



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEMI-ACOPLADA PARA O PROJETO DE UM SISTEMA DE ANCORAGEM EM UMA PLATAFORMA SEMISSUBMERSÍVEL

Juan Pablo Inza Blanco

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de
Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica,
Universidade Federal do Rio de Janeiro, como
parte dos requisitos necessários à obtenção do
título de Engenheiro.

Orientadores: Carl Horst Albrecht

Fabício Nogueira Corrêa

Rio de Janeiro

Abril de 2013

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEMI-ACOPLADA PARA O PROJETO DE UM
SISTEMA DE ANCORAGEM EM UMA PLATAFORMA SEMISSUBMERSÍVEL

JUAN PABLO INZA BLANCO

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA NAVAL E OCÂNCIA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO NAVAL E OCEÂNICO.

Examinada por:

Prof. Carl Horst Albrecht

Prof. Fabrício Nogueira Corrêa

Profa. Marta Cecília Tápia Reyes

Prof. Breno Pinheiro Jacob

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL de 2013

Inza Blanco, Juan Pablo

Aplicação da Metodologia Semi-Acoplada para o Projeto de um Sistema de Ancoragem em uma Plataforma Semissubmersível/ Juan Pablo Inza Blanco. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2013.

XIV, 114 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Carl Horst Albrecht

Fabício Nogueira Corrêa

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/
Curso de Engenharia Naval e Oceânica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 109-111.

1. Sistemas Offshore. 2. Metodologia Semi-Acoplada.
3. HTF-GA 4. Projeto de Sistema de Ancoragem. I.
Albrecht, Carl Horst. II. Corrêa, Fabício Nogueira. III.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola
Politécnica, Curso de Engenharia Naval e Oceânica. IV.
Título.

*A minha mãe Patricia que sempre me deu
todo seu apoio e amor e ao meu pai Juan Pablo
que sei que está me acompanhando desde onde se encontra.*

AGRADECIMENTOS

A Deus.

A minha mãe Patricia, sem ela não estaria aqui hoje. Obrigado por me apoiar sempre em tudo, só espero ser sempre o filho que você merece. Te amo.

Ao meu pai Juan Pablo que está me cuidando e me fazendo companhia desde sempre.

Aos meus irmãos José Javier, Paola Patricia e Luis Sabas pelo carinho e apoio que sempre me deram e pelo respeito que sempre me demonstraram.

Aos meus tios Germán e Maria Ángela, sem o apoio, carinho e amor deles não teria chegado até aqui e não seria a pessoa que sou hoje.

Aos meus avós Juan, Sarah e Luisa, por todo o carinho e amor que sempre me demonstraram. Obrigado por sempre acreditar em mim.

A Thaíse, uma das minhas melhores amigas. Obrigado pelos anos que convivemos juntos e pelo amor e carinho que sempre me demonstrou. Obrigado dona Lecir e Sr. Rubens por que sempre me trataram com carinho. Vocês todos foram uma segunda família para mim.

A Aline, minha namorada. Obrigado por me apoiar e me fazer companhia esses últimos meses de faculdade. Meu amor, você está sendo muito importante para mim.

Aos meus grandes amigos da Naval: Elô, Thay, Diego A., Rafael, Bob, Marcos, Caio, Gelder, Mari, Salomão, Alexandre, Rodrigo, Diego L e Hélio. Obrigado pelos momentos de risadas e choros compartilhados durante esses anos. Com certeza não teria terminado esse curso se não tivesse vocês do meu lado.

Aos professores da Naval. Em especial ao Severino, Marta, Alho, Tatalo, Sphaier, Sanglard e Protásio. Seus ensinamentos foram muito importantes.

A Débora, uma mula. Mas uma grande amiga que sempre vou levar comigo. Obrigado pelas risadas e pelas cervejas. Com certeza ainda vamos compartilhar muitas mais.

Ao professor Carl, orientador e amigo, sem o qual não teria começado uma iniciação científica desde cedo nem teria terminado esse trabalho. Obrigado por acreditar em mim e despertar a curiosidade científica desde o começo da faculdade.

Ao professor Fabrício, meu outro orientador e amigo. Obrigado por tudo o que me ensinou ao longo desses anos no laboratório. Obrigado pela paciência e por confiar e acreditar sempre na minha capacidade como engenheiro e pesquisador. Com certeza não teria concluído essa etapa sem os seus ensinamentos.

A mãe do LAMCSO, Ivete. Muito obrigado por sempre estar disposta a ajudar e por se preocupar comigo. Obrigado pelos conselhos e brincadeiras.

Ao professor Breno. Obrigado pela confiança no meu trabalho e por acreditar na minha capacidade como pesquisador.

Aos demais colegas do LAMCSO, Daniel, Marcelo, Lucas, Rodrigo, Aldo, Mauro, Jú, Bruno M, Bruno J, Caio, JJ, Ramon e Renan. Obrigado pela amizade, brincadeiras e ensinamentos, todos fizeram do meu tempo no laboratório uma das melhores épocas da minha vida.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Naval e Oceânico.

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEMI-ACOPLADA PARA O PROJETO DE UM SISTEMA DE ANCORAGEM EM UMA PLATAFORMA SEMISSUBMERSÍVEL

Juan Pablo Inza Blanco

Abril/2013

Orientadores: Carl Horst Albrecht
Fabrício Nogueira Corrêa

Curso: Engenharia Naval e Oceânica

Na medida em que as companhias de petróleo avançam na exploração e produção de petróleo em lâminas d'água ultra profundas, maiores obstáculos são revelados, proporcionando aos engenheiros grandes desafios tecnológicos, principalmente no que se refere ao desenvolvimento de plataformas, sistemas de *risers* e de ancoragem compatíveis com estas condições.

Neste contexto, este Projeto de Graduação aplica uma Metodologia Semi-Acoplada no dimensionamento de um sistema de ancoragem para uma plataforma semissubmersível, visando uma redução no custo computacional na etapa de projeto preliminar.

Para atingir tais objetivos, fez-se uso do algoritmo de integração HTF-GA Acoplado e Semi-Acoplado e de testes numéricos de decaimento. Além disso, desenvolveu-se um estudo de caso real (baseado no projeto da plataforma P-18) para validação dos conceitos expostos e ajustes dos procedimentos de projeto adotados.

Palavras-chave: Sistemas Offshore, Metodologia Semi-Acoplada, HTF-GA, Projeto de Sistema de Ancoragem.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/ UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

SEMI- COUPLED METHODOLOGY APLICATION FOR A MOORING SYSTEM PROJECT
OF A SEMI SUBMERSIBLE PLATFORM

Juan Pablo Inza Blanco

April/2013

Advisors: Carl Horst Albrecht
Fabrício Nogueira Corrêa

Course: Naval and Ocean Engineering

As the petroleum companies advance in the exploration and production of oil at ultra-deep water layers, greater obstacles are revealed providing huge technological challenges to the engineers, especially as concerns to the development of offshore platforms and risers and mooring systems compatible with these conditions.

In this context, this Undergraduate Project applies a Semi-Coupled Methodology in the dimensioning of a mooring system for a semi-submersible platform, aiming a computational cost reduction in the preliminary stage of project.

In order to achieve these objectives, use has been made of the integration algorithm HTF-GA Coupled and Semi-Coupled and of numerical decay tests. Besides that, a real case of study has been developed (based on the platform P-18) to validate the exposed concept and to adjust the project proceedings adopted.

Keywords: Offshore Systems, Semi-Coupled Methodology, HTF-GA, Mooring System Project.

SUMÁRIO

1	<i>INTRODUÇÃO</i>	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Estrutura da Monografia	4
2	<i>SISTEMAS DE ANCORAGEM OFFSHORE</i>	6
2.1	Introdução	6
2.2	Configurações de Ancoragem	7
2.3	Sistemas de Ancoragem.....	10
2.4	Componentes de um Sistema de Ancoragem	15
3	<i>PROJETO ESTRUTURAL CLÁSSICO DE SISTEMAS DE ANCORAGEM</i>	23
3.1	Introdução	23
3.2	Conceitos Iniciais.....	23
3.3	Condições de Projeto e Combinações de Carregamento	26
3.4	Métodos de Análise.....	28
3.5	Critérios de Projeto	37
3.6	Procedimentos de Análise.....	44
3.7	Análise Transiente.....	48
3.8	Revisão das Normas de Projeto de Ancoragem	50
4	<i>METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE SISTEMAS FLUTUANTES OFFSHORE</i>	57
4.1	Introdução	57
4.2	Metodologia Desacoplada.....	57
4.3	Metodologia Acoplada.....	62
4.4	Metodologia Híbrida	64
4.5	Ferramentas Computacionais nas Etapas de Análise.....	68

5	<i>METODOLOGIA SEMI-ACOPLADA</i>	71
5.1	Introdução	71
5.2	Definição	72
5.3	Procedimento	73
6	<i>ESTUDO DE CASO</i>	77
6.1	Introdução	77
6.2	Descrição da Plataforma	77
6.3	Características das Simulações	84
6.4	Rigidez do Sistema	85
6.5	Coefficientes de Amortecimento	90
6.6	Resultados de Deslocamento Considerando Amortecimento	100
6.7	Resultados dos Esforços no Topo Considerando Amortecimento	104
6.8	Condições de Avaria	107
7	<i>CONSIDERAÇÕES FINAIS</i>	110
7.1	Conclusão	110
	<i>COMPARAÇÃO DE OFFSET</i>	110
7.2	Trabalhos Futuros	111
8	<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	112

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 – Evolução da Exploração Nacional de Petróleo no Mar [2].</i>	<i>1</i>
<i>Figura 2.1 - Linha de Ancoragem Convencional de um Sistema Flutuante.</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2.2 – Ancoragem em Catenária Convencional [15].</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2.3 – Comparação de ancoragem em catenária convencional e de ancoragem em Taut Leg.</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.4 – Ilustração de uma TLP com Ancoragem Vertical.</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.5 – Exemplo de Amarração em Quadro de Ancoragem.</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2.6 – Ilustração de um Sistema DICAS.</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2.7 –Turret Interno [16].</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.8 –Turret Externo do FPSO Fluminense.</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.9 – Sistema CALM.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.10 – Sistema CALM com Yoke da FPSO Albacora.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.11 – Sistema SALM. Fonte: API-RP2SK [11].</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.12 – Sistema de Posicionamento Dinâmico [11].</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.13 - Representação dos Tipos de Amarras.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.14 - Componentes de um Cabo Multi-Strand.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.15 – Principais tipos de Cabos de Aço.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.16 – Componentes de um Cabo de Poliéster [2].</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2.17 – Linha de ancoragem típica da Plataforma P-36 [17].</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2.18 – Tipos de Âncoras. Fonte: Vryhof Anchors Catalog [18].</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.19 – Ilustração de uma Estaca Torpedo.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.20 – Ilustração de um Molinete.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.21 – Ilustração de um Guincho de Tambor.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2.22 – Representação de Fairleads [11].</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3.1 – Representação das principais dimensões de uma ancoragem em catenária típica [19].</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3.2 –Deslocamento do topo de uma linha em catenária [19].</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3.3 – Curvas características de Força de Restauração e Tração x Offset [19].</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.4 – Exemplo de um histórico de tração de uma linha ao longo do tempo [19].</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.5 – Amostra dos picos de tração ao longo de uma série temporal [13].</i>	<i>43</i>
<i>Figura 3.6 – Distribuições de Weibull e Gumbel.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.1 – Etapa de Análise Hidrodinâmica da UF (Metodologia Desacoplada).</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4.2 – Modelo de um Cilindro Vertical Equivalente.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 4.3 – Esquema da Metodologia Acoplada.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 4.4 –Resposta harmônica de um Teste de Decaimento Numérico.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 6.1 – Plataforma P-18.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 6.2 – Sistema de referência do casco.</i>	<i>79</i>

<i>Figura 6.3 – Arranjo das linhas de ancoragem (vista superior).....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 6.4 – Direções de incidência dos Carregamentos Ambientais.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 6.5 – Curva de rigidez em surge com deslocamento na direção sul</i>	<i>86</i>
<i>Figura 6.6 – Curva de rigidez em surge com deslocamento na direção norte.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 6.7 – Curva de rigidez em sway com deslocamento na direção leste</i>	<i>88</i>
<i>Figura 6.8 – Curva de rigidez em sway com deslocamento na direção oeste</i>	<i>89</i>
<i>Figura 6.9 – Curva de decaimento numérico com movimento em surge</i>	<i>91</i>
<i>Figura 6.10 – Curva de decaimento numérico com movimento em sway</i>	<i>92</i>
<i>Figura 6.11 – Curvas para calcular os coeficientes de amortecimento a partir do decaimento em surge</i>	<i>94</i>
<i>Figura 6.12 – Curvas para calcular os coeficientes de amortecimento a partir do decaimento em sway</i>	<i>95</i>
<i>Figura 6.13 – Comparação de decaimento numérico em surge com o modelo amortecido.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 6.14 – Comparação de decaimento numérico em sway com o modelo amortecido.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 6.15 – Deslocamento em Surge da Combinação Ambiental Sul 2</i>	<i>102</i>
<i>Figura 6.16 – Tração de Topo da Linha de Ancoragem 8 na Combinação Ambiental Sudoeste 2</i>	<i>106</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.1 – Características dos principais tipos de cabos sintéticos e dos cabos de aço.</i>	<i>19</i>
<i>Tabela 3.1 – Recomendações de norma para os Métodos de Análise e Condições de Projeto [11]......</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 3.2 – Estimativa de offsets admissíveis para a operação dos Risers [11].</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 3.3 – Fatores de Segurança para a Tração nas Linhas de Ancoragem (API RP 2SK e ISO 19901-7).</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 3.4 – Fatores de Segurança para a Tração nas Linhas de Ancoragem (DNV OS-301)......</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 6.1 – Características geométricas e peso do casco</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 6.2 – Características dos risers e umbilicais</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 6.3 – Propriedades dos materiais.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabela 6.4 – Características gerais das linhas de ancoragem.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabela 6.5 – Carregamento ambiental.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 6.6 – Força e rigidez com deslocamento surge em direção sul.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabela 6.7 – Força e rigidez com deslocamento surge em direção norte</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 6.8 – Força e rigidez com deslocamento sway em direção leste</i>	<i>88</i>
<i>Tabela 6.9 – Força e rigidez com deslocamento sway em direção oeste</i>	<i>89</i>
<i>Tabela 6.10 – Períodos naturais da plataforma.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabela 6.11 – Coeficientes linear e quadrático em surge</i>	<i>96</i>
<i>Tabela 6.12 – Coeficientes linear e quadrático em sway</i>	<i>96</i>
<i>Tabela 6.13 – Deslocamentos Máximos</i>	<i>100</i>
<i>Tabela 6.14 – Comparação dos Deslocamentos na Combinação S2.....</i>	<i>103</i>
<i>Tabela 6.15 – Trações de Topo Máximas.....</i>	<i>104</i>
<i>Tabela 6.16 – Comparação das Trações de Topo Máximas na Combinação SW2.....</i>	<i>105</i>
<i>Tabela 7.1 – Comparação dos Resultados das Formulações Acoplada e Semi-Acoplada.....</i>	<i>110</i>

NOMENCLATURA

ALS: *Accidental Limit State.*

API: *American Petroleum Institute.*

BOP: *Blowout Preventer.*

BTL: *Break Test Load.*

CA: *Coeficiente de Massa Adicionada.*

CALM: *Catenary Anchor Leg Mooring.*

CD: *Coeficiente de Arraste.*

CM: *Coeficiente de Inércia.*

DNV: *Det Norske Veritas.*

DP: *Dynamic Positioning.*

DFT: *Discrete Fourier Transform.*

DICAS: *Differentiated Compliance Anchoring System.*

EA: *Módulo de Elasticidade.*

EF: *Elemento Finito.*

FFT: *Fast Fourier Transform.*

FLS: *Fatigue Limit State.*

FPSO: *Floating Production Storage and Offloading.*

GPS: *Global Positioning System.*

Hs: *Altura Significativa.*

HTF-GA: *Hybrid Time-Frequency Domain with Green Approach.*

ISO: *International Organisation for Standardisation.*

ImFGA: *Implicit Fourier Green Approach.*

LA: *Linha de Ancoragem.*

LDA: *Lâmina d'Água.*

LRFD: *Load and Resistance Factor Design.*

MBS: *Minimum Breaking Strength.*

MODU: *Mobile Offshore Drilling Unit.*

MPM: *Most Probable Maximum.*

RAO: *Response Amplitude Operators.*

SALM: *Single Anchor Leg Mooring.*

SCR: *Steel Catenary Riser.*

SEPLA: *Suction Embedded Plate Anchor.*

SGO: *Sistema de Gerenciamento de Obstáculos.*

SLS: *Serviceability Limit States.*

SM: *Spread Mooring.*

SPM: *Single Point Mooring.*

TDP: *Touch Down Point.*

TLP: *Tension Leg Platform.*

Tp: *Período de Pico.*

UF: *Unidade Flutuante.*

ULS: *Ultimate Limit State.*

VLA: *Vertical Lift Anchor.*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Atualmente grande parte da produção mundial de petróleo encontra-se no mar. Conseqüentemente, as atividades de exploração de petróleo (exploração, produção e armazenamento) em área *offshore* adquiriram extrema importância econômica nos países produtores, exigindo por parte destes altos investimentos em tecnologia e mão-de-obra qualificada.

A partir de 2005 a Petrobras deu início à campanha exploratória marítima do país numa região denominada de Pré-Sal, que está situada numa faixa de 800 quilômetros de extensão e 200 quilômetros de largura entre os estados do Espírito Santo e Santa Catarina. Nesta área, o petróleo e o gás natural encontram-se contidos em rochas ultra profundas localizadas abaixo da camada de sal (figura 1.1), estando sujeitos a elevados níveis de temperatura e pressão.

Estima-se que o Campo de Tupi possua uma reserva de 5 a 8 bilhões de barris de petróleo de ótima qualidade, o que contrasta com os 3 bilhões de barris de petróleo pesado (má qualidade) e gás do Campo de Roncador, que até então possuía o maior volume de óleo do Brasil [1].

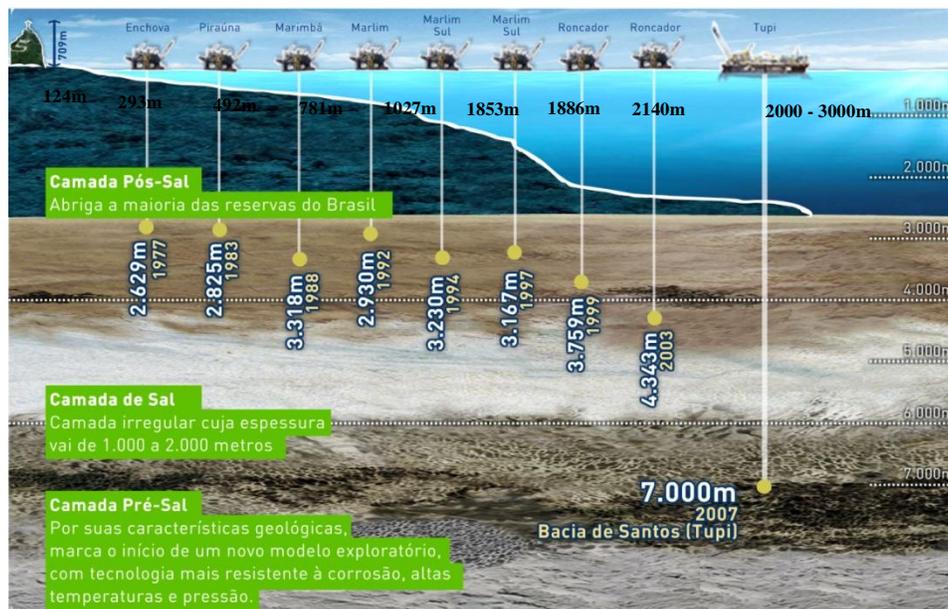


Figura 1.1 – Evolução da Exploração Nacional de Petróleo no Mar [2].

Na medida em que as descobertas de jazidas petrolíferas avançam para lâminas d'água ultra profundas (acima de 2000 metros), maiores obstáculos são revelados proporcionando à engenharia de infraestrutura *offshore* grandes desafios tecnológicos, principalmente no que se refere ao desenvolvimento de plataformas, sistemas de *risers* e ancoragem compatíveis com esta nova condição.

Neste cenário, um projeto que garanta um sistema de ancoragem seguro e confiável torna-se essencial, já que esse sistema é responsável pela manutenção do sistema flutuante em uma posição que não afete às atividades de exploração.

Pelas razões apresentadas nos parágrafos anteriores, o desenvolvimento de novas ferramentas de análise e de metodologias de projeto de sistemas de ancoragem e *risers* que garantam maior confiabilidade e integridade estrutural aos seus componentes e ao sistema flutuante *offshore* por completo são de fundamental importância às atividades de exploração de petróleo.

Nos últimos anos, o desenvolvimento usual dos projetos das linhas de ancoragem e *risers* consistia no uso de uma metodologia de análise desacoplada, onde se considerava pouca ou nenhuma interação entre os projetos destes sistemas. Além disso, a contribuição das linhas para análise de movimentos do casco no projeto do sistema de ancoragem era considerada de forma simplificada, ou seja, as ancoragens e *risers* eram representados por coeficientes escalares de massa, rigidez e amortecimento introduzidos nas equações do movimento da UF. Em seguida, os movimentos assim calculados eram inseridos como condição de contorno no modelo de Elementos Finitos de cada *riser* visando à realização da análise estrutural dessas linhas. Desta forma, pode-se dizer que esta metodologia incorpora uma interação, ainda que pequena, entre os projetos de sistemas de ancoragem (para análise de movimento da UF) e *risers*.

Entretanto, esta Metodologia Desacoplada torna-se ineficiente para a maioria de plataformas flutuantes projetadas atualmente, visto que estas geralmente estão localizadas em lâminas d'água cada vez mais profundas com grande número de linhas conectadas a elas, de forma que as aproximações que envolvem o desacoplamento do casco com suas linhas geram grandes imprecisões nos resultados. Estes fatos fizeram surgir a necessidade de considerar uma maior integração entre o sistema de ancoragem e *risers* através da Metodologia Acoplada que

estabelece o uso da formulação acoplada para simular ao mesmo tempo, na análise de movimentos do casco, os *risers* e as linhas de ancoragem, ambas modeladas por malhas de elementos finitos refinadas. No entanto, o uso de tal formulação ainda resulta em um elevado custo computacional pela necessidade da geração de modelos numéricos com muitos graus de liberdade.

Recentemente, pesquisas [3, 4, 5, 6] têm sido realizadas objetivando a implantação de uma Metodologia de Análise Híbrida nos projetos de sistemas flutuantes *offshore*, visando unir as vantagens das Metodologias de Análise Acoplada e Desacoplada. Em outras palavras, a aplicação da Metodologia de Análise Híbrida busca introduzir gradativamente as formulações acopladas no projeto, garantindo um maior nível de integração entre os componentes dos sistemas flutuantes (ancoragens, *risers* e casco), sem, no entanto, gerar modelos com um custo computacional muito elevado.

1.2 Objetivos

Atualmente, a maioria das empresas consagradas no ramo *offshore* como a Petrobras, já assimilaram a necessidade de utilização de formulações acopladas para a execução dos projetos de ancoragem e *risers* nas atuais condições: lâmina d'água ultra profunda e unidade flutuante com elevada quantidade de linhas. Entretanto, constata-se que a equipe de projetistas de *risers* e a equipe de projetistas de ancoragem ainda pouco interagem, o que não permite a obtenção de uma maior integração entre essas duas linhas de projeto necessárias para o dimensionamento completo e mais econômico do sistema flutuante.

A partir desta percepção, pesquisas vêm sendo realizadas visando o desenvolvimento de novas ferramentas de análise e procedimentos para que possam ser inseridos numa Metodologia Híbrida de Projeto que permita uma maior integração entre ambas as equipes de projetistas.

Por isto, além da utilização das formulações acopladas já comumente divulgadas e validadas por trabalhos anteriores [5, 7, 8], o objetivo principal deste trabalho será a aplicação de uma técnica de análise baseada na Metodologia Semi-Acoplada com o algoritmo de integração de casco HTF-GA [9] para o dimensionamento de um sistema de ancoragem para uma plataforma semissubmersível, visando uma redução no custo computacional na etapa de projeto preliminar.

Os resultados desta aplicação serão verificados usando uma formulação acoplada no mesmo sistema flutuante. Será feita uma comparação dos resultados obtidos de ambas as formulações para o passeio da plataforma e a tração de topo das linhas de ancoragem para uma condição ambiental aplicada em várias direções. Porém o modelo numérico desenvolvido será o mesmo, ou seja, tanto a análise acoplada como a semi-acoplada serão realizadas utilizando o mesmo modelo numérico do sistema flutuante.

A ferramenta computacional utilizada para o desenvolvimento do presente trabalho será o programa SITUA-Prosim [10], desenvolvido pelo Laboratório de Métodos Computacionais e Sistema *Offshore* (LAMCSO), da COPPE/UFRJ. Este programa permite a análise dinâmica não-linear de sistemas flutuantes baseando-se em uma formulação acoplada, onde se considera o modelo hidrodinâmico do casco da plataforma, integrado a um modelo de elementos finitos das linhas de ancoragem e *risers* em uma única estrutura de código e de dados.

1.3 Estrutura da Monografia

Este trabalho encontra-se estruturado como segue:

O Capítulo 2 descreve os principais componentes que constituem uma linha de ancoragem típica, as configurações de ancoragem mais comumente utilizadas, além dos tipos de sistemas de ancoragem de unidades flutuantes de exploração *offshore*.

O Capítulo 3 descreve as metodologias e práticas tradicionais referentes ao projeto de sistemas de ancoragem, segundo as normas API RP 2SK [11], ISO 19901-7 [12], DNV OS-301 [13] e API RP 2SM [14].

O Capítulo 4 apresenta as diferentes estratégias de análise de sistemas flutuantes *offshore*: Metodologia Desacoplada, Acoplada e Híbrida. Além disso, descrevem-se as ferramentas computacionais utilizadas em cada etapa de análise, no contexto de um projeto híbrido.

No Capítulo 5, é apresentada a Metodologia Semi-Acoplada e o procedimento de aplicação desta metodologia com o algoritmo de integração do casco HTF-GA.

O Capítulo 6 apresenta o estudo de caso de uma plataforma Semissubmersível com lâmina d'água de aproximadamente 900 metros.

Finalmente, no Capítulo 7 são apresentadas as considerações finais da monografia, bem como as sugestões para estudos futuros.

2 SISTEMAS DE ANCORAGEM *OFFSHORE*

2.1 Introdução

Uma unidade flutuante de exploração *offshore* necessita que a sua posição no mar esteja dentro de uma região que possibilite a realização de suas operações em segurança. Esta garantia é concedida pelo seu sistema de ancoragem, que tem como principal função interligar a UF ao leito-marinho através de seus componentes, o que fornece à plataforma passeios reduzidos devido à atuação das forças restauradoras ou através da elasticidade das linhas.

A figura 2.1 ilustra a configuração de uma linha de ancoragem convencional de uma plataforma flutuante.

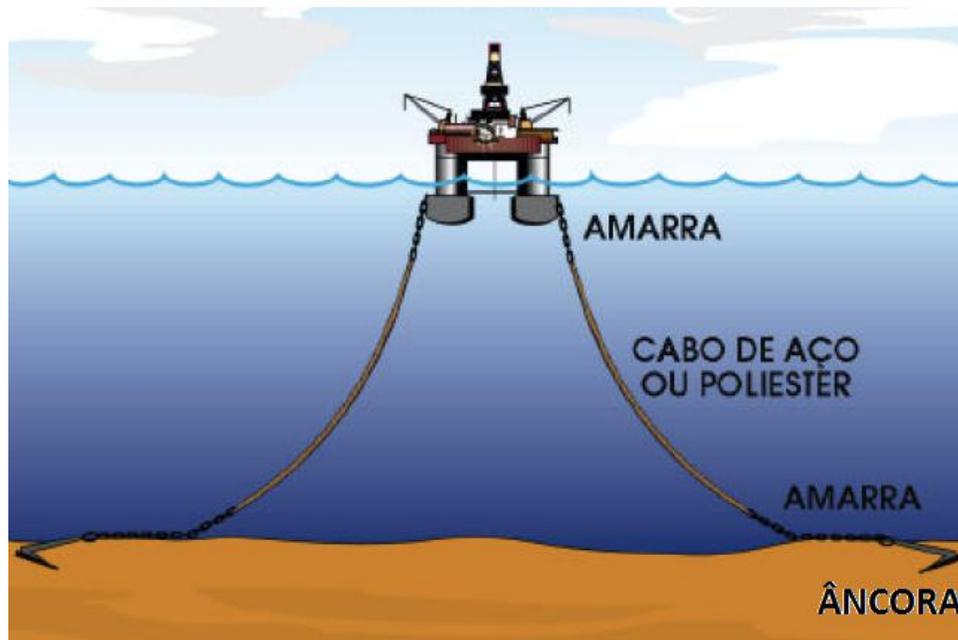


Figura 2.1 - Linha de Ancoragem Convencional de um Sistema Flutuante.

Dessa forma, uma linha de ancoragem típica (figura 2.1) apresenta uma configuração que une três dos seus componentes principais (amarras, cabos de aço e cabos sintéticos), entretanto a composição da linha pode variar para diferentes situações. As principais configurações de uma linha de ancoragem são:

- Configuração somente com Amarras;

- Configuração com Amarras e Cabos de Aço;
- Configuração com Amarras e Cabos Sintéticos;
- Configuração com Amarras, Cabos de Aço e Cabos Sintéticos;

A configuração somente com amarras pode ser encontrada em sistemas flutuantes ancorados em lâminas d'água rasas (menores que 100 metros). A configuração com amarras e cabos de aço (configuração convencional) é a mais utilizada em lâminas d'água intermediárias e profundas. Neste último caso, a maior parte do comprimento da linha deve ser em cabos de aço, visando à diminuição de custo de materiais e do peso submerso total. Em lâminas d'água ultra profundas (acima de 2000 metros), a utilização da configuração convencional torna-se inviável, sendo somente possível a implantação das combinações de amarras com cabos sintéticos ou amarras com cabos de aço e cabos sintéticos, devido à necessidade de diminuição ainda maior no peso linear das linhas e de ganho em elasticidade.

Na sequência deste capítulo serão apresentados os itens que compõem um sistema de ancoragem convencional, além da descrição das configurações de ancoragem utilizadas em unidades flutuantes *offshore*. Finalmente, apresentar-se-ão os principais sistemas de ancoragem empregados atualmente.

2.2 Configurações de Ancoragem

Nesta seção, serão apresentadas em ordem cronológica de desenvolvimento, as principais configurações de ancoragem empregadas em plataformas flutuantes.

2.2.1 Catenária Convencional

A Catenária Convencional consiste no tipo de ancoragem mais comum, onde o cabo de aço ou amarra encontra-se na forma de catenária (curva obtida pela suspensão da linha em suas extremidades, sendo que a única força atuante é o seu peso próprio).

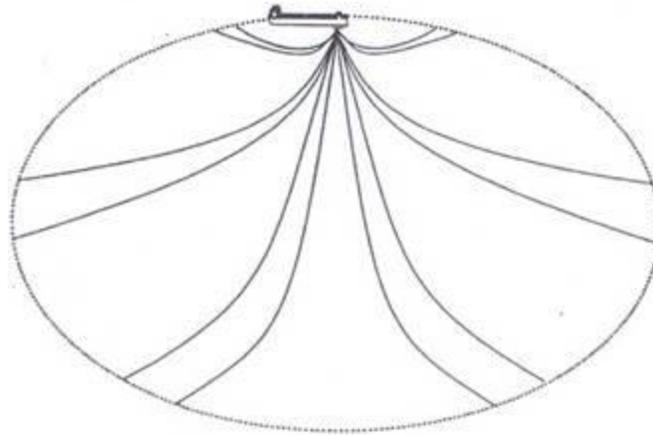


Figura 2.2 – Ancoragem em Catenária Convencional [15].

A ancoragem em catenária caracteriza-se por permitir maiores passeios à embarcação, sem a necessidade da utilização de âncoras com elevado poder de garra, visto que o atrito do trecho da linha apoiado no fundo do mar já absorve grande parte dos esforços horizontais. Entretanto, pelo fato da catenária necessitar de um considerável comprimento de linhas, este tipo de ancoragem está muito suscetível à interferência com equipamentos submarinos ou outras linhas de UF's próximas. Ou seja, exige um grande raio de ancoragem.

2.2.2 Taut Leg

A ancoragem em *Taut Leg* foi desenvolvida para contornar as desvantagens da catenária convencional. Ela apresenta um menor comprimento de linha, pois estas se encontram mais retesadas, formando um ângulo de topo com a vertical de aproximadamente 45 graus, conseqüentemente necessitando de um menor raio de ancoragem. Geralmente, as linhas são constituídas de material sintético e são ancoradas com VLA's (*Vertical Lift Anchors*), estacas de sucção ou estacas torpedo, que possuem uma elevada rigidez vertical, garantindo menores *offsets* à UF.

A figura 2.3 apresenta uma comparação de uma linha em catenária convencional com outra ancorada em *taut leg*, indicando a diferença nos raios de ancoragem.

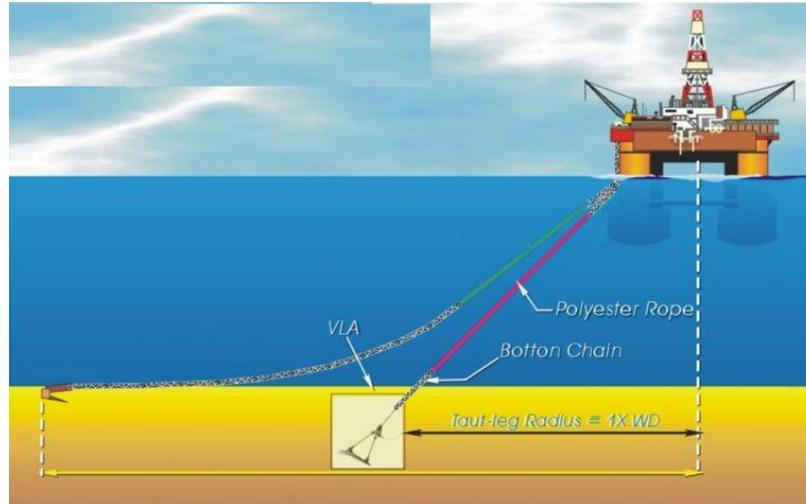


Figura 2.3 – Comparação de ancoragem em catenária convencional e de ancoragem em Taut Leg.

2.2.3 Ancoragem Vertical

A ancoragem vertical foi desenvolvida para um recente conceito de plataforma semissubmersível: a TLP (*Tension Leg Platform*). Ela é composta de tendões verticais tracionados com elevada rigidez vertical e baixa rigidez horizontal. Isto faz com que os períodos naturais dos movimentos de *Heave*, *Roll* e *Pitch* sejam pequenos (da ordem de 2 a 4 segundos) e os de *Surge*, *Sway* e *Yaw* sejam altos (da ordem de 100 segundos).

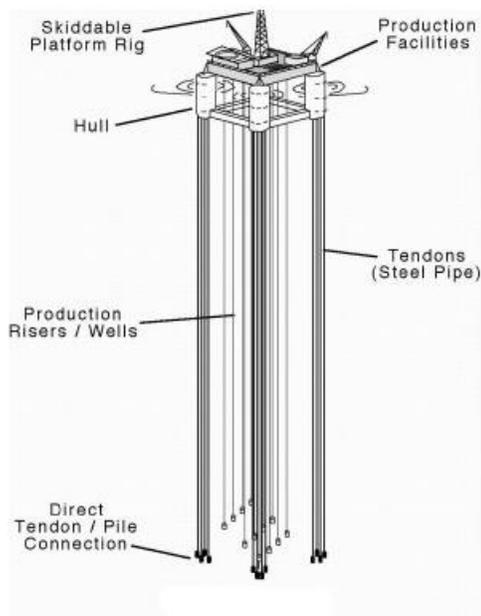


Figura 2.4 – Ilustração de uma TLP com Ancoragem Vertical.

2.3 Sistemas de Ancoragem

Os Sistemas de Ancoragem empregados em unidades flutuantes de exploração de petróleo podem ser classificados em três tipos principais:

- Amarração com Quadro de Ancoragem – SM (*Spread Mooring*);
- Ancoragem de Ponto Único – SPM (*Single Point Mooring*);
- Posicionamento Dinâmico – DP (*Dynamic Positioning*).

2.3.1 Amarração com Quadro de Ancoragem – SM

A Amarração em Quadro de Ancoragem foi o sistema de ancoragem pioneiro empregado em plataformas flutuantes, sendo que atualmente ainda é considerado o sistema mais utilizado. Na ancoragem SM (*Spread Mooring*), as linhas estão posicionadas simetricamente no entorno da embarcação (figura 2.5).

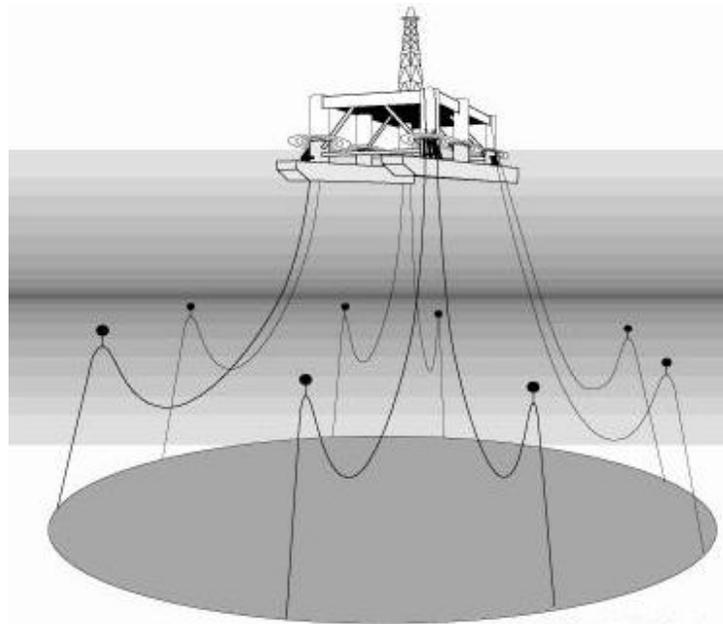


Figura 2.5 – Exemplo de Amarração em Quadro de Ancoragem.

As plataformas com Ancoragem SM devem resistir aos esforços ambientais em qualquer direção, visto que este sistema não permite seu alinhamento na direção de incidência dos carregamentos ambientais.

Na década de 90, a empresa Petrobras desenvolveu um novo conceito de ancoragem SM utilizada para a ancoragem de FPSO's na costa brasileira, chamada de DICAS (*Differentiated Compliance Anchoring System*). Este consiste basicamente em linhas de ancoragem conectadas na popa e proa do navio. Esta ligação permite que as extremidades opostas da UF possuam diferentes rigidezes obtidas através de diferentes níveis de pré-trações nas linhas. Esta característica do Sistema DICAS garante ao navio um pequeno aproamento a favor da direção dos carregamentos ambientais atuantes.

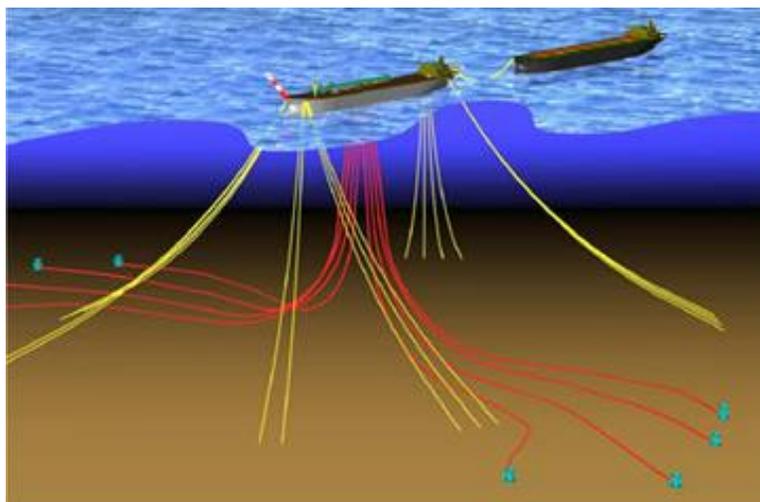


Figura 2.6 – Ilustração de um Sistema DICAS.

2.3.2 Ancoragem de Ponto Único – SPM

A Ancoragem de Ponto Único (*Single Point Mooring*) é o mais utilizado em FPSO's. Este sistema é caracterizado por permitir que o navio gire livremente ao redor de suas linhas de ancoragem, favorecendo ao seu alinhamento na direção de incidência dos carregamentos ambientais, reduzindo o impacto destes no casco. Nos itens subsequentes serão apresentados os tipos de Ancoragem SPM.

2.3.2.1 Ancoragem com Turret

Neste sistema as linhas de ancoragem e *risers* são conectadas a um equipamento chamado de *turret*, que permite a rotação do navio em torno do eixo do seu núcleo. Os *turrets* podem ser internos ou externos, fixos ou desconectáveis à embarcação. As figuras 2.7 e 2.8 ilustram o *turret* interno [16] e o *turret* externo do FPSO Fluminense da empresa Shell.

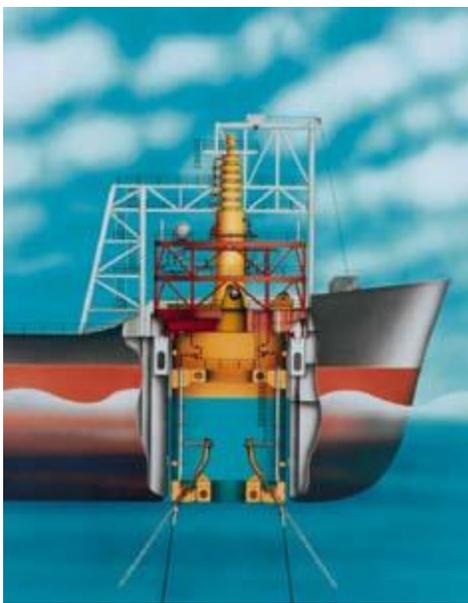


Figura 2.7 –Turret Interno [16].



Figura 2.8 –Turret Externo do FPSO Fluminense.

2.3.2.2 CALM (Catenary Anchor Leg Mooring)

O Sistema CALM baseia-se em uma boia que conectam as linhas e os *risers*, sendo ela, por sua vez, ligada ao navio por um cabo de material sintético (figura 2.9).



Figura 2.9 – Sistema CALM.

Este sistema é desconectado da UF quando as condições do mar apresentam uma tormenta, visto que, como a resposta aos esforços ambientais da boia é diferente da resposta do navio, inicia-se um movimento relativo horizontal entre eles. Para solucionar tal problema, desenvolveram-se estruturas rígidas de acoplamento (*yoke*) entre boia e navio, para que não seja mais necessária a desconexão do sistema em casos extremos.

A figura 2.10 ilustra o Sistema CALM com *yoke* da FPSO Albacora localizada na Bacia de Campos, Rio de Janeiro.



Figura 2.10 – Sistema CALM com Yoke da FPSO Albacora.

2.3.2.3 SALM (Single Anchor Leg Mooring)

O Sistema SALM consiste num *riser* rígido vertical com uma boia flutuadora na superfície e acoplado a Unidade Flutuante através de uma estrutura rígida metálica, conforme apresentado na figura 2.11.

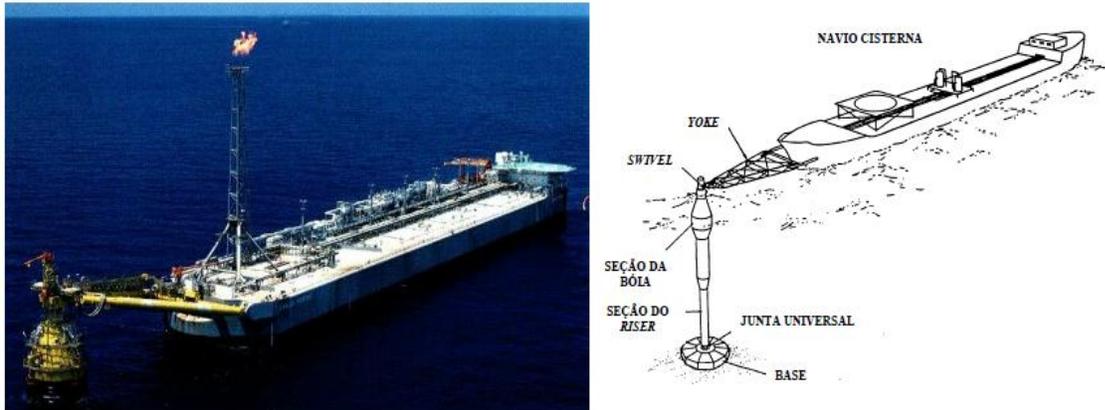


Figura 2.11 – Sistema SALM. Fonte: API-RP2SK [11].

2.3.3 Posicionamento Dinâmico – DP

O Sistema de Posicionamento Dinâmico (*Dynamic Positioning*) é muito utilizado em UF's que permanecem ancoradas temporariamente (atividades de perfuração, completação e intervenção em poços), em situações em que o fundo do mar encontra-se congestionado com equipamentos submarinos e linhas de outras unidades flutuantes, ou em lâminas d'água ultra profundas.

A ancoragem com DP mantém a UF estacionária através de um sistema de controle composto de sonares e GPS, além de um circuito de propulsores (*thrusters*), que devem ser capazes de gerar uma impulsão no sentido longitudinal e transversal do navio, e de gerar um torque em torno do eixo vertical do seu centro de gravidade.

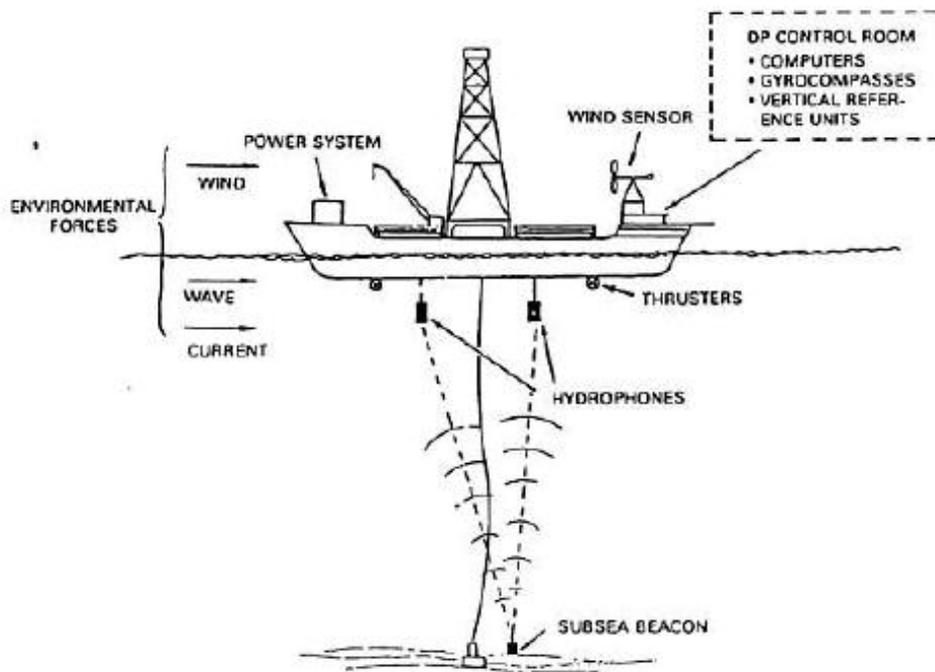


Figura 2.12 – Sistema de Posicionamento Dinâmico [11].

2.4 Componentes de um Sistema de Ancoragem

2.4.1 Amarras

As amarras são elos cujo material de fabricação é o aço e representam o elemento mais comum em um sistema de ancoragem convencional. Elas podem ser do tipo com ou sem malhete, sendo que a primeira é a mais utilizada em unidades flutuantes de exploração de petróleo (figura 2.13).

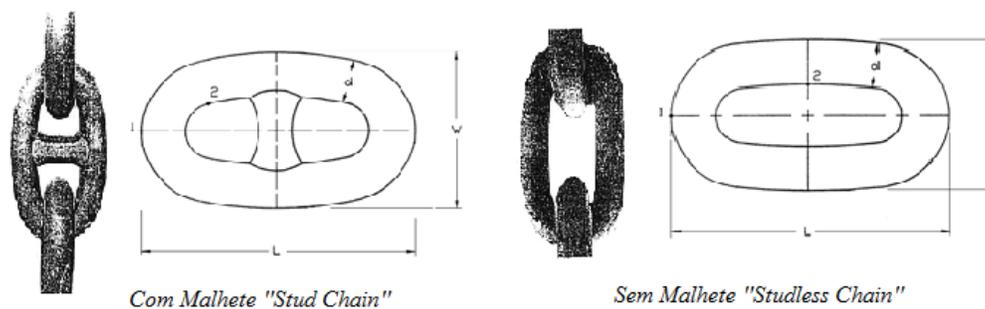


Figura 2.13 - Representação dos Tipos de Amarras.

De acordo com a API RP 2SK [11], as amarras podem ser classificadas quanto a sua resistência em R3 (grau 3), ORQ (*Oil Rig Quality*) e R4 (mais resistente). Elas podem romper por ultrapassar a carga de ruptura nominal ou por fadiga, sendo que esta ocorre principalmente quando a FPSO ou semissubmersível trabalha com tensões elevadas.

As correntes adjacentes de uma amarra são unidas por um elo metálico, sendo o mais comum o conhecido como *Kenter*. Os elos de ligação apresentam a mesma tensão de ruptura das amarras, no entanto são mais suscetíveis à fadiga, por isso devem ser evitados ao máximo.

2.4.2 Cabos de Aço

Os cabos de aço são constituídos de fios enrolados de forma helicoidal para se formar uma perna, garantindo a este elevada rigidez axial e flexibilidade. Eles podem possuir apenas uma perna (*single-strand*) ou um conjunto de pernas (*multi-strand*) que constituem um único cabo, sendo este último o mais utilizado em ancoragens. O conjunto de pernas deste tipo de cabo é enrolado em torno de uma alma de aço que garante uma maior resistência ao esmagamento e amassamento do cabo (figura 2.14).

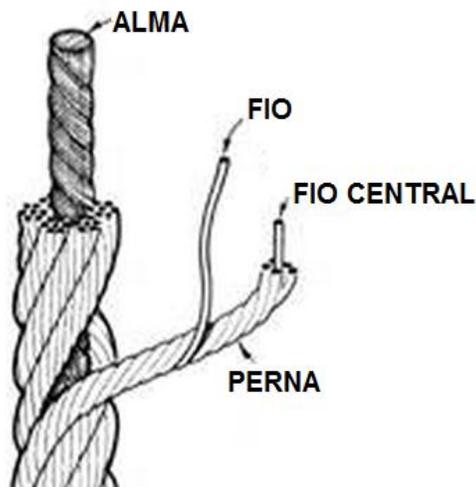


Figura 2.14 - Componentes de um Cabo Multi-Strand.

A figura 2.15 apresenta os principais tipos de cabos de aço utilizados como componente de ancoragem.

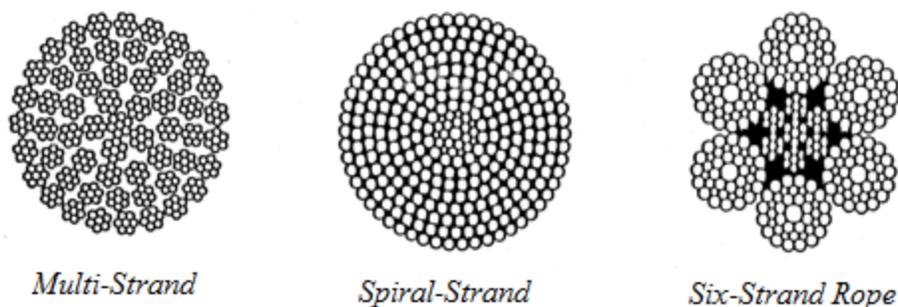


Figura 2.15 – Principais tipos de Cabos de Aço.

Os cabos *six-strand* por apresentarem fácil manuseio são muito utilizados em MODU's ou outras unidades flutuantes que ficam ancoradas temporariamente. Os cabos *spiral-strand* apresentam maior durabilidade e são mais resistentes à fadiga, porém seu custo é maior. Além disso, este tipo possui um raio de curvatura mínimo de cerca de 22 vezes o seu diâmetro externo, o que dificulta o seu manuseio.

Os cabos de aço são mais suscetíveis à corrosão que as amarras, portanto eles devem ser galvanizados na sua fabricação, além da maioria possuir uma cobertura plástica contra desgastes e corrosão.

2.4.3 Cabos Sintéticos

Os cabos sintéticos, especialmente os constituídos de poliéster, têm aplicação mais recente na indústria *offshore* como componente de ancoragem, devido à necessidade crescente de operar em lâminas d'água ultra profundas. Como as amarras e cabos de aço possuem um peso submerso bastante elevado, tornou-se necessário a utilização de um material mais leve e não menos resistente e flexível, que trabalhasse em conjunto com estes citados, garantindo um menor custo ao sistema de ancoragem.

Além disso, o desenvolvimento do tipo de ancoragem *taut leg* (apresentado na seção 2.2.2) exigiu o emprego de um material que permitisse um maior alongamento que os cabos de aço, pois esta característica é a principal responsável pela absorção dos movimentos dinâmicos da plataforma pelas linhas pré-tensionadas, reduzindo consideravelmente o passeio destas.

A figura 2.16 apresenta os principais constituintes de um cabo típico de poliéster e a figura 2.17 ilustra uma linha ancoragem típica da plataforma P-36 da empresa Petrobras.

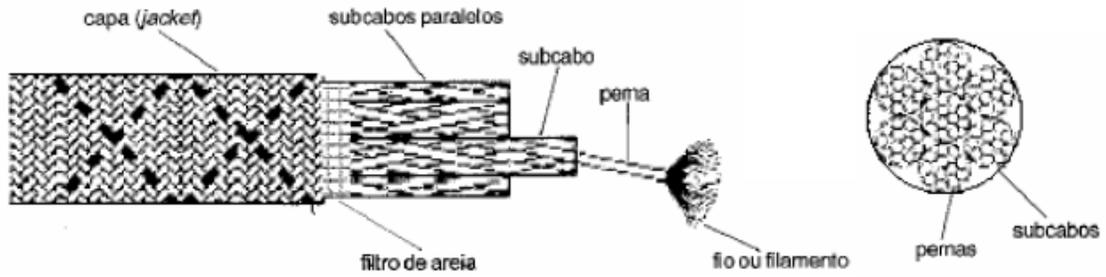


Figura 2.16 – Componentes de um Cabo de Poliéster [2].

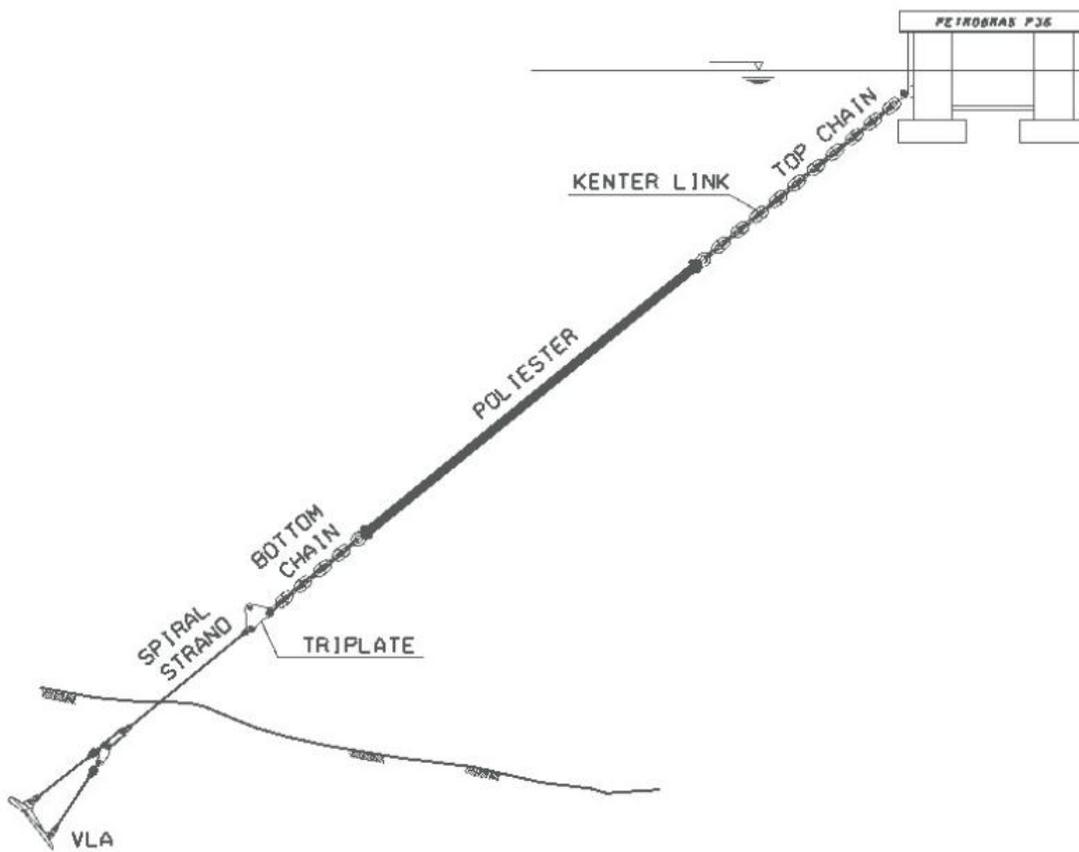


Figura 2.17 – Linha de ancoragem típica da Plataforma P-36 [17].

A tabela 2.1 faz um comparativo entre as principais propriedades dos cabos sintéticos (Nylon, Poliéster e Polipropileno) e dos cabos de aço.

Tabela 2.1 – Características dos principais tipos de cabos sintéticos e dos cabos de aço.

Características	Cabos Sintéticos			Cabos de Aço
	Nylon	Poliéster	Polipropileno	
Peso Específico (kgf/m ³)	1.14	1.38	0.91	7.86
Resistência à Tração (MPa)	850	1050	500	2160
Módulo de Elasticidade (MPa)	5500	9000	4200	200000
Alongamento até a Ruptura (%)	18%	12.5%	12%	1.1%
Temperatura de Fusão (°C)	219	256	170	1600
Absorção de Água (% do Peso Seco)	9%	1%	0%	0%
Resistência Molhada / Resistência Seca (%)	80 – 85%	100%	100%	100%
Resistência à Abrasão	Boa	Muito Boa	Muito Boa	Muito Boa
Resistência aos Raios UV	Boa	Boa	Boa	Muito Boa
Resistência Química	Boa	Boa	Boa	Muito Boa
Resistência à Fadiga devido a Compressão Axial	Fraca	Boa	Muito Boa	Muito Boa
<i>Creep</i>	Médio	Baixo	Médio	Muito Baixo

2.4.4 Âncoras

As âncoras são componentes de suma importância para a ancoragem de plataformas flutuantes, pois fornecem a força e rigidez necessária para conter as linhas de ancoragem na sua posição de projeto. Esta resistência oferecida é proveniente principalmente de seu peso próprio (âncoras de arrasto ou convencionais) ou de forças de sucção (âncoras verticais).

Os tipos de âncoras convencionais caracterizam-se pela elevada rigidez horizontal e rigidez vertical relativamente pequena. No entanto, nos projetos de ancoragem mais recentes, os quais serão apresentados na seção seguinte, estão presentes âncoras especiais como a VLA (*Vertical Lift Anchor*) e as âncoras de sucção, que trabalham principalmente resistindo aos esforços verticais, garantindo ao projeto menores comprimentos de linhas ancoragem.



Figura 2.18 – Tipos de Âncoras. Fonte: Vryhof Anchors Catalog [18].

De acordo com CHAKRABARTI [19], o poder de garra de uma âncora de arrasto varia em função do seu peso, geometria, penetração e do tipo de solo em que ela será ancorada. Atualmente, este tipo de âncora ainda é o mais utilizado em lâminas d'água rasas e intermediárias, principalmente pelo seu baixo custo relativo, facilidade de instalação e por permitir a realização de testes de carga antes da instalação completa da linha.

As âncoras de sucção geralmente são utilizadas em lâminas d'água profundas, pois são capazes de suportar as cargas verticais elevadas impostas pela UF. Elas apresentam uma estrutura metálica com geometria cilíndrica (figura 2.18) e enrijecedores internos. O processo de instalação é iniciado com uma penetração parcial devido ao seu peso próprio submerso. Em seguida, a água contida dentro da âncora de sucção é bombeada, o que gera um diferencial de pressão responsável pela continuação da cravação da âncora no solo, atingindo assim sua penetração final.

O processo de instalação das âncoras de placa VLA's é realizado de forma similar às âncoras de arrasto. Entretanto, a sua geometria permite que ela penetre em profundidades muito maiores, onde o solo é mais resistente, contribuindo com o seu elevado poder de garra. No momento em que a âncora atinge sua profundidade de projeto, a lâmina da placa é rotacionada, assentando-se numa posição perpendicular a linha de ancoragem.

As estacas torpedo (figura 2.19) representam outro tipo de tecnologia mais recente de âncoras, patenteada pela empresa Petrobras, podendo ser utilizadas tanto em MODU's como em semissubmersíveis e FPSO's. A instalação deste tipo de âncora é realizada por gravidade, onde a

estaca é transportada até certa altura do leito-marinho e abandonada em direção ao solo. As aletas laterais são responsáveis por permitir uma maior rigidez axial à estaca, além de manter a sua verticalidade durante o lançamento.



Figura 2.19 – Ilustração de uma Estaca Torpedo.

2.4.5 Guincho

Os guinchos são equipamentos responsáveis por fornecer a tração necessária ao sistema de ancoragem para recolher suas linhas ou liberá-las. Eles são classificados basicamente em dois tipos [11]:

- **Molinete:** consiste em uma coroa de barbotin (*slotted wildcat*) acionada por um motor elétrico com caixa de redução. Este equipamento é utilizado para recolher amarras que são puxadas enquanto a coroa gira.



Figura 2.20 – Ilustração de um Molinete.

- **Guincho de Tambor:** são utilizados para manuseio de cabos de aço e possuem um grande tambor onde o cabo é enrolado.

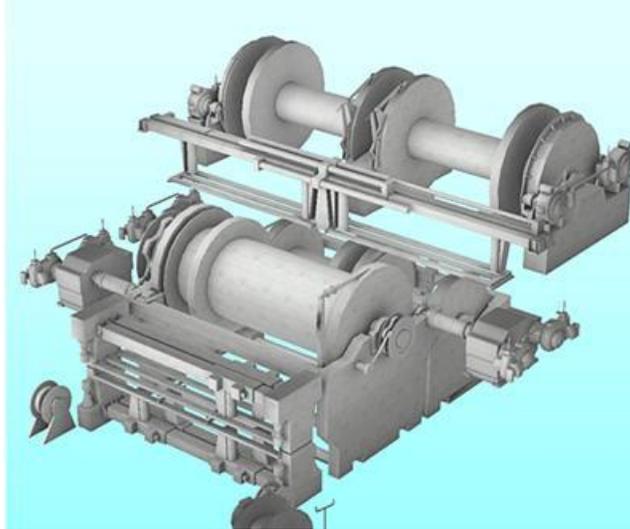


Figura 2.21 – Ilustração de um Guincho de Tambor.

2.4.6 Fairlead

Os *Fairleads* são polias conectadas na estrutura da plataforma que são responsáveis por permitir que as amarras fiquem na posição vertical para que sejam recolhidas pelos guinchos, conforme mostrado na figura 2.22.

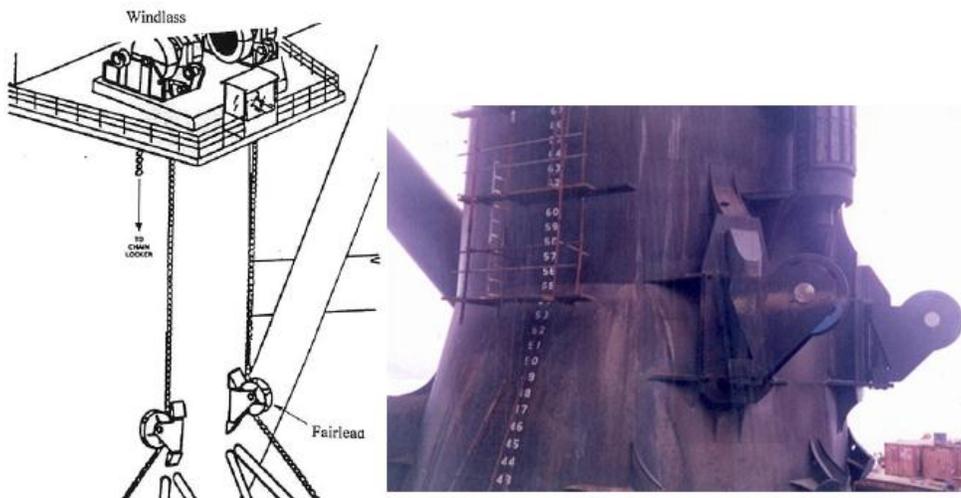


Figura 2.22 – Representação de Fairleads [11].

3 PROJETO ESTRUTURAL CLÁSSICO DE SISTEMAS DE ANCORAGEM

3.1 Introdução

Como mencionado anteriormente, o principal objetivo de um sistema de ancoragem consiste em manter a unidade flutuante dentro de uma região segura de operação. Dessa forma, um projeto adequado deve tornar o sistema suficientemente complacente para evitar forças excessivas atuando na plataforma, além de torná-lo rígido o suficiente para que não sejam causados danos a alguns componentes de extrema importância, como os *risers* de perfuração e produção.

Neste contexto, este capítulo busca descrever as metodologias e práticas tradicionais referentes ao projeto de sistemas de ancoragem de uma plataforma flutuante, segundo as normas vigentes.

3.2 Conceitos Iniciais

Nesta seção, são abordados conceitos necessários para o melhor entendimento dos procedimentos envolvidos em projetos de sistemas de ancoragem.

3.2.1 Linhas em Catenária

Define-se catenária como uma curva formada por um fio suspenso fixado em suas extremidades, estando sujeito apenas à ação da gravidade. Atualmente, a maioria das linhas de ancoragem de unidades flutuantes apresenta esta configuração, onde suas extremidades são fixadas no casco e na âncora, sendo que grande parte do seu comprimento encontra-se apoiado no leito-marinho.

A figura 3.1 apresenta uma ilustração de uma ancoragem em catenária típica e suas principais dimensões.

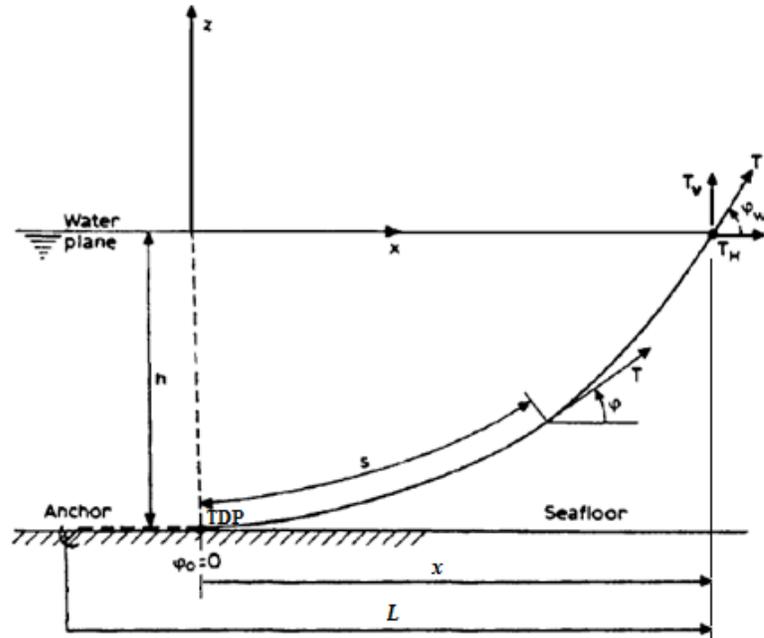


Figura 3.1 – Representação das principais dimensões de uma ancoragem em catenária típica [19].

Segundo CHAKRABARTI [19], uma solução analítica para a equação da catenária pode ser obtida a partir de uma série de hipóteses simplificadoras:

- a) A linha é tratada como um elemento bidimensional, onde as componentes de força sempre estão no seu plano;
- b) O leito-marinho é perfeitamente horizontal e não há a possibilidade de escorregamento da linha no solo;
- c) O único carregamento atuante é o peso próprio submerso da linha;
- d) A relação entre tensão e deformação é considerada linear e a catenária é tratada como uma linha extensível;
- e) A rigidez à flexão da linha é desprezível.

3.2.2 Forças de Restauração

As forças de restauração das linhas são as principais responsáveis pela geração de um mecanismo que garante a permanência da UF em sua posição de equilíbrio, evitando grandes deslocamentos quando esta esteja submetida às ações ambientais. A figura 3.2 ilustra o deslocamento de topo de uma linha em catenária.

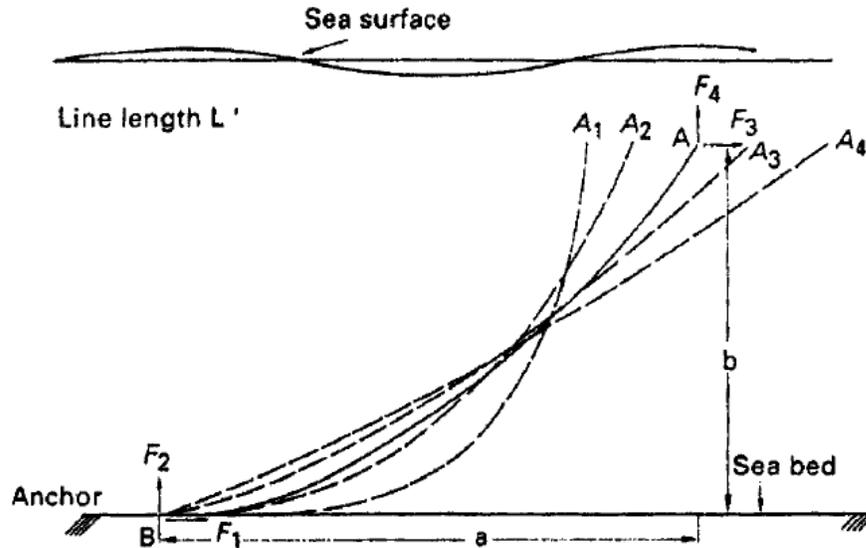


Figura 3.2 –Deslocamento do topo de uma linha em catenária [19].

Pode-se observar que o deslocamento do topo da linha do ponto A1 para o A4 faz com que a linha fique mais retesada e o ângulo de topo decresça, resultando em um aumento na tração da catenária. Além disso, o crescimento do *offset* da embarcação desloca o TDP de F1 para F2, gerando um maior comprimento de linha suspensa que, conseqüentemente, resulta no aumento do seu peso próprio submerso. Estes fatos fazem com que surja uma força restauradora não-linear responsável pelo retorno da linha à sua posição inicial (ponto A1).

3.2.3 Pré-tração nas linhas

A pré-tração consiste na tração submetida às linhas de ancoragem no momento em que a plataforma se encontra em deriva nula. Ela possui fundamental importância na manutenção da UF em sua posição de equilíbrio.

A tração adequada pré-estabelecida para uma ancoragem é alcançada partindo de dois pressupostos que se contrapõem: a utilização de uma pré-tração elevada resultará na geração de forças restauradoras de maior intensidade que não permitirá grandes deslocamentos para embarcação, entretanto a linha sempre trabalhará com tensões elevadas próximas a sua tração de ruptura. Por outro lado, adotando-se uma pré-tração de intensidade abaixo do adequado, resultaria em *offsets* excessivos para pequenas excitações, os quais podem prejudicar as operações de produção e perfuração da plataforma.

Ressalta-se que o uso de pré-trações elevadas pode ainda elevar o custo de implantação do sistema *offshore*, visto que, dessa forma, haveria necessidade de utilização de guinchos mais potentes para o pagamento e recolhimento destas linhas. Neste sentido, o ajuste na pré-tração para valores que garanta um comportamento otimizado do sistema flutuante ancorado é extremamente importante e deve ser realizado por projetistas experientes nas etapas anteriores à execução do projeto propriamente dito.

3.2.4 Comprimento mínimo das linhas de ancoragem

O comprimento mínimo de linha necessário para que a ancoragem atinja todas as suas finalidades depende de fatores de projeto, como a tração máxima prevista em cada linha, o seu peso nominal, a LDA onde se situa a plataforma, tipo de ancoragem e a complacência permitida ao sistema.

Nos sistemas de ancoragem convencionais, além do comprimento de linha suspenso, deve-se levar em conta o comprimento de ancoragem apoiada no leito-marinho, a fim de garantir que a âncora trabalhe com seu máximo poder de garra e somente resistindo às forças horizontais, sendo as componentes de força verticais absorvidas pelo peso dos segmentos de fundo. Além disso, conforme visto no item 3.2.2, o comprimento de linha apoiado permite o mecanismo de geração das forças de restauração.

Uma reserva adicional de linha apoiada também deve ser considerada para a realização do teste de âncora e para posicionar a unidade na sua locação correta.

3.3 Condições de Projeto e Combinações de Carregamento

As normas API RP 2SK [11], ISO 19901-7 [12] e DNV OS-301 [13] estabelecem em quais condições de projeto deve se desenvolver as análises e o dimensionamento do sistema de ancoragem. São estas:

- **Condição Intacta:** nesta condição o sistema de ancoragem encontra-se intacto e em perfeito funcionamento de seus componentes. Para as normas baseadas em Estados Limites (ISO 19901-7 e DNV OS-301), esta condição encontra-se inserida no Estado Limite Último (ULS);

- **Condição de Avaria:** a plataforma é analisada oscilando em torno de uma nova posição de equilíbrio ocorrida devido ao rompimento da linha mais tracionada ou falha de um *thruster*. Na norma ISO 19901-7, esta condição é denominada de Verificação de Redundância, enfatizando que o sistema deve conter uma reserva de resistência suficiente para suportar os mecanismos citados. Nas normas baseadas em Estados Limites, a condição de avaria encontra-se inserida no Estado Limite Último (ULS) para a ISO 19901-7, e Estado Limite Acidental (ALS) para a DNV OS-301;

- **Condição Transiente:** a plataforma é analisada sendo submetida a movimentos transientes ocasionados pelo rompimento da linha mais tracionada ou falha de um *thruster*. Na norma ISO 19901-7, esta condição está inserida no Estado Limite Último (ULS). No caso da DNV OS-301, a condição Transiente não é prevista;

Em relação às combinações de carregamento atuantes, as normas citadas recomendam que as ações de onda, corrente e vento atuantes em sistemas flutuantes permanentes sejam baseadas num período de retorno de 100 anos. No entanto, quando o sistema encontra-se ancorado na proximidade de outras instalações, o período de recorrência deve ser maior que 100 anos, levando em conta as consequências que um mecanismo falha pode acarretar nestas situações.

A DNV OS-301 enfatiza que, para cada conjunto de combinações, uma dessas ações ambientais deva ser considerada dominante (período de retorno centenário), sendo as demais tratadas por suas respectivas condições moderadas (períodos de retorno decenários ou anuais). Conforme será visto no Capítulo 4, uma prática usual que geralmente é adotada nos projetos de sistemas de ancoragem baseia-se no emprego das seguintes combinações extremas:

- a) Carregamentos de onda e vento com períodos de retorno de 100 anos e correnteza com período de retorno de 10 anos;

- b) Carregamentos de onda e vento com períodos de retorno de 10 anos e correnteza com período de retorno de 100 anos.

Para alguns casos particulares, certas precauções devem ser tomadas para a definição das combinações de carregamento mais adequadas ao projeto, visto que nem sempre as ações mais extremas são as que provocam as respostas mais críticas ao sistema flutuante. Como exemplo, pode-se citar o caso de algumas embarcações, cuja resposta é dominada pelos movimentos de baixa frequência, sendo estes principalmente excitados pela atuação de ondas de pequena altura e períodos longos. Dessa forma, nestes casos devem ser adicionadas novas combinações baseadas em períodos de recorrência mais curtos.

3.4 Métodos de Análise

A análise do sistema de ancoragem é desenvolvida objetivando a determinação das suas respostas aos movimentos, tais como as trações nas linhas, cargas das âncoras e *offsets* da embarcação quando esta é submetida aos carregamentos ambientais externos.

O dimensionamento de um sistema de ancoragem envolve duas etapas de simulação distintas:

- *Simulação da Resposta do Sistema Flutuante;*
- *Simulação da Resposta do Sistema de Ancoragem.*

3.4.1 Simulação da Resposta do Sistema Flutuante

Neste item, serão apresentados os métodos para a determinação dos movimentos da UF que se diferem principalmente pelo tipo de análise envolvida e seu respectivo grau de complexidade. São estes:

- *Abordagem Dinâmica no Domínio da Frequência;*
- *Abordagem Dinâmica no Domínio do Tempo;*
- *Abordagem Combinada nos Domínios da Frequência e do Tempo.*

Conforme será descrito no Capítulo 5, além dessa diferenciação das abordagens pela maneira como é realizada a simulação (nos domínios do tempo e da frequência), elas ainda podem ser categorizadas pelo nível de acoplamento considerado entre o modelo hidrodinâmico da UF e o modelo estrutural das linhas: formulações desacopladas ou acopladas.

3.4.1.1 Abordagem Dinâmica no Domínio da Frequência

A abordagem dinâmica no domínio da frequência trata a equação dinâmica do movimento da UF representada na expressão (3.2) de forma desacoplada. Ou seja, esta abordagem baseia-se no princípio da superposição linear, onde a parcela estática do movimento, além das parcelas baixa e na frequência da onda são analisadas separadamente e combinadas linearmente.

As respostas do sistema geralmente são obtidas por simulações numéricas em programas de difração-radiação, que obtém como resultado coeficientes de força de deriva média e lenta, além da função de transferência de primeira ordem (RAO). Esta última permite o cálculo do espectro de resposta da UF aos movimentos na frequência da onda através do seu cruzamento com o espectro de mar da localidade, conforme representado pela equação (3.1).

$$S_R = |H(\omega)|^2 S(\omega) \quad (3.1)$$

Onde:

$S_R \rightarrow$ Espectro de resposta devido aos movimentos da UF;

$H(\omega) \rightarrow$ Função de transferência do movimento para uma certa direção e grau de liberdade do sistema;

$S(\omega) \rightarrow$ Espectro de Mar;

Para utilização desta técnica, as não-linearidades envolvidas no sistema devem ser simplificadas e linearizadas, o que torna a análise no domínio da frequência com um menor custo computacional, entretanto não garante resultados precisos quando as parcelas não-lineares da resposta são significativas.

3.4.1.2 Abordagem Dinâmica no Domínio do Tempo

Na abordagem dinâmica no domínio do tempo, a equação dinâmica que descreve os movimentos da embarcação submetida aos carregamentos ambientais é avaliada através de uma única simulação no domínio do tempo.

Este método baseia-se na resolução da equação de equilíbrio dinâmica de forma acoplada, sendo esta representada pela expressão (3.2).

$$(m + A)\ddot{x} + B|\dot{x}|\dot{x} + Cx = F_x(t) \quad (3.2)$$

Onde:

$(m + A) \rightarrow$ Massa + massa adicionada;

$B \rightarrow$ Amortecimento;

$C \rightarrow$ Coeficiente de Rigidez;

$F_x(t) \rightarrow$ Forças externas em função do tempo;

$x \rightarrow$ Deslocamento para cada grau de liberdade;

$\dot{x} \rightarrow$ Velocidade;

$\ddot{x} \rightarrow$ Aceleração.

Nesta abordagem, as simulações realizadas garantem a consideração de todas não-linearidades envolvidas no sistema através da integração numérica da equação dinâmica do movimento. A utilização de um modelo numérico acoplado no domínio do tempo exige um maior custo computacional, entretanto obtêm-se resultados mais precisos.

Finalmente, tem-se como resultado uma série temporal completa do movimento para cada grau de liberdade do sistema e direção de incidência dos carregamentos ambientais, que posteriormente serão processados estatisticamente para obtenção dos valores extremos.

3.4.1.3 Abordagem Combinada nos Domínios do Tempo e Frequência

A abordagem combinada foi desenvolvida para reduzir o custo computacional de uma abordagem completa no domínio do tempo, além de diminuir a quantidade de linearizações realizadas, em relação a uma abordagem no domínio da frequência. As respostas aos carregamentos estáticos e aos movimentos de primeira e segunda ordem são combinadas em simulações combinadas no domínio da frequência e no domínio do tempo.

Num procedimento típico descrito em [11] e [12], as soluções para a parcela estática e a resposta da UF aos movimentos de segunda ordem geralmente são realizados por uma análise no

domínio do tempo, enquanto a resposta aos movimentos de primeira ordem é obtida através de uma análise no domínio da frequência.

3.4.2 Simulação da Resposta do Sistema de Ancoragem

Neste item, são descritos os métodos de análise presentes nas normas API RP 2SK [11], ISO 19901-7 [12] e DNV OS-E301 [13] para a avaliação das respostas do sistema de ancoragem aos movimentos impostos pela UF e pelos carregamentos atuantes. As principais repostas necessárias para o dimensionamento do sistema são os passeios do sistema, os esforços de tração nas linhas e os seus comprimentos suspensos, além das cargas nas âncoras.

Conforme mencionado no item 3.4.1, a simulação numérica dos movimentos da UF baseada numa abordagem completa no domínio do tempo considera a modelagem de todas as não-linearidades envolvidas. Além disso, a interação dinâmica não-linear entre a embarcação e as linhas pode ser corretamente representada com o uso de modelos acoplados ou híbridos. Neste sentido, este tipo de simulação permite que a resposta aos movimentos da UF e a avaliação dos esforços nas linhas de ancoragem sejam obtidos em uma única análise.

Quando a resposta do sistema de ancoragem é realizada por uma simulação numérica dos movimentos da UF baseada numa abordagem no domínio da frequência, as parcelas estáticas e dinâmicas são determinadas separadamente e combinadas pelo princípio de superposição linear. A avaliação dos esforços de tração devido aos carregamentos ambientais constantes e à pré-tração na linha adota procedimentos puramente estáticos baseados na equação da catenária. A resposta de tração aos movimentos de onda de baixa frequência pode ser obtida da mesma forma, visto que estes são caracterizados pelos longos períodos. Entretanto, para o cálculo da resposta de esforços das linhas aos movimentos de primeira ordem são considerados dois métodos distintos que são descritos na sequência: análise *quasi*-estática e dinâmica.

3.4.2.1 Análise Quasi-Estática

A análise *quasi*-estática consiste num método simplificado, onde os esforços dinâmicos atuantes são calculados por deslocamentos induzidos estaticamente no topo das linhas de ancoragem avaliadas. O comportamento de cada linha é avaliado pela equação da catenária, sendo que somente a sua parcela de rigidez é considerada através da geração de curvas características de Força de Restauração *versus Offset*. O método *quasi*-estático para

determinação dos esforços nas linhas de ancoragem é utilizado tanto numa abordagem no domínio do tempo, quanto no domínio da frequência, em relação à simulação da resposta do sistema flutuante.

Nesta técnica de análise, os carregamentos de correnteza atuantes nas linhas, os movimentos verticais no *fairlead* e os efeitos dinâmicos associados à massa, amortecimento e aceleração do fluido nas linhas são ignorados, o que resulta em algumas imprecisões na avaliação dos esforços de tração nas ancoragens.

A sequência de análises é iniciada com a imposição de deslocamentos horizontais prescritos (em *surge* e *sway*), para que em cada ponto, sejam calculadas a força de restauração resultante para o conjunto de linhas, o comprimento suspenso de linha e a tração na linha mais solicitada. Os resultados obtidos são representados pela geração da curva característica de Força de Restauração Resultante x *Offset*, além das curvas de Linha Suspensa x *Offset* e de Tração x *Offset* para cada linha (figura 3.3).

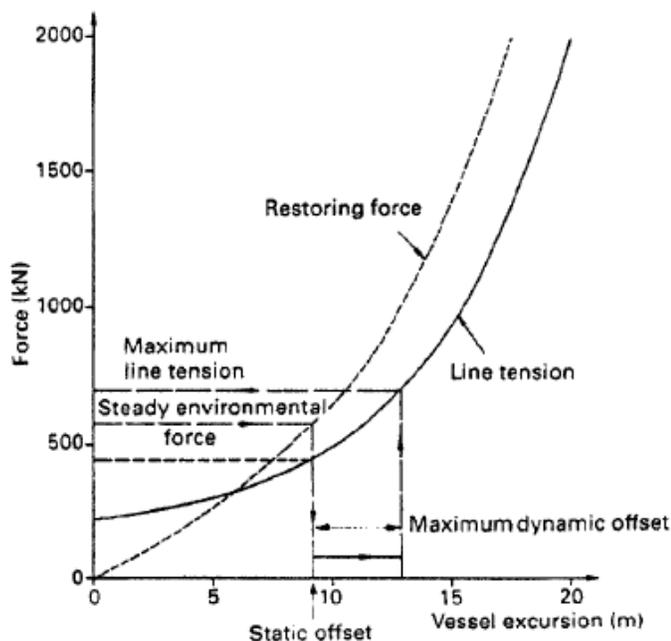


Figura 3.3 – Curvas características de Força de Restauração e Tração x *Offset* [19].

Numa abordagem de simulação do sistema flutuante no domínio do tempo, as forças de topo das linhas são inseridas pelo lado direito da equação de movimento do casco, da mesma forma utilizada pela formulação fracamente acoplada (seção 4.3), diferindo-se apenas que estas

forças possuem apenas parcelas elásticas definidas pelas curvas de restauração. Para cada posição dinâmica (no tempo) da unidade flutuante, são obtidas as posições do topo das linhas que por sua vez permitem que sejam encontradas as forças de topo a partir das curvas características Tração x *Offset* apresentada anteriormente.

Para uma abordagem de simulação da UF no domínio da frequência, a componente estática da força resultante proveniente dos carregamentos ambientais é aplicada no eixo vertical do gráfico, sendo que a interseção desta com a curva característica da força de restauração resulta no *offset* estático. Ressalta-se que a tangente da curva neste ponto fornece a rigidez linear equivalente do sistema de ancoragem para a direção em que o deslocamento foi aplicado (seis graus de liberdade). Esta rigidez é utilizada na análise no domínio da frequência para o cálculo dos movimentos de primeira ordem da UF e das trações dinâmicas nesta faixa de frequência. Nestes casos, a rigidez linear equivalente é representada pela expressão (3.3)

$$C \cdot x = F(x) \tag{3.3}$$

Onde:

$C \rightarrow$ Coeficiente de Rigidez Linear Equivalente para uma certa posição da linha;

$x \rightarrow$ Deslocamento horizontal (em *surge* e *sway*);

$F \rightarrow$ Componente de força estática.

Na sequência, o deslocamento proveniente das parcelas dinâmicas de primeira e segunda ordem é somado ao *offset* estático, resultando na deriva total devido aos carregamentos atuantes. Neste momento, o método *quasi*-estático caracteriza-se pelo simples cruzamento deste *offset* com a curva de tração de cada linha, a fim de se obter a tração máxima na linha de ancoragem que posteriormente deverá ser comparada com os valores admissíveis de projeto. Além da verificação da tração, deve-se ainda se certificar que, caso ancoragem seja convencional, o comprimento de linha apoiado no leito-marinho seja suficiente para absorver as componentes verticais de força no fundo.

Conforme mencionado anteriormente, a análise *quasi*-estática apresenta incertezas no cálculo da tração, principalmente pelo fato de não levar em conta os efeitos dinâmicos presentes

nas linhas, fazendo com que seja necessária a adoção de fatores de segurança muito conservadores para o projeto. Além disso, este tipo de análise não considera os carregamentos de correnteza atuantes nas linhas, o que certamente afetará a avaliação do *offset* estático.

Neste sentido, as normas API RP 2SK [11], ISO 19901-7 [12] e DNV OS-E301 [13] enfatizam que a precisão de cálculo na avaliação da tração dinâmica nas ancoragens utilizando este método pode ser drasticamente afetada em certas situações onde os efeitos dinâmicos casco-linhas são significativos, como nos casos descritos a seguir:

- Os movimentos de primeira ordem (na frequência da onda) da unidade flutuantes são acentuados;
- Lâmina d'água profunda;
- Os componentes das linhas de ancoragem contêm elementos com elevado coeficiente de arrasto;
- Unidade flutuante conectada a uma grande quantidade de *risers* (efeitos inerciais mais intensos);
- A fadiga das linhas de ancoragem está sendo avaliada e o efeito inercial influencia significativamente.

Atualmente, o método *quasi*-estático não é utilizado para o dimensionamento final de sistemas de ancoragem permanentes. No entanto, ele apresenta uma boa aplicação numa fase inicial de projeto, onde se busca uma estimativa inicial da resposta das linhas de ancoragem, a fim de se obter o dimensionamento de um sistema mais otimizado em etapas posteriores de análise. Além disso, as normas vigentes permitem o seu uso em outras situações, como exemplo no projeto de sistemas de ancoragem temporários.

3.4.2.2 Análise Dinâmica

A análise dinâmica rigorosa para o cálculo dos esforços nas linhas necessita que as mesmas sejam modeladas por elementos finitos para levar em conta todos os efeitos dinâmicos variantes no tempo (massa, amortecimento e aceleração do fluido), resultando em um custo computacional superior a análise *quasi*-estática, mas com maior nível de precisão.

Para as simulações da UF que utilizam uma formulação acoplada no contexto de uma abordagem no domínio do tempo, a análise dinâmica é implicitamente considerada. No entanto,

numa abordagem da simulação da UF no domínio da frequência, esta técnica difere-se pelo modo como as não-linearidades são tratadas no cálculo dos esforços dinâmicos. De acordo com a API RP 2SK [11] e ISO 19901-7 [12], existem quatro efeitos não-lineares que geralmente influenciam no comportamento das linhas de ancoragem:

- **Elasticidade não-linear da linha:** a deformação da linha é dada em função da magnitude da tração atuante. Este comportamento não-linear é mais acentuado em materiais sintéticos, sendo assim a linearização da elasticidade da linha em cabos de aço e amarras pode ser considerada uma boa aproximação;
- **Mudanças na geometria:** esta não-linearidade está associada à mudança na configuração das linhas com a atuação dos carregamentos ambientais;
- **Cargas de Fluido:** segundo a Equação de *Morison* (utilizada para determinar os efeitos dos fluidos atuando nas linhas) a parcela de arrasto é proporcional ao quadrado da velocidade relativa entre a linha e o fluido, sendo assim não-linear;
- **Efeitos do Solo:** a interação entre a linha apoiada no leito-marinho e o solo é considerada como sendo um processo friccional não-linear, além disso o comprimento de linha apoiado no fundo varia constantemente, o que influencia significativamente na não-linearidade geométrica da linha.

A seguir são apresentadas as duas técnicas de análise dinâmica mais comumente utilizadas, para a determinação da resposta do sistema de ancoragem aos movimentos de primeira ordem do sistema flutuante, que serão posteriormente combinados com os esforços estáticos e dinâmicos de segunda ordem, conforme será apresentado adiante.

- **Técnica de Análise no Domínio do Tempo:**

A técnica de análise dinâmica no domínio do tempo para o cálculo dos esforços dinâmicos de primeira ordem caracteriza-se pela consideração de todos os efeitos dinâmicos não-lineares que ocorrem nas linhas sem simplificações. Os movimentos na frequência da onda são

aplicados no topo das linhas de ancoragem através de uma série temporal a partir da posição média de equilíbrio estático.

As trações nas linhas são representadas por um histórico de resposta no tempo (figura 3.4), que contém os esforços provenientes das parcelas estáticas e dinâmicas de carregamento. Em seguida, a série temporal é tratada estatisticamente visando à obtenção das trações extremas que serão utilizadas no dimensionamento do sistema.

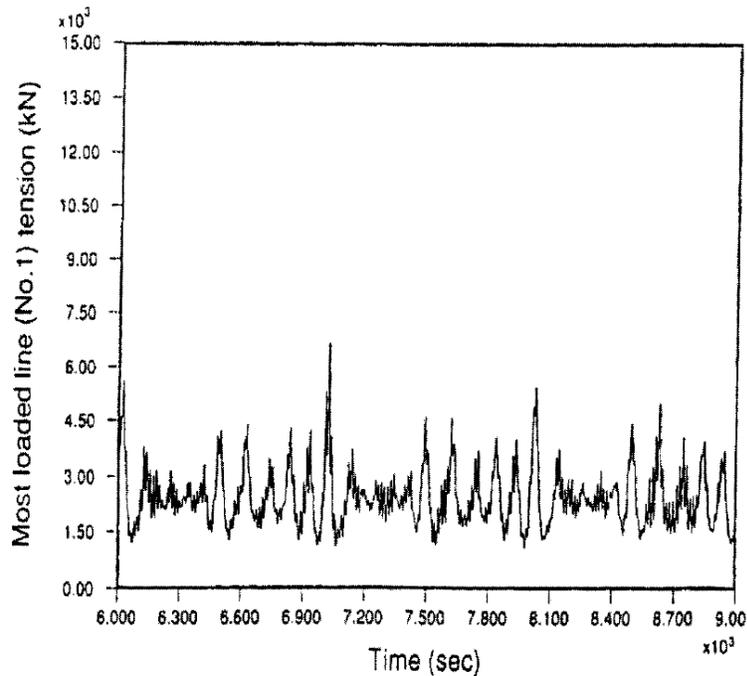


Figura 3.4 – Exemplo de um histórico de tração de uma linha ao longo do tempo [19].

Vale ressaltar que para utilização deste método, a simulação do tempo tem que ser suficientemente longa (em torno de 3 horas de simulação), para que se obtenha uma resposta confiável estatisticamente. Além disso, as normas de referência ainda recomendam que esta simulação seja repetida outras vezes variando a sua semente randômica.

- **Técnica de Análise no Domínio da Frequência:**

A técnica de análise dinâmica no domínio da frequência para a avaliação dos esforços dinâmicos de primeira ordem tem como ponto negativo a necessidade de linearização das não-linearidades presentes no comportamento das linhas de ancoragem, conforme mencionado no item anterior.

Os movimentos na frequência da onda são aplicados no topo da linha pelo cruzamento direto da função de transferência de movimentos (RAO) com o espectro de mar. A partir dela é possível obter um espectro de tração dinâmica do topo de cada linha, de onde pode ser extraído o desvio-padrão da resposta ou outros parâmetros, que auxiliem na obtenção estatística das máximas trações dinâmicas esperadas.

3.5 Critérios de Projeto

Nesta seção, são apresentados os critérios de projeto utilizados no dimensionamento de sistemas de ancoragem, respaldados pelas normas API RP 2SK [11], ISO 19901-7 [12], DNV OS-E301 [13] e API RP 2SM [14], para a determinação dos *offsets* máximos, trações de projeto, cargas nas âncoras, entre outras respostas. Estes critérios são aplicáveis às condições intacta e de avaria. Ressalta-se que na API RP 2SM, que expõe recomendações para ancoragens com materiais sintéticos, os critérios de projeto são semelhantes aos da norma API RP 2SK com algumas exceções, como a limitação da tração mínima, que serão apresentadas em seguida.

A tabela 3.1 faz uma relação entre os métodos de análise (seção 3.4) e as condições a serem analisadas (seção 3.3) para os diferentes tipos de ancoragem, etapas e ocorrências de projeto.

Tabela 3.1 – Recomendações de norma para os Métodos de Análise e Condições de Projeto [11].

Tipo de Ancoragem	Etapas e Ocorrências de Projeto	Métodos de Análise	Condições de Projeto Analisadas
Ancoragem Permanente	Projeto Preliminar	Quase-Estático ou Dinâmico	Intacto / Avaria
	Projeto Final	Dinâmico	Intacto / Avaria / Transiente
	Projeto de Fadiga	Dinâmico	Intacto
Ancoragem Temporária	Distante de outras Estruturas	Quase-Estático ou Dinâmico	Intacto
	Acima de Dutos	Quase-Estático ou Dinâmico	Intacto / Avaria
	Embarcação Próxima à outra Plataforma	Quase-Estático ou Dinâmico	Intacto / Avaria / Transiente

3.5.1 Offset

O *offset* é definido como sendo o deslocamento sofrido pela unidade flutuante quando esta é submetida aos carregamentos ambientais e de outras naturezas. Analogamente, o *offset* médio (S_{mean}) caracteriza-se pelo deslocamento devido aos carregamentos estáticos atuantes (corrente, vento e deriva média de onda) e a pré-tração na linha de ancoragem; o *offset* de baixa frequência (S_{lf}) corresponde ao deslocamento (máximo ou significativo, como será abordado no item seguinte) devido aos movimentos de onda de segunda ordem; o *offset* na frequência da onda (S_{wf}) deve-se ao deslocamento (máximo ou significativo) devido aos movimentos de onda de primeira ordem.

3.5.1.1 Determinação dos Offsets Máximos

Os procedimentos para a determinação do *offset* máximo dependem do método utilizado para simular a dinâmica da unidade flutuante. Quando a análise é no domínio da frequência, o *offset* máximo (S_{max}) é determinado pelo maior valor obtido pelas equações (3.4) e (3.5).

$$S_{max} = S_{mean} + S_{lfmax} + S_{wfsig} \quad (3.4)$$

$$S_{max} = S_{mean} + S_{wfm} + S_{lfsig} \quad (3.5)$$

Onde:

$S_{max} \rightarrow$ *Offset* máximo da UF;

$S_{mean} \rightarrow$ *Offset* médio da UF;

$S_{lfmax} \rightarrow$ Movimento máximo estatístico de baixa frequência;

$S_{lfsig} \rightarrow$ Movimento significativo de baixa frequência;

$S_{wfm} \rightarrow$ Movimento máximo na frequência de onda;

$S_{wfsig} \rightarrow$ Movimento significativo na frequência de onda;

No caso de uma abordagem no domínio do tempo para a simulação dinâmica da UF, a determinação do *offset* extremo envolve processamento estatístico na série temporal completa de movimentos.

3.5.1.2 Limitação dos Offsets

A limitação dos *offsets* máximos é necessária para prevenir danos aos *risers* de perfuração e produção e seus componentes, além de garantir que a unidade flutuante não colida com outras plataformas ou estruturas que, porventura, estejam próximas. Para estes casos, uma margem de segurança de excursão máxima entre sistemas flutuantes vizinhos deve ser garantida.

Como atualmente o projeto de *riser* é realizado independentemente do projeto do sistema de ancoragem, é dever dos projetistas de *risers* fornecer aos projetistas de ancoragem um *offset* admissível máximo para que o sistema flutuante atue sem influenciar na operação destes dutos. Este *offset* será tratado no presente trabalho como critério de projeto do sistema de ancoragem no contexto da Metodologia Híbrida de Projeto, conforme será abordado nos Capítulos 5 e 6.

Nos casos em que a UF está conecta a *risers* rígidos e verticais, como exemplo os *risers* de perfuração de plataformas MODU's, também se torna necessária a limitação do seu *offset* estático, visto que este influencia diretamente no ângulo admissível para a junta flexível do BOP (*Blowout Preventer*), denominada de *Ball Joint*. A DNV OS-301 [13] recomenda que nesta situação seja adotado de um passeio estático admissível de 2.5% da lâmina d'água.

A tabela 3.2 apresenta uma estimativa média de *offsets* admissíveis em porcentagem da lâmina d'água, para que seja garantido que a operação dos *risers* de perfuração e produção ocorra sem interrupções [11].

Tabela 3.2 – Estimativa de *offsets* admissíveis para a operação dos *Risers* [11].

Tipo de <i>Riser</i>		Tipo de <i>Offset</i>	<i>Offset</i> Admissível (% da LDA)
<i>Riser</i> de Perfuração		Estático	2% - 4%
		Máximo	8% - 12%
<i>Riser</i> de Produção	<i>Risers</i> Rígidos	Máximo	8% - 12%
	<i>Risers</i> Flexíveis em Águas Profundas	Máximo	10% - 15%
	<i>Risers</i> Flexíveis em Águas Rasas	Máximo	15% - 30%

3.5.2 Tração

3.5.2.1 Determinação da Tração Máxima nas Linhas

A determinação da máxima tração nas linhas de ancoragem é análoga a determinação do *offset* máximo. Quando é utilizada a abordagem no domínio da frequência, a tração máxima é obtida pelo maior dos valores calculados pelas equações (3.6) e (3.7).

$$T_{max} = T_{mean} + T_{lfmax} + T_{wfsig} \quad (3.6)$$

$$T_{max} = T_{mean} + T_{wfmmax} + T_{lfsig} \quad (3.7)$$

Onde:

T_{max} → Tração máxima da linha;

T_{mean} → Tração média da linha;

T_{lfmax} → Tração devido ao movimento máximo estatístico de baixa frequência;

T_{lfsig} → Tração devido ao movimento significativo de baixa frequência;

T_{wfmmax} → Tração devido ao movimento máximo estatístico na frequência de onda;

T_{wfsig} → Tração devido ao movimento significativo na frequência de onda;

No caso de abordagem no domínio do tempo para a simulação dinâmica da UF, o cálculo da tração máxima na linha envolve processamento estatístico da série temporal completa de tração. Ressalta-se que de acordo com as práticas recomendadas pela DNV OS-301 [16], deve-se realizar o filtro do sinal de resposta com a separação das parcelas estáticas e dinâmicas, visto que esta norma adota coeficientes de segurança distintos para cada uma destas parcelas, conforme apresentado no item subsequente.

3.5.2.2 Limitação da Tração Máxima

A limitação da tração máxima geralmente é expressa como uma porcentagem da resistência nominal de cada componente da linha de ancoragem, denominada de MBS (*Minimum Breaking Strength*). No caso das amarras, o MBS pode ser considerado igual a carga de rompimento de teste BTL (*Breaking Test Load*).

As tabelas 3.3 e 3.4 estabelecem os fatores de segurança das normas API RP 2SK [11], ISO 19901-7 [12] e DNV OS-301 [13] para limitação da tração máxima nas linhas. Ressalta-se que os critérios de projeto para a DNV OS-301 são dados em função das seguintes classes de consequência dos projetos:

- **Classe 1:** a falha no sistema de ancoragem provavelmente não acarreta em consequências inaceitáveis como perda de vida humana, colisão com plataformas adjacente, descontrole no fluxo de óleo e gás, entre outros;
- **Classe 2:** a falha no sistema de ancoragem provoca as consequências anteriormente citadas.

Tabela 3.3 – Fatores de Segurança para a Tração nas Linhas de Ancoragem (API RP 2SK e ISO 19901-7).

Condição de Projeto	Método de Análise	Limite da Tração (% do MBS)	Fator de Segurança Equivalente
Intacto	Quase-Estático	50	2.00
	Dinâmico	60	1.67
Avaria	Quase-Estático	70	1.43
	Dinâmico	80	1.25

Tabela 3.4 – Fatores de Segurança para a Tração nas Linhas de Ancoragem (DNV OS-301).

Condição de Projeto	Classe de Consequência	Método de Análise	Fator de Segurança para a Tração Estática	Fator de Segurança para a Tração Dinâmica
Intacto (ULS)	1	Dinâmico	1.10	1.50
	2	Dinâmico	1.40	2.10
	1	Quase-Estático	1.70	
	2	Quase-Estático	2.50	
Avaria (ALS)	1	Dinâmico	1.00	1.10
	2	Dinâmico	1.00	1.25
	1	Quase-Estático	1.10	
	2	Quase-Estático	1.35	

Conforme mencionado anteriormente, a norma DNV OS-301 é baseada nos Estados Limites ou LRFD (*Load and Resistance Factor Design*), onde são adotados fatores de segurança parciais para a resistência e para os efeitos de carga. Neste sentido, a verificação da integridade do sistema à tração é realizada pela comparação entre as trações de projeto nas linhas e a resistência características destas, ao contrário do que é previsto na API RP 2SK, onde as trações são comparadas diretamente com o MBS correspondente.

A resistência característica é obtida através de ensaios de tração nos componentes que constituem a linha de ancoragem (amarras, cabos de aço, poliéster), sendo avaliada pela expressão (3.8).

$$S_C = \mu_s [1 - \delta_s(3 - 6\delta_s)], \quad \delta_s \leq 0.10 \quad (3.8)$$

Onde:

S_C → Resistência Característica;

μ_s → Valor médio para a tração de rompimento do componente;

δ_s → Coeficiente de Variação para a tração de rompimento do componente;

A DNV OS-301 permite que nas situações em que não são realizados testes de tração suficientes para calibrar os parâmetros estatísticos, a expressão 3.9 pode ser adotada para o cálculo da resistência característica.

$$S_C = 0.95 \cdot MBS \quad (3.9)$$

Onde:

MBS → Resistência mínima ao rompimento por tração do componente;

3.5.2.3 Limitação da Tração Mínima

As linhas de ancoragem compostas de materiais sintéticos como o poliéster, para evitar falhas de fadiga por compressão da linha, a API RP 2SM [14] limita as trações mínimas em 5% do MBS em cabos de poliéster e 10% do MBS para materiais sintéticos com módulos de elasticidade mais elevados.

3.5.3 Comprimento das Linhas

O comprimento de linha necessário é influenciado diretamente (dentre outros aspectos) pelo tipo de âncora utilizada, visto que ele auxilia na prevenção da elevação das âncoras de arrasto, quando estas não conseguem resistir aos esforços verticais impostos. Por sua vez, o tipo de âncora está associado à LDA e à configuração de ancoragem prevista no projeto.

Dessa forma, em linhas em catenária convencional maiores comprimentos de amarra de fundo são necessários na utilização de âncoras de arrasto localizadas em areias e solos duros, onde a penetração é rasa, já que estas não resistem às cargas verticais muito elevadas. Menores comprimentos de linha são possíveis em sistemas que utilizam âncoras que podem resistir aos esforços verticais substancialmente, como por exemplo, as estacas de sucção mencionadas na seção 2.4.4.

3.5.4 Estimativa de Extremos

Conforme apresentado nas seções 3.5.1 e 3.5.2, para a obtenção dos deslocamentos e trações máximas nas linhas quando se utiliza a abordagem no domínio da frequência é necessário calcular os seus respectivos valores extremos (máximos e significativos) associados aos movimentos de primeira e segunda ordem. Por sua vez, estes são determinados através da utilização de procedimentos estatísticos na análise da resposta do sistema.

A norma DNV OS-E301 [13] recomenda que nestes casos se adote uma distribuição de picos de *Weibull* para a representação das trações de máximas de pico (figura 3.5), situadas entre dois cruzamentos sucessivos na linha média da série temporal de tração, conforme apresentado na figura seguinte.

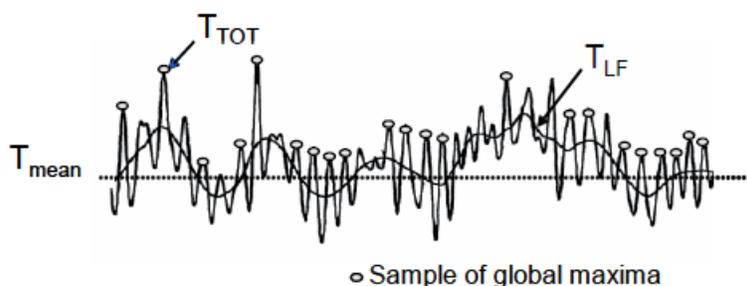


Figura 3.5 – Amostra dos picos de tração ao longo de uma série temporal [13].

Com isso obtém-se o valor máximo provável (MPM) para a tração através do ajuste de uma distribuição extrema de *Gumbel* (figura 3.6). O valor máximo provável (MPM) calculado por esta norma prevê uma porcentagem de 67% como probabilidade de excedê-lo.

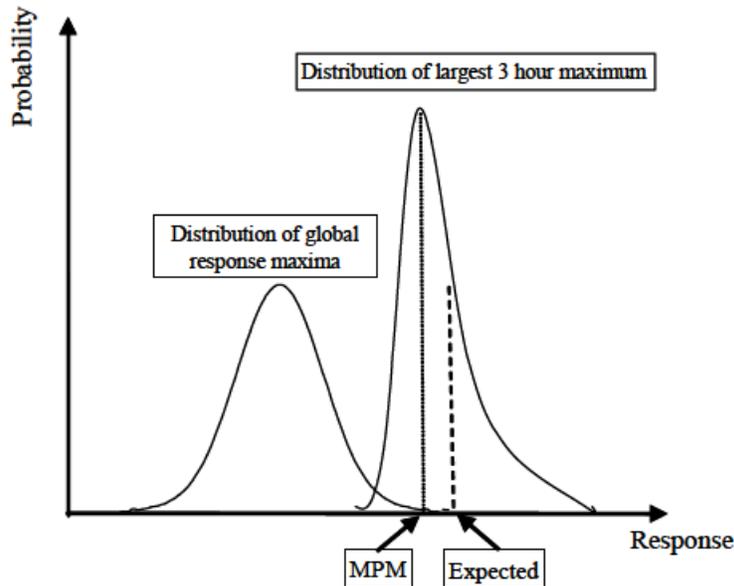


Figura 3.6 – Distribuições de Weibull e Gumbel

Conforme mencionado anteriormente, recomenda-se uma simulação de no mínimo 3 horas para obtenção de resultados confiáveis estatisticamente, além da repetição das simulações no tempo com a variação da semente randômica.

3.6 Procedimentos de Análise

Na seção 3.4, foram apresentados os métodos de análise baseados em abordagens no domínio da frequência e no domínio do tempo, que são usualmente utilizadas para o dimensionamento de sistemas de ancoragem de unidades flutuantes. Além disso, foi dada ênfase às diferentes peculiaridades que cada método possui, quanto aos seus procedimentos de cálculo e resultados obtidos.

A seguir, serão apresentadas as etapas de análise necessárias para o desenvolvimento destas abordagens distintas, baseando-se nas recomendações das normas API RP 2SK [11] e ISO 19901-7 [12], que se assemelha com as práticas recomendadas pela DNV OS-301 [13].

Os procedimentos descritos na sequência referem-se ao projeto de um sistema em quadro de ancoragem (*spread mooring*), onde os movimentos em *yaw* geralmente são menos importantes. Entretanto, para ancoragem em ponto único (*single point mooring*) estes movimentos são mais impactantes, devido a possibilidade de alinhamento do *turret* na direção de incidência dos carregamentos ambientais. Neste caso, os procedimentos apresentados devem ser ajustados para levar em conta tal alinhamento.

3.6.1 Etapas de Cálculo para Abordagem no Domínio da Frequência.

a) Determinar os critérios ambientais como velocidade de vento, parâmetros de onda e duração da tormenta para cada condição de projeto apresentada no item 3.3;

b) Definir as características físicas e geométricas do sistema de ancoragem dimensionado, além dos parâmetros de seus componentes (amarras, cabos de aço e cabos sintéticos) e as pré-trações nas linhas;

c) Calcular as forças ambientais estáticas atuantes no casco e o *offset* médio através de uma análise estática do sistema de ancoragem, considerando a fricção no fundo e a elasticidade da linha;

d) Determinar os movimentos de baixa frequência através de uma análise de movimentos da UF no domínio da frequência. Ressalta-se que os movimentos de segunda ordem dependem da rigidez das linhas na posição estática, portanto é necessária a determinação desta pela análise estática (etapa c);

e) Calcular os movimentos máximos e significativos na frequência da onda através do cruzamento dos RAO's do casco com o espectro de mar ou com auxílio de modelos reduzidos;

f) Determinar os *offsets* máximos utilizando as equações (3.4) e (3.5), além de avaliar o comprimento de linha suspenso, as cargas nas âncoras e a tração *quasi*-estática atuante.

O método *quasi*-estático utiliza as equações de catenária para o cálculo da tração devido aos movimentos máximos na frequência da onda, através da utilização da curva característica Força de Restauração x *Offset* e da curva Tração x *Offset*, ou com o auxílio de programas computacionais de análise estática de sistemas de ancoragem que calculam estas curvas automaticamente. Já o método dinâmico baseia-se no uso de simulações dinâmicas no domínio da frequência ou no domínio do tempo.

Caso seja realizada somente a análise *quasi*-estática, deve-se passar diretamente para a etapa i. Para a utilização do método dinâmico que envolve modelos de Elementos Finitos, devem-se seguir as etapas subsequentes (etapa g para análise no domínio da frequência e etapa h para análise no domínio do tempo).

g) Após a realização dos cálculos referentes aos movimentos da UF máximos e significativos de baixa frequência e suas respectivas respostas, eles são somados às derivas estáticas. As resultantes obtidas ($S_{mean} + S_{lfmax}$ e $S_{mean} + S_{wfmax}$) representam as posições em que os movimentos na frequência da onda serão impostos para realização de uma análise dinâmica de elementos finitos das linhas, a fim de se obter suas resposta para estes movimentos.

Já que a análise de movimentos do casco é dada no domínio da frequência, estes movimentos são representados a partir do cruzamento de suas funções de transferência (RAO's) com o espectro de mar do carregamento ambiental em estudo, resultando no espectro de movimentos. Este último é cruzado com a rigidez global da linha para a obtenção do espectro de tração, do qual se obtém o desvio-padrão e estima-se a tração máxima na linha através das equações (3.6) e (3.7).

h) A análise no domínio do tempo é realizada de forma similar a análise no domínio da frequência apresentada na etapa anterior. Estas se diferem principalmente na obtenção da tração dinâmica na frequência da onda, visto que os movimentos na análise no domínio do tempo são representados por um histórico de movimentos ao longo do tempo de simulação. Cabe reforçar que o modelo desacoplado de elementos finitos que representa uma ou mais linhas é sempre tratado no domínio do tempo.

O resultado desta análise é uma série temporal de tração que deve ser tratada estatisticamente para se obter a tração máxima e significativa na frequência da onda. Em seguida a tração extrema é obtida com o auxílio das equações (3.6) e (3.7).

i) Comparar os resultados obtidos com os critérios de projeto estabelecidos na seção 5.4. Caso algum critério não seja atendido, deve-se modificar a configuração do sistema de ancoragem e repetir as análises.

3.6.2 Etapas de Cálculo para Abordagem no Domínio do Tempo.

Conforme apresentado anteriormente, a simulação dinâmica do sistema flutuante seguindo uma abordagem no domínio do tempo permite que as não-linearidades sejam representadas em cada passo de tempo. Caso sejam utilizadas formulações desacopladas, as etapas de cálculo tornam-se análogas às apresentadas no item 3.6.1, excetuando-se o fato que as respostas extremas são obtidas através de processamento estatístico. No entanto, caso seja considerada o acoplamento físico entre o modelo das linhas e da UF, as etapas seguem os procedimentos apresentados na sequência.

a) Determinar os critérios ambientais como velocidade de vento, parâmetros de onda e duração da tormenta para cada condição de projeto (item 3.3);

b) Definir as características e geometria do sistema de ancoragem dimensionado, além de fixar os parâmetros de seus componentes (amarras, cabos de aço e cabos sintéticos) e as pré-trações nas linhas;

c) Definir os coeficientes de força de corrente e vento da embarcação e construir o modelo hidrodinâmico do casco, incluindo as linhas de ancoragem, *risers* e umbilicais;

d) Desenvolver uma simulação no domínio do tempo para a duração de tempestade de projeto (geralmente de 3 horas), a fim de se obter os históricos de tempo dos movimentos;

e) Utilizar técnicas de tratamento estatístico para obter os valores extremos para *offset* da UF, trações nas linhas, cargas nas âncoras e comprimento de linhas apoiado no solo;

f) Comparar os resultados obtidos com os critérios de projeto estabelecidos na seção 3.5. Caso algum critério não seja atendido, deve-se modificar a configuração do sistema de ancoragem e repetir as análises.

3.6.3 Etapas de Cálculo para Abordagem Combinada nos Domínios do Tempo e Frequência.

Conforme apresentado no item 3.4.1, esta abordagem consiste na combinação dos diferentes tipos de análises, sendo que geralmente, utiliza-se a simulação no domínio do tempo para a determinação da resposta estática e da resposta aos movimentos de baixa frequência, combinados com uma análise no domínio da frequência para avaliar a resposta aos movimentos de primeira ordem.

Dessa forma, a componente na frequência da onda é obtida através do cruzamento dos RAO's da UF com o espectro de mar, sendo posteriormente combinada com a parcela estática e de deriva através dos seguintes procedimentos:

- Os movimentos na frequência da onda são transformados em um histórico de movimentos e adicionados às componentes calculadas anteriormente no domínio do tempo (*offset* estático e de baixa frequência);
- As parcelas do movimento de deriva são tratadas estatisticamente para obter os seus respectivos valores extremos, que são combinados com os movimentos de primeira ordem através das equações (3.4) e (3.5).

3.7 Análise Transiente

Os movimentos transientes ocorrem após o rompimento de uma linha de ancoragem, antes da unidade flutuante adquirir sua nova posição de equilíbrio. A análise destes movimentos é complexa e exige que sejam realizadas simulações no domínio do tempo para a sua avaliação.

As normas API RP 2SK [11] e a ISO 19901-7 [12] recomendam esta análise para sistemas flutuantes ancorados próximos a outras instalações, ou para plataformas móveis do tipo MODU, onde deslocamentos excessivos provocados por este mecanismo de falha pode acarretar

em danos nos *risers* de perfuração. Ressalta-se que a DNV OS-301 [13] não leva em conta a análise transiente nas suas recomendações, que se justifica afirmando que seja improvável que o rompimento de uma linha ocorra simultaneamente com condições ambientais severas.

As normas citadas apresentam dois métodos distintos para a avaliação dos passeios decorrentes dos movimentos transientes, que serão descritos na sequência. As trações nas linhas devido ao transiente podem ser estimadas através dos métodos de análise abordados na seção 3.4.

➤ ***Análise Transiente no Domínio do Tempo:***

Este tipo de análise é similar a que foi descrita na seção 3.4.1 para simular a dinâmica do casco seguindo uma abordagem no domínio do tempo, diferindo-se pelo fato de que a linha de ancoragem mais tracionada é removida do sistema. Com a nova configuração, realiza-se uma simulação no domínio do tempo para obter o histórico de *offsets* ao longo do tempo de duração do movimento transiente, sendo, em seguida, estimada a deriva máxima através de processamentos estatísticos.

➤ ***Análise Combinada Transiente nos Domínios do Tempo e Frequência:***

A análise combinada caracteriza-se por uma simplificação da simulação, onde os movimentos transientes são calculados no domínio do tempo e os movimentos do casco são avaliados no domínio da frequência, sendo, posteriormente, superpostos.

O processo de análise inicia-se com a obtenção da posição de equilíbrio para o sistema intacto. A linha mais tracionada é retirada do sistema e os movimentos transientes são computados no domínio do tempo com a UF submetida somente aos carregamentos estáticos, sendo que a rigidez do sistema de ancoragem é atualizada em cada passo de tempo. Posteriormente, calculam-se os movimentos dinâmicos de primeira e segunda ordem por um procedimento no domínio da frequência, através da realização de uma análise hidrodinâmica e aplicação de RAO's nas linhas modeladas por elementos finitos. Finalmente, os *offsets* extremos de cada parcela são combinados pela expressão (3.10).

$$S_{max} = S_{mean} + S_t + S_{wfsig} + S_{lfsig} \quad (3.10)$$

Onde:

S_{max} → *Offset* máximo da UF;

S_{mean} → *Offset* médio da UF calculado para o sistema intacto;

S_t → Movimento transiente máximo;

S_{lfmax} → Movimento máximo de baixa frequência;

S_{wfsig} → Movimento significativo na frequência de onda, calculado no domínio da frequência;

S_{lfsig} → Movimento significativo de baixa frequência, calculado no domínio da frequência utilizando a rigidez do sistema de ancoragem na condição de avaria.

3.8 Revisão das Normas de Projeto de Ancoragem

Esta revisão das Normas de Projeto de Ancoragem foi abordada por LIMA [20], já que as práticas de projeto mencionadas anteriormente são respaldadas principalmente pelas normas API RP 2SK [11], API RP 2SM [14], ISO 19901-7 [12] e DNV OS-301 [13], entretanto estas apresentam diferenças nas suas respectivas metodologias (Determinística e Estados Limites) que serão abordadas na sequência. Além disso, serão discutidas algumas inconsistências nas normas citadas a cerca dos coeficientes de segurança recomendados aos projetos e dos procedimentos de análise para uma condição de avaria.

3.8.1 Abordagem Determinística versus Estados Limites

As normas API RP 2SK [11] e DNV OS-301 [13] são baseadas em duas premissas distintas para o cálculo das respostas do sistema, tais como trações nas linhas e cargas nas âncoras: Abordagem Determinística e Estados Limites (LRFD – *Load and Resistance Factor Design*), respectivamente. Estes métodos diferem-se principalmente pela maneira como são tratadas às incertezas na avaliação dos carregamentos ambientais atuantes e da resistência capacitiva do sistema de ancoragem.

A abordagem Determinística ou Método das Tensões Admissíveis caracteriza-se pelo cálculo das respostas máximas devido às ações ambientais extremas para um dado período de

retorno. Em seguida, estas respostas que são representadas na forma de esforços atuantes são comparadas com a resistência admissível do material, ou seja, a resistência nominal é minorada por um fator de segurança global. Este coeficiente geralmente é estimado empiricamente baseando-se na experiência obtida na realização de projetos em situações semelhantes.

A maior vantagem do método das Tensões Admissíveis consiste na sua facilidade de automatização e aplicação em projetos, sendo que atualmente, ainda é o mais utilizado nos empreendimentos *offshore*. No entanto, ele parte de premissas mais conservadoras, visto que todas as incertezas inerentes no processo estão concentradas em um único coeficiente de segurança. Além disso, estes fatores foram ajustados a partir da experiência passadas em projetos em lâminas d'águas mais rasas com poucas linhas conectadas a sistemas flutuantes convencionais, diferindo-se das características presentes na maioria dos projetos atuais que possuem uma considerável quantidade de *risers* em lâminas d'água profundas e ultraprofundas, tais como as do pré-sal brasileiro.

A abordagem em Estados Limites (LRFD) é considerada um método semi-probabilístico, onde se atribui fatores de segurança parciais tanto para os carregamentos atuantes quanto para a capacidade de resistência do material. Estes fatores parciais geralmente são calibrados através de análises de confiabilidade para a probabilidade de falha do sistema baseando-se em uma quantidade considerável de ocorrências, além disso, os carregamentos e a resistência do material à ruptura são tratados como variáveis aleatórias.

O método dos Estados Limites possibilita uma maior visualização das incertezas envolvidas no projeto, permitindo que sejam adotados coeficientes de segurança individuais e independentes para os carregamentos e para a capacidade de resistência, o que promove uma maior confiabilidade no tratamento destas incertezas de cálculo. Entretanto, os coeficientes de segurança calibrados por este método somente tornam-se confiáveis com a utilização de uma amostra bem representativa de casos possíveis (variações nos tipos de embarcação, lâmina d'água, carregamentos atuantes, localização, tipos de sistemas de ancoragem, entre outros).

A tendência futura é que os procedimentos de projetos *offshore*, incluindo o dimensionamento de sistemas de ancoragem, sigam uma metodologia semi-probabilística (LRFD) ou até mesmo uma metodologia completamente probabilística em maiores níveis de

confiabilidade. Este trabalho vem sendo realizado pelo comitê técnico da ISO (*International Organization for Standardization*), sendo este órgão responsável pela padronização e unificação das práticas de projeto baseando-se neste conceito.

As normas referentes a projetos de petróleo e gás são responsabilidade do subcomitê denominado de ISO/TC 67, sendo que este grupo vem desenvolvendo o seguinte conjunto de normas:

- ISO 19900 (*Petroleum and Natural Gas Industries — General Requirements for Offshore Structures*);
- ISO 19901 (*Petroleum and Natural Gas Industries — Specific Requirements for Offshore Structures*);

A parte 7 da ISO 19901 [12] trata de projetos de sistemas de ancoragem para sistemas flutuantes. Esta norma afirma ser baseada em fatores de segurança parciais (LRFD), definindo 4 Estados Limites que são mencionados na sequência:

- **Estado Limite Último (ULS)**: corresponde à resistência para as ações máximas aplicadas;
- **Estado Limite de Serviço (SLS)**: corresponde aos critérios de uso funcional;
- **Estado Limite de Fadiga (FLS)**: corresponde aos efeitos acumulados pelas ações repetitivas;
- **Estado Limite Acidental (ALS)**: corresponde às situações anormais ou eventos acidentais;

Neste sentido, a ISO 19900 [21] descreve este conjunto de estados limites, separando a influência das incertezas originada de diferentes causas (ações ambientais, propriedade dos materiais e parâmetros geométricos) por fatores de segurança parciais. Entretanto, verificou-se que, diferentemente da DNV OS-301 [11], os valores dos fatores de segurança não estão explícitos no corpo do texto deste documento, que somente apresenta as descrições e formulações que caracterizam esta filosofia de projeto.

Além disso, constatou-se que a ISO 19901-7 [12] incorpora os mesmo coeficientes de segurança globais provenientes da API RP 2SK [11], que por sua vez são baseados no Método das Tensões Admissíveis. Neste sentido, o presente trabalho enquadra tal situação como uma incoerência de conceitos, visto que a ISO 19901-7 utiliza os coeficientes presentes na API RP 2SK, os quais estão embutidos todas as incertezas do projeto, além de serem baseados numa abordagem determinística, mas em contrapartida, ela faz uso de fatores de segurança parciais para o tratamento das incertezas provenientes de ações ambientais e propriedade dos materiais, que se baseiam numa abordagem semi-probabilística.

Dessa forma, o presente trabalho recomenda que seja realizada uma revisão na utilização desses fatores de segurança globais da API, além de uma definição para a magnitude dos fatores de segurança parciais adotados pela ISO, baseando-se totalmente numa abordagem semi-probabilística, onde estes coeficientes são calibrados através de análises de confiabilidade e ensaios laboratoriais que utilizam amostras bem representativas.

3.8.2 Coeficientes de Segurança

A seção 3.4 do presente trabalho expõe as particularidades inerentes ao desenvolvimento dos principais métodos de análise de um sistema flutuante ancorado: abordagens no domínio da frequência e no domínio do tempo. Destacou-se que as análises no domínio da frequência exigem que as não-linearidades devido a dinâmica do casco e a resposta das linhas sejam eliminadas através de simplificações que envolvem linearizações de parcelas de força do sistema *offshore*. Elas são representadas principalmente pela parcela de amortecimento da equação do movimento do casco (expressão 3.3), pela rigidez não-linear física e geométrica da linha de ancoragem, parcela não-linear de arrasto da Equação de *Morison* utilizada para avaliação das cargas de fluido e os efeitos de interação entre a linha e o solo no leito-marinho.

Além disso, as normas API RP 2SK [11], ISO 19901-7 [12] e DNV OS-301[13] referenciam e recomendam também a utilização de uma simulação completa no domínio do tempo baseando-se em formulações acopladas. Estas serão descritas no Capítulo 4, onde serão destacados os benefícios que esta metodologia fornece na avaliação e consideração da interação dinâmica não-linear entre casco, linhas de ancoragem e *risers*, sendo esta de fundamental importância no dimensionamento de sistemas ancorados em lâminas d'água profundas com grande número de linhas conectadas.

Neste contexto, torna-se evidente que o nível das incertezas provenientes da avaliação dos movimentos do casco e dos esforços nas linhas varia consideravelmente em função de diversos fatores, tais como o tipo de simulação dinâmica (domínio da frequência ou do tempo), técnicas para avaliação dos esforços dinâmicos nas linhas (*quasi*-estático, dinâmico na frequência ou dinâmico no tempo) e tipo de acoplamento (formulações desacopladas ou acopladas).

Além dos fatores mencionados que se referem às análises efetuadas, existem outras variáveis que influenciam diretamente no grau de não-linearidade do sistema, como o tipo de plataforma, lâmina d'água, quantidade de linhas de ancoragem e *risers*, tipo de material das linhas (material sintético ou aço), entre outros. Como exemplo, enumeram-se os seguintes casos possíveis, com relação às características pertencentes ao tipo de unidade flutuante ancorada:

- **FPSO's com turret:** o *turret* permite que o FPSO permaneça alinhado na direção da resultante dos carregamentos ambientais atuantes, que não necessariamente é a direção de atuação das ondas. Isto pode provocar movimentos significativos de baixa frequência em *yaw*. Estes não são avaliados de forma precisa por uma abordagem no domínio da frequência, pois esta geralmente adota em seus cálculos a fixação do azimute da plataforma numa certa direção;
- **Spar Buoys:** as forças não-lineares de deriva de segunda ordem não são corretamente aproximadas por linearizações dos movimentos verticais de baixa frequência que caracterizam este tipo de plataforma. Além disso, plataformas de casco cilíndrico como a *Spar Buoy* apresentam a ocorrência de um fenômeno altamente não-linear denominado de VIM (*Vortex Induced Motion*);

- **TLP's:** as respostas de onda de segunda ordem podem excitar os movimentos ressonantes em *heave*, *roll* e *pitch* de uma TLP, sendo este fenômeno conhecido como *springing*. Dessa forma, análises no domínio do tempo são requeridas para a avaliação precisa destas respostas;
- **Sistema com amarração em configuração Taut-Leg:** o comportamento de linhas compostas por poliéster tem um efeito dinâmico menor do que as linhas convencionais compostas por cabos de aço e amarras com configuração em catenária, visto que são compostas por materiais mais pesados, garantindo um maior efeito inercial. Dessa forma, os fatores de segurança dinâmico e *quasi*-estático deveriam se aproximar, pois a utilização de simplificações nos cálculos para as parcelas dinâmicas de resposta não seria tão impactante como ocorre nos sistemas de ancoragem convencionais.

Conforme apresentado nas tabelas 3.2, 3.3 e 3.4, as normas API RP-2SK [11] e DNV OS-301 [13] atribuem aos seus respectivos coeficientes de segurança de cálculo, a diferenciação dos valores somente em relação à realização de uma análise *quasi*-estática ou dinâmica, sendo esta última sem distinguir o tipo de simulação envolvida (no domínio da frequência ou do tempo). Isto indica que os estudos para a definição dos fatores de segurança para o dimensionamento de sistemas de ancoragem não evoluíram na mesma intensidade das novas técnicas de análise e da tecnologia empregada nos projetos *offshore*.

Baseando-se nestes aspectos, o presente trabalho enfatiza a necessidade de realização de uma revisão nos coeficientes de segurança que são recomendados pelas normas citadas, buscando atribuir valores que sejam calibrados individualmente para cada tipo de simulação dinâmica utilizada, além de levar em consideração a variação dos diversos parâmetros envolvidos no projeto (tipo de unidade flutuante, materiais das linhas, lâmina d'água, entre outros).

Além disso, recomenda-se que estes estudos estejam respaldados numa análise de confiabilidade com probabilidade de falha, a fim de garantir maior confiabilidade estatística ao projeto de ancoragem sem a necessidade de adoção de uma margem de segurança muito conservadora como se tem atualmente. Claramente, o emprego destas medidas resultaria em

projetos com menor custo de implantação e uma maior visualização das incertezas envolvidas em cada etapa de análise.

3.8.3 Procedimentos de Análise para a Condição de Avaria

Conforme apresentado no item 3.3, a condição de avaria consiste na verificação do sistema de ancoragem quando este se encontra submetido a situações operacionais anormais, como a falha dos *thrusters* ou rompimento de uma linha. Neste último caso, as normas de referência recomendam somente o rompimento da linha mais tracionada para a realização das análises de avaria. Entretanto, percebe-se que a consideração do rompimento da linha que possui maior tração resultará somente na obtenção das maiores derivas possíveis, ou seja, esta condição não necessariamente acarretará nas maiores trações nas linhas.

Visando contornar tal situação, recomenda-se que os projetistas de ancoragem adotem no projeto uma segunda condição de avaria que consiste no rompimento da segunda linha mais tracionada que é obtida preliminarmente na análise de condição intacta. Este procedimento provavelmente resultará na maior tração possível para a primeira linha (a mais tracionada) que é ocasionada por esta condição. Durante a revisão bibliográfica, constatou-se que este procedimento não se encontra explicitado nas normas vigentes. Dessa forma, o presente trabalho propõe que o procedimento de rompimento da segunda linha mais tracionada seja inserido no âmbito da condição avariada descrita nas normas, a fim de obter uma maior confiabilidade nos resultados obtidos nos projetos atuais de sistemas de ancoragem.

Ressalta-se que a empresa Petrobras já adota tal procedimento descrito nos projetos de sistemas flutuantes ancorados, apesar dele não estar referenciado nas normas citadas.

4 METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE SISTEMAS FLUTUANTES *OFFSHORE*

4.1 Introdução

Conforme mencionado no Capítulo 1, com o avanço da exploração e produção de petróleo em águas cada vez mais profundas, além do aumento significativo da quantidade de *risers* em unidades flutuantes, tornou-se evidente que a plataforma e suas linhas de ancoragem e *risers* não podem ser tratadas como estruturas completamente independentes uma das outras. Neste contexto, verificou-se a necessidade de desenvolvimento de metodologias de análise de sistemas flutuantes que considerem a interação dinâmica não-linear entre seus componentes.

Neste capítulo serão apresentadas as diferentes estratégias de análise para o projeto de sistemas flutuantes *offshore* (ancoragens e *risers*), nas quais se diferem pelo tipo de formulação utilizada (acoplada ou desacoplada) e pelo nível de acoplamento de sua implementação computacional (no caso das metodologias que utilizam a formulação acoplada). São estas:

- *Metodologia Desacoplada;*
- *Metodologia Acoplada;*
- *Metodologia Híbrida.*

A seguir, será enfatizada a sequência de análises envolvidas num projeto híbrido *offshore*, explicitando as ferramentas computacionais que geralmente são utilizadas em cada etapa.

4.2 Metodologia Desacoplada

A Metodologia Desacoplada, também conhecida como Método Clássico, consiste na metodologia mais tradicional utilizada em projetos de sistemas flutuantes. Neste tipo de análise, empregam-se ferramentas computacionais baseadas em formulações desacopladas, sendo que o modelo hidrodinâmico da unidade flutuante não leva em conta o comportamento dinâmico não-linear das linhas. Além disso, a interação entre os *risers* e linhas de ancoragem não é considerada, ou considerada somente de forma parcial.

A análise desacoplada se inicia com a execução de uma análise hidrodinâmica do casco da UF que está sujeito aos carregamentos de onda, visando à obtenção de parâmetros hidrodinâmicos e funções de transferência (RAO's), sendo estes necessários para a determinação dos movimentos.

Em seguida, efetua-se uma análise desacoplada dos movimentos da UF, onde a contribuição das linhas de ancoragem e risers em termos de massa, rigidez e amortecimento, além de uma parcela das cargas de correnteza atuantes nas linhas, são representadas por coeficientes escalares introduzidos nas equações do movimento da UF, conforme esquematizado na figura 4.1.

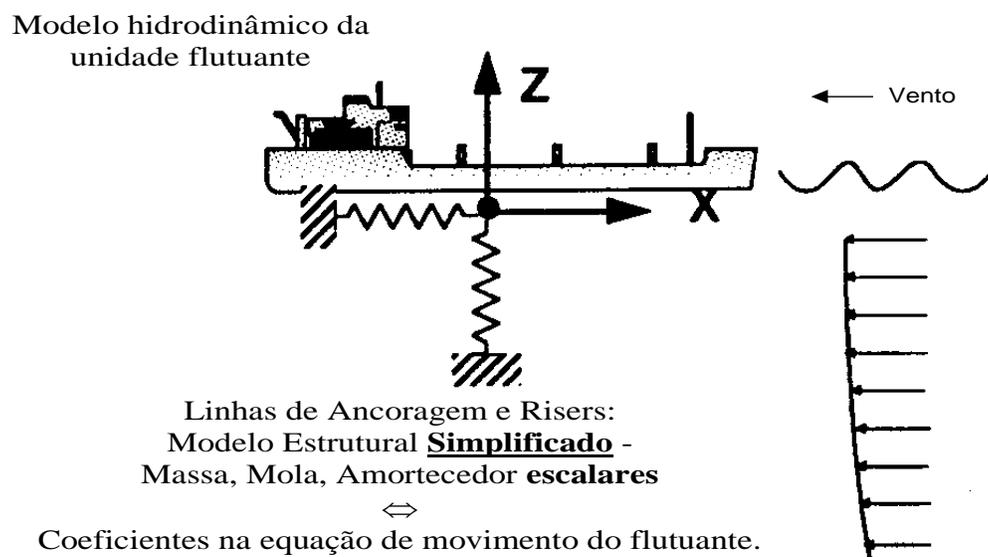


Figura 4.1 – Etapa de Análise Hidrodinâmica da UF (Metodologia Desacoplada).

A partir desta etapa, inicia-se o projeto do sistema de ancoragem (descrito no capítulo 3), onde é verificada a integridade das linhas através da determinação das respostas aos carregamentos atuantes, tais como as trações máximas atuantes nas linhas de ancoragem, esforços nas âncoras, comprimento de linha apoiado no solo, além do cálculo da vida-útil de fadiga. Em seguida, os parâmetros obtidos são comparados com os critérios de projeto estabelecidos.

Os coeficientes escalares mencionados geralmente são calculados através de modelos analíticos baseados na equação da catenária ou ajustados por modelos experimentais. O relatório do JIP, *Integrated Mooring and Riser Design* [22], propôs a utilização de métodos simplificados

para a calibração destes coeficientes escalares, considerando uma maior contribuição das linhas na determinação dos movimentos da plataforma. Alguns destes métodos que são sintetizados adiante podem ser considerados como uma evolução na direção de aplicação de uma Metodologia Híbrida (descrita na seção 4.4) para a determinação dos coeficientes da UF.

➤ **Forças Hidrodinâmicas dos Risers e Linhas de Ancoragem:**

Os métodos apresentados no JIP [22] para a consideração da parcela de cargas hidrodinâmicas provenientes das linhas baseiam-se na adoção de um modelo simplificado de cilindro vertical equivalente, ou na elaboração de um modelo de elementos finitos do conjunto de *risers* e linhas de ancoragem.

No primeiro procedimento mais simplificado, assume-se um cilindro vertical equivalente com altura igual à distância entre a quilha da plataforma e o leito-marinho, além de um diâmetro de arrasto igual à soma dos diâmetros de arrasto individuais de cada linha. A velocidade de corrente V_c é considerada constante em toda a LDA e a velocidade horizontal das linhas varia linearmente de um valor nulo no leito-marinho, para um valor igual à V_m na superfície, conforme exposto na figura 4.2. Finalmente, a parcela de carga atuante na UF é calculada através da reação de apoio no topo de um modelo de viga bi apoiada.

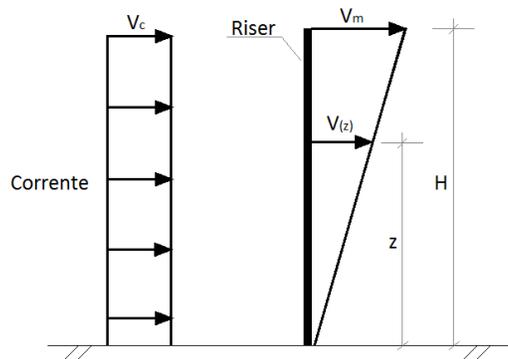


Figura 4.2 – Modelo de um Cilindro Vertical Equivalente.

O segundo procedimento apresentado em JIP [22] consiste na elaboração de um modelo de elementos finitos para uma linha típica, adotando-se perfis reais de correnteza. Entretanto, atualmente, a maioria dos programas de análise de *risers* e ancoragens permite a geração de um modelo considerando todas as linhas sem restrições, inclusive o programa SITUA [10]. Dessa

forma, este procedimento pode ser adaptado a partir dessas diretrizes, e através de uma análise estática para o conjunto de linhas, onde são consideradas todas as direções de incidência dos carregamentos ambientais, para a obtenção das reações no topo.

➤ **Contribuição da Rigidez das Linhas:**

Durante muito tempo, somente a contribuição das ancoragens em termos de rigidez era considerada na determinação de movimentos da unidade flutuante. No entanto, com a difusão de programas de elementos finitos de *risers* e com a verificação da real influência destes no comportamento hidrodinâmico e estrutural das plataformas flutuantes, o cálculo da rigidez das linhas dos *risers* também adquiriu extrema importância.

A rigidez das linhas é obtida a partir das curvas de restauração, que são determinadas através de uma análise estática de um modelo de elementos finitos do conjunto de linhas (mesmo modelo utilizado para a obtenção das forças hidrodinâmicas), com a introdução de deslocamentos prescritos em cada direção. Posteriormente, a rigidez resultante é extraída da tangente desta curva, ou em casos não-lineares, ela é representada pela própria curva de restauração. Na sequência, a rigidez é aplicada ao modelo hidrodinâmico na forma de molas lineares (ou não-lineares).

➤ **Contribuição da Massa Adicionada das Linhas:**

A contribuição da massa adicionada das linhas pode ser estimada através de um método mais simplificado, adotando-se uma porcentagem da massa das linhas como a parcela que atua na UF. Como exemplo, em plataformas do tipo TLP, geralmente um terço da massa dos tendões é adicionada à massa do casco [6]. Outro método consiste na utilização dos resultados de um ensaio de decaimento realizado em tanques de prova, onde a massa adicionada é determinada pela equação (4.1).

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{M}{K}} \quad (4.1)$$

Onde:

$T \rightarrow$ Período natural do sistema calculado por Ensaio de Decaimento Numérico;

$M \rightarrow$ Massa + massa adicionada da unidade flutuante;

$K \rightarrow$ Rigidez Horizontal na posição de deriva nula;

➤ **Contribuição do Amortecimento das Linhas:**

Analogamente à massa adicionada das linhas, os coeficientes de amortecimento podem ser obtidos através de uma estimativa realizada pelo projetista, ou através dos resultados de um ensaio de decaimento realizado em tanques de prova, associado às equações (4.1) e (4.2).

$$B = 2 \cdot \xi \cdot \sqrt{M \cdot K} \quad (4.2)$$

Onde:

$B \rightarrow$ Coeficiente de Amortecimento;

$k \rightarrow$ Taxa de Amortecimento obtida pelo ensaio de decaimento;

$M \rightarrow$ Massa + massa adicionada da unidade flutuante;

$K \rightarrow$ Rigidez Horizontal na posição de deriva nula;

A Metodologia Desacoplada ainda mostra-se eficiente para o projeto de ancoragem e *risers* de Unidades Flutuantes ancoradas em lâminas d'água rasas e com poucas linhas conectadas a UF, visto que este método possui baixo custo computacional. Entretanto, na medida em que a embarcação atinge lâminas d'água mais profundas e encontra-se conectada a um elevado número de *risers*, ou em estruturas de menor porte como monoboias, onde a interação dinâmica não-linear entre a boia e as linhas tem forte influência e não pode mais ser desprezada, o Método Clássico passa a não garantir resultados satisfatórios ao projeto.

4.3 Metodologia Acoplada

A aplicação da Metodologia Acoplada visa garantir melhores resultados através da análise em uma única estrutura de código de dados, de um modelo hidrodinâmico da UF acoplado a um modelo em Elementos Finitos para representação da dinâmica não-linear das linhas de ancoragem e *risers*, conforme esquematizado na figura 4.3.

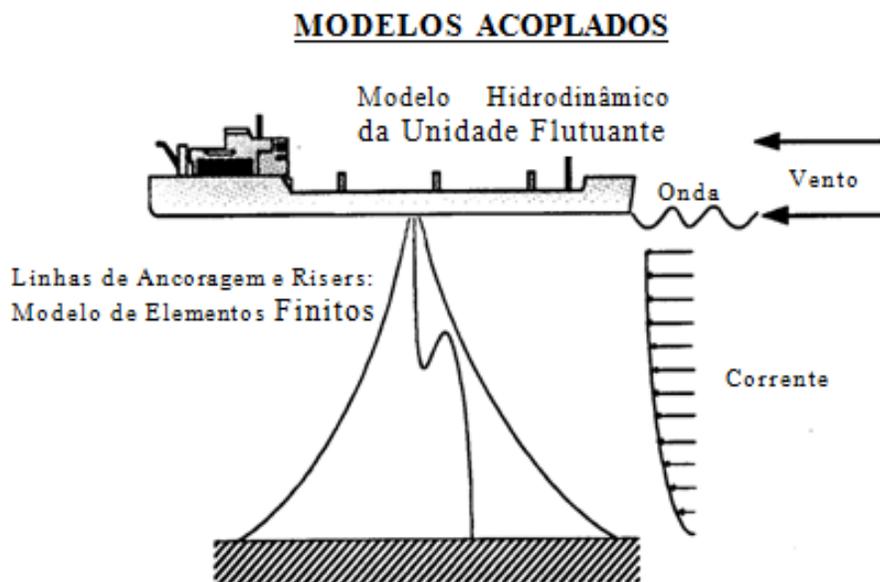


Figura 4.3 – Esquema da Metodologia Acoplada.

Neste método, o equilíbrio dinâmico do sistema flutuante é obtido através de uma análise dinâmica não-linear no domínio do tempo, o que permite integrar a determinação dos movimentos da UF e a resposta estrutural das linhas de ancoragem e *risers* em uma mesma análise.

Em BAHIENSE [7], foram apresentadas duas diferentes estratégias de implementação computacional para as formulações acopladas, que se diferenciam pelos seus respectivos níveis de acoplamento. Estas técnicas são sintetizadas a seguir:

➤ **Análise Fracamente Acoplada:**

Na estratégia de análise Fracamente Acoplada, uma análise dinâmica não-linear das linhas modeladas por Elementos Finitos é realizada em cada instante de tempo da integração das equações do movimento da embarcação. Em cada passo de análise, as componentes de movimento da UF são aplicadas no topo das linhas, que estão submetidas à ação dos carregamentos ambientais (onda e correnteza) e do peso próprio. Através desta análise dinâmica, obtêm-se as forças no topo das linhas, que são acumuladas e aplicadas no lado direito das equações do movimento da plataforma.

➤ **Análise Fortemente Acoplada:**

A análise Fortemente Acoplada baseia-se na criação de um nó adicional no CG da unidade flutuante para representação dos seus seis graus de liberdade, sendo que, em seguida, este nó é incorporado ao modelo de Elementos Finitos das linhas através de elementos rígidos conectados. Dessa forma, o modelo hidrodinâmico do casco é incorporado à malha das linhas pelo agrupamento das matrizes de massa, amortecimento e rigidez em uma única matriz global, fazendo com que as respostas do conjunto linhas e dos movimentos da plataforma sejam obtidas simultaneamente.

Vale ressaltar que as duas estratégias de análise acoplada encontram-se implementadas no programa SITUA-Prosim [10].

A Metodologia Acoplada fornece diversas vantagens à análise de unidades flutuantes ancoradas, como exemplo, a possibilidade de integração do projeto de *risers* e ancoragem, garantindo mais segurança e confiabilidade a ambos. Outra vantagem é relacionada ao fato de não existir mais a necessidade da calibração de coeficientes escalares por parte de engenheiros experientes para a consideração da contribuição das linhas (massa adicionada, amortecimento e rigidez) ao modelo. Estes fatos fazem com que a obtenção de resultados precisos não dependa principalmente do conhecimento e experiência do engenheiro que executa as análises.

Entretanto, uma considerável desvantagem deste método consiste no fato de que ele exige um elevado custo computacional. Nesse contexto, desenvolveu-se a Metodologia Híbrida

(apresentada na seção seguinte) que visa combinar as vantagens da Metodologia Clássica com as da Metodologia Acoplada nas análises.

4.4 Metodologia Híbrida

A Metodologia Híbrida foi desenvolvida com o objetivo de se introduzir gradativamente as formulações acopladas ao projeto integrado de sistemas *offshore*, visto que ainda há a necessidade de redução do custo computacional e de memória. Estes decorrem, principalmente, pela necessidade de geração de um modelo acoplado “pesado”, cuja malha de Elementos Finitos para representação de todas as linhas possui muitos elementos discretizados, associado a tempos de simulação relativamente longos.

Esta metodologia baseia-se principalmente na combinação da utilização de formulações acopladas e desacopladas para a determinação dos movimentos do sistema flutuante e realização da análise estrutural das linhas.

Atualmente, a utilização da Metodologia Híbrida no projeto de sistemas de ancoragem e *risers* é considerada essencial e está sendo adotada pelas empresas líderes do ramo (como a Petrobras) para o projeto de suas novas plataformas flutuantes, cuja lâmina d’água e quantidade de *risers* conectados são muito maiores. Neste sentido, novas propostas híbridas de integração têm sido estudadas (como a apresentada no presente trabalho), da forma que se aproxime cada vez mais da aplicação de uma ferramenta que considere integralmente a interação física e dinâmica entre os componentes de um sistema flutuante.

Em CORRÊA [5], a aplicação da Metodologia Híbrida foi enquadrada em duas categorias:

- *Análise Acoplada Simplificada Curta;*
- *Análise Acoplada Simplificada Longa.*

4.4.1 Análise Acoplada Simplificada Curta

Esta técnica consiste na utilização de uma análise acoplada com tempo de simulação relativamente curto, objetivando somente a calibração de coeficientes escalares que serão introduzidos nas equações de movimento da embarcação de um modelo desacoplado. Este

processo não exige um elevado grau de refinamento da malha de Elementos Finitos das Linhas, visto que o modelo referenciado não será utilizado para a análise dinâmica não-linear das ancoragens e *risers*.

A Análise Simplificada Curta também pode proporcionar a geração de RAO's mais aprimorados, visto que a obtenção de coeficientes escalares através de uma análise acoplada permite que seja considerada a influência das linhas no comportamento dinâmico do caso, mesmo que de uma forma simplificada. Dessa forma, programas baseados na Difração-Radiação como o WAMIT [23], que permite a entrada destes coeficientes, podem gerar RAO's mais representativos para a utilização em modelos desacoplados.

A calibração destes coeficientes de massa adicionada, rigidez e amortecimento é aferida através de procedimentos específicos apresentados em [5] e [6]. Dentre eles, destaca-se o Ensaio de Decaimento Numérico, sintetizado no item a seguir.

4.4.1.1 Ensaio de Decaimento Numérico (Decay Test)

O Ensaio de Decaimento Numérico representa uma aplicação da Metodologia Híbrida quanto à análise de movimentos acoplada da unidade flutuante. Uma de suas principais aplicações consiste na calibração de coeficientes de amortecimento para cada grau de liberdade do sistema, além da determinação do seu período natural.

Este teste baseia-se na utilização de um modelo hidrodinâmico do casco acoplado a uma malha pouco refinada de elementos finitos das linhas para a determinação dos movimentos da plataforma, conforme mencionado anteriormente. A partir da posição do *offset* estático, insere-se um deslocamento inicial neste modelo, obtendo-se uma resposta harmônica amortecida de deslocamento com período constante e amplitude sendo reduzida ao longo do tempo (figura 4.4).

Vale ressaltar que o tempo de simulação necessário para esta análise geralmente é curto (cerca de 3 vezes o período natural do sistema), visto que somente é necessário um tempo que garanta a obtenção de resultados estáveis estatisticamente.

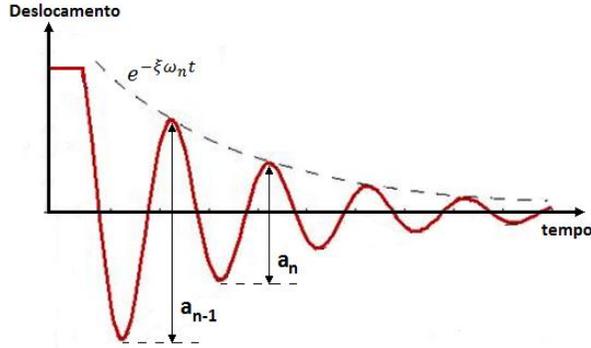


Figura 4.4 –Resposta harmônica de um Teste de Decaimento Numérico.

Segundo CLOUGH [24], o decaimento observado na amplitude de deslocamentos ao longo do tempo (curva tracejada da figura 4.4), é descrito pela seguinte expressão:

$$decay(t) = e^{-\xi \omega_n t} \quad (4.3)$$

Onde:

$\xi \rightarrow$ Taxa de Amortecimento linear;

$\omega_n \rightarrow$ Frequência da resposta;

$n \rightarrow$ Número de Ciclos.

Dessa forma, a taxa de amortecimento linear do sistema é obtida através da razão entre dois picos sucessivos da resposta, conforme apresentado nas equações (4.4) e (4.5).

$$\frac{a_{n-1}}{a_n} = \frac{e^{-\xi \cdot 2\pi \cdot (n-1)}}{e^{-\xi \cdot 2\pi \cdot n}} = e^{\xi \cdot 2\pi} \quad (4.4)$$

$$\therefore \xi = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{a_{n-1}}{a_n}\right) \quad (4.5)$$

Onde:

$a_n \rightarrow$ Amplitude de deslocamento para o ciclo n ;

$a_{n-1} \rightarrow$ Amplitude de deslocamento para o ciclo $n-1$.

De acordo com SENRA [6], o teste de decaimento numérico ainda possibilita o cálculo do período natural do sistema amortecido através da equação 4.6.

$$T_D = \frac{T}{\sqrt{(1 - \xi^2)}} \quad (4.6)$$

Onde:

T_D → Período natural amortecido do sistema;

T → Período natural não-amortecido.

Além da obtenção do coeficiente de amortecimento, a determinação da taxa de amortecimento linear e do período natural amortecido pelo Ensaio de Decaimento Numérico permite o cálculo dos coeficientes de rigidez e massa adicionada através das expressões 4.1 e 4.2, apresentadas na seção 4.2.

Cabe destacar que a perda de energia de um sistema *offshore* também decorre de parcelas de amortecimento que dependem da velocidade ao quadrado. Portanto, a expressão 4.3 pode ser utilizada para se encontrar uma taxa de amortecimento linear equivalente que incorpora contribuições lineares e quadráticas.

4.4.2 Análise Acoplada Simplificada Longa

Este procedimento baseia-se na substituição da primeira etapa da Metodologia Desacoplada (descrita no item 4.2) pelo emprego de uma análise acoplada com tempo de simulação suficientemente longo para a determinação dos movimentos do sistema flutuante ancorado, baseando-se dessa forma, numa formulação acoplada.

Da mesma forma que a Análise Simplificada Curta, utiliza-se um modelo acoplado com uma malha pouco refinada das linhas para a realização da análise hidrodinâmica do sistema. Maiores informações a cerca do grau de refinamento necessário para obtenção de resultados confiáveis para esta etapa são encontradas em CORRÊA [5].

Após a determinação dos movimentos da UF provenientes de uma análise acoplada, realiza-se a segunda e última etapa que consiste na análise estrutural dos *risers*, baseando-se em formulações desacopladas. Esta análise assemelha-se à etapa descrita na Metodologia Desacoplada, diferenciando-se pelo fato de que os movimentos da UF serão prescritos no topo dos *risers* enquanto os resultados das ancoragens são obtidos diretamente pela análise acoplada. Sendo assim, estas linhas de *risers* continuam sendo representadas por um modelo desacoplado com uma malha de Elementos Finitos suficientemente refinada para o cálculo da sua resposta estrutural através de análises dinâmicas não-lineares.

4.5 Ferramentas Computacionais nas Etapas de Análise

Conforme visto no item anterior, a aplicação da Metodologia Híbrida no projeto de sistemas flutuantes envolve algumas etapas sequenciais de análise que visam o dimensionamento completo dos seus componentes. Em projetos *offshore*, o desenvolvimento destas etapas é auxiliado por ferramentas computacionais que são baseadas em formulações acopladas ou desacopladas. Dessa forma, este item busca explicitar a sequência das análises envolvidas em um projeto híbrido, além de descrever o papel de cada ferramenta computacional utilizada, dando ênfase aos programas adotados pela empresa Petrobras, sendo que a maioria destes foi desenvolvida pela própria em parceria com a COPPE/UFRJ.

a) Determinação dos Parâmetros Hidrodinâmicos

Inicialmente, o projeto necessita do cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos de onda que levam em conta as forças de deriva média e lenta no casco, além do amortecimento dependente da frequência das ondas (amortecimento potencial). Estes coeficientes são obtidos pela realização de uma análise hidrodinâmica do casco, sendo esta executada por programas comerciais que se baseiam na Teoria da Difração-Radiação, como é o caso do WAMIT [23].

A análise hidrodinâmica efetuada parte de formulações desacopladas, visto que o modelo hidrodinâmico não considera os efeitos não-lineares das linhas, ou considera de forma simplificada e linearizada com a introdução de matrizes de restauração e de amortecimento. Além disso, programas de difração como WAMIT só levam em conta os efeitos de onda no casco, o que faz com que os efeitos decorrentes do vento e correnteza atuantes sejam calculados

externamente através de ensaios em modelos reduzidos. Estes efeitos são representados na forma de coeficientes de vento e correnteza (arrasto), que são lidos pelo programa de análise de movimentos numa etapa posterior.

Ressalta-se que outros programas comerciais também são capazes de realizar a etapa de determinação dos parâmetros hidrodinâmicos calculados pelo WAMIT, como é o caso do Wadam.

b) Elaboração da Batimetria e Verificação de Obstáculos no Fundo

Antigamente, programas de análise de movimentos não consideravam as variações topográficas no leito-marinho, cuja representação era simplificada por uma superfície perfeitamente plana. No entanto, o crescente número de obstáculos localizados no fundo do mar como as linhas, *manifolds* e âncoras, somado a verificação da real influência da batimetria no comportamento do sistema flutuante, fizeram com que programas como o SITUA incorporasse a batimetria de fundo e a identificação dos obstáculos em sua estrutura.

No caso da Petrobras, a batimetria e a localização dos obstáculos são monitoradas pelo SGO (Sistema de Gerenciamento de Obstáculos), que são responsáveis pela elaboração de mapas batimétricos com a locação de equipamentos submarinos existentes, que posteriormente serão lidos pelo SITUA para a caracterização do fundo do mar nos seus modelos numéricos.

c) Geração do Modelo Numérico e Análise de Movimentos Acoplada: SITUA-Prosim

O sistema SITUA-Prosim [10] vem sendo desenvolvido pelo laboratório LAMCSO da COPPE/UFRJ em parceria com a Petrobras desde 1997. Ele permite a realização de simulações estáticas e dinâmicas do movimento de unidades flutuantes, baseando-se em formulações acopladas.

A estrutura desta ferramenta computacional é dividida em dois componentes principais:

- ***SITUA***: pré-processador compilado em linguagem *Visual Basic*; possui uma interface gráfica responsável pela elaboração dos modelos numéricos acoplados (casco e linhas), especificação dos carregamentos ambientais atuantes, leitura dos dados batimétricos e obstáculos fornecidos pelo SGO, além dos coeficientes de

onda gerados pelo WAMIT e dos coeficientes de vento e correnteza obtidos em ensaios experimentais;

- ***Prosim***: pós-processador compilado em linguagem *Fortran*; responsável pelas simulações estáticas e dinâmicas nos modelos numéricos acoplados gerados pelo SITUA, através de algoritmos de integração numérica no tempo.

Como resultados dessas análises, o programa fornece a resposta do sistema flutuante na forma de movimentos na direção dos seus seis graus de liberdade: *surge*, *sway*, *heave*, *pitch*, *roll* e *yaw*.

d) Tratamento Estatístico dos Sinais de Resposta

Os movimentos da UF obtidos pelo SITUA-Prosim podem ser considerados como uma combinação entre as parcelas de baixa frequência e na frequência da onda, somados a uma possível existência de um ruído de sinal na resposta. Além disso, a simulação dinâmica dos movimentos geralmente é iniciada com a utilização de uma rampa de aplicação dos carregamentos ambientais, a fim de se evitar problemas de convergência na simulação.

Ressalta-se que a filtragem dos sinais é uma etapa opcional e fica a critério do projetista, visto que a análise estrutural das linhas pode ser realizada tanto com a série filtrada, como com a série temporal completa dos movimentos.

5 METODOLOGIA SEMI-ACOPLADA

5.1 Introdução

Nos últimos anos, pesquisadores do LAMCSO da COPPE/UFRJ vêm trabalhando no desenvolvimento e implementação de algoritmos e métodos inovadores para a solução de problemas dinâmicos, aplicados no contexto de ferramentas de análise dinâmica não-linear de sistemas flutuantes *offshore*. O método semi-acoplado foi desenvolvido para auxiliar os projetistas principalmente na fase inicial de projeto que requer análises expeditas que aliem velocidade computacional e precisão nos resultados. Embora esta ideia possa ser aplicada a qualquer algoritmo de integração de cascos, na atual versão do programa SITUA-Prosim, ele foi construído tomando partida do algoritmo de integração dinâmica, HTF-GA (*Hybrid Time-Frequency Domain with Green Approach*) [8, 9].

O algoritmo HTF-GA é baseado em evoluções do algoritmo híbrido tempo-frequência ImFGA (*Implicit Fourier Green Approach*) para solução de equações de movimento de sistemas estruturais [8]. Esses algoritmos empregam um procedimento derivado da DFT (*Discrete Fourier Transform*) que se baseia no cálculo implícito da função de *Green* do sistema no domínio da frequência. O procedimento emprega uma técnica de correção da DFT para eliminar efeitos indesejáveis da periodicidade, comumente encontrados em ferramentas para transformação de domínio com uso de séries harmônicas, tais como a DFT e a FFT (*Fast Fourier Transform*).

Neste sentido, o HTF-GA apresenta uma importante aplicação que consiste na utilização deste para a integração das equações de movimento do casco de sistemas flutuantes *offshore*, visto que estes envolvem componentes de força calculados a partir de coeficientes dependentes da frequência, como o amortecimento potencial e a massa adicionada do modelo hidrodinâmico do casco, além de envolver componentes de força acentuadamente não-lineares, tais como as resultantes da consideração da elevação instantânea da superfície livre do mar, o comportamento hidrostático do casco, o arrasto viscoso, e o comportamento não-linear das linhas, incluindo por exemplo a variação da região em contato com o solo (TDP).

De acordo com CORRÊA [9], o método híbrido tempo-frequência HTF-GA quando utilizado para a integração das equações de movimento do casco resulta em um menor custo computacional atrelado a uma maior precisão do que os métodos clássicos, como o *Runge-Kutta* de 4ª Ordem. As propriedades dependentes da frequência (massa adicionada e amortecimento potencial) são tratadas implicitamente no domínio da frequência, evitando as simplificações adotadas nos procedimentos atuais e a solução da integral de convolução da função memória a cada instante de tempo, que exige um esforço computacional elevado. Além disso, as componentes não-lineares de força são tratadas de forma rigorosa no lado direito das equações de movimento, ao contrário dos métodos tradicionais que se baseiam em simplificações, tal como a linearização do termo quadrático do arrasto viscoso.

5.2 Definição

Atualmente, o algoritmo HTF-GA vem sendo incorporado no programa SITUA-Prosím no contexto de uma formulação Fracamente Acoplada. Entretanto, apesar deste procedimento apresentar significativas evoluções na redução do custo computacional em comparação aos métodos tradicionais, ele ainda é dispendioso para a execução de um elevado número de combinações de carregamento. Daí surgiu a motivação para o desenvolvimento de um novo procedimento expedito denominado HTF-GA Semi-Acoplado, que consiste numa ferramenta com o custo computacional bastante reduzido, sendo adequada principalmente para etapas preliminares de projeto.

No procedimento HTF-GA Semi-Acoplado as linhas deixam de ser representadas por malhas de elementos finitos, passando a ser representadas por uma matriz de rigidez global equivalente com seis graus de liberdade obtida na posição de equilíbrio estático do sistema flutuante. O termo “semi-acoplado” utilizado para caracterizar este procedimento refere-se ao fato de que a matriz equivalente para as linhas é determinada automaticamente pelo programa SITUA, a partir de análises estáticas acopladas onde as linhas são representadas por suas malhas de Elementos Finitos. Desta forma, serão geradas matrizes equivalentes para diferentes posições de equilíbrio estático do sistema, correspondentes a cada condição de carregamento ambiental. A matriz de rigidez equivalente das linhas pode ser incorporada à matriz de rigidez do casco, a qual por sua vez entra nos cálculos da determinação da função de *Green* da unidade flutuante.

Ressalta-se que este procedimento envolve algumas simplificações relativas à linearização do comportamento das linhas durante a simulação dinâmica em torno da posição de equilíbrio estático. Em contrapartida, a rigidez global do conjunto pode ser calculada com as linhas em configurações tão complexas quanto às que são tratadas em modelos acoplados, levando em conta efeitos normalmente desconsiderados nos procedimentos tradicionais *quasi*-estáticos de representação de linhas, tais como a influência da correnteza e de flexão das linhas modeladas por elementos de pórtico.

Em suma, a ferramenta semi-acoplada é indicada em situações onde se deseja calcular os movimentos do casco e esforços nas linhas com uma precisão aceitável. Ela não possui o mesmo rigor de uma análise totalmente acoplada, entretanto é mais precisa que os procedimentos desacoplados tradicionais, nos quais as linhas são representadas através de curvas de restauração ou por equações analíticas de catenária. No presente trabalho, o procedimento HTF-GA Semi-Acoplado será apresentado no seguinte item.

5.3 Procedimento

Nesta seção é apresentado o procedimento proposto para o projeto de um sistema de ancoragem preliminar, baseando-se em análises não-lineares que utilizam formulações acopladas e semi-acopladas no domínio do tempo. Tais procedimentos encontram-se inseridos em uma Metodologia Híbrida completa de projeto, onde são destacadas as etapas de cálculo envolvidas, além das decisões a serem tomadas pelos projetistas no decorrer do dimensionamento do sistema de ancoragem. Dessa forma, podem-se sequenciar as etapas de procedimento como se segue:

➤ ***ETAPA (1): Carregamentos Ambientais***

Determinam-se os critérios ambientais, tais como as velocidades e direções de vento e correnteza atuantes, parâmetros de onda para um mar irregular (Altura Significativa H_s e Período de Pico T_p), de acordo com os Períodos de Retorno que serão adotados no projeto. Os carregamentos moderados e extremos definidos são utilizados tanto para a condição intacta, quanto para a condição de avaria. Para esta etapa, também é incluída a definição das características batimétricas do leito-marinho na região onde se situa a UF.

➤ ***ETAPA (2): Combinações de Carregamento***

Definem-se as combinações de carregamento de onda, vento e correnteza de acordo com as suas direções de atuação e com o Período de Retorno. As combinações devem enquadrar todas as situações possíveis, além de considerar a possibilidade de ocorrência entre um desalinhamento na direção de atuação das ações ambientais, conforme descrito no item 3.3.

➤ ***ETAPA (3): Parâmetros de Análise***

Definem-se os parâmetros necessários para a execução das simulações estáticas e dinâmicas não-lineares, tais como a escolha do algoritmo de integração no tempo para o casco e linhas, além da definição de rampa de aplicação de carregamentos, do intervalo de integração utilizado e do tempo total de simulação dinâmica.

➤ ***ETAPA (4): Modelagem do Sistema Flutuante Offshore (Casco + Risers)***

Elabora-se o modelo hidrodinâmico do casco da UF acoplado aos *risers*, umbilicais e anulares que são modelados por Elementos Finitos Finitos, baseado em um sistema de *risers* pré-definido. Definem-se suas características hidrodinâmicas, físicas e geométricas. Para os *risers* flexíveis e umbilicais, são introduzidos parâmetros como o azimute, ângulo de topo, características dos materiais que as compõem, raio de curvatura mínimo, tração máxima de utilização. Para os SCR's (*Steel Catenary Risers*), inclui-se também a definição da sua Tensão Admissível de *Von Mises*.

➤ ***ETAPA (5): Modelagem do Sistema de Ancoragem***

Acrescenta-se ao modelo acoplado elaborado na Etapa (4) o sistema de ancoragem de partida a ser analisado, também modelado por malhas de Elementos Finitos. Conseqüentemente, nesta etapa é definida a quantidade de linhas do sistema e seus respectivos azimutes, ajuste de parâmetros relativos aos comprimentos e características físicas de cada componente (amarras, cabos de aço e cabos sintéticos) constituinte, e determinação das posições das âncoras e das pré-trações atuantes nas linhas de ancoragem.

➤ ***ETAPA (6): Ajustes Paramétricos do Sistema de Ancoragem***

Nesta etapa, ajusta-se o sistema de ancoragem através de estudos paramétricos com simulações semi-acopladas que foram descritas na seção 4.4.

➤ ***ETAPA (7): Execução das Simulações Semi-Acopladas***

Executam-se as simulações estáticas e dinâmicas não-lineares no domínio do tempo com o modelo semi-acoplado. Nesta etapa, calcula-se internamente o equilíbrio do sistema devido às forças ambientais estáticas atuantes no sistema, obtendo-se o *offset* estático da plataforma. A partir desta nova posição, determinam-se as respostas do sistema *offshore* aos carregamentos dinâmicos, que são representados pelos esforços nas linhas de ancoragem e derivas totais sofridas pela embarcação. Os resultados do projeto de ancoragem são representados, dentre outros, através de séries temporais de tração nas linhas e de movimentos ao longo do tempo de simulação.

➤ ***ETAPA (8): Avaliação do Sistema de Ancoragem***

A avaliação do sistema de ancoragem é composto pelas sub-etapas descritas a seguir:

• ***Sub-Etapa (8.1): Processamento Estatístico da Resposta***

Os sinais de resposta obtidos devem ser tratados estatisticamente, visando à obtenção da tração extrema atuante em cada linha de ancoragem, além das derivas máximas sofridas pelo sistema flutuante. Conforme apresentado no item 3.5.4, o processamento deve ser baseado na modelagem de uma Distribuição de Probabilidade que melhor se enquadra ao caso analisado. Ressalta-se que esta etapa é válida tanto para o modelo intacto, quanto para o modelo avariado.

• ***Sub-Etapa (8.2): Verificação do Sistema Avariado***

Nesta etapa, devem-se fazer ajustes no modelo numérico intacto do sistema de ancoragem, para que seja representada a condição avariada. Estes ajustes são baseados na retirada do modelo da linha de ancoragem mais tracionada para a condição intacta, a fim de representar o seu rompimento. Conforme apresentado no item 3.8.3, propõe-se que também se considere outra situação para a representação da condição de avaria, baseada no rompimento da segunda linha mais tracionada, a fim de obter a maior tração possível atuante na primeira linha mais tracionada.

• ***Sub-Etapa (8.3): Verificação dos Critérios de Projeto de Ancoragem***

Após a obtenção das trações máximas atuantes, são verificados os critérios de projeto relativos à tração máxima admissível, resistência das âncoras e ao comprimento

mínimo apoiado das linhas, para as condições intacta e de avaria. Estes critérios são definidos pelas normas vigentes e apresentados na seção 3.5.

- ***Sub-Etapa (8.4): Decisão a ser tomada***

Se a resposta da UF estiver dentro dos limites estabelecidos pelos critérios de projeto, seguir para a Etapa (9); caso contrário, deve-se retroceder para a Etapa (6).

- ***ETAPA (9): Análise Transiente***

Caso o projeto analisado necessite da realização da Análise Transiente, devem-se seguir os procedimentos descritos na seção 3.7 do presente trabalho.

6 ESTUDO DE CASO

6.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado um estudo detalhado a cerca de um dos casos que se enquadram em situações reais de projeto de sistemas flutuantes ancorados. Este estudo visa validar e consolidar o procedimento proposto no Capítulo 5 para o dimensionamento preliminar de um sistema de ancoragem baseando-se em uma Metodologia Semi-Acoplada.

As avaliações realizadas foram baseadas no projeto da plataforma semissubmersível P-18 de propriedade da empresa Petrobras e que foi construída para operar na Bacia de Campos sobre uma lâmina d'água de 910 metros.

A ferramenta computacional SITUA-Prosim [10] desenvolvida pelo LAMCSO da COPPE/UFRJ, foi utilizada para a elaboração do modelo numérico e para a execução das análises necessárias da plataforma. O SITUA permite que o acoplamento entre o modelo hidrodinâmico do casco e a malha de Elementos Finitos para representação das linhas de ancoragem, *risers*, umbilicais e anulares seja representado em um único modelo numérico. Além disso, o processador Prosim é responsável pela execução das simulações estáticas e dinâmicas não-lineares no domínio do tempo deste modelo acoplado, através de integração numérica das equações do movimento do sistema flutuante.

6.2 Descrição da Plataforma

A plataforma P-18 (figura 6.1) é do tipo semissubmersível e encontra-se operando em uma lâmina d'água de 910 metros no campo de Marlim, localizado na Bacia de Campos, estado do Rio de Janeiro.



Figura 6.1 – Plataforma P-18.

O sistema de ancoragem implantado apresenta as amarrações em Quadro de Ancoragem (*Spread Mooring*), composta de 8 linhas com a configuração de catenária convencional. Além das linhas de ancoragem, o modelo numérico conecta-se a outras 24 linhas: 15 *risers* flexíveis, 7 umbilicais e 2 SCRs. A seguir, o modelo é descrito em detalhe.

6.2.1 Casco

O casco da semissubmersível foi modelado por elementos cilíndricos de seção circular (colunas) e elíptica (*pontoons*) para representar adequadamente o volume de água deslocada e o comportamento hidrostático/hidrodinâmico.

O sistema de referência do casco é mostrado na Figura 7.2. Os eixos estruturais X e Y formam o plano horizontal. O eixo X tem sentido positivo da popa para a proa e o eixo Y de boreste (lado à direita do casco olhando de popa a proa) a bombordo. O eixo estrutural Z da

plataforma é vertical com sentido positivo para cima, e com origem na base dos *pontoons* e passando pelo centro de gravidade (CG) do casco.

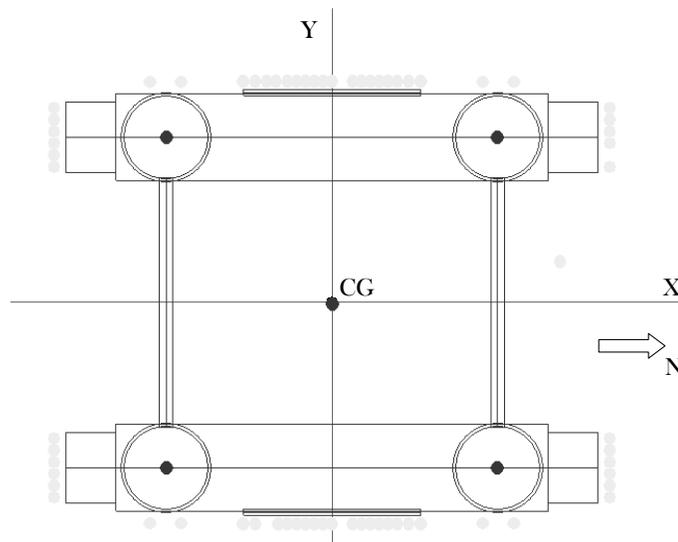


Figura 6.2 – Sistema de referência do casco.

A seguir, na tabela 6.1 apresentam-se as características geométricas e o peso do casco.

Tabela 6.1 – Características geométricas e peso do casco

Parâmetros do Casco	
Comprimento total (m)	90.000
Distância transversal entre centro de colunas (m)	56.000
Boca total (m)	65.115
<i>Pontoons</i> (Comprimento x Diâm. Vert. x Diâm. Transv.) (m)	(73 x 9.115 x 20.14)
Diâmetro dos <i>bracings</i> (m)	2.286
Aproamento (graus)	0
Calado de projeto (m)	23.100
CG (X,Y,Z) (m)	(0,0,19.3)
Peso total (kN)	324989.1

6.2.2 Sistema de Risers

O sistema compreende 2 SCRs, 15 *risers* flexíveis e 7 umbilicais. O tipo de elementos finitos (EF) utilizados para modelar os SCRs foi o pórtico e o dos *risers* flexíveis e umbilicais de treliça (tabela 6.2). Desse modo, consegue-se representar de maneira adequada a rigidez dos *risers* rígidos e flexíveis.

Tabela 6.2 – Características dos risers e umbilicais

<i>Riser</i>	Nome_Diâmetro	EF	Azimute	Localização
1	Umb1_2-5in	Treliça	335.37	Proa
2	Flex1_4in	Treliça	340.33	
3	Umb2_2-5in	Treliça	345.28	
4	Umb3_2-5in	Treliça	347.26	
5	Flex2_4-5in	Treliça	357.07	
6	Flex3_8in	Treliça	5.07	
7	Umb4_3in	Treliça	7.05	
8	Flex4_3in	Treliça	11.00	
9	Flex5_3in	Treliça	71.44	Boreste
10	Umb5_3in	Treliça	76.41	
11	Umb6_2-5in	Treliça	78.38	
12	Flex6_3in	Treliça	84.42	
13	Flex7_3in	Treliça	101.62	
14	Flex8_3in	Treliça	106.50	
15	Flex9_4-5in	Treliça	155.18	Popa
16	Flex10_3in	Treliça	166.34	
17	SCR_GA/EXP_10in	Pórtico	170.39	
18	SCR_PO_8in	Pórtico	179.94	
19	Flex11_3in	Treliça	180.90	
20	Flex12_4-5in	Treliça	191.01	
21	Flex13_4-5in	Treliça	203.14	
22	Umb7_2-5in	Treliça	255.57	Bombordo
23	Flex14-9in	Treliça	271.14	
24	Flex15_11in	Treliça	276.34	

Os coeficientes hidrodinâmicos da equação de *Morison* são considerados iguais para todas as linhas: $CM=2$, $CD=1.2$ e $CA=1$.

6.2.3 Sistema de Ancoragem

A plataforma semissubmersível é mantida em posição por um sistema de ancoragem distribuída com 8 linhas, duas em cada esquina como mostrado na Figura 6.3 a seguir.

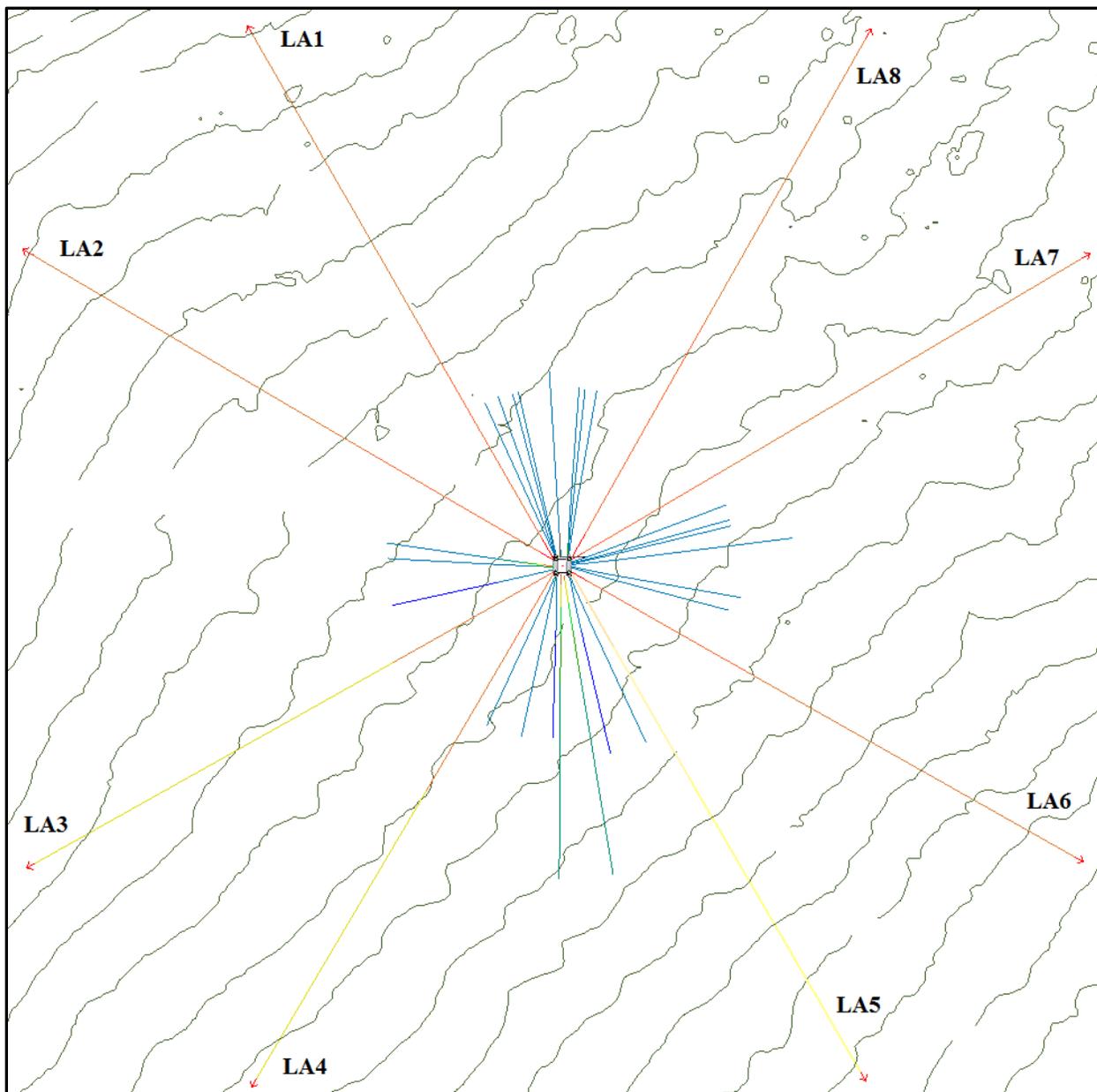


Figura 6.3 – Arranjo das linhas de ancoragem (vista superior)

O sistema de ancoragem é o convencional, com a configuração das linhas em catenária livre. Todas as linhas têm comprimento total de 3300 m e projeção horizontal de 3000 m. Elas estão conformadas por três tipos de materiais formando quatro trechos: no topo, 300 m de amarra tipo *Stud Chain*; um trecho suspenso de 1300 m de cabo de aço tipo *Spiral Strand Wire Rope*; mais um trecho de amarra tipo *Stud Chain* de 400 m; e apoiado no solo 1300 m de amarra tipo *Stud Chain* para fornecer atrito. As propriedades dos materiais são apresentadas na

Tabela 6.3 (incluindo os coeficientes hidrodinâmicos para a equação de Morison).

Tabela 6.3 – Propriedades dos materiais

Nome	Diâm. Ext. (m)	EA (kN)	MBS (kN)	Peso Ar (kN/m)	Peso Água (kN/m)	CM	CD	CA
<i>Spiral Strand Wire Rope</i>	0.102	921124	8730	0.5572	0.4333	2	1.2	1
<i>R3S Stud Chain</i>	0.111	1199137	8964	2.1484	1.8639	2	1.7	1
<i>Stud Chain SOLO</i>	0.095	69930000	6993	1.9390	1.6870	2	1.2	1

Na Tabela 6.4 são apresentados os azimutes e a tração inicial (ou pré-tração) de cada linha de ancoragem.

Tabela 6.4 – Características gerais das linhas de ancoragem

Linha	Azimute	Tração Inicial (kN)
LA 1	330.1	1781.95
LA 2	300.2	1749.98
LA 3	240.1	1537.21
LA 4	210.1	1596.15
LA 5	149.9	1609.93
LA 6	119.8	1761.02
LA 7	59.9	1732.12
LA 8	30.0	1819.76

As oito linhas de ancoragem foram modeladas por elementos finitos de treliça.

Estas trações iniciais foram obtidas fazendo um processo iterativo: Inicialmente foi escolhida uma tração aleatória para cada linha de ancoragem, logo, foi verificada a rigidez do sistema e como as linhas ficaram pouco tracionadas (o que provocaria um *offset* significativo)

essa tração foi incrementada e a rigidez foi novamente verificada. Dessa vez, as linhas ficaram muito tracionadas, o que provocaria um regime de operação das linhas próximo à tração de ruptura do material. Finalmente as trações iniciais foram modificadas novamente e a configuração atual (Tabela 6.4) foi obtida.

6.2.4 Carregamentos Ambientais

Os carregamentos ambientais são vento e correnteza constantes e onda irregular. Como uma simplificação, foram definidas oito direções de incidência de correnteza e para cada incidência foi aplicado o mesmo carregamento de onda e vento em três direções diferentes: uma alinhada com a direção da correnteza e as outras duas com variações de $\pm 30^\circ$ na direção. Portanto, foram definidas 24 combinações de carregamentos ambientais. Estas se encontram ilustradas na figura 6.4.

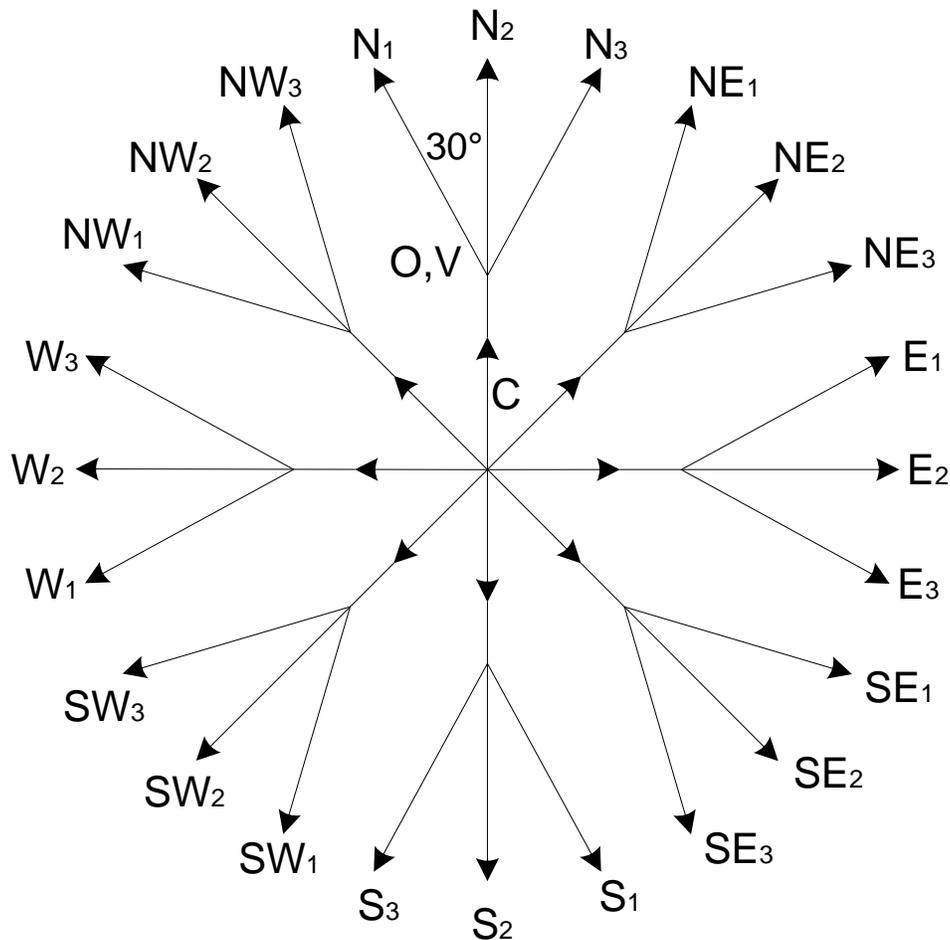


Figura 6.4 – Direções de incidência dos Carregamentos Ambientais

O valor do carregamento ambiental foi escolhido fazendo uma média dos valores dos carregamentos ambientais dos dados oceanográficos correspondentes à região de operação da Plataforma P-18 [25]. Vale lembrar que o objetivo do trabalho não é realizar um projeto integral de um sistema de ancoragem e sim uma aplicação e validação da metodologia Semi-Acoplada para o projeto preliminar do sistema.

A seguir, na Tabela 6.5 está indicado o valor do carregamento ambiental escolhido.

Tabela 6.5 – Carregamento ambiental

Correnteza (m/s)	Onda		Vento (m/s)
	Hs (m)	Tp (s)	
1.0	6.4	14	15.0

A energia das ondas é representada pelo espectro JONSWAP. A velocidade da correnteza é superficial e o perfil é triangular (com velocidade nula no fundo) sem variação de ângulo ao longo da profundidade (unidirecional). O vento está representado em uma velocidade média em 10 minutos.

6.3 Características das Simulações

As simulações com a formulação semi-acoplada iniciam com uma análise estática não linear. Em seguida, é calculada a matriz de rigidez equivalente das linhas de ancoragem e risers. Como passo final da simulação executa-se uma análise dinâmica, onde são estimados os movimentos do casco e calculada a resposta estrutural das linhas de maneira estática a cada intervalo do procedimento de integração no tempo.

Por outro lado, também foram realizadas simulações utilizando a formulação acoplada para comparar os resultados das simulações semi-acopladas. Estas também iniciam com uma análise estática não linear que leva em conta unicamente as parcelas estáticas dos carregamentos ambientais. Em seguida, a partir dos resultados da análise estática é iniciada uma análise dinâmica no domínio do tempo. A formulação utilizada é a Fracamente Acoplada.

Foi utilizado um único modelo numérico da plataforma para o procedimento acoplado e semi-acoplado.

Foram executadas simulações dinâmicas no domínio do tempo. Os parâmetros das simulações são os mesmos tanto para o procedimento acoplado quanto para o semi-acoplado. O tempo de simulação foi de 3600 segundos, suficiente para atingir estabilidade estatística na resposta. Foi empregado um intervalo de 0.1 segundos para o procedimento de integração no tempo. O algoritmo para a solução do problema dinâmico não linear das linhas de ancoragem e *risers* e para calcular a dinâmica do casco foi o HTF-GA [9].

6.4 Rigidez do Sistema

Como uma atividade inicial do presente estudo de caso foi calculada a rigidez das linhas da plataforma nas direções *surge* e *sway*, ou seja, foi determinada a força de restauração estática que o sistema de ancoragem e os *risers* fornecem em diferentes distâncias de deslocamento. O objetivo de calcular a rigidez das linhas, além de caracterizar a plataforma em termos de forças de restauração em diferentes localizações do casco, deve-se ao fato de que os valores serão utilizados durante o desenvolvimento do estudo de caso, especificamente para o cálculo dos coeficientes de amortecimento.

A rigidez representa a relação entre a força resultante das linhas e o deslocamento do casco em uma determinada direção. Neste caso, um deslocamento horizontal do casco corresponde a uma força resultante também horizontal das linhas.

A seguir, as figuras 6.5, 6.6, 6.8 e 6.7 contêm as curvas que representam a rigidez da plataforma nos sentidos *surge* (direções sul e norte) e *sway* (direções oeste e leste). Cada figura apresenta três curvas de rigidez, considerando: 1) linhas de ancoragem e *risers*; 2) unicamente as linhas de ancoragem; e 3) unicamente os *risers*.

Após cada figura foram colocadas as tabelas com os valores de força e rigidez em cada deslocamento da plataforma.

A maior rigidez é logicamente fornecida pelo sistema de ancoragem. Porém, é importante observar que os *risers* já impõem uma força horizontal no sentido sul desde a posição inicial da plataforma.

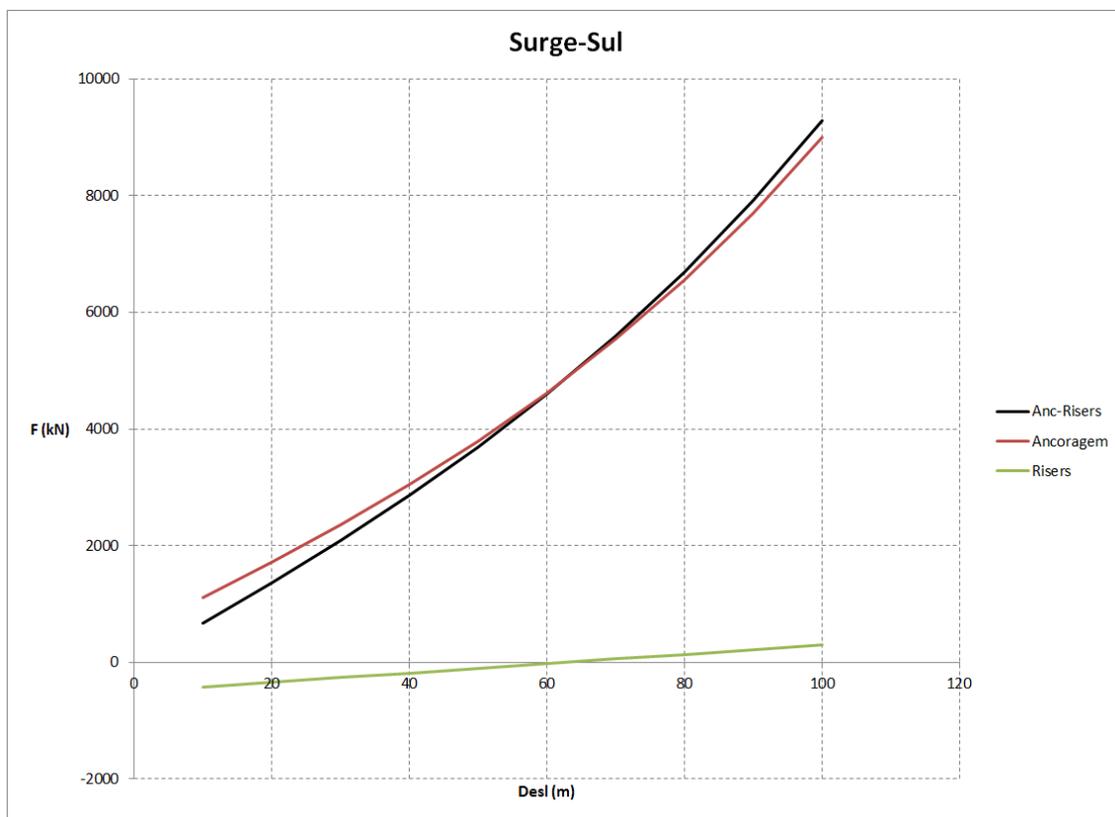


Figura 6.5 – Curva de rigidez em surge com deslocamento na direção sul

Tabela 6.6 – Força e rigidez com deslocamento surge em direção sul

Deslocamento Surge-Sul (m)	Força (kN)			Rigidez (kN/m)		
	Anc-Risers	Ancoragem	Risers	Anc-Risers	Ancoragem	Risers
10	676.8	1108.7	-431.9	67.7	110.9	43.2
20	1370.2	1716.7	-346.5	68.5	85.8	17.3
30	2092.8	2355.7	-262.9	69.8	78.5	8.8
40	2863.2	3043.9	-180.8	71.6	76.1	4.5
50	3693.4	3793.3	-100.0	73.9	75.9	2.0
60	4599.1	4619.4	-20.4	76.7	77.0	0.3
70	5594.3	5535.9	58.4	79.9	79.1	0.8
80	6695.5	6558.8	136.7	83.7	82.0	1.7
90	7920.5	7705.8	214.7	88.0	85.6	2.4
100	9289.5	8996.8	292.7	92.9	90.0	2.9
				77.3	84.1	8.4

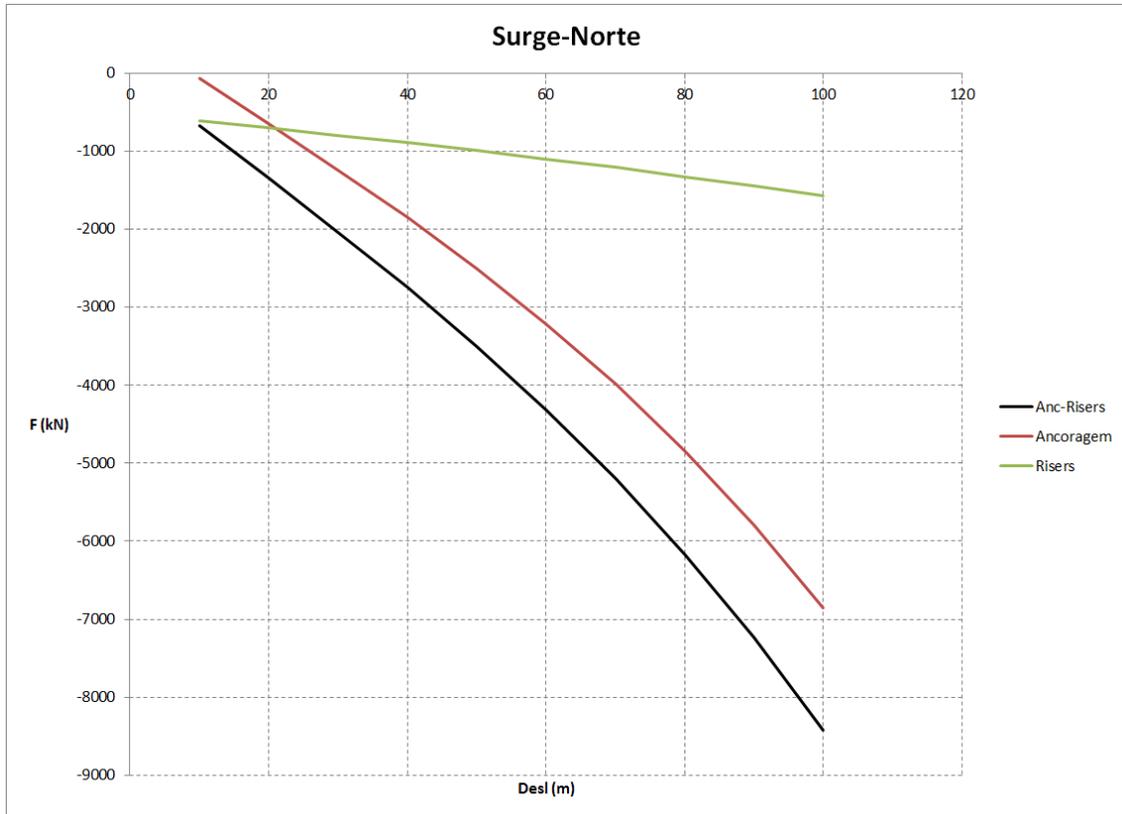


Figura 6.6 – Curva de rigidez em surge com deslocamento na direção norte

Tabela 6.7 – Força e rigidez com deslocamento surge em direção norte

Deslocamento Surge-Norte (m)	Força (kN)			Rigidez (kN/m)		
	Anc-Risers	Ancoragem	Risers	Anc-Risers	Ancoragem	Risers
10	-671.1	-62.1	-609.0	67.1	6.2	60.9
20	-1345.5	-644.3	-701.2	67.3	32.2	35.1
30	-2033.8	-1237.9	-796.0	67.8	41.3	26.5
40	-2747.2	-1853.3	-894.0	68.7	46.3	22.3
50	-3502.9	-2507.4	-995.5	70.1	50.1	19.9
60	-4316.3	-3215.4	-1100.9	71.9	53.6	18.3
70	-5200.0	-3989.3	-1210.7	74.3	57.0	17.3
80	-6168.3	-4842.9	-1325.4	77.1	60.5	16.6
90	-7238.2	-5792.4	-1445.8	80.4	64.4	16.1
100	-8425.6	-6852.9	-1572.6	84.3	68.5	15.7
				72.9	48.0	24.9

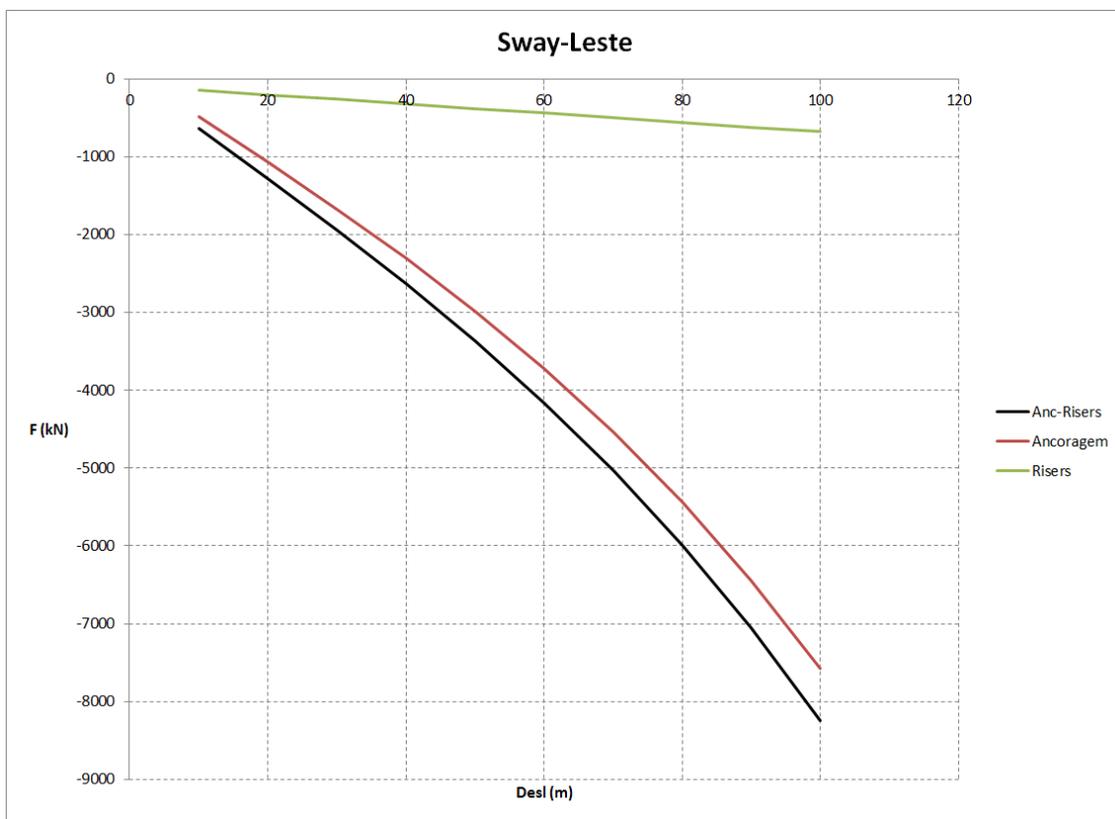


Figura 6.7 – Curva de rigidez em sway com deslocamento na direção leste

Tabela 6.8 – Força e rigidez com deslocamento sway em direção leste

Deslocamento Sway-Oeste (m)	Força (kN)			Rigidez (kN/m)		
	Anc-Risers	Ancoragem	Risers	Anc-Risers	Ancoragem	Risers
10	-634.4	-484.4	-150.0	63.4	48.4	15.0
20	-1276.3	-1069.8	-206.5	63.8	53.5	10.3
30	-1936.5	-1673.0	-263.5	64.5	76.9	8.8
40	-2628.3	-2307.1	-321.2	65.7	74.6	8.0
50	-3365.1	-2985.7	-379.4	67.3	74.5	7.6
60	-4162.9	-3725.0	-438.0	69.4	75.6	7.3
70	-5035.6	-4538.4	-497.2	71.9	77.7	7.1
80	-5996.8	-5439.7	-557.2	75.0	80.6	7.0
90	-7062.3	-6444.2	-618.1	78.5	84.1	6.9
100	-8249.0	-7568.9	-680.2	82.5	75.7	6.8
				70.2	72.2	8.5

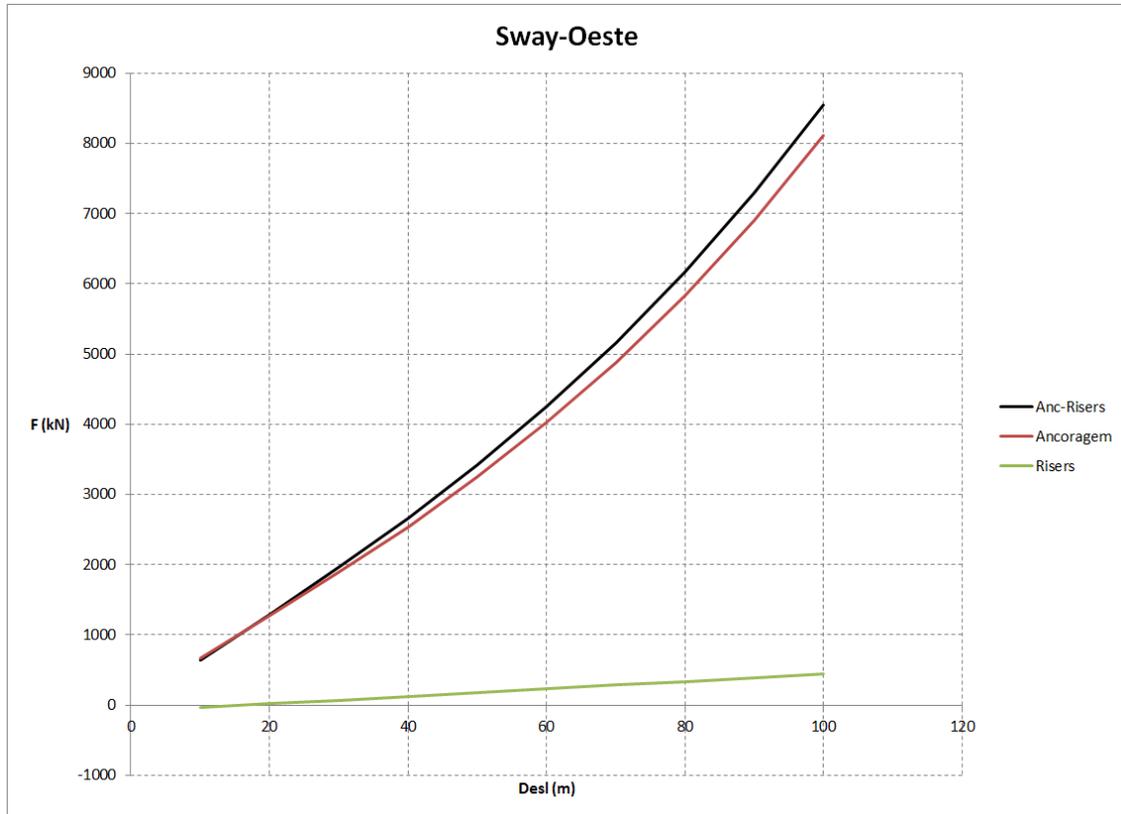


Figura 6.8 – Curva de rigidez em sway com deslocamento na direção oeste

Tabela 6.9 – Força e rigidez com deslocamento sway em direção oeste

Deslocamento (10 m)	Força (kN)			Rigidez (kN/m)		
	Anc-Risers	Ancoragem	Risers	Anc-Risers	Ancoragem	Risers
<i>Sway-Leste</i>	635.6	674.4	-38.7	63.6	67.4	3.9
20	1283.6	1267.6	16.0	64.2	63.4	0.8
30	1953.2	1883.1	70.1	65.1	62.8	2.3
40	2662.2	2538.4	123.8	66.6	63.5	3.1
50	3425.2	3248.3	176.9	68.5	65.0	3.5
60	4254.8	4025.0	229.8	70.9	67.1	3.8
70	5166.3	4883.8	282.5	73.8	69.8	4.0
80	6174.2	5839.1	335.1	77.2	73.0	4.2
90	7295.9	6908.1	387.8	81.1	76.8	4.3
100	8549.5	8108.8	440.7	85.5	81.1	4.4
				71.6	69.0	3.4

Os resultados de rigidez da plataforma permitiram identificar a contribuição das linhas de ancoragem e *risers* nas quatro direções analisadas.

6.5 Coeficientes de Amortecimento

Para considerar o amortecimento das linhas na formulação semi-acoplada é necessário calcular os coeficientes de amortecimento linear e quadrático. Este tipo de amortecimento é indicado para calibrar a força de amortecimento viscosa proporcional à velocidade do casco, servindo para adequar as amplitudes de movimento dinâmico do modelo numérico da plataforma.

Na formulação acoplada estes efeitos são implicitamente e automaticamente levados em conta como consequência do cálculo das forças das linhas pela solução do problema dinâmico não-linear representado pelo modelo de elementos finitos das linhas.

Normalmente, os coeficientes de amortecimento são calculados com dados provenientes de ensaios em tanques de prova. Porém, um procedimento simplificado consiste em realizar testes de decaimento, ou seja, o modelo físico da plataforma é deslocado em certa direção ou em certo ângulo e posteriormente soltado para se movimentar livremente. A partir disso, é obtida a série temporal do movimento que foi naturalmente dissipado por amortecimento e arraste, tanto do casco quanto das linhas. Depois de obtidas as séries temporais de movimento nos graus de liberdade estudados podem ser calculados os coeficientes de amortecimento.

Como uma alternativa aos ensaios em tanque de provas, podem ser realizadas simulações dinâmicas de decaimento no modelo numérico. Este tipo de simulações são comumente chamadas de “ensaios de decaimento numérico” e são efetuadas em modelos com uma condição inicial, por exemplo, um desequilíbrio ou uma velocidade imposta, e sem aplicar carregamentos ambientais.

O método simplificado para calcular os coeficientes linear e quadrático de amortecimento a partir de testes de decaimento que foi utilizado no presente estudo de caso está descrito com mais detalhe em GIRÓN [26].

Nesta etapa do estudo de caso foram calculados os coeficientes linear e quadrático de amortecimento a partir de ensaios de decaimento numérico do modelo com a formulação acoplada e semi-acoplada para compará-los entre si.

Foram calculados unicamente os coeficientes de amortecimento para os graus de liberdade da plataforma com maior ordem de grandeza, sendo eles os movimentos de translação *surge* e *sway*. Mas adverte-se que para um caso real é conveniente calcular os coeficientes para os seis graus de liberdade.

6.5.1 Ensaios de Decaimento Numérico e Períodos Naturais

Para realizar os ensaios de decaimento foi utilizado o modelo numérico baseado na formulação acoplada. O tempo total de cada simulação foi de 2500 segundos. A condição inicial foi a aplicação de uma velocidade de 1m/s para o casco se deslocar e em seguida oscilar livremente. Como mencionado anteriormente, não foi aplicado nenhum carregamento ambiental.

As séries de decaimento obtidas em *surge* e *sway* são apresentadas nas figuras a seguir.

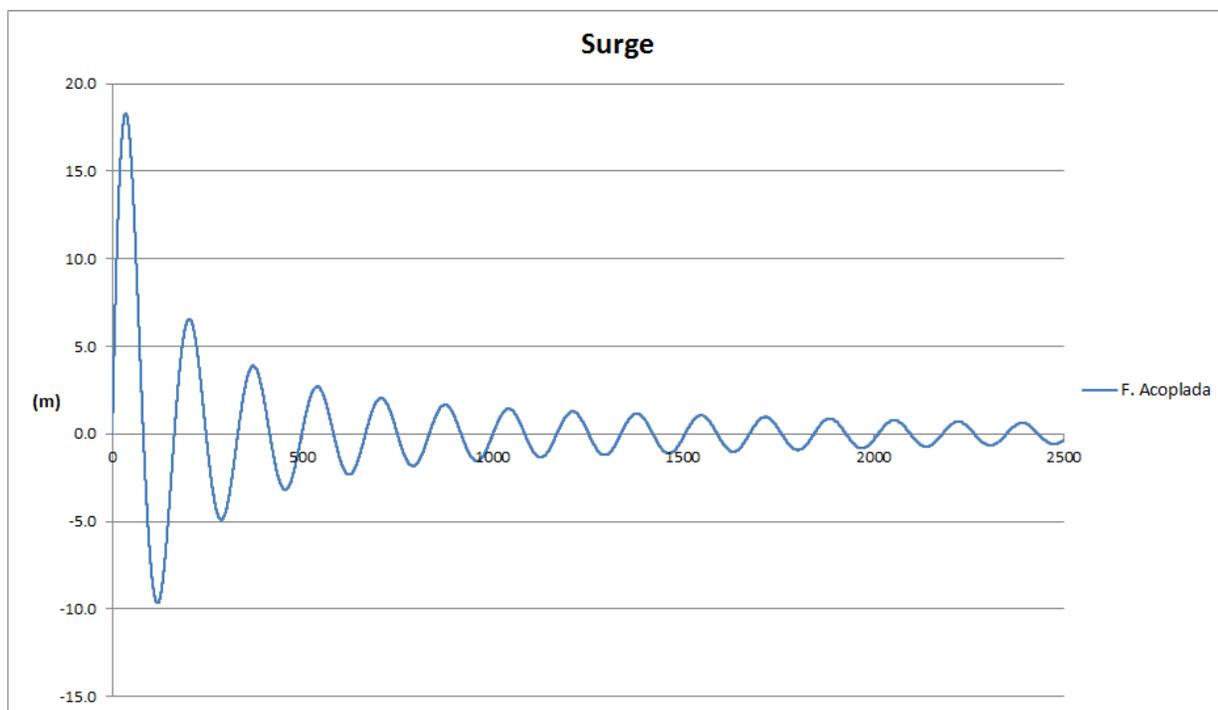


Figura 6.9 – Curva de decaimento numérico com movimento em surge

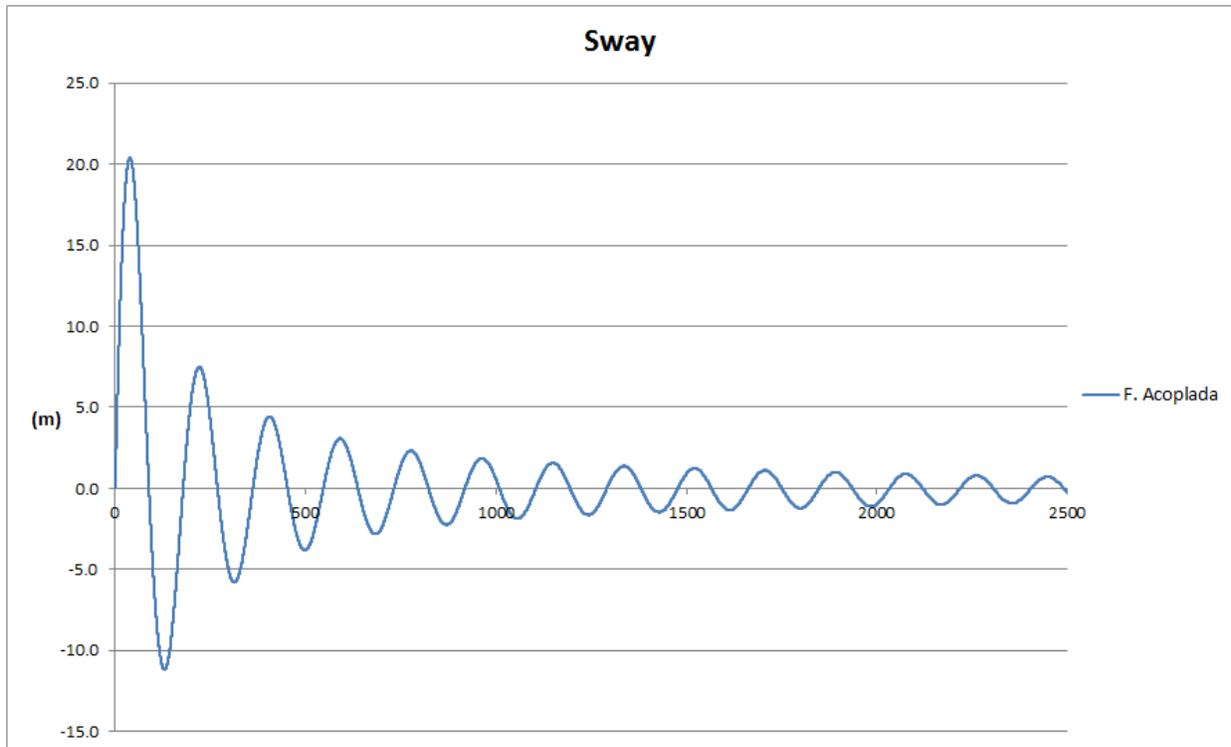


Figura 6.10 – Curva de decaimento numérico com movimento em sway

A partir das séries de decaimento foram obtidos diretamente os períodos naturais da plataforma nas direções analisadas. Para determinar os períodos naturais foi medido o tempo entre cada pico das séries e posteriormente foi calculada a média.

Os períodos naturais da plataforma nas direções *surge* e *sway* estão indicados a seguir na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 – Períodos naturais da plataforma

Direção	Período Natural (s)
<i>Surge</i>	165
<i>Sway</i>	180

6.5.2 Coeficientes Linear e Quadrático de Amortecimento

Como mencionado anteriormente, os coeficientes linear e quadrático foram calculados com o procedimento explicado em GIRÓN [26].

Como o objetivo é calcular coeficientes de amortecimento devido às linhas, foram realizados novos testes de decaimento numérico desconsiderando as forças de arraste do casco. Vale recordar que o procedimento semi-acoplado realiza a análise dinâmica considerando as linhas unicamente pela rigidez calculada previamente na análise estática e que o amortecimento que precisa ser calculado para calibrar o modelo é exclusivamente o correspondente as linhas. Dessa maneira, se o cálculo dos coeficientes de amortecimento parte de séries de decaimento de um modelo que considera o arraste do casco, quando os valores sejam inseridos no modelo semi-acoplado se estará duplicando o amortecimento do casco.

Porém, após serem calibrados os coeficientes de amortecimento no modelo semi-acoplado, as séries de resposta serão comparadas com as do modelo acoplado que considera as forças de arraste do casco.

O procedimento é descrito a seguir:

Inicialmente foram tratadas as amplitudes de cada oscilação dos resultados dos ensaios de decaimento numérico. A partir das amplitudes são calculados os valores das abcissas e ordenadas dos gráficos com que serão utilizados para estimar os valores de p (parte linear) e q (parte quadrática), e posteriormente calcular os coeficientes linear e quadrático de amortecimento.

O eixo das ordenadas contém a seguinte relação de amplitudes:

$$A_{dec/med} = \frac{A_i - A_{i+1}}{(A_i + A_{i+1})/2} \quad (6.1)$$

E o eixo das abcissas contém as médias de amplitudes subsequentes:

$$A_{med} = (A_i + A_{i+1})/2 \quad (6.2)$$

Observa-se que se os pontos do gráfico são provenientes de considerar amplitudes duplas do teste de decaimento, o eixo das abcissas deve ser $A_{med}=(A_i+A_{i+1})/4$.

De fato, foram calculados três grupos de pontos para incluir nos gráficos, ou seja, um grupo considerando as amplitudes positivas das séries de decaimento, outro grupo de pontos com as amplitudes negativas, e um terceiro grupo considerando amplitudes duplas.

Devido aos pontos calculados serem normalmente dispersos deve ser utilizado um método regressão linear para ajustar uma curva e obter p e q . Portanto, para cada grupo de pontos (amplitudes positivas, negativas e duplas) foi ajustada uma reta calculada pelo método dos mínimos quadrados.

A seguir, são apresentados os gráficos com as relações de amplitudes provenientes das séries de decaimento em *surge* e *sway* (figuras 6.11 e 6.12).

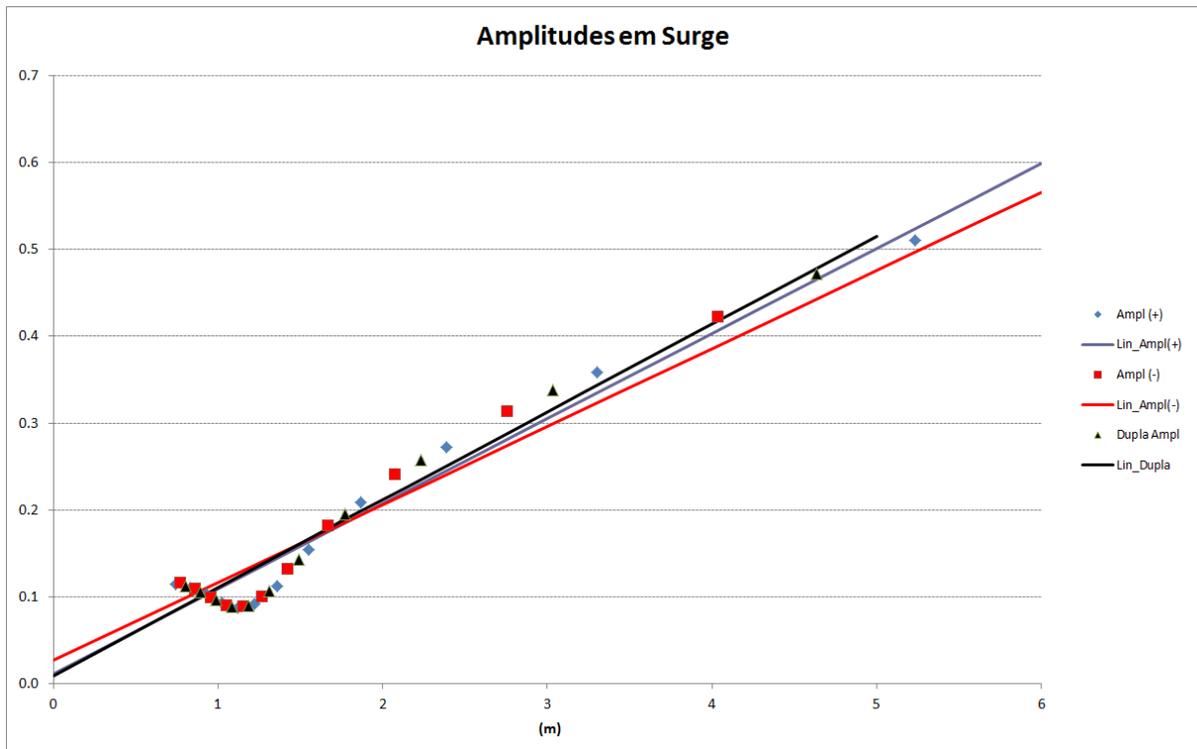


Figura 6.11 – Curvas para calcular os coeficientes de amortecimento a partir do decaimento em surge

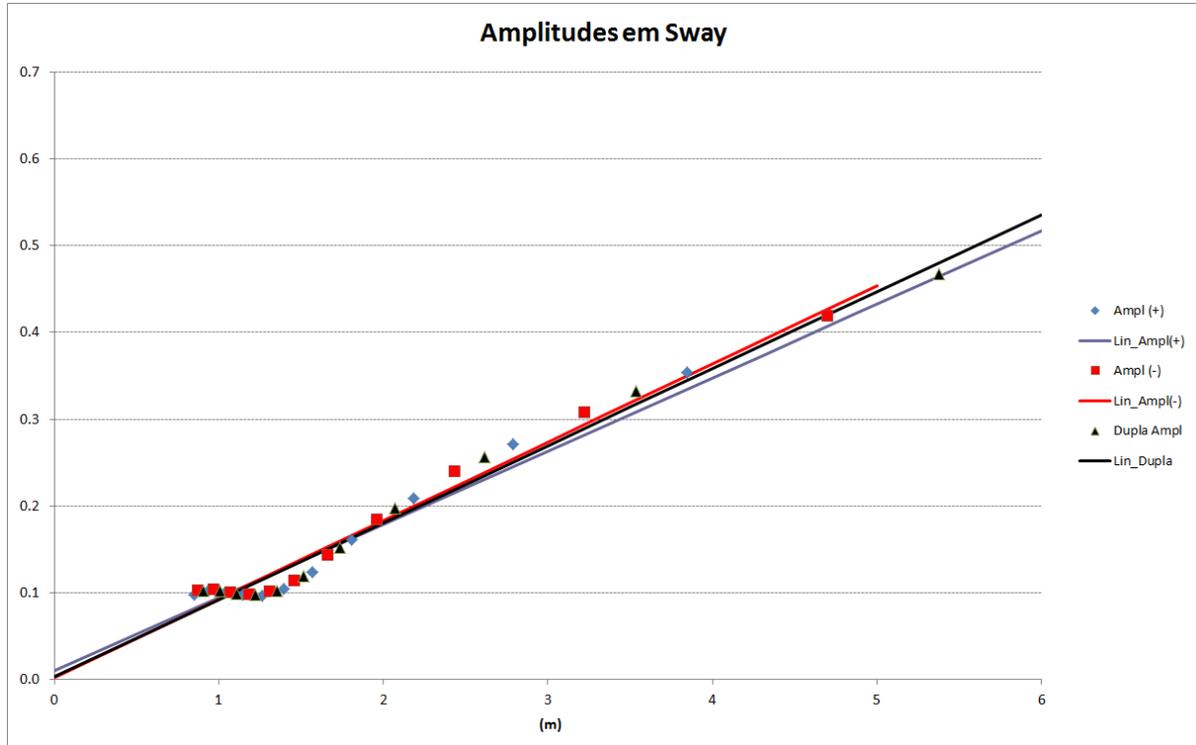


Figura 6.12 – Curvas para calcular os coeficientes de amortecimento a partir do decaimento em sway

Como descrito em GIRÓN [26], as equações para calcular os coeficientes linear e quadrático são as seguintes:

$$c_{x1} = 2p \frac{(m+m_a)}{T_n} \quad (6.3)$$

$$c_{x2} = \frac{3}{8}q(m + m_a) \quad (6.4)$$

Onde:

m = Massa do casco;

m_a = Massa adicionada;

T_n = Período natural.

O valor da massa total ($m+m_a$) pode ser calculado com a seguinte equação:

$$M = k \left(\frac{T_n^2}{4 \cdot \pi^2} \right) \quad (6.5)$$

Onde:

k = Rigidez da plataforma.

A rigidez foi calculada para as direções *surge* e *sway* na seção 7.4. Foram obtidos valores até 100 metros de deslocamento, porém, o valor que será tomado para o cálculo da massa total será a rigidez equivalente aos primeiros 10 metros de deslocamento. Ou seja, a rigidez no sentido *surge* é $k_{surge} = 67.7$ kN/m e no sentido *sway* é $k_{sway} = 63.6$ kN/m.

Os períodos naturais foram calculados previamente (vide Tabela 6.10): $T_{n surge} = 165$ s e $T_{n sway} = 180$ s.

A seguir, nas tabelas 6.11 e 6.12 são indicados os valores dos coeficientes p e q obtidos dos gráficos, e os valores dos coeficientes de amortecimento linear e quadrático.

Tabela 6.11 – Coeficientes linear e quadrático em surge

Amplitudes SURGE	Parte linear p (sem unidades)	Parte quadrática q (m^{-1})	Coef. linear C_{x1} (Ton/s)	Coef. quadrático C_{x2} (Ton/m)
Positivas	0.01174	0.09776	6.773	1779.353
Negativas	0.02720	0.08965	15.694	1631.848
Duplas	0.00997	0.10099	5.754	1838.142

Tabela 6.12 – Coeficientes linear e quadrático em sway

Amplitudes SWAY	Parte linear p (sem unidades)	Parte quadrática q (m^{-1})	Coef. linear C_{x1} (Ton/s)	Coef. quadrático C_{x2} (Ton/m)
Positivas	0.01021	0.08439	6.092	1749.319
Negativas	0.00266	0.09029	1.588	1871.594
Duplas	0.00343	0.08868	2.044	1838.103

Observa-se que os valores obtidos a partir das amplitudes positivas, negativas e duplas são bem aproximados. Para calibrar o modelo baseado na formulação semi-acoplada foram tomados os coeficientes calculados a partir das amplitudes duplas.

6.5.3 Revisão dos Coeficientes de Amortecimento

Como uma revisão básica foram excetuadas novamente as simulações de decaimento numérico com a formulação semi-acoplada, mas agora com o modelo “amortecido”, e os resultados foram comparados com as séries obtidas anteriormente com a formulação acoplada e com a formulação semi-acoplada original (sem considerar amortecimento).

As figuras 6.13 e 6.14 apresentam os resultados das simulações de decaimento descritas no parágrafo anterior. Note-se que, embora a curva da formulação semi-acoplada (F. S-Acop) apresenta períodos semelhantes à curva da formulação acoplada (F. Acoplada), existe uma grande diferença de amplitudes de movimento. Porém, quando foi utilizado o modelo calibrado com os coeficientes de amortecimento, a formulação semi-acoplada apresentou uma semelhança maior a serie da formulação acoplada.

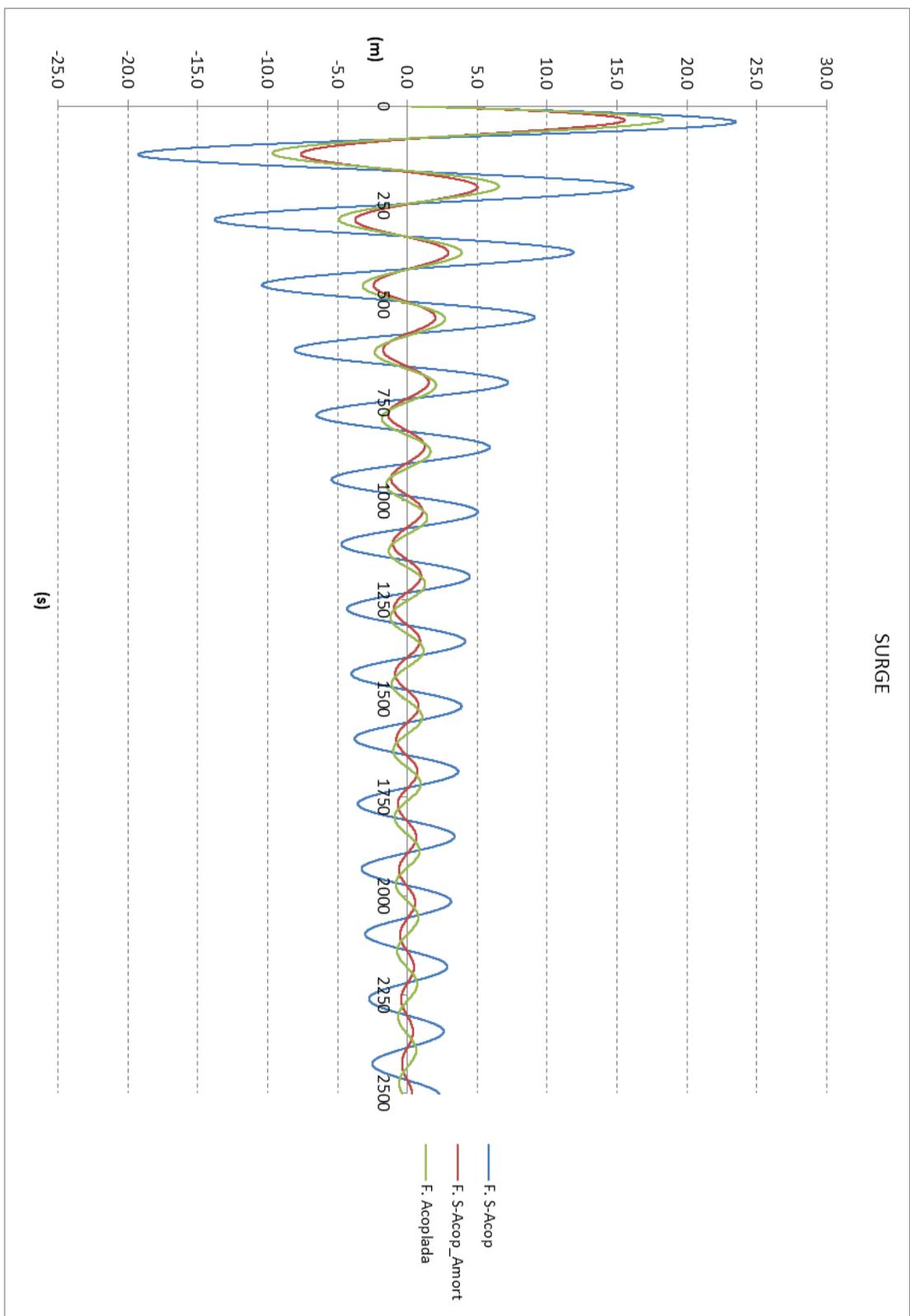


Figura 6.13 – Comparação de decaimento numérico em surge com o modelo amortecido

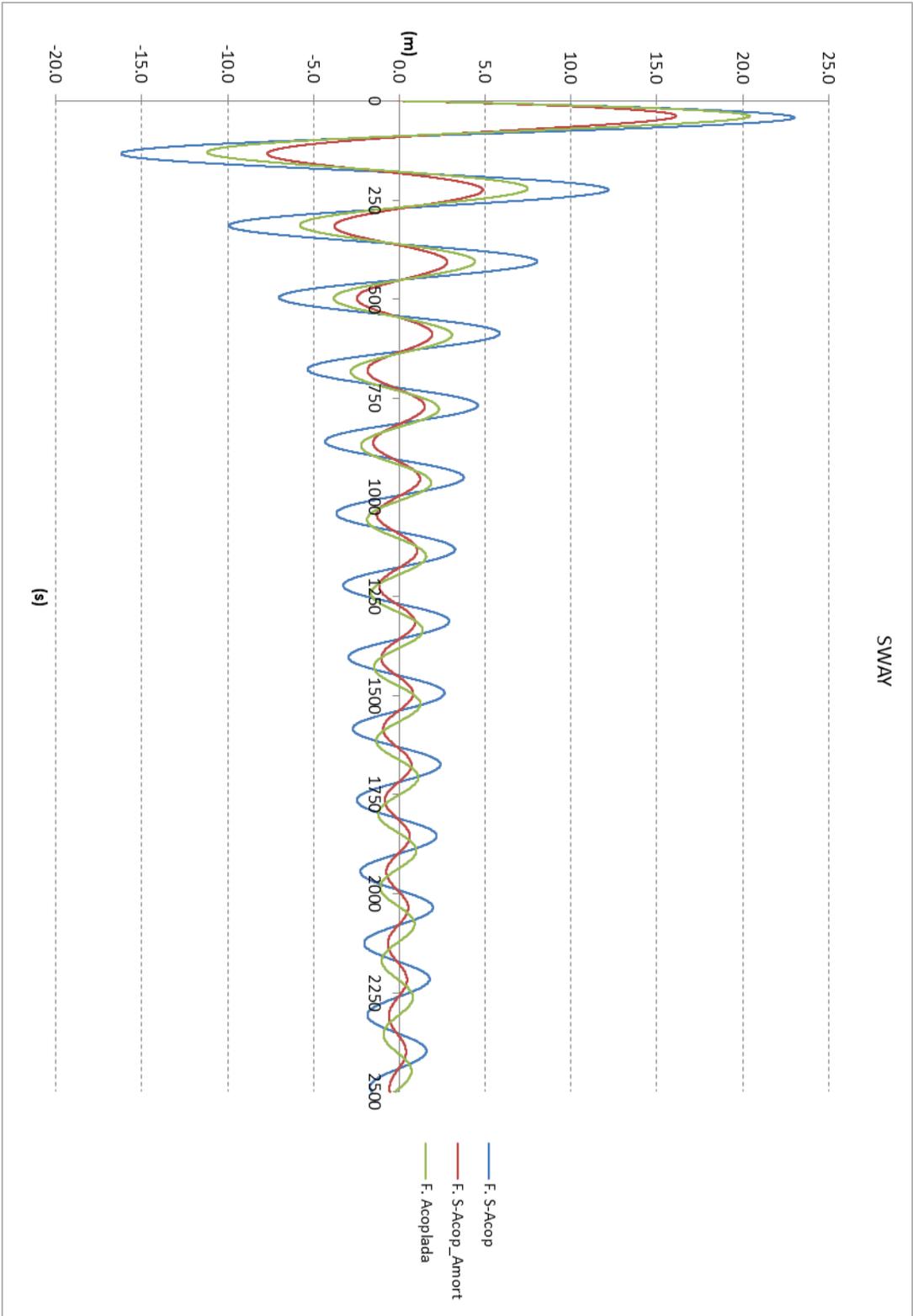


Figura 6.14 – Comparação de decaimento numérico em sway com o modelo amortecido

Os resultados mostram que os coeficientes de amortecimento conseguem calibrar de maneira adequada o modelo que utiliza a formulação semi-acoplada, obtendo uma resposta similar, mas com tempos de execução bem menores. Por exemplo, a simulação de 2500 segundos em *surge* com a formulação acoplada consumiu 100 minutos e com a semi-acoplada unicamente 56 segundos.

6.6 Resultados de Deslocamento Considerando Amortecimento

Na presente seção estão apresentados (na tabela 6.13) os deslocamentos do casco em *surge* e *sway* para todas as combinações ambientais utilizando a formulação semi-acoplada. Nesta tabela, em vermelho, está o maior deslocamento provocado pela condição ambiental Sul 2 (S2). Este deslocamento foi obtido aplicando a norma DNV OS-E301 [13], onde o valor encontrado é o valor máximo provável obtido através do ajuste de uma distribuição extrema de *Gumbel* para uma distribuição de picos *Weibull*. Pode-se observar que este deslocamento foi de **38.94 metros** na direção *surge sul*.

Tabela 6.13 – Deslocamentos Máximos

Comb	Movimentos	Deslocamento (m)	Comb	Movimentos	Deslocamento (m)
Comb_N1	<i>Surge</i>	26.61	Comb_S1	<i>Surge</i>	-35.97
	<i>Sway</i>	4.69		<i>Sway</i>	-9.52
Comb_N2	<i>Surge</i>	27.81	Comb_S2	<i>Surge</i>	-38.94
	<i>Sway</i>	-1.35		<i>Sway</i>	2.31
Comb_N3	<i>Surge</i>	27.01	Comb_S3	<i>Surge</i>	-35.98
	<i>Sway</i>	-6.52		<i>Sway</i>	12.83
Comb_NE1	<i>Surge</i>	24.22	Comb_SW1	<i>Surge</i>	-32.55
	<i>Sway</i>	-19.45		<i>Sway</i>	19.83
Comb_NE2	<i>Surge</i>	22.05	Comb_SW2	<i>Surge</i>	-28.38
	<i>Sway</i>	-23.76		<i>Sway</i>	30.40
Comb_NE3	<i>Surge</i>	16.62	Comb_SW3	<i>Surge</i>	-17.72
	<i>Sway</i>	-26.91		<i>Sway</i>	29.20
Comb_E1	<i>Surge</i>	4.04	Comb_W1	<i>Surge</i>	-8.73
	<i>Sway</i>	-24.06		<i>Sway</i>	26.49

Comb_E2	Movimentos	Deslocamento (m)	Comb_W2	Movimentos	Deslocamento (m)
	<i>Surge</i>	1.27		<i>Surge</i>	-0.80
	<i>Sway</i>	-23.54		<i>Sway</i>	25.82
Comb_E3	Movimentos	Deslocamento (m)	Comb_W3	Movimentos	Deslocamento (m)
	<i>Surge</i>	-2.47		<i>Surge</i>	9.07
	<i>Sway</i>	-23.77		<i>Sway</i>	25.90
Comb_SE1	Movimentos	Deslocamento (m)	Comb_NW1	Movimentos	Deslocamento (m)
	<i>Surge</i>	-14.39		<i>Surge</i>	14.48
	<i>Sway</i>	-22.73		<i>Sway</i>	23.70
Comb_SE2	Movimentos	Deslocamento (m)	Comb_NW2	Movimentos	Deslocamento (m)
	<i>Surge</i>	-21.43		<i>Surge</i>	19.02
	<i>Sway</i>	-20.69		<i>Sway</i>	18.91
Comb_SE3	Movimentos	Deslocamento (m)	Comb_NW3	Movimentos	Deslocamento (m)
	<i>Surge</i>	-22.77		<i>Surge</i>	23.43
	<i>Sway</i>	-15.69		<i>Sway</i>	13.92

6.6.1 Verificação do Deslocamento Máximo

Para verificar o resultado da simulação semi-acoplada com coeficientes de amortecimento foi feita uma simulação acoplada do mesmo modelo numérico para a condição ambiental crítica (combinação Sul 2).

De acordo com a recomendação API RP 2SK [11] o deslocamento máximo (explicitado na tabela 3.2 da seção 3.5.1) não deve ser maior a 8% da LDA. Como a LDA do presente caso de estudo é 910 metros e o deslocamento máximo encontrado representa 4.3% desta LDA se pode concluir que os resultados obtidos estão dentro dos valores máximos permitidos para a condição Intacta.

Por outro lado, para essa combinação ambiental mais crítica foi feita uma simulação acoplada de 3600 segundos e as séries temporais dos movimentos do casco (*surge*) de ambas as simulações estão a seguir.

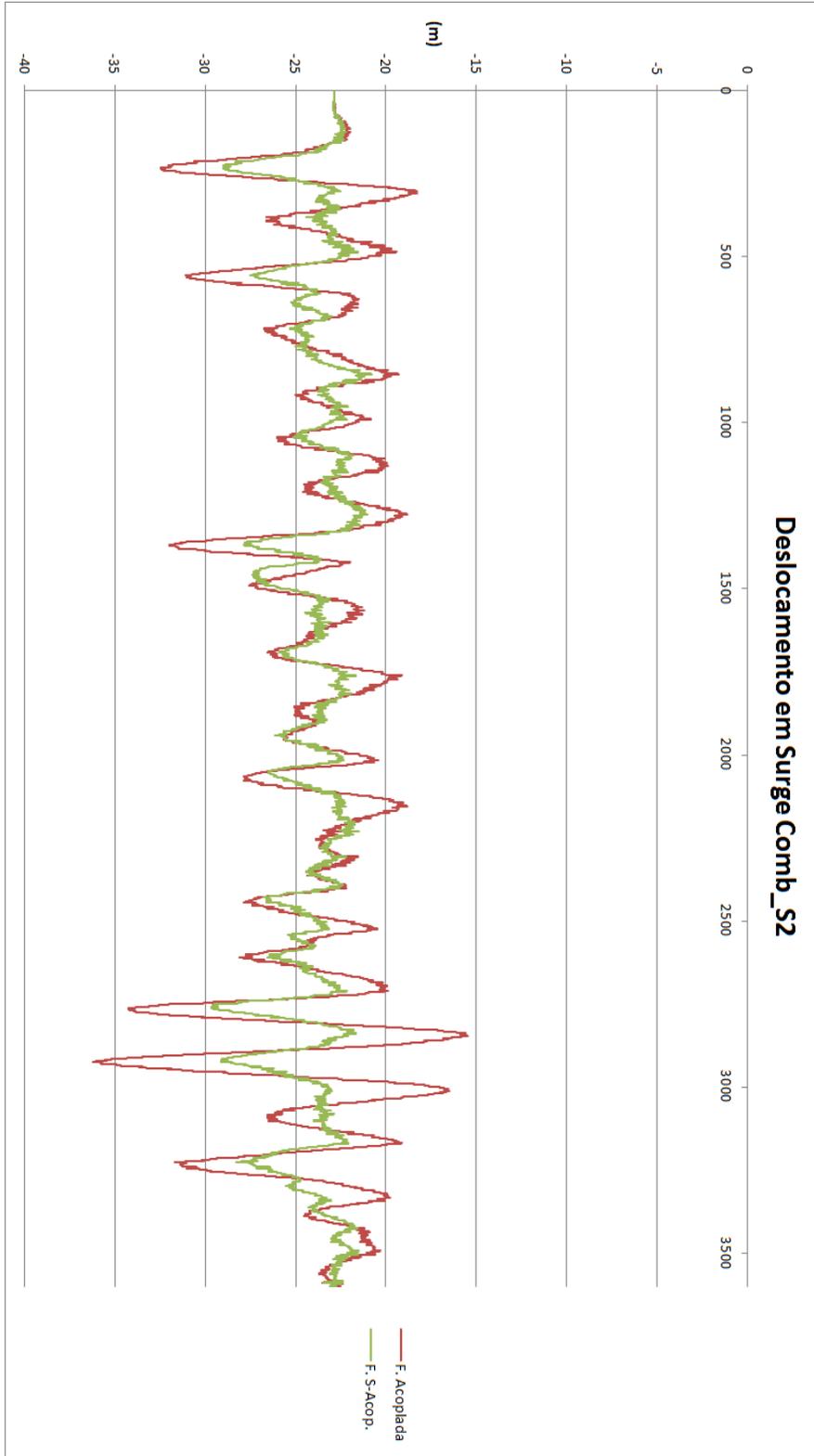


Figura 6.15 – Deslocamento em Surge da Combinação Ambiental Sul 2

Para o resultado da simulação acoplada foi verificado o deslocamento máximo em *surge* novamente com a recomendação API RP 2SK [11] (tabela 3.2 da seção 3.5.1) e foi observado que este deslocamento corresponde a 3.3% da LDA do presente caso de estudo. Então se pode concluir que os resultados obtidos também estão dentro dos valores máximos permitidos para a condição Intacta.

6.6.2 Interpretação dos Resultados

No início desta seção foram calculados os coeficientes de amortecimento linear e quadrático da plataforma nos sentidos *surge* e *sway*. Assim, foi calibrado o modelo numérico baseado na formulação semi-acoplada.

Comparando os resultados com os obtidos da formulação acoplada, as **séries de movimento** resultantes da aplicação da formulação semi-acoplada no modelo “amortecido” mostraram um melhor ajuste em relação às obtidas originalmente com o modelo “não amortecido”.

Por outro lado, na figura 6.15 se pode observar que a frequência de movimento entre ambas as simulações é muito próxima validando novamente o resultado obtido através da formulação Semi-Acoplada.

Na tabela 6.14 é feita uma comparação entre os deslocamentos máximos e os tempos de análise entre as formulações Acoplada e Semi-Acoplada.

Tabela 6.14 – Comparação dos Deslocamentos na Combinação S2

Análise Semi-Acoplada	Movimentos	Deslocamento (m)	Tempo de Análise (min)
	<i>Surge</i>		38.94
Análise Acoplada	Movimentos	Deslocamento (m)	Tempo de Análise (min)
	<i>Surge</i>		29.65

Pode-se observar que com a formulação Semi-Acoplada houve uma redução de 88% do tempo de simulação com relação à formulação Acoplada.

6.7 Resultados dos Esforços no Topo Considerando Amortecimento

Na presente seção estão apresentados (na tabela 6.15) as trações de topo de todas as linhas de ancoragem para todas as combinações ambientais utilizando a formulação semi-acoplada. Nesta tabela, em vermelho, está a maior tração de topo provocada pela condição ambiental Sudoeste 2 (SW2). Esta tração de topo foi obtida aplicando a norma DNV OS-E301 [13], onde o valor encontrado é o valor máximo provável obtido através do ajuste de uma distribuição extrema de *Gumbel* para uma distribuição de picos *Weibull*. Pode-se observar que esta tração de topo foi de **2628.5 kN** e aconteceu na **Linha de Ancoragem 8 (LA8)**.

Tabela 6.15 – Trações de Topo Máximas

<i>Comb_N1</i>	Tração (kN)		<i>Comb_E3</i>	Tração (kN)		<i>Comb_SW2</i>	Tração (kN)	
	2077.2	LA6		2140.2	LA2		2628.5	LA8
Comb_N2	Tração (kN)		Comb_SE1	Tração (kN)		Comb_SW3	Tração (kN)	
	2005.4	LA6		2256.6	LA2		2417.2	LA8
Comb_N3	Tração (kN)		Comb_SE2	Tração (kN)		Comb_W1	Tração (kN)	
	2030.7	LA4		2355.0	LA1		2198.9	LA8
Comb_NE1	Tração (kN)		Comb_SE3	Tração (kN)		Comb_W2	Tração (kN)	
	2086.3	LA4		2321.5	LA1		2177.1	LA6
Comb_NE2	Tração (kN)		Comb_S1	Tração (kN)		Comb_W3	Tração (kN)	
	2117.6	LA4		2520.0	LA1		2256.3	LA6
Comb_NE3	Tração (kN)		Comb_S2	Tração (kN)		Comb_NW1	Tração (kN)	
	2056.8	LA4		2518.5	LA8		2281.2	LA6
Comb_E1	Tração (kN)		Comb_S3	Tração (kN)		Comb_NW2	Tração (kN)	
	2085.1	LA2		2523.6	LA8		2259.9	LA6
Comb_E2	Tração (kN)		Comb_SW1	Tração (kN)		Comb_NW3	Tração (kN)	
	2104.8	LA2		2617.8	LA8		2194.4	LA6

6.7.1 Verificação da Tração de Topo Máxima

Para verificar o resultado da simulação semi-acoplada com coeficientes de amortecimento foi feita uma simulação acoplada do mesmo modelo numérico para a condição ambiental crítica (combinação Sudoeste 2).

De acordo com a recomendação API RP 2SK [11] a tração de topo máxima (explicitada na tabela 3.3 da seção 3.5.2) para o método de análise quase-estático não deve ultrapassar 50% do MBS do material da linha de ancoragem. Como o MBS da linha de ancoragem 8 do presente caso de estudo é 6514.0 kN e a tração de topo máxima encontrada representa 40.4% deste MBS se pode concluir que os resultados obtidos estão dentro dos valores máximos permitidos para a condição Intacta.

Por outro lado, para essa combinação ambiental mais crítica foi feita uma simulação acoplada de 3600 segundos e as séries temporais das trações de topo da linha de ancoragem 8 de ambas as simulações estão a seguir.

Na tabela 6.16 é feita uma comparação entre as trações de topo máximas e os tempos de análise entre as formulações Acoplada e Semi-Acoplada.

Tabela 6.16 – Comparação das Trações de Topo Máximas na Combinação SW2

Análise Semi-Acoplada	Tração Máxima (kN)	% MBS	Tempo de Análise (min)
	2628.5	40.4	37.6
Análise Acoplada	Tração Máxima (kN)	% MBS	Tempo de Análise (min)
	2758.5	42.3	288.5

Pode-se observar que com a formulação Semi-Acoplada houve uma redução de 87% do tempo de simulação com relação à formulação Acoplada.

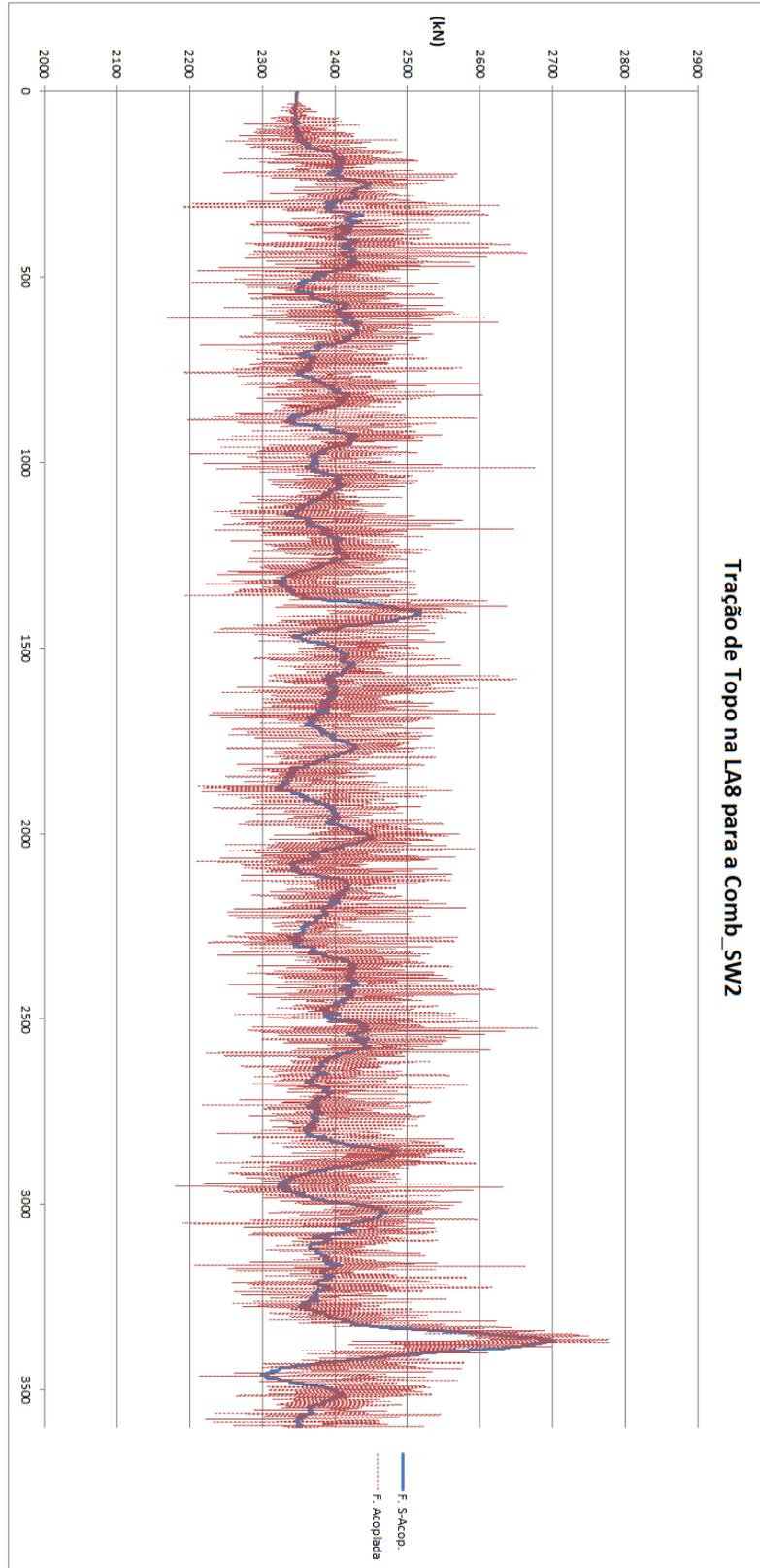


Figura 6.16 – Tração de Topo da Linha de Ancoragem 8 na Combinação Ambiental Sudoeste 2

Para o resultado da simulação acoplada foi verificada a tração de topo máxima da Linha de Ancoragem 8 novamente com a recomendação API RP 2SK [11] (tabela 3.3 da seção 3.5.2) e foi observado que a tração de topo corresponde a 42.3% do MBS desta linha de ancoragem. Então se pode concluir que os resultados obtidos também estão dentro dos valores máximos permitidos para a condição Intacta.

6.7.2 Interpretação dos Resultados

Na comparação das **séries temporais de tração** foi observada uma boa aproximação em relação à formulação acoplada.

Por outro lado, no referente aos **parâmetros estatísticos**, as trações médias continuam sendo muito similares em todas as simulações realizadas.

Em geral, foi observada uma melhora nos resultados, mas deve-se recordar que unicamente foram calibrados fatores de amortecimento para as direções *surge* e *sway*, e que se os outros GL tivessem sido calibrados, os resultados poderiam ter sido ainda melhores. Porém, como foi descrito no escopo do presente caso de estudo, a calibração de coeficientes de amortecimento nas direções *surge* e *sway* é suficiente para mostrar o aprimoramento nos resultados deste estudo.

6.8 Condições de Avaria

De acordo com as normas API RP 2SK [11], ISO 19901-7 [12] e DNV OS-301 [13] devem ser estudados, pelo menos, duas condições de avaria para o projeto de um sistema de ancoragem:

- Condição 1: Onde deve ser considerada como avariada a linha de ancoragem com maior tração de topo e em posição oposta à direção do maior deslocamento do casco da unidade flutuante para a combinação ambiental crítica.
- Condição 2: Onde deve ser considerada como avariada a segunda linha de ancoragem com maior tração de topo para a combinação ambiental crítica.

6.8.1 Condição 1 de Avaria

Como mencionado acima e de acordo com as normas API RP 2SK [11], ISO 19901-7 [12] e DNV OS-301 [13], para a condição ambiental Sul 2 (S2), foi considerada avariada a linha de ancoragem 8.

Foi utilizada a formulação acoplada para verificar este critério de avaria e, de acordo com a tabela 3.2, o *Offset* máximo da plataforma não pode ultrapassar 8% da LDA.

Para encontrar o valor máximo provável de deslocamento para esta condição de avaria foi aplicada novamente a norma DNV OS-E301 [13], onde o valor encontrado foi obtido através do ajuste de uma distribuição extrema de *Gumbel* para uma distribuição de picos *Weibull*. Este deslocamento máximo foi de **49.6 metros** na direção *surge sul* e corresponde a 5.5% da LDA do estudo de caso presente.

Por outro lado, também foi calculada a tração de topo máxima da linha de ancoragem mais tracionada para esta condição de avaria. De acordo com as normas citadas, esta tração de topo não pode ultrapassar 70% do MBS do material da linha de ancoragem (tabela 3.3 da seção 3.5.2).

Aplicando, mais uma vez, a norma DNV OS-E301 [13], foi obtida uma tração máxima provável de **3019.6 kN** na **Linha de Ancoragem 7 (LA7)**, que corresponde a 46.4% do MBS do material desta linha de ancoragem.

Por tanto, a condição 1 de avaria é satisfeita para ambos os limites exigidos pelas normas estudadas.

6.8.2 Condição 2 de Avaria

Como mencionado acima e de acordo com as normas API RP 2SK [11], ISO 19901-7 [12] e DNV OS-301 [13], para a condição ambiental Sudoeste 2 (SW2), foi considerada avariada a linha de ancoragem 7.

Foi utilizada a formulação acoplada para verificar este critério de avaria e, de acordo com a tabela 3.2, o *Offset* máximo da plataforma não pode ultrapassar 8% da LDA.

Para encontrar o valor máximo provável de deslocamento para esta condição de avaria foi aplicada novamente a norma DNV OS-E301 [13], onde o valor encontrado foi obtido através do ajuste de uma distribuição extrema de *Gumbel* para uma distribuição de picos *Weibull*. Este deslocamento máximo foi de **57.4 metros** na direção *sway leste* e corresponde a 6.3% da LDA do estudo de caso presente.

Por outro lado, também foi calculada a tração de topo máxima da linha de ancoragem mais tracionada para esta condição de avaria. De acordo com as normas citadas, esta tração de topo não pode ultrapassar 70% do MBS do material da linha de ancoragem (tabela 3.3 da seção 3.5.2).

Aplicando, mais uma vez, a norma DNV OS-E301 [13], foi obtida uma tração máxima provável de **3886.3 kN** na **Linha de Ancoragem 8 (LA8)**, que corresponde a 59.7% do MBS do material desta linha de ancoragem.

Por tanto, a condição 2 de avaria também é satisfeita para ambos os limites exigidos pelas normas estudadas.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Conclusão

Através do procedimento de análise Semi-Acoplada desenvolvido pelos pesquisadores do LAMCSO e implementado no programa SITUA-Prosim se constatou que a ferramenta semi-acoplada possui uma aplicação importante na etapa de calibração de uma nova configuração de ancoragem no âmbito da Metodologia Híbrida de Projeto Integrado de Sistemas Flutuantes.

E, de acordo com o conteúdo apresentado nos capítulos do presente trabalho, pode-se afirmar que o objetivo principal deste trabalho, que foi a aplicação de uma técnica de análise baseada na Metodologia Semi-Acoplada com o algoritmo de integração de casco HTF-GA (*Hybrid Time-Frequency Domain with Green Approach*) [9] para o dimensionamento de um sistema de ancoragem para uma plataforma semissubmersível, visando uma redução no custo computacional na etapa de projeto preliminar, foi alcançado e cumprido integralmente.

Por outro lado, através do estudo de caso realizado se verificou que este procedimento atende aos objetivos de sua utilização nesta etapa de projeto. Como comparativo entre os valores obtidos pelo HTF-GA Semi-Acoplado e Acoplado está a tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Comparação dos Resultados das Formulações Acoplada e Semi-Acoplada

Comparação de <i>Offset</i>			
Análise Semi-Acoplada	Movimentos	Deslocamento (m)	Tempo de Análise (min)
	<i>Surge</i>	38.94	32.9
Análise Acoplada	Movimentos	Deslocamento (m)	Tempo de Análise (min)
	<i>Surge</i>	29.65	288.5

Comparação de Tração de Topo			
Análise Semi-Acoplada	Tração Máxima (kN)	% MBS	Tempo de Análise (min)
	2628.5	40.4	37.6
Análise Acoplada	Tração Máxima (kN)	% MBS	Tempo de Análise (min)
	2758.5	42.3	288.5

As condições avariadas apresentaram um *offset* máximo de 6.3% da LDA e uma tração máxima de 59.7% do MBS, que de acordo com as normas API RP 2SK [11], ISO 19901-7 [12] e DNV OS-301 [13] (tabelas 3.2 e 3.3) estão dentro dos limites permitidos.

Em suma, constatou-se que a utilização procedimento de análise HTF-GA Semi-Acoplado é adequado para etapa de ajuste da configuração de ancoragem no contexto da metodologia de projeto apresentada, pois fornece resultados em passeios e trações muito próximos dos valores de referência (metodologia Acoplada), além de reduzir drasticamente o custo computacional nesta fase do projeto.

Vale ressaltar que o modelo numérico utilizado para a análise Acoplada e para análise Semi-Acoplada é o mesmo, ou seja, não há nenhum trabalho adicional para o projetista que for utilizar as duas metodologias. Porém, a metodologia Semi-Acoplada precisa do cálculo prévio da rigidez das linhas de ancoragem e *risers* e do cálculo dos coeficientes de amortecimento do casco para poder obter resultados adequados.

Isto se deve a que na formulação acoplada os efeitos viscosos da força de amortecimento viscosa proporcional à velocidade do casco são implicitamente e automaticamente levados em conta como consequência do cálculo das forças das linhas pela solução do problema dinâmico não-linear representado pelo modelo de elementos finitos das linhas.

7.2 Trabalhos Futuros

Deverá ser realizado um projeto integral de um sistema de ancoragem, para o qual é necessário aplicar as condições ambientais descritas nas normas API RP 2SK [11], ISO 19901-7 [12] e DNV OS-E301 [13], onde é recomendado usar combinações de ondas decenárias com correntes centenárias e de ondas centenárias com correntes decenárias.

Por outro lado, está sendo realizada a implementação no programa SITUA-Prosim do cálculo da rigidez das linhas e dos coeficientes de amortecimento do casco para acelerar ainda mais o processo de análise e evitar que o projetista realize essa parte trabalhosa da metodologia Semi-Acoplada atual.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] THOMAS, J. E, Fundamentos de Engenharia do Petróleo. Ed. Interciência, 2001.
- [2] A produção de Petróleo no Brasil. Disponível em: <
<http://www.portalsaofrancisco.com.br/>>. Acesso em: 12/05/2011.
- [3] CONNAIRE, A., KAVANAGH, K., AHILAN, R.V., GOODWIN, P. – *Integrated Mooring and Riser Design: Analysis Methodology* – OTC 10810, May/1999.
- [4] ORMBERG, H., FYLLING I. J., LARSEN K., Sodahl N., Coupled Analysis of Vessel Motions and Mooring and Riser System Dynamics – OMAE 1997, Volume I-A, Offshore Technology.
- [5] CORRÊA, F.N., Aplicação de Metodologias Híbridas em Estudos Paramétricos sobre o Comportamento de Sistemas *Offshore*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.
- [6] SENRA, S., Metodologias de Análise e Projeto Integrado de Sistemas Flutuantes para Exploração de Petróleo *Offshore*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
- [7] BAHIENSE, R.A, Implementação e Avaliação de uma Metodologia Fortemente Acoplada para a Análise de Sistemas Flutuantes Offshore, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, Dezembro de 2007.
- [8] CORRÊA, F.N., Ferramentas Computacionais para a Análise Acoplada de Sistemas Offshore, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, Junho de 2008.
- [9] CORRÊA, F.N, JACOB, B.P., MANSUR, J.W, Formulation of an Efficient Hybrid Frequency Domain Solution Procedure for Structural Dynamic Problems. *Computer & Structures*, 2010.

- [10] SITUA-PROSIM, Programa Prosim: Simulação Numérica do Comportamento de Sistemas para Exploração de Petróleo Offshore. Manual Teórico, Versão Preliminar, LAMCSO COPPE/UFRJ, Novembro de 2006.
- [11] API RP 2SK, Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures. 3rd ed., American Petroleum Institute, 2005.
- [12] ISO 19901-7, Stationkeeping Systems for Floating Offshore Structures and Mobile Offshore Units. International Organization for Standardization, 2005.
- [13] DNV OS-E301, Position Mooring. DNV Offshore Standard, October 2010.
- [14] API RP 2SM, Recommended Practice for Design, Manufacture, Installation, and Maintenance of Synthetic Fiber Ropes for Offshore Mooring. 1st ed., American Petroleum Institute, 2001.
- [15] ODE, Offshore & Dredging Engineering Group. Disponível em: < <http://www.offshoremoorings.org> >. Acesso em: 23/03/2013.
- [16] OGJ, Oil & Gas Journal. Disponível em: < <http://www.ogj.com> >. Acesso em: 23/03/2013.
- [17] HENRIQUES, C.C.D., FACHETTI, M.B., Roncador Field: Transport of P-36 and Installation of the Mooring System – OTC 12141. Offshore Technology Conference, 2000.
- [18] VRYHOF, Anchors Catalog. Disponível em: < www.vryhof.com >. Acesso em: 20/03/2010.
- [19] CHAKRABARTI, S. K., Handbook of Offshore Engineering, Volume I and II, ELSEVIER, 2005.

- [20] LIMA, D.A., Avaliação de uma Nova Metodologia de Projeto Integrado de Sistemas de Ancoragem e Risers em Unidades Flutuantes *Offshore*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- [21] ISO 19900, Petroleum and Natural Gas Industries – General Requirements for Offshore Structures. International Organization for Standardization, 2002.
- [22] JIP, Joint Industry Project, Integrated Mooring and Riser Design. Phase I (1997), Phase II (1998) and Phase III (1999) Reports, MCS International and Noble Denton Europe.
- [23] WAMIT – A Radiation-Diffraction Panel Program for Wave-Body Interactions. Version 5.3, User Manual, Department of Ocean Engineering Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- [24] CLOUGH, R.W., PENZIEN, J., Dynamics of Structures. Computer & Structures Inc., Third Edition, 2003.
- [25] METOCEAN DATA, Especificação Técnica. I-ET-3000.00-1000-941-PPC-001_C, Petrobras/Cenpes/PDP, 2005.
- [26] GIRÓN, A.R.C., Projeto Integrado de Sistemas de Ancoragem e Risers em Plataformas Flutuantes de Produção de Petróleo, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.