.....	80
3.10	Definição da Janela Operacional.....	80
4.	Resultados.....	83
4.1	Validação dos Modelos de Ondas Oceânicas.....	83
4.2	Validação dos Modelos de Dinâmica da Embarcação.....	88

4.3	Validação do MEF-CF .....	94
4.4	Comparação dos modelos considerando comprimento fixo de cabo.....	98
4.5	Influência da velocidade de lançamento/recuperação do cabo .....	105
4.5.1	Resposta do Sistema sem Excitação Oceânica.....	105
4.5.2	Carga dinâmica para onda regular .....	108
4.5.3	Carga dinâmica para onda irregular.....	113
4.5.4	Comentários.....	114
4.6	Janela Operacional.....	118
5.	Conclusão .....	122
ANEXO A	– RAO da Embarcação de Instalação ( $\beta = 165^\circ$ ).....	132

## 1. INTRODUÇÃO

O início da exploração comercial de petróleo ocorreu nos Estados Unidos em 1859 após a perfuração pioneira de um poço por Edwin Drake (THOMAS, 2001). Durante o final do século XIX e início do século XX, a produção de petróleo se concentrou principalmente em campos em terra, sobretudo nos Estados Unidos. A partir da década de 1960, intensificou-se a exploração offshore de petróleo, especialmente no Golfo do México, Mar do Norte e na Bacia de Campos, no Brasil (HANSEN; RICKEY, 1994). Inicialmente, a exploração se concentrou em lâminas d'água rasas, sendo que os poços eram construídos por completação seca a partir de uma plataforma fixa. A descoberta de novos campos expandiu a fronteira de produção offshore para locais mais distantes da costa e com lâminas d'água mais profundas, forçando a indústria a desenvolver novas tecnologias que viabilizassem a exploração e produção desses campos.

Arelada à necessidade de se produzir petróleo em ambientes offshore, existe a necessidade de se instalar dutos e equipamentos no solo marinho, visando controlar a produção e transportar os hidrocarbonetos produzidos do fundo do mar até a superfície. As operações de instalação de equipamentos submarinos representam uma parcela considerável do investimento que deve ser realizado para viabilizar um campo de produção de petróleo offshore, especialmente devido à utilização de embarcações dedicadas com taxa diária elevada. Este será o tópico principal a ser abordado nesta dissertação.

A sequência deste capítulo irá apresentar uma breve revisão dos tipos de equipamentos submarinos e também dos métodos existentes para sua instalação. Além disso, serão apresentados os desafios relativos ao tema e o objetivo desta dissertação.

### 1.1 Equipamentos Submarinos Típicos

Os principais equipamentos submarinos necessários à produção de hidrocarbonetos em ambientes offshore são conhecidos como árvores de natal molhada, manifolds, estações de bombeio e estações de processamento submarino. Além desses, existem outros equipamentos com funções auxiliares, tais como: estruturas de proteção, *skids* para conexão de linhas hidráulicas e elétricas, módulos recuperáveis, âncoras, entre outros.

A Árvore de Natal Molhada (ANM) é um componente de segurança a ser instalado na cabeça

do poço de petróleo (localizado em ambiente submerso), com o objetivo de controlar sua produção/injeção. É composta por válvulas e sensores operados remotamente. Um exemplo de ANM está apresentado na Figura 1.1.



Figura 1.1: Árvore de Natal Molhada típica (Petrobras: Fatos e Dados, 2015).

Conforme definido na norma ISO 13628-15, um manifold (Figura 1.2) é um sistema de tubulações, conexões e válvulas usado para agrupar fluidos produzidos ou distribuir fluidos injetados em sistemas submarinos de produção de óleo e gás. Ele pode ser dotado de meios para testar ou realizar serviços em poços, além de também poder contar com sistemas de controle e instrumentação. Seus componentes podem ser integrados à sua estrutura ou montados em módulos separados, para instalação ou recuperação futura.



Figura 1.2: Manifold submarino típico (TecPetro, 2014).

Estações de bombeio têm como função aumentar a pressão nas linhas de produção, visando o aumento das vazões de óleo produzido. Por outro lado, estações de processamento submarino (Figura 1.3) permitem realizar o tratamento de fluidos produzidos ou injetados, podendo atuar separando fases ou removendo impurezas. Esses equipamentos são, em geral, mais complexos que os equipamentos padrões (ANMs e manifolds).



Figura 1.3: Estação de processamento submarino típico (PetroNotícias, 2013).

A Tabela 1.1 apresenta dados geométricos típicos para diversos equipamentos submarinos. Esses dados são de suma importância para avaliação das operações de instalação, como será visto na sequência deste trabalho.

Tabela 1.1: Dados geométricos típicos para equipamentos submarinos.

<b>Equipamento</b>	<b>Massa (t)</b>	<b>Área de base (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Altura (m)</b>
ANM	30 a 60	15 a 30	2 a 4
Manifold	60 a 400	50 a 250	3 a 7
Estação de bombeio	40 a 100	50 a 150	3 a 5
Estação de processamento	50 a 500	50 a 400	3 a 10
Skids de conexão de linha	1 a 10	2 a 30	1 a 2

## 1.2 Métodos de Instalação de Equipamentos Submarinos

### 1.2.1 Sonda com *riser* rígido

O método de instalação com sonda com *riser* rígido (Figura 1.4) consiste em se conectar o equipamento submarino a diversos trechos independentes de tubos de aço conectados sucessivamente. A sonda realiza a descida de um tubo e o conecta em um suporte para que outro tubo seja adicionado à coluna. O processo continua até que a coluna de tubos atinja a profundidade para assentamento do equipamento no solo marinho.

Esse método gera baixas cargas dinâmicas no sistema, pois a sonda é bastante estável (em comparação com as outras embarcações) e também pela alta rigidez axial da coluna. Além disso, a orientação do equipamento para seu assentamento pode ser gerada diretamente pelo giro da coluna. Apesar dessas vantagens, a operação é bastante lenta, a diária da embarcação é elevada e a disponibilidade de sondas para esse tipo de operação é baixa, resultando em operações com custo elevado.

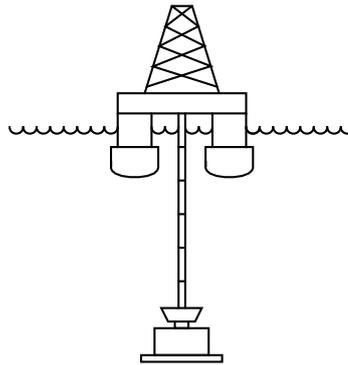


Figura 1.4: Instalação de equipamento submarino por sonda com *riser* rígido.

### 1.2.2 Múltiplas lingas

Esse método (Figura 1.5) consiste em utilizar uma embarcação com guindaste de lâmina d'água rasa em conjunto com lingas<sup>1</sup> para instalar o equipamento. De forma semelhante ao método anterior, a embarcação realiza a descida de uma linga e conecta o sistema em um suporte para que outra linga seja conectada. A diferença desse método para a sonda com *riser* rígido é que são utilizados cabos em vez de tubos nessa opção.

Dependendo da capacidade de carga do guindaste em questão, é possível instalar equipamentos de grande porte em águas profundas. Entretanto, semelhantemente ao método anterior, a operação é lenta e a disponibilidade de embarcações com guindaste de grande capacidade de carga também é limitada, resultando em operações com custo elevado. Além disso, é necessário um método para aproamento do equipamento antes do assentamento, uma vez que não é possível gerar giro no equipamento com precisão através de cabos.

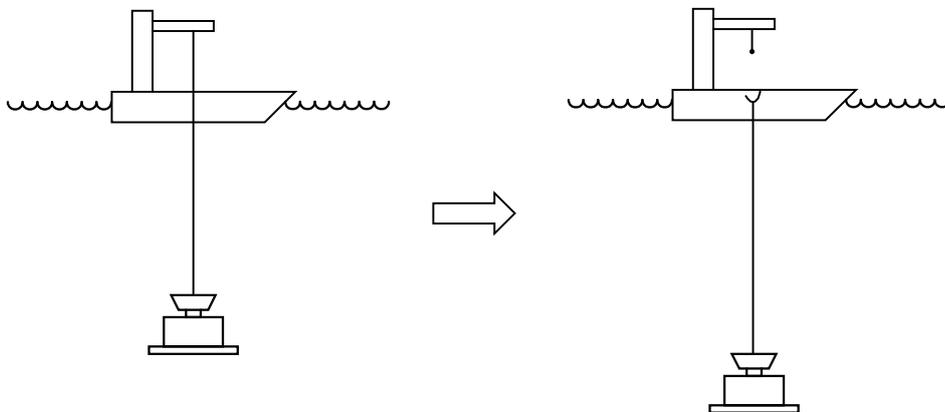


Figura 1.5: Instalação de equipamento submarino por múltiplas lingas.

<sup>1</sup> Lingas são trechos de cabos de aço utilizados para movimentação de carga.

### 1.2.3 Instalação direta com cabo

Esse método (Figura 1.6) consiste em lançar o equipamento diretamente até o leito marinho a partir do guindaste. É o método mais simples e rápido que existe, de forma que é a primeira opção a ser considerada para uma operação de instalação.

Nesse caso, o cabo do guindaste pode estar em uma configuração em *single fall* ou em *double fall*<sup>2</sup> – aumentando a capacidade de carga, mas restringindo a profundidade máxima alcançada.

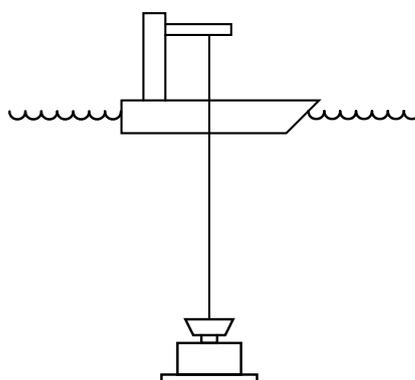


Figura 1.6: Instalação direta com cabo.

### 1.2.4 Transferência de carga submarina

Esse é uma adaptação do método direto, sendo utilizado em situações em que existe violação dos limites estruturais dos cabos ao longo da lâmina d'água de instalação. Para evitar esse problema, é conectado um trecho de cabo usualmente mais flexível (poliéster em geral) em série com o cabo de aço. Essa operação (Figura 1.7) é feita a partir da transferência do equipamento, em uma dada lâmina d'água, do guindaste para um guincho (na mesma ou em outra embarcação) que já conta com o trecho de cabo mais flexível.

Esse método possibilita uma redução considerável das cargas dinâmicas após a introdução do tramo flexível, facilitando inclusive a operação de assentamento. Entretanto, é necessário possuir o cabo adicional e também uma embarcação com guincho auxiliar (além do guindaste) ou utilizar duas embarcações durante a operação (o que a torna mais cara e com requisitos de compatibilização de cronograma entre as embarcações).

<sup>2</sup> A configuração em *single fall* indica que o cabo estará conectado diretamente ao equipamento. Enquanto que *double fall* indica que o cabo estará conectado a uma roldana próximo ao equipamento, de forma que, na prática, existirão dois cabos em paralelo sustentando o equipamento.

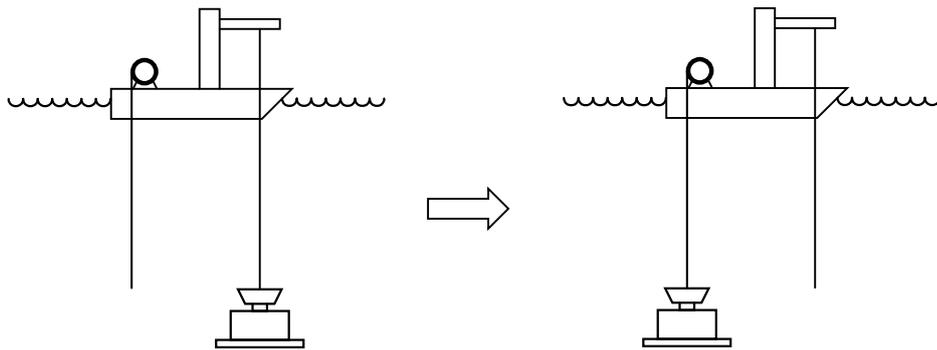


Figura 1.7: Instalação de equipamento submarino por transferência de carga submarina.

### 1.2.5 Método da roldana

Esse método (Figura 1.8) é semelhante à instalação direta na configuração *double fall*; entretanto, são utilizadas duas embarcações, cada uma sustentando uma das pontas do cabo. Nesse caso, é necessário que uma das embarcações possua um guindaste (para realizar o *overboarding* do equipamento) e também um guincho (para sustentar o equipamento pela roldana).

Esse método permite o alcance de lâminas d'água mais profundas, mesmo na configuração *double fall*, uma vez que é possível unir os cabos dos guinchos das duas embarcações. Entretanto, pela necessidade de se utilizar duas embarcações, seu custo pode ser elevado.

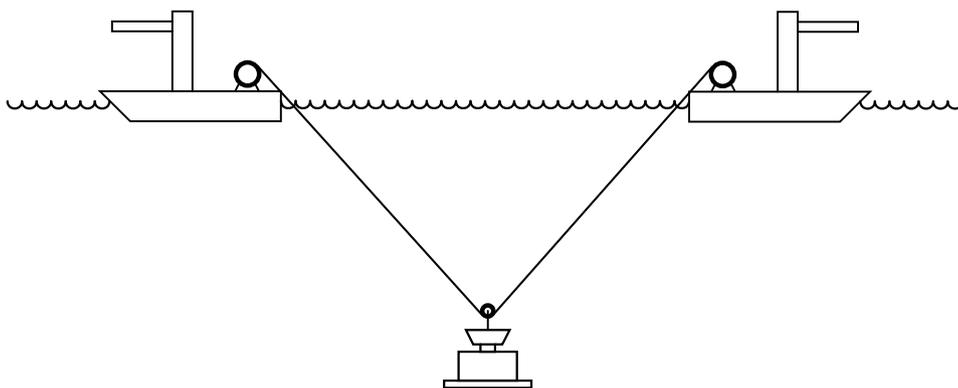


Figura 1.8: Instalação de equipamentos submarinos pelo método da roldana.

### 1.2.6 Método pendular

O método pendular (Figura 1.9) consiste em instalar o equipamento a partir de um movimento pendular do equipamento da superfície até próximo ao leito marinho. Nesse caso, a etapa de entrada do equipamento na água pode ser realizada utilizando-se um guindaste, uma balsa alagável ou uma rampa de lançamento.

Esse método evita problemas de ressonância ao longo da descida, entretanto o equipamento deve ser projetado para evitar instabilidades hidrodinâmicas que podem resultar em movimentos caóticos do equipamento durante o pêndulo.

Em especial, no caso de se utilizar a entrada na água por rampa de lançamento, o método necessita apenas de duas embarcações de pequeno porte, reduzindo o custo total da instalação, além de viabilizar instalação de equipamentos de grande porte em lâminas d'água ultra profundas. Entretanto, diferentemente dos métodos anteriores, esse método não pode ser utilizado para recuperação de equipamentos e também não necessariamente facilita a etapa de assentamento do equipamento no fundo do mar.

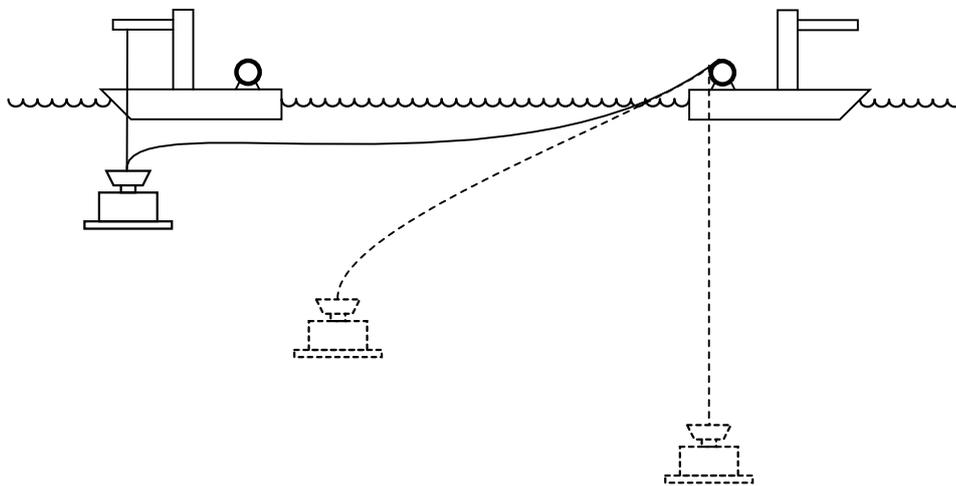


Figura 1.9: Método pendular para instalação de equipamentos submarinos.

### 1.2.7 Boia lastreável

Esse método (Figura 1.10) consiste em se conectar o equipamento a uma boia lastreável em águas abrigadas. Posteriormente, a embarcação instaladora realiza o transporte da boia com o equipamento até o local da instalação. Finalmente, o equipamento é descido até o leito marinho através do lastreamento da boia.

Esse método elimina problemas de ressonância durante a descida e também não necessita de embarcações caras. Entretanto, é necessário possuir um local apropriado para realizar a conexão do equipamento na boia (nem todos os cais possuem lâmina d'água suficiente para a operação). Além disso, deve-se analisar a operação de reboque, uma vez que esta pode restringir os estados de mar para a operação de transporte.

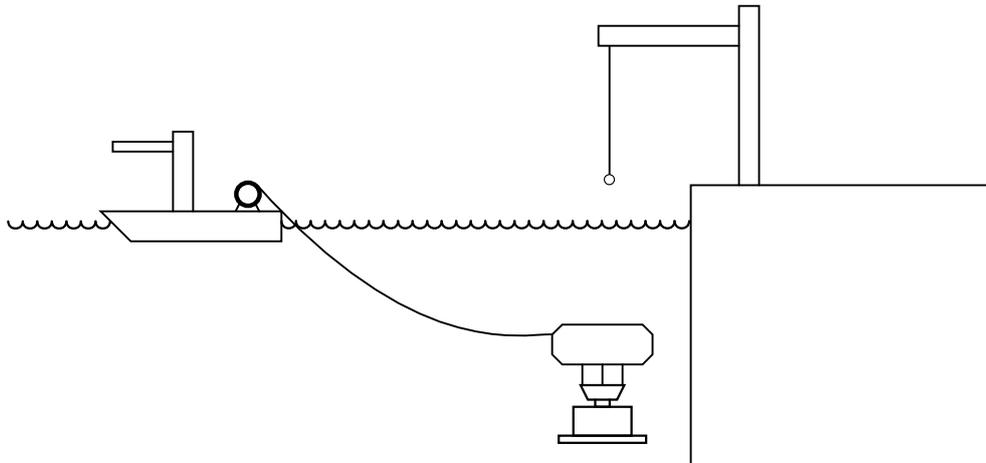


Figura 1.10: Instalação de equipamentos submarinos utilizando uma boia lastreável.

### 1.3 Sistemas de Compensação de *Heave*<sup>3</sup>

Um ponto importante a ser considerado nas operações de instalação de equipamentos submarinos é a amplificação dinâmica de esforços no cabo de instalação que ocorre devido à excitação cíclica das ondas sob a embarcação. De forma a reduzir essa amplificação, foram desenvolvidos alguns sistemas para compensação de *heave*.

#### 1.3.1 Compensadores ativos de *heave*

O método de compensação ativa de *heave* visa eliminar a influência dos movimentos da embarcação no cabo de instalação a partir de um sistema de controle em malha fechada e com atuadores com alimentação externa de energia. A atuação, neste caso, é feita a partir do controle de lançamento e recolhimento da linha, por meio de cilindros pneumáticos ou motores do sistema de guincho.

Esses sistemas, em geral, possuem dois modos de atuação:

- Compensação de *heave*, em que a lógica de controle visa reduzir as oscilações verticais do equipamento;
- Controle de tensão, em que o objetivo é manter uma tensão constante no cabo de instalação.

<sup>3</sup> *Heave* é o movimento de translação da embarcação na direção vertical.

### 1.3.2 Compensadores passivos de *heave*

Nesse tipo de sistema, a atuação ocorre através de mecanismos que não necessitam de aporte externo de energia. Em geral, são utilizados componentes que alteram a rigidez e o amortecimento do sistema, visando atenuar as cargas dinâmicas. Além disso, o sistema passivo pode estar montado tanto na embarcação quanto no cabo de instalação, próximo ao equipamento.

## 1.4 Etapas de Análise

Qualquer operação de instalação de equipamentos submarinos precisa ser analisada previamente, de forma a se determinar sua viabilidade técnica e também sua janela operacional<sup>4</sup>. De acordo com a prática recomendada DNV-RP-H103 (2014b), as seguintes etapas devem ser analisadas em operações de instalação de equipamentos submarinos:

1. *Overboarding*;
2. Passagem do equipamento pela zona de atuação das ondas;
3. Içamento do equipamento ao longo da lâmina d'água;
4. Posicionamento e assentamento.

Durante a etapa de *overboarding*, a amarração<sup>5</sup> é removida e o equipamento passa a ser sustentado pelo guindaste. É realizado, então, o translado do equipamento para fora da embarcação, guiado por cabos guias ou estruturas de proteção. Nessa etapa, as principais limitações operacionais são devido às cargas máximas de impacto que podem ocorrer entre o equipamento e a embarcação devido a movimentos pendulares do bloco do guindaste e do equipamento.

A passagem do equipamento pela zona de atuação das ondas constitui um dos pontos críticos para a operação. Nesse caso, as forças geradas pelo impacto do equipamento na água e também as cargas hidrodinâmicas devida aos movimentos relativos entre o equipamento e as ondas geram carregamentos dinâmicos na estrutura do equipamento e nos cabos de instalação, podendo levar à violação dos limites estruturais de algum elemento de içamento e, consequentemente, à queda do equipamento.

Durante a etapa de içamento do equipamento ao longo da lâmina d'água, dois pontos são im-

---

<sup>4</sup> Janela de operacional (ou janela de instalação) é a uma tabela indicando quais estados de mar (combinação de altura e período de onda) em que uma dada operação pode ser realizada de forma segura.

<sup>5</sup> Amarração é o sistema utilizado para manter o equipamento fixo à embarcação durante seu transporte marítimo.

portantes de se verificar. O primeiro é a carga estática a qual o guindaste será submetido; uma vez que à medida que o equipamento atinge profundidades mais elevadas, o peso do trecho suspenso do cabo de instalação se torna maior. O segundo é que, além do aumento do peso suspenso, a rigidez do cabo é inversamente proporcional ao comprimento do cabo. Os dois efeitos levam à redução do período natural do sistema. Caso esse período se torne próximo ao período de excitação, ocorre o fenômeno de ressonância, o que leva a cargas dinâmicas elevadas no sistema. Novamente, o cenário de falha nesse caso é a possível queda do equipamento.

A última etapa é o posicionamento e assentamento do equipamento no solo marinho. Nesse caso, é importante garantir que o equipamento não apresente oscilações muito elevadas, de forma que a carga de impacto durante o assentamento não seja danosa ao equipamento.

Em operações de recuperação de equipamentos, a sistemática é semelhante; entretanto, inicia-se pelo içamento e liberação da fundação do solo, seguido por içamento do equipamento ao longo da lâmina d'água, passagem pela zona de atuação das ondas e *inboarding*.

## **1.5 Desafios da Instalação de Equipamentos Submarinos**

De forma geral, o desafio relativo à instalação de equipamentos submarinos é reduzir o custo total da operação, mantendo os requisitos de segurança. Isso pode ser alcançado de duas formas diferentes:

1. Melhoria das metodologias de análise existentes;
2. Desenvolvimento de métodos de instalação mais simples.

A melhoria das metodologias de análise é útil, pois permite realizar operações com janelas operacionais menos restritivas, mantendo-se os requisitos de segurança. Dessa forma, reduz-se o tempo de espera da embarcação, e conseqüentemente, o custo total da atividade.

O desenvolvimento de métodos de instalação mais simples permite a utilização de embarcações mais baratas para instalar um mesmo equipamento. Um exemplo característico é o método de instalação pendular sem guindaste, em que são necessárias apenas embarcações de apoio para instalar equipamentos de peso elevado em águas profundas.

## 1.6 Objetivo

Com base nos desafios apresentados anteriormente, o objetivo deste trabalho é atuar na melhoria das metodologias de análise existentes para instalação de equipamentos submarinos. Mais especificamente, o foco será na etapa de descida e recuperação do equipamento ao longo da lâmina d'água.

Historicamente, para se determinar a janela operacional da etapa de descida ou recuperação, são realizadas análises com o equipamento em posições fixas ao longo da lâmina d'água. Dessa forma, é possível verificar os esforços no cabo de instalação e determinar em quais profundidades ocorrem problemas de ressonância. Entretanto, operações reais ocorrem com o guindaste liberando ou recolhendo o cabo a uma dada velocidade, de forma que o equipamento não fica fixo em posições definidas.

Assim, o objetivo específico deste trabalho é propor um modelo simplificado visando avaliar a dinâmica do sistema cabo-equipamento com o comprimento de cabo suspenso variando ao longo da análise e, posteriormente, avaliar a influência da velocidade de lançamento ou recolhimento do cabo em operações de instalação ou recuperação de equipamentos submarinos, durante a etapa de içamento ao longo da lâmina d'água.

Como objetivos secundários, lista-se:

- Implementação de modelos para analisar ondas regulares e irregulares tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo;
- Implementação de modelos para avaliar a resposta de embarcações quando submetidas à excitação de ondas oceânicas;
- Implementação de um modelo simplificado e de um modelo em elementos finitos visando avaliar a dinâmica do sistema cabo-equipamento com o comprimento de cabo suspenso constante ao longo da análise.

## 1.7 Descrição da Dissertação

Visando atingir os objetivos propostos, a dissertação está organizada conforme descrito na sequência:

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre instalação de equipamentos submarinos. São abordados trabalhos referentes ao desenvolvimento de novos métodos de instalação,

metodologias para avaliar a viabilidade técnica da operação e também trabalhos referentes à análise de lançamento de cabos submarinos.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia a ser utilizada nesse trabalho. São apresentados métodos para se analisar ondas regulares e irregulares tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo; métodos para avaliar a dinâmica da embarcação e três modelos para análise de instalação de equipamentos submarinos: um modelo simplificado com comprimento fixo de cabo suspenso, um modelo em elementos finitos também considerando comprimento fixo de cabo suspenso e um modelo simplificado considerando a variação do comprimento do cabo suspenso ao longo da análise. Além disso, serão apresentados aspectos estatísticos para avaliação dos resultados obtidos, um algoritmo para integração dinâmica de equações não lineares e um procedimento para determinação da janela operacional.

O Capítulo 4 irá apresentar os resultados obtidos no trabalho. Primeiro, serão apresentados resultados para validação dos modelos propostos para a dinâmica das ondas e da embarcação. Na sequência, serão apresentados os resultados relativos à comparação dos modelos propostos em situações com comprimento suspenso fixo. Finalmente, será apresentada a influência da velocidade de lançamento durante operações de instalação e recuperação de equipamentos submarinos.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas neste estudo e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Métodos e Exemplos de Instalações de Equipamentos Submarinos

Apesar de se tratar de um tópico por vezes considerado confidencial pela indústria, alguns trabalhos podem ser encontrados na literatura aberta abordando métodos ou exemplos de instalação de equipamentos submarinos.

Roveri, de Oliveira e Moretti (1996) descrevem em seu artigo a instalação de um manifold de 420 ton a 620 m de profundidade através do método de múltiplas lingas com a embarcação BGL-1. Os autores realizaram análises no domínio da frequência e do tempo para planejamento da operação. Além disso, foram realizados ensaios para determinação dos coeficientes hidrodinâmicos a serem usados como dados de entrada para os modelos. A comparação dos dados obtidos em campo com os resultados dos modelos computacionais mostrou que havia concordância nos valores de deslocamento do equipamento, mas que as forças apresentavam discrepâncias, em especial devido à dificuldade em obter a massa adicional do equipamento.

O trabalho de Nelson et al. (1997) propõe um sistema de compensação de *heave*, conhecido como boia-corrente. Os autores argumentaram que o sistema foi avaliado por modelos simplificados de um grau de liberdade e por elementos finitos. Posteriormente, o sistema foi testado no campo de *Garden Banks* (Golfo do México), confirmando os resultados obtidos através de modelagem. Foi concluído que, cumpridas certas recomendações de ordem operacional, o sistema era eficiente e permitia o uso de embarcações mais simples para instalar e recuperar equipamentos submarinos.

Lima (2008) ilustra o processo de qualificação e instalação pioneira de um manifold pelo método pendular na Bacia de Campos. A qualificação do método de instalação contou com ensaios em modelos reduzidos e uma série de análises numéricas, variando diversos parâmetros-chaves como os coeficientes hidrodinâmicos. Além destas atividades, também foi realizado um teste em escala real que ressaltou a importância de utilização de mecanismos para evitar o giro do manifold durante sua queda livre. Por outro lado, Wang et al. (2013) descrevem as análises realizadas para instalação de um manifold pelo método pendular na China. Nesse caso, foi utilizado CFD para avaliação dos coeficientes hidrodinâmicos e softwares de análise dinâmica não linear para análise dos esforços nos cabos.

Os artigos de Mork e Lunde (2007), Risoey et al. (2007), Joensen e Paul (2011) e Cao et al.

(2016) ilustram as características de diversos métodos de instalação do tipo boia lastreável. Os trabalhos abordam a capacidade dos métodos em instalar e recuperar equipamentos com embarcações de baixo custo e janelas operacionais menos restritivas que em operações convencionais.

Por fim, os trabalhos de Frazer, Perinet e Vennemann (2005), Wang et al. (2012) e McPherson (2015) apresentam uma revisão dos métodos disponíveis de instalação de equipamentos submarinos à época em que foram escritos. Destaca-se, além disso, o detalhamento das embarcações capazes de realizar tais operações em Wang et al. (2012).

## **2.2 Desenvolvimento de Sistemas de Instalação Baseados em Cabos Sintéticos**

Durante o início do século XXI, os campos de exploração de petróleo offshore começaram a atingir profundidades da ordem de 2000 m. Entretanto, representantes das principais companhias de exploração de petróleo acreditavam que os métodos existentes naquela época para instalar equipamentos submarinos seriam incapazes ou inviáveis economicamente de serem utilizados nessas lâminas d'água. Além disso, os campos mais profundos que já tinham sido desenvolvidos até então contavam com condições ambientais favoráveis, de forma que os métodos de instalação de equipamentos que haviam sido utilizados nesses campos não poderiam ser automaticamente utilizados em ambientes mais hostis (STANDING; MACKENZIE; SNELL, 2002). Em face desse problema, algumas empresas decidiram formar um JIP<sup>6</sup> (*Joint Industry Project*) focado no desenvolvimento de tecnologias para instalação de equipamentos submarinos em águas profundas. Esse JIP recebeu o nome de DISH (*Deepwater Installation of Subsea Hardware*).

O projeto foi dividido em duas fases. A primeira fase teve como objetivo a identificação das principais lacunas existentes àquela época para atender às demandas dos dez anos seguintes. A segunda fase, por sua vez, teria como objetivo o desenvolvimento de novas tecnologias que pudessem eliminar as lacunas identificadas anteriormente.

Rowe, Mackenzie & Snell (2001) abordaram os principais pontos que poderiam ser investigados no JIP, sendo estes divididos em três grandes áreas: tecnologias de içamento; posicionamento e controle; e efeitos meteoceanográficos e janelas operacionais. Para a área de tecnologias de içamento, ressaltou-se o aumento de peso do cabo de instalação à medida que as pro-

---

<sup>6</sup> JIP (*Joint Industry Project*) é um projeto de pesquisa e/ou desenvolvimento realizado por diversas empresas em parceria, com o intuito de desenvolver um tema específico que seja de interesse de todas as partes envolvidas, compartilhando custos e resultados.

fundidades aumentam, dificuldades de fabricar trechos suficientemente longos de cabos de aço, possibilidade de torção do cabo quando tracionado, viabilidade de uso de módulos de flutuação, efeitos dinâmicos resultantes de cargas hidrodinâmicas e efeitos da correnteza na dinâmica do sistema. No tema de posicionamento e controle foi abordada a possível necessidade de sistemas para posicionamento do equipamento antes do assentamento, transferência de dados entre o equipamento e a embarcação e interação do equipamento com o solo durante o assentamento e recuperação. Por fim, com relação ao tema de efeitos meteoceanográficos e janelas operacionais, foi abordado o aumento de tempo de instalação e possibilidade de não ser encontrado estados de mar capazes de viabilizar a operação como um todo.

Conforme detalhado por Standing, Mackenzie e Snell (2002), após análise dos pontos listados anteriormente, as principais lacunas identificados na fase 1 do JIP foram:

- Capacidade limitada dos sistemas de instalação que utilizam cabos de aço para instalar equipamentos em profundidades superiores a 2000 m.
- Dificuldade para estimar propriedades hidrodinâmicas dos equipamentos submarinos, em especial a massa adicional de equipamentos complexos.

Os autores detalham que, como possível solução para o primeiro problema, o JIP sugeriu o desenvolvimento de sistemas de instalação que tivessem como base o uso de cabos sintéticos, já que os mesmos possuem peso submerso praticamente neutro. E para o segundo, seria necessária a realização de ensaios para determinação das propriedades hidrodinâmicas de equipamentos submarinos.

Conforme Beckman (2005) e Torben et al. (2008), durante a segunda fase do projeto, foram realizados diversos ensaios laboratoriais para determinação do comportamento de cabos sintéticos com relação à fadiga, atrito em polias, deformações, amortecimento, fluência, entre outros. Após testes com três tipos de cabos, concluiu-se que o cabo BOB (*Braid Optimized for Bending*), consistindo de um composto de HMPE (*High Modulus Polyethylene*) e LCP (*Liquid Crystal Polymer*), seria a solução mais adequada. Além dos trabalhos relacionados ao cabo, também foram analisadas metodologias para determinação de coeficientes hidrodinâmicos a partir de CFD, o que se mostrou uma técnica efetiva.

Outro JIP foi criado em 2002 para o desenvolvimento de um sistema de instalação de equipamentos submarinos com cabos sintéticos (FRDS – *Fiber Rope Deployment System*). Esse JIP foi nomeado VP2002. De acordo com Ingeberg *et al* (2006), um sistema desse tipo foi desenvolvido para uma carga de trabalho de 50 t em 3000 m de profundidade. O sistema funciona

com o cabo passando por uma série de polias antes de ser bobinado, permitindo que se mantenha uma tensão baixa e constante durante seu recolhimento. Também possui modo de operação com controle ativo de *heave* e com tensão constante, assentamento/recuperação automática e monitoramento de dados de integridade do cabo. O cabo utilizado foi o BOB, testado anteriormente no escopo do DISH. As funcionalidades do sistema foram avaliadas por testes em campo com um equipamento de 35 t indicando que: não era observável torção do cabo durante operação; o sistema de compensação de *heave* era capaz de reduzir os movimentos em mais de 90% para diferentes períodos e amplitudes e o sistema de operação ativa com tensão constante era capaz de manter a tensão no limite de  $\pm 2$  tf. Posteriormente aos testes em campo, o sistema foi empregado para a instalação de uma âncora gravitacional de 35 t com a embarcação *Geoffjord* no campo de *Ormen Lange* a 855 m de profundidade. A operação ocorreu de forma satisfatória, demonstrando a capacidade do sistema de compensação de *heave* em reduzir as oscilações do equipamento durante a descida e o assentamento.

Torben (2007) detalha outras operações realizadas com o FRDS realizadas no Golfo do México. No total, tinham sido previstas a instalação de aproximadamente 100 equipamentos em lâminas d'água entre 2500 e 2750 m com a embarcação *Toisa Perseus*. Nesse caso, um dos aspectos-chaves foi a utilização de metodologias para gestão da integridade do cabo sintético. Até a data da publicação do artigo, o sistema tinha realizado 60 instalações, tendo consumido 40% da vida útil do cabo e também demonstrando a capacidade de redução dos tempos globais das operações.

Posteriormente, Torben *et al* (2008) apresentaram novos resultados sobre o FRDS. Após 6 meses de uso e de 140 instalações concluídas, foi realizada a primeira inspeção do cabo sintético. Não foi encontrada nenhuma fibra rompida ou danificada e as camadas mais externas também estavam em boas condições. Nesse artigo também foi apresentado o planejamento de um novo projeto considerando o aumento de capacidade do FRDS para 125 ton que também seria capaz de trabalhar em *double fall* em até 3000 m de profundidade, resultando em uma capacidade total de 250 ton.

O sistema escalonado para 250 ton foi testado em 2009, conforme explicam Torben *et al* (2011). Os testes foram realizados com a embarcação *Skandi Santos* no mar do Norte, com uma carga de 100 ton e em uma profundidade de 940 m. A principal preocupação com esse novo sistema seria a torção dos cabos durante a instalação, entretanto, os testes mostraram que a torção se manteve dentro dos limites estabelecidos para todos os cenários analisados.

## 2.3 Metodologias de Análise

Os primeiros trabalhos abordando aspectos teóricos relacionados à instalação de cargas em ambientes submarinos datam da década de 1960. A consultoria Arthur D. Little (1963) apresentou um relatório que trata de forma detalhada diversos aspectos essenciais para a instalação de equipamentos submarinos. Foi apresentada uma fórmula para a carga estática ao longo do cabo e foram feitas comparações para situações utilizando cabos de aço e de nylon, ressaltando-se a preferência pela utilização de cabos de aço. Com relação à influência da correnteza, foram apresentados argumentos justificando sua baixa influência na dinâmica do sistema quando a força vertical líquida (peso menos empuxo) é suficientemente maior que a força exercida pela correnteza. Também foi apresentado um modelo para a análise da dinâmica do cabo em função dos movimentos da embarcação. Esse modelo foi baseado na equação da onda para um cabo contínuo e foram feitas simplificações considerando que: o cabo permanece sempre tracionado; a dinâmica da embarcação e do cabo pode ser desacoplada e o arrasto no equipamento pode ser linearizado (o arrasto no cabo pode ser considerado desprezível caso exista amortecimento de intensidades maiores atuando no sistema). Foi argumentada, além disso, a importância da análise da influência do estado de mar na dinâmica da embarcação, demonstrando que o içamento do cabo em um ponto próximo ao centro de gravidade da embarcação seria mais adequado às operações de instalação. Por fim, apresentou-se um modelo simplificado para avaliar se o cabo iria flambar devido às cargas dinâmicas.

Baseado no trabalho da consultoria Arthur D. Little, Holmes (1966) construiu uma metodologia para determinação dos esforços no cabo de instalação em função das condições de mar. O autor, entretanto, argumentou que seria necessário realizar medições em operações reais para validação do modelo.

Posteriormente, Iwan (1972) modelou o problema a partir da discretização do cabo de instalação e propôs um método de análise capaz de obter respostas harmônicas em regime permanente e também a resposta aleatória estacionária, resultante de um estado de mar real. Possivelmente, este foi o primeiro trabalho a abordar de forma sistêmica as questões estatísticas.

Rowan e Ahilan (1989) apresentaram um modelo considerando o acoplamento da embarcação, do cabo e do equipamento. Para isso, foi considerado um sistema com três graus de liberdade: o *heave* e o *roll* da embarcação e o deslocamento vertical do equipamento. A força de arrasto no equipamento foi linearizada e o problema foi resolvido do domínio da frequência. Os resultados obtidos através do modelo proposto mostraram concordância para os esforços

no cabo da ordem de 20% com relação a dados experimentais. Outro ponto notável deste artigo foi a descrição de diversos métodos de instalação de equipamentos submarinos, abordando suas vantagens e desvantagens.

Um dos artigos mais influentes sobre análises de instalação de equipamentos submarinos foi escrito por Niedzwecki e Thampi (1991). Neste trabalho, os autores modelaram o problema a partir de um sistema com um grau de liberdade. Após linearizar a força de arrasto, foi obtida uma solução fechada capaz de prever se o sistema irá trabalhar tracionado ou se irá solecar. Esse resultado gerou impacto relevante nas operações reais, pois permitiu que fosse verificada de forma rápida a viabilidade de uma série de operações. Além disso, foi apresentado um modelo com múltiplos graus de liberdade para verificar os esforços no cabo mesmo em situações que ele perde tração. Nesse caso, foi considerada que a rigidez do cabo se torna nula quando ele soleca. Os resultados apresentados pelos autores ressaltaram a importância de se definir corretamente o valor da massa adicional, uma vez que esta possui influência significativa na resposta do sistema.

Driscoll, Lueck e Nahon (2000) construíram um modelo de análise unidimensional baseado no método dos elementos finitos para avaliar a dinâmica de um ROV *cage mounted*<sup>7</sup>. O modelo considerou uma matriz de massa concentrada, as forças de arrasto na sua forma não linear e a possibilidade de avaliar cargas devido ao solecamento do cabo. Os autores também utilizaram uma metodologia para obter os parâmetros dos sistemas a partir de dados obtidos no campo. Os resultados obtidos pelo modelo foram comparados com dados de campo, indicando aderência entre eles.

Outros trabalhos também consideraram metodologias para avaliar a cargas de impacto devido ao solecamento de cabos submarinos. Huang e Vassalos (1993), Vassalos e Huang (1996) e Plaut, Archilla e Mays (2000) são exemplos de modelos que consideram rigidez axial nula para o cabo quando ele perde tração. Por outro lado, Tjavaras et al. (1998) e Buckham, Driscoll e Nahon (2004) consideram rigidez de flexão (e de torção no trabalho de Buckham et al.) para o cabo destracionado, resultando em modelos mais próximos da realidade.

O trabalho de Cerqueira (1998) apresenta uma modelagem para operações de instalação de equipamentos submarinos com cabos ou linhas flexíveis a partir de um modelo de um grau de

---

<sup>7</sup> ROV (*Remotely Operated Vehicle*) é um robô capaz de realizar inspeções e intervenções em sistemas submarinos, sendo controlado remotamente a partir da superfície. No ROV *cage mounted*, existe uma gaiola entre o ROV e a embarcação, permitindo certo desacoplamento dos movimentos da embarcação e dando maior controle ao ROV. Além disso, durante as operações de lançamento e recuperação, o ROV fica alojado dentro da gaiola, aumentando a segurança da operação.

liberdade. O autor apresenta várias análises, verificando a influência de parâmetros chaves para a resposta do sistema, tais como correnteza, rigidez, profundidade, massa do corpo e da linha, entre outros.

Até então, os trabalhos publicados relacionados a metodologias de análise tratavam de forma mais específica a etapa de descida do equipamento até o leito marinho. Entretanto, Kopsov e Sandvik (1995) apresentaram um trabalho abordando de forma detalhada cada uma das etapas que deveriam ser avaliadas: içamento no deck da embarcação, passagem pela zona de atuação das ondas, descida ao longo da lâmina d'água e assentamento no solo. Para realizar as análises, os autores consideraram uma rotina computacional capaz de realizar análises não lineares no domínio do tempo. Os coeficientes hidrodinâmicos foram considerados variáveis em situações próximas às fronteiras (interface ar-água e interface água-solo). Além de tratar dos aspectos teóricos de cada etapa, o trabalho abordou quais seriam os critérios de projeto que deveriam ser atendidos para indicar a viabilidade da operação. Em especial, os resultados das análises mostraram que a passagem do equipamento pela zona de atuação das ondas era a etapa mais crítica da operação, sendo que, neste caso, os movimentos da embarcação possuem influência menor que a dinâmica das ondas nos esforços resultantes no sistema, principalmente em períodos mais baixos.

Em 1996, a sociedade classificadora DNV lançou um conjunto de regras conhecido como *Rules for Planning and Execution of Marine Operations* (DET NORSKE VERITAS, 1996), abordando, dentre outros tópicos, operações de içamento submarino. Esse conjunto de regras passou por algumas revisões e a parte envolvendo metodologias para análise de instalação de equipamentos submarinos foi agrupada na prática recomendada DNV-RP-H103 (2014b), publicada inicialmente em 2009. Dentre os tópicos abordados pela prática recomendada, citam-se metodologias simplificadas para avaliação do equipamento em todas as etapas de análise necessárias e meios de se calcular os coeficientes hidrodinâmicos para equipamentos submarinos típicos. Além disso, são apresentadas recomendações para utilização de modelos dinâmicos não lineares de forma coerente.

Apesar do extenso uso por parte da indústria das normas da DNV, o trabalho apresentado por Thiagarajan e Yann (2001) argumenta que sua utilização necessita de avaliação cautelosa e experiência por parte do usuário, em especial na definição dos coeficientes hidrodinâmicos.

O trabalho realizado por Cermelli et al. (2003) aborda o desenvolvimento de um modelo de um grau de liberdade para análise da etapa de assentamento no solo marinho. Aspectos esta-

tísticos foram levados em consideração no modelo, uma vez que foram considerados estados de mar irregular como dados de entrada. Após comparação com resultados de campo, foram encontrados desvios nas respostas do modelo. Os autores argumentaram que essas diferenças poderiam ser oriundas de amortecimento no cabo (que não foi considerado no modelo) e/ou dificuldades em obter dados realísticos sobre a massa adicional do equipamento.

Recentemente, diversos trabalhos relacionados à instalação de equipamentos submarinos foram realizados baseados em análises de interação fluido-estrutura. Bunnik e Buchner (2004) e Bunnik, Buchner e Veldman (2006) utilizaram uma metodologia conhecida como iVOF (*Improved Volume of Fluid Method*) enquanto que Park, Kim e Nam (2013) e Jia e Agrawal (2014) utilizaram CFD para avaliar a dinâmica do equipamento e cabos de instalação durante a passagem do equipamento pela zona de atuação das ondas. Essas análises, apesar de apresentarem maior capacidade de prever a dinâmica de equipamentos com geometria complexa, resultam em tempos de análise proibitivos quando se consideram todos os estados de mar que devem ser avaliados na definição de uma janela operacional real.

Outra abordagem para análise da passagem pela zona de atuação das ondas é utilizar pacotes computacionais para análises dinâmicas não lineares e incluir as forças externas no equipamento representado a interação com as ondas. Gordon, Grytoyr e Dhaigude (2013) utilizaram o software SIMO (DET NORSKE VERITAS, 2012) para tal, além de apresentarem uma comparação com modelos simplificados apresentados na prática recomendada DNV RP H103 (2014b). Esse tipo de análise apresenta correspondência com dados reais melhor que modelos simplificados e o tempo de análise necessário para definir a janela operacional é viável em termos práticos.

Outro software utilizado recentemente para analisar a instalação de equipamentos submarinos é o Orcaflex (ORCINA, 2016). Os trabalhos de Keprate (2015) e Keprate e Mohammed (2016) ilustram sua utilização. A metodologia empregada pelo software para análises do sistema consiste em considerar o cabo como um sistema discretizado do tipo massa concentrada capaz de lidar com cargas devido ao solecamento do cabo e forças hidrodinâmicas tanto na zona de atuação das ondas quanto na descida e assentamento do equipamento.

## **2.4 Compensadores de Heave**

Apesar de não constituir objeto de estudo desta dissertação, a utilização de compensadores de heave é de suma importância prática. Os trabalhos de Driscoll, Nahon e Lueck (2000), Presley

e Koutsoukos (2011) e Nascimento (2014) abordam a influência do uso de sistemas de compensação passiva de heave em operações de içamento offshore. Todos estes trabalhos ilustram a eficiência do sistema em reduzir cargas dinâmicas e aumentar janelas operacionais; entretanto, é ressaltada a importância de se analisar os limites operacionais dos compensadores para evitar problemas de ordem prática.

## 2.5 Metodologias para Avaliação de Cabos com Comprimento Variável

Os trabalhos de Ablow e Schechter (1983), Vaz e Patel (2000), Nagatomi, Nakamura e Koterayama (2002), Yang (2013) abordam o tema de instalação e/ou reboque de cabos submarinos (em geral, cabos de comunicação). Nesses artigos, são apresentadas metodologias para avaliação da tensão no cabo durante essas operações, sendo considerada também a influência da velocidade de lançamento e recuperação do cabo na dinâmica do sistema. Apesar de apresentarem metodologias adequadas para avaliar a influência da velocidade de lançamento, em geral, os trabalhos não abordam casos específicos de cabos sustentando cargas em sua extremidade inferior e necessitam de condições de contorno para o cabo tocando o solo marinho. Além disso, o trabalho de Yang (2013) considera também que o cabo não se deforma axialmente. Dessa forma, as metodologias apresentadas nestes trabalhos não podem ser diretamente aplicadas ao problema de instalação de equipamentos submarinos.

O artigo publicado por Pesce, Tannuri e Casetta (2006) aborda uma modificação nas Equações de Lagrange visando expandir sua aplicação a sistemas que possuem massa variando diretamente com a posição. Para ilustrar a metodologia proposta, os autores abordam a operação de instalação de cabos submarinos, obtendo-se a equação do movimento para o caso do lançamento de um cabo que não se deforma axialmente. Novamente, o modelo não é diretamente aplicável ao problema tratado nesta dissertação.

Por outro lado, alguns autores apresentam notas superficiais com relação à influência da velocidade de lançamento nas operações de instalação de equipamentos submarinos. Por exemplo:

Pode ser mostrado que para que o lançamento em lâminas d'água profundas existirá quase sempre uma profundidade em que irá ocorrer ressonância. É importante que a região de ressonância seja atravessada rapidamente e que ela não ocorra na profundidade máxima, quando é necessário controle preciso para o posicionamento do equipamento (ROWE; MACKENZIE; SNELL, 2001, p. 3).

Esse fragmento ilustra a importância de se aumentar a velocidade de lançamento durante situações de ressonância do sistema, visando reduzir o tempo de exposição do sistema a cargas dinâmicas excessivas e, conseqüentemente, aumentando a segurança da operação.

Em uma operação de instalação de uma âncora gravitacional, foi ressaltado que:

Oscilações de tensão eram consideráveis quando o AHC estava desligado. O início e término do lançamento de mais cabo também apresentaram picos de tração devido à alta massa hidrodinâmica da âncora. Durante o lançamento a velocidade constante, entretanto, [...] a tração do cabo era relativamente estável (INGEBERG *et al.*, 2006, p. 132).

Nesse caso, nota-se que durante o lançamento com velocidade constante as tensões no cabo se mantiverem relativamente estáveis, contrapondo-se à situação onde o cabo mantinha seu comprimento fixo com o AHC desligado.

Esses trechos ressaltam a importância de se construir uma metodologia para avaliar a velocidade de lançamento e recuperação em operações de instalação de equipamentos submarinos, uma vez que sua influência pode ser significativa na dinâmica do sistema e conseqüentemente na viabilidade e custo da operação.

## 2.6 Discussão

Com base na revisão bibliográfica realizada, nota-se que foram feitos diversos avanços na área de modelagem de operações de instalação de equipamentos submarinos nos últimos cinquenta anos. Em especial, foram construídos modelos para avaliação da dinâmica do sistema cabo-equipamento tanto nas etapas de descida ao longo da lâmina d'água quanto na etapa de passagem pela zona de atuação das ondas e assentamento. Um ponto importante a ser ressaltado é que os modelos construídos até então não abordam de forma sistêmica a influência da velocidade de lançamento ou recolhimento de cabo nestas operações. Esse tema foi definido como o objetivo principal desta dissertação, uma vez que sua influência pode ser significativa na janela operacional e conseqüentemente no custo total da operação.

Para atingir este objetivo, este trabalho propõe construir um modelo simplificado com um grau de liberdade para avaliação da influência da velocidade de lançamento na dinâmica do sistema cabo-equipamento durante a etapa de descida ou recuperação ao longo da coluna d'água.

Para efeitos de comparação de resultados, esta dissertação também irá apresentar dois outros modelos que são utilizados rotineiramente para avaliação das operações de instalação de equipamentos submarinos. O primeiro é um modelo simplificado baseado nos trabalhos de Niedzwecki e Thampi (1991) e Cerqueira (1998), enquanto o segundo é baseado no trabalho de Driscoll, Lueck e Nahon (2000), sendo considerado mais realista, já que considera as não-lineares intrínsecas do problema na sua formulação.

### 3. METODOLOGIAS DE ANÁLISE PARA INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS SUBMARINOS

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada nesta dissertação. Conforme descrito anteriormente, o objetivo é avaliar a influência da velocidade de lançamento nas operações de instalação de equipamentos submarinos. Para isso, é necessário obter um modelo capaz de fornecer a janela de instalação de uma dada operação, sendo assim imprescindível construir modelos que representem as ondas incidentes na embarcação, a dinâmica da embarcação em função das ondas e a dinâmica do sistema cabo-equipamento em função dos movimentos do ponto de içamento.

A Figura 3.1 ilustra um fluxograma das etapas necessárias para essa análise, considerando os três modelos que serão desenvolvidos neste trabalho. No escopo desta dissertação, as três etapas descritas serão modeladas de forma desacoplada. Essa consideração é recorrente na indústria e na literatura (Niedwecki e Thampi (1991), Keprate e Mohammed (2016), entre outros) e leva a respostas conservadoras, uma vez que a presença de um equipamento suspenso tende a reduzir os movimentos da embarcação.

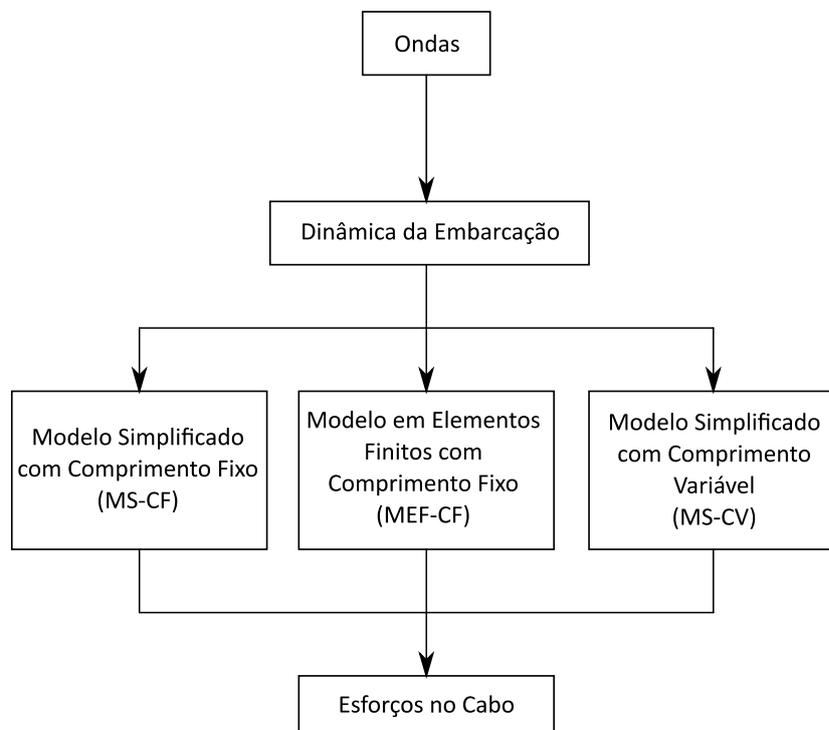


Figura 3.1: Fluxograma das etapas necessárias para definição da janela de instalação de equipamentos submarinos.

### 3.1 Ondas Superficiais Oceânicas

O objetivo deste tópico é apresentar os conceitos relativos à modelagem de ondas superficiais oceânicas, necessários para a construção dos modelos de instalação de equipamentos submarinos. A teoria apresentada é baseada nos trabalhos de Journée e Massie (2001), Wilson (2003) e nas práticas recomendadas DNV-RP-C205 (2014a) e DNV-RP-H103 (2014b); maiores detalhes podem ser encontrados nos mesmos.

Ondas superficiais oceânicas podem ser definidas como oscilações da superfície livre do mar em torno de uma posição de equilíbrio, sendo a gravidade a força restauradora. Essas ondas são dependentes do tempo e do espaço e se propagam ao longo da interface entre o mar e a atmosfera.

Existem diversos fenômenos que criam este tipo de onda, tais como o vento, terremotos, forças astronômicas, entre outros. Em especial, as ondas geradas pelo vento são preponderantes na determinação dos movimentos da embarcação e, conseqüentemente, do sistema cabo e equipamento. Dessa forma, o foco da análise serão as ondas geradas pelo vento.

Essas ondas podem ser classificadas em dois tipos: *sea* (ondas geradas por ventos locais, com característica bastante irregular) e *swell* (ondas que se propagaram para longe do local onde foram geradas, com característica mais regular). Esses dois tipos de onda podem estar atuando de forma separada ou em conjunto para um determinado local.

#### 3.1.1 Ondas regulares

Uma onda regular é aquela que possui forma definida (comprimento, período e altura), sendo que, conhecendo as condições iniciais, é possível determinar os valores das variáveis de interesse (elevação da superfície do mar, velocidade, aceleração...) para qualquer instante de tempo.

Para a compreensão das ondas superficiais oceânicas regulares é importante conhecer alguns conceitos teóricos. A Figura 3.2 representa uma onda regular senoidal, indicando os parâmetros de interesse para análise. Além destes, o nível médio do mar representa o valor médio da elevação da superfície do mar ao longo do tempo e a profundidade (*LDA*) é dada pela distância vertical do solo marinho até o nível médio do mar.

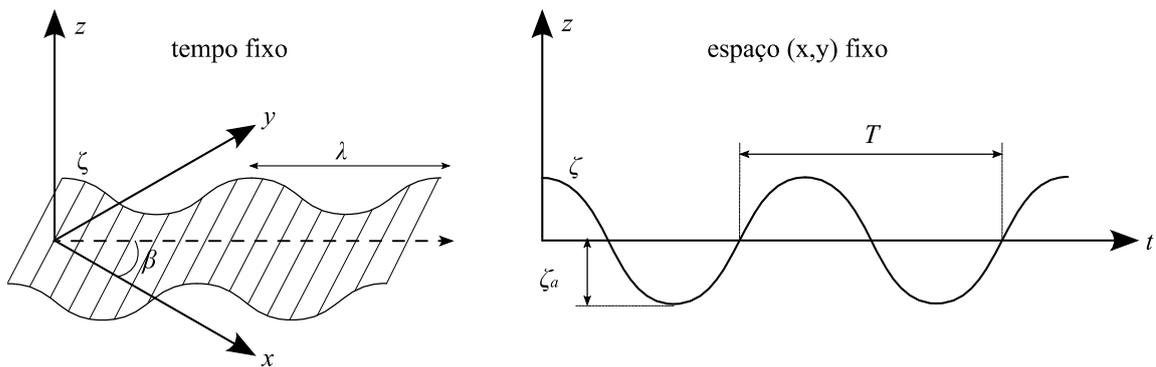


Figura 3.2: Onda regular e parâmetros de análise.

Nesse caso:  $\zeta$  é a elevação da superfície do mar,  $\zeta_a$  é a amplitude,  $T$  é o período e  $\lambda$  é o comprimento da onda. A altura da onda  $H$  é definida como:

$$H = 2\zeta_a \quad (3.1)$$

A velocidade da onda  $c$  é dada por:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{\mathbb{k}} \quad (3.2)$$

sendo que  $\mathbb{k}$  é o número de onda e  $\omega = 2\pi/T$  é a velocidade angular. Para profundidades elevadas (quando  $LDA$  tende ao infinito), tem-se:

$$\mathbb{k} = \frac{\omega^2}{g} \quad (3.3)$$

sendo que  $g$  é a aceleração da gravidade.

A equação que representa a elevação da superfície do mar para uma onda se propagando nas direções positivas dos eixos  $x$  e  $y$  é dada por:

$$\zeta = \zeta_a \sin(\omega t - \mathbb{k}x \cos\beta - \mathbb{k}y \sin\beta + \theta) \quad (3.4)$$

sendo que  $\beta$  é o ângulo entre a direção de propagação da onda e o eixo  $x$  e  $\theta$  é a fase da onda.

### 3.1.2 Ondas irregulares

Como visto na Seção 3.1, as ondas geradas pelo vento, principalmente do tipo *sea*, são irregulares. Nesse tipo de onda, mesmo conhecendo as condições iniciais, não é possível determinar o valor exato de uma variável num determinado instante de tempo, constituindo assim um fenômeno aleatório. Nesse caso, a alternativa é avaliar os parâmetros estatísticos de suas sé-

ries históricas sendo que, caso os parâmetros estatísticos se mantenham inalterados com o tempo, é caracterizado um processo aleatório estacionário.

Ondas superficiais oceânicas podem ser vistas como processos aleatórios estacionários. Historicamente, consideram-se 3 horas como o período necessário para que o estado de mar apresente característica estacionária, entretanto esse período pode variar de 30 minutos a 10 horas.

A Figura 3.3 ilustra um registro de elevação da superfície do mar ao longo do tempo. É possível notar que existem vários períodos de cruzamento com o zero e também várias amplitudes diferentes ao longo da série.

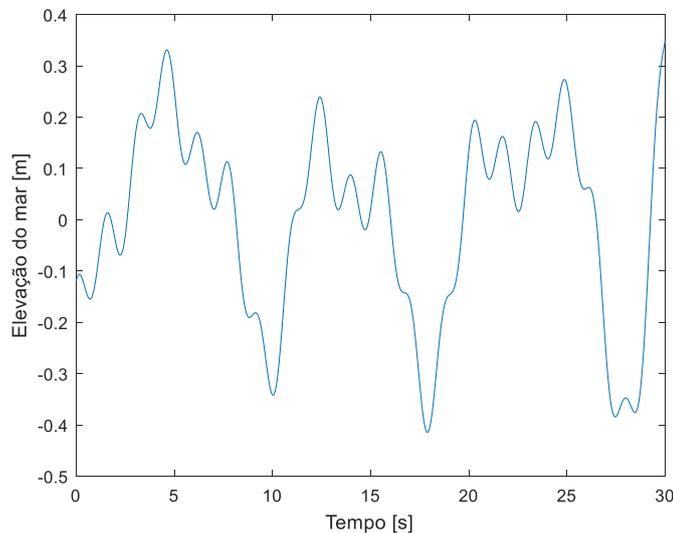


Figura 3.3: Elevação da superfície do mar ao longo do tempo.

Para caracterizar o estado de mar, é necessário determinar seus parâmetros estatísticos a partir da série temporal. Em geral, com relação ao período, a principal variável de análise é o período médio de cruzamento com o zero ( $T_z$ ):

$$T_z = \frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^{N_T} T_i \quad (3.5)$$

sendo que,  $T_i$  são os períodos entre pontos de cruzamento ascendentes com o zero<sup>8</sup> e  $N_T$  é o número total de cruzamentos ascendentes com o zero.

Com relação à elevação da superfície do mar, mais variáveis estatísticas são consideradas na prática. O desvio padrão, por exemplo, é dado por:

<sup>8</sup> Um ponto de cruzamento ascendente com o zero é definido como um ponto de cruzamento com o nível médio do mar que possui a primeira derivada positiva.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_\zeta - 1} \sum_{i=1}^{N_\zeta} \zeta_i^2} \quad (3.6)$$

sendo que,  $N_\zeta$  é o número de elevações registradas na série temporal e  $\zeta_i$  é a elevação registrada para a onda em um dado instante. Nesse caso,  $N_\zeta$  depende do período de amostragem da série  $\Delta t$ , tal que  $N_\zeta = t_{serie}/\Delta t$ .

A amplitude significativa ( $\zeta_s$ ) e a altura significativa ( $H_s$ ) da onda são dadas a partir do desvio padrão, tal que:

$$\zeta_s = 2\sigma \quad (3.7)$$

$$H_s = 4\sigma \quad (3.8)$$

A altura significativa também pode ser interpretada como aproximadamente igual à média do terço superior das alturas de onda da série temporal.

### 3.1.3 Espectros de Energia da Onda

Ondas aleatórias irregulares, representando um estado de mar real, podem ser modeladas a partir da combinação de várias componentes de ondas regulares, tal que:

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^N \zeta_{a_i} \cos(\omega_i t - k_i x \cos \beta_i - k_i y \sin \beta_i + \theta_i) \quad (3.9)$$

Nesse caso,  $N$  é o número de termos da série. A partir de uma análise de séries de Fourier, é possível obter o espectro de densidade de energia  $S_\zeta(\omega)$  para essa onda no domínio das frequências (Figura 3.4):

$$S_\zeta(\omega_i) d\omega = \frac{1}{2} \zeta_{a_i}^2 \quad (3.10)$$

Essa formulação exclui as informações sobre a fase da onda. Entretanto, para efeitos de análise de instalação de equipamentos submarinos (e também de outros fenômenos de dinâmica *offshore*), não é necessário manter as informações sobre as fases, é necessário apenas manter as propriedades estatísticas do estado de mar.

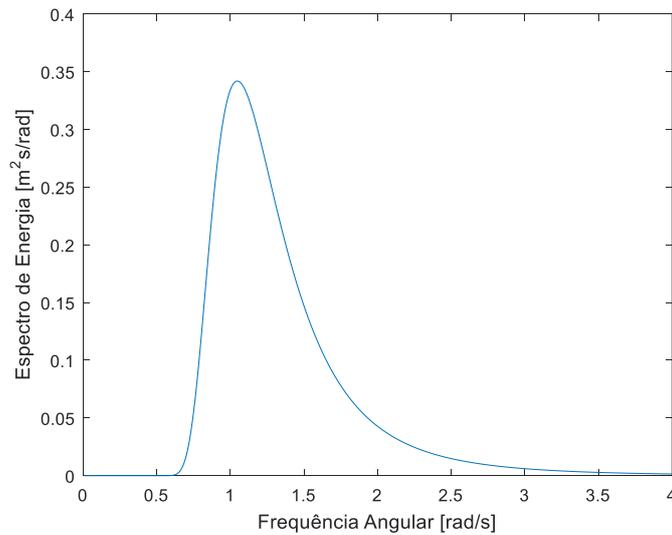


Figura 3.4: Exemplo de espectro de energia de onda.

Algumas relações estatísticas também podem ser obtidas a partir do cálculo dos momentos de área sob o espectro. Nesse caso, os momentos de ordem 0, 1 e 2 são:

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega \quad (3.11)$$

$$m_1 = \int_0^{\infty} \omega S(\omega) d\omega \quad (3.12)$$

$$m_2 = \int_0^{\infty} \omega^2 S(\omega) d\omega \quad (3.13)$$

e as seguintes relações são válidas:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (3.14)$$

$$T_z = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (3.15)$$

Além disso,  $T_p$  é definido como o período onde ocorre o pico de energia no espectro.

### 3.1.4 Espectros de Energia Padrão

Existem diversas formulações para espectros de onda na literatura. Dentre os mais utilizados para ondas geradas pelo vento, pode-se citar o espectro de Pierson-Moskowitz (PM) e o espectro de JONSWAP.

O espectro de Pierson-Moskowitz (PIERSON; MOSKOWITZ, 1964) foi originalmente proposto para a representação de mares completamente desenvolvidos. Sua equação é dada por:

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} H_s^2 \omega_p^4 \omega^{-5} \exp \left[ -\frac{5}{4} \left( \frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right] \quad (3.16)$$

sendo que  $\omega_p = 2\pi/T_p$  é a frequência angular de pico.

O espectro de JONSWAP foi resultado de um extenso programa de medição realizado no Mar do Norte no final da década de 1960. Essa formulação estende o espectro PM de forma a considerar o efeito da zona de atuação dos ventos sobre o mar, tal que:

$$S_J(\omega) = (1 - 0,287 \ln \gamma) \gamma^{\exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\omega - \omega_p}{\tau \omega_p} \right)^2 \right]} S_{PM} \quad (3.17)$$

Sendo que  $\gamma$  é um parâmetro de forma adimensional e  $\tau$  é um parâmetro de largura espectral. Após uma série de estudos terem sido realizados para a Bacia de Campos, a Petrobras indica o uso do espectro de JONSWAP considerando as seguintes relações (NASCIMENTO, 2014) para melhor representar o espectro real:

$$\gamma = 6,4 T_p^{-0,491} \quad (3.18)$$

$$T_z = T_p \sqrt{\frac{5 + \gamma}{10,89 + \gamma}} \quad (3.19)$$

$$\tau = \begin{cases} 0,07 & \text{para } \omega \leq \omega_p \\ 0,09 & \text{para } \omega > \omega_p \end{cases} \quad (3.20)$$

A Figura 3.5 ilustra o espectro de PM e de JONSWAP ajustado com os dados recomendados pela Petrobras para  $H_s = 2m$  e  $T_p = 6s$ .

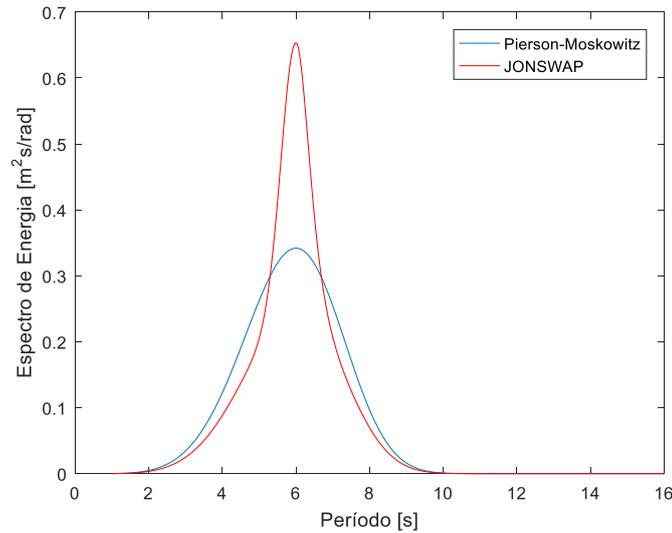


Figura 3.5: Comparação entre espectro de mar de PM e JONSWAP para  $H_s = 2m$  e  $T_p = 6s$ .

### 3.1.5 Determinação da série temporal irregular a partir do espectro

Nos itens anteriores deste capítulo foram apresentados métodos para obter os parâmetros estatísticos a partir de uma série no tempo ou de um espectro de densidade de energia. Esse item trata do problema inverso: determinar uma série temporal a partir de um dado espectro de onda.

A metodologia empregada consiste em subdividir o espectro em diversas secções, sendo que cada uma irá representar uma senóide com uma dada amplitude e frequência. Como o espectro de energia não contém informações sobre a fase, são usadas fases aleatórias para cada frequência. Assim, o sinal gerado não será idêntico ao sinal usado para gerar o espectro; entretanto, possuirá as mesmas propriedades estatísticas.

Para determinação das amplitudes de cada termo da série, usa-se:

$$\zeta_{a_i} = \sqrt{2S_\zeta(\omega_i)\Delta\omega_i} \quad (3.21)$$

A frequência angular de cada componente é:

$$\omega_i = \frac{\omega_j + \omega_{j+1}}{2} \quad (3.22)$$

e a fase de cada componente é dada por um número aleatório tal que:

$$0 \leq \theta_i \leq 2\pi \quad (3.23)$$

Os termos da série podem ser gerados a partir da divisão em intervalos iguais de  $\Delta\omega$ , entretanto isso irá gerar um sinal que se repete com período de  $2\pi/\Delta\omega$ . A alternativa para evitar esse efeito é dividir o espectro em intervalos iguais de área  $S_\zeta(\omega_i)\Delta\omega_i$ . Nesse caso, todos os termos da série possuirão a mesma amplitude; contudo, existirão mais termos com frequência próxima à frequência de pico do espectro.

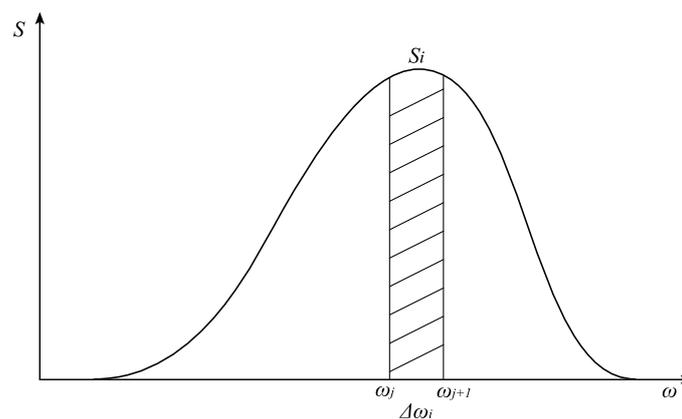


Figura 3.6: Divisão do espectro em intervalos de área igual.

### 3.1.6 Diagrama de ocorrência

A Tabela 3.1 apresenta um diagrama de probabilidade de ocorrência para diversos períodos de pico e alturas significativas de ondas para a Bacia de Campos (NASCIMENTO, 2014). Nota-se que os períodos entre 5 e 14 segundos e alturas significativas de 1,0 a 3,0 representam aproximadamente 90% dos estados de mar que ocorrem nessa região, sendo, por isso, os mais relevantes a serem considerados durante análises de instalação de equipamentos submarinos.

Tabela 3.1: Diagrama de ocorrência em porcentagem para Bacia de Campos (NASCIMENTO, 2014).

Altura Significativa (m)	Período de Pico (s)																	Total	
	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - 11	11 - 12	12 - 13	13 - 14	14 - 15	15 - 16	16 - 17	17 - 18	18 - 19	19 - 20		
0.0 - 0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.5 - 1.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2
1.0 - 1.5	0.0	1.2	3.2	4.0	5.3	3.4	1.8	1.6	1.4	0.6	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.0
1.5 - 2.0	0.0	0.5	5.0	7.1	6.0	5.0	3.4	2.8	2.3	1.4	0.6	0.3	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	34.5
2.0 - 2.5	0.0	0.0	1.2	4.2	4.2	3.2	2.5	2.1	2.2	1.5	0.7	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	22.2
2.5 - 3.0	0.0	0.0	0.1	1.2	2.2	1.5	1.2	1.3	1.4	1.1	0.5	0.2	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	10.9
3.0 - 3.5	0.0	0.0	0.0	0.2	0.6	0.6	0.5	0.5	0.7	0.5	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4
3.5 - 4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6
4.0 - 4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7
4.5 - 5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
5.0 - 5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
5.5 - 6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6.0 - 6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total	0.0	1.8	9.7	17.1	19.0	14.2	9.9	8.9	8.7	5.8	2.6	1.2	0.7	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	100.0

## 3.2 Dinâmica de Embarcações

Após apresentar a metodologia para modelar ondas superficiais oceânicas, esta seção irá introduzir os conceitos relativos à dinâmica de embarcações, consistindo a segunda etapa da análise de instalação de equipamentos submarinos (conforme Figura 3.1). A teoria apresentada é baseada no trabalho de Journée e Massie (2001); maiores detalhes podem ser encontrados no mesmo.

### 3.2.1 Movimentos de uma embarcação

Para análise de instalação de equipamentos submarinos, a embarcação pode ser considerada como um corpo rígido, uma vez que os movimentos de translação e rotação da embarcação possuem ordem de grandeza superior a possíveis deformações que ocorrem em sua estrutura.

Em engenharia naval, os movimentos de corpo rígido de uma embarcação possuem denominações específicas (Figura 3.7):

- *Surge*: translação no eixo  $x$ ;
- *Sway*: translação no eixo  $y$ ;
- *Heave*: translação no eixo  $z$ ;
- *Roll*: rotação em torno do eixo  $x$ ;
- *Pitch*: rotação em torno do eixo  $y$ ;
- *Yaw*: rotação em torno do eixo  $z$ ;

O movimento resultante da embarcação é a combinação de cada um desses movimentos.

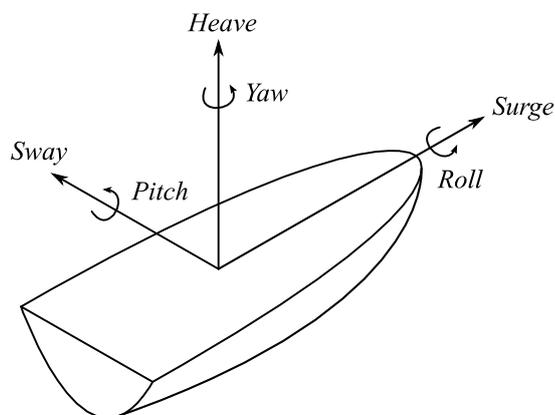


Figura 3.7: Movimentos de corpo rígido de uma embarcação.

### 3.2.2 RAO (*Response Amplitude Operator*)

A resposta de uma embarcação submetida à ação das ondas pode ser avaliada supondo que ela se comporta como um sistema linear. Com base nisto, pode-se escrever uma função de resposta em frequência (que em engenharia naval recebe o nome de RAO – *Response Amplitude Operator*) para cada um dos seus seis graus de liberdade:

$$RAO(\omega) = |RAO(\omega)|e^{j\varphi(\omega)} \quad (3.24)$$

sendo que  $\varphi(\omega)$  é a diferença de fase entre a resposta da embarcação e a onda incidente e  $j = \sqrt{-1}$ . Convém destacar que é necessária uma função de RAO para cada direção de onda incidindo na embarcação. A resposta da embarcação ( $R$ ) para uma onda regular do tipo  $\zeta_a e^{j\omega t}$  será então:

$$R = |RAO(\omega)|\zeta_a e^{j(\omega t + \varphi)} \quad (3.25)$$

Também é possível escrever funções de resposta em frequência para as velocidades ( $RAO_v$ ) e acelerações ( $RAO_a$ ) relativas a cada um dos movimentos de corpo rígido da embarcação, tal que:

$$RAO_v = j\omega RAO \quad (3.26)$$

$$RAO_a = -\omega^2 RAO \quad (3.27)$$

A Figura 3.8 ilustra o RAO de uma embarcação típica que realiza operações de instalação de equipamentos submarinos. Nota-se que para ondas incidindo longitudinalmente (direção de  $180^\circ$ ), a resposta preponderante da embarcação é relativa aos movimentos de *Surge*, *Heave* e *Pitch*. Para ondas incidindo transversalmente (direção de  $90^\circ$ ), a influência do *Roll* e do *Sway* se torna mais acentuada e o *Heave* apresenta um pico de resposta. O movimento de *Yaw* ocorre de forma mais significativa para ondas incidindo com ângulos intermediários ( $45^\circ$  ou  $135^\circ$ ).

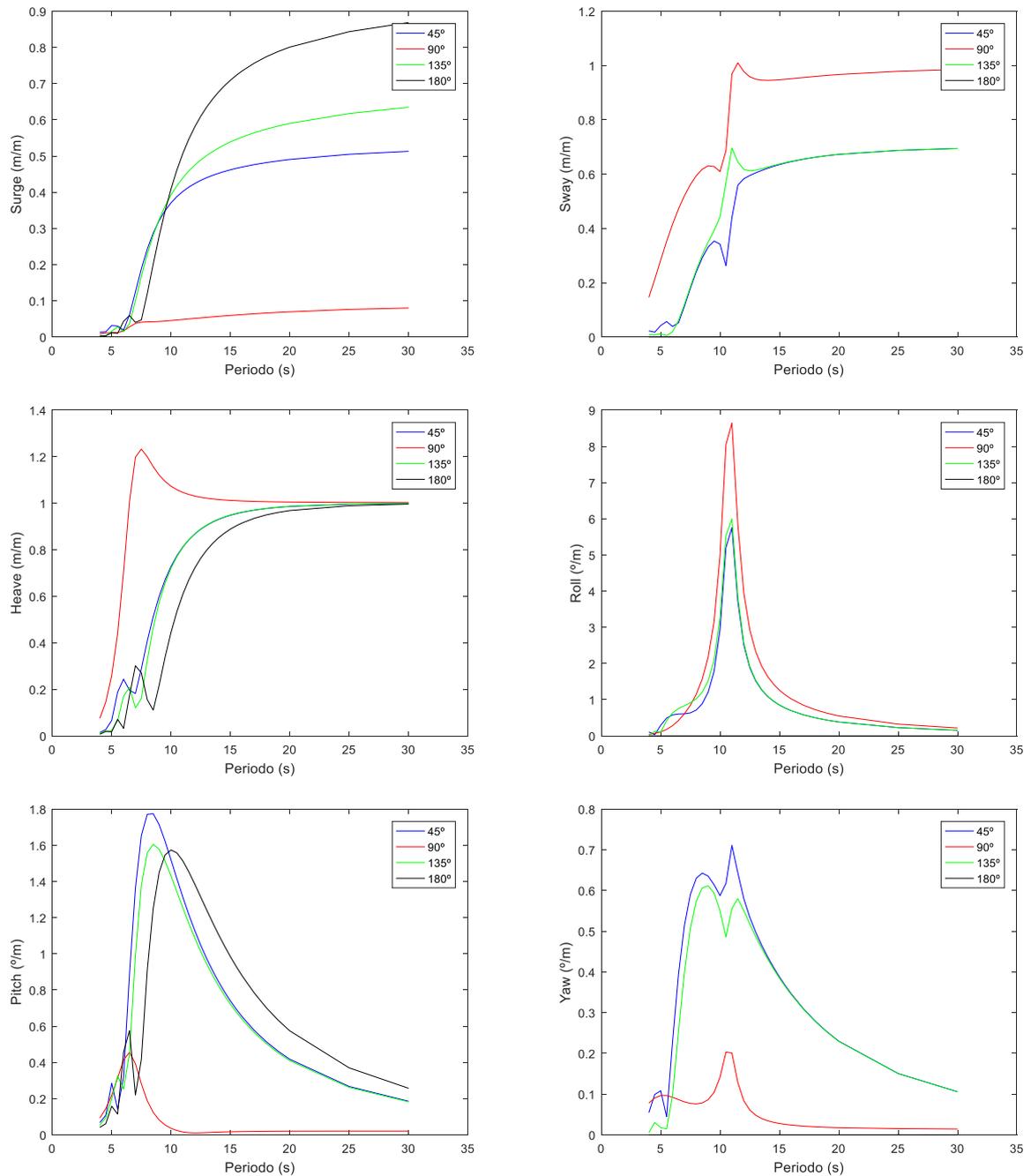


Figura 3.8: Exemplo para o RAO (amplitude) de uma embarcação.

### 3.2.3 Translação do RAO

Para a análise de instalação de equipamentos submarinos, é necessário conhecer os movimentos da embarcação no ponto de içamento. Supondo que os movimentos de rotação da embarcação são pequenos, pode-se considerar que  $\cos \alpha \cong 1$  e que  $\sin \alpha \cong \alpha$ , tal que  $\alpha$  é um movimento de rotação qualquer. Dessa forma, os RAOs de deslocamentos transladados são dados por:

$$PI_x = Surge - y_p Yaw + z_p Pitch \quad (3.28)$$

$$PI_y = Sway + x_p Yaw - z_p Roll \quad (3.29)$$

$$PI_z = Heave - x_p Pitch + y_p Roll \quad (3.30)$$

tal que  $PI_x$ ,  $PI_y$  e  $PI_z$  são, respectivamente, os *RAOs* de deslocamento do ponto de içamento (coordenadas  $x_p$ ,  $y_p$  e  $z_p$  com relação ao ponto de referência do *RAO* da embarcação) nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

O movimento do ponto de içamento preponderante para as análises de instalação de equipamentos é o deslocamento na direção  $z$  (DNV-RP-H103, 2014b); conseqüentemente, a variável  $PI_z$  e os movimentos de *Heave*, *Pitch* e *Roll* são os principais a serem avaliados. Nota-se que à medida que o ponto de içamento se aproxima do centro de gravidade da embarcação, as cotas  $x_p$  e  $y_p$  se aproximam de zero, reduzindo o efeito do *Pitch* e do *Roll* no movimento do ponto de içamento, viabilizando maiores janelas operacionais.

### 3.2.4 Resposta da embarcação para mar irregular

A resposta da embarcação em um mar irregular pode ser obtida no domínio das frequências a partir da seguinte relação:

$$S_R(\omega) = |RAO(\omega)|^2 S(\omega) \quad (3.31)$$

sendo que  $S(\omega)$  é o espectro de onda (conforme apresentado em 3.1.3).

Caso seja necessário transformar o sinal para o domínio do tempo, pode-se empregar a mesma metodologia apresentada em 3.1.5 utilizando o espectro de resposta (equação (3.31)).

Por fim, a resposta da embarcação também pode ser obtida diretamente no domínio do tempo considerando que a resposta total será igual à combinação da resposta individual de cada um dos termos senoidais que compõem a onda incidente:

$$R(t) = \sum_{i=1}^N |RAO(\omega_i)| \zeta_{\alpha_i} e^{j(\omega_i t + \theta_i + \varphi_i)} \quad (3.32)$$

### 3.3 Forças Hidrodinâmicas

As sessões 3.1 e 3.2 apresentaram, respectivamente, a teoria necessária para modelagem das ondas e da dinâmica da embarcação. A próxima etapa é a análise da dinâmica do sistema cabo-equipamento, sendo que um ponto chave nesse caso é a interação do equipamento submarino com o fluido ao seu redor.

Para os modelos que serão apresentados nas sessões seguintes, esta interação será modelada a partir da formulação proposta por Morison et al. (1950). Essa abordagem está em concordância com a maior parte dos trabalhos existentes na literatura tratando de instalação de equipamentos submarinos, tais como Niedzwecki e Thampi (1991), Cerqueira (1998), Cao et al. (2016), entre outros.

De acordo com Morison et al. (1950), as forças atuando em um corpo submerso possuem duas parcelas, uma força de inércia proporcional à aceleração do fluido deslocado e uma força de arrasto proporcional ao quadrado da velocidade. Assim, a força hidrodinâmica total atuando em um equipamento se movimentando em um fluido estacionário pode ser representada da seguinte forma:

$$F_{hid} = -\rho C_a \mathbb{V} \ddot{w} - \frac{1}{2} \rho C_d A_p \dot{w} |\dot{w}| \quad (3.33)$$

tal que  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $\mathbb{V}$  e  $A_p$  são, respectivamente, o volume e a área projetada na direção do movimento do equipamento,  $w$  é o deslocamento e  $C_a$  e  $C_d$  são, respectivamente, os coeficientes de massa adicional e de arrasto.

Pode-se então definir a massa adicional ( $M_{add}$ ) referente ao equipamento por:

$$M_{add} = \rho C_a \mathbb{V} \quad (3.34)$$

Os coeficientes de massa adicional e de arrasto são dependentes do número de Reynolds e de Keulegan-Carpenter, sendo que sua correta determinação é essencial para a realização de uma análise de instalação de equipamentos submarinos coerente. No escopo deste trabalho, quando necessário, serão utilizados coeficientes baseados na geometria do equipamento conforme apresentado nas práticas recomendadas DNV-RP-H103 (2014b) e DNV-RP-C205 (2014a) e também nos trabalhos de Oristland (1989) e Mineiro (2006).

### 3.4 Modelo Simplificado com Comprimento Fixo (MS-CF)

O primeiro modelo para a análise da dinâmica do sistema cabo-equipamento será descrito nesta seção. Neste caso, será considerado um sistema de um grau de liberdade e com comprimento fixo de cabo suspenso. A formulação apresentada é baseada nos trabalhos de Niedzwecki e Thampi (1991) e Cerqueira (1998).

As hipóteses consideradas na construção deste modelo são:

- O sistema possui um grau de liberdade: o deslocamento vertical do equipamento submarino.
- O cabo apresenta todo seu comprimento submerso (o empuxo atua em toda sua extensão);
- A influência da massa do cabo é considerada na análise;
- O movimento do ponto de içamento é do tipo senoidal;
- O cabo de instalação possui um comportamento linear elástico;
- A força hidrodinâmica atua apenas no equipamento (não no cabo);
- O modelo não é capaz de prever cargas devido ao solecamento do cabo (cabo está sempre tracionado).

A Figura 3.9 ilustra o sistema utilizado como referência.

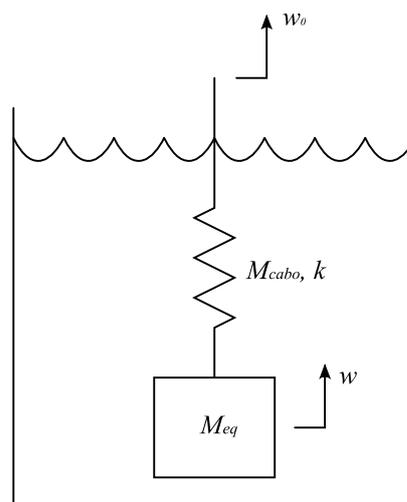


Figura 3.9: Sistema simplificado de um grau de liberdade com comprimento fixo de cabo suspenso.

As variáveis consideradas na análise são: a massa do equipamento ( $M_{eq}$ ); a massa ( $M_{cabo}$ ), o módulo de elasticidade ( $E$ ), a área de seção ( $A$ ) e o comprimento suspenso de cabo ( $L$ ); o deslocamento vertical do equipamento ( $w$ ) e o deslocamento vertical do ponto de içamento da

embarcação ( $w_0$ ).

Como o cabo de instalação pode vir a apresentar massa suspensa de ordem de grandeza semelhante a do equipamento em certas ocasiões, é necessário considerar sua influência na análise.

Para isso, é feita a seguinte aproximação para a massa total do sistema ( $M_s$ ):

$$M_s \cong M_{eq} + \rho M_{cabo} \quad (3.35)$$

tal que  $\rho$  é um coeficiente aproximado em 1/3 (DNV-RP-H103, 2014b).

Considerando o balanço de forças verticais no equipamento, obtém-se a seguinte equação:

$$M_s \ddot{w} = -k(w - w_0) + F_{hid} \quad (3.36)$$

sendo que  $k$  é rigidez axial do cabo de instalação, sendo dada por:

$$k = \frac{EA}{L} \quad (3.37)$$

Substituindo a equação (3.33) na equação (3.36), obtêm-se:

$$M_s \ddot{w} = -k(w - w_0) - \rho C_d \nabla \ddot{w} - \frac{1}{2} \rho C_d A_p \dot{w} |\dot{w}| \quad (3.38)$$

$$M_V \ddot{w} + \frac{1}{2} \rho C_d A_p \dot{w} |\dot{w}| + kw = kw_0 \quad (3.39)$$

Sendo que  $M_V$  é a massa virtual do sistema:

$$M_V = M_{eq} + \rho M_{cabo} + M_{add} \quad (3.40)$$

A equação (3.39) não possui solução analítica, uma vez que o termo devido ao arrasto é não linear. Essa não linearidade pode ser simplificada considerando um coeficiente de amortecimento equivalente, que dissipe a mesma quantidade de energia em um ciclo de oscilação (NIEDZWECKI; THAMPI, 1991). A equação resultante nesse caso será:

$$M_V \ddot{w} + C \dot{w} + kw = kw_0 \quad (3.41)$$

Sendo que:

$$C \cong \frac{4\omega}{3\pi} \rho C_d A_p W \quad (3.42)$$

Tal que  $\omega$  é a frequência angular de vibração e  $W$  é a amplitude do deslocamento do equipamento.

Dado que a excitação possui uma forma senoidal com amplitude  $W_0$  e frequência angular  $\omega$ , a solução da equação também será uma senóide com uma dada amplitude ( $W$ ) e fase ( $\phi$ ):

$$w_0 = W_0 \text{sen}(\omega t) \quad (3.43)$$

$$w = W \text{sen}(\omega t - \phi) \quad (3.44)$$

Dessa forma, a solução da equação (3.41) é dada por:

$$\frac{W}{W_0} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \Lambda^2)^2 + (2\xi\Lambda)^2}} \quad (3.45)$$

$$\phi = \text{atan}\left(\frac{2\xi\Lambda}{1 - \Lambda^2}\right) \quad (3.46)$$

sendo que o fator de frequência ( $\Lambda$ ) e o fator de amortecimento ( $\xi$ ) são dados por:

$$\Lambda = \frac{\omega}{\omega_n} = \frac{\omega}{\sqrt{k/M_V}} \quad (3.47)$$

$$\xi = \frac{C}{2\sqrt{kM_V}} \quad (3.48)$$

em que  $\omega_n$  é a frequência angular natural do sistema.

Nesse caso específico, o fator de amortecimento depende da amplitude do movimento do equipamento (conforme equação (3.42)). Dessa forma, é necessário realizar as seguintes manipulações para obter a resposta em deslocamento do equipamento:

Elevando a equação (3.45) a menos dois, tem-se:

$$\frac{W_0^2}{W^2} = (1 - \Lambda^2)^2 + (2\xi\Lambda)^2 \quad (3.49)$$

Substituindo o fator de amortecimento:

$$\frac{W_0^2}{W^2} = (1 - \Lambda^2)^2 + \left(\frac{4\omega\rho C_d A_p W}{3\pi\sqrt{kM_V}} \Lambda\right)^2 \quad (3.50)$$

Colocando a equação em uma forma de quarto grau:

$$\left(\frac{4\omega\rho C_d A_p}{3\pi\sqrt{kM_V}} \Lambda\right)^2 W^4 + (1 - \Lambda^2)^2 W^2 - W_0^2 = 0 \quad (3.51)$$

Definindo novas variáveis:

$$a = \left( \frac{4\omega\rho C_d A_p}{3\pi\sqrt{kM_V}} \Lambda \right)^2 \quad (3.52)$$

$$b = (1 - \Lambda^2)^2 \quad (3.53)$$

$$c = -W_0^2 \quad (3.54)$$

$$Z = W^2 \quad (3.55)$$

obtem-se:

$$aZ^2 + bZ + c = 0 \quad (3.56)$$

cuja solução é dada por:

$$Z = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3.57)$$

Uma vez que a variável de interesse é a amplitude de um sinal senoidal, pode-se considerar apenas a solução positiva da equação (3.55), tal que:

$$W = \sqrt{\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}} \quad (3.58)$$

Os esforços presentes no cabo de instalação serão a composição de uma parcela estática ( $F_{est}$ ), referente ao peso dos componentes, e uma parcela dinâmica ( $F_{din}$ ), devida à excitação externa no sistema. Assim:

$$F = F_{est} + F_{din} \quad (3.59)$$

A parcela estática pode ser obtida por:

$$F_{est}(x) = (M_{eq} - \rho V)g + (m_l - \rho A)g\ell \quad (3.60)$$

sendo que  $g$  é a aceleração gravitacional,  $m_l$  é a massa de cabo por unidade de comprimento e  $\ell$  é uma variável de auxiliar representando o comprimento de cabo a partir do equipamento ( $\ell = 0$  no ponto de conexão do equipamento e  $\ell = L$  no ponto de içamento).

A parcela dinâmica é dada por:

$$F_{din} = k[W_0 \sin(\omega t) - W \sin(\omega t - \phi)] \quad (3.61)$$

O valor máximo da parcela dinâmica pode ser obtido a partir da diferenciação da equação anterior e obtenção do valor do tempo que torna a equação resultante nula (posteriormente verificando que a segunda derivada possui valor negativo neste ponto). A partir da substituição deste valor de tempo na equação (3.61) e após uma série de manipulações trigonométricas (NIEDZWECKI; THAMPI, 1991), pode-se escrever que:

$$\max(F_{din}) = k \left[ \frac{\Lambda^4 + (2\xi\Lambda)^2}{\sqrt{\Lambda^4(\Lambda^2 + 4\xi^2 - 1)^2 + (2\xi\Lambda)^2}} \right] W_0 \quad (3.62)$$

Dessa forma, é possível obter os esforços máximos e mínimos em qualquer ponto do cabo de instalação a partir da aplicação das equações (3.60) e (3.62), o que é essencial para a construção da janela operacional.

### 3.5 Modelo em Elementos Finitos com Comprimento Fixo (MEF-CF)

O segundo modelo para análise da dinâmica do sistema cabo-equipamento também considera um comprimento fixo de cabo suspenso, entretanto, o cabo é discretizado conforme a teoria de elementos finitos. A formulação utilizada nesta seção é baseada no trabalho de Driscoll, Lueck e Nahon (2000). Maiores detalhes com relação à teoria do método dos elementos finitos podem ser obtidos, por exemplo, em Reddy (2006).

De forma geral, para a construção do modelo em elementos finitos é necessário realizar a discretização do domínio do problema (Figura 3.10). Posteriormente, as equações que governam o sistema são obtidas para cada elemento e, na sequência, agrupadas para formar um sistema que represente todo o domínio do problema. A solução deste sistema agrupado permite obter a resposta do sistema como um todo, tanto em problemas estáticos quanto dinâmicos.

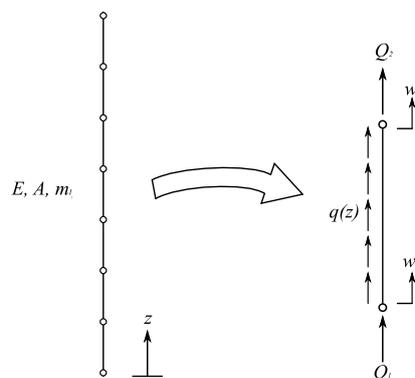


Figura 3.10: Cabo discretizado em elementos.

Para nosso problema em particular, serão consideradas as seguintes hipóteses na construção do modelo:

- O cabo será considerado como um domínio unidimensional;
- Apenas as tensões axiais serão consideradas no modelo;
- O cabo mantém-se na vertical durante toda a análise;
- O cabo possui comportamento linear elástico;
- As deformações são pequenas;
- Não são considerados esforços devido ao solecamento do cabo;
- Forças hidrodinâmicas atuam apenas no equipamento (não no cabo).

Com base nas hipóteses apresentadas, a equação que governa a dinâmica de um dado elemento é:

$$m_l \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial z} \left( EA \frac{\partial w}{\partial z} \right) = q \quad \forall \quad z \in \Omega_e(0, l) \quad (3.63)$$

tal que  $w$  é o deslocamento vertical de um ponto qualquer do elemento,  $q$  é o carregamento externo (podendo ser função do tempo e do espaço) e  $\Omega_e(0, l)$  é o domínio do elemento. Escrevendo a equação na forma de uma integral ponderada:

$$\int_0^l v \left[ m_l \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial z} \left( EA \frac{\partial w}{\partial z} \right) - q \right] dz = 0 \quad (3.64)$$

sendo que  $v$  é a função de ponderação. Realizando uma integração por partes:

$$\int_0^l \left( m_l v \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + EA \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial z} - vq \right) dz - vEA \frac{\partial w}{\partial z} \Big|_0^l = 0 \quad (3.65)$$

O último termo do lado esquerdo da equação representa as forças nodais ( $Q$ ). Assim, é possível escrever:

$$\int_0^l \left( m_l v \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + EA \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial z} - vq \right) dz - v(0)Q_1 - v(l)Q_2 = 0 \quad (3.66)$$

$$Q_1 = -EA \frac{\partial w}{\partial z} \Big|_0 \quad (3.67)$$

$$Q_2 = EA \frac{\partial w}{\partial z} \Big|_l \quad (3.68)$$

A equação (3.66) representa a forma fraca do problema. Definindo uma solução aproximada para o problema baseado nos valores nodais de um elemento linear, tem-se:

$$w \cong w_1\psi_1 + w_2\psi_2 \quad (3.69)$$

$$\psi_1 = 1 - \frac{z}{l} \quad (3.70)$$

$$\psi_2 = \frac{z}{l} \quad (3.71)$$

tal que  $w_i$  é o valor nodal do deslocamento e  $\psi_i$  são as funções de interpolação. Em forma matricial:

$$w \cong \mathbf{N}\mathbf{w}^{el} \quad (3.72)$$

$$\mathbf{N} = [\psi_1 \quad \psi_2] \quad (3.73)$$

$$\mathbf{w}^{el} = \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{Bmatrix} \quad (3.74)$$

Considerando que as funções ponderadoras serão obtidas pelo método de Galerkin, tem-se:

$$v_i = \psi_i \quad (3.75)$$

Dessa forma, substituindo as equações (3.72) e (3.75) na equação (3.66), existirão duas equações linearmente independentes para o problema:

$$\int_0^l \left( m_i \psi_i \frac{\partial^2 \mathbf{N}\mathbf{w}^{el}}{\partial t^2} + EA \frac{\partial \psi_i}{\partial z} \frac{\partial \mathbf{N}\mathbf{w}^{el}}{\partial z} - \psi_i q \right) dz - \psi_i(0)Q_1 - \psi_i(l)Q_2 = 0 \quad (3.76)$$

$$\int_0^l \left( m_i \psi_i \frac{\partial^2 \mathbf{N}\mathbf{w}^{el}}{\partial t^2} + EA \frac{\partial \psi_i}{\partial z} \frac{\partial \mathbf{N}\mathbf{w}^{el}}{\partial z} - \psi_i q \right) dz - \psi_i(0)Q_1 - \psi_i(l)Q_2 = 0 \quad (3.77)$$

Como  $\psi_1(l) = \psi_2(0) = 0$  e  $\psi_1(0) = \psi_2(l) = 1$ , tem-se:

$$\int_0^l \left( m_i \psi_i \frac{\partial^2 \mathbf{N}\mathbf{w}^{el}}{\partial t^2} + EA \frac{\partial \psi_i}{\partial z} \frac{\partial \mathbf{N}\mathbf{w}^{el}}{\partial z} - \psi_i q \right) dz - Q_1 = 0 \quad (3.78)$$

$$\int_0^l \left( m_i \psi_i \frac{\partial^2 \mathbf{N}\mathbf{w}^{el}}{\partial t^2} + EA \frac{\partial \psi_i}{\partial z} \frac{\partial \mathbf{N}\mathbf{w}^{el}}{\partial z} - \psi_i q \right) dz - Q_2 = 0 \quad (3.79)$$

Agrupando-se as duas equações matricialmente:

$$\int_0^l \left( m_l \mathbf{N}^T \frac{\partial^2 \mathbf{N} \mathbf{w}^{el}}{\partial t^2} + EA \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial z} \frac{\partial \mathbf{N} \mathbf{w}^{el}}{\partial z} - \mathbf{N}^T q \right) dz - \mathbf{Q}^{el} = 0 \quad (3.80)$$

$$\mathbf{Q}^{el} = \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{Bmatrix} \quad (3.81)$$

Definindo  $\mathbf{B} = d\mathbf{N}/dz$  e considerando que  $\mathbf{N}$  é função apenas de  $z$ ,  $\mathbf{w}^{el}$  é função apenas de  $t$  e que  $m_l$ ,  $A$  e  $E$  são constantes no domínio do elemento, pode-se escrever:

$$\mathbf{M}^{el} \ddot{\mathbf{w}}^{el} + \mathbf{K}^{el} \mathbf{w}^{el} = \mathbf{q}^{el} + \mathbf{Q}^{el} \quad (3.82)$$

sendo que, a matriz de massa do elemento ( $\mathbf{M}^{el}$ ), a matriz de rigidez do elemento ( $\mathbf{K}^{el}$ ) e o vetor de carregamento distribuído no elemento ( $\mathbf{q}^{el}$ ) são dados por:

$$\mathbf{M}^{el} = m_l \int_0^l \mathbf{N}^T \mathbf{N} dx \quad (3.83)$$

$$\mathbf{K}^{el} = EA \int_0^l \mathbf{B}^T \mathbf{B} dx \quad (3.84)$$

$$\mathbf{q}^{el} = \int_0^l \mathbf{N}^T q dx \quad (3.85)$$

Resolvendo as integrais, é possível obter os valores numéricos para as matrizes dos elementos:

$$\mathbf{M}^{el} = \frac{m_l l}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.86)$$

$$\mathbf{K}^{el} = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.87)$$

$$\mathbf{q}^{el} = \frac{lq}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (3.88)$$

Conforme Driscoll, Nahon e Lueck (2000), a matriz de massa do elemento pode ser diagonalizada para desacoplar os termos de aceleração. Assim:

$$\mathbf{M}^{el} = \frac{m_l l}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.89)$$

A partir de um balanço de forças e levando em consideração as condições de compatibilidade cinemática entre nós de elementos diferentes, é possível agrupar as equações de cada elemento formando um sistema de equações válido para todo o domínio do problema:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{w}} + \mathbf{K}\mathbf{w} = \mathbf{q} + \mathbf{Q} \quad (3.90)$$

Nesse caso,  $\mathbf{M}$  e  $\mathbf{K}$  representam, respectivamente, as matrizes de massa e de rigidez do sistema;  $\mathbf{q}$  representa as forças distribuídas atuando no sistema e  $\mathbf{Q}$  representa as forças pontuais externas atuando no sistema.

Para resolver o problema descrito anteriormente, é necessário definir as condições de contorno para o mesmo. As condições de contorno naturais são referentes aos termos de força externa, dadas pelo peso submerso do equipamento e pela força hidrodinâmica atuando no mesmo. Assim, tem-se que:

$$\mathbf{Q}_N = -(M_{eq} - \rho V)g - \rho C_a V \ddot{w}_N - \frac{1}{2} \rho C_d A_p \dot{w}_N |\dot{w}_N| \quad (3.91)$$

sendo que  $N$  representa o índice referente ao último nó do sistema, onde está localizado o equipamento. Como o termo da massa adicional é dependente da aceleração do equipamento, ele pode ser reagrupado na matriz de massa do sistema, em conjunto com a massa do equipamento e a componente referente ao peso do último elemento de cabo.

$$\mathbf{M}_{N,N} = \frac{m_l l}{2} + M_{eq} + \rho C_a V \quad (3.92)$$

Dessa forma, a força externa será apenas:

$$\mathbf{Q}_N = -(M_{eq} - \rho V)g - \frac{1}{2} \rho C_d A_p \dot{w}_N |\dot{w}_N| \quad (3.93)$$

Também é necessário definir as condições de contorno essenciais do problema. Nesse caso, ela será dada pelo deslocamento imposto no primeiro elemento de cabo (o ponto de conexão do mesmo com a embarcação):

$$\mathbf{w}_1 = h(t) \quad (3.94)$$

$$\dot{\mathbf{w}}_1 = \dot{h}(t) \quad (3.95)$$

$$\ddot{\mathbf{w}}_1 = \ddot{h}(t) \quad (3.96)$$

sendo  $h(t)$  uma função que represente o movimento do ponto de içamento ao longo do tempo. Além disso, é necessário definir as forças distribuídas. Nesse caso, a única força distribuída atuando no sistema é o peso submerso do cabo (não é considerado arrasto atuando no cabo), dada por:

$$q = -(m_l - \rho A)gl \quad (3.97)$$

Para resolver a equação (3.90), pode-se particionar o sistema de equações em dois novos sub-sistemas, separando os graus de liberdade submetidos às condições de contorno essenciais (sub-índice 1) e naturais (sub-índice 2).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} & \mathbf{M}_{12} \\ \mathbf{M}_{21} & \mathbf{M}_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{w}}_1 \\ \ddot{\mathbf{w}}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{w}_1 \\ \mathbf{w}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{q}_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{Q}_1 \\ \mathbf{Q}_2 \end{Bmatrix} \quad (3.98)$$

Dessa forma, uma vez que  $\ddot{\mathbf{w}}_1$ ,  $\mathbf{w}_1$ ,  $\mathbf{q}_2$  e  $\mathbf{Q}_2$  são conhecidos à priori, o sistema a ser resolvido pelo algoritmo de integração dinâmica (apresentado na Seção 3.7) é dado por:

$$\mathbf{M}_{22}\ddot{\mathbf{w}}_2 + \mathbf{K}_{22}\mathbf{w}_2 = \mathbf{q}_2 + \mathbf{Q}_2 - \mathbf{M}_{21}\ddot{\mathbf{w}}_1 - \mathbf{K}_{21}\mathbf{w}_1 \quad (3.99)$$

Posteriormente, é possível calcular as forças de reação (nesse caso, a força no topo do cabo de instalação):

$$\mathbf{Q}_1 = \mathbf{M}_{11}\ddot{\mathbf{w}}_1 + \mathbf{M}_{12}\ddot{\mathbf{w}}_2 + \mathbf{K}_{11}\mathbf{w}_1 + \mathbf{K}_{12}\mathbf{w}_2 - \mathbf{q}_1 \quad (3.100)$$

Após a resolução das equações que governam a dinâmica do problema, é possível determinar as deformações, tensões e forças atuando em cada elemento.

A deformação em um dado elemento é dada por:

$$\varepsilon_{zz} = \frac{dw}{dz} = \frac{d}{dz} \mathbf{N} \mathbf{w}^{el} = \mathbf{B} \mathbf{w}^{el} \quad (3.101)$$

Assim:

$$\varepsilon_{zz} = \frac{w_2 - w_1}{l} \quad (3.102)$$

A tensão no elemento será:

$$\sigma_{zz} = E \varepsilon_{zz} = \frac{E(w_2 - w_1)}{l} \quad (3.103)$$

A força axial em um dado elemento será:

$$F_{el} = \frac{EA(w_2 - w_1)}{l} \quad (3.104)$$

No ponto de conexão com o equipamento, a força pode ser calculada por:

$$F_{eq} = (M_{eq} + M_{add})\ddot{w}_N - Q_N \quad (3.105)$$

Dessa forma, a partir da equação (3.104) é possível obter o valor da força em qualquer ponto do cabo de instalação e, em especial, a partir das equações (3.100) e (3.105) é possível obter os esforços no topo e no ponto inferior do cabo, essenciais para determinação da janela operacional.

### 3.6 Modelo Simplificado com Comprimento Variável (MS-CV)

Nos tópicos anteriores, foram apresentados dois modelos para analisar a dinâmica do sistema cabo-equipamento, o primeiro com solução no domínio das frequências e o segundo, a partir de uma implementação em elementos finitos, com solução no domínio do tempo. Ambos os modelos consideram um comprimento fixo de cabo suspenso para a análise. O modelo proposto nesta seção tem como característica considerar a variação de comprimento de cabo suspenso durante a simulação, podendo representar situações de lançamento ou recuperação do equipamento.

As seguintes hipóteses são consideradas na construção desse modelo:

- O sistema possui um grau de liberdade: o deslocamento vertical do equipamento submarino;
- O cabo apresenta todo o seu comprimento submerso, de forma que o empuxo atua sob toda sua extensão.
- A massa e a rigidez do cabo são consideradas na análise;
- O deslocamento e a velocidade de um ponto intermediário do cabo são considerados como sendo a interpolação linear entre, respectivamente, o deslocamento e a velocidade do ponto de içamento e do equipamento (RAO, 2011);
- O cabo de instalação possui um comportamento linear elástico;
- A força hidrodinâmica atua apenas no equipamento (não no cabo);
- Cargas devido ao solecamento do cabo não são representadas.

A Figura 3.11 ilustra o modelo considerado.

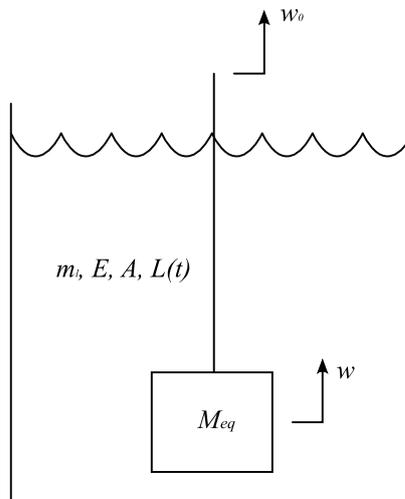


Figura 3.11: Modelo considerado para a análise com comprimento variável.

Partindo da equação de Lagrange para descrever o movimento de um sistema, tem-se:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathbb{T}}{\partial \dot{w}} \right) - \frac{\partial \mathbb{T}}{\partial w} + \frac{\partial \mathbb{U}}{\partial w} = \mathbb{Q} \quad (3.106)$$

sendo que  $\mathbb{T}$ ,  $\mathbb{U}$  e  $\mathbb{Q}$  são, respectivamente, a energia cinética, a energia potencial e as forças externas ao sistema.

A energia cinética de um elemento diferencial de cabo ( $d\ell$ ) é dada por:

$$d\mathbb{T}_1 = \frac{1}{2} m_l d\ell \dot{w}_\ell^2 \quad (3.107)$$

A velocidade de um ponto intermediário do cabo de instalação ( $\dot{w}_\ell$ ) é dada pela interpolação linear da velocidade do equipamento e do ponto de içamento (RAO, 2011), tal que:

$$\dot{w}_\ell = \dot{w} + \frac{\ell}{L} (\dot{w}_0 - \dot{w}) \quad (3.108)$$

sendo que  $\ell$  é uma variável auxiliar referente ao comprimento do cabo ( $\ell = 0$  no ponto de içamento do equipamento e  $\ell = L$  no ponto de içamento). Dessa forma, a energia cinética de um elemento diferencial de cabo será:

$$d\mathbb{T}_1 = \frac{1}{2} m_l d\ell \left[ \dot{w} + \frac{\ell}{L} (\dot{w}_0 - \dot{w}) \right]^2 \quad (3.109)$$

Integrando a equação (3.109) ao longo do comprimento total de cabo suspenso é possível ob-

ter a energia cinética total do cabo de instalação:

$$\mathbb{T}_1 = \frac{1}{2} m_l \int_0^L \left[ \dot{w} + \frac{\ell}{L} (\dot{w}_0 - \dot{w}) \right]^2 d\ell \quad (3.110)$$

$$\mathbb{T}_1 = \frac{m_l L}{6} (\dot{w}_0^2 + \dot{w}_0 \dot{w} + \dot{w}^2) \quad (3.111)$$

A energia cinética do equipamento será:

$$\mathbb{T}_2 = \frac{1}{2} M_{eq} \dot{w}^2 \quad (3.112)$$

Assim, a energia cinética total do sistema será:

$$\mathbb{T} = \mathbb{T}_1 + \mathbb{T}_2 \quad (3.113)$$

$$\mathbb{T} = \frac{m_l L}{6} (\dot{w}_0^2 + \dot{w}_0 \dot{w} + \dot{w}^2) + \frac{1}{2} M_{eq} \dot{w}^2 \quad (3.114)$$

A energia potencial gravitacional de um elemento diferencial de cabo é dada por:

$$d\mathbb{U}_1 = (m_l - \rho A) g d\ell w_\ell \quad (3.115)$$

O deslocamento de um ponto intermediário do cabo ( $w_\ell$ ) pode ser obtido pela interpolação linear do deslocamento do equipamento e do cabo (RAO, 2011):

$$w_\ell = w + \frac{\ell}{L} (w_0 - w) \quad (3.116)$$

Dessa forma, a energia potencial de um elemento diferencial de cabo será:

$$d\mathbb{U}_1 = (m_l - \rho A) g d\ell \left[ w + \frac{\ell}{L} (w_0 - w) \right] \quad (3.117)$$

A energia potencial do cabo total é obtida através da integração da equação (3.117) ao longo do comprimento do cabo:

$$\mathbb{U}_1 = (m_l - \rho A) g \int_0^L \left[ w + \frac{\ell}{L} (w_0 - w) \right] d\ell \quad (3.118)$$

$$\mathbb{U}_1 = \frac{(m_l - \rho A) g L}{2} (w_0 + w) \quad (3.119)$$

A energia potencial gravitacional do equipamento é:

$$\mathbb{U}_2 = (M_{eq} - \rho V)gw \quad (3.120)$$

A energia potencial elástica do cabo de instalação é:

$$\mathbb{U}_3 = \frac{1}{2} \frac{EA}{L} (w_0 - w)^2 \quad (3.121)$$

Dessa forma, a energia potencial total do sistema é:

$$\mathbb{U} = \mathbb{U}_1 + \mathbb{U}_2 + \mathbb{U}_3 \quad (3.122)$$

$$\mathbb{U} = \frac{(m_l - \rho A)gL}{2} (w_0 + w) + (M_{eq} - \rho V)gw + \frac{1}{2} \frac{EA}{L} (w_0 - w)^2 \quad (3.123)$$

A força hidrodinâmica atuando no equipamento pode ser considerada uma força não conservativa, assim:

$$\mathbb{Q} = -M_{add}\ddot{w} - \frac{1}{2}\rho C_d A_p \dot{w}|\dot{w}| \quad (3.124)$$

Substituindo as equações (3.114), (3.123) e (3.124) na equação (3.106) e realizando as derivadas parciais com relação a  $w$  e  $\dot{w}$ , obtém-se:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[ \frac{m_l L}{6} (\dot{w}_0 + 2\dot{w}) + M_{eq} \dot{w} \right] + \frac{(m_l - \rho A)gL}{2} + (M_{eq} - \rho V)g \\ - \frac{EA}{L} (w_0 - w) = -M_{add}\ddot{w} - \frac{1}{2}\rho C_d A_p \dot{w}|\dot{w}| \end{aligned} \quad (3.125)$$

Nesse caso específico, o comprimento de cabo suspenso também varia com o tempo, então a equação resultante, após derivação com relação ao tempo, é:

$$\begin{aligned} \left[ \frac{m' L}{6} (\dot{w}_0 + 2\dot{w}) + \frac{m' L}{6} (\ddot{w}_0 + 2\ddot{w}) + M_{eq} \ddot{w} \right] + \frac{(m' - \rho A)gL}{2} \\ + (M_{eq} - \rho V)g - \frac{EA}{L} (w_0 - w) \\ = -M_{add}\ddot{w} - \frac{1}{2}\rho C_d A_p \dot{w}|\dot{w}| \end{aligned} \quad (3.126)$$

Reagrupando os termos:

$$\begin{aligned}
& \left( M_{eq} + M_{add} + \frac{1}{3} m' L \right) \ddot{w} + \left( \frac{m_l \dot{L}}{3} + \frac{1}{2} \rho C_d A_p |\dot{w}| \right) \dot{w} + \frac{EA}{L} w \\
& = - \frac{(m_l - \rho A) g L}{2} - (M_{eq} - \rho V) g + \frac{EA}{L} w_0 \\
& - \frac{m_l \dot{L}}{6} \dot{w}_0 - \frac{m_l L}{6} \ddot{w}_0
\end{aligned} \tag{3.127}$$

Essa é a equação do movimento do sistema. Nota-se que a equação se assemelha à equação (3.39) deduzida na Seção 3.4, em especial com relação à influência da massa do cabo na massa total do sistema. Nesse caso particular, foram acrescentados os termos referentes ao peso do cabo de instalação e do equipamento como esforços externos ao sistema, de forma que a deformação estática estará incluída na solução da equação. Além disso, surgiram termos referentes à variação do comprimento de cabo com o tempo. Isso era esperado, uma vez que o objetivo é avaliar justamente a influência desse fenômeno na dinâmica do sistema.

A solução desta equação será realizada a partir de um algoritmo de integração dinâmica no tempo, uma vez que é necessário avaliar a influência da variação do comprimento de cabo. Dessa forma, a não-linearidade referente à força de arrasto será mantida.

As condições de contorno para a resolução da equação (3.127) são o deslocamento, a velocidade e a aceleração do ponto de içamento. Nesse caso, dados por:

$$w_0 = h(t) + \int V_c dt \tag{3.128}$$

$$\dot{w}_0 = \dot{h}(t) + V_c \tag{3.129}$$

$$\ddot{w}_0 = \ddot{h}(t) + \dot{V}_c \tag{3.130}$$

Nesse caso,  $V_c$  é uma função do tempo que representa a velocidade de lançamento de cabo, sendo considerada positiva para recolhimento de cabo (operações de recuperação de equipamentos) e negativa para lançamento de cabo (operações de instalação de equipamentos).

Além disso, o comprimento total de cabo suspenso ( $L$ ) e sua variação no tempo ( $\dot{L}$ ) serão dados por:

$$L = L_0 - \int V_c dt \tag{3.131}$$

$$\dot{L} = -V_c \tag{3.132}$$

Para fins de avaliação de critérios de aceitação para um dado estado de mar, é necessário determinar os esforços atuantes no cabo de instalação. Como temos um sistema com um grau de liberdade, os esforços serão dados por:

$$F_{top} = \frac{EA}{L}(w_0 - w) + \frac{(m_l - \rho A)gL}{2} \quad (3.133)$$

$$F_{eq} = \frac{EA}{L}(w_0 - w) - \frac{(m_l - \rho A)gL}{2} \quad (3.134)$$

Nesse caso foi necessário adicionar ou subtrair metade do peso total do cabo de instalação, pois a influência do peso na dinâmica do sistema já havia sido incluída na equação do movimento.

### 3.7 Método de Newmark Preditor-Corretor

Para a solução das equações obtidas nos modelos apresentados nas seções 3.5 e 3.6, é necessário um algoritmo de integração dinâmica. No escopo desta dissertação foi escolhido utilizar o algoritmo de Newmark na forma preditor-corretor (HUGHES; LIU, 1978).

O conceito básico dos algoritmos de integração dinâmica é calcular os deslocamentos e velocidades assumindo formas conhecidas para a aceleração. No caso específico do algoritmo de Newmark do tipo preditor-corretor, as seguintes relações são válidas:

$$\dot{\underline{w}}^{n+1} = \underline{\dot{w}}^{n+1} + \eta \Delta t \ddot{\underline{w}}^{n+1} \quad (3.135)$$

$$\underline{w}^{n+1} = \underline{w}^{n+1} + \Delta t^2 \delta \ddot{\underline{w}}^{n+1} \quad (3.136)$$

sendo que:

$$\underline{\dot{w}}^{n+1} = \dot{\underline{w}}^n + (1 - \eta) \Delta t \ddot{\underline{w}}^n \quad (3.137)$$

$$\underline{w}^{n+1} = \underline{w}^n + \Delta t \dot{\underline{w}}^n + \Delta t^2 \left( \frac{1}{2} - \delta \right) \ddot{\underline{w}}^n \quad (3.138)$$

tal que  $\Delta t$  é o passo de integração no tempo e  $\eta$  e  $\delta$  são parâmetros que definem o comportamento do algoritmo quanto à estabilidade<sup>9</sup>.

Dada uma equação do tipo:

$$\mathbf{M}\dot{\underline{w}} + \mathbf{K}\underline{w} = \mathbf{f}(\dot{\underline{w}}) \quad (3.139)$$

<sup>9</sup> Neste trabalho, serão considerados  $\eta = 1/2$  e  $\delta = 1/4$ , o que torna o algoritmo incondicionalmente estável.

sendo  $f(\dot{\mathbf{w}})$  uma função com todas as forças externas aplicadas ao sistema, nesse caso específico dependendo da velocidade. É possível obter sua solução fazendo o resíduo ( $\Psi$ ) se tornar nulo:

$$\Psi = M\ddot{\mathbf{w}} + K\mathbf{w} - f(\dot{\mathbf{w}}) = \mathbf{0} \quad (3.140)$$

Essa equação deve ser satisfeita para cada instante de tempo discretizado, tal que:

$$\Psi^{n+1} = M\ddot{\mathbf{w}}^{n+1} + K\mathbf{w}^{n+1} - f(\dot{\mathbf{w}}^{n+1}) = \mathbf{0} \quad (3.141)$$

A equação (3.141) pode ser reescrita em função apenas dos deslocamentos, realizando as seguintes manipulações com as equações (3.135) e (3.136):

$$\ddot{\mathbf{w}}^{n+1} = \frac{1}{\Delta t^2 \delta} (\mathbf{w}^{n+1} - \underline{\mathbf{w}}^{n+1}) \quad (3.142)$$

$$\dot{\mathbf{w}}^{n+1} = \underline{\dot{\mathbf{w}}}^{n+1} + \frac{\eta}{\Delta t \delta} (\mathbf{w}^{n+1} - \underline{\mathbf{w}}^{n+1}) \quad (3.143)$$

Dessa forma, o resíduo será função apenas dos deslocamentos, tal que:

$$\Psi^{n+1}(\mathbf{w}) = \mathbf{0} \quad (3.144)$$

A resolução deste problema pode ser obtida a partir de um algoritmo de Newton-Raphson. Nesse caso, é necessário determinar matriz tangente para o problema:

$$\mathbf{T} = \frac{\partial \Psi}{\partial \mathbf{w}} \quad (3.145)$$

$$\mathbf{T} = M \frac{\partial \ddot{\mathbf{w}}}{\partial \mathbf{w}} + K - \frac{\partial f}{\partial \dot{\mathbf{w}}} \frac{\partial \dot{\mathbf{w}}}{\partial \mathbf{w}} \quad (3.146)$$

A partir das equações (3.142) e (3.143), obtém-se:

$$\frac{\partial \ddot{\mathbf{w}}}{\partial \mathbf{w}} = \frac{1}{\Delta t^2 \delta} \quad (3.147)$$

$$\frac{\partial \dot{\mathbf{w}}}{\partial \mathbf{w}} = \frac{\eta}{\Delta t \delta} \quad (3.148)$$

Assim, a matriz tangente do problema será:

$$\mathbf{T} = \frac{1}{\Delta t^2 \delta} \mathbf{M} + \mathbf{K} - \frac{\eta}{\Delta t \delta} \frac{\partial f}{\partial \dot{\mathbf{w}}} \quad (3.149)$$

Para a formulação em elementos finitos apresentada na Seção 3.5, a matriz de força externa tangente será dada por:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial \dot{\mathbf{w}}}\right)_{N,N} = -\rho C_d A_p \dot{\mathbf{w}}_N \quad (3.150)$$

$$\left(\frac{\partial f}{\partial \dot{\mathbf{w}}}\right)_{i,j} = 0 \quad \forall \quad i, j \neq N \quad (3.151)$$

Para a formulação simplificada com comprimento de cabo variável apresentada na Seção 3.6, a equação do movimento do sistema pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} & \left(M_{eq} + M_{add} + \frac{1}{3}m_l L\right) \ddot{w} + \frac{EA}{L} w \\ & = -\frac{(m_l - \rho A)gL}{2} - (M_{eq} - \rho \mathbb{V})g + \frac{EA}{L} w_0 \\ & - \frac{m_l \dot{L}}{6} \dot{w}_0 - \frac{m_l L}{6} \ddot{w}_0 - \left(\frac{m_l \dot{L}}{3} + \frac{1}{2} \rho C_d A_p |\dot{w}|\right) \dot{w} \end{aligned} \quad (3.152)$$

Assim, a força externa tangente será dada por:

$$\frac{\partial f}{\partial \dot{w}} = -\frac{m' \dot{L}}{3} - \rho C_d A_p \dot{w} \quad (3.153)$$

De forma a evitar oscilações transitórias durante o início da integração dinâmica, duas abordagens são utilizadas. A primeira consiste em utilizar como condição inicial para o problema dinâmico a solução do problema estático equivalente. A segunda abordagem consiste em utilizar um tempo de pré-simulação em que o deslocamento imposto no ponto de içamento (e a velocidade de lançamento ou recolhimento de cabo no MS-CV) cresce de forma suave de zero até o seu valor real.

A equação (3.154) ilustra a função utilizada para a construção da rampa ( $r$ ) na pré-simulação. A vantagem da utilização desta fórmula é que suas duas primeiras derivadas são nulas tanto no ponto inicial quanto final da função, evitando transientes indesejáveis na solução das equações do movimento. A Figura 3.12 ilustra a forma desta função.

$$r = 1 - \left\{ 1 + \exp \left[ \frac{fat}{t_{pre} \left( t - \frac{t_{pre}}{2} \right)} \right] \right\}^{-1} \quad (3.154)$$

sendo que  $t_{pre}$  é o tempo de pré-simulação e  $fat$  é um fator de forma para a rampa.

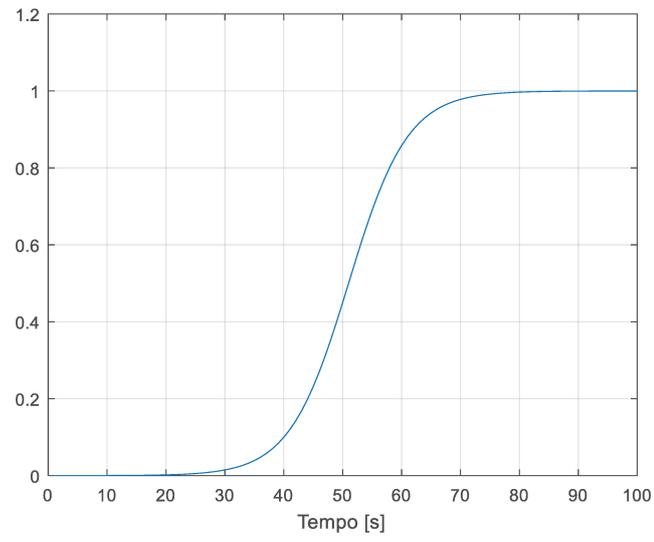


Figura 3.12: Função rampa para condições de contorno na pré-simulação.

O algoritmo utilizado para a resolução do problema dinâmico é descrito na sequência:

#### Algoritmo de Newmark com Previsão-Correção

---

1. Dado  $\mathbf{w}^0$  e  $\dot{\mathbf{w}}^0$
2. Calcular aceleração inicial:  $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{w}}^0 + \mathbf{K}\mathbf{w}^0 = \mathbf{q} + \mathbf{Q}(\dot{\mathbf{w}}^0)$
3. Para  $t^{n+1} = t^n + \Delta t$

- a. Calcular a previsão:  $\mathbf{w}^{n+1} = \mathbf{w}^n + \Delta t\dot{\mathbf{w}}^n + \Delta t^2 \left(\frac{1}{2} - \delta\right) \ddot{\mathbf{w}}^n$

$$\dot{\mathbf{w}}^{n+1} = \dot{\mathbf{w}}^n + (1 - \eta)\Delta t\ddot{\mathbf{w}}^n$$

$$\ddot{\mathbf{w}}^{n+1} = \mathbf{0}$$

- b. Calcular o resíduo:  $\boldsymbol{\Psi}^{n+1} = \mathbf{M}\ddot{\mathbf{w}}^{n+1} + \mathbf{K}\mathbf{w}^{n+1} - \mathbf{q} - \mathbf{Q}(\dot{\mathbf{w}}^{n+1})$

- c. Verificar convergência:  $\|\boldsymbol{\Psi}^{n+1}\| \leq \epsilon\|\mathbf{Q}(\dot{\mathbf{w}}^{n+1})\|$

- i. Se convergiu, voltar para 3

- ii. Caso contrário, continuar para “d”

- d. Calcular matriz tangente:  $\mathbf{T} = \frac{1}{\Delta t^2 \delta} \mathbf{M} + \mathbf{K} - \frac{\eta}{\Delta t \delta} \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \dot{\mathbf{w}}}$

- e. Calcular incremento de deslocamento:  $\mathbf{T}\Delta\mathbf{w} = -\boldsymbol{\Psi}^{n+1}$

- f. Calcular a correção:  $\mathbf{w}_{n+1} = \mathbf{w}^{n+1} + \Delta\mathbf{w}$

$$\dot{\mathbf{w}}_{n+1} = \dot{\mathbf{w}}^{n+1} + \frac{\eta}{\Delta t \delta} \Delta\mathbf{w}$$

$$\ddot{\mathbf{w}}_{n+1} = \ddot{\mathbf{w}}^{n+1} + \frac{1}{\Delta t^2 \delta} \Delta\mathbf{w}$$

- g. Voltar para “b”

---

### 3.8 Modelagem Estatística

Em certas ocasiões é necessário obter valores máximos para variáveis aleatórias. Conforme Journée e Massie (2001), é possível verificar na prática que as amplitudes das ondas (e, em geral, a resposta da embarcação e do sistema cabo-equipamento) se ajustam a uma distribuição de Rayleigh. Nesse caso, a função densidade de probabilidade será dada por:

$$p(\zeta_a) = \frac{\zeta_a}{\sigma^2} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\zeta_a}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (3.155)$$

A partir da função densidade de probabilidade, é possível determinar a probabilidade da amplitude da série ser maior que um dado valor ( $\zeta_{max}$ ):

$$P\{\zeta_a > \zeta_{max}\} = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\zeta_{max}}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (3.156)$$

Considerando-se que a probabilidade de ocorrência para a amplitude máxima em uma série será igual ao inverso do número de cruzamentos ascendentes com o zero na série, tem-se que o valor máximo mais provável ( $\zeta_{max}$ ) é:

$$P\{\zeta_a > \zeta_{max}\} = \frac{1}{N_T} = \frac{t_{serie}}{T_z} \quad (3.157)$$

$$\zeta_{max} = \sigma \sqrt{2 \ln N_T} \quad (3.158)$$

O valor máximo com um dado risco de excedência ( $a$ ) pode ser calculado por (OCHI, 1973):

$$\zeta_{max} = \sigma \sqrt{2 \ln \left( -\frac{N_T}{\ln(1-a)} \right)} \quad (3.159)$$

Dessa forma, é possível obter os valores máximos de uma série a partir das equações (3.53) ou (3.54). Além disso, convém ressaltar que como prática comum, considera-se que  $N_T$  será igual a 1000 em uma tempestade de 3 horas (JOURNÉE; MASSIE, 2001).

Caso seja necessário transformar um dado sinal aleatório em um sinal regular equivalente, pode-se usar (DNV-RP-H103, 2014b):

$$\zeta_a = \zeta_{max} \quad (3.160)$$

$$T = T_z \quad (3.161)$$

### 3.9 Modelagem no Orcaflex

Esta seção visa detalhar algumas características do software comercial Orcaflex (ORCINA, 2016), uma vez que o mesmo será usado para validar alguns dos modelos propostos nesta dissertação.

O Orcaflex é um pacote computacional para análise dinâmica não linear de sistemas offshore, sendo capaz de representar as excitações ambientais (tais como onda, vento, correnteza e forças hidrodinâmicas), a dinâmica de embarcações, cabos, dutos e corpos rígidos.

Em especial, com relação à teoria de cabos, o Orcaflex considera um modelo de massa discretizada, conectadas entre si a partir de elementos de molas e amortecedores (podendo representar comportamento não linear). Com relação à teoria de corpos rígidos (o equipamento submarino), o pacote computacional permite a determinação dos seis graus de liberdade do corpo, além de também ser possível aplicar esforços hidrodinâmicos no mesmo.

Por fim, para a integração dinâmica implícita, o software utiliza o algoritmo conhecido como  $\alpha$ -Generalizado, descrito por Chung e Hulbert (1993).

### 3.10 Definição da Janela Operacional

O ponto essencial de uma análise de instalação de equipamentos submarinos é a construção da janela operacional. Esta seção irá detalhar a metodologia utilizada para este fim, incluindo os critérios de aceitação conforme a prática recomendada DNV-RP-H103 (2014b).

Os critérios de aceitação para validação de um dado estado de mar na etapa de descida ou recuperação de um equipamento ao longo da lâmina d'água são os seguintes:

- O esforço máximo não pode ultrapassar o valor máximo admissível de nenhum elemento do sistema de içamento.
- O cabo de içamento não pode perder tração em nenhum ponto.

Considerando que qualquer elemento de conexão (manilhas, anelões, lingas, etc.) e que o equipamento foram projetado de forma que seus limites estruturais não são o fator limitante do sistema<sup>10</sup>, o ponto mais crítico do sistema será o ponto de içamento da embarcação, uma vez que nesse ponto existirão, além dos esforços dinâmicos, os esforços referentes a todo o peso do cabo submerso. Assim:

---

<sup>10</sup> Nesse caso, o equipamento deve ser projetado para suportar esforços dinâmicos de valor igual ao peso submerso do equipamento.

$$F_{top} \leq SWL \quad (3.162)$$

sendo que  $F_{top}$  é a força máxima que irá ocorrer no topo do cabo de instalação (ou seja, no ponto de içamento) e  $SWL$  (*Safe Working Load*) é a carga máxima que o cabo pode suportar de forma segura.

De forma análoga ao caso anterior, o ponto em que irão ocorrer os esforços mínimos no sistema será o ponto de conexão com o equipamento, uma vez que não existirá influência do peso submerso do cabo neste ponto. Nesse caso, a prática recomendada DNV-RP-H103 (2014b) recomenda manter o esforço mínimo no cabo acima de 10% do peso submerso do equipamento. Tal que:

$$F_{eq} \geq 0,1(M_{eq} - \rho V)g \quad (3.163)$$

sendo que  $F_{eq}$  é a força mínima que irá ocorrer no ponto inferior do cabo de instalação (ou seja, no ponto de conexão com o equipamento).

No escopo desta dissertação, a janela operacional será obtida apenas para o MS-CV, uma vez que este modelo é o único capaz de avaliar a influência da velocidade de lançamento de cabo na resposta do sistema. Para avaliar os critérios de aceitação é necessário obter os esforços máximos no cabo de instalação ao longo da análise. Neste caso, este modelo apresenta como resultado uma série no domínio do tempo para os esforços no cabo e instalação. Além disso, como o comprimento do cabo de instalação varia ao longo da simulação, a resposta do sistema não pode ser considerada um fenômeno aleatório estacionário e, conseqüentemente, a teoria apresentada na Seção 3.8 para obtenção de valores máximos não é aplicável. Dessa forma, serão realizadas diversas análises para cada estado de mar (porém alterando as fases das componentes senoidais) e os valores extremos serão obtidos pelos máximos e mínimos resultantes de 95% das análises.

**Algoritmo para construção da janela operacional com o MS-CV**

---

1. Dados os parâmetros de entrada
  2. Para cada  $H_s, T_p$  (com diversas fases aleatórias), calcular:
    - a. A resposta do ponto de içamento a partir da equação (3.32)
    - b. A força no topo do cabo ao longo do tempo a partir da equação (3.133)
    - c. A força no equipamento ao longo do tempo a partir da equação (3.134)
    - d. Verificação dos critérios de aceitação: equações (3.162) e (3.163)
      - i. Se ambos aceitos: estado de mar aceitável
      - ii. Caso contrário: estado de mar não aceitável
  3. Construir janela operacional com os estados de mar viáveis
-

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Validação dos Modelos de Ondas Oceânicas

Como visto no Capítulo 3, as ondas oceânicas são as variáveis de entrada para o problema de se determinar a janela de instalação de uma operação. Dessa forma, é necessário verificar a capacidade dos modelos propostos em representar de forma adequada a onda desejada.

A primeira verificação para o modelo de ondas oceânicas consiste em avaliar a capacidade de se obter as variáveis estatísticas a partir do espectro de densidade de energia da onda. Nesse caso, compararam-se os valores obtidos da altura significativa (equação (3.14)) e do período de pico (equação (3.15) e equação (3.19)) com os valores utilizados para construção do espectro (baseado no modelo de JONSWAP). A Tabela 4.1 ilustra os resultados obtidos. Nota-se que a altura significativa calculada apresenta desvio máximo de  $-0,15\%$  em relação ao valor de referência, enquanto que o período de pico apresenta desvio máximo de  $3,69\%$  em relação ao valor de referência. Além disso, é possível perceber que o desvio tende a aumentar quando se analisa espectros com períodos de pico menores. Por outro lado, os desvios calculados não se alteraram quando são analisados espectros com diferentes alturas significativas.

Tabela 4.1: Comparação dos resultados obtidos a partir de espectros de densidade de energia com os parâmetros de referência utilizados para construção do espectro.

Parâmetros de Referência		Resultados			
$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	Desvio no $H_s$ (%)	$T_p$ (s)	Desvio no $T_p$ (%)
1.5	5	1.500	0.000	5.184	3.687
1.5	8	1.499	-0.058	8.185	2.308
1.5	11	1.498	-0.117	11.192	1.742
1.5	14	1.498	-0.150	14.196	1.401
2.0	5	2.000	0.000	5.184	3.687
2.0	8	1.999	-0.058	8.185	2.308
2.0	11	1.998	-0.117	11.192	1.742
2.0	14	1.997	-0.150	14.196	1.401
2.5	5	2.500	0.000	5.184	3.687
2.5	8	2.499	-0.058	8.185	2.308
2.5	11	2.497	-0.117	11.192	1.742
2.5	14	2.496	-0.150	14.196	1.401

A segunda verificação consiste em analisar a capacidade de se obter as variáveis estatísticas de interesse a partir de sinais no domínio do tempo. Dessa forma, para um dado espectro de onda, foram gerados sinais temporais (conforme metodologia apresentada em 3.1.5) para diversos valores de  $N$  (número de termos senoidais, conforme equação (3.9)). Para cada um desses sinais, foram calculadas as variáveis estatísticas de interesse: altura significativa (equação (3.8)), período médio (equação (3.5)), valor máximo mais provável (equação (3.158)) e com 5% de risco de excedência (equação (3.159)) da série. Os valores calculados de  $H_s$  e  $T_z$  foram então comparados com os valores utilizados para construção do espectro e o valor máximo encontrado em cada sinal foi comparado com o valor máximo mais provável e com o valor máximo com 5% de risco de excedência.

Como exemplo, foi considerado um estado de mar gerado a partir de um espectro de JONSWAP com  $H_s = 2,0m$  e  $T_p = 8s$ . A série temporal resultante possui três horas de duração, tendo sido discretizada com intervalos de 0,1s.

A Figura 4.1 ilustra a altura significativa obtida a partir do sinal no domínio do tempo para diversos valores de  $N$ . Nota-se que, neste caso, não existe dependência da variável calculada com a quantidade de componentes senoidais e o valor obtido apresenta desvio máximo de aproximadamente 1% com relação ao valor utilizado como referência para construção do sinal.

A Figura 4.2 ilustra o valor calculado para o período médio em função do número de componentes senoidais. Nesse caso, são necessários mais que 150 componentes para obter convergência nos resultados. O desvio máximo nesse caso foi de aproximadamente 4% após a convergência.

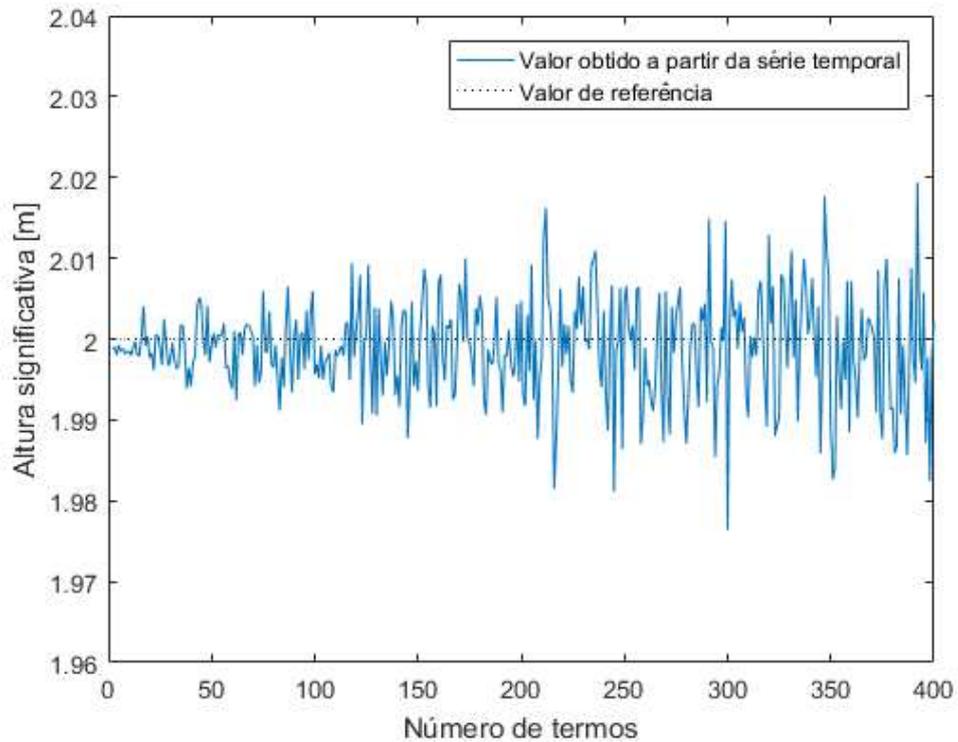


Figura 4.1: Altura significativa do sinal no domínio do tempo em função do número de termos senoidais para um espectro de JONSWAP com  $H_s = 2,0 \text{ m}$  e  $T_p = 8 \text{ s}$ .

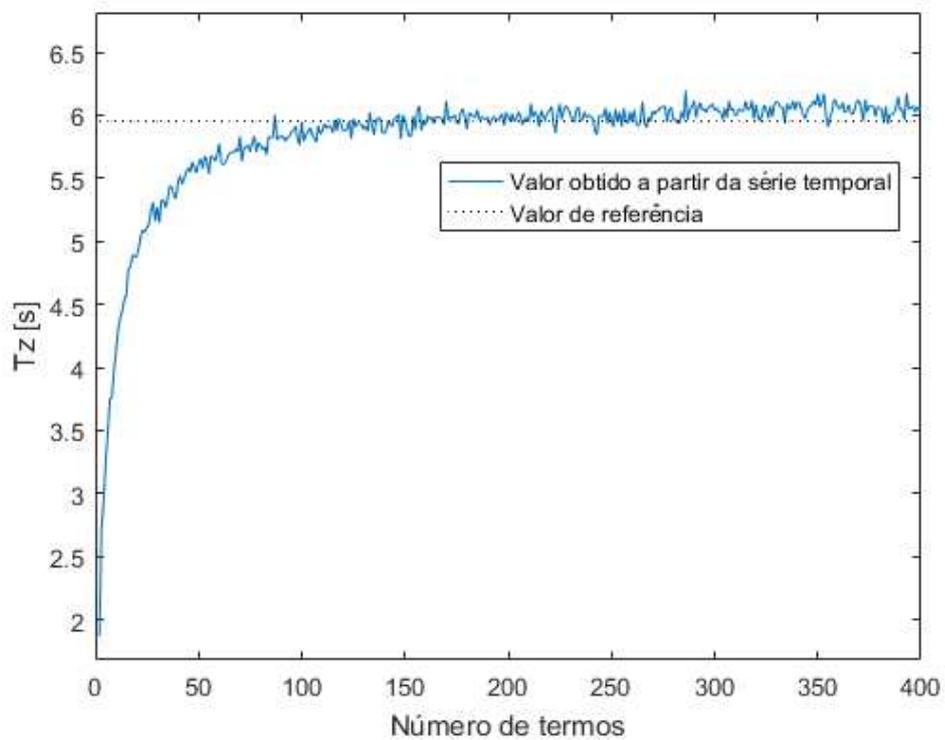


Figura 4.2: Período médio calculado a partir do sinal no domínio do tempo em função do número de termos senoidais para um espectro de JONSWAP com  $H_s = 2,0 \text{ m}$  e  $T_p = 8 \text{ s}$ .

A Figura 4.3 apresenta o valor máximo mais provável e o valor máximo com 5% de risco de excedência em comparação com o valor máximo obtido na série. Apesar do valor máximo mais provável e máximo com 5% de risco não dependerem da quantidade de componentes senoidais, a valor máximo da série necessita de mais que aproximadamente 30 termos para apresentar um comportamento estacionário.

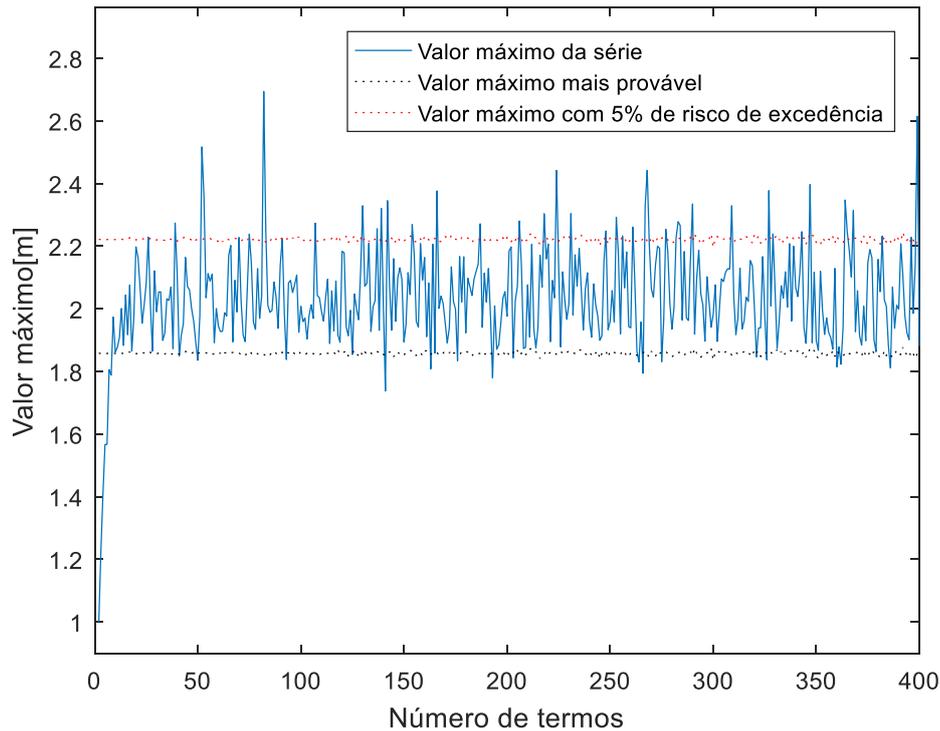


Figura 4.3: Valor máximo da série, máximo mais provável e máximo com 5% de risco de excedência em função do número de termos senoidais para um espectro de JONSWAP com  $H_s = 2,0m$  e  $T_p = 8 s$ .

O comportamento apresentado neste exemplo para o cálculo da altura significativa e dos valores máximos a partir do sinal no domínio do tempo é semelhante caso seja utilizado um espectro com outros valores de  $H_s$  e  $T_p$ . Entretanto, o cálculo do  $T_z$  a partir do sinal temporal depende do valor do período de pico do espectro usado como base para construção do sinal. A Figura 4.4 ilustra essa influência. É possível perceber que a convergência é mais rápida quando são considerados períodos de pico menores. Nesse caso, para manter o desvio menor que 5% foram necessários aproximadamente 100 termos no caso de  $T_p = 5 s$  e 600 termos no caso de  $T_p = 14 s$ .

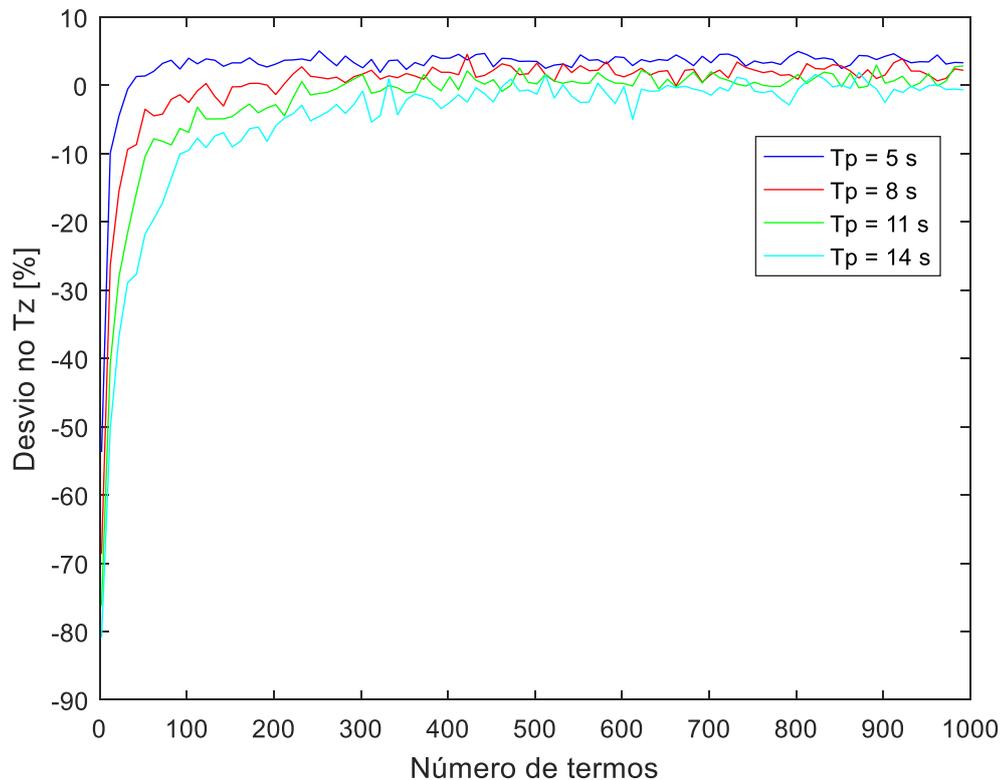


Figura 4.4: Influência do período de pico do espectro na convergência do período médio do sinal no domínio do tempo.

A partir dos resultados apresentados, é possível obter as seguintes conclusões:

- Os modelos propostos para análise de ondas oceânicas são coerentes e permitem obter as variáveis estatísticas de interesse de forma adequada tanto a partir do sinal no domínio do tempo quanto pelo espectro de densidade de energia;
- A análise espectral permite obter as variáveis estatísticas com desvio inferior a 4%.
- A análise do sinal no domínio do tempo permite obter as variáveis estatísticas com desvio inferior a 5%;
- Para a análise no domínio do tempo, a influência do número de componentes senoidais não é expressiva no cálculo da altura significativa, do valor máximo mais provável e do valor máximo com 5% de risco de excedência;
- Para a análise no domínio do tempo, o cálculo do período médio do sinal depende da quantidade de componentes senoidais e do período de pico do espectro usado com referência para construção do sinal. Nesse caso, a convergência é mais lenta quando são considerados períodos de pico maiores (o pior caso analisado necessitou de aproximadamente 600 componentes para convergir);

## 4.2 Validação dos Modelos de Dinâmica da Embarcação

Assim como as ondas oceânicas, os movimentos da embarcação possuem importante influência na obtenção da janela operacional, uma vez que o movimento do ponto de içamento será utilizado como parâmetro de entrada para determinação dos esforços no cabo de instalação. Dessa forma, também é necessário verificar a validade dos modelos propostos para a análise da dinâmica da embarcação.

A primeira verificação consiste em calcular a resposta da embarcação, para uma dada onda irregular incidente, usando a metodologia apresentada na Seção 3.2 e comparar com os resultados obtidos através do software comercial Orcaflex. Nessa verificação e em todas as análises apresentadas na sequência será considerado o ponto de içamento  $x_p = -10\text{ m}$  e  $y_p = -20\text{ m}$ , o ângulo de incidência  $\beta = 165^\circ$  e a embarcação cujo *RAO* está apresentado no ANEXO A. Além disso, os espectros de densidade de energia para as ondas incidentes serão sempre referentes ao modelo de JONSWAP.

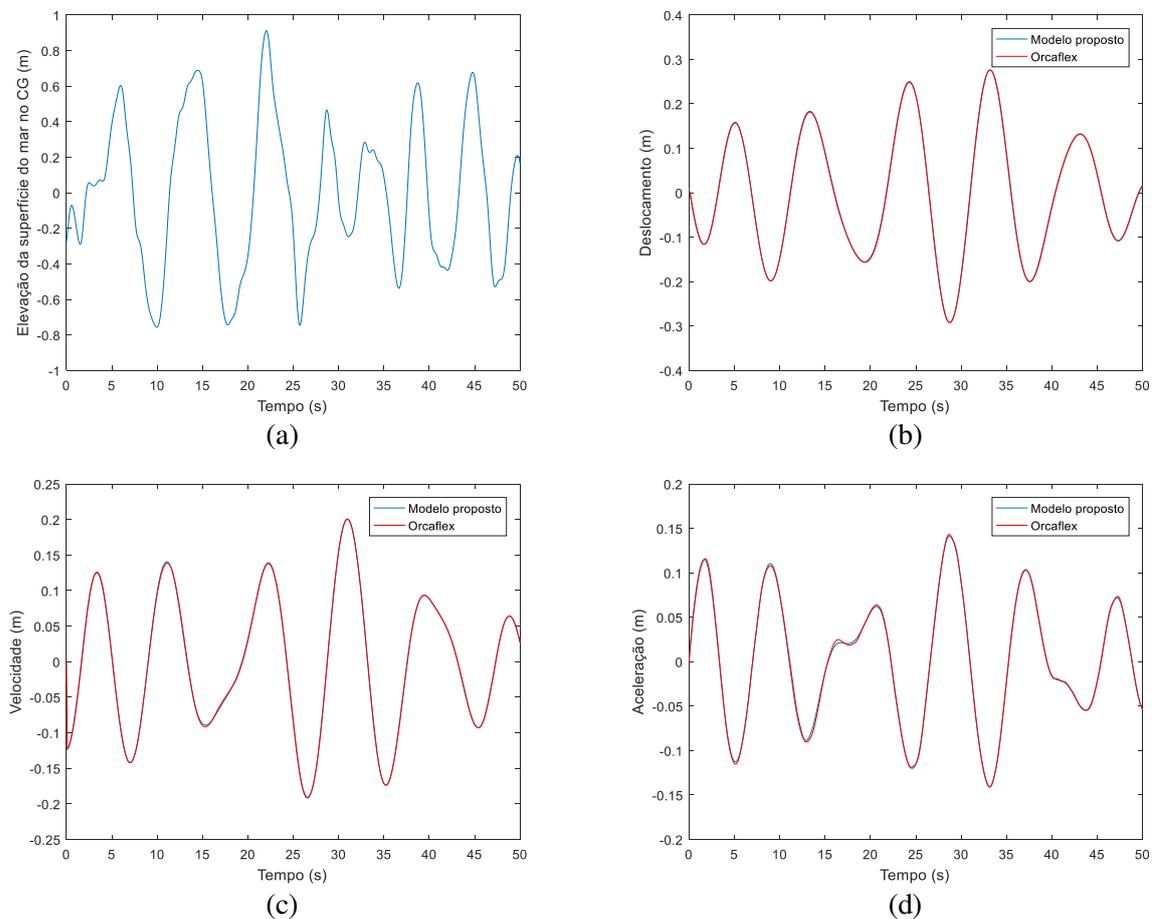


Figura 4.5: Comparação da resposta da embarcação obtida no modelo proposto e no Orcaflex. Foi considerada uma onda com  $H_s = 2,0\text{ m}$  e  $T_p = 8\text{ s}$ .

A Figura 4.5a ilustra a onda utilizada para análise ( $H_s = 2,0 \text{ m}$ ,  $T_p = 8 \text{ s}$ ). A resposta da embarcação foi calculada a partir da equação (3.32). A Figura 4.5b-d ilustra as respostas para o ponto de içamento na direção vertical. Nota-se a correspondência de resultados entre o modelo proposto e os resultados obtidos no software comercial. Resultados semelhantes foram obtidos para outras ondas, embarcações e pontos de içamento considerados.

A próxima verificação consiste em comparar a resposta da embarcação obtida a partir de uma análise espectral (equação (3.31)) com a resposta obtida a partir da análise no domínio do tempo (equação (3.32)). Para a resposta no domínio do tempo, serão consideradas séries de 3 horas de duração, discretizadas a cada 0,1 segundo.

A Figura 4.6 ilustra a convergência do valor máximo com 5% de risco de excedência para a resposta da embarcação em função do número de componentes senoidais do sinal no domínio do tempo. Nesse caso, foi considerada uma onda com  $H_s = 2,0 \text{ m}$ . Nota-se que a convergência é mais lenta para períodos baixos, sendo que para o período de 5 segundos são necessários aproximadamente 700 termos para obter desvio relativo inferior a 10%. O aumento do número de componentes, a partir deste valor, resulta em redução mais lenta do desvio relativo e aumenta significativamente o custo computacional da análise.

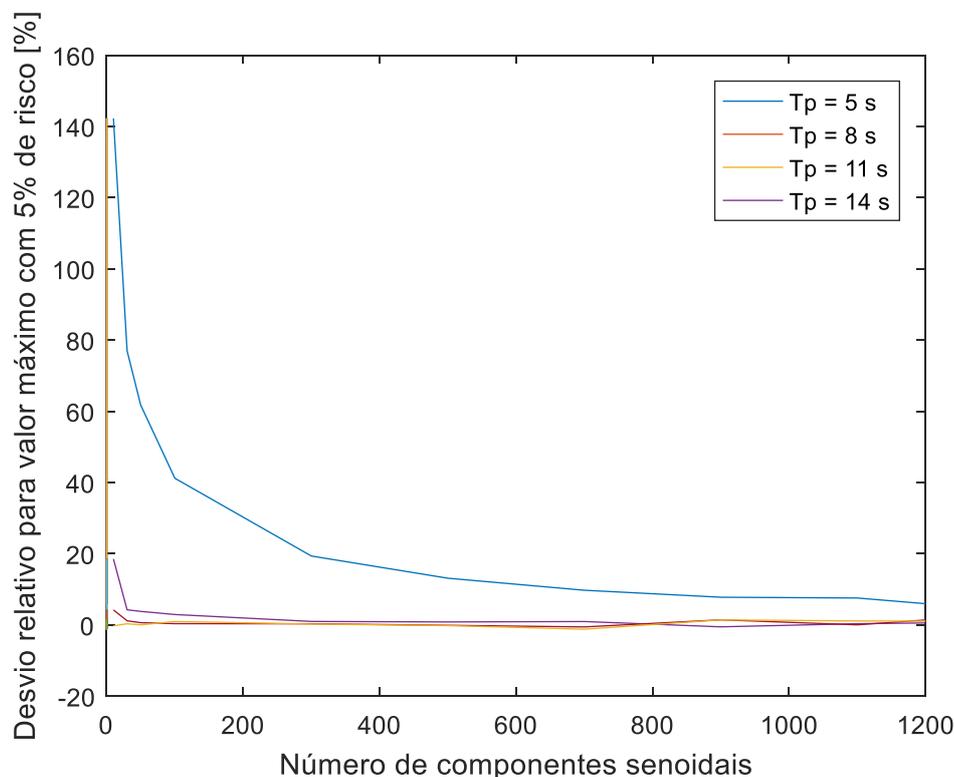


Figura 4.6: Desvio relativo entre a análise no domínio do tempo e espectral para o valor máximo com 5% de risco de excedência. Foi considerada uma onda com  $H_s = 2,0 \text{ m}$ .

A Tabela 4.2 ilustra a comparação dos resultados obtidos a partir de espectros de densidade de energia com os resultados obtidos a partir de análise no domínio do tempo para várias ondas incidentes (considerando 1000 componentes senoidais). Nota-se que o desvio relativo é inferior a 7,5% em todos os casos analisados. Além disso, a influência do período é mais relevante que da amplitude da onda, sendo que para períodos menores o desvio relativo é maior (devido à convergência mais lenta para a análise no domínio do tempo, conforme apresentado anteriormente).

Tabela 4.2: Comparação dos resultados obtidos a partir de espectros de densidade de energia com os resultados obtidos a partir de análise no domínio do tempo.

Parâmetros de Referência		Valor máximo com 5% de risco de excedência		
$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Análise no domínio do tempo (m)	Análise Espectral (m)	Desvio (%)
1.5	5	0.124	0.116	7.3
1.5	7	0.421	0.416	1.2
1.5	9	0.708	0.716	-1.1
1.5	11	0.989	0.990	-0.2
1.5	13	1.114	1.104	0.9
2.0	5	0.165	0.154	7.3
2.0	7	0.562	0.555	1.3
2.0	9	0.942	0.955	-1.4
2.0	11	1.320	1.320	0.0
2.0	13	1.490	1.473	1.2
2.5	5	0.207	0.193	7.5
2.5	7	0.695	0.694	0.2
2.5	9	1.200	1.193	0.6
2.5	11	1.639	1.650	-0.7
2.5	13	1.796	1.841	-2.4

Convém ressaltar que os resultados obtidos para o cálculo da altura significativa e do período médio do sinal apresentam comportamento semelhante (com relação ao desvio e à convergência) aos resultados apresentados anteriormente para o valor máximo com 5% de risco de excedência.

Também é importante frisar que os valores obtidos pela análise no domínio do tempo dependem da onda irregular utilizada, de forma que caso sejam utilizadas ondas diferentes (mantendo a mesma altura significativa e período de pico, mas alterando a fase dos componentes senoidais), os resultados obtidos não serão exatamente iguais. Os desvios entre os métodos, entretanto, se mantêm na mesma ordem de grandeza aos apresentados.

De forma ilustrativa, o *RAO* de deslocamento vertical da embarcação no ponto de içamento é apresentado na Figura 4.7, notam-se picos de movimentos para períodos de aproximadamente 7 s e 10 s, por outro lado, para períodos próximos a 8 s existe uma atenuação mais acentuada da resposta. Para períodos inferiores a 4 s, a embarcação praticamente não responde à excitação das ondas. Para uma onda com  $H_s = 2,0m$ ,  $T_p = 9s$ , o espectro de densidade de energia da onda e da resposta da embarcação são apresentadas na Figura 4.8. Claramente, a resposta da embarcação mantém concordância com as regiões de amplificação e atenuação do *RAO* da embarcação e com as regiões de maior energia do espectro da onda.

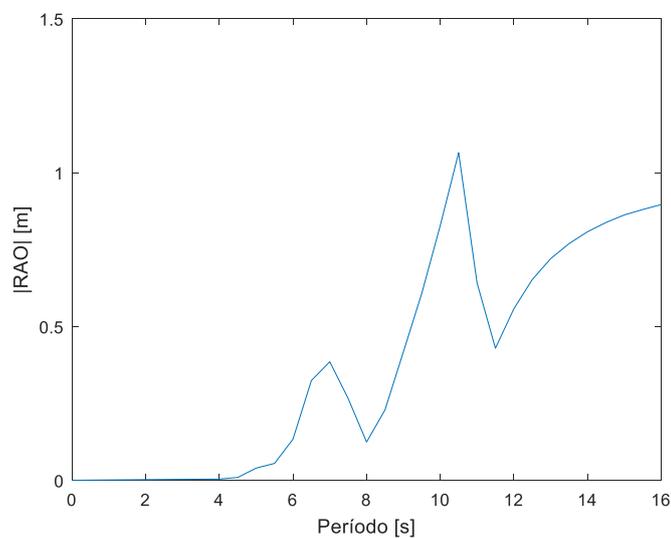


Figura 4.7: Amplitude do RAO de deslocamento vertical da embarcação no ponto de içamento.

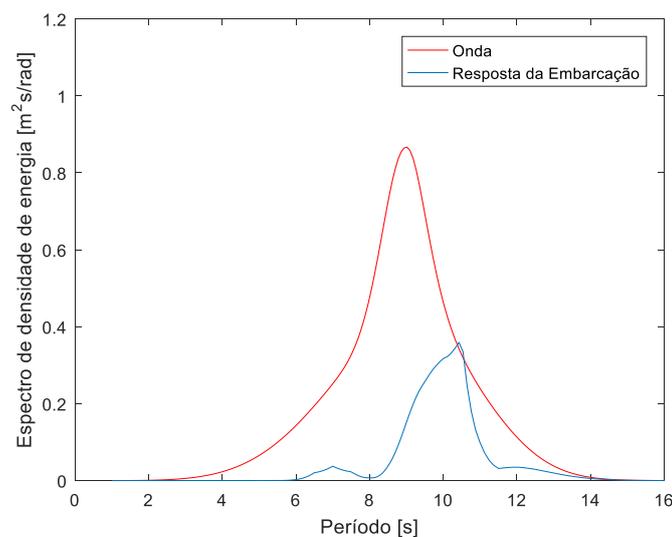


Figura 4.8: Espectro de densidade de energia da onda incidente ( $H_s = 2,0m$ ,  $T_p = 9s$ ) e da resposta da embarcação.

A próxima verificação consiste em analisar a capacidade de se obter o valor máximo da série a partir das variáveis estatísticas do sinal. Nesse caso, a Tabela 4.3 ilustra o valor máximo do sinal no domínio do tempo, o valor máximo mais provável e o valor máximo com 5% de risco de excedência para diversas ondas incidentes. As ondas foram geradas utilizando 1000 componentes senoidais. É possível notar que o valor máximo da resposta excede o valor máximo mais provável em algumas situações, o que não ocorreu com o valor máximo com 5% de risco para os casos analisados.

Tabela 4.3: Comparação dos resultados obtidos para os valores máximos na análise no domínio do tempo.

Parâmetros de Referência		Resultados (análise no domínio do tempo)		
$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Valor máximo da resposta (m)	Valor máximo mais provável (m)	Valor máximo com 5% de risco (m)
1.5	5	0.100	0.1041	0.125
1.5	7	0.342	0.3464	0.414
1.5	9	0.604	0.6121	0.732
1.5	11	0.856	0.8387	1.003
1.5	13	0.915	0.9195	1.100
2.0	5	0.130	0.1383	0.165
2.0	7	0.473	0.4687	0.561
2.0	9	0.750	0.8027	0.960
2.0	11	1.226	1.1007	1.316
2.0	13	1.198	1.2253	1.465
2.5	5	0.175	0.1726	0.206
2.5	7	0.581	0.5799	0.694
2.5	9	1.038	1.0142	1.213
2.5	11	1.355	1.3177	1.576
2.5	13	1.670	1.5772	1.886

Para exemplificar a situação descrita anteriormente, a Figura 4.9 ilustra a resposta da embarcação no domínio do tempo para uma onda incidente de  $H_s = 2$  m,  $T_p = 11$  s. Também são apresentados o valor máximo mais provável e o valor máximo com 5% de risco de excedência. Nota-se que ocorre a violação do valor máximo mais provável em alguns instantes de tempo.

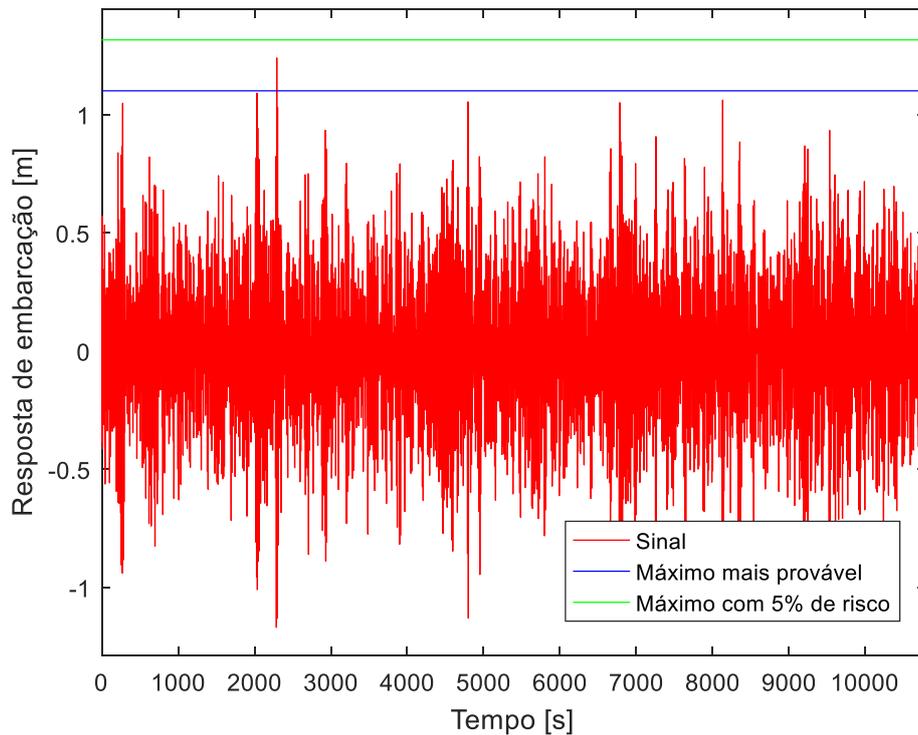


Figura 4.9: Resposta da embarcação em função do tempo para onda com  $H_s = 2 \text{ m}$ ,  $T_p = 11 \text{ s}$ .

A partir dos resultados apresentados nesta seção, podem-se obter as seguintes conclusões:

- Os modelos propostos para análise da dinâmica da embarcação são coerentes e permitem obter as variáveis estatísticas de interesse de forma adequada tanto a partir do sinal no domínio do tempo quanto pelo espectro de densidade de energia;
- O modelo para análise dos movimentos da embarcação no domínio do tempo apresentou resultados compatíveis com o software comercial Orcaflex;
- A análise no domínio do tempo é sensível ao número de componentes senoidais utilizados para construção do sinal, sendo que a convergência é mais lenta para representar ondas com períodos de pico menores (o pior caso analisado necessitou de aproximadamente 700 componentes para convergir);
- A comparação dos resultados obtidos pela análise espectral e pela análise no domínio do tempo apresentou desvio inferior a 7,5% em todos os casos analisados, após a convergência ter sido obtida (considerando 1000 componentes senoidais);
- O valor máximo mais provável é, em alguns casos, inferior ao valor máximo da série temporal. O mesmo não foi verificado para o valor máximo com 5% de risco de exceção.

### 4.3 Validação do MEF-CF

O modelo em elementos finitos com comprimento de cabo fixo foi apresentado na Seção 3.5. De forma a verificar a validade desse modelo, esse tópico irá apresentar alguns resultados e compará-los com os resultados obtidos com o Orcaflex. Os parâmetros apresentados na Tabela 4.4 foram utilizados como dados de entrada para o problema.

Tabela 4.4: Parâmetros de análise para verificação do MEF-CF.

	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>
Cabo de instalação	Peso linear	24,6 kgf/m
	Peso linear submerso	20,4 kgf/m
	Rigidez axial (EA)	315 MN
	Comprimento	1000 m
Equipamento	Massa	60 t
	Volume	7.63 m <sup>3</sup>
	Área projetada	56,95 m <sup>2</sup>
	Massa adicional	300 t
	Coefficiente de arrasto	7
Integrador	Passo de tempo	0,1 s
	Tempo de pré-simulação	100 s
	Tempo de simulação	100 s
	Erro relativo máximo	10 <sup>-6</sup>
	Número de elementos	10

A primeira verificação consiste em avaliar o modelo considerando uma excitação harmônica. A Figura 4.10a ilustra o deslocamento imposto no ponto de içamento. Nesse caso, foi considerado um sinal senoidal com amplitude unitária e período de dez segundos. A Figura 4.10b-d ilustra, respectivamente, o deslocamento, a velocidade e a aceleração do equipamento submarino. Enquanto a Figura 4.10e-f ilustra, respectivamente, a força no topo e a força no equipamento. Nota-se que os resultados apresentados pelo modelo proposto são compatíveis com aqueles apresentados pelo software comercial. Além disso, também é possível perceber o caráter não linear do sistema quando se analisa a curva de aceleração do equipamento.

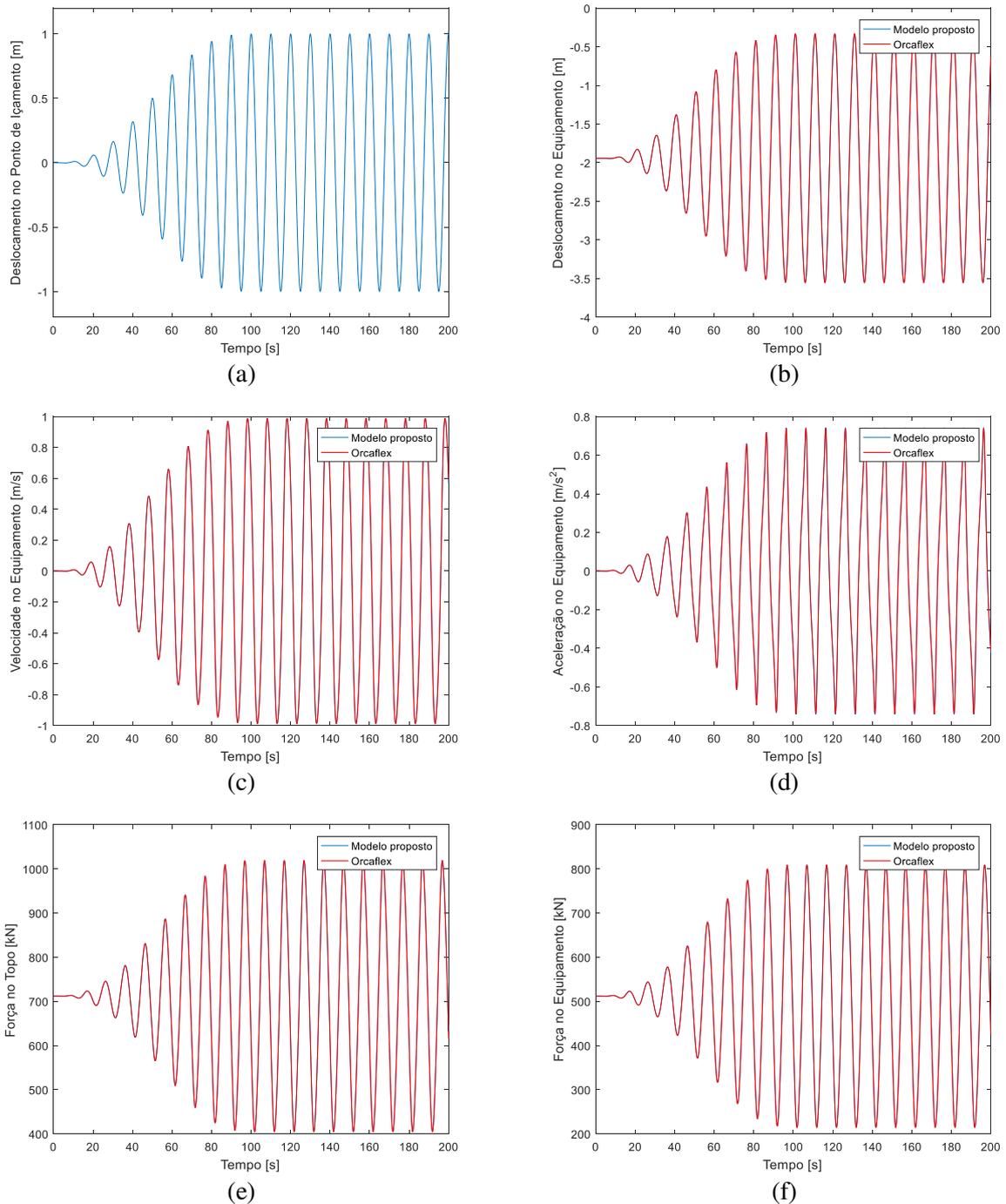


Figura 4.10: Comparação entre o MEF-CF e os resultados obtidos pelo software Orcaflex para um sinal senoidal como excitação do sistema.

Na sequência, apresenta-se a análise considerando uma excitação aleatória para o sistema. A Figura 4.11a ilustra o deslocamento do ponto de içamento utilizado como condição de contorno para o modelo. A Figura 4.11b-f apresenta os resultados obtidos para a cinemática no equipamento e os esforços no cabo de instalação. Novamente, nota-se a correspondência entre o modelo proposto e os resultados obtidos com o Orcaflex.

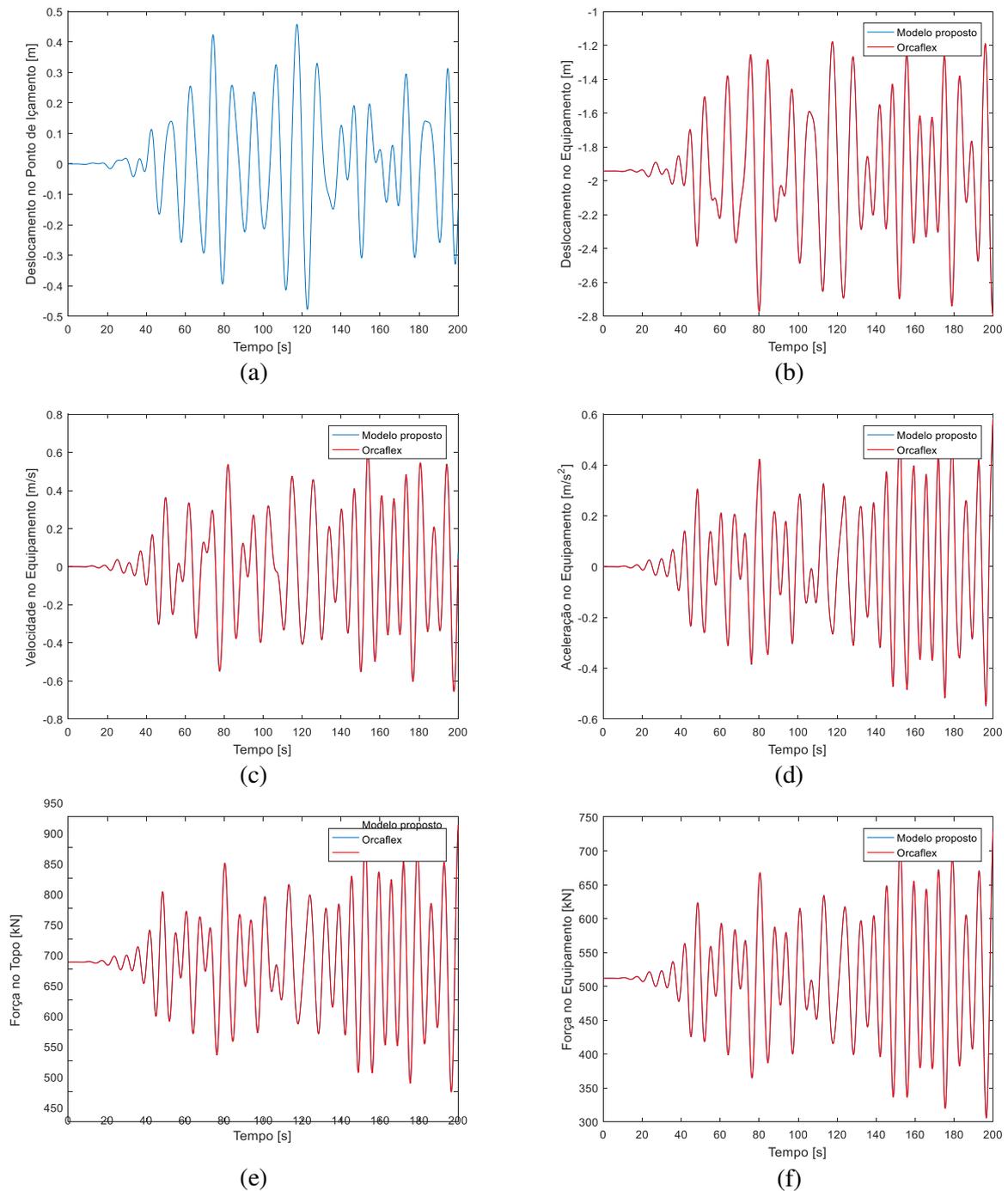


Figura 4.11: Comparação dos resultados obtidos entre o modelo proposto em elementos finitos e o software Orcaflex para uma excitação irregular.

A próxima verificação consiste em realizar uma análise de convergência para determinar o refinamento necessário para a malha. Nesse caso, foi considerada uma onda de amplitude igual a 2 metros, período de 8 segundos e um comprimento suspenso de cabo de 2000 metros. Como variáveis de controle, utilizou-se a amplitude da tração no topo e no ponto inferior do cabo de instalação. A Figura 4.12 ilustra os resultados obtidos. Nota-se que para obter convergência com precisão de aproximadamente 1 kN são necessários aproximadamente 25 ele-

mentos. Também é possível perceber que mesmo com apenas 1 elemento o desvio é menor do que 5%. Convém destacar que, caso sejam alterados os valores da excitação e do comprimento de cabo suspenso, o número de elementos necessários para atingir a convergência é semelhante ou inferior ao apresentado neste exemplo.

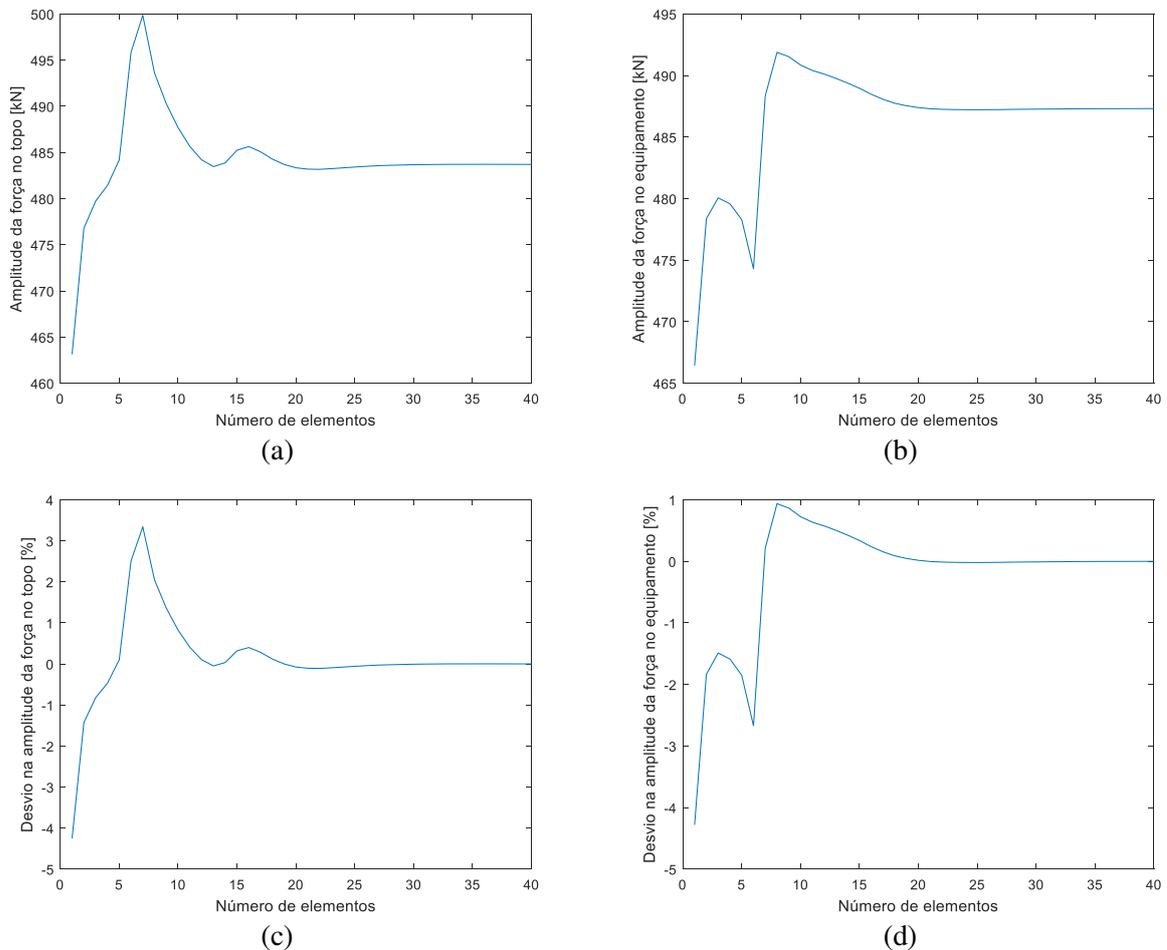


Figura 4.12: Análise de convergência avaliando a influência da quantidade de elementos nos esforços atuantes no cabo de instalação.

Com base nos resultados apresentados, é possível concluir que:

- O modelo proposto é capaz de obter a dinâmica do sistema cabo-equipamento de forma satisfatória, tendo apresentado resultados semelhantes ao software comercial Orcaflex tanto na análise de excitações regulares quanto irregulares;
- Uma malha com 25 elementos foi capaz de apresentar resultados com desvio inferior a 1 kN na amplitude do esforço no cabo de instalação. Além disso, mesmo utilizando uma malha pouco refinada, desvios inferiores a 5% foram obtidos, o que indica pouca influência dos modos de vibração do cabo na dinâmica do sistema.

#### 4.4 Comparação dos modelos considerando comprimento fixo de cabo

Após validar os modelos de ondas oceânicas, da dinâmica da embarcação e do modelo em elementos finitos, esta seção irá apresentar a comparação dos resultados obtidos pelos três modelos de análise da dinâmica do sistema cabo-equipamento. O intuito desta análise é mostrar a capacidade do MS-CV em analisar a resposta do sistema em situações de comprimento suspenso fixo e comparar os resultados obtidos com os modelos tradicionalmente usados na indústria (MS-CF e MEF-CF).

A primeira verificação consiste em comparar a resposta obtida pelos três modelos considerando uma excitação senoidal. Nesse caso, foram considerados os parâmetros indicados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Parâmetros de análise para comparação de modelos.

	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>
Cabo de instalação	Peso linear	24,6 kgf/m
	Peso linear submerso	20,4 kgf/m
	Rigidez axial (EA)	315 MN
Equipamento	Massa	60 t
	Volume	7.63 m <sup>3</sup>
	Área projetada	56,95 m <sup>2</sup>
	Massa adicional	300 t
	Coefficiente de arrasto	7
Integrador	Passo de tempo	0,1 s
	Tempo de pré-simulação	100 s
	Tempo de simulação	100 s
	Erro relativo máximo	10 <sup>-6</sup>
	Número de elementos (MEF-CF)	30

A Figura 4.13 ilustra o valor máximo e mínimo dos esforços no topo e na parte inferior do cabo de instalação para cada um dos três modelos apresentados em função da profundidade do equipamento (comprimento de cabo suspenso). Nesse caso, foram realizadas análises no domínio do tempo (MEF-CF e MS-CV) para diversas profundidades do equipamento e obtidos os valores máximos e mínimos da série após término da pré-simulação. A Figura 4.13a-b ilustra os resultados obtidos considerando uma excitação com amplitude de 0,3 metros e período de 5 segundos, enquanto que a Figura 4.13c-d considera período de 9 segundos e a Figura 4.13e-f considera período de 13 segundos.

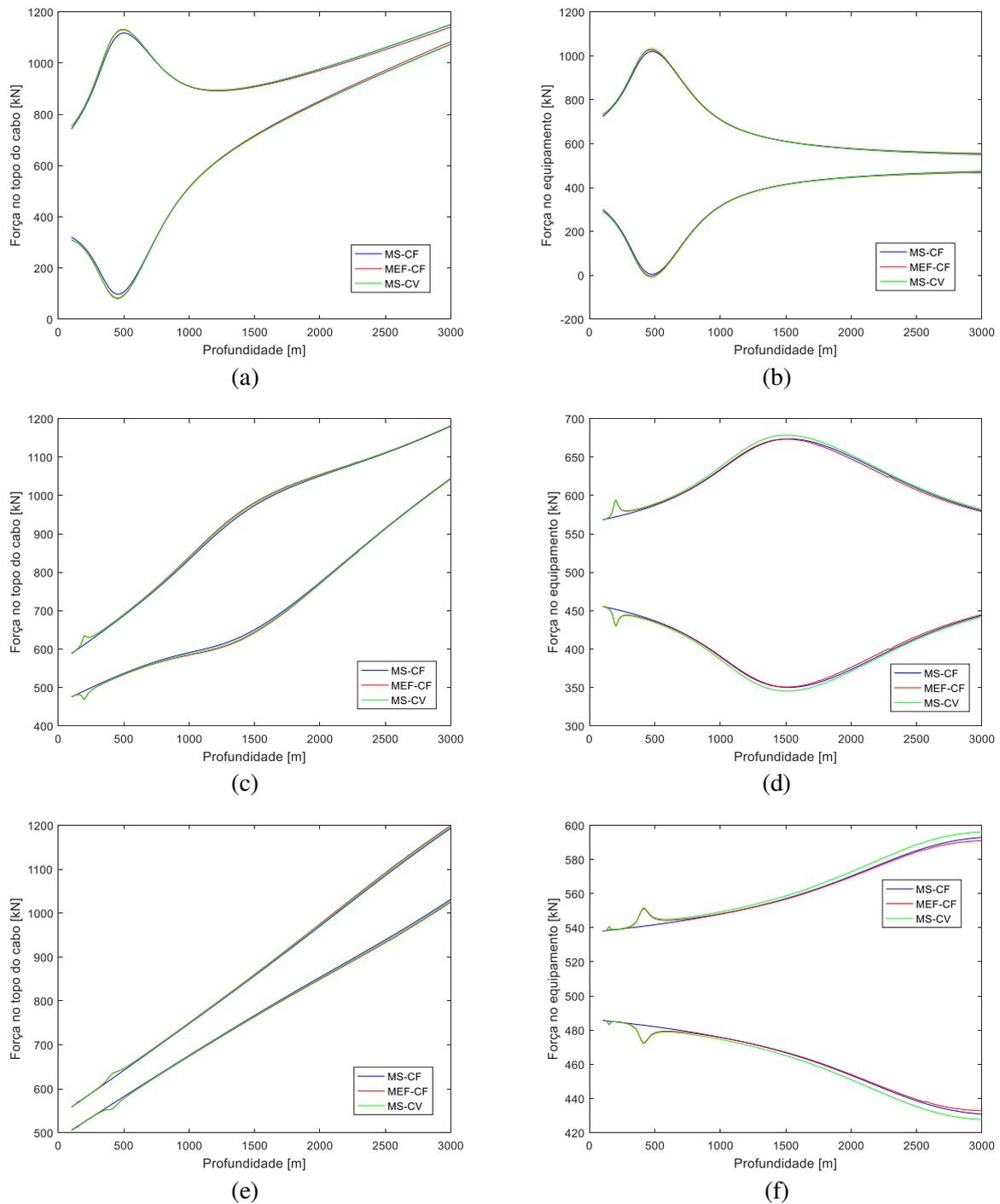


Figura 4.13: Comparação dos resultados obtidos entre os modelos considerando uma excitação senoidal com amplitude de 0,3 metros. a-b) Período de excitação de 5 segundos. c-d) Período de excitação de 9 segundos. e-f) Período de excitação de 13 segundos.

Analisando a Figura 4.13, nota-se que o pico de resposta do sistema ocorre em diferentes profundidades quando o período de excitação é alterado. Isso ocorre pois a frequência natural do sistema varia em função do comprimento suspenso de cabo, sendo que quanto menor o comprimento suspenso, maior é a rigidez do sistema e, conseqüentemente, menor é o período de ressonância (a Figura 4.14 ilustra a variação do período de ressonância do sistema com um

grau de liberdade em função da profundidade). Além disso, a amplitude do sinal durante a ressonância é maior quando o período de excitação é menor. Também é possível perceber que existem picos de resposta secundários que ocorrem em profundidades em que a frequência de excitação é equivalente a um múltiplo ímpar da frequência de ressonância do sistema para aquela profundidade. Nestes casos, existem componentes senoidais com frequência superior na resposta do sistema, o que é conhecido como resposta superharmônica. Esse fenômeno é típico de sistemas não lineares e, dessa forma, não é representado pelo MS-CF. Fora desta região, os três modelos apresentam resultados comparáveis.

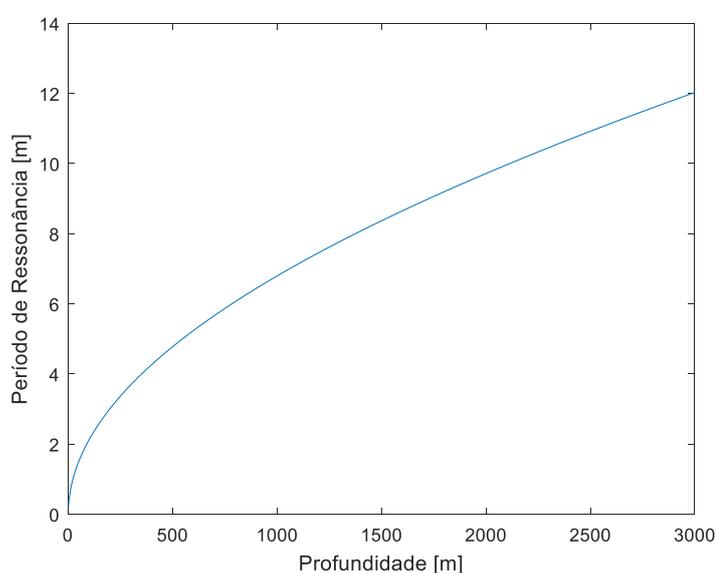


Figura 4.14: Período de ressonância do sistema em função da profundidade do equipamento.

A Figura 4.15 ilustra a resposta no domínio do tempo e das frequências para a situação com comprimento suspenso de 200 metros e período de excitação de 9 segundos utilizando o MEF-CF e MS-CV. É possível perceber a presença de duas componentes senoidais, a primeira com frequência de 0,11 Hz (9 segundos de período), semelhante à frequência de excitação, e a segunda com frequência de 0,33 Hz (3 segundos de período) igual a três vezes a frequência de excitação e igual à frequência natural do sistema para esta profundidade. Além disso, é possível perceber que o componente de frequência 0,11 Hz possui amplitude de aproximadamente 60 kN, semelhante à resposta obtida pelo MS-CF como representado na Figura 4.13c-d. Isso indica que a diferença de amplitude total da resposta entre os modelos MS-CF e MS-CV/MEF-CF é devida a existência de componentes superharmônicos que só são representadas pelos modelos que consideram as não-linearidades do sistema.

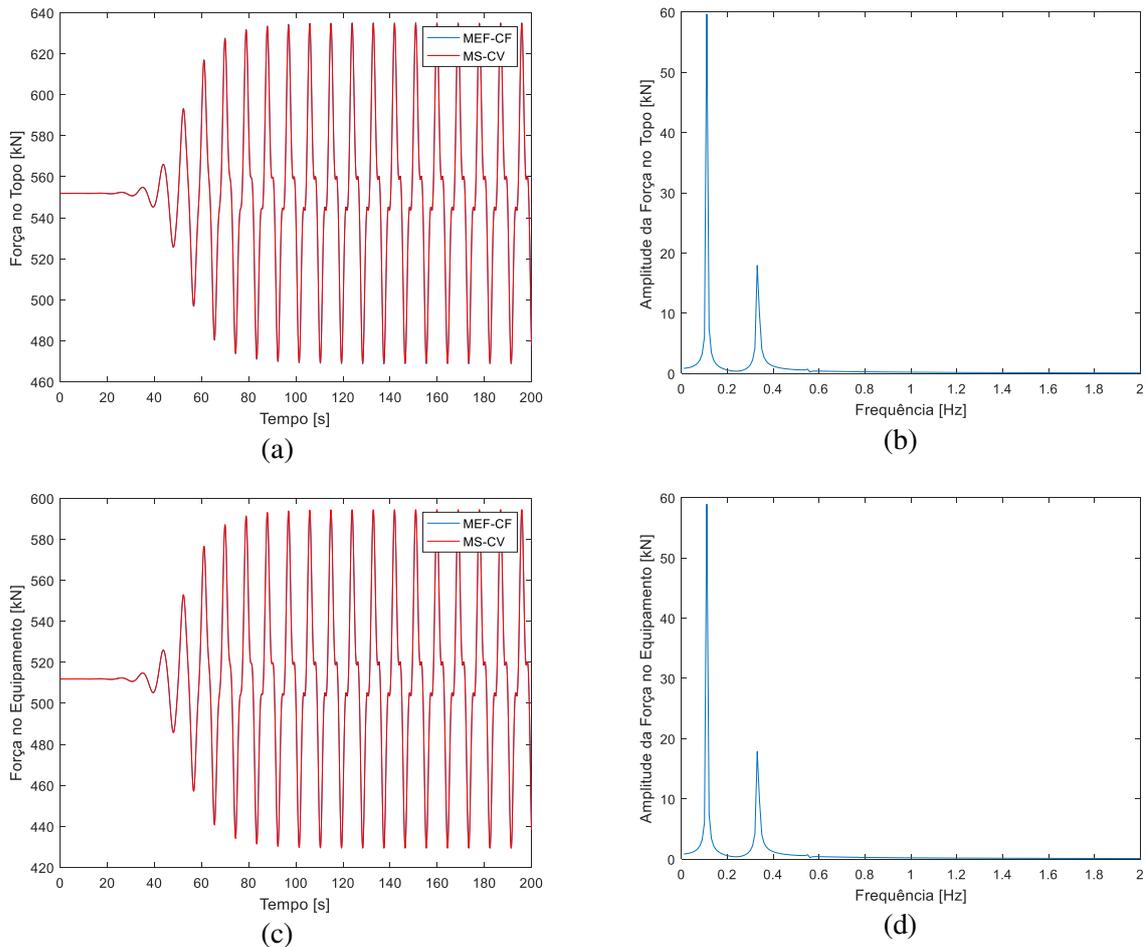


Figura 4.15: Comparação dos resultados obtidos entre o MEF-CF e MS-CV considerando uma excitação senoidal com amplitude de 0,3 metros, período de 9 segundos e 200 metros de comprimento.

A Figura 4.16 ilustra a resposta do sistema para comprimento suspenso de 1500 metros, amplitude de excitação de 0,3 metros e período de excitação igual a 9 segundos. Nesse caso, as componentes de frequência superior praticamente não estão presentes, o que faz com que os três modelos apresentem respostas semelhantes (conforme Figura 4.13).

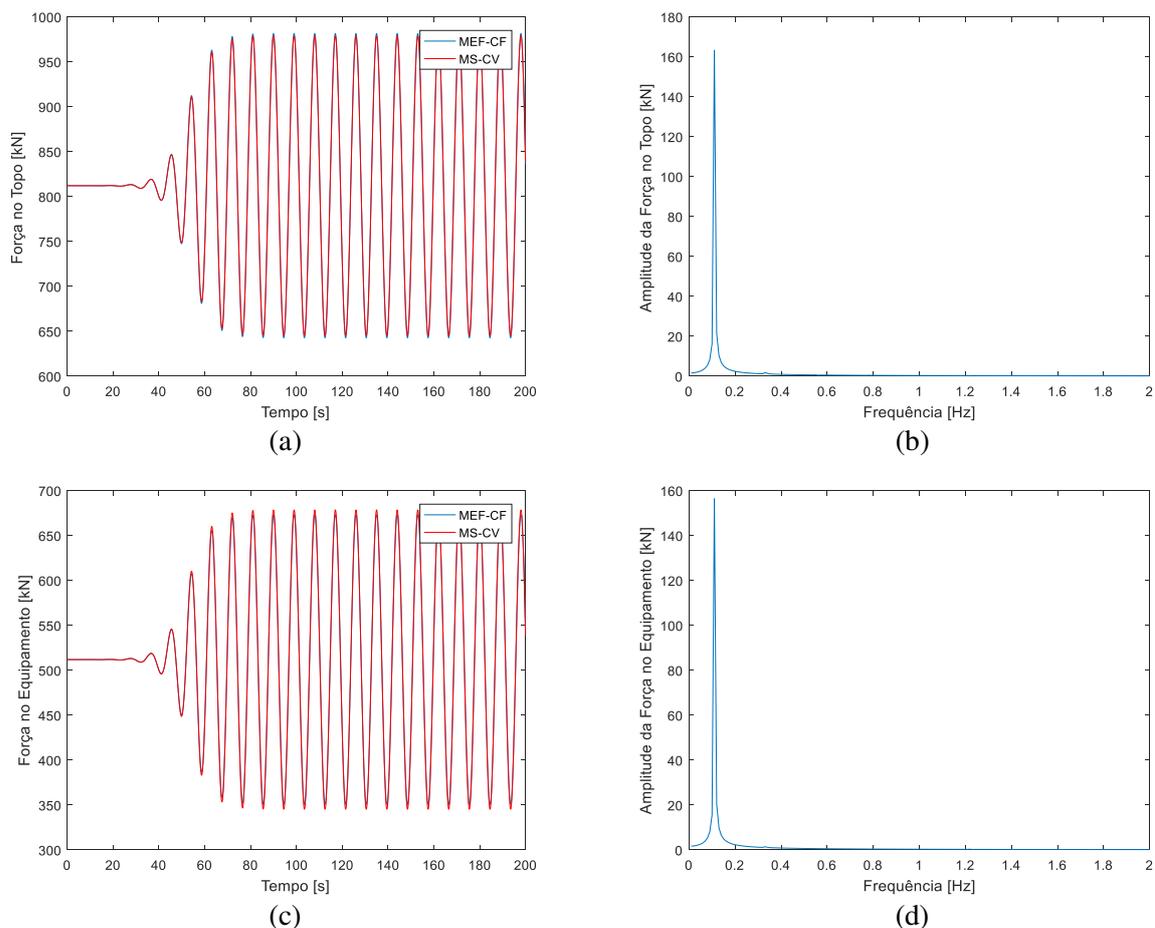


Figura 4.16: Comparação dos resultados obtidos entre o MEF-CF e MS-CV considerando uma excitação senoidal com amplitude de 0,3 metros, período de 9 segundos e 1500 metros de comprimento.

A próxima verificação consiste em analisar a resposta obtida pelos modelos considerando uma excitação irregular. Nesse caso, foi considerado que o deslocamento imposto no ponto de içamento possui amplitude significativa de aproximadamente 0,3 metros e período de pico de 9 segundos (Figura 4.17a-b) e o comprimento de cabo foi considerado igual a 200 metros. Os esforços resultantes nos sistema estão representados nas Figura 4.17c-f. Nota-se, novamente, que os modelos apresentam respostas compatíveis entre si. A resposta obtida, nesse caso, possui uma banda de frequência mais larga, mas apresenta comportamento semelhante ao apresentado na Figura 4.15, com a presença de componentes superharmônicos na resposta do sistema.

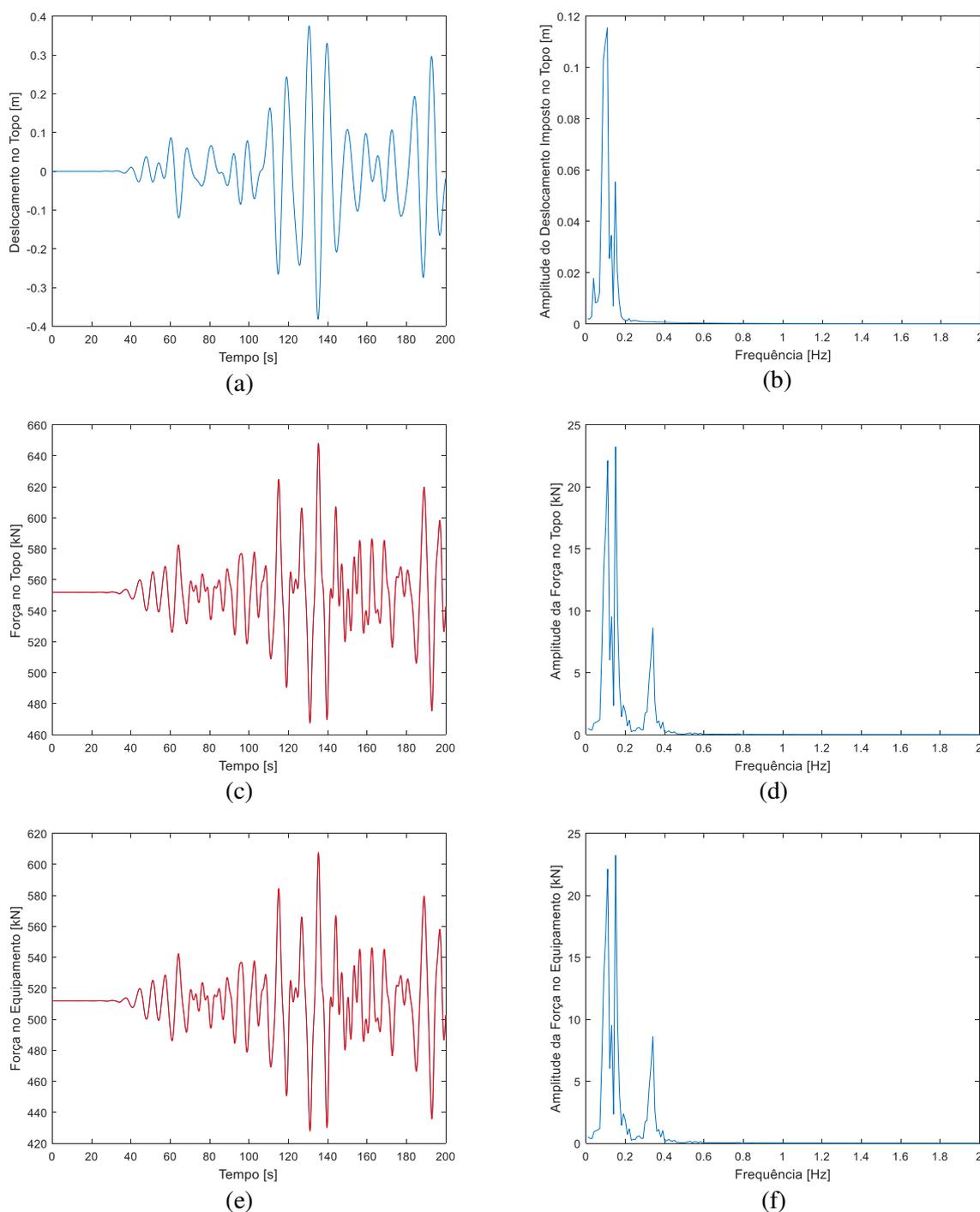


Figura 4.17: Comparação dos resultados obtidos entre o MEF-CF e MS-CV considerando uma excitação irregular com amplitude significativa de aproximadamente 0,3 metros, período de pico de 9 segundos e 200 metros de comprimento.

Por fim, a Tabela 4.6 ilustra os 10 primeiros modos de vibração obtidos a partir do MEF-CF para o cabo com 3000 metros de comprimento. O primeiro modo está relacionado à vibração vertical do equipamento (semelhante a um sistema de um grau de liberdade, considerando o cabo como a mola). Os modos na sequência estão relacionados às vibrações internas ao cabo. Nota-se que os modos de vibração internos ao cabo possuem período de ressonância em uma

região que não é excitada no problema de instalação de equipamentos submarinos, uma vez que está fora da banda de frequência das ondas e da resposta da embarcação (vide Figura 4.7). Isso explica a aderência de respostas entre o MEF-CF e o MS-CV para os exemplos analisados, uma vez que o primeiro modo de vibração é excitado de forma majoritária nos problemas de instalação de equipamentos submarinos.

Tabela 4.6: Modos de vibração axial obtidos pelo MEF-CF considerando 3000 metros de cabo suspenso.

<b>Modo de vibração</b>	<b>Período de Ressonância (s)</b>
1	12,03
2	1,64
3	0,84
4	0,56
5	0,42
6	0,34
7	0,28
8	0,24
9	0,22
10	0,19

Com base nos resultados apresentados nesta seção, é possível concluir que:

- Os modelos apresentam respostas coerentes entre si, demonstrando sua capacidade de prever a resposta do sistema para análises considerando comprimento fixo do cabo suspenso;
- O MEF-CF e MS-CV são capazes de prever fenômenos não lineares (como a presença de componentes superharmônicos na resposta do sistema) uma vez que consideram a força de arrasto em sua forma quadrática;
- A frequência de ressonância do sistema varia em função do comprimento suspenso de cabo, uma vez que isso irá alterar a rigidez do sistema. Dessa forma, para diferentes períodos de excitação, a região de ressonância irá ocorrer em diferentes profundidades, sendo que quanto menor o período de excitação, menor será a profundidade onde irá ocorrer a ressonância;
- A aderência de resultados entre o MEF-CF e os MS-CV e MS-CF (fora da região de superharmônicas) pode ser explicada pelo fato de que os modos de vibração internos ao cabo possuem frequência de ressonância fora da faixa de frequência da excitação do sistema, de forma que a resposta do sistema é dominada pela vibração vertical do equipamento, semelhante a um sistema de um grau de liberdade.

## 4.5 Influência da velocidade de lançamento/recuperação do cabo

Esta seção tem por objetivo apresentar os resultados obtidos com o MS-CV. As análises apresentadas na sequência irão verificar a capacidade do modelo proposto em analisar a dinâmica do sistema para ondas regulares e irregulares, considerando uma dada taxa de lançamento ou recolhimento de cabo. A Tabela 4.7 ilustra os parâmetros de análise considerados.

Tabela 4.7: Parâmetros de análise considerados para avaliação do MS-CV.

Parâmetros		Valor
Cabo de instalação	Peso linear	24,6 kgf/m
	Peso linear submerso	20,4 kgf/m
	Rigidez axial (EA)	315 MN
Equipamento	Massa	60 t
	Volume	7.63 m <sup>3</sup>
	Área projetada	56,95 m <sup>2</sup>
	Massa adicional	300 t
	Coefficiente de arrasto	7
Integrador	Passo de tempo	0,1 s
	Tempo de pré-simulação	500 s
	Erro relativo máximo	10 <sup>-6</sup>

### 4.5.1 Resposta do Sistema sem Excitação Oceânica

A primeira verificação consiste em analisar a resposta do sistema quando submetida a uma dada velocidade de lançamento ou recuperação de cabo sem a presença da excitação devido às ondas oceânicas.

A Figura 4.18 apresenta a resposta do sistema considerando uma velocidade de lançamento de cabo igual a 1,0 m/s. O equipamento se encontra a 1 metro de profundidade no início da simulação. Quando o tempo total de simulação atinge 3500 segundos, a velocidade é definida como sendo igual a 0 m/s. Nota-se que o equipamento obtém velocidade constante igual à velocidade de lançamento de cabo durante a simulação até o momento em que o lançamento de cabo é interrompido. A partir deste momento, o sistema apresenta um pico de resposta e oscila tendendo a atingir um ponto de equilíbrio. Além disso, enquanto é mantida a velocidade de lançamento de cabo, os esforços apresentam uma redução de valor equivalente à força de arrasto atuando no equipamento (nesse exemplo, igual a 204 kN).

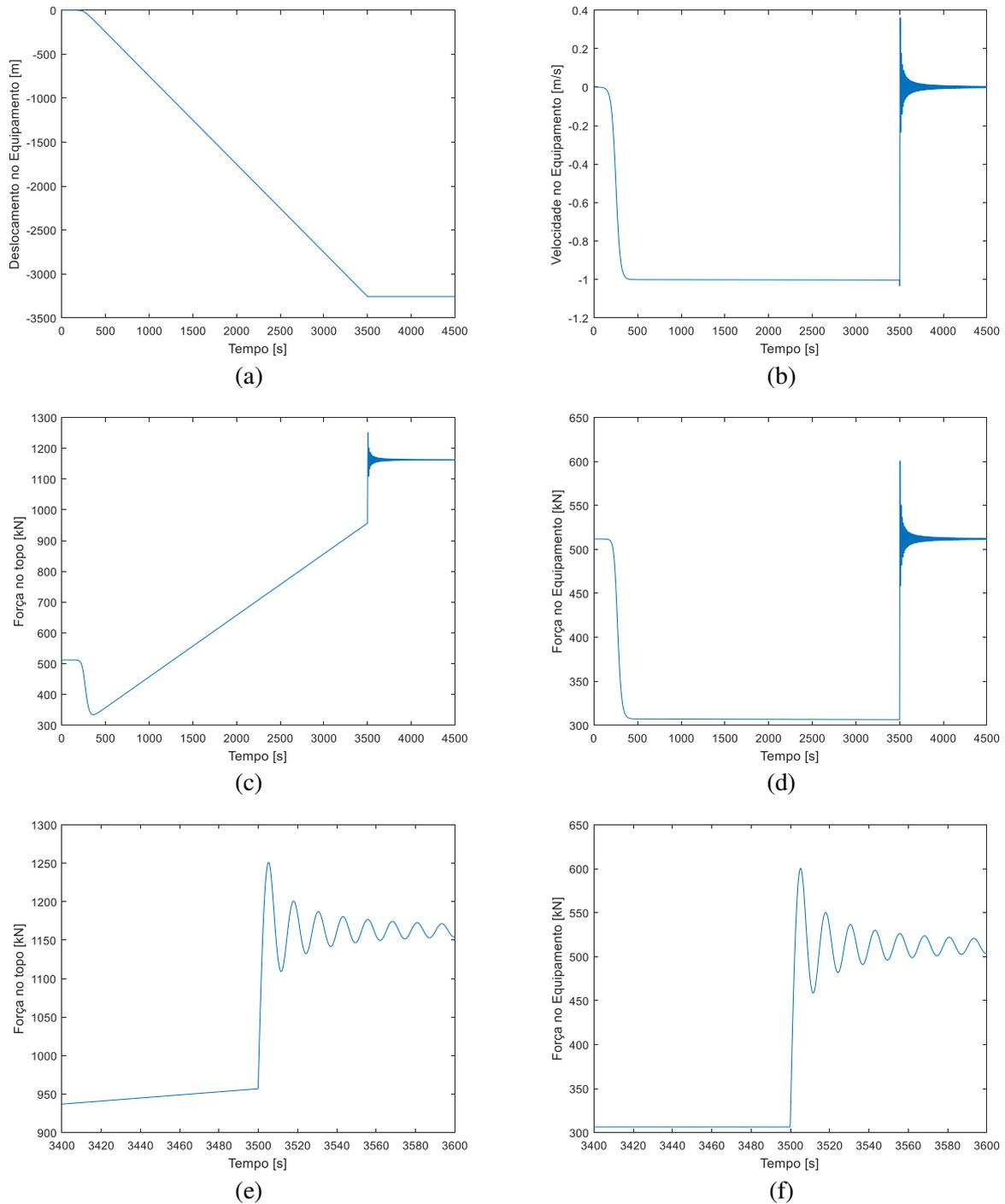


Figura 4.18: Dinâmica do sistema considerando velocidade de lançamento igual a 1 m/s sem excitação oceânica.

O próximo exemplo considera uma velocidade de recuperação de cabo igual a 1 m/s. Nesse caso, o equipamento encontra-se inicialmente a 3500 metros de profundidade. A Figura 4.19 apresenta os resultados obtidos. Neste caso, os esforços atuantes no sistema são aumentados enquanto é mantida a taxa de recuperação de cabo. Além disso, também é possível perceber a diferença nas frequências de oscilação do sistema após a interrupção do lançamen-

to/recolhimento de cabo. Isso se deve à diferença da frequência natural nos dois casos no instante que se interrompe o lançamento de cabo: para o exemplo de lançamento, o equipamento encontra-se a 3250 metros de profundidade (período natural de 13,4 segundos), enquanto que no exemplo de recuperação, o equipamento encontra-se a 250 metros de profundidade (período natural de 3,4 segundos).

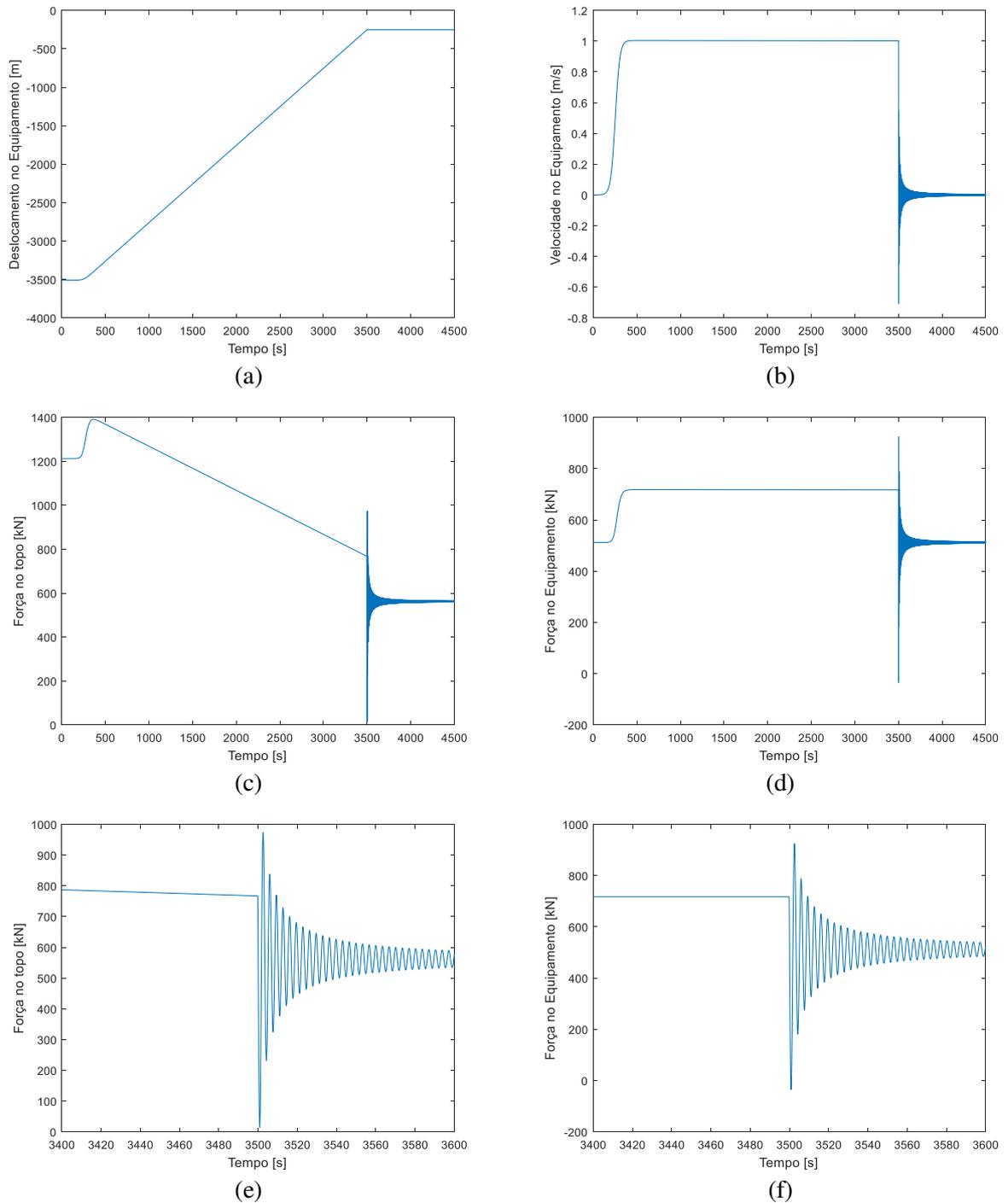


Figura 4.19: Dinâmica do sistema considerando velocidade de recuperação de cabo igual a 1 m/s sem excitação oceânica.

A Figura 4.20 apresenta uma curva de influência da velocidade de lançamento (Figura 4.20a) e de recuperação (Figura 4.20b) na carga estática do sistema para vários coeficientes de arrasto diferentes. Para velocidades de lançamento próximas a zero, a força estática no equipamento é próxima ao peso submerso do equipamento. À medida que a velocidade é aumentada ocorre um decaimento quadrático para o caso de lançamento e um crescimento quadrático da força estática para o caso de recuperação. Nota-se também que para coeficientes de arrasto maiores, a variação da força estática também. Isso realça a conclusão de que a variação da força estática em função da velocidade é devida à força de arrasto atuando no equipamento quando o mesmo é lançado ou recuperado a uma dada velocidade. Esse resultado está em concordância com as recomendações da prática recomendada DNV-RP-H103.

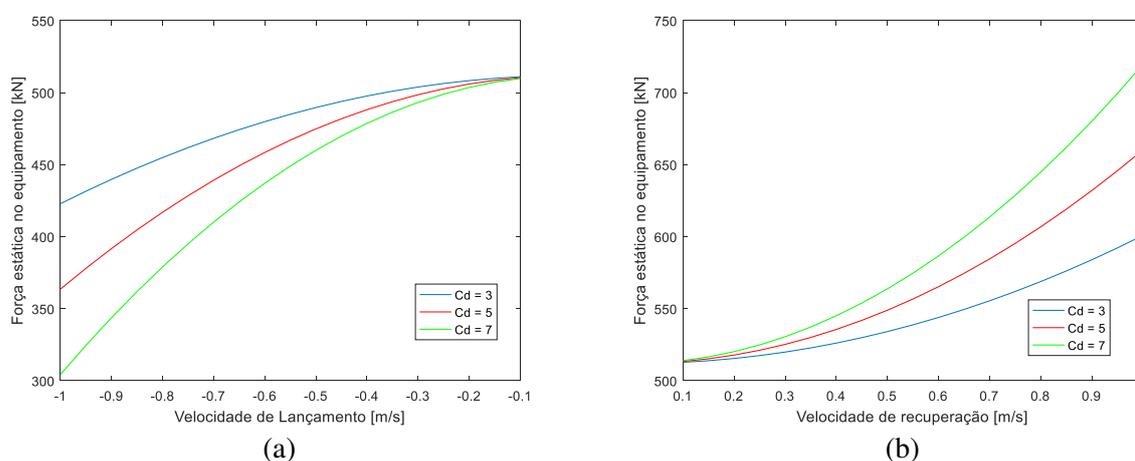


Figura 4.20: Influência da velocidade de (a) lançamento e de (b) recuperação na carga estática no equipamento para diversos coeficientes de arrasto.

#### 4.5.2 Carga dinâmica para onda regular

A próxima verificação consiste em analisar a resposta do sistema quando submetido a uma excitação harmônica em conjunto com uma dada velocidade de lançamento ou recolhimento de cabo. Os exemplos apresentados nesta seção irão considerar uma excitação senoidal de amplitude igual a 0,3 metros e período de 9 segundos.

A Figura 4.21 apresenta a comparação da resposta do sistema considerando uma velocidade de lançamento baixa ( $V_c = -0,01 \text{ m/s}$ ) com a resposta do sistema obtida a partir de uma análise com comprimento fixo (de forma semelhante à apresentada na Figura 4.13). Nota-se que os resultados obtidos em ambos os casos são análogos, o que indica que o MS-CV é capaz de gerar respostas semelhantes às obtidas com análises com comprimento fixo desde que seja considerada uma velocidade de lançamento de cabo suficientemente baixa.

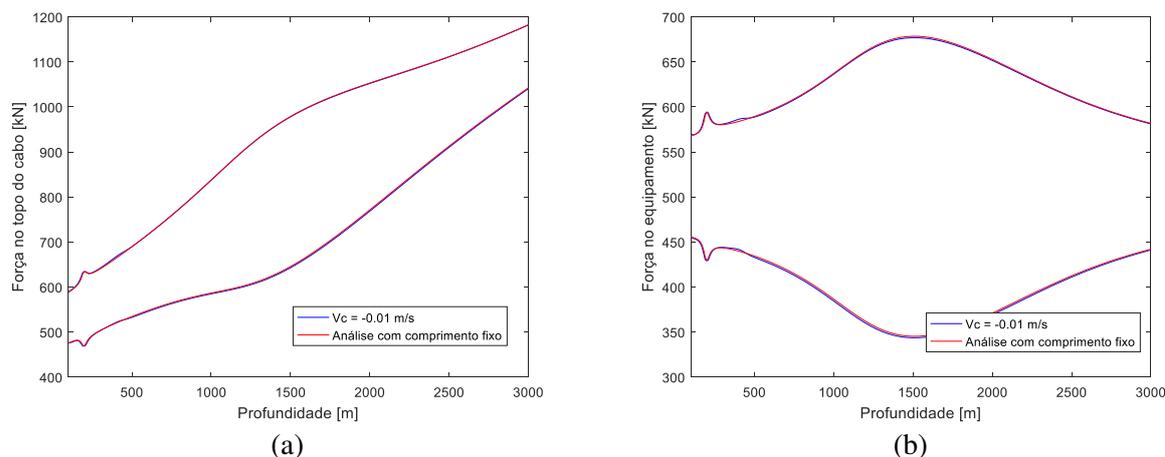


Figura 4.21: Comparação da resposta do sistema para uma velocidade de lançamento baixa ( $V_c = -0,01$  m/s) com a resposta obtida a partir de uma análise com comprimento fixo.

A Figura 4.22 e a Figura 4.23 ilustram, respectivamente, os esforços no sistema para situações de instalação (cabo sendo lançado pela embarcação) e recuperação (cabo sendo recuperado pela embarcação) de equipamentos submarinos. A partir destas ilustrações, é possível descrever algumas considerações:

- Existe um transiente dinâmico, aproximadamente, na mesma região em que foi observado o surgimento de componentes superharmônicos na análise com comprimento fixo. Esse regime é mais acentuado em análises com menores velocidades de lançamento/recuperação.
- À medida que se aumenta a velocidade de lançamento, a carga média do sistema tende a reduzir e, à medida que se aumenta a velocidade de recuperação, a carga média do sistema tende a aumentar (fenômeno evidenciado na Seção 4.5.1).
- À medida que se aumenta a velocidade de lançamento ou recuperação, a região onde ocorre o pico de resposta do sistema tende a ocorrer em profundidades menores e com menores amplitudes.
- À medida que se aumenta a velocidade de lançamento ou recuperação, a região onde ocorre o pico de resposta tende a perder sua simetria em relação à carga estática. No caso de lançamento de cabo, as cargas de vale são mais acentuadas, enquanto que no caso de recuperação de cabo, as cargas de pico são mais acentuadas.

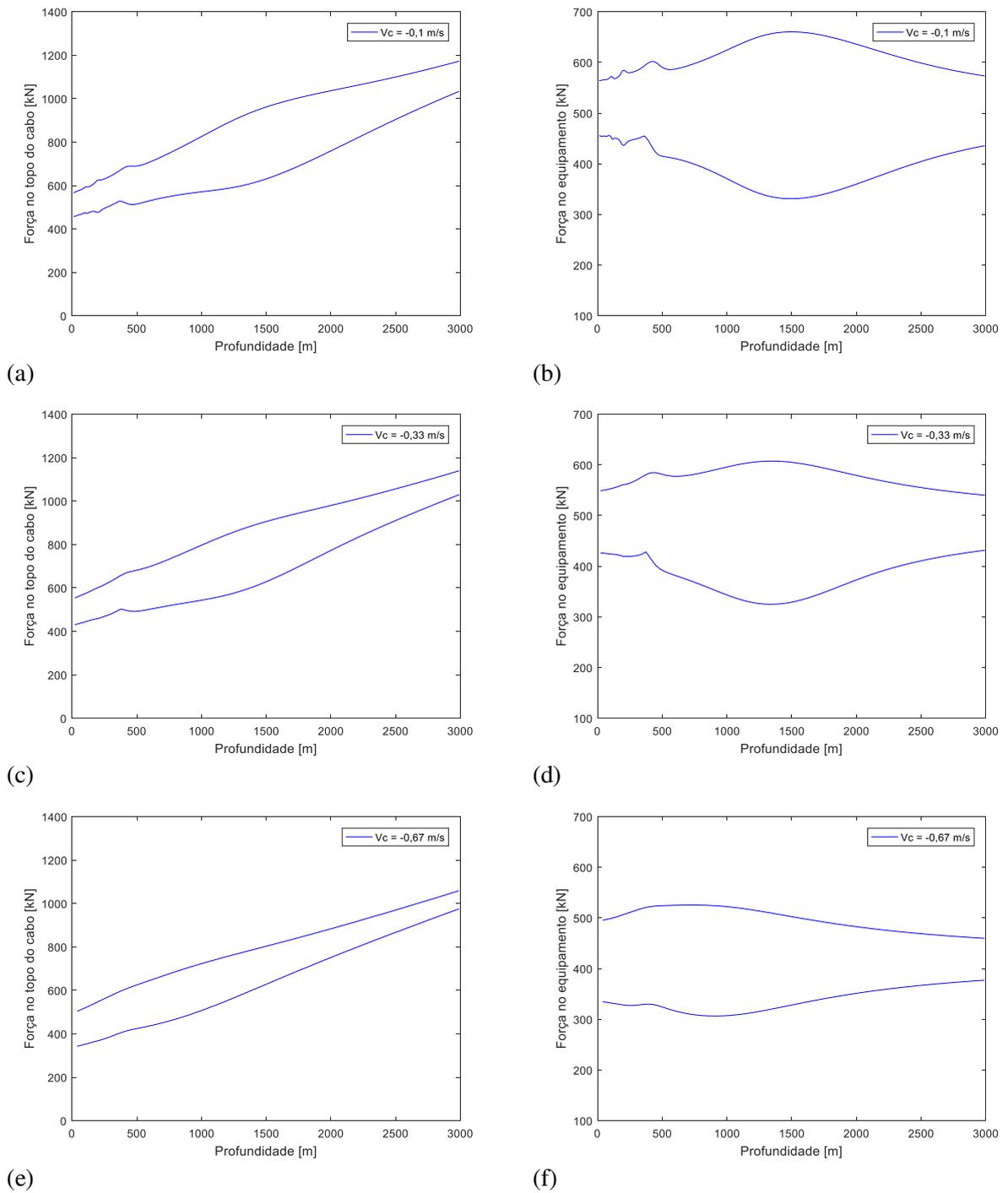


Figura 4.22: Esforços no sistema para onda regular com amplitude de 0,3 metros e período de 9 segundos: a-b)  $V_c = -0,1 \text{ m/s}$ ; c-d)  $V_c = -0,33 \text{ m/s}$ ; e-f)  $V_c = -0,67 \text{ m/s}$ .

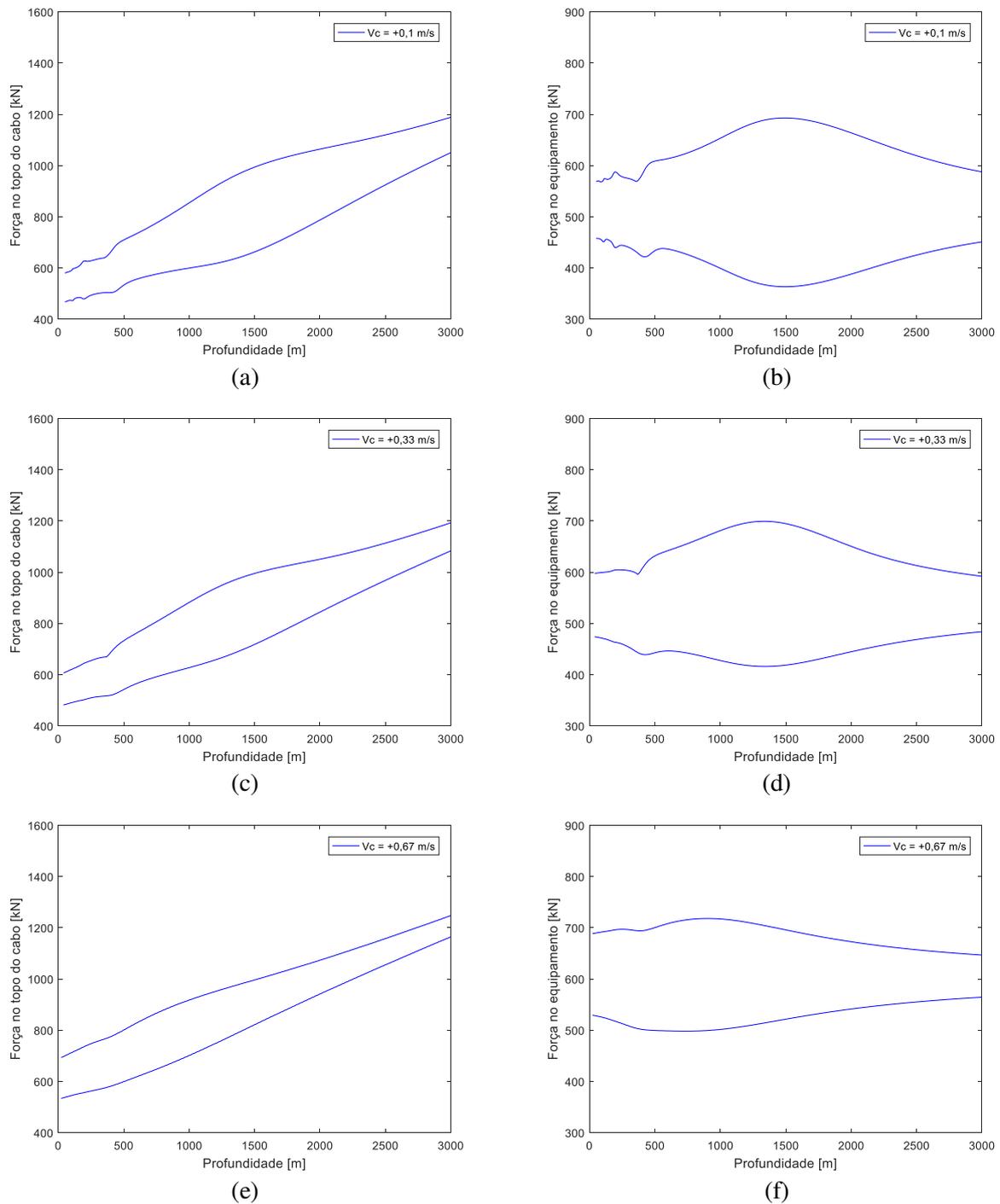


Figura 4.23: Esforços no sistema para onda regular com amplitude de 0,3 metros e período de 9 segundos: a-b)  $V_c = 0,1 \text{ m/s}$ ; c-d)  $V_c = 0,33 \text{ m/s}$ ; e-f)  $V_c = 0,67 \text{ m/s}$ .

A Figura 4.24 ilustra a força no equipamento na profundidade de aproximadamente de 100 a 125 metros, considerando velocidade de lançamento de cabo  $V_c = -0,10 \text{ m/s}$ . Nota-se a presença dos componentes superharmônicos que alteram sua amplitude ao longo da profundidade, resultando nos transientes dinâmicos observados na Figura 4.22b.

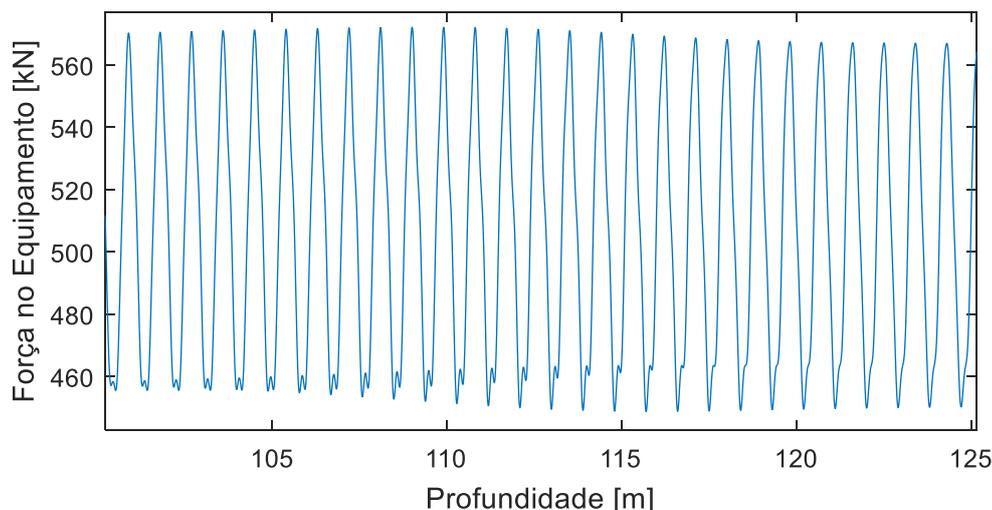


Figura 4.24: Força no equipamento na região de transiente dinâmico.

A Figura 4.25 ilustra a variação da força dinâmica no equipamento ao longo da profundidade para diversas velocidades de lançamento. Novamente, é possível perceber que, à medida que o equipamento é lançado mais rapidamente, o pico de resposta dinâmica é reduzido e tende a ocorrer em profundidades menores.

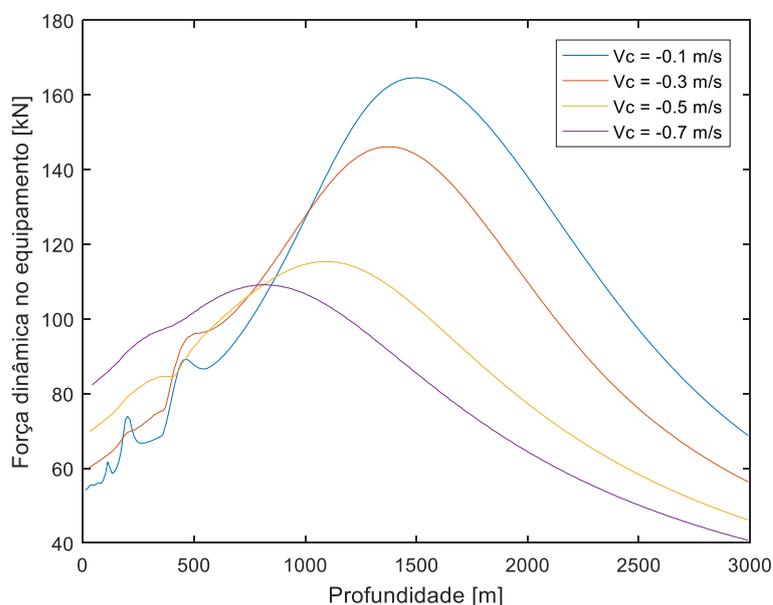


Figura 4.25: Força dinâmica no equipamento ao longo da profundidade para diversas velocidades de lançamento e para onda regular com amplitude de 0,3 metros e período de 9 segundos.

De forma ilustrativa, a Figura 4.26 apresenta a dinâmica do equipamento para o caso de instalação com  $V_c = -1,0 \text{ m/s}$ . Nesse caso, quando a simulação atinge 3500 segundos, o lançamento de cabo é interrompido. É possível perceber que o sistema apresenta um pico de resposta logo após a interrupção do lançamento e, posteriormente, a resposta do sistema tende ao

valor obtido na análise com comprimento fixo (Figura 4.13c-d). A velocidade do equipamento, neste exemplo, oscila em torno da velocidade de lançamento de cabo.

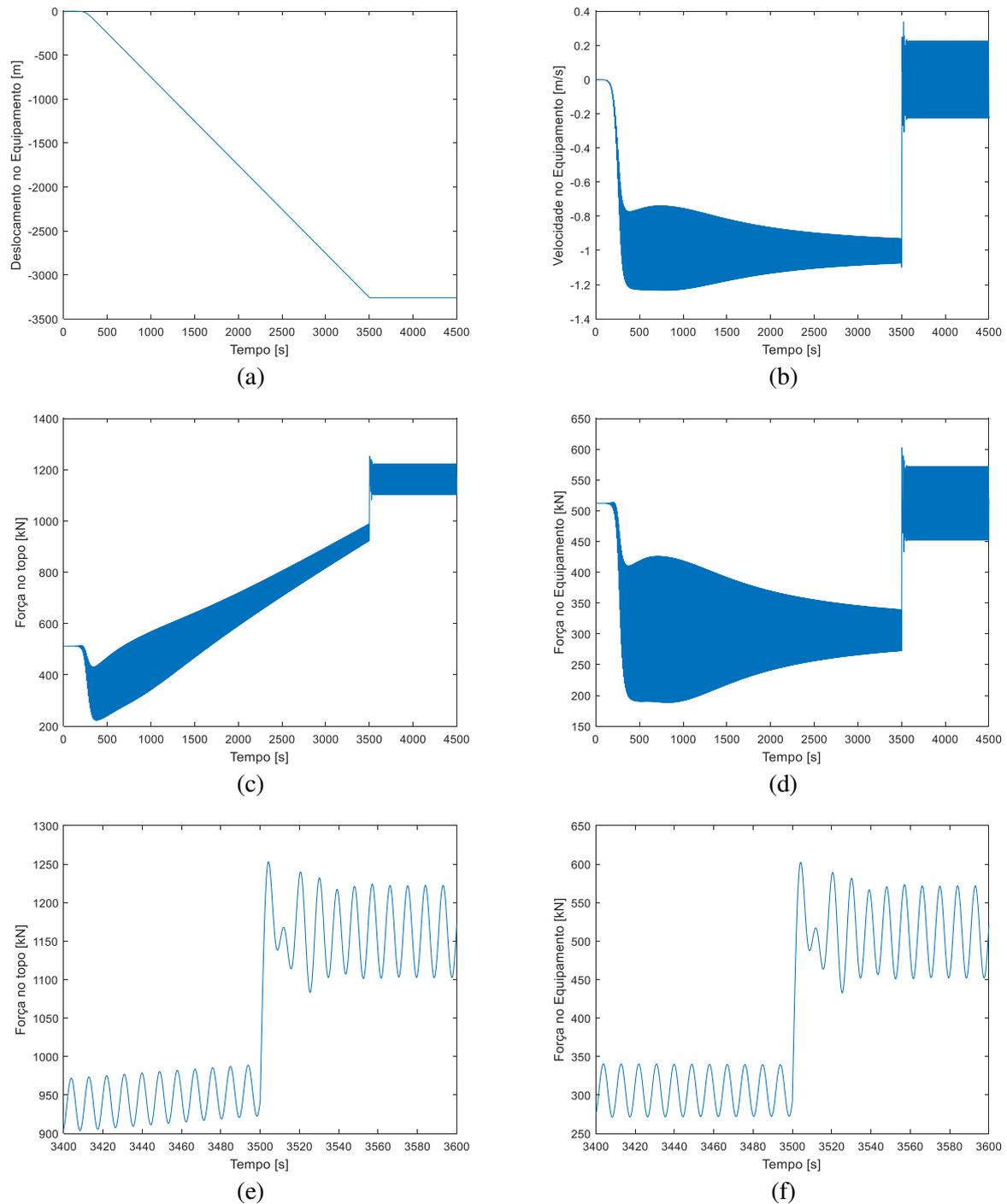


Figura 4.26: Dinâmica do sistema considerando velocidade de lançamento de cabo  $V_c = -1,0 \text{ m/s}$  e excitação oceânica regular com amplitude 0,3 metros e período 9 segundos.

### 4.5.3 Carga dinâmica para onda irregular

A última verificação referente ao MS-CV considera uma excitação irregular como condição

de contorno. Nesse caso, foi considerado um deslocamento imposto no ponto de içamento com amplitude significativa de aproximadamente 0,3 metros e período médio de 9 segundos. A Figura 4.27 e a Figura 4.28 ilustram, respectivamente, os esforços no sistema para situações de instalação (cabo sendo lançado pela embarcação) e recuperação (cabo sendo recuperado pela embarcação) de equipamentos submarinos. Nesse caso, o comportamento do sistema é semelhante ao apresentado na Seção 4.5.2, porém a resposta do sistema possui caráter irregular. Além disso, como o equipamento irá gastar menos tempo na zona de ressonância, a probabilidade de ser submetido a ondas de maior amplitude é reduzida.

A Figura 4.29 apresenta a dinâmica do equipamento para o caso de instalação com  $V_c = -1,0 \text{ m/s}$  com uma excitação irregular. Nesse caso, quando a simulação atinge 3500 segundos, o lançamento de cabo é interrompido. Semelhantemente à Figura 4.26, a resposta do sistema atinge um pico logo após a interrupção do lançamento de cabo.

#### 4.5.4 Comentários

Com base nos resultados apresentados nesta seção, é possível descrever as seguintes conclusões:

- O modelo proposto é capaz de descrever o comportamento do sistema em situações de lançamento ou recolhimento de cabo, tendo representado fenômenos que não eram possíveis de serem obtidos pelos MS-CF e MEF-CF;
- O aumento da velocidade de lançamento tende a reduzir a carga estática no sistema, enquanto que o aumento da velocidade de recuperação tende a aumentar a carga estática no sistema. Isso ocorre devido à atuação da força de arrasto no equipamento submarino;
- A interrupção do lançamento ou recolhimento de cabo gera uma carga transiente no sistema, sendo que, após um pico de esforço inicial, a carga tende ao valor obtido nas análises com comprimento de cabo suspenso constante;
- A região onde estão presentes componentes superharmônicos é representada pelo modelo, sendo mais acentuada para baixas velocidades de lançamento ou recuperação. A passagem do equipamento por esta zona gera um transiente dinâmico no sistema.
- O aumento da velocidade de lançamento ou recuperação altera o pico de resposta do sistema, tanto no que se refere à sua amplitude, quanto na profundidade em que ocorre e na sua simetria em torno da carga estática no sistema;

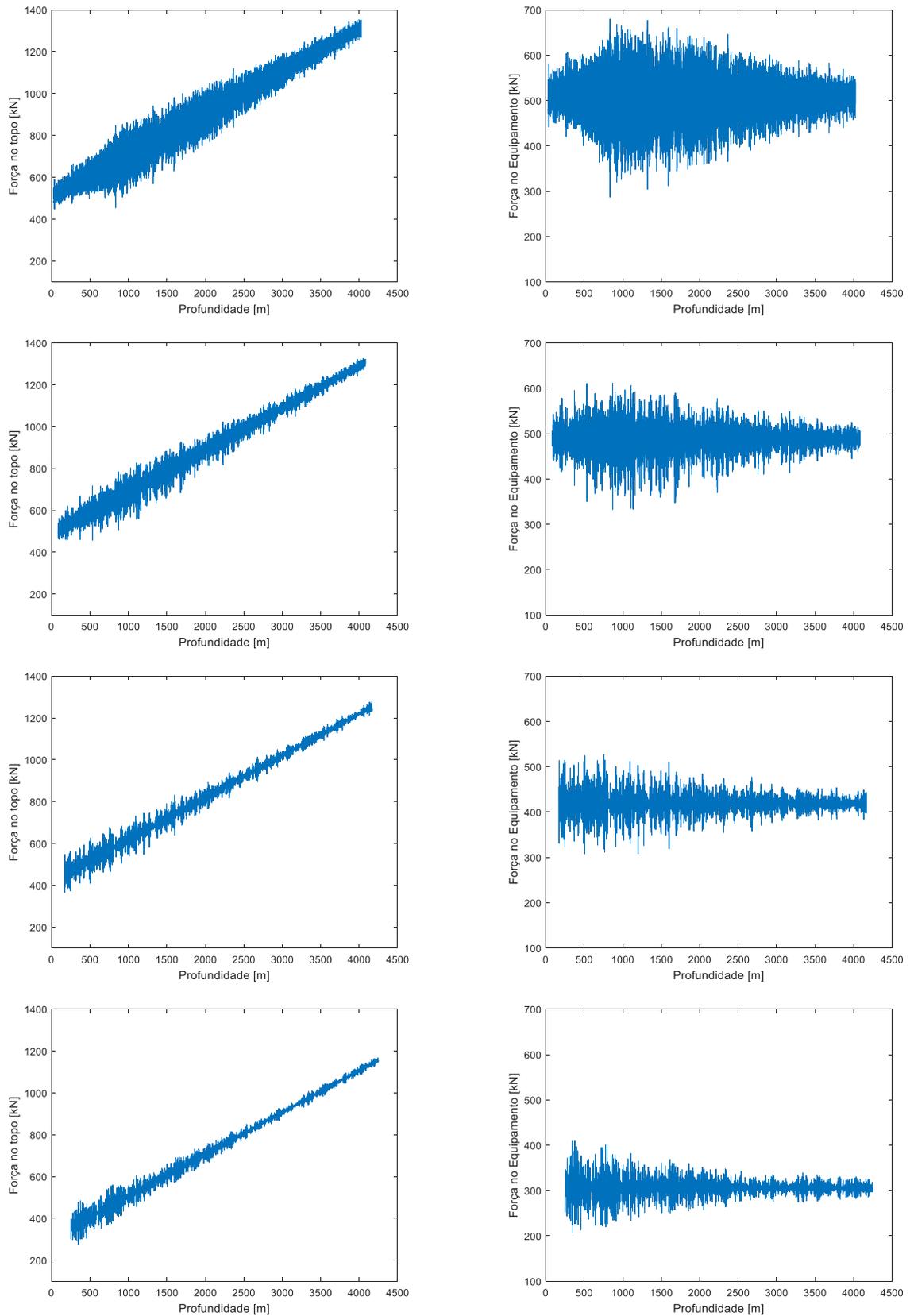


Figura 4.27: Esforços no sistema para onda irregular com amplitude significativa de aproximadamente 0,3 metros e período médio de 9 segundos: a-b)  $V_c = -0,1 \text{ m/s}$ ; c-d)  $V_c = -0,33 \text{ m/s}$ ; e-f)  $V_c = -0,67 \text{ m/s}$  e g-h)  $V_c = -1,0 \text{ m/s}$

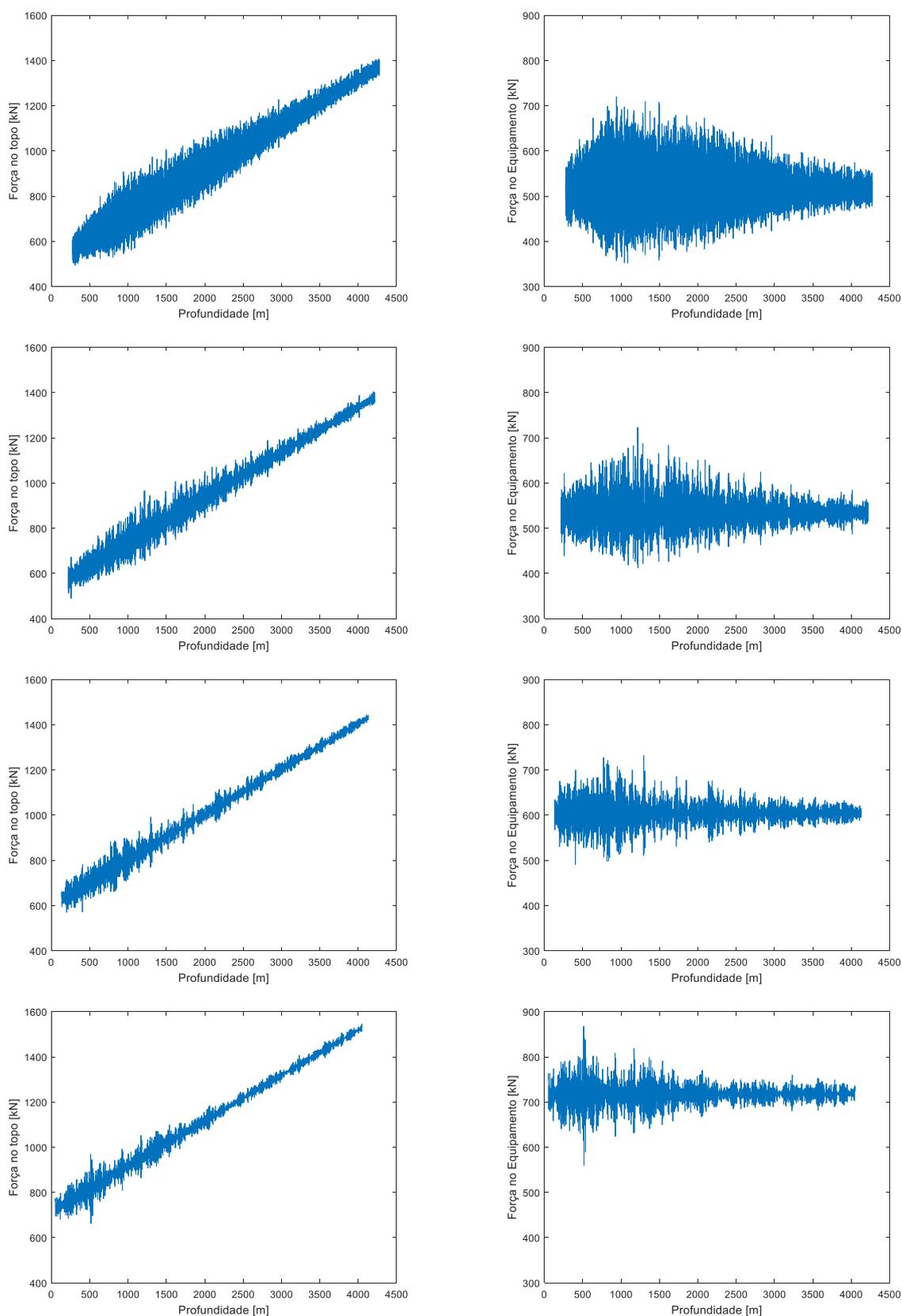


Figura 4.28: Esforços no sistema para onda irregular com amplitude significativa de aproximadamente 0,3 metros e período médio de 9 segundos: a-b)  $V_c = 0,1 \text{ m/s}$ ; c-d)  $V_c = 0,33 \text{ m/s}$ ; e-f)  $V_c = 0,67 \text{ m/s}$  e g-h)  $V_c = 1,0 \text{ m/s}$

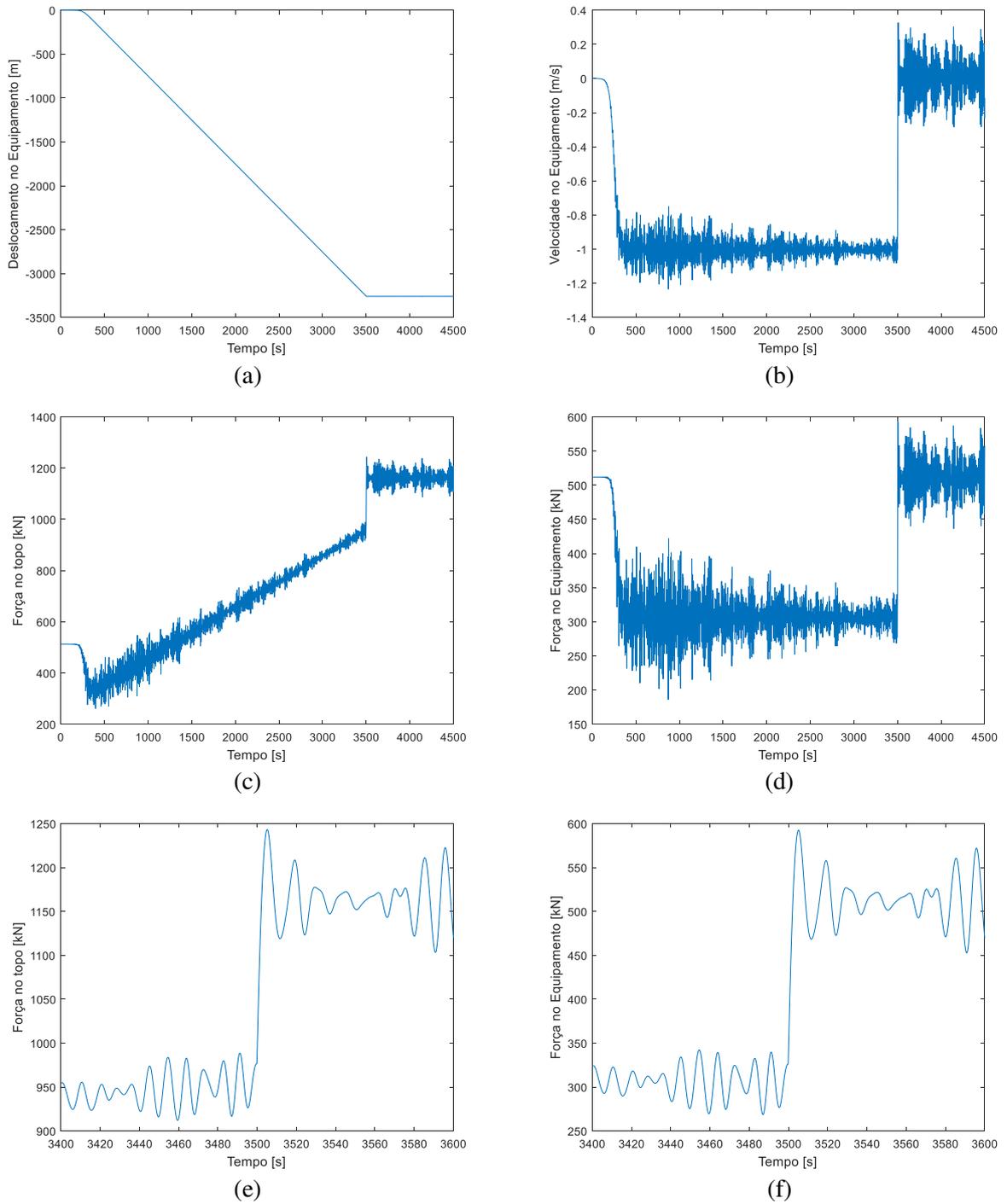


Figura 4.29: Dinâmica do sistema considerando velocidade de lançamento de cabo  $V_c = -1,0 \text{ m/s}$  e excitação oceânica irregular com amplitude significativa de aproximadamente 0,3 metros e período médio de 9 segundos.

## 4.6 Janela Operacional

Após verificar a validade dos modelos apresentados e também de analisar a influência da velocidade de lançamento e recuperação de cabo na dinâmica do sistema cabo-equipamento, a última verificação deste trabalho consiste em comparar as janelas operacionais obtidas considerando o MS-CV com diferentes velocidades de lançamento e recuperação.

Os dados apresentados na Tabela 4.8 foram utilizados para construção da janela operacional, conforme detalhado na Seção 3.10.

Tabela 4.8: Parâmetros de análise considerados para construção da janela operacional.

	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>
Embarcação	Ponto de içamento (direção $x$ )	-10 m
	Ponto de içamento (direção $y$ )	-20 m
	Ângulo de incidência das ondas	165°
Cabo de instalação	Peso linear	24,6 kgf/m
	Peso linear submerso	20,4 kgf/m
	Rigidez axial (EA)	315 MN
	SWL	1100 kN
Equipamento	Massa	60 t
	Volume	7.63 m <sup>3</sup>
	Área projetada	56,95 m <sup>2</sup>
	Massa adicional	300 t
	Coefficiente de arrasto	7
Integrador	LDA	1500 m
	Passo de tempo	0,1 s
	Tempo de pré-simulação	100 s
	Erro relativo máximo	10 <sup>-6</sup>

A Tabela 4.9 apresenta a janela de instalação obtida considerando uma análise com comprimento fixo de cabo suspenso. As células marcadas com a cor verde indicam que o estado de mar é viável, enquanto que as células sem preenchimento indicam que o estado de mar não é viável à operação nas condições indicadas. Para a Bacia de Campos, essa janela indica uma disponibilidade<sup>11</sup> da embarcação da ordem de 66%. Além disso, convém destacar que neste tipo de análise a janela operacional seria idêntica para situações de instalação e recuperação

<sup>11</sup> A disponibilidade da embarcação é dada pela porcentagem de estados de mar (ponderada conforme a ocorrência de cada estado de mar para a locação) em que a operação pode ser realizada com sucesso.

de equipamentos submarinos.

Tabela 4.9: Janela de operação para análise com comprimento fixo.

$H_s/T_p$	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1.4	Operational								
1.6	Operational								
1.8	Operational								
2.0	Operational								
2.2	Operational								
2.4	Operational								
2.6	Operational								
2.8	Operational								
3.0	Operational								

A influência da velocidade pode ser avaliada a partir da Figura 4.30. Neste caso, é apresentada uma curva de disponibilidade da embarcação em função da velocidade de lançamento (Figura 4.30a) e de recuperação (Figura 4.30b). A partir da análise desses resultados, é possível descrever os seguintes pontos:

- Para as situações de instalação do equipamento (velocidade do cabo negativa), à medida que se aumenta a velocidade de lançamento, a janela operacional aumenta até atingir um valor máximo ( $V_c = -0,4 \text{ m/s}$ ) e depois tende a ser reduzida ( $V_c > -0,4 \text{ m/s}$ ). Isso pode ser explicado tendo em vista que o aumento da velocidade de lançamento altera a forma do pico de resposta do sistema (conforme apresentado nas Seções 4.5.2 e 4.5.3) e reduz o tempo que o equipamento gasta atravessando a região de ressonância, reduzindo o valor da carga dinâmica máxima. Quando a velocidade do cabo atinge valores elevados, entretanto, o equipamento tende a solecar com mais facilidade, uma vez que a carga estática do sistema reduz com o aumento da velocidade do cabo (conforme apresentado na Seção 4.5.1).
- Para situações de recuperação do equipamento (velocidade do cabo positiva), à medida que se aumenta a velocidade de recuperação, a janela operacional tende a ser reduzida continuamente, com exceção da região  $+0,4 < V_c < +0,8 \text{ m/s}$ . Nesse caso, a influência do aumento da carga estática é dominante em relação à alteração da forma do pico de resposta do sistema.

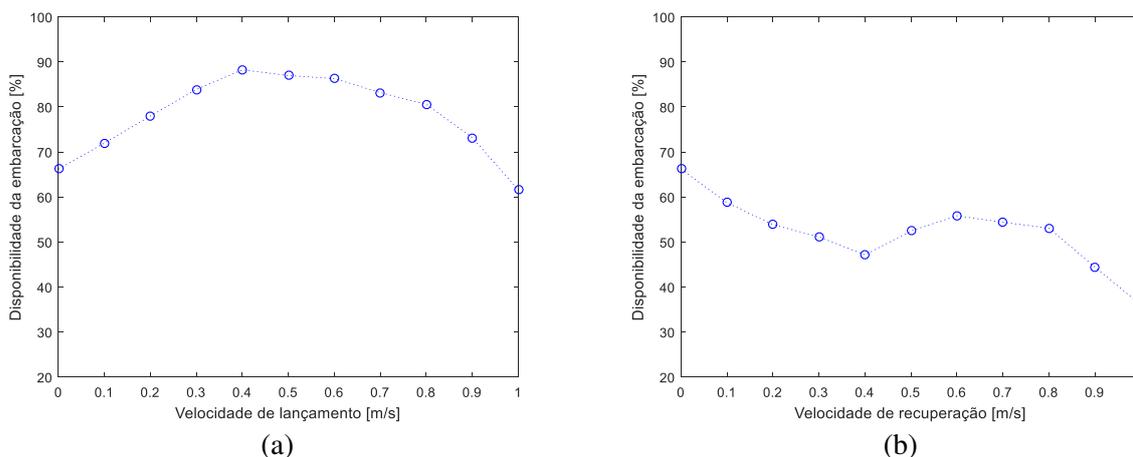


Figura 4.30: Influência da velocidade na disponibilidade da embarcação. (a) Instalação de equipamento. (b) Recuperação de equipamento

Convém ressaltar que as conclusões obtidas anteriormente são referentes apenas ao exemplo considerado. A alteração dos dados de entrada do problema pode alterar a forma como a janela operacional é modificada em função da velocidade de lançamento/recuperação do cabo. Caso o limite estrutural do cabo seja suficientemente alto, pode haver um cenário em que, para condições de recuperação do equipamento, o aumento da velocidade do cabo atue sempre no sentido de aumentar a janela operacional, diferentemente dos resultados apresentados no exemplo anterior.

Como resultado geral, a alteração da janela operacional em função da variação da velocidade de lançamento/recuperação de cabo ocorre a partir de variação conjunta da forma do pico de resposta do sistema, do tempo de exposição do sistema na região de ressonância e da variação da carga estática do sistema, podendo levar a uma expansão ou redução da janela operacional.

Dessa forma, é importante que as análises de instalação e recuperação de equipamentos submarinos considerem a influência da velocidade de lançamento/recuperação de cabo que será considerada na prática, já que sua influência é notória na janela operacional. A utilização de análises baseadas apenas em comprimento fixo de cabo pode levar a resultados que não são necessariamente conservadores ou otimizadas com relação ao seu custo. Para a análise em questão, por exemplo, caso fosse ser realizada uma operação de instalação do equipamento, a utilização do modelo considerando a velocidade de lançamento aumentaria a disponibilidade da embarcação, conseqüentemente reduzindo o custo da operação. Por outro lado, se fosse necessário recuperar este equipamento, o uso de um modelo baseado em comprimento fixo de cabo não seria conservador, uma vez que qualquer velocidade considerada na prática resultaria em uma disponibilidade menor da embarcação, o que poderia colocar em risco a operação.

Além disso, os valores considerados nesta seção para a velocidade de lançamento e recuperação são compatíveis com os valores utilizados em operações reais. Conforme DNV-RP-H103 (2014b), a velocidade de lançamento típica é de 0,50 m/s, sendo que alguns sistemas podem alcançar velocidade de lançamento/recuperação de até 1,5 m/s (INGEBERG *et al.*, 2006, p. 128) dependendo do peso do equipamento.

## 5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados ao longo desta dissertação, é possível descrever as seguintes conclusões para este trabalho:

1. Os modelos propostos para análise de ondas oceânicas são coerentes e permitem obter as variáveis estatísticas de interesse de forma adequada tanto a partir do espectro de densidade de energia quanto pelo sinal no domínio do tempo; neste último caso, a influência da quantidade de componentes senoidais é preponderante no cálculo do período médio do sinal;
2. Os modelos propostos para análise da dinâmica da embarcação são coerentes e permitem obter as variáveis estatísticas de interesse de forma adequada tanto a partir do espectro de densidade de energia quanto pelo sinal no domínio do tempo. Novamente, para o sinal no domínio do tempo, a influência da quantidade de componentes senoidais é essencial no cálculo das variáveis estatísticas;
3. Para as análises considerando comprimento fixo de cabo suspenso:
  - a. Os três modelos apresentados são capazes de descrever a dinâmica do sistema em zonas onde não existe a presença de componentes de alta frequência na resposta do sistema;
  - b. Apenas o MEF-CF e MS-CV são capazes de representar a presença de componentes superharmônicos na resposta do sistema, uma vez que ambos consideram a força de arrasto na sua forma quadrática;
  - c. O MEF-CF e o MS-CV apresentam resultados semelhantes entre si, o que pode ser explicada pelo fato de que os modos de vibração internos ao cabo possuem frequência de ressonância fora da faixa de frequência da excitação do sistema, de forma que a resposta do sistema é dominada pela vibração vertical do equipamento, semelhante a um sistema de um grau de liberdade;
4. Para as análises considerando a influência da velocidade de lançamento/recuperação do cabo:
  - a. O aumento da velocidade de lançamento tende a reduzir a carga estática no sistema, enquanto que o aumento da velocidade de recuperação tende a aumentar a carga estática no sistema. Isso ocorre devido à atuação da força de arrasto no equipamento submarino;

- b. A interrupção do lançamento ou recolhimento de cabo gera uma carga transitente no sistema, sendo que, após um pico de esforço inicial, a carga tende ao valor obtido nas análises com comprimento de cabo suspenso constante;
- c. O aumento da velocidade de lançamento ou recuperação altera o pico de resposta do sistema, tanto no que se refere à sua amplitude, quanto na profundidade em que ocorre e na sua simetria em torno da carga estática no sistema;
- d. A alteração da janela operacional em função da variação da velocidade de lançamento/recuperação de cabo ocorre a partir de variação conjunta da forma do pico de resposta do sistema, do tempo de exposição do sistema na região de ressonância e da variação da carga estática do sistema, podendo levar a uma expansão ou redução da janela operacional.

Como recomendações para trabalhos futuros, citam-se:

1. Construção de um modelo capaz de representar um cabo discretizado em situações de lançamento e recolhimento. Esse ponto é importante pois existem situações em que o peso do equipamento é inferior ao peso total do cabo suspenso, de forma que a frequência natural do sistema cabo-equipamento é de ordem de grandeza semelhante aos modos de vibração internos do cabo. Nesse caso, o modelo de um grau de liberdade apresentado nesta dissertação não é o mais adequado;
2. Realização de ensaios laboratoriais e aquisição de dados de operações reais para verificar se os resultados apresentados pelo MS-CV são condizentes;
3. Avaliação de coeficientes hidrodinâmicos ( $C_d$  e  $C_a$ ) em regimes de velocidade constante em conjunto com regime oscilatório. Nesse caso, os valores existentes na literatura para os coeficientes são dados para regimes com velocidade constante apenas ou em regimes oscilatório apenas;
4. Avaliação mais aprofundada dos fenômenos não lineares que ocorrem no sistema devido às forças hidrodinâmicas. Neste trabalho, foram apresentadas regiões onde componentes superharmônicos estão presentes na resposta do sistema. Entretanto, ainda é necessário um estudo mais detalhado das razões e efeitos que esses fenômenos geram;
5. Construção de modelos estatísticos para obter as variáveis máximas e mínimas com o MS-CV de forma a evitar a necessidade de rodar diversos casos para um mesmo estado de mar durante a construção da janela operacional;
6. Avaliar possíveis instabilidades hidrodinâmicas que podem ocorrer no equipamento à medida que se aumenta a velocidade de lançamento/recuperação do mesmo;

7. Expandir a aplicação do modelo para a região de influência das ondas, uma vez que esta é uma das etapas mandatórias para uma análise de instalação completa.

Por fim, cita-se também a necessidade de se realizar análises de risco antes de viabilizar uma operação cuja análise seja baseada no MS-CV, uma vez que, durante operações reais, o guincho pode vir a apresentar falhas durante o lançamento e submeter o sistema a permanecer em uma dada lâmina d'água por um tempo indeterminado.

## Referências

ABLOW, C. M.; SCHECHTER, S. Numerical Simulation of Undersea Cable Dynamics. **Ocean Engineering**, v. 10, n. 6, p. 443-457, 1983.

ARTHUR D. LITTLE INC. **Stress analysis of ship-suspended heavily loaded cables for deep underwater emplacements**. Technical Report 1370863, Department of the Navy. Cambridge. 1963.

BECKMAN, J. Joint Industry Project Addresses Heavy Lift Constraints. **Offshore**, v. 65, n. 11, 2005.

BUCKHAM, B.; DRISCOLL, F. R.; NAHON, M. Development of a Finite Element Cable Model for Use in Low-Tension Dynamics Simulation. **Journal of Applied Mechanics**, v. 71, p. 476-485, Julho 2004.

BUNNIK, T.; BUCHNER, B. Numerical Predictions of Wave Loads on Subsea Structures in the Splash Zone. **Proceedings of the the Fourteenth (2004) International Offshore and Polar Engineering Conference**, Toulon, 2004. 284-290.

BUNNIK, T.; BUCHNER, B.; VELDMAN, A. The Use of a Volume of Fluid (VOF) Method Coupled to a Time Domain Motion Simulation to Calculate the Motions of a Subsea Structure Lifted Through the Splash Zone. **Proceedings of the 25th International Conference on Offshore Mechanics and Polar Engineering**, Hamburg, 2006.

CAO, Y. et al. Design of a Novel Installation Device for a Subsea Production System. **Applied Ocean Research**, v. 59, p. 24-37, 2016.

CERMELLI, C. et al. Progression of Ultradeep Subsea Deployment Systems. **Offshore Technology Conference**, Houston, 2003.

CERQUEIRA, M. B. D. **Instalação de Equipamentos Submarinos em Águas Ultra Profundas Através de Suspensores Flexíveis**. Rio de Janeiro: Dissertação (Mestrado), COPPE/UFRJ, 1998.

CHUNG, J.; HULBERT, G. M. A time integration algorithm for structural dynamics with

improved numerical dissipation: The generalized- $\alpha$  method. **Journal of Applied Mechanics**, v. 60, 1993.

DET NORSKE VERITAS. **Rules for Planning and Execution of Marine Operations**. DNV. Hovik. 1996.

DET NORSKE VERITAS. **Simo Version 3.6 Documentation**. DNV-GL. Hovik. 2012.

DNV-RP-C205. Environmental Conditions and Environmental Loads, Recommended Practice, DNV, 2014a.

DNV-RP-H103. Modelling and analysis of marine operations, Recommended Practice, DNV, 2014b.

DRISCOLL, F. R.; LUECK, R. G.; NAHON, M. Development and Validation of a Lumped-Mass Dynamics Model of a Deep-Sea ROV System. **Applied Ocean Research**, v. 22, p. 169-182, 2000.

DRISCOLL, F. R.; NAHON, M.; LUECK, R. G. A Comparison of Ship-Mounted and Cage-Mounted Passive Heave Compensation Systems. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v. 122, n. 3, p. 214-221, 2000.

FRAZER, I.; PERINET, D.; VENNEMANN, O. Technology Required for the Installation of Production Facilities in 10.000 ft of Water. **Offshore Technology Conference**, Houston, 2005.

GORDON, R. B.; GRYTOYR, G.; DHAIGUDE, M. Modeling Suction Pile Lowering Through the Splash Zone. **Proceedings of the ASME 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**, Nantes, 2013.

HANSEN, R. L.; RICKEY, W. P. Evolution of subsea production systems: a worldwide overview. **Offshore Technology Conference**, Houston, 1994. 929-939.

HOLMES, P. **Mechanics of Raising and Lowering Heavy Loads in the Deep Ocean: Cable and Payload Dynamics**. Technical Report R433, Department of the Navy. Port Hueneme. 1966.

HUANG, S.; VASSALOS, D. A Numerical Method for Predicting Snap Loading of Marine

Cables. **Applied Ocean Research**, v. 15, p. 235-242, 1993.

HUGHES, T. J. R.; LIU, W. K. Implicit – explicit finite elements in transient analysis. **Journal of Applied Mechanics**, v. 45, n. 2, 1978.

INGEBERG, P. et al. Development of Fiber Rope Based Deployment System for Deep Water Application. **Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference**, San Francisco, 2006.

ISO 13628-15. Petroleum and natural gas industries - design and operation of subsea production systems - subsea structures and manifolds, International Standard, 2011.

IWAN, W. D. Dynamic Response of Suspended Underwater Systems. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 51, n. 5B, p. 1688-1696, 1972.

JIA, D.; AGRAWAL, M. Fluid-Structure Interaction - Lowering Subsea Structure / Equipment in Splash Zone During Installation. **Offshore Technology Conference**, Houston, 2014.

JOENSEN, A.; PAUL, D. A Low Tech, Low Risk System for the Installation of Large Structures in Deep Water. **SPE Offshore Europe Oil and Gas Conference and Exhibition**, Aberdeen, 2011.

JOURNÉE, J. M. J.; MASSIE, W. W. **Offshore Hydromechanics**. 1st. ed. Stevinweg: Delft University of Technology, 2001.

KEPRATE, A. Impact of Passive Heave Compensator on Offshore Lifting. **Journal of Shipping and Ocean Engineering**, v. 5, p. 166-180, 2015.

KEPRATE, A.; MOHAMMED, M. A. Appraising the Module Deployment Operation in the RLWI Units. **Journal of Shipping and Ocean Engineering**, v. 6, p. 82-94, 2016.

KOPSOV, I. E.; SANDVIK, P. C. Analysis of Subsea Structures Installation. **Proceedings of the Fifth (1995) International Offshore and Polar Engineers Conference**, The Hauge, 1995. 193-199.

LIMA, J. M. T. G. et al. Developments of Subsea Facilities in the Roncador Field (P-52). **Offshore Technology Conference**, Houston, 2008.

MCPHERSON, G. Developments in Deepwater Installation Systems. **Offshore Technology Conference**, Houston, 2015.

MINEIRO, F. P. D. S. **Propriedades Hidrodinâmicas de Corpos de Geometria Complexa Como Manifolds para Operação em Águas Profundas**. Rio de Janeiro: Dissertação (Mestrado), COPPE/UFRJ, 2006.

MORISON, J. R. et al. The force exerted by surface waves on piles. **Petroleum transactions**, v. 189, p. 149-154, 1950.

MORK, H.; LUNDE, J. A Cost-Effective and Safe Method for Transportation and Installation of Subsea Structures - The Pencil Buoy Method. **SPE Offshore Europe**, Aberdeen, 2007.

NAGATOMI, O.; NAKAMURA, M.; KOTERAYAMA, W. Dynamic Simulation and Field Experiment of Submarine Cable During Laying and Recovery. **Proceedings of the Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference**, Kitakyushu, 2002. 255-262.

NASCIMENTO, V. M. F. **Modelo de instalação de equipamentos submarinos com sistema de compensação passiva de heave para águas profundas**. Rio de Janeiro: Dissertação (Mestrado), COPPE/UFRJ, 2014.

NELSON, R. et al. Heave Compensated Landing System - A Novel Tool for Subsea Intervention. **Offshore Technology Conference**, Houston, 1997.

NIEDZWECKI, J. M.; THAMPI, S. K. Snap Loading of Marine Cable Systems. **Applied Ocean Research**, v. 13, n. 5, p. 210-219, 1991.

OCHI, M. K. On Prediction of Extreme Values. **Journal of Ship Research**, v. 17, n. 1, 1973.

ORCINA. **Orcaflex Version 10.1a Help**. Ulverston. 2016.

ORITSLAND, O. **A Summary of Subsea Module Hydrodynamic Data**. Marintek. Trondheim. 1989. (MT51 89-0045).

PARK, Y. S.; KIM, W. J.; NAM, B. W. CDF Simulation of Hydrodynamic Forces Acting on Subsea Manifold Templates at Wave Zone. **Proceedings of the Twenty-Third (2013) International Offshore and Polar Engineering Conference**, Anchorage, 2013. 654-661.

PESCE, C. P.; TANNURI, E. A.; CASETTA, L. The Lagrange Equations for Systems with Mass Varying Explicitly with Position - Some Applications to Offshore Engineering. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 28, n. 4, p. 496-504, 2006.

PETROBRAS: Fatos e Dados, 2015. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/conheca-curiosidades-sobre-equipamentos-de-nossos-sistemas-submarinos.htm>>.

Acesso em: 14 ago. 2017.

PETRONOTÍCIAS, 2013. Disponível em: <<https://www.petronoticias.com.br/archives/33853>>. Acesso em: 13 ago. 2017.

PIERSON, W. J.; MOSKOWITZ, L. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii. **Journal of geophysical research**, v. 69, n. 24, 1964.

PLAUT, R. H.; ARCHILLA, J. C.; MAYS, T. W. Snap Loads in Mooring Lines During Large Three-Dimensional Motions of a Cylinder. **Nonlinear Dynamics**, v. 23, p. 271-284, 2000.

PRESLEY, B.; KOUTSOUKOS, S. Effectiveness of Passive Heave Compensation in a Deepwater Environment. **Offshore Technology Conference**, Houston, 2011.

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. 5th. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2011.

REDDY, J. N. **An Introduction to the Finite Element Method**. 3<sup>a</sup>. ed. New York: McGraw Hill, 2006.

RISOEY, T. et al. The Pencil Buoy Method - A Subsurface Transportation and Installation Method. **Offshore Technology Conference**, Houston, 2007.

ROVERI, F. E.; DE OLIVEIRA, M. C.; MORETTI, M. J. Installation of a Production Manifold in 2000 ft Water Depth Offshore Brazil. **Offshore Technology Conference**, Houston, 1996.

ROWAN, D.; AHILAN, R. V. Experience with Deepwater Installations. **Advances in Underwater Technologies**, v. 19, p. 91-104, 1989.

ROWE, S. J.; MACKENZIE, B.; SNELL, R. Deepwater Installation of Subsea Hardware. **Proceedings of the 10th Offshore Symposium**, 2001.

STANDING, R. G.; MACKENZIE, B.; SNELL, R. O. Enhancing the Technology for Deepwater Installation of Subsea Hardware. **Offshore Technology Conference**, 2002.

TECPETRO , 2014. Disponível em: <<https://tecpetro.com/2014/05/11/equipamentos-submarinos/>>. Acesso em: 14 ago. 2017.

THIAGARAJAN, K. P.; YANN, N. Assessment of One Company's Regulations for Offshore Lifting Operations. **Offshore Technology Conference**, Houston, 2001.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

TJAVARAS, A. A. et al. The Mechanics of Highly-Extensible Cables. **Journal of Sound and Vibration**, v. 213, n. 4, p. 709-737, 1998.

TORBEN, S. Fiber Rope Deployment System for Ultra Deep Water Installations. **Offshore Technology Conference**, 2007.

TORBEN, S. et al. Fiber Rope Deployment System and Rope Management Process. **Proceeding of the Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference**, 2008.

TORBEN, S.; INGERBERG, P. Field Pilot of Subsea Equipment Installation in Deep Water using Fibre Rope in Two-fall Arrangement. **Offshore Technology Conference**, 2011.

VASSALOS, D.; HUANG, S. Dynamics of Small-Sagged Taut-Slack Marine Cables. **Computers and Structures**, v. 58, n. 3, p. 557-562, 1996.

VAZ, M. A.; PATEL, M. H. Three-Dimensional Behaviour of Elastic Marine Cables in Sheared Currents. **Applied Ocean Research**, v. 22, p. 45-53, 2000.

WANG, A. et al. Latest Progress in Deepwater Installation Technologies. **Proceedings of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference**, Rhodes, 2012. 1079-1090.

WANG, A. M. et al. Pendulous Installation Method and its Installation Analysis for a Deepwater Manifold in South China Sea. **Proceedings of the Twenty-third (2013) International Offshore and Polar Engineering Conference**, Anchorage, 2013. 774-784.

WILSON, J. F. **Dynamics of Offshore Structures**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.

YANG, N.; JENG, D.-S.; ZHOU, X. L. Tension Analysis of Submarine Cables During Laying Operations. **The Open Civil Engineering Journal**, v. 7, p. 282-291, 2013.

