



DETERMINAÇÃO DE MASSA ADICIONAL DE ESTRUTURAS  
SUBMARINAS COM BASE EM DADOS DE CAMPO

Alberto Lima dos Santos

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

Orientadores: Sergio Hamilton Sphaier  
Paulo de Tarso Themistocles  
Esperança

Rio de Janeiro  
Setembro de 2018

DETERMINAÇÃO DE MASSA ADICIONAL DE ESTRUTURAS  
SUBMARINAS COM BASE EM DADOS DE CAMPO

Alberto Lima dos Santos

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

Examinada por:

---

Prof. Sergio Hamilton Sphaier, Dr.Ing.

---

Prof. Claudio Alexis Rodríguez Castillo, D.Sc.

---

Prof. Luís Volnei Sudati Sagrilo, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
SETEMBRO DE 2018

Santos, Alberto Lima dos

Determinação de Massa Adicional de Estruturas Submarinas com Base em Dados de Campo/Alberto Lima dos Santos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XIII, 79 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Sergio Hamilton Sphaier

Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Oceânica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 77 – 79.

1. Equipamentos submarinos. 2. Massa adicional e amortecimento. 3. Análise de instalação. I. Sphaier, Sergio Hamilton *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

*À BCB.*

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos que viabilizaram e contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho. Agradeço à minha família pelo apoio e suporte em todas as horas e ao Professor Sphaier pela infinita paciência e pela amizade.

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

## DETERMINAÇÃO DE MASSA ADICIONAL DE ESTRUTURAS SUBMARINAS COM BASE EM DADOS DE CAMPO

Alberto Lima dos Santos

Setembro/2018

Orientadores: Sergio Hamilton Sphaier

Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Programa: Engenharia Oceânica

A determinação das cargas dinâmicas que atuam em estruturas submarinas durante sua instalação representa um desafio para a indústria *offshore*. Durante a instalação, equipamentos e estruturas submarinas são expostos a cargas cíclicas oriundas do movimento da embarcação instaladora e do movimento do fluido no qual encontram-se imersos. De maneira geral, a metodologia adotada pela indústria para determinação dessas cargas gera resultados conservadores, resultando no superdimensionamento dos dispositivos de instalação, guindastes e guinchos, e em janelas operacionais muito restritas. A fim de adequar a prática da indústria ao cenário *offshore* atual, se faz necessário revisar a maneira com a qual a análise de instalação de equipamentos submarinos é realizada, principalmente no que diz respeito a determinação das propriedades hidrodinâmicas destes equipamentos, mais especificamente, a massa adicional. Este trabalho se propõe a desafiar a metodologia atualmente adotada pela indústria *offshore* para a determinação dos valores de massa adicional utilizados na análise de instalação de equipamentos submarinos. Para isto, uma metodologia para inferir a massa adicional de um equipamento a partir de dados gravados em campo é proposta. Valores obtidos através do método proposto são então comparados contra valores calculados utilizando os métodos atualmente adotados pela indústria, permitindo que o impacto da metodologia adotada atualmente no processo de determinação dos valores de massa adicional seja avaliado sob o ponto de vista do custo operacional.

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

## DETERMINATION OF ADDED MASS OF SUBSEA STRUCTURES BASED ON FIELD DATA

Alberto Lima dos Santos

September/2018

Advisors: Sergio Hamilton Sphaier

Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Department: Ocean Engineering

The determination of the dynamic loads acting on subsea structures during installation represents a challenge for the offshore industry. When installed, underwater equipment and structures are exposed to cyclic loads arising from the installation vessel and fluid motions. In general, the methodology adopted by the industry to determine these loads generates conservative results, reflecting in oversized installation devices and in very restricted operational windows. In order to adapt the industry practice to the current offshore scenario, it is necessary to review the way which installation analysis of subsea equipment is being carried out, more specifically, the methods for determination of the hydrodynamic properties of these equipments. The objective of this work is to challenge the methodology currently adopted by the offshore industry for the determination of the added mass values used in installation analysis of subsea equipment. In order to achieve this objective, a methodology to determine the added mass of an subsea structure based on data recorded in the field is proposed. Values obtained through the proposed method are then compared against values calculated using the methods currently adopted by the industry, allowing to assess the impact of applying the current industry practice for added mass determination through a cost point of view.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Descrição dos Capítulos . . . . .	2
<b>2 Visão Geral da Instalação de Estruturas e Equipamentos Subma- rinos</b>	<b>4</b>
2.1 Método de Instalação por Içamento . . . . .	5
2.1.1 Fase Aérea . . . . .	6
2.1.2 Passagem pela zona de ondas ( <i>splash zone</i> ) . . . . .	8
2.1.3 Descida pelo restante da lâmina d'água . . . . .	13
2.1.4 Pousa no leito marinho . . . . .	16
2.2 Método de Instalação por Reboque Submarino . . . . .	18
2.3 Método de Instalação Pendular . . . . .	20
<b>3 Revisão Bibliográfica</b>	<b>22</b>
3.1 Métodos de Instalação de Equipamentos Submarinos . . . . .	22
3.2 Metodologia de Análise de Instalação de Equipamentos Submarinos .	24
3.3 Determinação de Coeficientes Hidrodinâmicos . . . . .	25
3.4 Software de Análise . . . . .	26
<b>4 Hidrodinâmica Aplicada a Instalação de Equipamentos Subma- rinos</b>	<b>28</b>
4.1 Dinâmica de um Corpo Içado Através da Lâmina d'Água Suspenso por um Cabo Elástico . . . . .	28
4.1.1 Equação do Movimento . . . . .	29
4.1.2 Solução . . . . .	30
4.1.3 Força Dinâmica . . . . .	31
4.1.4 Espectro de Resposta . . . . .	31
4.1.5 Discussão . . . . .	32



4.2	Determinação da Massa Adicional e do Amortecimento . . . . .	32
4.2.1	Determinação da Massa Adicional e do Amortecimento Através de Semelhança Geométrica . . . . .	33
4.2.2	Determinação da Massa Adicional e do Amortecimento Através de Ensaio . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Metodologia de Análise</b>	<b>38</b>
5.1	Aquisição e Preparação de Dados . . . . .	39
5.2	Método Exaustivo de Busca . . . . .	41
5.3	Integração da Equação do Movimento . . . . .	48
<b>6</b>	<b>Estudo de Caso</b>	<b>55</b>
6.1	Dados do Equipamento . . . . .	55
6.2	Cálculo dos Coeficientes Hidrodinâmicos . . . . .	56
6.2.1	Aproximação por Placa Plana . . . . .	56
6.2.2	Aproximação por Bloco . . . . .	58
6.2.3	Aproximação por Corpo com Paredes Verticais . . . . .	59
6.2.4	Discussão . . . . .	60
6.3	Determinação da Massa Adicional a partir de Dados de Campo . . . . .	60
6.3.1	Dados de Entrada . . . . .	60
6.3.2	Aplicação do Método Exaustivo de Busca . . . . .	62
6.3.3	Análise por Integração da Equação do Movimento . . . . .	65
6.4	Resultados . . . . .	69
<b>7</b>	<b>Conclusões</b>	<b>74</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>77</b>

# Lista de Figuras

2.1	Ilustração das fases de instalação pelo método tradicional. . . . .	5
2.2	Fase aérea da instalação de equipamentos (fonte: Biblioteca de imagens da Ithaca Energy). . . . .	7
2.3	Simulação de içamento de estrutura submarina em tandem (fonte: cm-labs.com). . . . .	8
2.4	Passagem de estrutura pela zona de ondas (fonte: sal-heavylift.com). . . . .	8
2.5	<i>Manifold</i> submarino equipado com mudmat (fonte: brazilenergyinsight.com). . . . .	9
2.6	Exemplo de <i>template</i> submarino (fonte: oilandgastechnologies.wordpress.com). . . . .	10
2.7	Exemplo de compensador de movimento vertical (fonte: cranemaster.com). . . . .	12
2.8	Partes de um compensador de movimento vertical (fonte: cranemaster.com). . . . .	12
2.9	Simulação numérica demonstrando o uso de um compensador de movimento vertical durante a passagem pela zona de ondas (fonte: cranemaster.com). . . . .	13
2.10	Exemplo de <i>pennant</i> sintético utilizado em aplicações <i>offshore</i> (fonte: energy-oil-gas.com). . . . .	15
2.11	Exemplo de um arranjo submarino de extração de óleo e gás (fonte: opetroleo.com.br). . . . .	17
2.12	Ilustração do método de instalação por reboque submarino. . . . .	19
2.13	Ilustração do método de instalação pendular (extraído de CERQUEIRA <i>et al.</i> [1]). . . . .	21
4.1	Configuração do sistema de içamento em águas profundas. . . . .	29
4.2	Aproximação da geometria de um PLEM por uma placa plana (fontes: sal-heavylift.com e [2]). . . . .	33
4.3	Aproximação da geometria de uma estaca de sucção por um cilindro (fontes: www.offshore-technology.com e [2]). . . . .	33

4.4	Aproximação da geometria de um <i>template</i> submarino por elementos individuais (fontes: <a href="http://www.offshore-technology.com">www.offshore-technology.com</a> e [2]). . . . .	34
4.5	Configuração padrão de teste com modelo em escala reduzida. . . . .	35
5.1	Fluxo da metodologia de análise. . . . .	39
5.2	Exemplo de séries temporais de carga atuando no guindaste e movimento da embarcação. . . . .	41
5.3	Fluxo de análise por força bruta. . . . .	42
5.4	Comparação entre resultados das simulações numéricas vs. dados obtidos em campo. . . . .	43
5.5	Comparação entre resultados das simulações numéricas vs. dados obtidos em campo. . . . .	43
5.6	Comparação entre resultados das simulações numéricas vs. dados obtidos em campo. . . . .	44
5.7	Comparação entre resultados das simulações numéricas vs. dados obtidos em campo. . . . .	45
5.8	Exemplo de resultado da análise por força bruta. . . . .	46
5.9	Exemplo de determinação da massa adicional. . . . .	47
5.10	Fluxo de análise. . . . .	48
5.11	Fluxo de análise. . . . .	48
5.12	Comparação entre força simulada e força medida em campo. . . . .	49
5.13	Exemplo da aplicação do método. . . . .	50
5.14	Aplicação da transformada discreta de Fourier. . . . .	51
5.15	$A_z$ como função de $KC = \ddot{z}_{max}T/D$ . . . . .	52
5.16	Exemplo de simulação com ajuste da força externa. . . . .	53
5.17	Exemplo de $C_{A_z}$ como função de $KC$ . . . . .	54
6.1	Modelo ilustrando as dimensões do equipamento considerado no estudo. . . . .	56
6.2	Coeficientes de massa adicional para placa plana - Meyerhoff (1970). . . . .	57
6.3	Coeficientes de massa adicional para um bloco retangular - Sarpkaya (1960). . . . .	58
6.4	Séries temporais de carga e movimento. . . . .	61
6.5	Espectro de energia da série temporal de carga no guindaste. . . . .	62
6.6	Espectro de energia das séries temporais de movimento. . . . .	63
6.7	Resultados da análise por força bruta. . . . .	65
6.8	Resultados da análise por força bruta. . . . .	65
6.9	Exemplo de simulação com ajuste da força externa. . . . .	66
6.10	Resultado da análise por força externa. . . . .	67
6.11	Resultado da análise por força externa - Equipamento 2. . . . .	68
6.12	Resultado da análise por força externa - Equipamento 3. . . . .	68

6.13	Resultado da análise por força externa - Equipamento 4. . . . .	69
6.14	Resultado da análise por força externa - Equipamento 5. . . . .	69
6.15	Envelope de cargas - Revisão 1. . . . .	71
6.16	Envelope de cargas - Revisão 2. . . . .	72
6.17	Estado de mar limite para instalação - Revisão 1. . . . .	73
6.18	Estado de mar limite para instalação - Revisão 2. . . . .	73

# Lista de Tabelas

6.1	Propriedades do equipamento. . . . .	55
6.2	Propriedades do cabo de içamento. . . . .	55
6.3	Cálculo da massa adicional a partir de uma placa plana. . . . .	57
6.4	Cálculo da massa adicional a partir de uma placa plana em escoamento oscilatório. . . . .	57
6.5	Cálculo da massa adicional a partir de um bloco retangular. . . . .	58
6.6	Cálculo da massa adicional para um corpo com paredes verticais. . . . .	59
6.7	Cálculo da massa adicional para um corpo com paredes verticais - Escoamento oscilatório. . . . .	59
6.8	Resumo do cálculo para determinação de massa adicional. . . . .	60
6.9	Intervalo dos parâmetros considerados na montagem da matriz de análise. . . . .	63
6.10	Resumo dos valores obtidos para massa adicional $A_z$ . . . . .	70
6.11	Dados de entrada para simulações de validação. . . . .	71

# Capítulo 1

## Introdução

A instalação de estruturas e equipamentos submarinos em águas ultra-profundas representa um desafio crescente em termos de engenharia e custos. No cenário de mercado atual, realizar projetos maiores sem investir na construção de novas embarcações tem sido uma das premissas da indústria *offshore*. As limitações econômicas impostas ao custo dos projetos aumentam ainda mais o desafio da engenharia, tornando necessário a busca por novas soluções e a revisão de métodos de instalação já consagrados pela indústria.

Um dos grandes desafios da engenharia de instalação *offshore* é a determinação das cargas dinâmicas que atuam nos equipamentos submarinos enquanto os mesmos são içados da superfície até o leito marinho. Durante este trajeto, quase sempre vertical, equipamentos e estruturas submarinas são expostos a cargas cíclicas oriundas do movimento da embarcação instaladora e do movimento do fluido no qual encontram-se imersos. Os principais carregamentos hidrodinâmicos são decorrentes da ação das ondas incidentes na embarcação e na própria estrutura, transformando o problema da determinação de cargas em um problema de movimento oscilatório, cujas frequências correspondem às das ondas incidentes.

De maneira geral, a metodologia adotada pela indústria para determinação dessas cargas gera resultados conservadores, resultando no superdimensionamento dos dispositivos de instalação, guindastes e guinchos, e em janelas operacionais muito restritas.

Com o objetivo de adequar a prática da indústria ao cenário *offshore* atual, se faz necessário revisar a maneira com a qual a análise de instalação de equipamentos submarinos é realizada, principalmente no que tange a determinação das propriedades hidrodinâmicas destes equipamentos, mais especificamente, a massa adicional e o amortecimento.

Este trabalho se propõe a questionar os resultados obtidos através da metodologia atualmente adotada pela indústria *offshore* para a determinação dos valores de massa adicional utilizados na análise de instalação de equipamentos submarinos. Para isto, dados observados em campo, durante operações de instalação de equipamentos, serão analisados de forma que a massa adicional destes equipamentos possa ser inferida a partir de registros temporais de carga nos dispositivos de içamento e movimento da embarcação instaladora.

Esta propriedade hidrodinâmica será então comparada contra valores calculados utilizando os métodos atualmente adotados pela indústria, permitindo que o impacto da metodologia adotada atualmente no processo de determinação dos valores de massa adicional seja avaliado sob o ponto de vista do custo operacional.

## 1.1 Descrição dos Capítulos

O Capítulo 2 apresenta uma visão geral da instalação de estruturas e equipamentos submarinos. Os métodos mais comuns de instalação são abordados assim como os pontos mais relevantes deste tipo de operação.

O Capítulo 3 apresenta uma breve revisão bibliográfica dos trabalhos que versam sobre os métodos de instalação de equipamentos, as metodologias de análise de instalação e determinação de coeficientes hidrodinâmicos assim como os pacotes computacionais utilizados pela indústria para este tipo de análise.

O Capítulo 4 apresenta uma revisão dos principais conceitos de hidrodinâmica que são aplicados a análise de instalação de equipamentos. Neste capítulo são apresentados os blocos fundamentais para realização de análises de instalação e para a execução da metodologia proposta neste trabalho.

O Capítulo 5 descreve a metodologia proposta neste trabalho para determinação da massa adicional a partir de dados de campo. O fluxo de análise da metodologia é apresentado e o processo é ilustrado através de exemplos.

O Capítulo 6 apresenta um estudo de caso onde a metodologia proposta é aplicada para analisar dados de uma operação de instalação de equipamento obtidos em campo. Os resultados são apresentados e discutidos.

Por fim, o Capítulo 7 traça as conclusões do trabalho e pontua com as recomendações para trabalhos futuros.



## Capítulo 2

# Visão Geral da Instalação de Estruturas e Equipamentos Submarinos

Diferentes metodologias podem ser utilizadas para a instalação de estruturas e equipamentos submarinos. O método mais comum, ou tradicional, requer o içamento da estrutura a partir do convés de uma embarcação e sua descida pela lâmina d'água através de um cabo de içamento, geralmente suportado por um guindaste ou guincho *offshore*.

Geralmente a fase mais crítica da instalação de equipamentos pelo método tradicional é a passagem da estrutura através da zona de ondas. Visando reduzir as limitações encontradas nesta fase da instalação, foram desenvolvidos métodos que envolvem o reboque submerso das estruturas a partir de águas abrigadas até o campo onde serão instaladas.

Outros métodos alternativos visam reduzir a probabilidade de ocorrência de problemas durante a descida da estrutura até o leito marinho, como por exemplo a amplificação das cargas dinâmicas atuando nos dispositivos de içamento devido ao efeito de ressonância axial no sistema içado. Dentre esses métodos pode-se destacar o lançamento pendular de equipamentos.

A escolha do método de instalação de estruturas e equipamentos submarinos é estratégica para o sucesso de um projeto e deve ser feita visando reduzir o tempo de instalação e, ao mesmo tempo, aumentar a segurança da operação. Nesta seção são apresentados, de forma breve, os métodos de instalação de estruturas e equipamentos submarinos existentes e suas principais vantagens e desvantagens são discutidas.

## 2.1 Método de Instalação por Içamento

O método tradicional para instalação de equipamentos submarinos consiste, primeiramente, em transportar para o campo a estrutura a ser instalada, seja no convés de uma balsa ou no convés da própria embarcação instaladora.

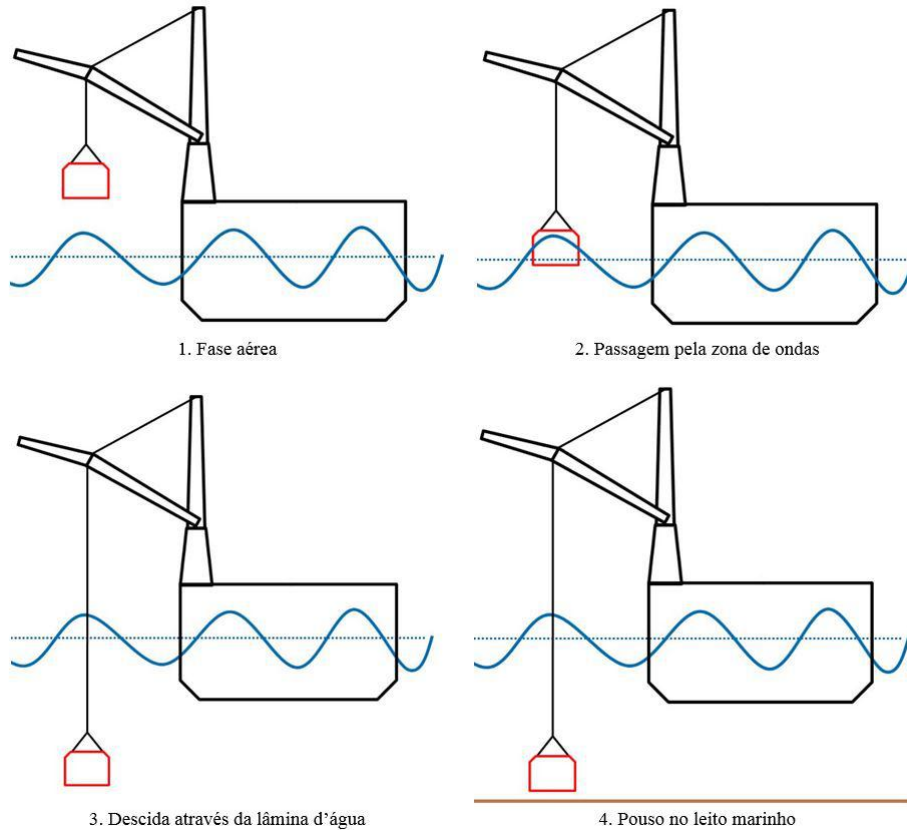


Figura 2.1: Ilustração das fases de instalação pelo método tradicional.

A instalação de uma estrutura submarina através de içamento pode ser resumida nas seguintes fases:

- Içamento do convés e transbordo (ou fase aérea);
- Passagem pela zona de ondas;
- Descida pelo restante da lâmina d'água;
- Pousa no leito marinho.

A fase aérea é caracterizada pelo içamento do equipamento ou estrutura a partir do convés da embarcação e pela manobra de transbordo até a posição onde o equipamento será descido através da superfície do mar. A fase de passagem pela zona de ondas inicia após a manobra de transbordo e termina no momento em que

o equipamento atinge uma profundidade onde a ação das ondas sobre a estrutura pode ser desconsiderada. A fase seguinte é a descida do equipamento pelo restante da lâmina d'água até uma profundidade onde o equipamento é preparado para realizar o pouso no leito marinho. A fase de pouso do equipamento é caracterizada pelo posicionamento da estrutura de acordo com as coordenadas de instalação e pelo seu assentamento ou cravamento no solo marinho. A Figura 2.1 ilustra as fases descritas acima.

Para cada uma das fases listadas acima são definidos critérios que devem ser observados para que a operação de instalação ocorra de forma segura. Os principais critérios são os limites de carga dos dispositivos de içamento (guindastes e guinchos), dos cabos e lingadas de içamento e do próprio equipamento sendo instalado (olhais e estrutura). Para algumas das fases, critérios de movimento do equipamento também se tornam críticos, como por exemplo o deslocamento no plano horizontal durante o içamento do convés e a velocidade vertical durante o pouso no leito marinho.

### **2.1.1 Fase Aérea**

Esta fase da operação é caracterizada pelo içamento do convés e transbordo do equipamento ou estrutura, Figura 2.2. Esta é a única das fases de instalação na qual o equipamento não se encontra exposto a cargas hidrodinâmicas. Nesta fase o conjunto equipamento-cabo de içamento funciona como um pêndulo e possíveis variações dinâmicas devido a ressonância do conjunto devem ser estudadas.

Na maioria dos casos, no entanto, o conjunto equipamento-cabo de içamento pode ser aproximado por um corpo rígido para fins de avaliação das cargas verticais atuando no dispositivo de içamento. Dada a rigidez do sistema no sentido vertical, as acelerações do ponto onde o cabo de içamento está conectado ao navio podem ser diretamente transferidas para o equipamento, permitindo um cálculo simplificado das forças atuando no sistema, porém representativo do que se observa em campo.

É importante notar que a premissa acima perde a validade quando o movimento vertical do equipamento é tal que a tração no cabo de içamento tende a zero ou quando o equipamento passa a oscilar de forma pendular. Estes casos, no entanto, representam situações extremas de operação cuja probabilidade de ocorrência é relativamente baixa.

Durante a fase aérea, o movimento do equipamento é, geralmente, o ponto crítico da operação. O deslocamento do equipamento no plano é geralmente limitado por

guinchos e obstáculos montados nos conveses das embarcações instaladoras. A análise do movimento permite avaliar riscos de colisão e dimensionar dispositivos limitadores de movimento, como guinchos e anteparas.



Figura 2.2: Fase aérea da instalação de equipamentos (fonte: Biblioteca de imagens da Ithaca Energy).

Existem casos, no entanto, onde o equipamento a ser instalado precisa ser içado do convés de outra embarcação. Neste tipo de operação, a avaliação do movimento vertical relativo entre embarcações passa a ser um ponto crítico, sendo necessário avaliar os riscos de colisão do equipamento contra o convés da embarcação de apoio durante o içamento. Em alguns casos, a interação hidrodinâmica entre as duas embarcações pode se tornar relevante, fazendo-se necessário que o movimento acoplado de ambas seja considerado nas análises de içamento.

Estruturas e equipamentos também podem ser içados em tandem, ou seja, através do uso simultâneo de dois guindastes, que podem estar instalados na mesma embarcação ou em embarcações diferentes. Içamentos em tandem tem uso limitado para instalação de equipamentos submarinos devido a sua complexidade e aos riscos associados a perda de sincronia entre os dispositivos de içamento.



Figura 2.3: Simulação de içamento de estrutura submarina em tandem (fonte: cm-labs.com).

### 2.1.2 Passagem pela zona de ondas (*splash zone*)

A passagem pela zona de ondas é caracterizada pela descida do equipamento através da superfície livre do mar até uma profundidade onde as forças oriundas da ação das ondas se tornam irrelevantes. Esta fase é, na maioria dos casos, a fase mais crítica da operação de instalação de uma estrutura submarina. Em função das altas velocidades e acelerações que a partícula fluida assume na proximidade da superfície livre, as cargas hidrodinâmicas que atuam no equipamento, combinadas com a dinâmica imposta pela embarcação, representam um risco real de sobrecarga nos dispositivos de içamento. A Figura 2.4 ilustra a passagem de um equipamento pela zona de ondas.

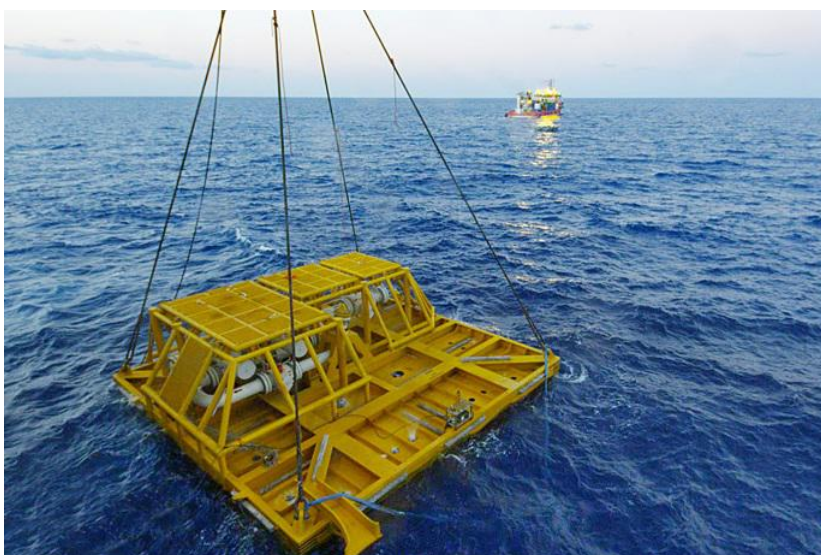


Figura 2.4: Passagem de estrutura pela zona de ondas (fonte: sal-heavylift.com).

As forças hidrodinâmicas atuando no equipamento durante a passagem pela zona de ondas variam com o tempo e de acordo com a submersão do corpo. Quando



o equipamento se encontra suspenso, porém próximo a superfície livre, o mesmo fica exposto a cargas de *slamming*, que podem ser modeladas em função da velocidade relativa entre a estrutura e a partícula fluida, da área vertical projetada da estrutura e de um coeficiente de força que está relacionado a geometria da estrutura.

Carregamentos dinâmicos em função do *slamming* são uma preocupação em estruturas com grande área vertical projetada, geralmente equipadas com *mudmats*, bases estruturais projetadas com o objetivo de impedir que as estruturas afundem no leito marinho. A Figura 2.5 apresenta um exemplo de *manifold* submarino equipado com *mudmat* de grande área vertical projetada.

A partir do momento em que o equipamento inicia o cruzamento da superfície livre, forças devido à massa adicional e ao arrasto também passam a atuar na estrutura. Essas forças são modeladas em função da aceleração e velocidade relativa entre a partícula fluida e a estrutura, respectivamente. Da mesma maneira que as forças de *slamming*, a geometria do equipamento afeta diretamente outras cargas hidrodinâmicas. De forma geral, quanto maior a área vertical projetada da estrutura, maiores as forças relacionadas à massa adicional e ao arrasto.



Figura 2.5: *Manifold* submarino equipado com *mudmat* (fonte: [brazilenergyinsight.com](http://brazilenergyinsight.com)).

Em função da magnitude da aceleração e velocidade da partícula fluida próxima a superfície livre, os maiores carregamentos hidrodinâmicos costumam ocorrer nesta fase da operação de instalação. Para estruturas complexas, como *templates* de proteção e *manifolds*, é possível que diferentes partes da estrutura se encontrem expostas a diferentes forças ao mesmo tempo.

A Figura 2.6 apresenta um *template* submarino de grandes dimensões atravessando a zona de ondas. Devido a sua geometria complexa e dimensão vertical, diferentes partes da estrutura podem ser expostas a diferentes forças ao mesmo tempo. Por exemplo, uma vez submersas, as fundações do *template* estarão expostas somente a forças em função da massa adicional e de arrasto, enquanto que o topo da estrutura estará exposto a forças de *slamming*.



Figura 2.6: Exemplo de *template* submarino (fonte: [oilandgastechnologies.wordpress.com](http://oilandgastechnologies.wordpress.com)).

As forças atuando na estrutura em função da ação das ondas decaem de forma exponencial conforme a estrutura submerge e se afasta da superfície livre. A partir de uma certa profundidade o efeito das ondas sobre o equipamento pode ser desconsiderado. Deste ponto em diante, pode-se assumir que as forças dinâmicas atuando no sentido vertical da estrutura são dependentes somente do movimento vertical da embarcação instaladora.

É importante observar que a magnitude das forças devido à massa adicional

e ao amortecimento variam em função da distância do equipamento em relação a superfície livre. De forma geral, a magnitude dessas forças só atinge seu valor máximo quando a estrutura se encontra totalmente submersa. No entanto, durante a passagem do equipamento pela superfície livre o escoamento em torno da estrutura é complexo, tornando difícil estimar com precisão os valores dos coeficientes de força a serem adotados para o cálculo das forças hidrodinâmicas.

Na prática, os valores de massa adicional e coeficiente de amortecimento adotados para determinação das forças hidrodinâmicas atuando na estrutura durante a passagem pela superfície livre são mantidos constantes e valores conservadores geralmente são adotados. Esta prática geralmente resulta em forças hidrodinâmicas superestimadas e, por consequência, na redução do estado de mar limite para instalação do equipamento.

Existem, no entanto, dispositivos que podem ser instalados em linha com o cabo de içamento e que tem por objetivo desacoplar o movimento do navio do movimento do equipamento sendo instalado. Estes dispositivos são chamados de compensadores de movimento vertical passivos (PHC) e seu método de funcionamento consiste em aumentar o comprimento do sistema de içamento de forma a compensar os deslocamentos verticais da embarcação instaladora. Exemplos de compensadores de movimento vertical passivos são apresentados na Figura 2.7.

Compensadores de movimento vertical passivos são compostos por um pistão conectado a um cilindro preenchido por óleo e um acumulador preenchido por um gás inerte. Conforme a embarcação se movimenta, o pistão corre por dentro do cilindro com um curso igual ao deslocamento vertical da embarcação. Ao se movimentar, o pistão comprime ou alivia o gás inerte presente no acumulador. A pressão do gás inerte define a rigidez do compensador de movimento e pode ser calibrada de forma que o mesmo funcione compensando movimentos ou como um absorvedor de choque. A Figura 2.8 ilustra as partes que compõem um compensador vertical de movimento.

Ao desacoplar o movimento vertical entre a embarcação e a estrutura sendo içada, o compensador vertical de movimento reduz a velocidade e aceleração relativas entre a estrutura e a partícula fluida durante a passagem pela zona de ondas. Dessa forma, os carregamentos hidrodinâmicos são reduzidos, visto que os mesmos são função da velocidade e aceleração relativa.





Figura 2.7: Exemplo de compensador de movimento vertical (fonte: cranemas-ter.com).

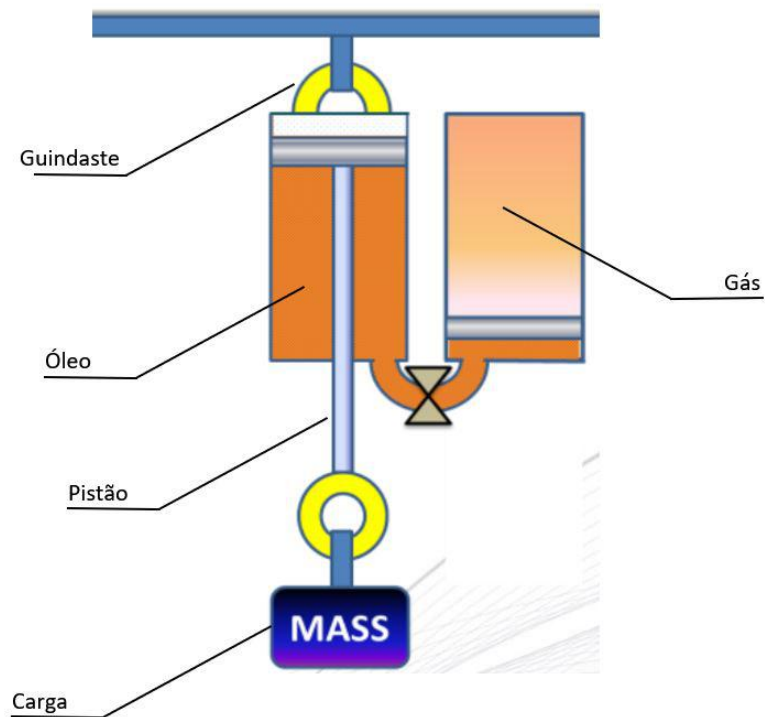


Figura 2.8: Partes de um compensador de movimento vertical (fonte: cranemas-ter.com).

A Figura 2.9 apresenta uma simulação numérica realizada no *software* Orcaflex ilustrando o uso de um compensador de movimento vertical sendo aplicado ao içamento de um equipamento pela zona de ondas. No quadro a esquerda é possível

observar o modelo 3D do equipamento sendo içado. O equipamento à esquerda está conectado diretamente ao cabo de içamento enquanto que o equipamento à direita está conectado a um compensador de movimento vertical. Nos quadros a direita são apresentadas duas séries temporais da carga atuando no guindaste, no gráfico superior é apresentada a série temporal da simulação sem o uso do compensador de movimento vertical enquanto que no gráfico inferior é apresentado o resultado da simulação com o compensador de movimento vertical. Observando os resultados fica explícita a redução das cargas atuando no guindaste devido ao uso do compensador de movimento.

Guindastes e guinchos também podem ser equipados com compensadores de movimento vertical, neste caso o cilindro hidráulico e o acumulador são instalados a bordo da embarcação e atuam sobre o cabo de içamento modificando a rigidez do sistema içado.

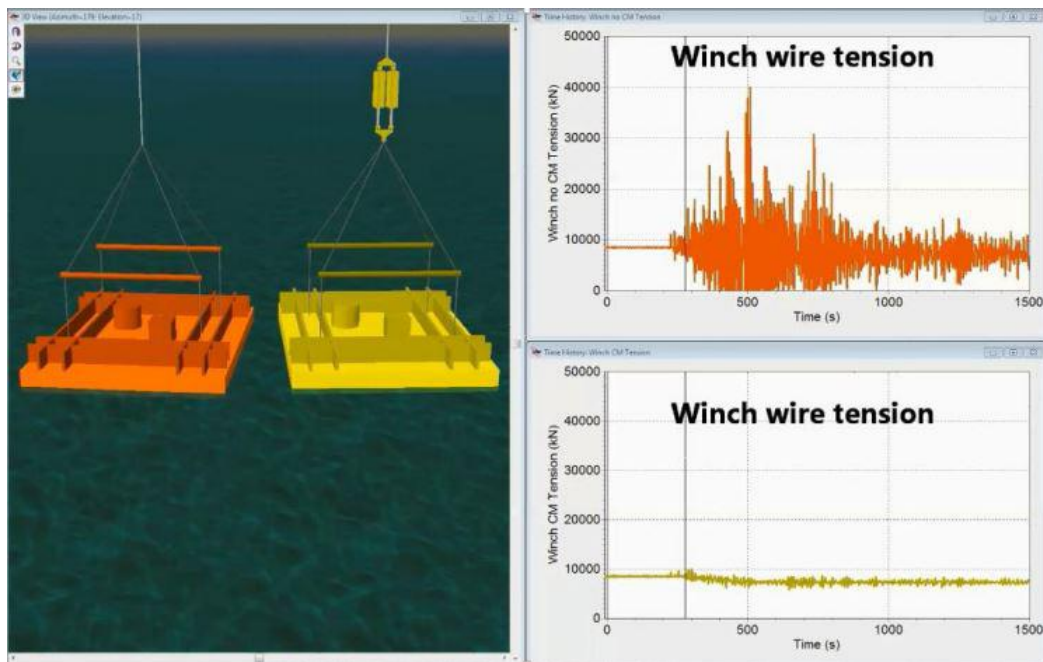


Figura 2.9: Simulação numérica demonstrando o uso de um compensador de movimento vertical durante a passagem pela zona de ondas (fonte: cranemaster.com).

### 2.1.3 Descida pelo restante da lâmina d'água

A profundidade a partir da qual podemos desprezar as forças dinâmicas devido a ação das ondas marca o início de outra fase da operação de instalação de equipamentos, a descida pela coluna d'água. Nesta fase, as forças dinâmicas atuando na estrutura são impostas somente pelo movimento da extremidade superior do cabo de içamento, visto que a velocidade e aceleração da partícula fluida devido a

presença de ondas tendem a zero.

Em se tratando de águas ultra-profundas, esta geralmente é a fase mais longa da operação de instalação de equipamentos e pode ser dividida em diversos passos intermediários, quando se faz necessário realizar transferência de carga entre diferentes dispositivos de içamento.

De forma geral, após a passagem pela zona de ondas, o equipamento é descido até o leito marinho por um único dispositivo de içamento, um guindaste ou guincho. A cada passo da descida, a carga estática atuando no dispositivo de içamento aumenta devido ao aumento do comprimento do cabo de içamento e, por consequência, do peso total do conjunto içado.

Em alguns casos, devido ao peso do sistema içado, ou seja, devido ao peso conjunto da estrutura e do cabo de içamento, se faz necessário transferir toda a carga do conjunto para um dispositivo de içamento com maior capacidade. Outra opção é reduzir a carga estática através do uso de cabos sintéticos, visto que estes apresentam peso linear inferior aos cabos de aço com os quais a maioria dos guindastes e guinchos são equipados. Flutuadores também podem ser utilizados para reduzir a carga estática do sistema içado, embora sua utilização em operações em águas profundas seja menos comum.

O maior risco durante a fase da descida pela lâmina d'água é a amplificação das cargas dinâmicas devido a efeitos de ressonância. Como foi dito anteriormente, durante a descida da estrutura até o leito marinho se faz necessário lançar cabo de içamento, aumentando o comprimento do cabo de içamento e a massa do sistema içado. A alteração destes dois parâmetros afeta diretamente o período natural do sistema içado, que varia durante todo o processo de descida através da coluna d'água.

Em instalações de equipamentos em águas profundas, é comum que o período natural do sistema içado se encontre próximo ao período das ondas incidentes. Quando isso ocorre existe o risco de amplificação do movimento do sistema içado e, por consequência, das cargas atuando no sistema.

Por outro lado, estimar o período natural de um corpo sendo içado verticalmente por um cabo elástico não é tarefa difícil. O período natural do sistema é função direta da massa total do mesmo, incluindo a massa da estrutura, massa do cabo e massa adicional, e inversamente proporcional a rigidez do sistema, ou seja, a rigidez do cabo de içamento. Voltando ao caso exposto anteriormente, conforme a

estrutura desce em direção ao leito marinho e o comprimento do cabo de içamento aumenta, a massa do sistema aumenta enquanto a rigidez diminui. Dessa forma, pode-se concluir que, conforme o equipamento desce pela lâmina d'água, o período natural do sistema içado aumenta.

A afirmação anterior perde a validade quando algum equipamento ou dispositivo que tenha efeito sobre a rigidez do sistema é introduzido na operação. Um método comum para alteração da rigidez de um sistema içado é a utilização de extensores ou *pennants* compostos por materiais sintéticos com baixa rigidez axial, como por exemplo o *nylon* e o poliéster. A Figura 2.10 apresenta um exemplo de *pennant* fabricado com material sintético para utilização *offshore*.



Figura 2.10: Exemplo de *pennant* sintético utilizado em aplicações *offshore* (fonte: energy-oil-gas.com).

*Pennants* são instalados em linha com o cabo e lingadas de içamento e reduzem a rigidez do sistema içado de forma proporcional ao seu comprimento. Conforme dito anteriormente, a utilização de *pennants* sintéticos também reduz a carga estática de todo o sistema, visto que a maioria dos materiais utilizados na fabricação deste tipo de cabo apresentam peso reduzido ou mesmo flutuabilidade neutra quando imersos na água.

Compensadores de movimento vertical passivos também podem ser utilizados durante esta fase de instalação com o objetivo de alterar a rigidez do sistema içado. Como foi descrito anteriormente, compensadores de movimento vertical podem ser configurados para funcionarem como uma mola em linha com o sistema içado.

De acordo com a rigidez da mola, o período natural do sistema pode ser alterado para não coincidir com o período das ondas incidentes mais comuns, reduzindo assim o risco de sobrecarga no sistema devido a efeitos de ressonância axial. Os compensadores de movimento vertical passivos são mais eficientes e permitem maior flexibilidade do que *pennants* de material sintético. Em alguns casos, no entanto, as duas soluções podem ser utilizadas em conjunto, reduzindo o peso do sistema e alterando a sua rigidez.

Visto que nesta fase da instalação as forças hidrodinâmicas atuando no corpo podem ser consideradas como função apenas do movimento da embarcação instaladora, os modelos de análise de instalação adotados para esta fase geralmente tem boa correlação com observações de campo, sendo até mesmo possível adotar modelos analíticos para determinação das forças atuando no corpo.

#### **2.1.4 Pouso no leito marinho**

A última fase da operação de instalação de equipamentos é o pouso no leito marinho. Alguns equipamentos são projetados para pousarem diretamente sobre o leito marinho enquanto outros pousam sobre estruturas pré instaladas. Seja de uma forma ou de outra, o ponto crítico do pouso do equipamento geralmente está relacionado a velocidade vertical de pouso e ao posicionamento e orientação do equipamento.

Dessa forma, é importante que os movimentos verticais da estrutura sejam reduzidos de forma que o equipamento possa ser corretamente orientado durante o pouso e não perturbar o leito marinho, comprometendo dessa forma a região do solo onde irá pousar. A forma mais comum utilizada para reduzir o movimento da estrutura durante o pouso é a utilização de compensadores verticais de movimento passivos ou ativos.

É importante notar que a dinâmica do equipamento durante o pouso é afetada pela proximidade da estrutura com o leito marinho. Este fator deve ser levado em consideração nas análises de instalação visto que a massa adicional e o amortecimento são afetados pela proximidade do corpo com o fundo, o que pode aumentar o carregamento dinâmico atuando no corpo.

Efeitos devido à corrente oceânica podem deslocar o equipamento no plano horizontal, dificultando o posicionamento e orientação da estrutura durante o pouso, porém tem pouca influência na carga atuando no cabo de içamento. O

posicionamento e alinhamento do equipamento pode ser feito de diversas formas, sendo que a mais comum é a utilização de ROVs para ajustar a orientação do equipamento e a utilização de *transponders* para ajustar a posição. Poitas também podem ser utilizadas para orientação e posicionamento de estruturas de grande porte. Este método requer que uma cabresteira de posicionamento seja instalada no equipamento e conectada a poita através de uma lingada com comprimento ajustável. A lingada de posicionamento é então tracionada permitindo ajustar posição e orientação do equipamento sem auxílio de outros dispositivos. Alguns equipamentos são guiados até sua posição final através de cabos, pinos ou convites estruturais previamente instalados em uma base já posicionada no leito marinho.

O correto posicionamento e orientação dos equipamentos submarinos é fator fundamental em um projeto, tendo em vista que os mesmos são interligados a outros equipamentos através de dutos rígidos ou flexíveis. A Figura 2.11 ilustra um arranjo submarino onde diferentes equipamentos são interligados por *jumpers* rígidos, umbilicais eletro-hidráulicos e dutos flexíveis. Neste arranjo fica clara a necessidade de realizar o correto posicionamento das principais estruturas para que não ocorram problemas na posterior instalação dos outros elementos que conectam todo o sistema.

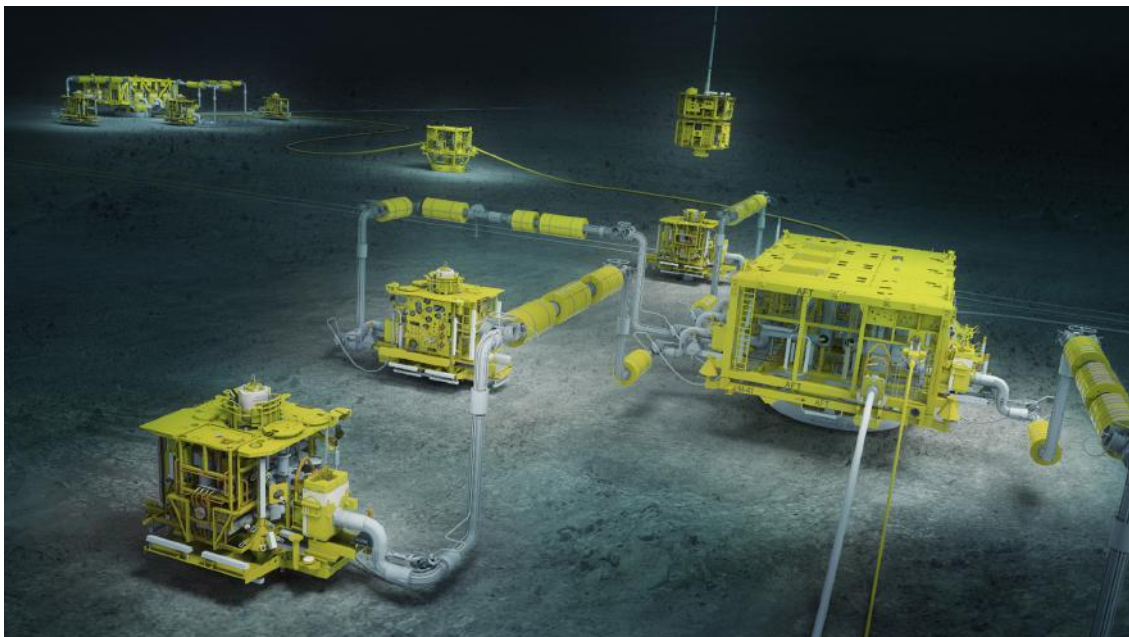


Figura 2.11: Exemplo de um arranjo submarino de extração de óleo e gás (fonte: opetroleo.com.br).



## 2.2 Método de Instalação por Reboque Submarino

Tradicionalmente estruturas submarinas são instaladas através do método descrito na seção anterior, no entanto, devido ao aumento das dimensões e peso das estruturas submarinas e da pouca disponibilidade de embarcações instaladoras no mercado com capacidade de realizar este tipo de operação, novos métodos de instalação foram desenvolvidos e vem sendo empregados com cada vez mais frequência.

Um destes métodos é a instalação por reboque submarino, cujo principal objetivo é adiantar a fase de passagem da estrutura pela zona de ondas, permitindo que esta parte do processo de instalação ocorra em águas abrigadas onde o carregamento hidrodinâmico devido a presença de ondas é irrelevante.

De forma resumida, a instalação de equipamentos através de reboque submarino consiste nos seguintes passos: transporte da estrutura após fabricação para uma região de águas rasas e abrigadas; içamento e armazenagem da estrutura no leito marinho; recuperação da estrutura pela embarcação instaladora; navegação até o campo *offshore* com a estrutura submersa e suspensa por um cabo; descida e pouso da estrutura no campo. A Figura 2.12 ilustra este método de instalação conforme descrito por AAARSET, SARKAR e KARUNAKARAN [3].

O primeiro passo deste tipo de operação é a armazenagem submarina da estrutura a ser instalada, Passo 1 da Figura 2.12. Este passo pode ser entendido como uma micro operação de instalação do equipamento realizada em águas rasas e abrigadas. O equipamento geralmente é transportado de um cais até o local de armazenamento submarino por uma barcaça e o içamento é geralmente feito por uma cámbrea portuária. Tendo em vista a baixa profundidade e a ausência de ondas significativas no local de armazenagem, os problemas descritos anteriormente para a fase de passagem pela zona de ondas e descida pela lâmina d'água são eliminados.

Uma vez armazenada no leito marinho, a estrutura será recuperada pela embarcação que realizará a instalação *offshore*, Passo 2 da Figura 2.12. A recuperação da estrutura geralmente é feita com um guincho equipado com um compensador de movimento vertical. O compensador de movimento vertical tem duas funções neste tipo de operação, facilitar a remoção da estrutura do leito marinho, evitando picos de carga devido ao efeito de sucção entre o fundo do equipamento e o solo, e reduzir as cargas dinâmicas atuando no guincho durante a navegação até a localização *offshore*.

Neste método de instalação, a navegação até a localização *offshore* passa a ser o ponto mais crítico da operação, Passo 3 da Figura 2.12. Durante o reboque a estrutura é posicionada em uma profundidade onde os efeitos das ondas podem ser desprezados, no entanto, os movimentos do navio instalador podem atingir amplitudes maiores durante a navegação do que quando o mesmo se encontra sem velocidade de avanço. Dessa forma, é necessário desacoplar o movimento do navio do movimento do equipamento, esse desacoplamento se dá através da utilização do compensador de movimento vertical passivo.

Uma vez que a estrutura chega a posição de instalação *offshore*, Passo 4 da Figura 2.12, o processo de instalação segue a partir da fase de descida pela lâmina d'água até o pouso no leito marinho. Estas duas fases são similares às fases apresentadas no método descrito anteriormente.

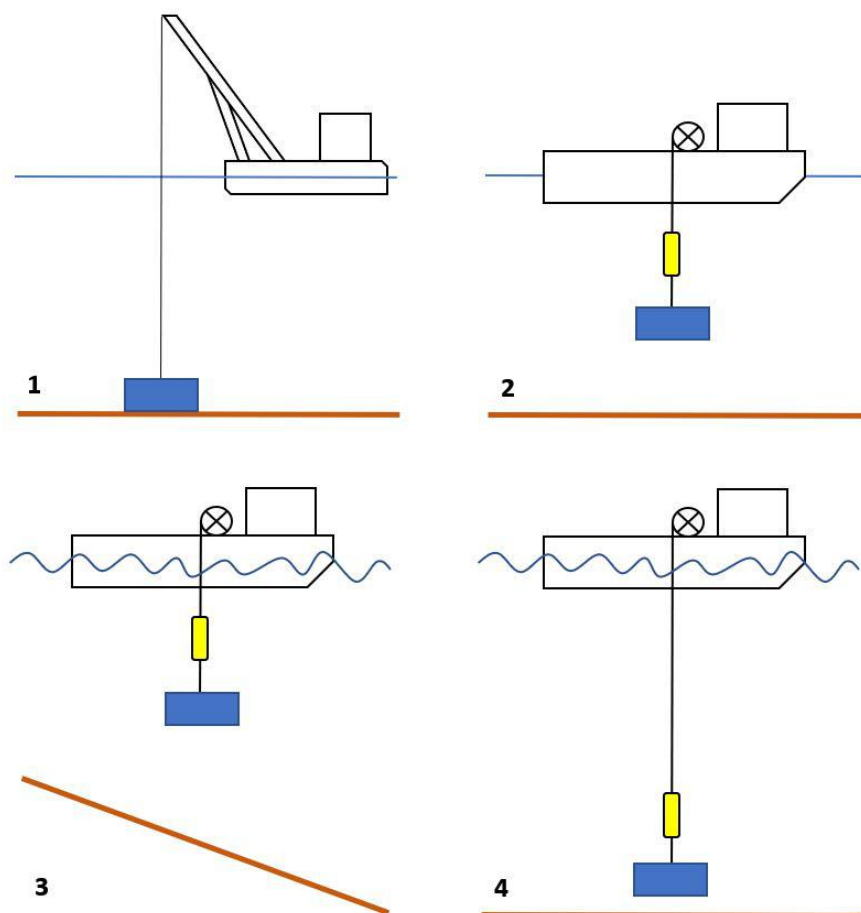


Figura 2.12: Ilustração do método de instalação por reboque submarino.

A grande vantagem deste método é a redução dos custos operacionais devido ao fato de que não é necessário uma embarcação de instalação equipada com um



guindaste de grande capacidade para realizar a operação *offshore*. Isto só é possível porque a fase mais crítica da operação, a passagem pela zona de ondas, ocorre em águas rasas e abrigadas e pode ser realizada por um guindaste de menor capacidade.

## 2.3 Método de Instalação Pendular

O método de instalação pendular consiste em liberar o equipamento a ser instalado de uma determinada profundidade, próximo a superfície livre, e deixar que o mesmo pendule até próximo ao leito marinho. Neste procedimento, uma embarcação transporta o equipamento até o local de instalação e realiza o içamento do equipamento através da zona de ondas. A lingada de içamento do equipamento é então transferida do guindaste para um ponto no costado da embarcação e depois é conectada ao cabo de instalação que é suportado por uma segunda embarcação. A partir deste ponto a lingada de içamento é desconectada da primeira embarcação e fica livre para pendular suportada pela segunda embarcação. O pêndulo é projetado para ter comprimento ligeiramente inferior que a profundidade de instalação, sendo que a última fase da operação, o pouso no leito marinho, é feita pelo guincho da segunda embarcação.

A embarcação que transporta o equipamento deve estar equipada com um guindaste com capacidade suficiente para içar o equipamento de seu convés e realizar a passagem pela zona de ondas. A embarcação também deve ser equipada com um ponto forte no seu costado, capaz de suportar o peso do equipamento e o carregamento hidrodinâmico devido ao movimento do navio. A embarcação que finaliza a instalação do equipamento deve estar equipada com um guincho capaz de suportar o peso do equipamento, o carregamento hidrodinâmico devido ao seu movimento e o peso do cabo de instalação, sendo que este cabo é geralmente fabricado com material sintético, como por exemplo o poliéster.

Uma vez que o equipamento se encontra suspenso pelo costado da primeira embarcação e conectado ao cabo de instalação, um mecanismo desprende o equipamento e este descreve uma trajetória pendular suave, graças ao efeito do arrasto hidrodinâmico atuante no equipamento e ao longo do cabo de instalação. Após a finalização da trajetória pendular, o equipamento estará próximo ao leito marinho e seu pouso é realizado desenrolando-se um pequeno comprimento de cabo do guincho instalado na segunda embarcação. A Figura 2.13 ilustra o método de instalação pendular conforme descrito por CERQUEIRA *et al.* [1].

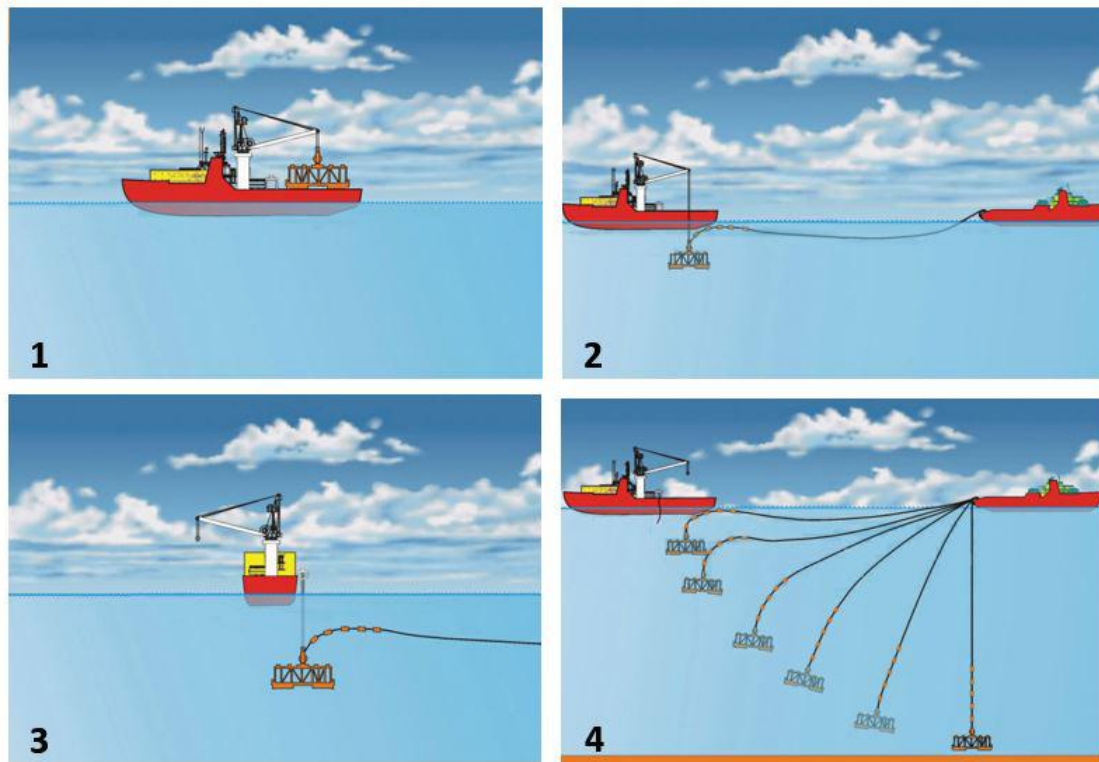


Figura 2.13: Ilustração do método de instalação pendular (extraído de CERQUEIRA *et al.* [1]).

No método pendular, a trajetória do equipamento e do cabo de instalação é efetuada com todo o comprimento do cabo já desenrolado. Dessa forma, ao definir o comprimento do cabo, é possível evitar que o período natural do sistema coincida com o período das ondas incidentes mais comuns, reduzindo ou mesmo eliminando a possibilidade de ocorrência de ressonância axial.

Conforme exposto em [1], as principais vantagens na utilização do método pendular são a redução da probabilidade de ocorrência de ressonância axial e a redução do custo da operação em até 50% quando comparado com o método de instalação tradicional.

Uma variação do método pendular para instalação de equipamentos é o lançamento da estrutura a partir de uma rampa instalada na embarcação de transporte. Esta variação do método requer apenas duas embarcações de pequeno porte, reduzindo o custo total da instalação, além de viabilizar a instalação de estruturas de grande porte em águas profundas visto que a passagem pela zona de ondas não precisa ser feita por um guindaste de grande capacidade, geralmente instalados em embarcações especiais.

# Capítulo 3

## Revisão Bibliográfica

### 3.1 Métodos de Instalação de Equipamentos Submarinos

A instalação de equipamentos e estruturas submarinas não constitui, em si, uma disciplina da engenharia *offshore* e inovações nesta área são geralmente tratadas de forma sigilosa, com o objetivo de manter possíveis vantagens competitivas. Talvez por esses motivos a disponibilidade de material específico relacionado a métodos de instalação e metodologias de análise seja escasso, ao contrário de outras áreas da engenharia *offshore* como o projeto de risers ou de equipamentos, cujos temas são tratados em inúmeras obras bibliográficas. Os poucos trabalhos na área de instalação de equipamentos submarinos, no entanto, são em sua maioria relevantes e formam a base de conhecimento sobre a qual a indústria *offshore* desenvolveu recomendações práticas para este tipo de operação *offshore*.

O trabalho desenvolvido por ROVERI, OLIVEIRA e MORETTI [4], descreve o projeto e execução da operação de instalação de um *manifold* de 420 toneladas em uma lâmina d'água de 620 metros pelo método tradicional. No artigo os autores descrevem as análises numéricas e ensaios realizados para avaliar e validar a operação, assim como as dificuldades operacionais encontradas. Um dos principais pontos deste trabalho é a comparação dos dados obtidos em campo com os resultados das simulações numéricas realizadas na fase de projeto. Os autores pontuam o trabalho apontando as dificuldades de se obter a massa adicional do equipamento com base nos dados medidos em campo.

CERQUEIRA *et al.* [1] descrevem o desenvolvimento do método de instalação pendular de equipamentos submarinos desde sua concepção, passando por análises, testes com modelos em escala reduzida até testes com modelos reais. LIMA [5],

apresenta a instalação de um *manifold* pelo método pendular na Baía de Santos. Pelo fato de ser uma operação pioneira o projeto contou com diversos recursos, como ensaios com modelos em escala, para determinar coeficientes hidrodinâmicos e avaliar o método de instalação, além de um teste com um modelo real, que juntos serviram para qualificar o método de instalação.

O método de instalação pendular também foi abordado por WANG e ZHU [6]. Neste artigo os autores descrevem como o método de instalação pendular foi utilizado para instalar um *manifold* de 195 toneladas em uma lâmina d'água de 1500 metros. Ponto importante deste trabalho foi a utilização de CFD para determinação dos coeficientes hidrodinâmicos e pacotes computacionais de análise dinâmica não linear para análise dos esforços nos cabos de içamento. Os autores também apontam os problemas de estabilidade do equipamento durante o movimento pendular e o alto custo benefício do método quando comparado ao método tradicional.

Um trabalho que aborda o método de instalação por reboque submarino é apresentado por AARSET, SARKAR E KARUNAKARAN [3]. Neste artigo, são apresentadas as lições aprendidas a partir das operações de içamento e reboque submarino de estruturas de grande porte. O trabalho aborda os principais pontos da instalação de equipamentos submarinos além de apontar os principais desafios encontrados e soluções adotadas para viabilizar o reboque submerso de um *template* submarino com 183 toneladas de massa.

WANG [7] apresenta uma visão geral do atual estado da arte dos métodos de instalação de equipamentos em águas profundas. Diferentes métodos e tecnologias são descritos de forma a apontar os principais aspectos das operações de instalação, incluindo os diferentes tipos de embarcações utilizadas, dispositivos de içamento, cabos de aço e de material sintético, sistemas anti-rotação, sistemas de compensação de movimento vertical, entre outros.

Outros trabalhos relevantes relacionados aos métodos de instalação de equipamentos e estruturas submarinas são apresentados por FRAZER, PERINET e VENNEMANN [8] e MCPHERSON [9].

## 3.2 Metodologia de Análise de Instalação de Equipamentos Submarinos

LITTLE [10] apresentou em um relatório técnico para a marinha americana os fundamentos para a análise de instalação de estrutura submarinas. O trabalho apresenta um modelo simplificado para análise dinâmica do sistema içado que permite avaliar as cargas atuando no dispositivo de içamento. Este trabalho foi expandido por HOLMES [11], onde é apresentada uma metodologia de análise que permite determinar os esforços no cabo de içamento em função da dinâmica da embarcação instaladora.

A análise dos esforços atuando em um cabo de içamento em função das propriedades da estrutura içada e da dinâmica da embarcação foi abordada por IWAN [12]. Este trabalho descreve um modelo discretizado de um sistema de içamento de um hidrofone, com somente um grau de liberdade, que pode ser utilizado para obter o movimento da carga em função de ondas regulares ou irregulares.

Um dos trabalhos mais relevantes da área, elaborado por KOPSOV e SANDVIK [13], define e aponta as principais fases da instalação de equipamentos assim como as principais dificuldades encontradas em cada fase.

CERQUEIRA [14] apresenta uma extensa dissertação sobre a instalação de equipamento submarinos, na qual aborda parte dos principais aspectos de metodologia e análise. O autor descreve um modelo para análise de instalação de estruturas com apenas um grau de liberdade e, a partir do mesmo, avalia a influência de fatores como massa adicional, amortecimento e rigidez do cabo de içamento.

BØE e NESTEGÅRD [15] apresentam um modelo analítico para o cálculo da força atuando em um corpo suspenso por um cabo elástico durante a fase de descida pela lâmina d'água. O modelo permite determinar as forças verticais atuando no extremidade do cabo de içamento conectada ao dispositivo de içamento e também as forças atuando na estrutura suspensa. Um estudo de caso é apresentado e os resultados são comparados contra simulações numéricas.

Por fim, uma das principais referências nesta área foi emitida como um conjunto de recomendações práticas elaborado pela Sociedade Classificadora Det Norske Veritas, Rules for Planning and Execution of Marine Operations [2]. A versão mais recente do documento serve como um guia para modelar e analisar operações de instalação *offshore*, mais especificamente, operações de içamento através da zona de

ondas, descida pela coluna d'água e pouso no leito marinho. O trabalho descreve diversos aspectos da análise de instalação de equipamentos e oferece formulações simplificadas para estabelecer cargas de projeto a serem consideradas no planejamento e na execução de operações de instalação. O documento também aborda temas como determinação de coeficientes hidrodinâmicos, ocorrência de ressonância axial no cabo de içamento, utilização de compensadores de movimento vertical, operações de reboque e determinação de estados de mar limite.

### **3.3 Determinação de Coeficientes Hidrodinâmicos**

Na análise de instalação de equipamentos, a prática mais comum para determinar a massa adicional e o amortecimento atuando no corpo é através de semelhança geométrica. Ou seja, dado um equipamento submarino, composto por diferentes partes, tenta-se aproximar cada parte do equipamento por geometrias simples para as quais existam dados experimentais, como descrito por SARKAR e GUDMESTAD [16], e somar a massa adicional de cada componente para chegar a um valor final.

Este procedimento, no entanto, não leva em consideração o escoamento interno entre partes do equipamento, tratando cada parte da estrutura como um corpo independente e isolado. SARPKAYA [17] apresenta razões pelas quais esse tipo de abordagem é falha. Dentre as principais está o fato de que a maioria dos valores de referência de massa adicional e amortecimento para corpos simples não leva em consideração escoamentos oscilatórios, como é o caso da instalação de equipamentos submarinos.

Esta combinação de geometrias, além de ignorar o efeito do escoamento interno e desprezar a natureza oscilatória do problema, resulta geralmente em valores superestimados para as cargas hidrodinâmicas atuando no corpo, visto que a maioria dos valores idealizados de massa adicional representa um limite superior para esta propriedade hidrodinâmica, como apontado em SARPKAYA [17].

BUNNIK e BUCHNER [18] demonstram como a interação de diferentes partes de uma estrutura podem afetar a massa adicional e o amortecimento atuando em um equipamento submarino. A partir de uma série de ensaios com modelos reduzidos de estruturas submarinas, é possível verificar uma variação significativa das forças hidrodinâmicas durante as diferentes fases de instalação apresentadas

anteriormente. Os resultados obtidos neste trabalho são um grande indicativo de que não se pode ignorar a interação entre diferentes partes da estrutura e da própria estrutura com a superfície livre e o fundo.

Objetivando resultados mais realistas, algumas tentativas de simular a variação da massa adicional e amortecimento durante algumas fases da instalação tem sido adotadas com algum nível de sucesso. Sendo a passagem pela superfície livre geralmente a fase mais crítica da operação, existem tentativas de simular a variação da massa adicional do equipamento em função da sua submergência, ou seja, da sua distância em relação a superfície livre média. SØFTELAND [3] apresenta comparações entre resultados obtidos para a análise de estruturas treliçadas compostas por membros cilíndricos e dados medidos durante a instalação. As simulações numéricas foram realizadas considerando a variação da massa adicional dos elementos cilíndricos em função da submergência, como mostrado por GREENHOW e AHN [19], gerando resultados condizentes com dados medidos em campo.

Embora produza resultados mais realistas, este procedimento ainda se baseia em valores constantes de massa adicional e amortecimento em função da submergência do corpo, sem levar em consideração o movimento oscilatório. BUCHNER, BUNNIK e HONIG [20] apresentam um método numérico para determinação das cargas hidrodinâmicas atuando em uma estrutura durante sua passagem pela splash zone e descida pela coluna d'água levando em consideração o escoamento oscilatório em torno do corpo. No entanto, a complexidade do método não permite que o mesmo seja aplicado diretamente em simulações numéricas baseadas na equação de Morison para o cálculo das forças hidrodinâmicas.

Outro recurso utilizado para reduzir o conservadorismo na determinação dos coeficientes hidrodinâmicos é levar em consideração o grau de perfuração e permeabilidade presente nas estruturas. Trabalhos neste sentido foram apresentados por SANDVIK, SOLAAS e NIELSEN [21], AN e FALTINSEN [22] e FERNANDES e MINEIRO [23]. A adoção deste recurso, embora reduza o conservadorismo da prática comum, ainda falha em representar a maneira como as diferentes partes do corpo afetam o escoamento interno e em torno do equipamento.

### **3.4 Software de Análise**

Embora existam metodologias simplificadas que permitem determinar as cargas atuando em um sistema içado durante uma operação de instalação de equipamentos, existem pacotes computacionais que permitem a realização deste tipo de análise

com facilidades para modelagem do sistema e das condições ambientais.

Um destes pacotes de análise é o *software* SIMO (Marintek SINTEF), utilizado em [16]. O SIMO é um *software* de simulação no domínio do tempo para estudo de movimento de embarcações e forças de conexão que pode ser utilizado para analisar todas as fases da instalação de equipamentos submarinos.

Outro *software* comumente empregado na análise de instalação de equipamentos submarinos é o Orcaflex (Orcina), embora sua principal aplicação seja a análise de *risers*. Trabalhos comparando os resultados obtidos através do *software* contra as metodologias simplificadas de análise foram publicados por KIMIAEI, JING e YU [24] e por SUN *et al.* [25].



## Capítulo 4

# Hidrodinâmica Aplicada a Instalação de Equipamentos Submarinos

### 4.1 Dinâmica de um Corpo Içado Através da Lâmina d'Água Suspenso por um Cabo Elástico

A metodologia apresentada neste trabalho para determinação da massa adicional de equipamentos submarinos é focada na fase de descida da estrutura através da lâmina d'água. Com o objetivo de avaliar as cargas dinâmicas atuando na estrutura durante esta fase, consideramos que a mesma está suspensa por um cabo elástico conectado a um dispositivo de içamento instalado a bordo de uma embarcação. A embarcação por sua vez está exposta a ação de ondas, o que resulta em uma oscilação forçada na extremidade superior do cabo. A Figura 4.1 apresenta a configuração do sistema de içamento.

No modelo considerado, o eixo  $Z$  está alinhado com o cabo de içamento e é positivo para cima. A extremidade superior do cabo está posicionada em  $z = 0$  e representa o ponto de içamento solidário a embarcação. O comprimento do cabo de içamento é dado por  $L$  e sua extremidade inferior está conectada ao corpo em  $z = -L$ .

O cabo de içamento pode ser considerado como uma barra uniforme com peso linear dado por  $m$  e rigidez axial constante representada por  $\varepsilon = EA$ , onde  $E$  é o módulo de elasticidade do cabo e  $A$  é a área de sua seção transversal. O peso do

corpo içado é representado por  $M$  e a massa adicional vertical do corpo por  $A_z$ .

Amortecimento viscoso quadrático é aplicado ao cabo, em função de um coeficiente de fricção tangencial  $C_{Df}$ , e ao corpo, em função de um coeficiente de arrasto vertical  $C_{Dz}$ . No entanto, assume-se que um modelo linearizado é representativo do amortecimento.

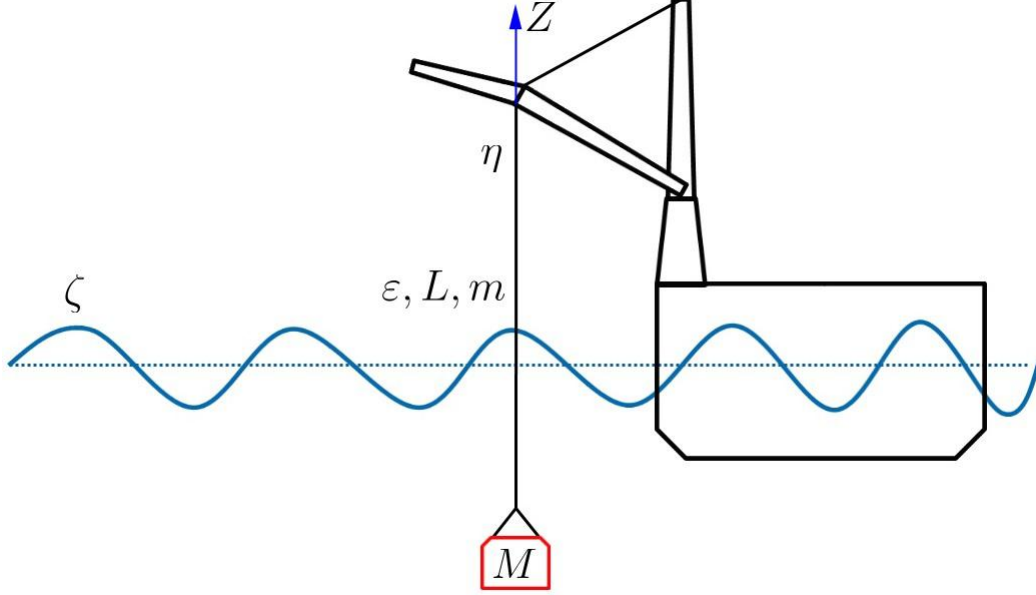


Figura 4.1: Configuração do sistema de içamento em águas profundas.

#### 4.1.1 Equação do Movimento

Assumindo que apenas o movimento vertical é relevante para a avaliação das cargas dinâmicas, é possível escrever a equação do movimento do cabo em relação a uma função deslocamento axial  $V(z, t)$ , dada por

$$V(z, t) = \eta(z)e^{i\omega t} \quad (4.1)$$

A equação do movimento do cabo pode então ser escrita da seguinte forma

$$m \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + \frac{1}{2} \rho C_{Df} \pi D \frac{\partial V}{\partial t} \left| \frac{\partial V}{\partial t} \right| - \varepsilon \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (4.2)$$

com as seguintes condições de contorno:

- em  $z = 0$ :

$$V = \eta_0 e^{i\omega t} \quad (4.3)$$

- em  $z = -L$ :

$$(M + A_z) \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + \frac{1}{2} \rho C_{Dz} A_p \frac{\partial V}{\partial t} \left| \frac{\partial V}{\partial t} \right| - \varepsilon \frac{\partial V}{\partial z} = 0 \quad (4.4)$$

A linearização da equação do movimento apresentada em (4.2) leva a

$$m \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + \beta \frac{\partial V}{\partial t} - \varepsilon \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (4.5)$$

onde o amortecimento linear equivalente atuando no cabo é dado por:

$$\beta = \frac{4}{3} \rho C_{D_f} D \omega \eta_0 \quad (4.6)$$

Este termo de amortecimento depende da amplitude do deslocamento axial  $V$  ao longo do cabo. Neste estudo, no entanto, assume-se que a amplitude do deslocamento axial em  $z = 0$  pode ser aplicada ao longo do cabo.

A forma linearizada da condição de contorno em  $z = -L$ , apresentada em (4.4), é dada por

$$(M + A_z) \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + B_z \frac{\partial V}{\partial t} - \varepsilon \frac{\partial V}{\partial z} = 0 \quad (4.7)$$

onde o amortecimento linear equivalente atuando no corpo pode ser escrito como

$$B_z = \frac{4}{3\pi} \rho C_{D_z} A_p \omega \eta_L \quad (4.8)$$

## 4.1.2 Solução

Considerando que o movimento atuando na extremidade superior do cabo é harmônico, é possível assumir que a resposta do cabo e do corpo suspenso também será harmônica, visto que a equação do movimento apresentada em (4.5) é linear.

Como foi visto anteriormente,  $V$  é função de  $z$  e  $t$ , o que torna possível encontrar uma solução através de separação de variáveis [15]. O movimento vertical em um determinado ponto ao longo do cabo de içamento em função da frequência  $\omega$  e da amplitude  $\eta_0$  do movimento na extremidade superior do cabo é dado por:

$$\eta(z) = \frac{(k\varepsilon) \cos(k(z+L)) + h \sin(k(z+L))}{(k\varepsilon) \cos(kL) + h \sin(kL)} \eta_0 \quad (4.9)$$

A amplitude complexa do movimento do corpo içado pode ser obtida fazendo  $z = -L$  na equação acima

$$\eta(-L) = \frac{k\varepsilon}{(k\varepsilon) \cos(kL) + h \sin(kL)} \eta_0 \quad (4.10)$$

que pode ser escrita em termos do seu módulo

$$\eta_L = \left| \frac{k\varepsilon}{(k\varepsilon) \cos(kL) + h \sin(kL)} \right| \eta_0 \quad (4.11)$$

A função de transferência do movimento vertical do corpo içado é dada pela razão entre o movimento vertical do corpo e o movimento vertical na extremidade superior do cabo.

$$H_L(\omega) = \left| \frac{\eta_L(\omega)}{\eta_0(\omega)} \right| \quad (4.12)$$

### 4.1.3 Força Dinâmica

A força dinâmica atuando ao longo do cabo é dada pela variação da força de restauração, que é função da deformação do cabo no sentido vertical.

$$F_d(z) = \varepsilon \dot{\eta}(z) \quad (4.13)$$

Derivando (4.9), é possível obter a amplitude da força dinâmica atuando no cabo.

$$|F_d(z)| = \left| \frac{-(k\varepsilon)^2 \sin(k(z+L)) + (k\varepsilon)h \cos(k(z+L))}{(k\varepsilon) \cos(kL) + h \sin(kL)} \right| \eta_0 \quad (4.14)$$

A força dinâmica atuando nas extremidades superior ( $z = 0$ ) e inferior ( $z = -L$ ) do cabo é dada por:

$$|F_d(0)| = \left| \frac{-(k\varepsilon)^2 \sin(kL) + (k\varepsilon)h \cos(kL)}{(k\varepsilon) \cos(kL) + h \sin(kL)} \right| \eta_0 \quad (4.15)$$

$$|F_d(-L)| = \left| \frac{(k\varepsilon)h}{(k\varepsilon) \cos(kL) + h \sin(kL)} \right| \eta_0 \quad (4.16)$$

A função de transferência da força dinâmica é dada pela razão entre a força de restauração vertical em um determinado ponto do cabo e a amplitude do movimento na extremidade superior do cabo.

$$H_{F_d}(\omega, z) = \left| \frac{F_d(z)}{\eta_0(\omega)} \right| \quad (4.17)$$

### 4.1.4 Espectro de Resposta

A função de transferência do movimento vertical na ponta da lança do guindaste apresentado na Figura 4.1 é definida pela razão entre o movimento vertical na extremidade do cabo e a amplitude da onda incidente.

$$H_{\eta_0}(\omega) = \left| \frac{\eta_0(\omega)}{\zeta(\omega)} \right| \quad (4.18)$$

Considerando que a função de transferência da força dinâmica atuando no cabo é dada por (4.17) e que a função de transferência do movimento vertical na ponta

da lança do guindaste é dada por (4.18), é possível obter o espectro de resposta da força dinâmica em função do espectro de onda incidente  $S(\omega)$ .

$$S_F(\omega, z) = (H_{F_d}(\omega, z)H_{\eta_0}(\omega))^2 S(\omega) \quad (4.19)$$

Já o espectro de resposta do movimento do corpo içado pode ser escrito como

$$S_L(\omega) = (H_L(\omega)H_{\eta_0}(\omega))^2 S(\omega) \quad (4.20)$$

onde  $H_L(\omega)$  é definido em (4.12).

#### 4.1.5 Discussão

As equações apresentadas nesta seção podem ser utilizadas para determinar cargas dinâmicas atuando na ponta da lança do guindaste e no corpo suspenso durante a descida pela lâmina d'água. Para definir a solução destas equações é necessário aplicar um processo iterativo, uma vez que a linearização do amortecimento viscoso  $B_z$  atuando no corpo depende da amplitude de seu movimento  $\eta_L$ .

Deve-se notar, no entanto, que o amortecimento viscoso  $\beta$  atuando no cabo foi linearizado em função da amplitude de movimento na extremidade superior do cabo  $\eta_0$ . Neste estudo, assume-se que os erros gerados por essa simplificação não são significativos.

## 4.2 Determinação da Massa Adicional e do Amortecimento

De forma geral, coeficientes hidrodinâmicos de um corpo em escoamento oscilatório, como coeficiente de massa adicional, arrasto, amortecimento e *slamming*, dependem da geometria do corpo, do número de Reynolds e do número de Keulegan-Carpenter. Além disso, outros parâmetros como razão de aspecto, ângulo de ataque em relação ao escoamento, rugosidade da superfície, perfuração, frequência de oscilação e proximidade com a superfície livre, fundo ou outros corpos, podem ter influência na determinação das propriedades hidrodinâmicas. Esta seção descreve os principais métodos para determinação dos coeficientes de massa adicional e amortecimento de estrutura submarinas praticados pela indústria.

#### 4.2.1 Determinação da Massa Adicional e do Amortecimento Através de Semelhança Geométrica

A primeira aproximação para determinação dos coeficientes hidrodinâmicos de uma estrutura submarina é através de semelhança geométrica. Este método consiste em aproximar a complexa geometria dos equipamentos submarinos por geometrias simples, para as quais existem resultados experimentais.

Por exemplo, para equipamentos submarinos como *manifolds*, PLETs ou PLEMs, que apresentam *mudmats* de grandes proporções, é comum assumir que suas propriedades hidrodinâmicas na orientação vertical são semelhantes as de uma placa plana, visto que o *mudmat* do equipamento é a parte que causa maior distúrbio no escoamento. A Figura 4.2 ilustra essa aproximação geométrica.

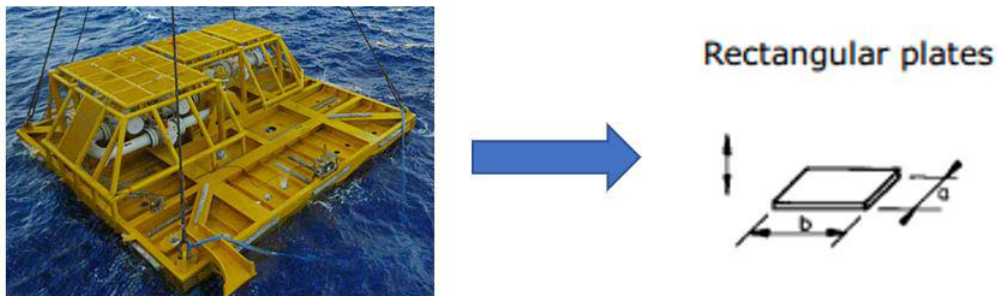


Figura 4.2: Aproximação da geometria de um PLEM por uma placa plana (fontes: sal-heavylift.com e [2]).

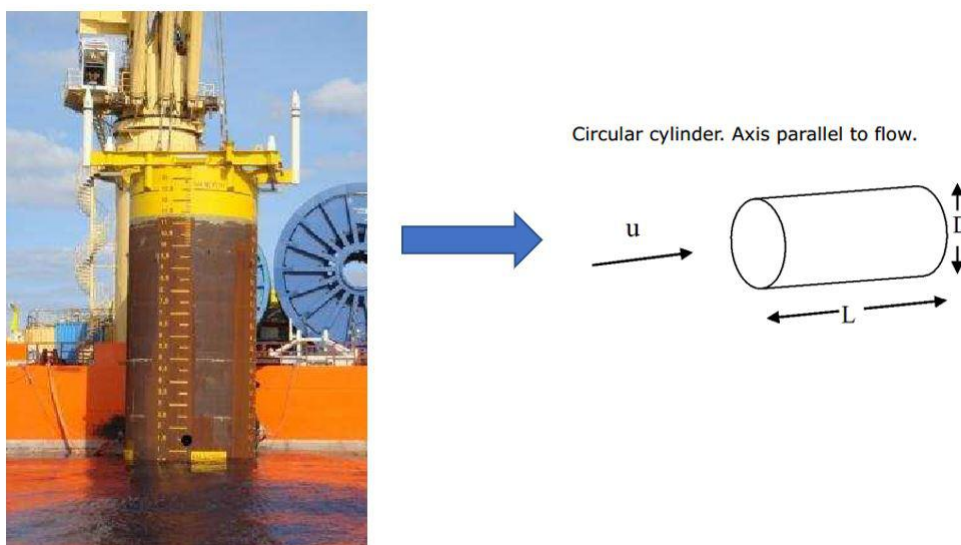


Figura 4.3: Aproximação da geometria de uma estaca de sucção por um cilindro (fontes: www.offshore-technology.com e [2]).

Para outras estruturas como estacas de sucção, é comum assumir que as propriedades hidrodinâmicas do equipamento se aproximam as de um cilindro. Dependendo da orientação da estaca de sucção durante a instalação, devem ser considerados coeficientes para um cilindro exposto a escoamento axial ou transversal. A Figura 4.3 ilustra essa aproximação geométrica.

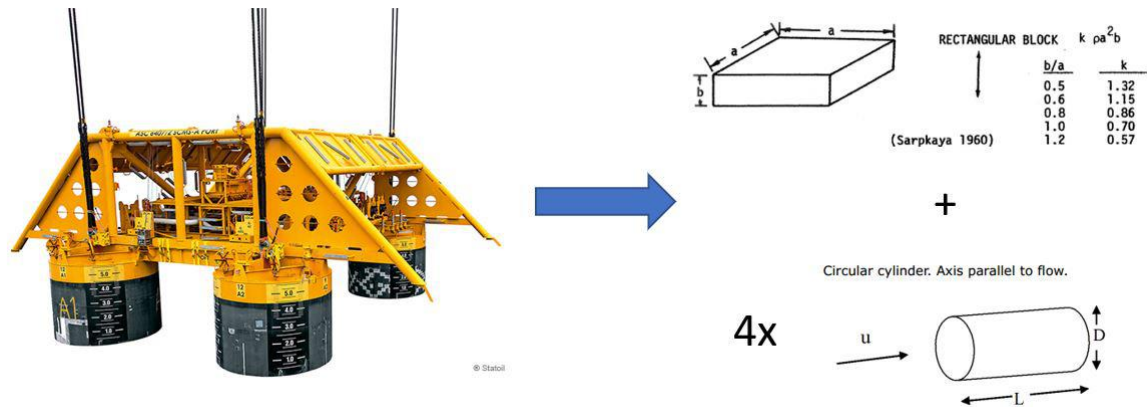


Figura 4.4: Aproximação da geometria de um *template* submarino por elementos individuais (fontes: [www.offshore-technology.com](http://www.offshore-technology.com) e [2]).

Para o caso de estruturas mais complexas, é comum que propriedades como massa adicional e amortecimento sejam estimadas como a soma das contribuições de seus membros estruturais. É importante notar, no entanto, que iterações entre os diferentes elementos estruturais são desprezadas nessa metodologia, o que pode resultar em uma estimativa incorreta dos coeficientes hidrodinâmicos. A Figura 4.4 ilustra o método utilizado para composição da massa adicional de uma estrutura submarina com geometria complexa. As fundações do equipamento são aproximadas por cilindros enquanto que a parte superior da estrutura é aproximada por um bloco. A massa adicional é então composta pela soma da massa adicional do bloco equivalente e pela massa adicional dos 4 cilindros representando as fundações do equipamento.

#### 4.2.2 Determinação da Massa Adicional e do Amortecimento Através de Ensaio

A massa adicional e amortecimento associados a um corpo submerso oscilando verticalmente podem ser estimados através de ensaios com modelos reduzidos. Este tipo de ensaio pode ser realizado para um corpo com geometria complexa, como por exemplo um manifold, ou para corpos com geometrias simples como placas

planas, cilindros, estruturas treliçadas ou combinações dessas geometrias.

Quando realizados de forma sistemática, estes ensaios permitem mapear os coeficientes de massa adicional e amortecimento de um corpo em função da amplitude e do período de oscilação.

A Figura 4.5 apresenta a configuração padrão de um teste de oscilação forçada com modelos em escala reduzida. Neste tipo de teste o modelo é montado solidário a um oscilador vertical cuja amplitude e frequência do movimento são conhecidos. Desta forma, movimentos verticais harmônicos podem ser aplicados ao corpo enquanto as forças dinâmicas atuando no mesmo são medidas por uma célula de carga.

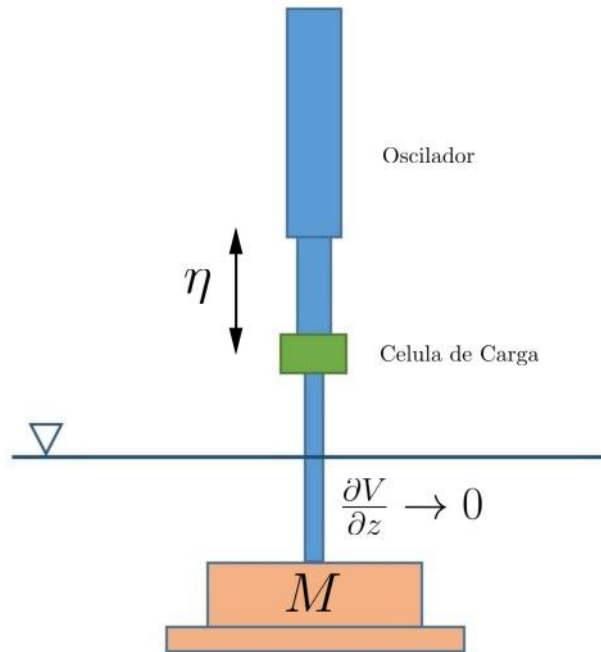


Figura 4.5: Configuração padrão de teste com modelo em escala reduzida.

Assumindo que nesta configuração de teste a deformação no elemento que conecta o modelo ao oscilador é desprezível, ou seja, não existe defasagem entre o movimento do oscilador e o movimento do corpo, é possível reescrever  $V$  apenas como função de  $t$ .

$$V(t) = \eta_0 e^{i\omega t} \quad (4.21)$$

Uma vez que  $\partial V/\partial z = 0$ , a equação (4.4) pode ser reescrita da seguinte forma

$$(M + A_z) \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + B_z \frac{\partial V}{\partial t} = F_{osc}(t) \quad (4.22)$$



onde  $F_{osc}$  é a força medida na célula de carga devido a oscilação do corpo.

Se uma oscilação harmônica  $V(t)$  for imposta ao modelo, é possível assumir que a força dinâmica atuando no modelo também será harmônica, porém com uma defasagem  $\delta$  em relação a frequência de oscilação.

$$F_{osc}(t) = F_0 e^{i\omega t + \delta} \quad (4.23)$$

Substituindo  $V(t)$  e  $F_{osc}(t)$  em (4.22), obtem-se.

$$-(M + A_z)\omega^2\eta_0 e^{i\omega t} + iB_z\omega\eta_0 e^{i\omega t} = F_0 e^{i\omega t + \delta} \quad (4.24)$$

usando as relações

$$e^{i\omega t} = \cos(\omega t) + i \sin(\omega t) \quad (4.25)$$

$$\cos(i\omega t + \delta) = \cos(i\omega t) \cos(\delta) - \sin(i\omega t) \sin(\delta) \quad (4.26)$$

$$\sin(i\omega t + \delta) = \sin(i\omega t) \cos(\delta) + \cos(i\omega t) \sin(\delta) \quad (4.27)$$

e considerando apenas a parte real, chega-se a

$$-(M + A_z)\omega^2\eta_0 \cos(\omega t) - B_z\omega\eta_0 \sin(\omega t) = F_0 \cos(\delta) \cos(\omega t) - F_0 \sin(\delta) \sin(\omega t) \quad (4.28)$$

Combinando os termos em fase,  $\cos(\omega t)$ , e os termos fora de fase,  $\sin(\omega t)$ , existentes nos dois lados da equação acima, é possível eliminar  $t$  e dividir a equação do movimento nas seguintes equações

$$-(M + A_z)\omega^2\eta_0 = F_0 \cos(\delta) \quad (4.29)$$

$$B_z\omega\eta_0 = F_0 \sin(\delta) \quad (4.30)$$

que podem ser reescritas para fornecer a massa adicional e o amortecimento vertical.

$$A_z = -\frac{F_0 \cos(\delta)}{\omega^2\eta_0} - M \quad (4.31)$$

$$B_z = \frac{F_0 \sin(\delta)}{\omega\eta_0} \quad (4.32)$$

Uma vez que a amplitude e a frequência do movimento vertical são conhecidas, é possível determinar a massa adicional e o amortecimento vertical em função do número de Keulegan–Carpenter,  $KC$ , definido como:

$$KC = \frac{\dot{z}_{max}T}{L} \quad (4.33)$$

onde:  $\dot{z}_{max}$  é a velocidade máxima do corpo, ou do escoamento em torno do corpo;  $T$  é o período do movimento vertical e  $L$  é um comprimento característico do corpo. No caso do teste descrito acima,  $KC$  pode ser escrito como:

$$KC = \frac{2\pi\eta_0}{L} \quad (4.34)$$

# Capítulo 5

## Metodologia de Análise

Este capítulo apresenta as duas metodologias de análise aplicadas neste trabalho para determinação da massa adicional de uma estrutura submarina a partir de dados observados em campo. A primeira metodologia se baseia no uso de capacidade computacional para cobrir diversas combinações dos parâmetros envolvidos na determinação da força atuando no sistema içado e a segunda consiste em reproduzir os dados obtidos em campo a partir de um modelo numérico simplificado, similar ao modelo considerado em testes em escala reduzida.

A primeira metodologia abordada pode ser definida como uma busca exaustiva que consiste em rodar diversas simulações numéricas combinando diferentes parâmetros de massa adicional, amortecimento e rigidez do cabo de içamento e comparar parâmetros estatísticos e espectrais das séries temporais de força e movimento medidos em campo contra séries temporais geradas nessas simulações numéricas. Este procedimento permite estimar valores constantes para os coeficientes de massa adicional e amortecimento que sejam representativos das forças medidas em campo.

A segunda metodologia, por sua vez, consiste em reproduzir as séries temporais de força e movimento observadas em campo através da integração numérica da equação do movimento do corpo içado. Este procedimento permite estimar a força hidrodinâmica atuando no corpo em função do seu movimento e, a partir de uma análise de Fourier, definir os coeficientes de massa adicional e amortecimento como funções do número de Keulegan–Carpenter, definido na Equação 4.33.

As duas metodologias se aplicam a fase de descida do equipamento pela coluna d'água e consideram as seguintes premissas:

- A geometria e o sistema de referência de movimento da embarcação instaladora

são conhecidos, assim como as curvas de capacidade e possíveis configurações dos guindastes e guinchos;

- O movimento vertical do ponto de içamento e da estrutura é a única fonte de excitação relevante para determinação das cargas atuando no corpo e no cabo de içamento;
- O cabo de içamento possui rigidez constante e seu comportamento é linear;
- A estrutura se encontra em uma profundidade onde o efeito das ondas é desprezível;
- Forças devido a corrente oceânica não tem efeito sobre as forças verticais atuando no sistema içado.

A aplicação das metodologias descritas acima segue o fluxo de análise apresentado na Figura 5.1 e discutido nas próximas seções.

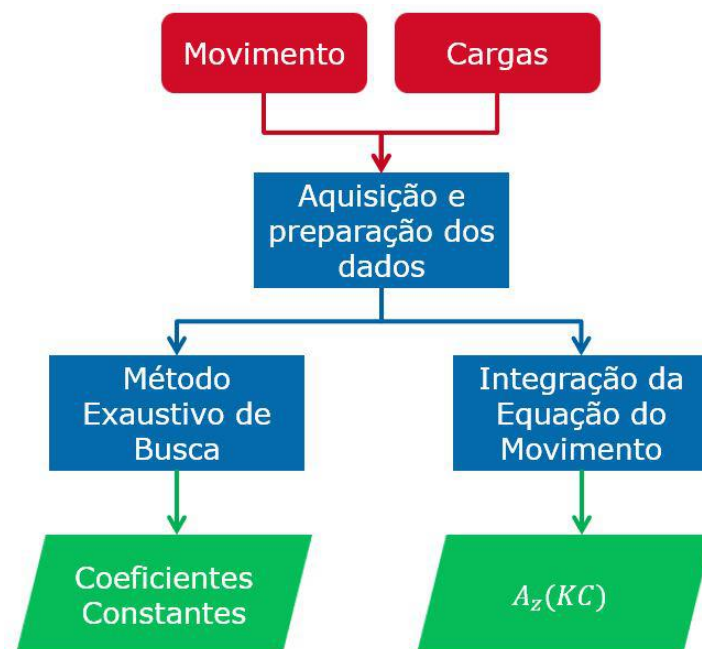


Figura 5.1: Fluxo da metodologia de análise.

## 5.1 Aquisição e Preparação de Dados

O primeiro passo do processo proposto é a aquisição e preparação dos dados de entrada, enumerados abaixo:

- Registro do movimento da embarcação durante a operação;
- Registro das cargas atuando nos dispositivos de içamento durante a operação.

O registro de movimento da embarcação é o primeiro item a ser coletado para aplicação da metodologia proposta. Seguindo as premissas definidas anteriormente, os movimentos no plano horizontal da embarcação, *surge*, *sway* e *yaw*, são descartados e apenas os movimentos no plano vertical são considerados. Desta forma, o registro do movimento da embarcação consiste somente nas séries temporais de *heave*, *roll* e *pitch*.

Usando o princípio da superposição de movimentos, conforme descrito em [26], e conhecendo a geometria da embarcação, é possível construir o registro de movimento vertical no ponto de içamento, ou seja, é possível representar em uma série temporal o movimento vertical da ponta da lança do guindaste ou da polia do guincho utilizado na instalação. Esta série temporal será dado de entrada para as simulações numéricas necessárias na aplicação das duas metodologias.

Os registros de movimento da embarcação são geralmente medidos por um sistema de medição inercial com sensores de movimento de múltiplos eixos. A bordo de embarcações, são geralmente utilizadas MRUs equipadas com acelerômetros e giroscópios conectados a sistemas que são capazes de inferir os movimentos de *heave*, *roll* e *pitch*.

Para que sejam utilizados na determinação de coeficientes hidrodinâmicos, é importante que a frequência de aquisição dos sistemas de medição de movimento seja suficientemente alta quando comparada com as frequências de ondas e, por sua vez, as frequências de oscilação vertical da embarcação.

O segundo item da lista acima se refere ao registro de carga do dispositivo de içamento utilizado na operação, ou seja, do registro de carga do guindaste ou guincho utilizado para içar o equipamento em questão. Os dados de carga consistem na série temporal da força atuando no dispositivo de içamento. Esta força é, geralmente, medida na última polia do sistema de içamento, seja um guindaste ou guincho, através de um dispositivo chamado pino de carga. Um pino de carga é um tipo de célula de carga que funciona ao detectar a força cisalhante que lhe é aplicada via um *strain gage*, geralmente instalado no centro do pino.

As cargas medidas por um pino de carga instalado em um guindaste, por exemplo, apresentam a carga estática do sistema somado da variação dinâmica, ou seja, a média da série temporal de carga é igual a soma do peso submerso do equipamento sendo instalado e do peso do cabo de içamento lançado. Ao subtrair a série temporal de carga do seu valor médio, obtém-se a carga dinâmica atuando

no dispositivo de içamento. Esta última série temporal será dado de entrada para as simulações numéricas necessárias para aplicação da metodologia de análise por força externa.

Uma vez levantadas as séries temporais de movimento e carga, o passo seguinte é sincronizar e, se necessário, realizar uma re-amostragem das séries temporais de forma que ambas possuam o mesmo número de amostras por intervalo de tempo. Na maioria das vezes, no entanto, esses passos não se fazem necessários, visto que boa parte dos sistemas de aquisição de dados disponíveis a bordo de embarcações instaladoras são capazes de gravar dados sincronizados e em altas frequências de aquisição, quando comparadas com as frequências das ondas incidentes.

A Figura 5.2 apresenta um exemplo de séries temporais de carga e movimento medidos durante uma operação de instalação de equipamento submarino. O gráfico superior mostra a carga medida na ponta da lança do guindaste da embarcação, ou seja, no pino de carga, enquanto o gráfico inferior apresenta os movimentos de heave, roll e pitch medidos pela MRU da embarcação e transpostos para o mesmo ponto.

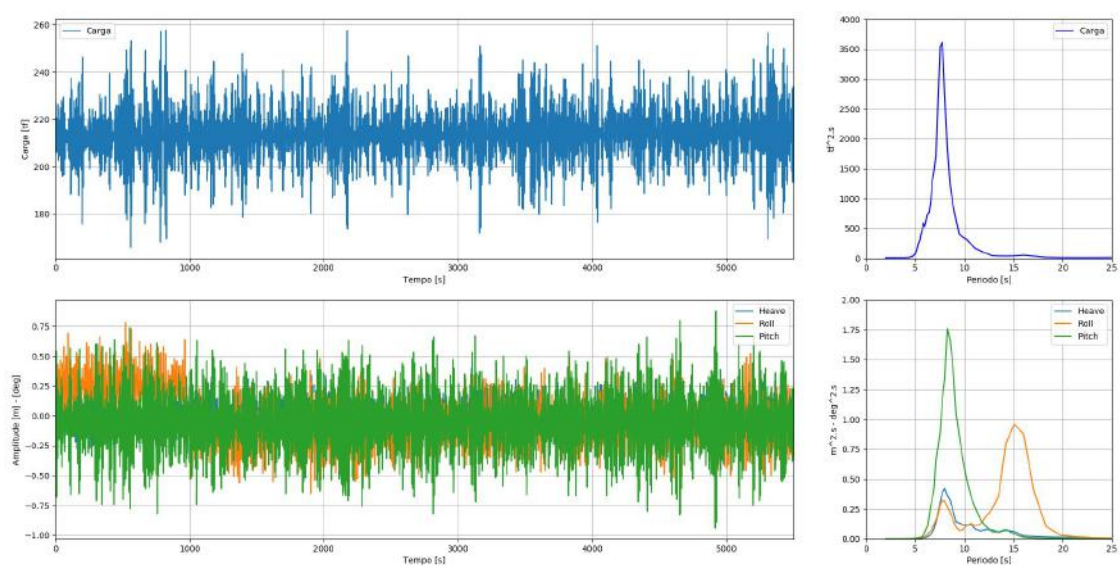


Figura 5.2: Exemplo de séries temporais de carga atuando no guindaste e movimento da embarcação.

## 5.2 Método Exaustivo de Busca

Como foi dito anteriormente, este método consiste em realizar diversas simulações numéricas combinando diferentes parâmetros da instalação com o objetivo de

mapear a influência de cada um nas cargas atuando na estrutura sendo instalada e nos dispositivos de içamento. A Figura 5.3 ilustra o fluxo de análise.

Uma vez preparados os dados de entrada, o passo seguinte deste método é realizar uma análise estatística e espectral dos dados de cargas medidos em campo. Nesta análise serão levantadas propriedades como média, máximos e mínimos, desvio padrão, o espectro de energia do carregamento e seu período de pico. Estes dados serão posteriormente utilizados para avaliar os resultados obtidos a partir das simulações numéricas.

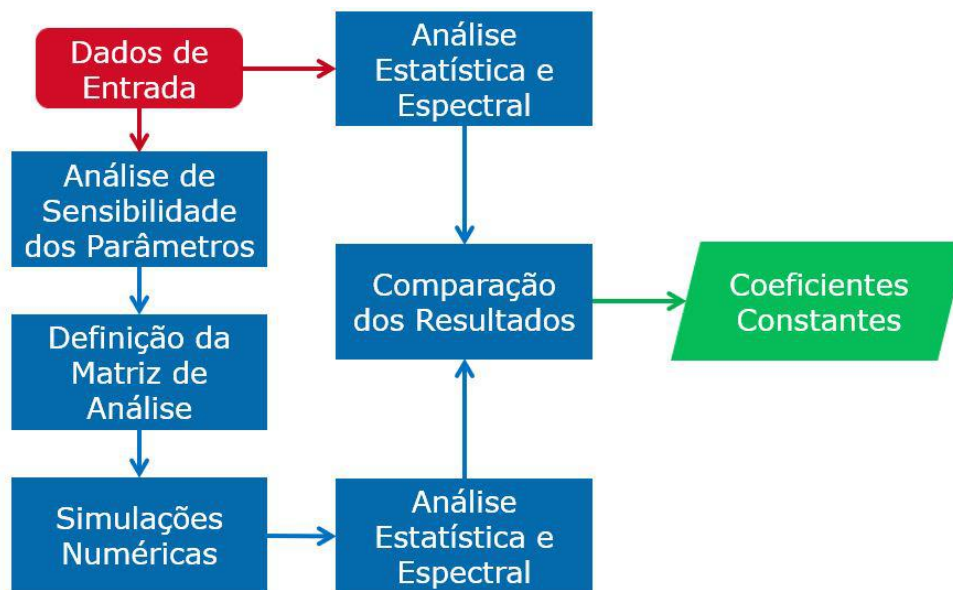


Figura 5.3: Fluxo de análise por força bruta.

Com o objetivo de reduzir o número de simulações numéricas, uma análise de sensibilidade variando os parâmetros considerados relevantes para o problema é realizada. Esta análise preliminar tem como objetivo definir os intervalos de variação dos parâmetros a serem considerados na análise principal. Este processo faz a partir da realização de algumas simulações e comparação estatística dos resultados para a carga com os dados medidos em campo. Neste passo as combinações de parâmetros que resultam em grandes desvios dos resultados obtidos em campo são descartadas e os limites para definição da matriz de análise são refinados. Neste passo alguns parâmetros também podem ser identificados como irrelevantes e são eliminados das análises seguintes.

Refinados os limites inferiores e superiores para o intervalo de variação dos parâmetros da análise, monta-se uma matriz de casos cruzando os parâmetros de forma a gerar todas as combinações possíveis. Esta combinação geralmente resulta

em um número considerável de casos, que é função do número de parâmetros iniciais e da precisão com a qual os mesmos são definidos. É comum que esta matriz compreenda centenas de casos a serem simulados.

Ao fim de cada simulação numérica, uma análise estatística e espectral do sinal de carga é realizada e seus resultados são comparados contra os resultados obtidos para os dados obtidos em campo. As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 ilustram a comparação entre as séries temporais e os espectros da carga no guindaste medidos em campo (em azul) e obtidos através de simulação (em vermelho).

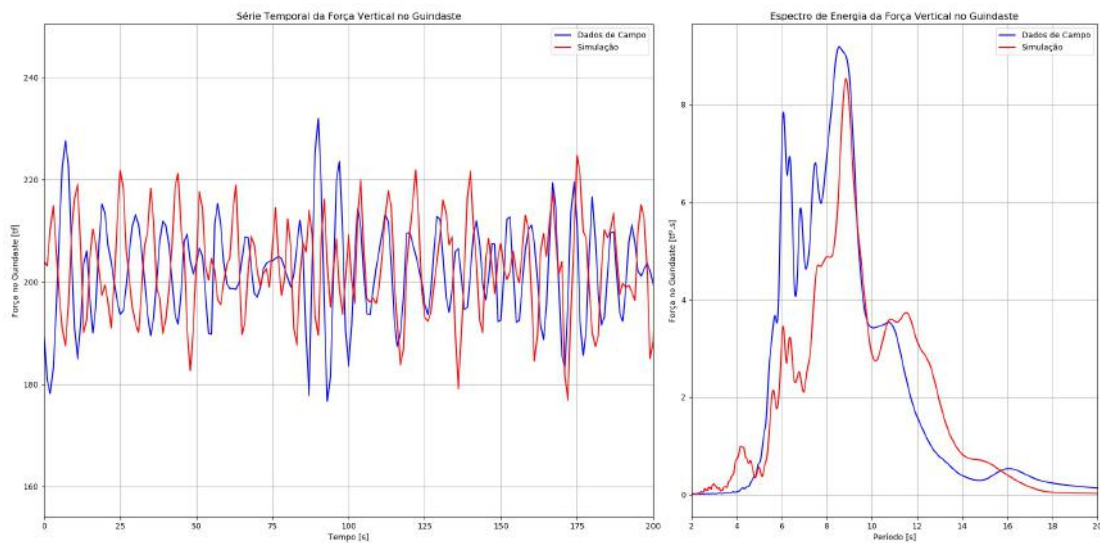


Figura 5.4: Comparação entre resultados das simulações numéricas vs. dados obtidos em campo.

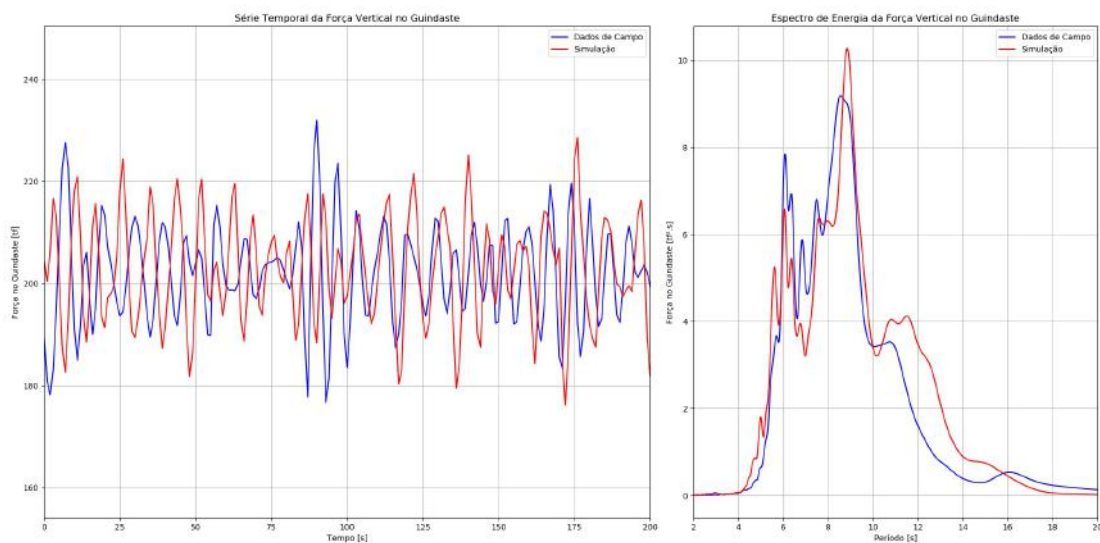


Figura 5.5: Comparação entre resultados das simulações numéricas vs. dados obtidos em campo.



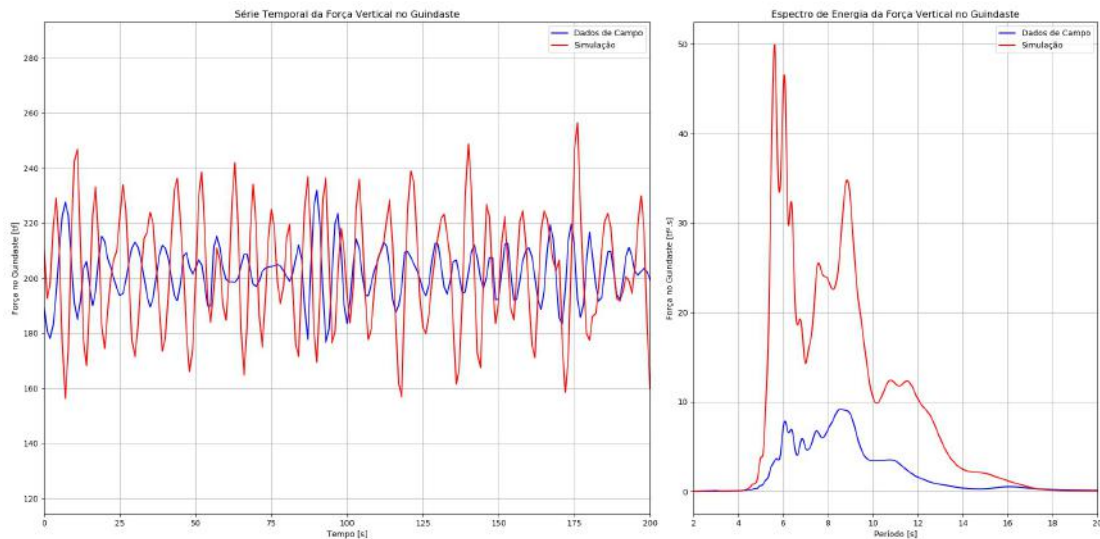


Figura 5.6: Comparação entre resultados das simulações numéricas vs. dados obtidos em campo.

Os gráficos acima representam simulações realizadas considerando o movimento vertical observado em campo para a extremidade do cabo de içamento, porém para diferentes valores de massa adicional vertical da estrutura sendo içada. A Figura 5.4 apresenta os resultados de uma simulação onde os valores máximos e mínimos simulados ficaram abaixo dos valores observados em campo. Também é possível notar que o espectro de energia da força vertical atuando no cabo de içamento não é equivalente ao espectro da força medida em campo. A Figura 5.6, por sua vez, apresenta resultados de uma simulação onde valores máximos e mínimos da força vertical no cabo de içamento são consideravelmente maiores que os observados em campo. Isso fica claro quando compara-se os espectros de energia da força vertical calculada nesta simulação contra os dados observados em campo.

A Figura 5.5, no entanto, apresenta resultados de uma simulação onde as cargas máximas e mínimas calculadas se encontram na mesma ordem de grandeza das cargas observadas em campo. Isto é um indicativo de que o valor de massa adicional vertical considerado nesta simulação, combinado com os outros parâmetros da simulação, é representativo dos dados medidos em campo. A análise dos espectros de energia da força vertical mostra que existe uma boa aproximação entre resultados simulados e medidos em campo.

O resultado final deste processo de análise é definir um conjunto de parâmetros de análise, sendo o principal deles a massa adicional vertical, que reproduzam com o menor erro possível os resultados medidos em campo. A Figura 5.7 ilustra o resultado deste processo obtido para o mesmo equipamento sendo instalado em

diferentes condições de mar.

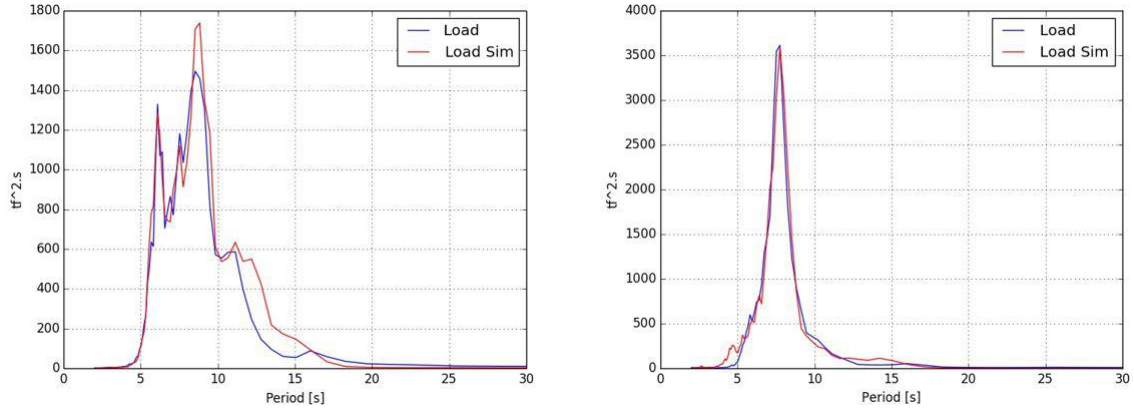


Figura 5.7: Comparação entre resultados das simulações numéricas vs. dados obtidos em campo.

O próximo passo deste método é calcular o erro absoluto entre os resultados obtidos nas simulações e os dados medidos em campo. O resultado deste procedimento pode ser apresentado na forma de mapas, onde os resultados de cada simulação realizada são cruzados para determinar o valor de um parâmetro específico em função de outro, como por exemplo a massa adicional em função da carga no guindaste. O erro absoluto é dado pela diferença entre a força calculada em uma simulação e o valor real observado em campo, ou seja:

$$\Delta x = x_0 - x \quad (5.1)$$

onde:  $\Delta x$  é o erro absoluto;  $x_0$  é o valor calculado na simulação e  $x$  o valor observado em campo. A Figura 5.8 ilustra os resultados deste procedimento.

Os gráficos da Figura 5.8 apresentam o erro absoluto entre a carga determinada por simulação e a carga medida em campo em função da massa adicional e de três outros parâmetros: coeficiente de arrasto no corpo, rigidez axial e amortecimento estrutural do cabo de içamento. A primeira linha de gráficos apresenta o erro entre a carga máxima gerada nas simulações e a carga máxima medida em campo. A segunda linha apresenta o erro para a carga mínima enquanto a terceira apresenta o erro para o desvio padrão da série temporal de carga. As linhas de contorno de cada gráfico representam uma faixa de erro no valor da carga para cada combinação dos parâmetros avaliados.

Por exemplo, o primeiro gráfico da primeira linha apresenta o erro calculado para a carga máxima atuando no guindaste em função da massa adicional e

do coeficiente de arrasto. A faixa branca no gráfico indica que os erros para a carga máxima calculados nas simulações, realizadas com as combinações de massa adicional e coeficiente de arrasto dentro desta faixa, variam entre -5 e 5 tf em relação aos dados medidos em campo.

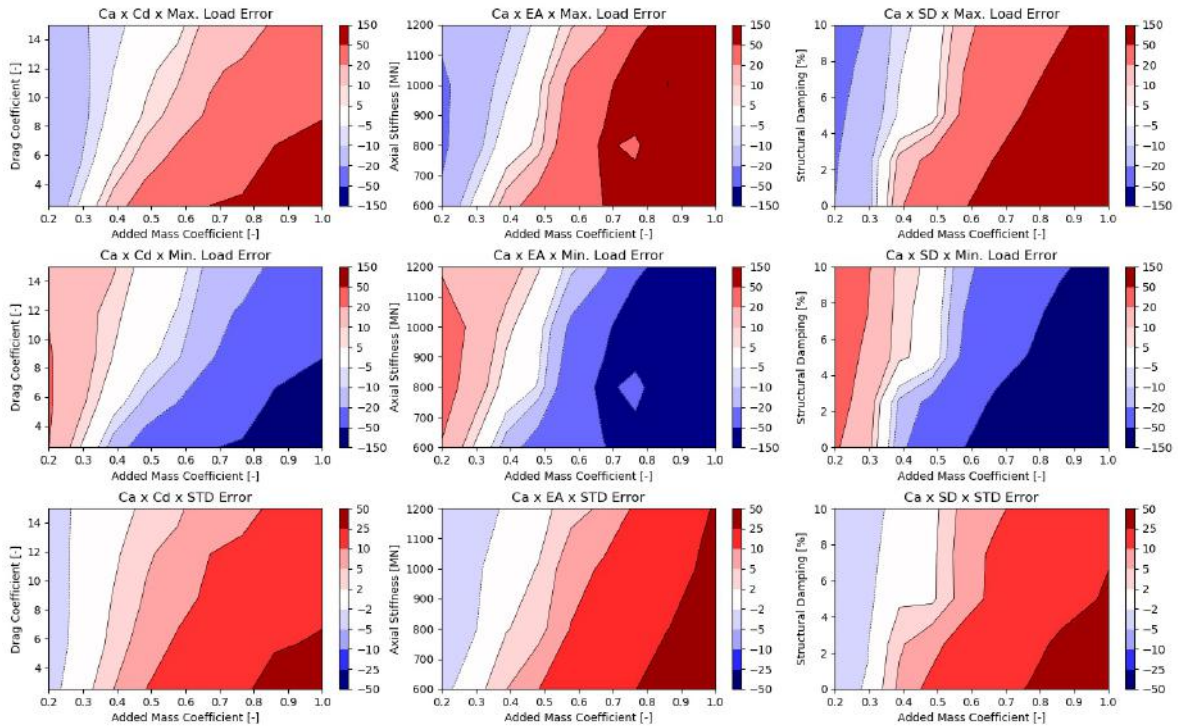


Figura 5.8: Exemplo de resultado da análise por força bruta.

Já o segundo gráfico da primeira linha apresenta o erro para a carga máxima em função da massa adicional e da rigidez axial do cabo de içamento. A faixa branca indica que simulações realizadas com valores de massa adicional e rigidez axial dentro desta faixa também geram erros entre -5 e 5 tf em relação aos dados medidos em campo.

Somando os erros relativos entre os diferente parâmetros descritos acima, é possível identificar que somente certas combinações de parâmetros, dentro de um intervalo específico, geram resultados semelhantes aos medidos em campo. Os erros relativos são definidos como:

$$\delta x = \frac{\Delta x}{x} = \frac{x_0 - x}{x} \quad (5.2)$$

A Figura 5.9 apresenta um exemplo da soma dos erros relativos de carga máxima, mínima e desvio padrão da série temporal de carga para todas as combinações entre os parâmetros avaliados em função da massa adicional. As curvas de contorno representam intervalos de erros relativos, sendo que a cor branca

representa os menores erros (0-2.5%).

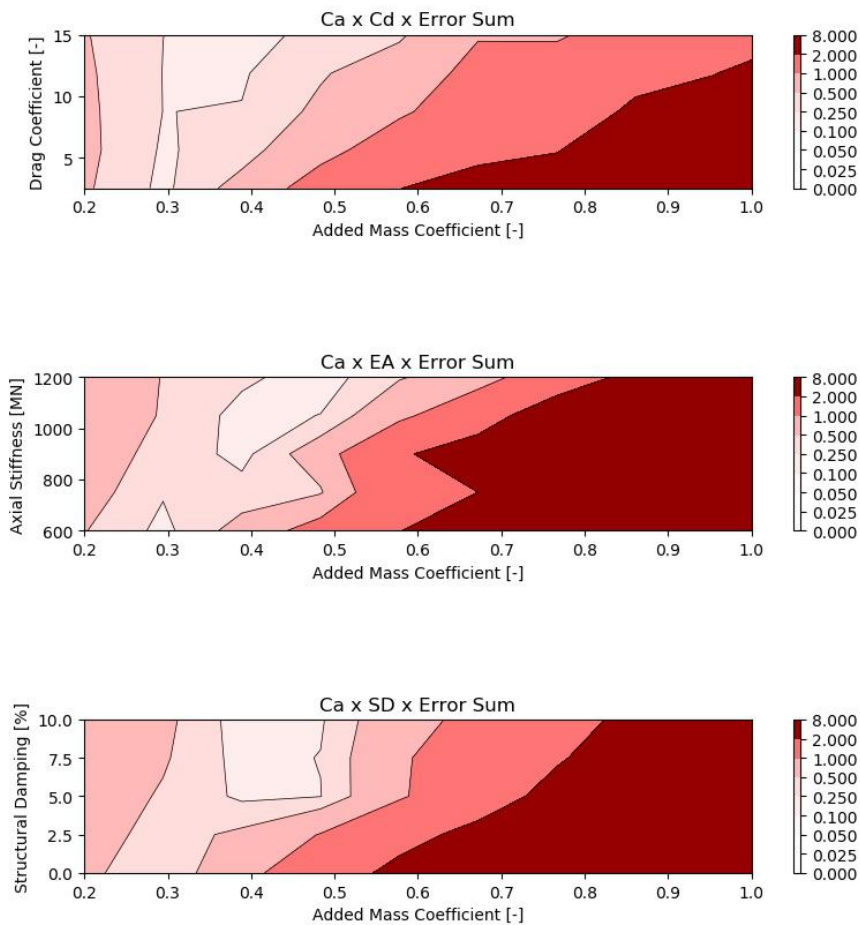


Figura 5.9: Exemplo de determinação da massa adicional.

No gráfico acima é possível observar que o valor para a massa adicional converge para um pequeno intervalo onde qualquer combinação com os outros parâmetros é capaz de reproduzir os resultados medidos em campo dentro de uma pequena margem de erro. Por outro lado, valores de massa adicional fora deste intervalo não são capazes de reproduzir os dados medidos em campo dentro de uma margem de erro aceitável, independente das combinações com os outros parâmetros. Com base nesses resultados é possível chegar a um pequeno intervalo de valores de massa adicional que são representativos do que foi medido durante a operação. O mesmo procedimento pode ser aplicado aos outros parâmetros de forma a isolar um intervalo de valores específico para cada um.

### 5.3 Integração da Equação do Movimento

A segunda metodologia aplicada neste trabalho consiste em reproduzir as séries temporais de força registradas em campo através da integração numérica da equação do movimento vertical do corpo içado. Esse procedimento pode ser entendido como uma análise inversa, que consiste em integrar numericamente a equação do movimento do corpo enquanto a força hidrodinâmica atuando na estrutura é ajustada a cada passo da integração, de forma que a carga total na extremidade superior do cabo de içamento alcance a força observada em campo. As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam o fluxo de análise desta metodologia.

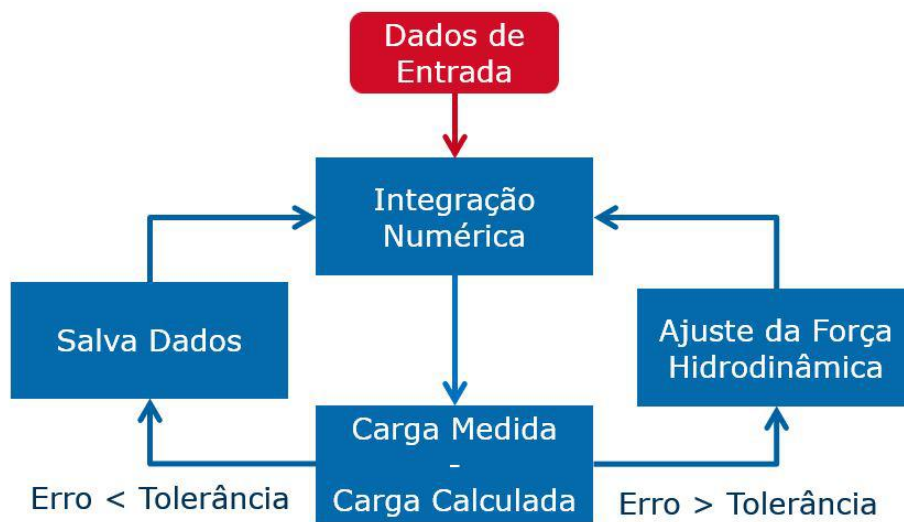


Figura 5.10: Fluxo de análise.

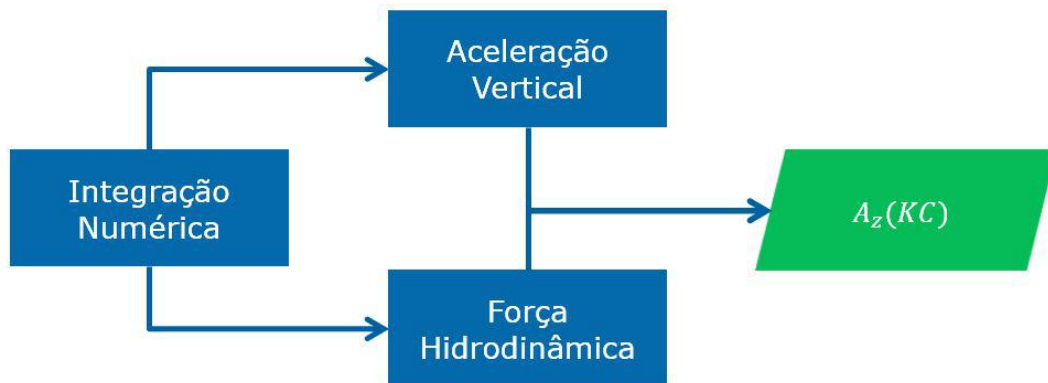


Figura 5.11: Fluxo de análise.

O fluxo de análise ilustra de forma simplificada o processo iterativo aplicado neste método. A cada passo da integração da equação do movimento da estrutura

submarina, a força atuando no dispositivo de içamento é calculada e comparada com a força medida em campo. Caso o erro entre as duas forças seja pequeno, a integração segue e os resultados são armazenados. Caso contrário, um ajuste é feito na força hidrodinâmica aplicada a estrutura de forma que a força resultante no cabo de içamento se aproxime da força medida em campo. Ao final deste processo é possível obter uma série temporal de força que representa a força hidrodinâmica atuando na estrutura submarina.

Reescrevendo a Equação 4.4, é possível isolar a força hidrodinâmica atuando na estrutura em um único termo compreendendo as forças devido à massa adicional e ao arrasto.

$$M \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = \varepsilon \frac{\partial V}{\partial z} - \left( A_z \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + \frac{1}{2} \rho C_{Dz} A_p \frac{\partial V}{\partial t} \left| \frac{\partial V}{\partial t} \right| \right) \quad (5.3)$$

$$M \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = \varepsilon \frac{\partial V}{\partial z} - F_{hidro} \quad (5.4)$$

A força hidrodinâmica  $F_{hidro}$  é definida pela diferença entre a variação da força medida em campo na extremidade do cabo de içamento,  $F_{real}$ , e a força calculada atuando na estrutura a cada passo da iteração,  $F_{corpo}$ , ou seja:

$$F_{hidro} = F_{real} - F_{corpo} \quad (5.5)$$

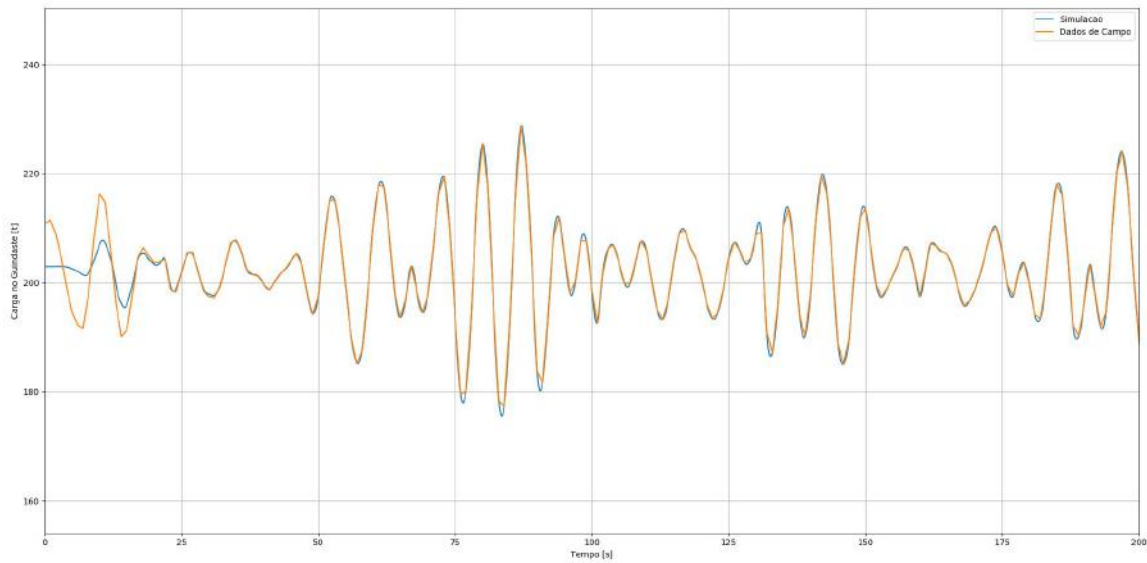


Figura 5.12: Comparação entre força simulada e força medida em campo.

O resultado deste processo é ilustrado na Figura 5.12. No gráfico é possível



observar que, no início da simulação, o erro entre a força medida em campo,  $F_{real}$ , e a calculada na simulação é grande. Porém, a cada passo da integração numérica, a força hidrodinâmica,  $F_{hidro}$ , é ajustada de forma que no passo seguinte a força atuando na extremidade superior ao cabo de içamento se aproxime do valor medido em campo. Após alguns passos da integração numérica, a força calculada passa a ser igual a força medida em campo.

Voltando a premissa de que a estrutura içada se encontra em uma profundidade onde o efeito das ondas é desprezível, é possível assumir que a força hidrodinâmica levantada após a integração numérica é composta por uma parcela em fase com a aceleração vertical do corpo e outra em fase com a velocidade vertical.

De posse desses resultados, a metodologia prossegue com a aplicação de uma análise de Fourier para determinar amplitudes e frequências das componentes das séries temporais de força e aceleração. A massa adicional para cada frequência encontrada na análise é então calculada a partir das amplitudes de força e aceleração.

A Figura 5.13 apresenta as séries temporais, geradas a partir de uma simulação, da força hidrodinâmica vertical atuando em um corpo, da velocidade e da aceleração vertical. Estas séries foram geradas integrando-se a equação do movimento e considerando valores constantes de massa adicional,  $A_z = 500t$ , e coeficiente de arrasto vertical,  $C_{D_z} = 7$ , para o corpo em questão.

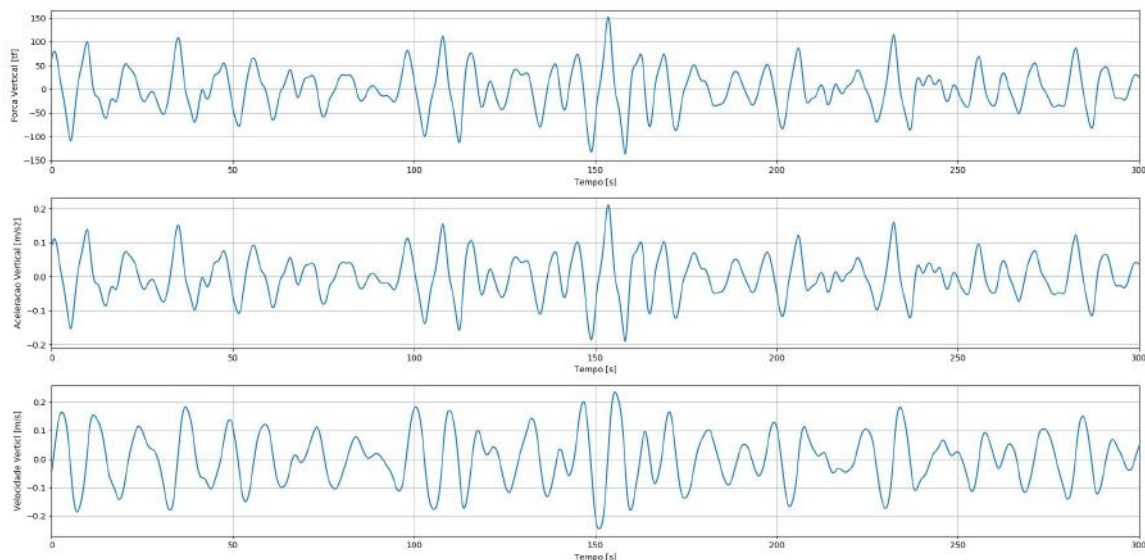


Figura 5.13: Exemplo da aplicação do método.

Para se obter os coeficientes de cada componente de força e aceleração verticais, a transformada discreta de Fourier é aplicada sobre cada série temporal  $f$  com  $N$

amostras medidas a cada  $T$  segundos,

$$F[\omega_n] = \sum_{k=0}^{N-1} f[k]e^{-i\omega_k T} \quad (5.6)$$

onde:  $F[\omega_n]$  é a transformada discreta de Fourier para cada frequência  $\omega_n$  definida por:

$$\omega_n = \frac{2\pi}{NT}n \quad (5.7)$$

com  $n = 0 \dots N - 1$ . A Figura 5.14 apresenta o resultado da aplicação da transformada discreta de Fourier sobre as séries temporais de força e aceleração apresentadas na Figura 5.13.

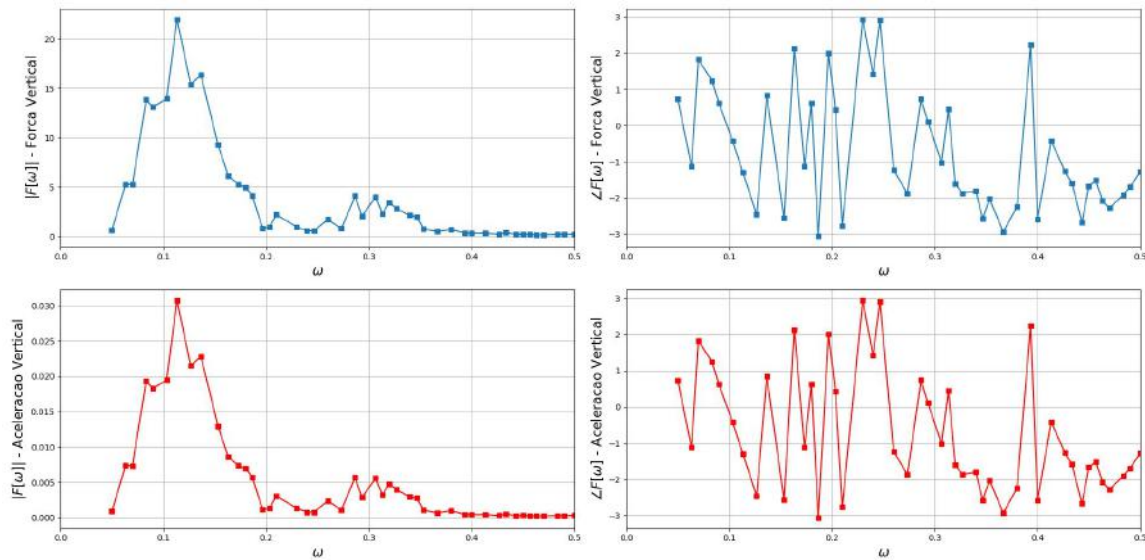


Figura 5.14: Aplicação da transformada discreta de Fourier.

Na Figura 5.14, os gráficos à direita apresentam as amplitudes das componentes de cada sinal,  $|F[\omega_n]|$ , enquanto os gráficos à esquerda apresentam as fases,  $\angle F[\omega_n]$ , definidas como:

$$|F[\omega_n]| = \sqrt{F_{re}^2 + F_{im}^2} \quad (5.8)$$

$$\angle F[\omega_n] = \tan^{-1} \left( \frac{F_{im}}{F_{re}} \right) \quad (5.9)$$

onde os índices  $re$  e  $im$  são relativos ao termo real e ao termo complexo de  $F[\omega_n]$ ,



respectivamente.

Uma vez determinadas as amplitudes e fases de cada componente de força e aceleração, a Equação 4.31 pode ser utilizada para determinar o valor da massa adicional  $A_z$  para cada frequência  $\omega_n$ :

$$A_z[\omega_n] = -\frac{|F[\omega_n]|}{|A[\omega_n]|} \cos(\delta[\omega_n]) - M \quad (5.10)$$

onde  $|F[\omega_n]|$  é a amplitude das componentes de força;  $|A[\omega_n]|$  é a amplitude das componentes de aceleração e  $\delta[\omega_n]$  é a defasagem entre os sinais de força e aceleração para cada frequência calculada através da transformada discreta. O resultado desta análise para a simulação descrita anteriormente é apresentado na Figura 5.15. No gráfico, é possível observar que o valor de  $A_z$  calculado a partir da Equação 5.10 apresenta uma pequena variação em torno de 502 toneladas, um pouco acima do valor constante considerado na análise. Essa diferença ocorre em função do erro numérico inerente ao processo de aplicação da transformada discreta, porém valida o método apresentado, visto que o valor constante de  $A_z$  utilizado na simulação pode ser recuperado e não varia em função de  $KC$ .

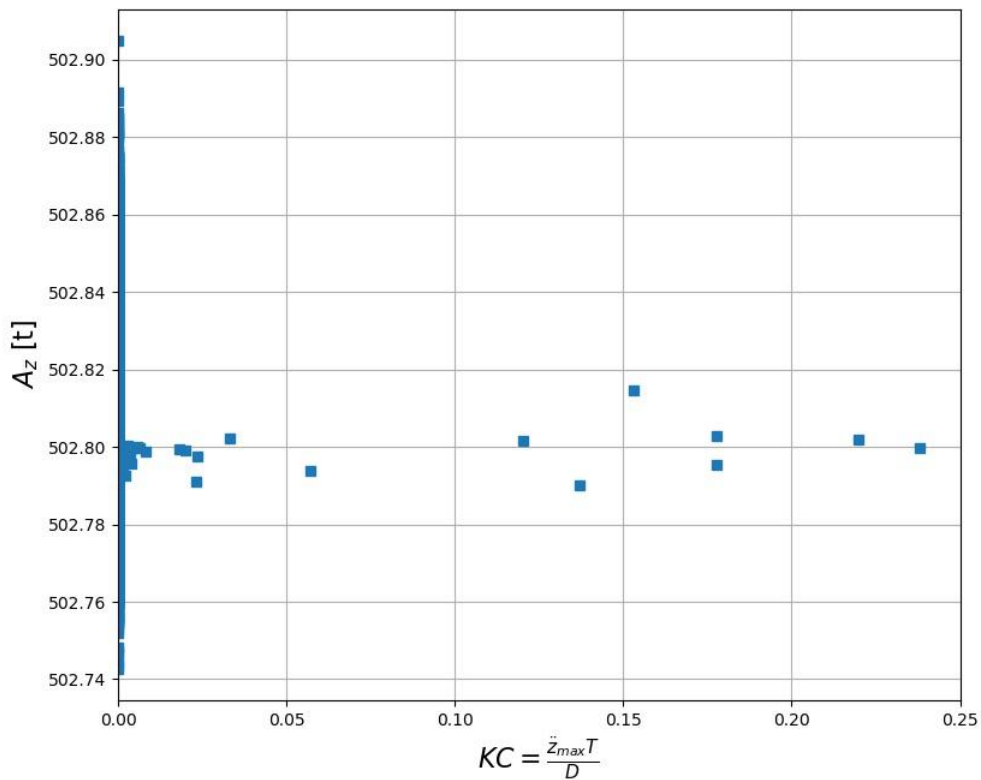


Figura 5.15:  $A_z$  como função de  $KC = \ddot{z}_{max}T/D$ .

Na Figura 5.15 é importante notar que a dispersão encontrada para baixos número de  $KC$ , tendendo a zero, ocorre devido a divisão de pequenas amplitudes de força por pequenas amplitudes de aceleração.

Um exemplo de aplicação deste método para um caso real é apresentado na Figura 5.16. Para efeito de comparação, três séries temporais foram plotadas nos gráficos: VLS, que corresponde a carga real medida em campo; Ofx, que corresponde a simulação numérica realizada no software Orcaflex; ODE, que corresponde a simulação numérica realizada em um código desenvolvido para este trabalho. O gráfico inferior apresenta uma ampliação do trecho marcado em vermelho.

Analisando o gráfico é possível concluir que os resultados das simulações batem com os dados medidos em campo. Assumindo que outros parâmetros considerados na análise estão corretos, como por exemplo a rigidez axial do cabo, pode-se concluir que o movimento do corpo calculado na simulação corresponde ao movimento real do equipamento instalado. A Figura 5.17 apresenta o resultado da aplicação do método descrito anteriormente. No gráfico, o coeficiente de massa adicional vertical  $C_{Az}$  é plotado em função do número de  $KC$ .

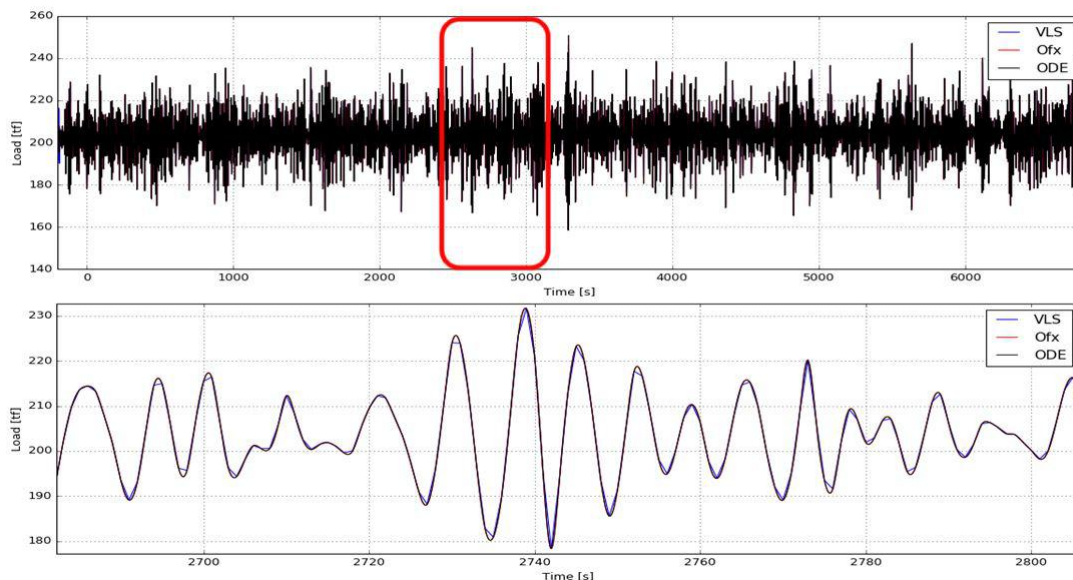


Figura 5.16: Exemplo de simulação com ajuste da força externa.

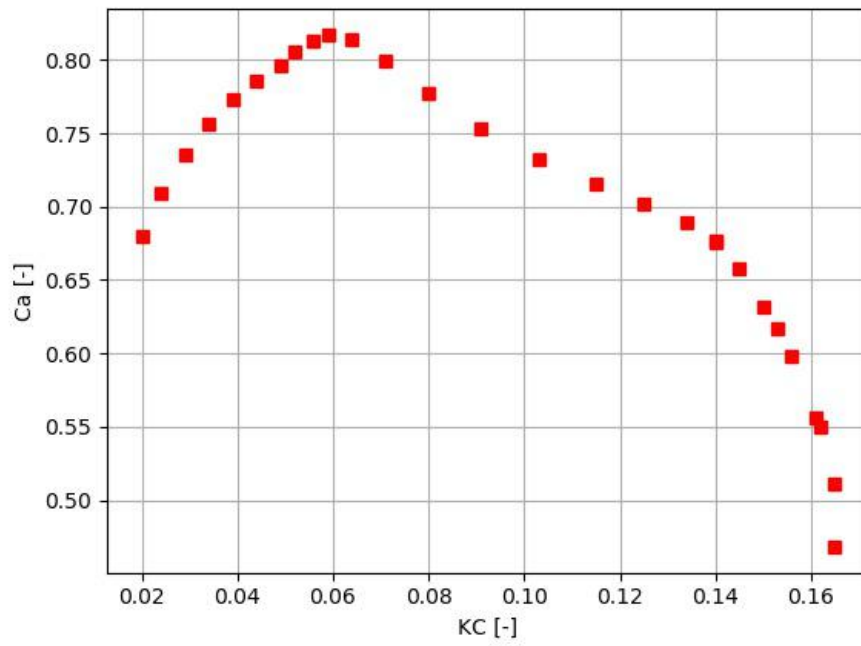


Figura 5.17: Exemplo de  $C_{A_z}$  como função de  $KC$ .

# Capítulo 6

## Estudo de Caso

Este capítulo apresenta o estudo de um caso de instalação de equipamento submarino utilizando a metodologia descrita no Capítulo 5 e os resultados obtidos.

### 6.1 Dados do Equipamento

O caso analisado se refere a instalação de um *manifold* de produção submarino com as propriedades apresentadas na Tabela 6.1. As propriedades do cabo de içamento são apresentadas na Tabela 6.2.

Tabela 6.1: Propriedades do equipamento.

Propriedades	Valor	Unidade
Peso no ar	190	tf
Peso na água	165	tf
Volume Submerso	24.5	m <sup>3</sup>
Comprimento	16.0	m
Largura	10.0	m
Altura	6.5	m
Área Vertical Projetada	160.0	m <sup>2</sup>

Tabela 6.2: Propriedades do cabo de içamento.

Propriedades	Valor	Unidade
Peso linear do cabo no ar	90.0	kgf/m
Rigidez axial (nominal)	1300	MPa
Comprimento	500	m

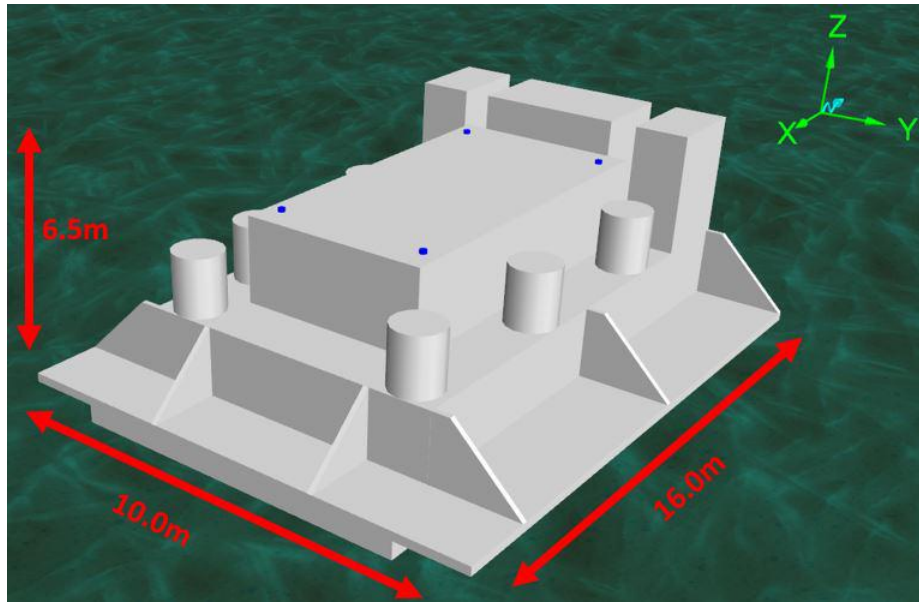


Figura 6.1: Modelo ilustrando as dimensões do equipamento considerado no estudo.

## 6.2 Cálculo dos Coeficientes Hidrodinâmicos

O método usualmente adotado pela indústria consiste em determinar os coeficientes de massa adicional, arrasto e slamming a partir da semelhança geométrica do equipamento apresentado acima com corpos de geometria simples para os quais existem dados hidrodinâmicos disponíveis. A seguir são apresentadas três aproximações geralmente adotadas pela indústria para o cálculo da massa adicional do equipamento.

### 6.2.1 Aproximação por Placa Plana

A geometria do equipamento apresentado na Figura 6.1 indica que, no sentido vertical, o mudmat do equipamento talvez seja a parte da estrutura que mais cause distúrbio no escoamento. Dessa forma, uma aproximação comum para o cálculo da massa adicional é assumir que a estrutura é equivalente a uma placa plana.

Na literatura encontram-se dados experimentais de massa adicional para placas planas em escoamentos permanentes e oscilatórios. É importante notar que os dados disponíveis foram gerados para geometrias provavelmente diferentes da geometria do equipamento em questão. Isto quer dizer que a razão comprimento-largura das placas planas analisadas não é, necessariamente, a mesma do equipamento. A prática mais comum é, a partir da área vertical projetada da estrutura, definir um comprimento equivalente semelhante aos considerados em ensaios.

O cálculo seguinte ilustra o processo de determinação da massa adicional por semelhança com uma placa plana utilizando os dados levantados por MEYERHOFF [27].

Tabela 6.3: Cálculo da massa adicional a partir de uma placa plana.

Largura	$a$	10.0	m
Comprimento	$b$	16.0	m
Razão $b/a$	$b/a$	1.60	-
Volume de referência	$V_{ref} = \frac{\pi}{4}a^2b$	1257	m <sup>3</sup>
Coefficiente de Massa Adicional Vertical	$C_{A_z}$	0.70	-
Massa Adicional Vertical	$A_z = C_{A_z}\rho V_{ref}$	902	t

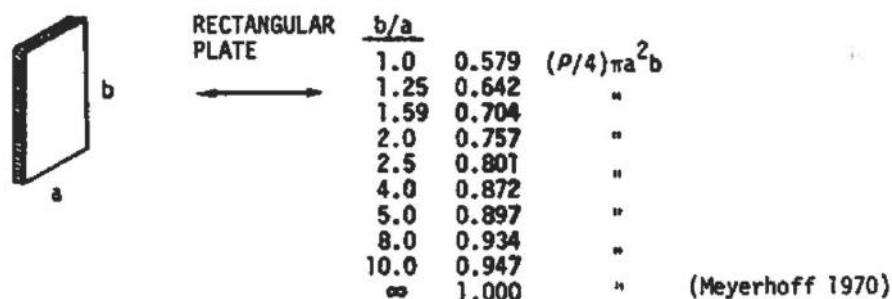


Figura 6.2: Coeficientes de massa adicional para placa plana - Meyerhoff (1970).

O cálculo apresentado na Tabela 6.4 ilustra o processo de determinação da massa adicional por semelhança com uma placa plana em escoamento oscilatório utilizando os dados levantados por ØRITSLAND [28].

Tabela 6.4: Cálculo da massa adicional a partir de uma placa plana em escoamento oscilatório.

Largura	$a$	10.0	m
Comprimento	$b$	16.0	m
Razão $b/a$	$b/a$	1.60	-
Volume de referência	$V_{ref} = \frac{\pi}{4}a^2b$	1257	m <sup>3</sup>
Coefficiente de Massa Adicional Vertical	$C_{A_z}$	0.91	-
Massa Adicional Vertical	$A_z = C_{A_z}\rho V_{ref}$	1172	t

É importante ressaltar que o coeficiente de massa adicional apresentado em [28] se refere a uma placa plana com razão comprimento-largura igual a 1.47 e não 1.60 como indicado na Tabela 6.4. Essa aproximação, no entanto, é comumente adotada em vista da falta de outros dados experimentais para placas planas em escoamentos oscilatórios.

## 6.2.2 Aproximação por Bloco

Outra abordagem comum para a determinação da massa adicional vertical de uma estrutura semelhante a estudada, é a aproximação da geometria por um bloco retangular com o mesmo volume do equipamento. Dados para massa adicional de um bloco retangular foram publicados por SARPKEYA [29]. A Tabela 6.5 apresenta o cálculo da massa adicional para o equipamento em questão a partir da aproximação para um bloco retangular.

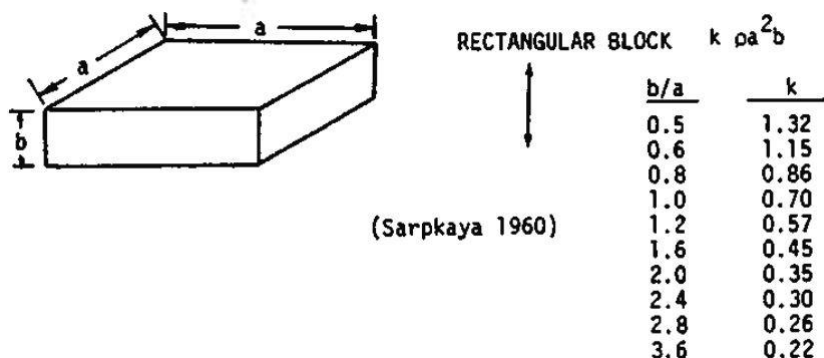


Figura 6.3: Coeficientes de massa adicional para um bloco retangular - Sarpkaya (1960).

Tabela 6.5: Cálculo da massa adicional a partir de um bloco retangular.

Lado equivalente	$a = \sqrt{LW}$	12.7	m
Razão Altura-Lado equivalente	$b/a$	0.51	-
Coefficiente de Massa Adicional Vertical	$C_{Az}$	1.31	-
Volume de referência	$V_{ref} = LWH$	1040	m <sup>3</sup>
Massa Adicional Vertical	$A_z = C_{Az} \rho V_{ref}$	1396	t

Para utilizar os dados para um bloco com base quadrada foi necessário primeiro calcular um lado equivalente com base na área vertical projetada do equipamento. Este processo, embora seja uma aproximação, é geralmente praticado pela indústria e defendido com base na experiência acumulada. Embora esta aproximação tenha se mostrado útil, é visível a diferença dos valores de massa adicional obtidos com as aproximações apresentadas acima.

É importante notar também que os limites geométricos para os quais os coeficiente de massa adicional foram determinados através de ensaios devem ser respeitados. Isto significa que os coeficiente hidrodinâmicos não devem ser aplicados a blocos onde a razão entre altura e lado equivalente se encontra abaixo de 0.5 ou acima de 3.6. Interpolar dentro dos limites para os quais os valores dos coeficientes

foram levantados, no entanto, não acarreta em grandes erros na determinação da massa adicional.

### 6.2.3 Aproximação por Corpo com Paredes Verticais

Para geometrias como a do equipamento em questão, também é comum aproximar a estrutura por um corpo tridimensional com paredes verticais. Essa aproximação consiste em determinar a massa adicional para a base do equipamento, neste caso uma placa plana, e aplicar uma correção como se o corpo fosse um prisma vertical com seção transversal igual a da sua base, conforme as equações abaixo:

$$A_z = A_{z_0} \left[ 1 + \sqrt{\frac{1 - \lambda^2}{2(1 + \lambda^2)}} \right] \quad (6.1)$$

$$\lambda = \frac{\sqrt{A_p}}{h + \sqrt{A_p}} \quad (6.2)$$

onde:  $A_z$  é a massa adicional vertical corrigida;  $A_{z_0}$  é a massa adicional vertical da base do corpo;  $h$  é a altura do corpo e  $A_p$  é área vertical projetada da base do corpo. A Tabela 6.6 apresenta o cálculo da massa adicional considerando as equações acima.

Tabela 6.6: Cálculo da massa adicional para um corpo com paredes verticais.

Massa Adicional Vertical - Placa Plana	$A_{z_0}$	902	m
Altura do Equipamento	$h$	6.50	m
Área Vertical Projetada	$A_p$	160	m <sup>2</sup>
$\lambda$	$\lambda$	0.73	-
Massa Adicional Vertical	$A_z$	1256	t

Caso a massa adicional para a placa plana tenha sido calculada com os coeficientes levantados em escoamento oscilatório, o valor para massa adicional após a correção para paredes verticais é apresentado na Tabela 6.7.

Tabela 6.7: Cálculo da massa adicional para um corpo com paredes verticais - Escoamento oscilatório.

Massa Adicional Vertical - Placa Plana	$A_{z_0}$	1172	m
Altura do Equipamento	$h$	6.50	m
Área Vertical Projetada	$A_p$	160	m <sup>2</sup>
$\lambda$	$\lambda$	0.73	-
Massa Adicional Vertical	$A_z$	1633	t



## 6.2.4 Discussão

Os cálculos apresentados acima ilustram a diferença dos valores de massa adicional que podem ser obtidos para um mesmo equipamento dependendo da aproximação aplicada. Pelo fato de não existir um critério ou recomendação definitiva de qual método pode gerar a maior precisão para cada tipo de geometria, é possível obter diferentes estados de mar limite para a instalação de um mesmo equipamento devido ao fato de que a massa adicional calculada depende da experiência e metodologia adotada pelo analista. A Tabela 6.8 resume os resultados obtidos nas seções anteriores.

Tabela 6.8: Resumo do cálculo para determinação de massa adicional.

Aproximação	$A_z$	Unidade
Placa plana	902	tf
Placa plana em escoamento oscilatório	1172	tf
Bloco retangular com base quadrada	1396	tf
Corpo com paredes verticais	1256	tf
Corpo com paredes verticais - Escoamento oscilatório	1633	tf

Como apresentado na Tabela 6.8, existe uma diferença de 731 toneladas entre o máximo e mínimo valor de massa adicional calculada a partir de aproximação geométrica. Esta diferença vai refletir na determinação das cargas calculada na análise de instalação que, por consequência, afetará a janela de operação para instalação do equipamento que, por fim, terá impacto no custo da operação.

## 6.3 Determinação da Massa Adicional a partir de Dados de Campo

Nesta seção, a metodologia apresentada neste trabalho será aplicada para determinar a massa adicional do equipamento estudado a partir de dados obtidos em campo.

### 6.3.1 Dados de Entrada

Seguindo o fluxo de análise apresentado no Capítulo 5, o procedimento se inicia com o levantamento e preparação dos dados de movimento e carga. Os dados de movimento do caso em questão foram extraídos da MRU da embarcação instaladora enquanto que a série temporal de carga foi extraída do sistema de monitoramento do guindaste e do guincho utilizados na instalação. A Figura 6.4 apresenta as séries temporais de movimento, heave, roll e pitch, e a série temporal da carga atuando na ponta da lança do guindaste instalador para todo o período da operação.

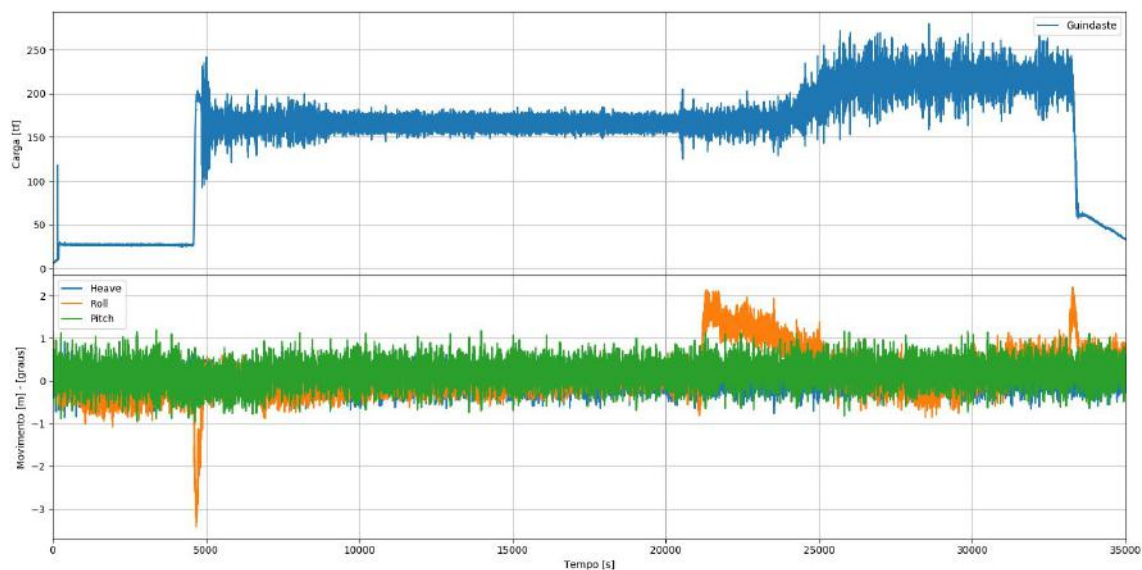


Figura 6.4: Séries temporais de carga e movimento.

O gráfico superior da Figura 6.4 apresenta as séries temporais de carga nos dispositivos de içamentos utilizados na operação. A série temporal em azul representa a carga atuando na ponta da lança do guindaste enquanto que a série temporal em verde indica a carga atuando no guincho de abandono e recolhimento do navio. O gráfico inferior apresenta as séries temporais dos movimentos de heave, roll e pitch da embarcação.

Na figura é possível observar a variação da carga na ponta da lança do guindaste durante as diferentes fases da operação. Nos primeiros instantes observa-se a força atuando no guindaste sair de próximo de 0 para 190 toneladas. Esse período se refere a fase de içamento do equipamento do convés da embarcação instaladora e transbordo da carga.

Na sequência observa-se uma grande variação dinâmica da carga seguida por uma redução na média do sinal. Esta fase indica a passagem do equipamento pela zona de ondas, geralmente a fase mais crítica da operação devido ao risco de sobrecarga ou afrouxamento dos cabos de içamento. No gráfico é possível observar que as forças dinâmicas atuando no corpo durante a passagem pela zona de ondas reduzem a carga no guindaste em até 100 toneladas. Uma vez que o corpo afunda através das ondas e o efeito das últimas passa a ser reduzido, verifica-se que a média da série temporal, ou seja, que a carga média atuando no guindaste passa a variar em torno de 165 toneladas em função do empuxo gerado pelo volume deslocado pelo equipamento.

Na sequência da operação é possível verificar um aumento na carga média

atuando no guindaste, indicando que o equipamento está descendo através da coluna d'água. O aumento da carga ocorre em função do aumento do comprimento do cabo de içamento sendo lançado a água pelo guindaste. Em um certo instante, a carga média para de aumentar e se estabiliza. Em seguida a carga começa a reduzir até que a média do carregamento passa a ser equivalente ao peso do cabo de içamento. Este ponto marca uma transferência de carga entre o guindaste e outro guincho instalado na embarcação.

Na aplicação da metodologia para determinação da massa adicional, o período a ser considerado na análise é o anterior a esta transferência de carga. Este trecho da operação foi escolhido por ser o período mais longo para o qual se registrou os dados de carga e movimento enquanto o equipamento permanecia na mesma profundidade e afastado da zona de ondas.

### 6.3.2 Aplicação do Método Exaustivo de Busca

Com os dados de entrada preparados, segue-se a aplicação da metodologia para determinação da massa adicional através do método exaustivo de busca, conforme apresentado na Seção 5.2. O primeiro passo é realizar a análise estatística e espectral das séries temporais de carga e movimento, representados nas Figuras 6.5 e 6.5.

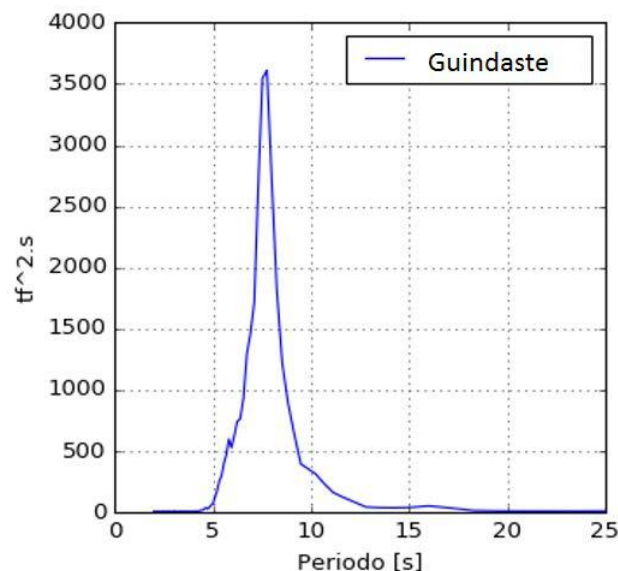


Figura 6.5: Espectro de energia da série temporal de carga no guindaste.

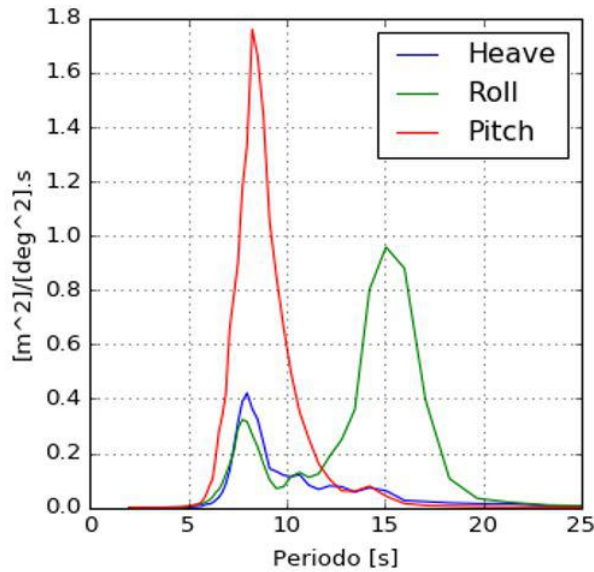


Figura 6.6: Espectro de energia das séries temporais de movimento.

Nos gráficos acima pode-se observar que o período de pico do espectro de carga ocorre no mesmo período de pico dos movimento de pitch e heave, indicando que este era o período da onda incidente no momento da operação.

O segundo passo do processo consiste em realizar análises de sensibilidade para verificação dos parâmetros relevantes na determinação da carga atuando no guindaste. Para o caso em questão, esta análise foi realizada através de simulações numéricas combinando valores de massa adicional, coeficiente de arrasto, rigidez do cabo de içamento e amortecimento estrutura do cabo. O resultado da análise mostrou que apenas os três primeiros parâmetros mencionados acima são relevantes e que o amortecimento estrutura do cabo de içamento poderia ser desprezado.

A análise de sensibilidade também indicou quais os intervalos de massa adicional, coeficiente de arrasto e rigidez axial do cabo de içamento deveriam ser considerados para montagem da matriz de análise. Os intervalos são apresentados na Tabela 6.9.

Tabela 6.9: Intervalo dos parâmetros considerados na montagem da matriz de análise.

Parâmetros	Mínimo	Máximo
Massa adicional	400 t	1600 t
Coeficiente de arrasto	2.0	15.0
Rigidez axial	600 MPa	1200 MPa

A partir dos valores expostos acima, montou-se uma matriz de análise combi-

nando os três parâmetros com intervalos de 50 toneladas para massa adicional, 0.5 para o coeficiente de arrasto e 50 MPa para a rigidez axial do cabo de içamento. As simulações foram então rodadas e as propriedades estatísticas dos resultados para a carga no guindaste foram extraídas e comparadas com os resultados observados em campo. Calculando o erro entre resultados de simulação e o dados medidos, chegou-se ao mapa apresentado na Figura 6.7.

No mapa é possível observar as possíveis combinações entre os parâmetros avaliados que levam a resultados similares aos registros gravados em campo. O trabalho no entanto só se completa quando os erros são somados de forma a convergir para um valor específico de massa adicional. Esse processo é apresentado na Figura 6.8.

Analisando os resultados obtidos através da aplicação da metodologia de análise por força bruta, é possível concluir que, para os parâmetros considerados na análise, o valor de massa adicional capaz de reproduzir os resultados registrados em campo gira em torno de 700 toneladas, visto que os erros no entorno deste valores são mínimos.

Embora a rigidez axial nominal do cabo de içamento seja de aproximadamente 1200 MPa, os resultados da análise mostram que seria possível reproduzir os resultados obtidos em campo considerando valores menores para a rigidez axial do cabo de içamento.

É importante notar também que coeficientes de arrasto acima de 8.0 aplicados a simulação reproduzem com pouco erro os resultados obtidos em campo. Este valor para o coeficiente de arrasto está em linha com resultados obtidos em ensaios para corpos em escoamento oscilatório e baixo número de Keulegan–Carpenter, SARPKAYA [30].

Em trabalho posterior, os resultados obtidos no estudo deste caso foram utilizados para prever as cargas atuando no corpo e no guindaste em futuras operações de instalação do mesmo equipamento. Para essas análises os resultados da comparação com o registros obtidos em campo foram os mesmos, indicando que esta combinação de parâmetros é capaz de representar as forças dinâmicas envolvidas no processo.

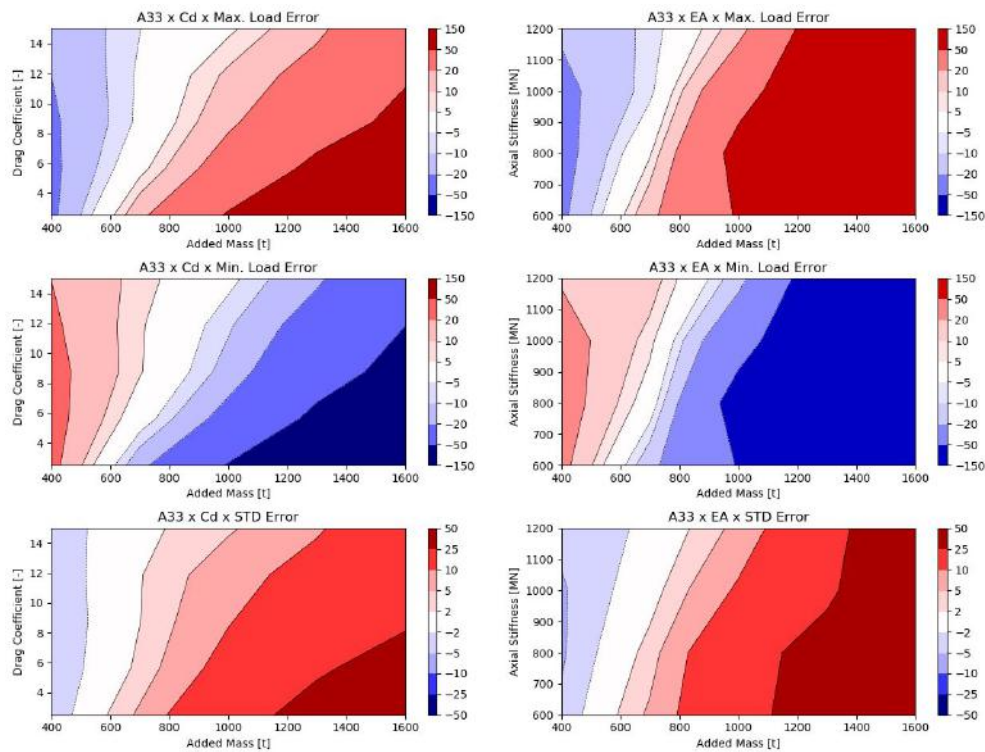


Figura 6.7: Resultados da análise por força bruta.

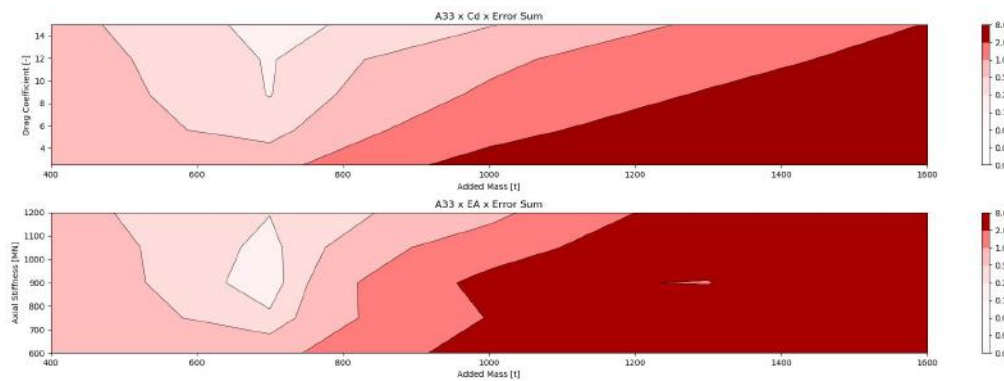


Figura 6.8: Resultados da análise por força bruta.

### 6.3.3 Análise por Integração da Equação do Movimento

O primeiro passo para aplicação da metodologia de análise através da integração da equação do movimento é a preparação do modelo numérico para realização da simulação. Para o presente trabalho, duas ferramentas foram consideradas, o software Orcaflex e um código escrito em Python capaz de integrar a equação do movimento.

A metodologia de análise por força externa é muito mais direta que a análise por força bruta pelo fato de partir dos dados de carga medidos em campo para determinar a força hidrodinâmica atuando na estrutura instalada. O processo de

integração numérica, seja ela feita através de um software proprietário ou um código especialmente desenvolvido para tal, permite que a cada passo da integração sejam avaliadas as forças e movimentos executados pelo corpo e embarcação, de forma que é possível corrigir tais movimentos e, por consequência, as cargas relacionadas, com base em uma referência. De forma simplificada, o método de análise por força externa consiste em realizar uma "conta de chegada" para determinar a força hidrodinâmica atuando no corpo e no dispositivo de içamento.

O trecho considerado para análise com a metodologia de força externa é o mesmo considerado na seção anterior. A Figura 6.9 ilustra os resultados numéricos obtidos para a carga na ponta da lança do guindaste através do software Orcaflex e através do código desenvolvido especificamente para este trabalho. Analisando o gráfico é possível notar que o erro entre os resultados obtidos com o Orcaflex e com o código em Python é mínimo.

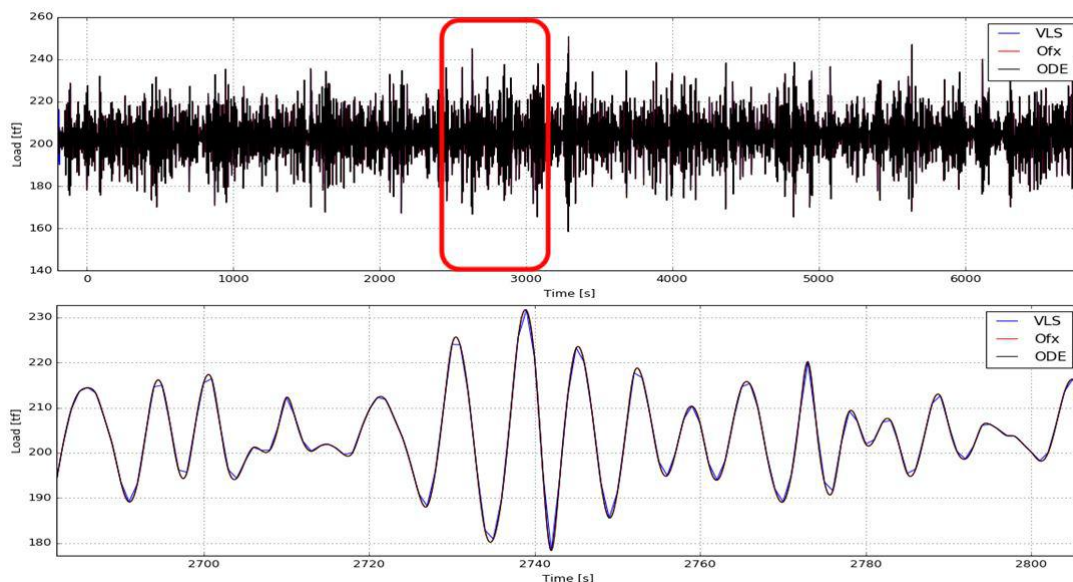


Figura 6.9: Exemplo de simulação com ajuste da força externa.

O resultado da análise para determinação da massa adicional é dado em forma de uma função  $A_z(KC)$ , conforme apresentado na Figura 6.10. No gráfico é possível observar que o máximo valor encontrado para a massa adicional em função de  $KC$  não ultrapassa 850 toneladas para o caso analisado.

O mesmo procedimento foi aplicado em outros registros observados em campo referentes a instalação do mesmo equipamento em diferentes períodos. Os resultados são apresentados nas Figuras 6.11 e 6.12.

Para alguns dos resultados obtidos a partir da análise de outras operações de instalação do mesmo equipamento indicam que a máxima massa adicional calculada também está próxima de 800 toneladas. No entanto, para outros casos analisados os resultados foram diferentes. A Figura 6.13 apresenta os resultados de outra operação para o mesmo equipamento. Neste caso, embora a os valores de massa adicional calculados estejam dentro dos limites encontrados nos outros casos, foi observada uma maior dispersão nos resultados obtidos.

Em outro caso analisado, o máximo valor obtido para a massa adicional ultrapassou o limite estabelecido nos casos anteriores, chegando próximo de 1000 toneladas para valores de KC similares aos dos casos anteriores, Figura 6.14. É importante ressaltar que todas essas operações ocorreram em condições ambientais diferentes, ou seja, a altura significativa de onda e o período de pico do mar total durante as operações eram diferentes.

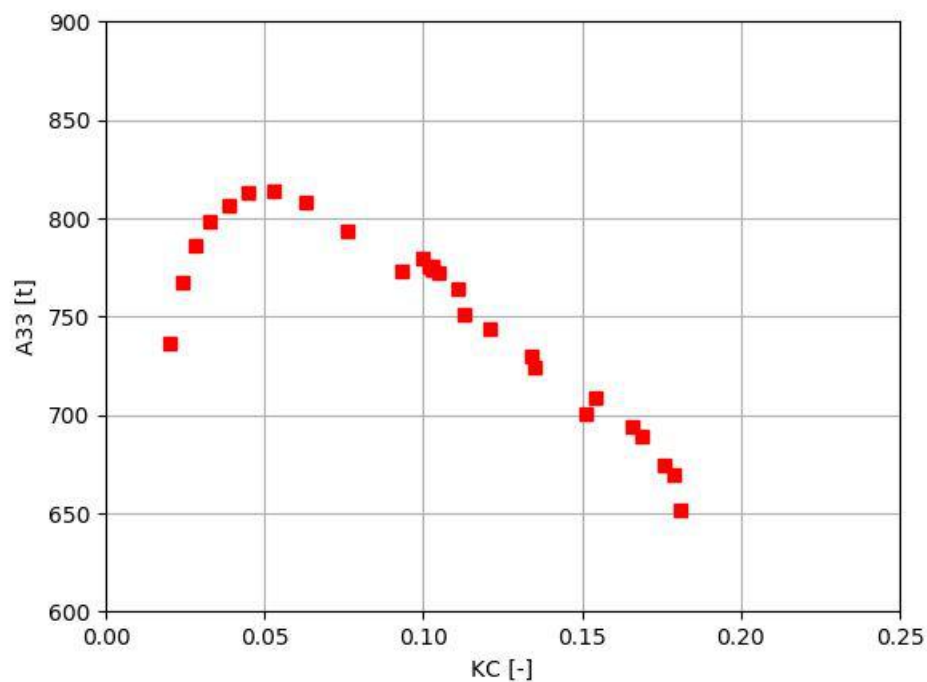


Figura 6.10: Resultado da análise por força externa.



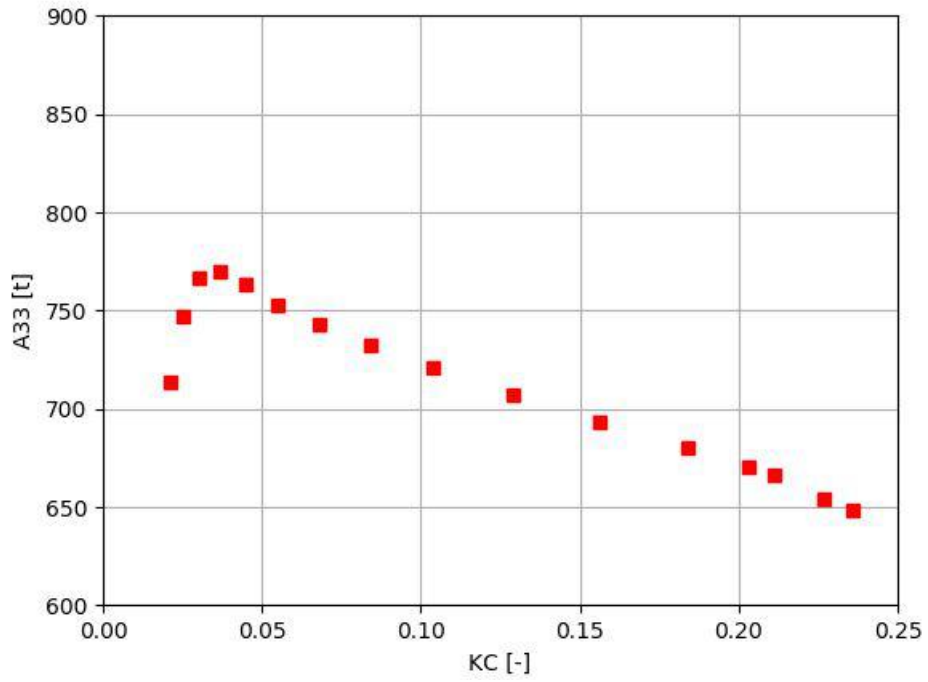


Figura 6.11: Resultado da análise por força externa - Equipamento 2.

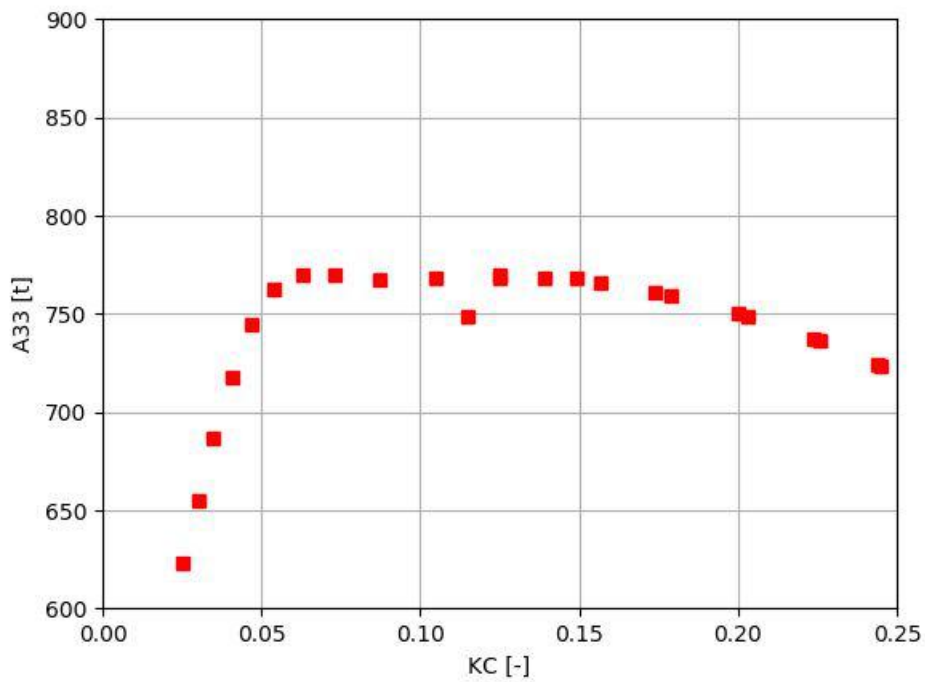


Figura 6.12: Resultado da análise por força externa - Equipamento 3.

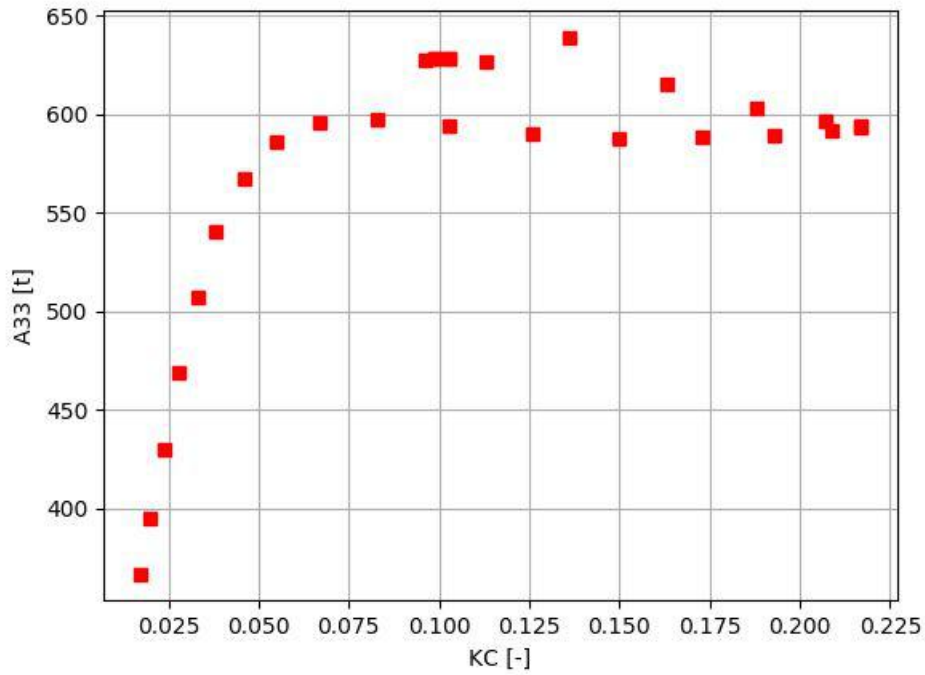


Figura 6.13: Resultado da análise por força externa - Equipamento 4.

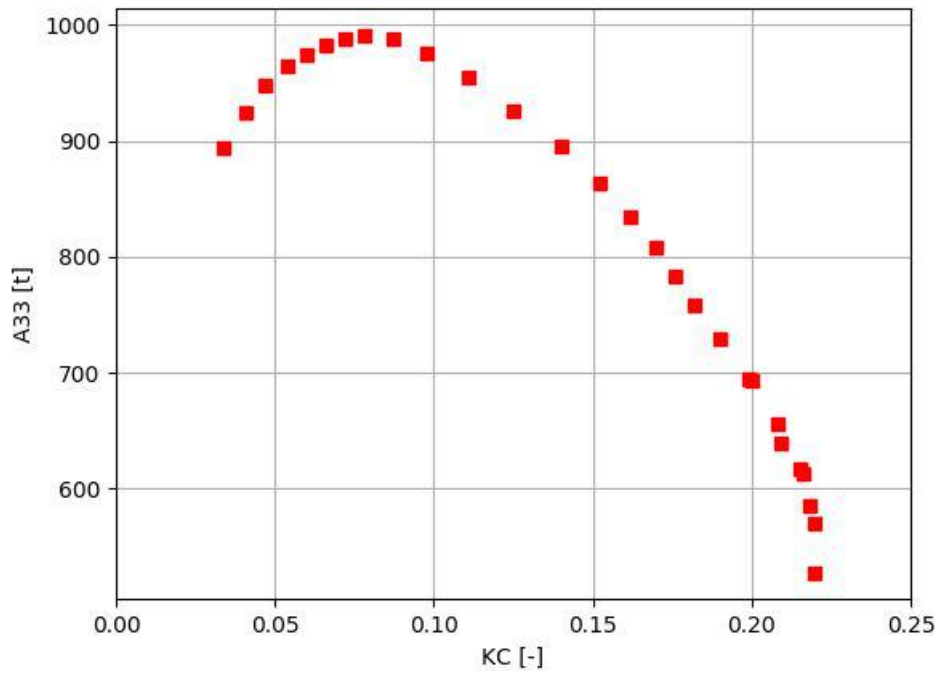


Figura 6.14: Resultado da análise por força externa - Equipamento 5.

## 6.4 Resultados

A Tabela 6.10 apresenta os valores obtidos para a massa adicional vertical do equipamento estudado através dos diferentes métodos apresentados anteriormente.

Tabela 6.10: Resumo dos valores obtidos para massa adicional  $A_z$ .

<b>Método</b>	$A_z$	<b>Unidade</b>
Placa plana	902	t
Placa plana em escoamento oscilatório	1172	t
Bloco retangular com base quadrada	1396	t
Corpo com paredes verticais	1256	t
Corpo com paredes verticais - Escoamento oscilatório	1633	t
Força Bruta	650 - 750	t
Força Externa	600 - 1000	t

A aplicação das metodologias de análise por força bruta e força externa não permite determinar um valor constante de forma direta, mas sim um intervalo de valores para a massa adicional vertical. No entanto, esses valores, junto com outros parâmetros do problema como o coeficiente de arrasto e a rigidez axial do cabo de içamento, servem de balizas para determinação de um valor constante para a massa adicional que possa ser utilizado em simulações numéricas para determinação das cargas atuando no sistema içado.

A Tabela 6.10 indica que os valores de massa adicional calculados a partir da aproximação da geometria do equipamento por geometrias mais simples, resulta em valores consideravelmente maiores do que os valores calculados através das duas metodologias apresentadas neste trabalho. Comparando os resultados, pode ser concluir que o cálculo por aproximação de geometria que produz resultado mais próximo do calculados pelas metodologias apresentadas, é a aproximação por placa plana em escoamento permanente. É importante ressaltar que isto vai de encontro com conclusões apresentadas em trabalhos anteriores [17].

Com o objetivo de validar os valores de massa adicional calculados através das metodologias apresentadas, simulações numéricas foram realizadas com os valores obtidos e comparados contra os resultados medidos em campo. Para isso, no entanto, foi necessário definir um valor de massa adicional e coeficiente de arrasto constante para ser utilizado na simulação. A Tabela 6.11 apresenta os dados de entrada considerados nas simulações.

A Figura 6.15 apresenta os resultados obtidos para uma primeira revisão da análise de instalação do equipamento em questão. Nesta revisão o valor de massa adicional e coeficiente de arrasto considerados foram 1172 toneladas e 2.5, respectivamente. A massa adicional para esta revisão foi calculada pela aproximação para

uma placa plana em escoamento oscilatório.

Tabela 6.11: Dados de entrada para simulações de validação.

Propriedades	Valor	Unidade
Massa Adicional Vertical	700	t
Coefficiente de Arrasto Vertical	8.0	[-]
Rigidez axial do cabo de içamento	1200	MPa

Na Figura 6.15, a linha vermelha representa o limite superior do envelope de cargas calculado através de análise, a linha amarela representa o limite inferior deste envelope, as linhas tracejadas em azul e verde representam os limites do envelope das cargas máximas medidas em campo, enquanto que os pontos em azul e verde representam as máximas medidas em cada operação considerada. Analisando os resultados apresentados no gráfico da Figura 6.15, fica claro que os valores considerados para massa adicional e amortecimento levam a valores superestimados para as cargas máximas e, em alguns casos, subestimados para as cargas mínimas de cada fase da instalação.

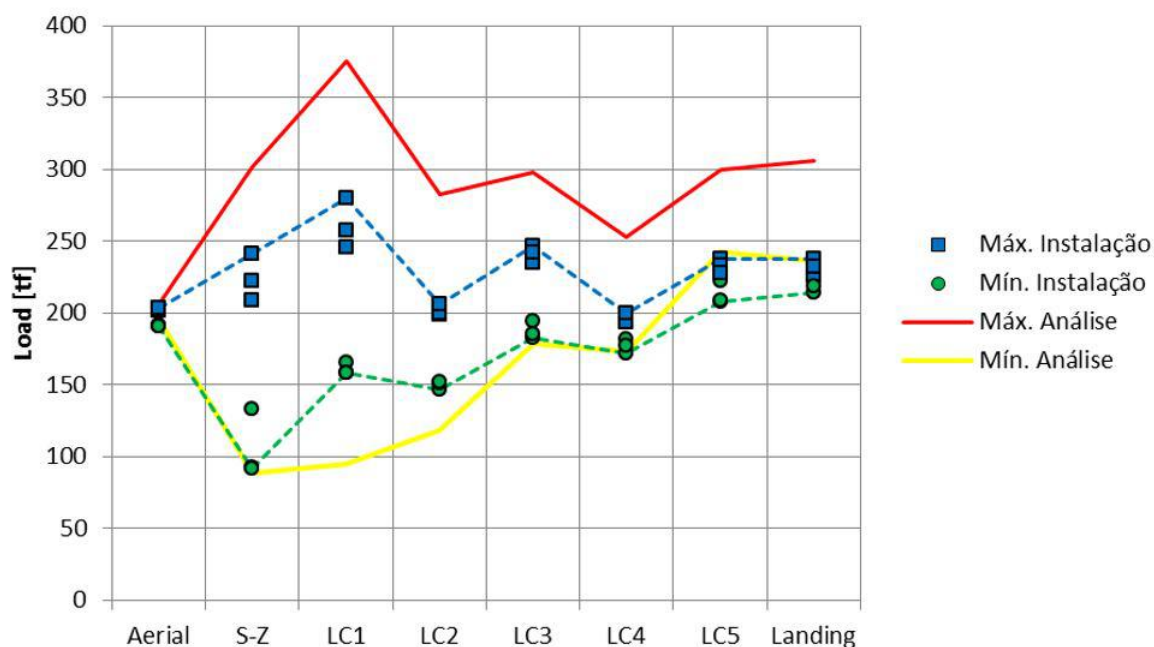


Figura 6.15: Envelope de cargas - Revisão 1.

A Figura 6.16 apresenta os resultados obtidos considerando os valores apresentados na Tabela 6.11.

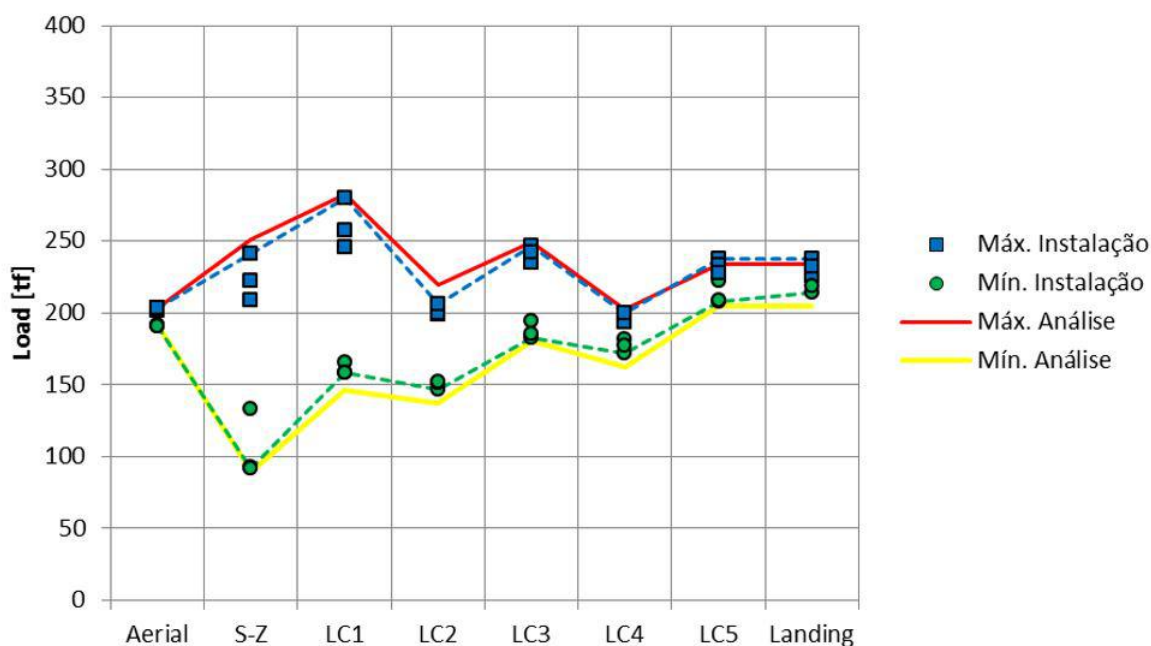


Figura 6.16: Envelope de cargas - Revisão 2.

Neste caso, observa-se que o envelope das cargas calculadas através da simulação numérica praticamente se sobrepõe ao envelope das cargas medidas em campo. Este resultado era esperado, visto que os valores de massa adicional, amortecimento e rigidez considerados na análise foram levantados a partir dos dados medidos em campo, conforme discutido nas seções anteriores. O mais importante em relação a este resultado, no entanto, é a constatação de que os valores de massa adicional capazes de reproduzir os dados de campo, são consideravelmente inferiores aos valores geralmente determinados a partir da metodologia adotada pela a indústria. Esses resultados validam os valores de massa adicional calculados e a metodologia aplicada.

As Figuras 6.17 e 6.18 apresentam o estado de mar limite para instalação obtidos para os dois casos apresentados acima. As áreas em verde nos gráficos abaixo indicam as combinações de  $H_s$  e  $T_p$  para as quais é possível instalar o equipamento sem ultrapassar os limites de carga da estrutura e do guindaste da embarcação instaladora. As áreas em vermelho indicam as combinações de  $H_s$  e  $T_p$  para as quais existe risco de sobrecarga na estrutura e no guindaste e ocorrência de afrouxamento de cabos. As informações apresentadas nestes gráficos, quando cruzadas com dados meteoceanográficos da locação de instalação, permitem estimar o tempo de espera necessário para realizar uma operação. De forma geral, quanto menor o estado de mar limite para instalação, maior o custo da operação devido ao tempo de espera por condições ambientais favoráveis.

Analisando os gráficos apresentados nas Figuras 6.17 e 6.18, é possível concluir que os métodos para determinação de massa adicional utilizados pela indústria resultam em maior custo operacional em campanhas de instalação de equipamentos. Por outro lado, para campanhas de instalação onde múltiplos equipamentos de um mesmo tipo serão instalados em sequência, a metodologia apresentada neste trabalho torna possível reavaliar os estados de mar limite para instalação a partir do primeiro equipamento instalado, permitindo uma precisão maior na determinação da janela operacional.

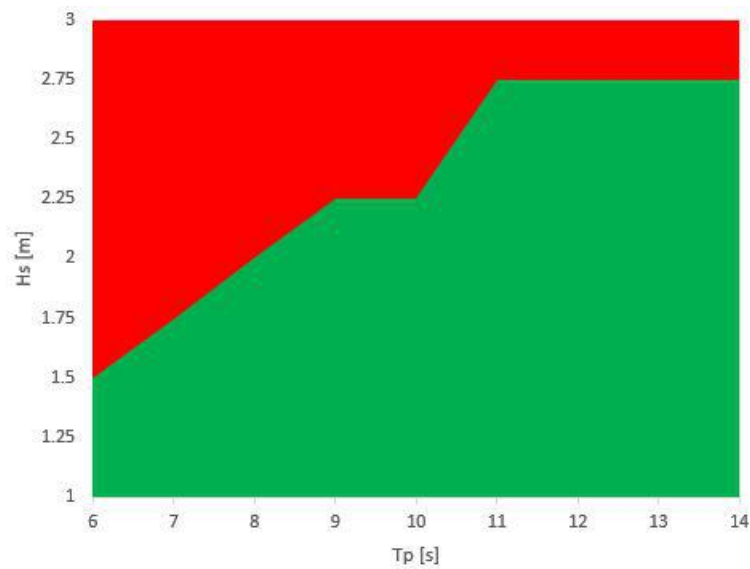


Figura 6.17: Estado de mar limite para instalação - Revisão 1.

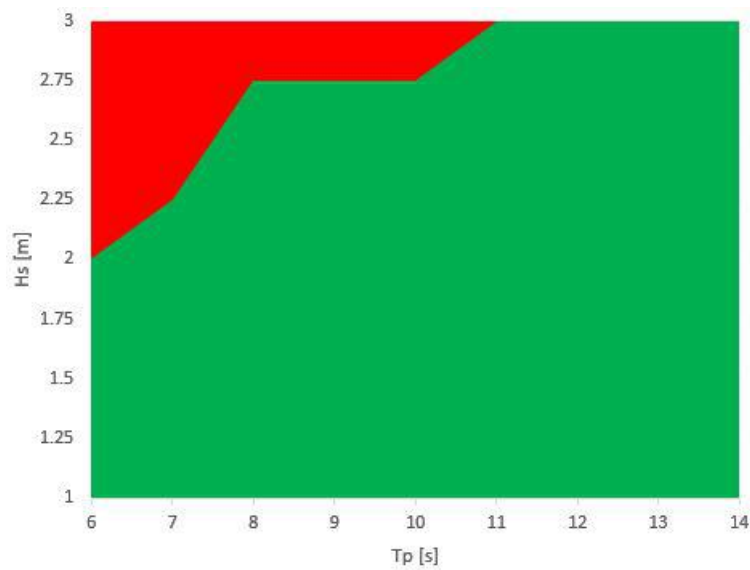


Figura 6.18: Estado de mar limite para instalação - Revisão 2.

# Capítulo 7

## Conclusões

Neste trabalho foram apresentados os principais aspectos relacionados a instalação de equipamentos submarinos e foram abordadas as principais metodologias para determinação da massa adicional vertical de tais estruturas. Foram também apresentadas duas metodologias de análise para determinação da massa adicional a partir de dados obtidos em campo durante operações de instalação.

Um estudo de caso, com base em dados reais obtidos em campo durante uma campanha de instalação de equipamentos submarinos, foi realizado com o objetivo de comparar os valores de massa adicional obtidos através dos métodos praticados pela indústria contra os valores obtidos através das metodologias aqui apresentadas.

Com base nos resultados deste estudo e nos temas abordados, é possível traçar as seguintes conclusões:

1. Com base nos resultados apresentados no Capítulo 6, é possível concluir que simulações numéricas considerando os resultados obtidos para os valores de massa adicional através da metodologia proposta, são capazes de representar com precisão razoável os resultados obtidos em campo. É importante notar, no entanto, que mais de uma combinação de valores para massa adicional, coeficiente de arrasto e rigidez axial do cabo de içamento pode trazer resultados semelhantes, como foi exposto na Seção 6.3.2. Em suma, as metodologias propostas neste trabalho produzem bons resultados para replicação e previsão de cargas atuando no equipamento e dispositivo de instalação.
2. Analisando os estados de mar limite apresentados na Seção 6.4, é possível concluir que os métodos para determinação de massa adicional utilizados pela indústria resultam em maior custo operacional em campanhas de instalação de equipamentos. Por outro lado, para campanhas de instalação onde múltiplos equipamentos de um mesmo tipo serão instalados em sequência, a metodologia

apresentada neste trabalho torna possível reavaliar os estados de mar limite para instalação a partir do primeiro equipamento instalado, permitindo uma precisão maior na determinação da janela operacional.

3. O método de análise por força bruta permite determinar valores constantes para massa adicional, coeficiente de arrasto e rigidez axial do cabo de içamento, de forma que os mesmos possam ser utilizados em simulações numéricas para prever movimentos e forças atuando no sistema içado. O método de análise por força externa, por sua vez, permite avaliar o comportamento da massa adicional vertical do equipamento em função do número de Keulegan–Carpenter. Embora esse resultado não possa ser usado diretamente em simulações numéricas, ele permite validar os valores obtidos com o primeiro método.
4. A fase da instalação considerada para análise no estudo apresentado no Capítulo 6 representa uma condição onde o deslocamento, velocidade e aceleração do equipamento tem baixa amplitude, ou seja, o número de Keulegan–Carpenter calculado para esta condição é relativamente baixo, geralmente inferior a 0.4 para os casos analisados. São poucas as referências publicadas para coeficientes de inércia e massa adicional para valores de  $KC$  dessa magnitude, não permitindo aqui traçar conclusões sobre o comportamento das curvas apresentadas na Seção 6.3.3.
5. O método praticado pela indústria para determinação da massa adicional vertical de equipamentos submarinos pode levar a valores conservadores. Para o caso estudado no Capítulo 6, todas as aproximações usualmente utilizadas resultaram em valores de massa adicional consideravelmente maiores do que os calculados a partir dos dados medidos em campo. Para o caso de outras estruturas, como por exemplo templates submarinos, onde a prática consiste em calcular a massa adicional para cada parte da estrutura como um corpo isolado e depois realizar o somatório de todas esses valores para compor a massa adicional da estrutura, os resultados podem ainda ser mais conservadores, visto que o efeito que cada parte do corpo tem sobre o escoamento incidente em outra, é totalmente desprezado. Embora este conservadorismo inerente ao método de determinação de massa adicional por aproximação geométrica resulte em custos mais elevados para a instalação de equipamentos, ele tem um impacto na segurança da operação, uma vez que aumenta de forma indireta os fatores de segurança adotados pela engenharia. O balanço entre custo e segurança geralmente pesa para o lado do segundo, por isto, talvez, tais métodos continuem sendo praticados sem serem desafiados.



6. Devido ao baixo custo do procedimento, na maioria dos projetos de instalação de equipamentos, a determinação dos coeficientes hidrodinâmicos é realizada através dos métodos de aproximação de geometria. Em casos muito específicos, por exemplo para equipamentos de grandes proporções ou campanhas extensas, testes com modelos reduzidos são realizados para determinar as propriedades hidrodinâmicas. Este método, no entanto, é entendido como o mais preciso para determinação das propriedades hidrodinâmicas de estruturas complexas. Análises de CFD são geralmente utilizadas em projetos de pesquisa e desenvolvimento. Para que sejam utilizadas na prática, análises de CFD necessitam ser validadas a partir de ensaios com modelos reduzidos.

Os seguintes pontos apresentam sugestões para trabalhos futuros:

1. Os resultados apresentados neste trabalho se referem a um único modelo de equipamento submarino. Fica clara a necessidade de aplicar a metodologia apresentada a outros modelos de equipamento com geometria semelhante porém com razões de aspecto diferentes, de forma que seja possível validar os resultados obtidos e, além disso, buscar métodos para interpolar ou extrapolar os resultados para outros equipamentos da mesma classe.
2. Outra validação que deveria ser buscada é através de ensaios com modelos reduzidos. Para isso, sugere-se que as séries temporais de movimento sejam aplicadas a um modelo em escala reduzida do equipamento em questão de forma que os resultados obtidos para a massa adicional em função de  $KC$  pudessem ser verificados.

Por fim, pode-se concluir que a metodologia apresentada neste trabalho produz resultados satisfatórios para determinação da massa adicional de equipamentos submarinos a partir de dados obtidos em campo.

# Referências Bibliográficas

- [1] CERQUEIRA, M., ROVERI, F., FERREIRA, J., et al. “Método pendular para instalação de equipamentos submarinos”, *Boletim Técnico da Produção de Petróleo*, v. 1, n. 2, pp. 327–339.
- [2] DNVGL. *Modelling and Analysis of Marine Operations*. Recommended Practice DNVGL-RP-N103, DNV GL, 2017.
- [3] AARSET, K., SARKAR, A., KARUNAKARAN, D. “Lessons Learnt from Lifting Operations and Towing of Heavy Structures in North Sea”, *OTC*, 2011.
- [4] ROVERI, F. E., OLIVEIRA, M. C., MORETTI, M. J. “Installation of a Production Manifold in 2000 ft Water Depth Offshore Brazil”, *Offshore Technology Conference - OTC*, 1996.
- [5] LIMA, J. “Developments of Subsea Facilities in the Roncador Field (P-52)”, *Offshore Technology Conference - OTC*, 2008.
- [6] WANG, A., ZHU, S. “Pendulous Installation Method and its Installation Analysis for a Deepwater Manifold in South China Sea”, *International Society of Offshore and Polar Engineers - ISOPE*, 2013.
- [7] WANG, A. “Latest Progress in Deepwater Installation Technologies”, *International Society of Offshore and Polar Engineers - ISOPE*, 2012.
- [8] FRAZER, I., PERINET, D., VENNEMANN, O. “Technology Required for the Installation of Production Facilities in 10.000 ft of Waters”, *Offshore Technology Conference - OTC*, 2005.
- [9] MCPHERSON, G. “Developments in Deepwater Installation Systems”, *Offshore Technology Conference - OTC*, 2015.
- [10] LITTLE, A. *Stress analysis of ship-suspended heavily loaded cables for deep underwater emplacements*. Technical Report REPORT NO. 1370863, Department of The Navy Bureau of Ships, Cambridge, Massachusetts, 1963.

- [11] HOLMES, P. *Mechanics of Raising and Lowering Heavy Loads in the Deep Ocean - Cable and Payload Dynamic*. Technical Report Technical Report R-433, Bureau of Yards and Docks - U.S. Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, California, April 1966.
- [12] IWAN, W. “Dynamic Response of Suspended Underwater Systems”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 51, n. 5, pp. 1688–1696, set. 1971.
- [13] KOPSOV, I., SANDVIK, P. “Analysis of Subsea Structure Installation”. In: *Proceedings of the Fifth International Offshore and Polar Engineering Conference*. ISOPE, 1995.
- [14] CERQUEIRA, M. B. *Instalação de Equipamentos Submarinos em Águas Ultra-profundas Através de Suspensores Flexíveis*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.
- [15] BOE, T., NESTEGARD, A. “Dynamic Forces During Deepwater Lifting Operations”, *ISOPE*, 2010.
- [16] SARKAR, A., GUDMESTAD, O. “Splash Zone Lifting Analysis of Subsea Structures”. In: *Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, n. OMAE2010-20489. OMAE, 2010.
- [17] SARPKAYA, T. *Wave Forces on Offshore Structures*. 1 ed. New York, Cambridge University Press, 2010.
- [18] BUNNIK, T., BUCHNER, B. “Experimental Investigation of Subsea Structures during Installation and the Related Wave Loads, Added Mass and Damping”, *ISOPE*, 2004.
- [19] GREENHOW, M., AHN, S. “Added Mass and Damping of Horizontal Circular Cylinder Sections”, *Ocean Engineering*, v. 15, n. 5, 1988.
- [20] BUCHNER, B., BUNNIK, T. H. J., HONIG, D., et al. “A New Simulation Method for the Installation of Subsea Structures from the Splash Zone to the Ultra Deep”, *DOT*, 2003.
- [21] SANDVIK, P. C., SOLAAS, F., NIELSEN, F. “Hydrodynamic Forces on Ventilated Structures”, *ISOPE*, 2006.
- [22] AN, S., FALTINSEN, O. M. “An experimental and numerical study of heave added mass and damping of horizontally submerged and perforated rectangular plates”, *Journal of Fluids and Structure*, v. 39, 2013.

- [23] FERNANDES, A. C., MINEIRO, F. P. S. “Assessment of Hydrodynamic Properties of Bodies With Complex Shapes”, *Applied Ocean Research*, v. 29, n. 3, 2007.
- [24] KIMIAEI, M., JING, X., YU, H. “Comparing the Results of a Simplified Numerical Model With DNV Guidelines for Installation of Subsea Platforms”, *OMAE*, 2009.
- [25] SUN, G., WANG, J., WANG, F., et al. “A Generic Study on Lowering Analysis of Massive Jumper Structures”, *OMAE*, 2015.
- [26] SPHAIER, S. *Hidrodinâmica de Corpos Flutuantes, Notas de Aula*. Rio de Janeiro, UFRJ, 2016.
- [27] MEYERHOFF, W. “ADDED MASSES OF THIN RECTANGULAR PLATES CALCULATED FROM POTENTIAL THEORY”, v. 14, pp. 100–111, 06 1970.
- [28] ORITSLAND, O. *A Summary of Subsea Module Hydrodynamic Data*. Marine Operations Part III.2 70, Marintek, 1989.
- [29] SARPKEYA, T. “Added Mass of Lenses and Parallel Plates”, *Journal of Engineering Mechanics*, 1960.
- [30] SARPKEYA, T. “Forces on a Circular Cylinder in Viscous Oscillatory Flow at Low Keulegan-Carpenter Numbers”, *Journal of Fluid Mechanics*, 1986.