



ESTUDO DE DIFERENTES CONCEPÇÕES DE SISTEMAS DE ANCORAGEM
EM LÂMINA D'ÁGUA PROFUNDA

Rodrigo Moretti Kochem

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

Orientadores: Breno Pinheiro Jacob
Fabricio Nogueira Correa

Rio de Janeiro
Março de 2016

ESTUDO DE DIFERENTES CONCEPÇÕES DE SISTEMAS DE ANCORAGEM EM
LÂMINA D'ÁGUA PROFUNDA

Rodrigo Moretti Kochem

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

Examinada por:



Prof. Breno Pinheiro Jacob, D. Sc.



Prof. Fabrício Nogueira Corrêa, D. Sc.



Prof. Carl Horst Albrecht, D. Sc.



Dr. Allan Carre de Oliveira, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
MARÇO DE 2016

Kochem, Rodrigo Moretti

Estudo de Diferentes Concepções de Sistemas de Ancoragem em Lâmina D'água Profunda/ Rodrigo Moretti

Kochem – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

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

Orientadores: Breno Pinheiro Jacob

Fabício Nogueira Corrêa

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

Referências Bibliográficas: p. 99-101.

1. Sistemas de Ancoragem. 2. Análise Acoplada. 3. Novas Concepções de Sistemas de Ancoragem. I. Jacob, Breno Pinheiro *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Dedico este trabalho aos meus pais, Sérgio e Patrícia, a minha namorada Camila e aos meus amigos e familiares.

Agradecimentos

A Deus.

Aos meus pais Sérgio e Patrícia por todo o apoio e carinho em todos os momentos.

A minha namorada Camila pelo amor e motivação.

Aos meus orientadores Breno e Fabrício, pela orientação inestimável dada durante o desenvolvimento desse trabalho, sem os quais com certeza meus objetivos não seriam alcançados.

Aos colegas e amigos de mestrado.

Aos companheiros do Lamcso por sempre estarem solícitos a me ajudar no que for preciso.

Ao PFRH/PB pelo apoio financeiro, contribuindo diretamente para a pesquisa e desenvolvimento desta dissertação.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta dissertação.

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

ESTUDO DE DIFERENTES CONCEPÇÕES DE SISTEMAS DE ANCORAGEM EM LÂMINA D'ÁGUA PROFUNDA

Rodrigo Moretti Kochem

Março/2016

Orientadores: Breno Pinheiro Jacob
Fabricio Nogueira Correa

Programa: Engenharia Civil

O petróleo consiste no principal recurso natural utilizado para suprir a demanda mundial de energia. Seu processo de produção em lâmina d'água profunda demanda a utilização de unidades flutuantes ancoradas. O sistema de ancoragem é responsável pelo posicionamento do sistema flutuante dentro dos limites operacionais. O tipo de ancoragem utilizado em águas profundas é a ancoragem tipo Taut-Leg, na qual as linhas se encontram retesadas e apresentam em sua composição materiais mais leves, como o poliéster. Este material é utilizado na maior parte do comprimento da linha, o que permite o sistema trabalhar sob tração com raio de ancoragem reduzido, admitindo maiores possibilidades de arranjo dos equipamentos submarinos.

Neste contexto, esta dissertação tem por objetivo analisar os efeitos de duas variações da ancoragem tipo Taut-Leg para Lâminas d'água profunda. Para tal, propõe-se a utilização de uma ancoragem Taut-Leg com boia e uma ancoragem Taut-Leg com peso. Foram realizadas análises acopladas no domínio do tempo, através do programa SITUA-PROSIM, que considera em uma única estrutura de código e dados, um modelo hidrodinâmico representando o casco da plataforma, acoplado a um modelo de elementos finitos, que representa o comportamento estrutural das linhas.

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

STUDY OF DIFFERENT CONCEPTIONS OF THE MOORING SYSTEMS IN
DEEPWATER

Rodrigo Moretti Kochem

March/2016

Advisors: Breno Pinheiro Jacob
Fabricio Nogueira Correa

Department: Civil Engineering

Oil is the main natural resource used the supply world energy demand. In deepwaters, its production process complies the use of mooring system units. The mooring system is responsible for positioning the floating system within the operational limits in a way that the oil exploration is not affected. The mooring system used in deepwaters is called the Taut-Leg mooring. In this system, the lines are taut and composed by lighter materials, such as polyester which is responsible for most of the length of the line. This material allows the system works under tension with the reduced mooring footprint admitting greater arrangement possibilities of subsea equipments.

In this context, this dissertation aims to analyze the effects of two variations of the *Taut-Leg* mooring at a Spread Mooring system in deepwaters. For such, it proposes the use of the *Taut-Leg* mooring with a buoy and the *Taut-Leg* mooring with weight. Coupled analyses were performed in the time-domain, were used the program SITUA-PROSIM. This program considers in a single code structure and date a hydrodynamic model representing the platform hull coupled to a finite element model representing the behavior of the structural lines.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Contexto	1
1.2	Motivação	2
1.3	Objetivos	3
1.4	Organização do Trabalho	4
2	Ancoragem	5
2.1	Introdução	5
2.2	Componentes de um Sistema de Ancoragem	6
2.2.1	Amarras	6
2.2.2	Cabos de Aço	7
2.2.3	Cabos de Poliéster	8
2.2.4	Boias de Ancoragem	10
2.2.5	Guincho	10
2.2.6	Fairlead	12
2.2.7	Fundações para Sistema Flutuantes	12
2.3	Tipos de Ancoragem	21
2.3.1	Ancoragem em Catenária	21
2.3.2	Ancoragem <i>Taut-Leg</i>	21
2.3.3	Ancoragem Vertical	22
2.4	Sistemas de Ancoragem	23
2.4.1	Ancoragem em Ponto Único (SPM)	23
2.4.2	Amarração com Quadro de Ancoragem (SM)	26
2.4.3	Posicionamento Dinâmico (DP – <i>Dynamic Position</i>)	27
3	Carregamentos Ambientais	29
3.1	Introdução	29
3.2	Corrente	29
3.3	Representação do Estado de Mar	30
3.3.1	Representação Espectral	32
3.3.2	Cálculo das Forças Geradas pelas Ondas	33
3.4	Vento	37
4	Projeto de Sistemas de Ancoragem	38
4.1	Introdução	38
4.2	Combinações de Carregamento Utilizadas em Projeto	38

4.3	Condições de Projeto.....	39
4.3.1	Condição Intacta	39
4.3.2	Condição de Avaria	39
4.3.3	Condição Transiente	39
4.4	Critérios de Projeto	40
4.4.1	Máximo Passeio Permitido	40
4.4.2	Máxima Tração nas Linhas de Ancoragem.....	41
4.4.3	Tração Mínima nas Linhas de Ancoragem	42
4.5	Projeto Integrado de Linhas de Ancoragem e <i>Risers</i>	42
4.5.1	Introdução	42
4.5.2	Zona de Segurança Operacional (SAFOP).....	42
4.5.3	Diagrama de Offset.....	43
4.5.4	Cruzamento de Diagramas de Offset e SAFOP.....	44
5	Sistemas de Ancoragem Estudados.....	46
5.1	Introdução.....	46
5.2	Modelo de Ancoragem Taut Leg Convencional	49
5.2.1	Composição das Linhas	49
5.2.2	Pré-Trações	50
5.3	Modelo de Ancoragem <i>Taut-Leg</i> com Boia	53
5.3.1	Posicionamento da Boia.....	54
5.3.2	Composição das Linhas	55
5.3.3	Pré-Trações	56
5.4	Modelo de Ancoragem <i>Taut-Leg</i> com Peso	59
5.4.1	Posicionamento do Peso.....	60
5.4.2	Composição das Linhas	61
5.4.3	Pré-Trações	62
5.5	Demais Dados dos Modelos Numéricos.....	64
5.5.1	Características Geométricas do Navio	64
5.5.2	Característica dos <i>Risers</i>	65
5.6	Combinações de Carregamentos.....	67
5.7	Descrição das Análises Envolvidas	68
6	Comparação dos Modelos	69
6.1	Introdução.....	69
6.2	Estudo Comparativo.....	69
6.2.1	Raio de Ancoragem.....	69
6.2.2	Pré-Tração Inicial	71
6.3	Resultados Estatísticos.....	71

6.3.1	Tração Máxima Extrema	71
6.3.2	Tração Mínima Extrema	75
6.3.3	Passeio Máximo Extremo	80
6.4	Análise de Condição de Avaria	80
6.4.1	Rompimento da linha mais tracionada.....	81
6.4.2	Rompimento da Segunda Linha mais Tracionada	82
6.4.3	Identificação de Linha Rompida	87
6.5	Análise de Inundação da Boia.....	91
7	Conclusões	96
7.1	Conclusões do trabalho proposto.....	96
7.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	98
8	Referência Bibliográfica	99

Índice de Figuras

Figura 2.1- Elos de Amarras [4].....	6
Figura 2.2- Amarra utilizada para ancoragem de sistema <i>offshore</i> [5]	7
Figura 2.3- Tipos de Cabo de Aço [3]	7
Figura 2.4- Cabo de poliéster [7]	8
Figura 2.5- Guincho tipo molinete [3].....	11
Figura 2.6- Guincho de Tambor [3].....	11
Figura 2.7- Fairlead [3]	12
Figura 2.8- Âncora Convencional [11].....	13
Figura 2.9- Âncora Vertical [3] [10]	14
Figura 2.10- Âncora VLA após instalação [13].....	14
Figura 2.11- Âncora de placa com sistema de detonação [14].....	16
Figura 2.12- Estaca de Sucção [4].....	16
Figura 2.13- Instalação de uma Estaca de Sucção [14].....	17
Figura 2.14- Âncora SEPLA [11].....	18
Figura 2.15- Instalação da Âncora SEPLA [10].....	18
Figura 2.16- Estaca Torpedo [11]	19
Figura 2.17- Processo de Instalação de uma Estaca Torpedo [12].....	20
Figura 2.18- Configuração em Catenária x <i>Taut-Leg</i> [7]	22
Figura 2.19- Ancoragem Vertical em uma TLP [17]	23
Figura 2.20- Exemplos de <i>turret</i> interno e externo [10]	24
Figura 2.21- <i>Turret</i> interno e externo [15]	24
Figura 2.22- Ancoragem tipo CALM fixada com <i>Hawser</i> e com <i>Yoke</i> [15]	25
Figura 2.23- SALM com <i>riser</i> pré-tracionado e com flutuação através de boia [11]	26
Figura 2.24- Amarração com Quadro de Ancoragem (<i>Spread Mooring</i>) [3]	26
Figura 2.25- Vista 3D do sistema DICAS [15].....	27
Figura 2.26- Sistema DP [11]	28
Figura 3.1- Carregamento Ambientais atuantes em uma UF[18]	29
Figura 3.2- Representação de uma Onda Regular [20]	30
Figura 3.3- Representação de uma Onda Irregular [20].....	31
Figura 3.4- Modelo Matemático de Representação das Ondas do Mar[18]	31
Figura 4.1- Estimativa de passeio admissíveis para operação com <i>Risers</i> [3].	41
Figura 4.2- Trações admissíveis e fatores de segurança [3].....	41

<i>Figura 4.3- Representação do diagrama SAFOP de um riser [10]</i>	43
<i>Figura 4.4- Superposição do Diagrama de Offset com o SAFOP [10]</i>	44
<i>Figura 5.1- Arranjo Geral dos Sistemas de Ancoragem e numeração das linhas</i>	47
<i>Figura 5.2- Vista Lateral - Modelo Taut Leg</i>	49
<i>Figura 5.3- Vista 3D - Modelo Taut Leg</i>	49
<i>Figura 5.4- Linha de Ancoragem Modelo Taut-Leg – Trações na Linha</i>	52
<i>Figura 5.5- Vista Lateral do Modelo com Boia Auxiliar</i>	53
<i>Figura 5.6- Vista 3D do Modelo com Boia Auxiliar</i>	54
<i>Figura 5.7- Modelo Taut-Leg com boia</i>	55
<i>Figura 5.8- Linha de Ancoragem com Boia– Trações na Linha</i>	58
<i>Figura 5.9- Vista Lateral do Modelo com Peso</i>	59
<i>Figura 5.10- Vista 3D do Modelo com Peso</i>	59
<i>Figura 5.11- Configuração da Linha de Ancoragem com Peso</i>	60
<i>Figura 5.12- Linha de Ancoragem com Peso – Trações na Linha</i>	63
<i>Figura 5.13- Vista 3D da Unidade Flutuante</i>	64
<i>Figura 5.14- Geometria dos Risers</i>	66
<i>Figura 6.1- Configurações dos Tipos de Ancoragem Estudados – Linha 1</i>	70
<i>Figura 6.2- Combinação de Carregamento Predominante</i>	75
<i>Figura 6.3- Tração Mínima – Modelo Taut Leg</i>	79
<i>Figura 6.4- Modelo Representando Rompimento da Linha mais Tracionada</i> ... 81	
<i>Figura 6.5- Modelo Representando Rompimento da Segunda Linha mais Tracionada</i>	82
<i>Figura 6.6- Rompimento de Linha Acima da Boia – Momento 1</i>	87
<i>Figura 6.7- Rompimento de Linha Acima da Boia – Momento 2</i>	88
<i>Figura 6.8- Rompimento de Linha Acima da Boia – Momento 3</i>	88
<i>Figura 6.9- Rompimento de Linha Acima da Boia – Momento 4</i>	89
<i>Figura 6.10- Rompimento de Linha Abaixo da Boia – Momento 1</i>	89
<i>Figura 6.11- Rompimento de Linha Abaixo da Boia – Momento 2</i>	90
<i>Figura 6.12- Rompimento de Linha Abaixo da Boia – Momento 3</i>	90
<i>Figura 6.13- Rompimento de Linha Abaixo da Boia – Momento 4</i>	91
<i>Figura 6.14- Modelo Representando a Inundação da boia (Linha 19)</i>	91
<i>Figura 6.15- Modelo Inundação da boia – Trações na Linha</i>	94
<i>Figura 6.16- Modelo Inundação da boia – Rompimento</i>	95

Índice de Tabelas

Tabela 2-1. <i>Propriedades Cabos Sintéticos e Cabos de Aço</i> [10].....	10
Tabela 5-1. <i>Características Físicas e Geométricas das linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg</i>	50
Tabela 5-2. <i>Divisão por Segmentos e refino de malha das linhas de ancoragem</i>	50
Tabela 5-3. <i>Azimute e Pré-Trações das Linhas de Ancoragem – Modelo Taut Leg</i>	51
Tabela 5-4. <i>Divisão por Segmentos e refino de malha das linhas de ancoragem – Modelo com Boia</i>	56
Tabela 5-5. <i>Características Físicas e Geométricas das linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg com Boias</i>	56
Tabela 5-6. <i>Azimute e Pré-Trações das Linhas de Ancoragem – Modelo com Boia Auxiliar</i>	57
Tabela 5-7. <i>Divisão por Segmentos e refino de malha das linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg com Peso</i>	61
Tabela 5-8. <i>Características Físicas e Geométricas das linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg com Peso</i>	61
Tabela 5-9. <i>Azimute e Pré-Trações das Linhas de Ancoragem – Modelo com Peso</i>	62
Tabela 5-10. <i>Propriedades Geométricas da Unidade Flutuante</i>	64
Tabela 5-11. <i>Matriz de Raios de Giração em Relação ao CG</i>	65
Tabela 5-12. <i>Posição do Centro de Gravidade em Relação ao Eixo Estrutural (m)</i>	65
Tabela 5-13. <i>Características Físicas e Geométricas dos Risers</i>	65
Tabela 5-14. <i>Divisão por segmentos e refino de malha dos Risers</i>	66
Tabela 6-1. Raios de Ancoragem – Linha 1.....	69
Tabela 6-2. Comprimento das Linhas de Ancoragem – Linha 1.....	70
Tabela 6-3. Pré-Tração Inicial - Linha 1	71
Tabela 6-4. <i>MBL dos materiais utilizados nas linhas de ancoragem</i>	71
Tabela 6-5. <i>Trações Máximas Extremas nas linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg Convencional</i>	72
Tabela 6-6. <i>Trações Máximas Extremas nas linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg com Boia</i>	73

Tabela 6-7. <i>Trações Máximas Extremas nas linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg com Peso</i>	74
Tabela 6-8. <i>Tração Mínima Admissível</i>	75
Tabela 6-9. <i>Trações Mínimas Extremas nas linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg Convencional</i>	76
Tabela 6-10. <i>Trações Mínimas Extremas nas linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg com Boia</i>	77
Tabela 6-11. <i>Trações Mínimas Extremas nas Linhas de Ancoragem – Modelo Taut-Leg com Peso</i>	78
Tabela 6-12. <i>Passeio Máximo Admissível</i>	80
Tabela 6-13. <i>Valores Extremos Encontrados para o Passeio – Sistema Intacto</i>	80
Tabela 6-14. <i>Valores Extremos Encontrados para o Passeio – Sistema Avariado</i>	82
Tabela 6-15. <i>MBL dos materiais utilizados nas linhas de ancoragem – Sistema Avariado</i>	83
Tabela 6-16. <i>Trações Máximas Extremas nas linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg Convencional (Condição de Avaria)</i>	84
Tabela 6-17. <i>Trações Máximas Extremas nas linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg com Boia (condição de avaria)</i>	85
Tabela 6-18. <i>Trações Máximas Extremas nas linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg com Peso (Condição de Avaria)</i>	86
Tabela 6-19. <i>Características Físicas e Geométricas – Boia Inundada</i>	92
Tabela 6-20. <i>Trações Máximas Extremas – Boia Inundada</i>	93
Tabela 6-21. <i>Passeio Máximo Extremo – Boia Inundada</i>	94

1 Introdução

1.1 Contexto

O petróleo tem sido, ao longo dos anos, o principal elemento da matriz energética mundial, tornando-se assim um fator estratégico, político e econômico de grande importância para todos os países.

O emprego dos sistemas *offshore* em águas profundas inviabilizou a utilização de plataformas fixas, já que o período natural das mesmas se aproximou dos períodos das ondas, o que poderia levar ao seu colapso estrutural. Desta forma, novas soluções foram desenvolvidas para possibilitar a exploração de petróleo neste ambiente, uma das primeiras soluções encontradas e que atualmente é uma das mais empregadas consiste na utilização de sistemas flutuantes ancorados.

Os sistemas de ancoragem são compostos por um conjunto de linhas de ancoragem, com várias composições, e tem a função de manter a posição de projeto da unidade flutuante. A composição das linhas de ancoragem e o tipo de ancoragem utilizado varia de acordo com o tipo de embarcação, a lâmina d'água, o tipo de operação realizada, custo entre outros parâmetros.

O primeiro tipo de ancoragem desenvolvido foi a ancoragem em catenária. Este sistema foi empregado na maioria das plataformas até uma profundidade em torno de 500 metros, e é composto por amarra e cabos de aço. Com o aumento da profundidade a utilização da ancoragem em catenária se tornou inviável por que exigiria a necessidade de guinchos mais potentes (devido ao maior peso das linhas) e raios de ancoragem bastante elevados (causando congestionamento das linhas em plataformas próximas e equipamentos submarinos). Para contornar os problemas citados acima, foi desenvolvido um novo tipo de ancoragem denominado *Taut-Leg*. Neste tipo de ancoragem as linhas encontram-se retesadas formando um ângulo de topo de aproximadamente 45° e têm em sua composição amarras, cabos de aço e cabos de poliéster, este último responsável pela maior parte do comprimento da linha, apresenta um peso molhado bem menor.

Devido à utilização de cabos de poliéster, que apresentam flexibilidade axial bem maior, a ancoragem *Taut-Leg* permite a adoção de sistemas que trabalhem sob tração, com raio de ancoragem significativamente menor em relação ao sistema anterior para uma mesma lâmina d'água. Este tipo de ancoragem proporciona maior rigidez ao sistema, limitando o passeio da plataforma.

Quanto à metodologia de projeto do sistema de ancoragem, ela também sofreu aprimoramentos ao longo do tempo, ela era baseada unicamente em formulações desacopladas, que consiste em tratar separadamente o comportamento estrutural não-linear das linhas de ancoragem e os movimentos do casco sem levar em consideração o comportamento interativo com os *risers*.

Devido à complexidade encontrada para representar o comportamento estrutural de um sistema flutuante *offshore* em águas profundas e/ou com grande número de *risers*, onde a interação estrutural e hidrodinâmica linha-casco passa a ser significativa, desenvolveu-se a formulação acoplada, que incorpora em uma única estrutura de código e dados, um modelo hidrodinâmico representando o casco da plataforma, acoplado a um modelo de elementos finitos, que representa o comportamento estrutural das linhas. A formulação acoplada, por considerar a interação dinâmica não-linear entre todos os componentes do sistema, apresenta resultados mais condizentes com a realidade, porém demandam maior esforço computacional. Ela é recomendada em fases avançadas de projeto.

1.2 Motivação

Como visto anteriormente o sistema de ancoragem é o responsável por manter a unidade flutuante dentro da posição de projeto que não afete as atividades de produção. Dessa forma, a execução de um projeto que garanta o dimensionamento de um sistema de ancoragem seguro é essencial, visto que sua falha pode acarretar interrupção nas atividades de produção, perda de materiais e equipamentos, além de provocar danos ambientais.

Com o avanço da exploração e produção para profundidades cada vez maiores, obstáculos são revelados, proporcionando a engenharia *offshore* grandes desafios tecnológicos, principalmente no que se refere ao posicionamento da unidade flutuante compatível com essa nova realidade. Neste sentido, o desenvolvimento de concepções de ancoragem que aperfeiçoem as variáveis inerentes ao projeto, tais como a pré-tração e o raio de ancoragem, tornou-se um importante campo de pesquisa.

A pré-tração consiste na tração submetida às linhas de ancoragem no momento em que a plataforma se encontra na posição de projeto. Ela possui fundamental importância na manutenção da UF (Unidade Flutuante) em sua posição de equilíbrio. Valores muito elevados de pré-tração elevariam o custo da implantação do sistema *offshore*, uma vez que necessitaria de guinchos mais potentes para o pagamento e

recolhimento destas linhas. Em razão disto, busca-se trabalhar com os menores valores de pré-tração possível, sem colocar em risco a integridade do sistema flutuante.

A busca por raios de ancoragem cada vez menores tem o intuito de permitir maiores possibilidades de arranjos dos equipamentos submarinos, evitar o congestionamento de linhas de unidades flutuantes próximas, além de minimizar os custos de outros sistemas. Por outro lado, em ancoragens *Taut-Leg*, raios menores implicam em maiores pré-trações. Buscar uma relação ótima entre raio de ancoragem e pré-tração é um fator relevante para a minimização do custo do sistema de ancoragem.

Outro ponto importante no contexto de sistemas de ancoragem diz respeito ao evento de linha rompida (condição de avaria). Embora sistemas de ancoragem sejam projetados para operarem com linhas rompidas, sendo inclusive, prevista esta condição em projeto, a rápida identificação em campo da mesma é essencial para manter o sistema de ancoragem seguro. Normalmente a identificação é realizada quando a leitura da tração no guincho está disponível e calibrada ou através de inspeções submarinas.

1.3 Objetivos

Diante do exposto nas seções anteriores o objetivo do presente trabalho é analisar os efeitos de duas variações da ancoragem tipo *Taut-Leg* em um sistema com Quadro de Ancoragem (*Spread Mooring*) em lâmina d'água profunda. Para tal, propõe-se a utilização de uma ancoragem *Taut-Leg* com boia e uma ancoragem *Taut-Leg* com peso.

A finalidade para compor uma ancoragem do tipo *Taut-Leg* com a inserção de uma boia é obter uma configuração que diminua o raio de ancoragem e também a pré-tração aplicada na linha, visto que a boia ajuda a sustentar o peso da mesma. Outro fator importante na utilização de boias na ancoragem *Taut-Leg* é a possibilidade de projetar a linha para que na condição de avaria a boia seja capaz de emergir até a superfície, permitindo a identificação visual, de forma quase instantânea, do rompimento de qualquer linha do sistema.

Já o propósito da ancoragem do tipo *Taut-Leg* com peso é também obter uma configuração de linha que diminua o raio de ancoragem, além de aplicar uma pré-tração inicial menor do que a prevista em projeto, sendo esta diferença suplantada pela inserção de peso em determinado ponto da linha, possibilitando o emprego de guinchos menos potentes.

É objetivo do trabalho também, comparar através de análises acopladas no domínio do tempo os dois tipos de ancoragem citados acima com uma ancoragem do tipo *Taut-Leg* tradicional, com o intuito de identificar suas vantagens e desvantagens.

1.4 Organização do Trabalho

O texto desta dissertação está organizado da seguinte forma:

O capítulo 2 descreve os principais componentes de um sistema de ancoragem, os tipos de ancoragem que são utilizados, além dos sistemas de ancoragem propriamente ditos.

No capítulo 3, são apresentadas as condições ambientais de onda, vento e corrente atuantes nos sistemas *offshore*, destacando os modelos de representação das ondas do mar e o cálculo das forças geradas pelos carregamentos ambientais.

No capítulo 4, são descritas as práticas, condições e critérios de projeto referentes ao sistema de ancoragem de acordo com as normas. Além de apresentar uma metodologia que integra os projetos de ancoragem e de *risers*, conforme descrito em GIRÓN [1].

Em seguida, o capítulo 5 descreve os sistemas de ancoragem estudados, apresentando todas as características dos modelos numéricos, combinações de carregamento utilizadas e descrição das análises envolvidas.

No capítulo 6, encontram-se todos os resultados obtidos e é realizado um estudo comparativo entre os tipos de ancoragem propostos nesta dissertação.

Finalmente, no capítulo 7, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 Ancoragem

2.1 Introdução

A exploração de petróleo no mar exige basicamente a execução das seguintes atividades: perfuração, completção, produção e *workover* (intervenção em poços). Para realização dessas atividades podem ser utilizadas unidades flutuantes do tipo semissubmersível ou navios FPSO's (*Floating Production Storage and Offloading*) ancoradas.

A finalidade dos sistemas de ancoragem é manter uma unidade flutuante dentro dos limites propostos no projeto para que as atividades de exploração *offshore* possam ser executadas com sucesso.

Os sistemas de ancoragem são compostos por um conjunto de linhas de ancoragem, com várias composições, e âncoras ou estacas, que transferem os esforços ambientais sofridos pela plataforma para o solo. A composição das linhas de ancoragem varia de acordo com o tipo de embarcação, a lâmina d'água, o tipo de operação realizada, custo entre outros parâmetros. [2]

Na sequência deste capítulo, serão descritos todos os componentes que fazem parte de um sistema de ancoragem, além das configurações empregadas atualmente.

2.2 Componentes de um Sistema de Ancoragem

2.2.1 Amarras

As amarras são correntes de alta resistência cujo material de fabricação é o aço e representam o elemento mais comum utilizado na ancoragem convencional. Elas podem ser do tipo com ou sem malhete (Figura 2.1), sendo que o primeiro é o mais utilizado na ancoragem de plataformas flutuantes. As dimensões de um elo de corrente são múltiplos do diâmetro da corrente. [2]

As amarras geralmente são utilizadas nos trechos iniciais e finais das linhas, já que esse material possui maior resistência ao atrito decorrente do contato com o fundo do mar e com os guinchos da unidade flutuante.

Segundo a norma API RP 2SK [3], as amarras podem ser classificadas conforme sua resistência em R3 (grau 3), ORQ (*Oil Rig Quality*) e R4 (mais resistente). As amarras podem romper por fadiga ou por ultrapassar o limite de ruptura.

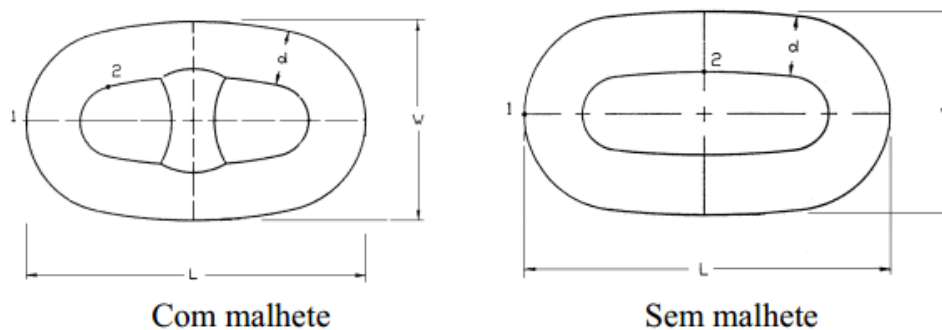


Figura 2.1- Elos de Amarras [4]

Existem alguns tipos de componentes que são utilizados para conectar duas partes de corrente. O mais empregado é o elo *Kenter*, que embora tenha resistência à ruptura igual ou superior a uma corrente com a mesma dimensão, possui menor resistência à fadiga, sendo assim as linhas de ancoragem devem utilizar o menor número possível desses componentes.



Figura 2.2- Amarra utilizada para ancoragem de sistema *offshore* [5]

2.2.2 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. A especificação dos cabos de aço consiste de dois números, como por exemplo, 6x19. O primeiro número fornece a quantidade de pernas torcidas e o segundo a quantidade de fios em cada perna. [4]

São vários os tipos de cabo de aço utilizados na ancoragem de unidades flutuantes, sendo os principais os *six-strand* e os *spiral-strand*. Os primeiros por apresentarem fácil manuseio, são empregados com maior frequência nas unidades de perfuração. No entanto, os segundos possuem alta resistência e durabilidade, sendo mais comumente utilizado nas unidades de produção [6]. A Figura 2.3 mostra os tipos de cabo de aço utilizados para a ancoragem de unidades flutuantes. [3]

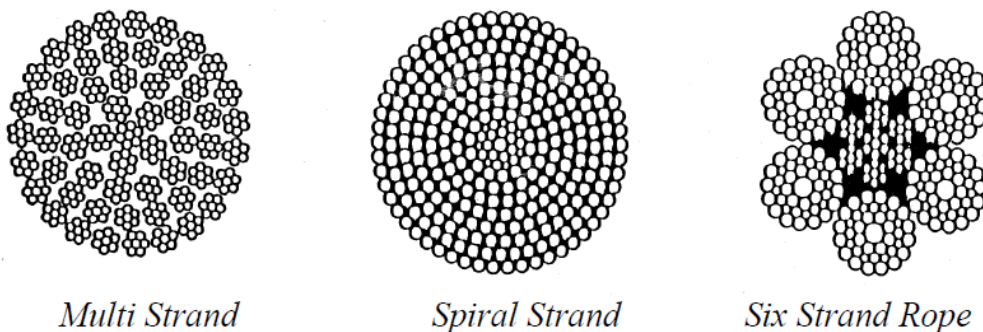


Figura 2.3- Tipos de Cabo de Aço [3]

Devido à corrosão da trança metálica, os cabos de aço apresentam vida à corrosão inferior à das amarras, problema que pode ser mitigado através da utilização de cabos galvanizados.

Em relação à resistência dos arames que formam o cabo, normalmente são empregados dois tipos: IPS (*Improved Plow Steel*) ou EIPS (*Extra Improved Plow Steel*). O cabo com fios EIPS é mais resistente à tração e recomendado para unidades flutuantes. [7]

2.2.3 Cabos de Poliéster

Os cabos de poliéster, Figura 2.4, são cabos produzidos de materiais sintéticos, que possuem uma flexibilidade axial bem maior do que os cabos de aço ou amarras, com a mesma carga de ruptura nominal e um peso molhado bem menor. Com o aumento significativo das lâminas d'água os cabos de poliéster se apresentaram como uma solução viável em conjunto com as amarras e os cabos de aço, para a utilização em sistemas de ancoragem do tipo *Taut-Leg*. Esse tipo de ancoragem exige o emprego de um material que permita um maior alongamento que os materiais até então utilizados, esta característica é a principal responsável pela absorção dos movimentos dinâmicos de uma unidade flutuante, através da pré-tração aplicada nas linhas de ancoragem, reduzindo de forma considerável o passeio desta. [2]

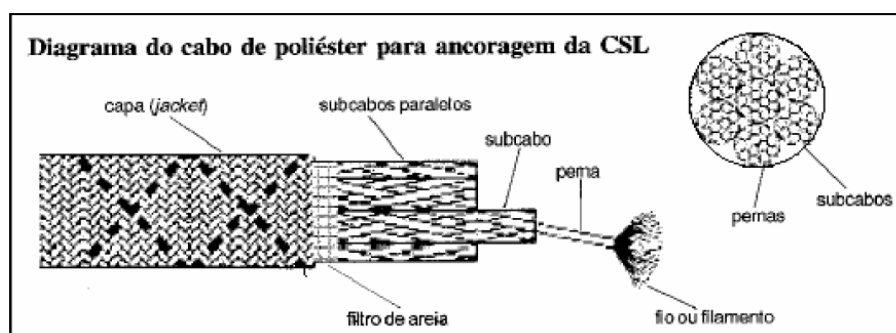


Figura 2.4- Cabo de poliéster [7]

Outro fator importante a se destacar com utilização dos cabos de poliéster diz respeito ao menor raio de ancoragem, permitindo arranjos de equipamentos submarinos mais eficientes, isso se deve ao fato de que a força de restauração na utilização do poliéster se dá pela elasticidade do material e não pelas características geométricas da linha.

Os cabos de poliéster apresentam baixa ou nenhuma rigidez à compressão axial. Por este motivo, devem estar necessariamente, submetidos a esforços axiais de tração [8].

Em ROSSI [9] destaca-se que o poliéster apresenta como principal característica a viscoelasticidade, ou seja, apresenta um comportamento tanto sólido elástico quanto líquido viscoso. Sendo assim a relação tensão x deformação não apresenta um padrão linear e, portanto, não pode ser representado pela lei de *Hooke*.

Os materiais visco-elásticos apresentam algumas propriedades importantes, tais como [9]:

- *Creep*: aumento da deformação ao se aplicar uma tensão constante, isto é, a deformação aumenta sem que haja um aumento de tensão correspondente.
- *Relaxação*: redução da tensão ao se aplicar uma deformação constante, isto é, a tensão diminui sem que haja uma redução correspondente da deformação.
- *Ciclo de Histerese*: representa o fenômeno de dissipação de energia quando o material é submetido a cargas cíclicas.

A Tabela 2-1 faz um comparativo das propriedades dos cabos de fibra sintética e dos cabos de aço.

Tabela 2-1. *Propriedades Cabos Sintéticos e Cabos de Aço* [10]

Características	Cabos de 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%	12.50%	12%	1.10%
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

2.2.4 Boias de Ancoragem

As boias utilizadas como componente do sistema de ancoragem podem ser de superfície ou submersas, elas geralmente possuem um formato cilíndrico e são fabricadas de aço, material sintético ou uma combinação de ambos. As principais funcionalidades na utilização das boias de ancoragem são apresentadas abaixo [3]:

- Reduzir o peso que as linhas de ancoragem transferem para a unidade flutuante, garantindo assim menores trações no topo das linhas.
- Diminuir o passeio da unidade flutuante para um dado comprimento de linha e nível de pré-tração.
- As boias de superfície possuem ainda função indicadora, buscando facilitar a visualização das linhas de ancoragem.

As boias devem ser projetadas para resistir à pressão hidrostática. Durante a fabricação as soldas devem ser verificadas através de ensaios não destrutivos e uma adequada proteção contra corrosão deve ser elaborada [3].

2.2.5 Guincho

Os guinchos têm papel importante na manutenção da posição de projeto previstos nos sistemas de ancoragem, eles são responsáveis por fornecer a tração necessária para as linhas, recolhendo ou “pagando” conforme a necessidade. De acordo com a norma API RP 2SK [3] os guinchos podem ser classificados basicamente em dois tipos:

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

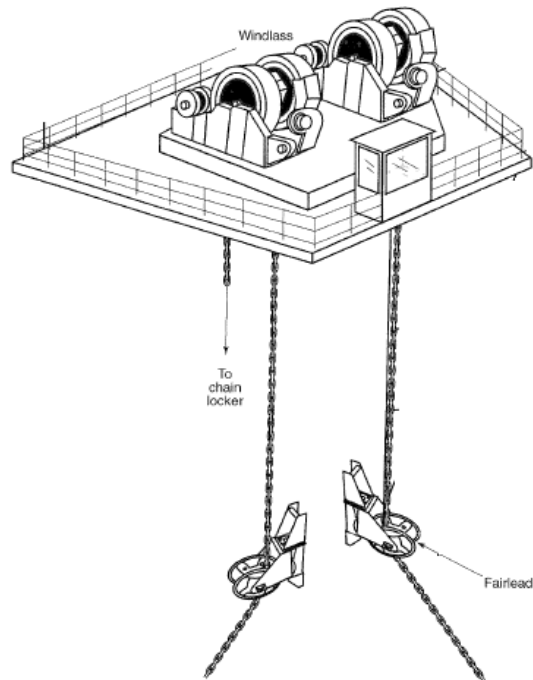


Figura 2.5- Guincho tipo molinete [3]

- Guincho de Tambor: é o equipamento utilizado para manusear cabos de aço. Consiste em um grande tambor onde o cabo é enrolado. Um dispositivo auxilia no posicionamento do para que seja feito em camadas à medida que o cabo vai sendo enrolado.

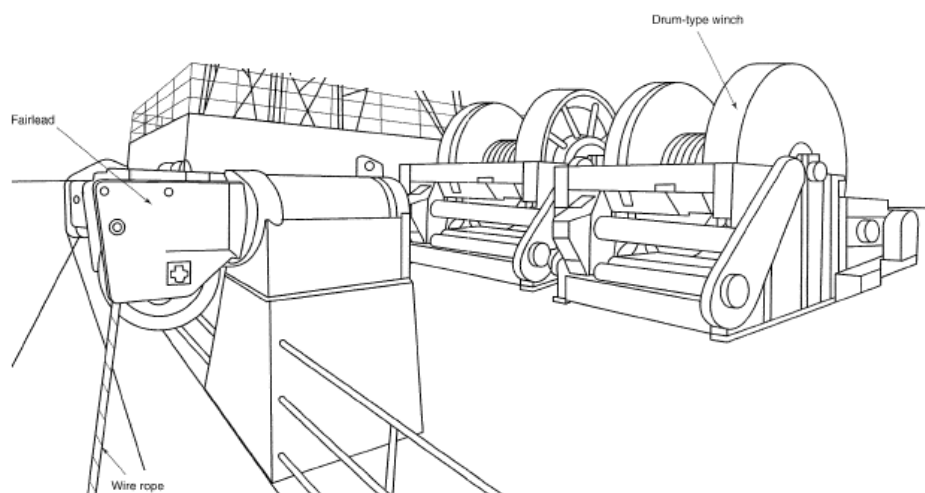


Figura 2.6- Guincho de Tambor [3]

2.2.6 Fairlead

Os *Fairleads*, Figura 2.7, são polias conectadas na estrutura da plataforma e são responsáveis por permitir que as amarras fiquem na posição vertical para que sejam recolhidas pelos guinchos. Os *fairleads* devem ter uma relação entre o diâmetro da polia e o diâmetro da linha de modo a minimizar a fadiga por tração-flexão. Para cabos de aço, utilizam-se polias com razão D/d de 16 a 25 em MODU's (*Mobile Offshore Drilling Unit*) e de 40 a 60 para sistemas permanentes de produção. [3]

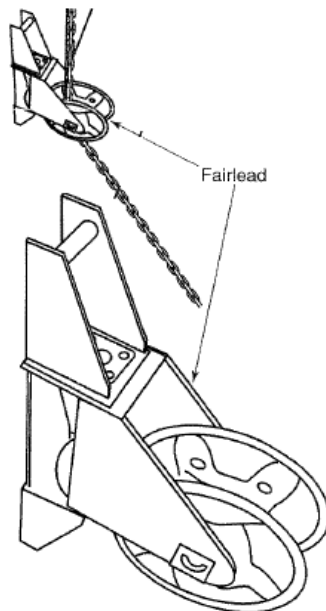


Figura 2.7- Fairlead [3]

2.2.7 Fundações para Sistema Flutuantes

A principal função das linhas de ancoragem é manter o posicionamento da unidade flutuante, para tal a linha deve ser fixada em um ponto no fundo do mar de forma de tal forma que os esforços se concentrem no mesmo. A este ponto dá-se o nome de ponto de ancoragem e o elemento responsável por manter esse ponto fixo é chamado de âncora. [7]

Nos itens a seguir são apresentados os principais tipos de âncora utilizados na fixação de unidade flutuantes.

2.2.7.1 Âncora Convencional

As âncoras convencionais, Figura 2.8, são geralmente constituídas de uma haste (*shank*) fixa ou articulada, responsável por fornecer o ângulo de ataque para penetração e o enterramento no solo; de uma garra (*fluke*) cuja função é mobilizar a capacidade de

carga do solo; de um cepo (*stoke*) que é um braço transversal à haste, responsável por impedir a rotação da mesma após seu enterramento no leito marinho; e uma coroa (*crown*), que conecta as respectivas partes, fornecendo rigidez ao conjunto. [11]

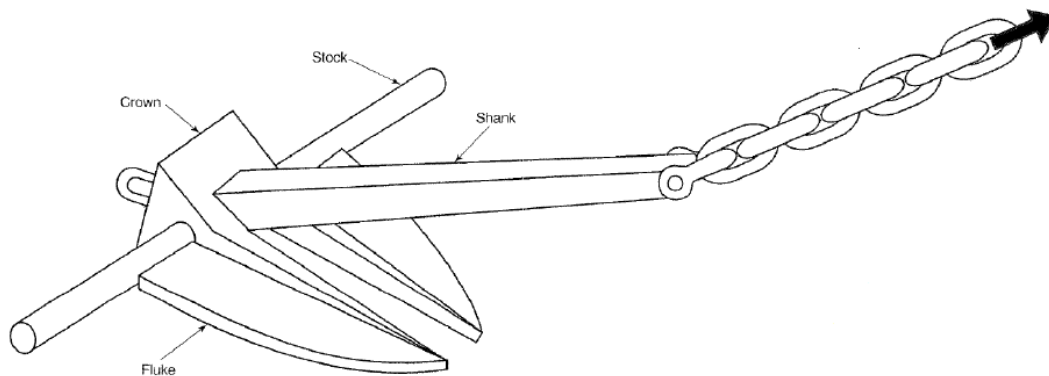


Figura 2.8- Âncora Convencional [11]

As âncoras convencionais não resistem a carregamento vertical (*uplift*) e, portanto, são utilizadas em linhas de ancoragem em catenária, necessitando de um longo trecho de linha apoiado no fundo do mar, de modo a garantir que isto não ocorra. [12]

O processo de instalação é feito por arrasto com o auxílio de uma embarcação responsável por lançar a âncora e puxá-la, fazendo-a penetrar no solo. Durante esta operação, os guinchos da plataforma e da embarcação liberam quantidade de linha até atingir o alvo. [2]

Um fator preponderante no dimensionamento da âncora é a resistência do solo. Nos solos de baixa compacidade ou consistência, o carregamento se distribui uniformemente em toda a superfície da garra; por outro lado, em solos cimentados, toda transferência de esforços pode se concentrar em apenas uma pequena área de contato. Qualquer que seja o tipo de solo, o travamento da âncora deve se alinhar o máximo possível com o leito marinho, inibindo o seu arrasto no solo. Isto é facilitada devido ao fato das âncoras convencionais estarem sempre associados a amarras de aço, cuja geometria da catenária corresponde a um comprimento de três a quatro vezes a lâmina d'água da locação. [12]

2.2.7.2 Âncoras Verticais

Com o aumento da profundidade nas operações *offshore*, é necessário o uso de ancoragem do tipo *Taut-Leg* (apresentado na seção 2.3.2), sendo assim surgiu à

necessidade de desenvolver um sistema de ancoragem que suporte cargas que tenham componentes verticais. A solução encontrada foi a utilização das âncoras verticais, também conhecidas como VLA (*Vertically Loaded Anchor*).

As âncoras VLA, Figura 2.9, se distingue da âncora convencional por substituir a haste rígida por um conjunto de cabos associados a um dispositivo que permite a mudança de ângulo de aplicação da carga para que a mesma incida perpendicularmente à placa, tornando possível resistir às componentes verticais de carga. [13]

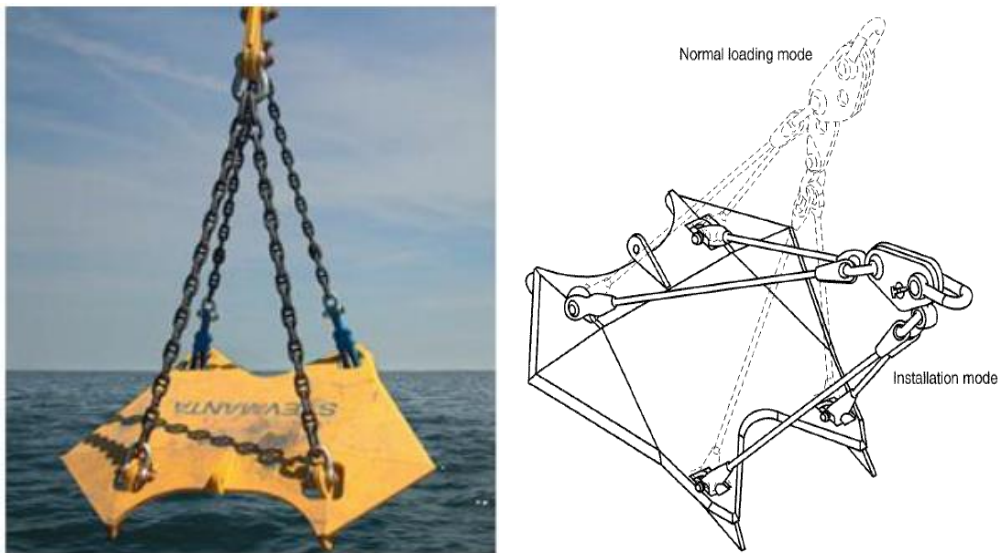


Figura 2.9- Âncora Vertical [3] [10]

A instalação de âncora tipo VLA, Figura 2.10, ocorre de forma semelhante à âncora convencional, com o auxílio de embarcações a âncora é puxada até atingir a carga prevista e a locação para instalação, então, a direção é mudada para se tornar perpendicular à placa. Com o carregamento agindo nesta posição, o comportamento será igual ao de uma âncora de placa. [2]

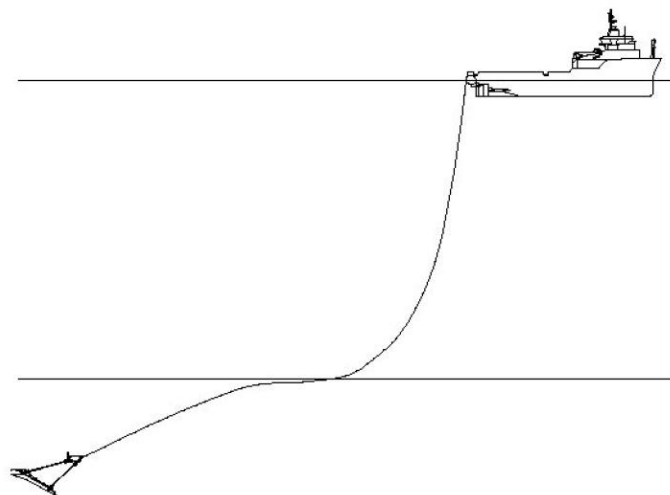


Figura 2.10- Âncora VLA após instalação [13]

É interessante que a instalação seja realizada com o sistema de ancoragem definitivo, a fim de facilitar a ligação entre a âncora e a plataforma. No entanto, quando se utiliza o sistema de linhas de ancoragem do tipo *Taut-Leg* com cabo de poliéster, essa operação não é possível, pois o cabo irá absorver parte da carga aplicada durante o arraste. Neste caso, são usadas duas linhas de instalação, uma é conectada à embarcação que realiza a instalação, e a outra fica de espera em outro barco. Ao final do processo, o pino da manilha é rompido e a linha de espera é ligada a uma boia para, posteriormente ser conectada à plataforma. [14]

2.2.7.3 Âncoras de Placa

As âncoras de placa, Figura 2.11, também conhecidas como PEA's (*Plate Embedment Anchor*), foram inicialmente utilizadas pela marinha americana e têm sido implantadas na indústria *offshore*. [3]

Estas âncoras não são instaladas por arrasto como as convencionais, são instaladas por cravação com o auxílio de martelos ou pelo uso de explosivos. No caso de uso de explosivos, se torna necessário averiguar se a camada de solo tem resistência suficiente, a fim de evitar a dissipação da energia decorrente do impacto da âncora, impedindo assim sua dissipação em uma camada mais resistente. [14]

As âncoras de placa apresentam três principais vantagens em relação às convencionais: [2]

- Elas resistem de forma eficiente a carregamentos em qualquer direção, inclusive a cargas verticais;
- Elas podem ser instaladas de maneira precisa em qualquer alvo;
- Apresentam elevada capacidade de carga, que está relacionada com a profundidade atingida pela âncora no solo.

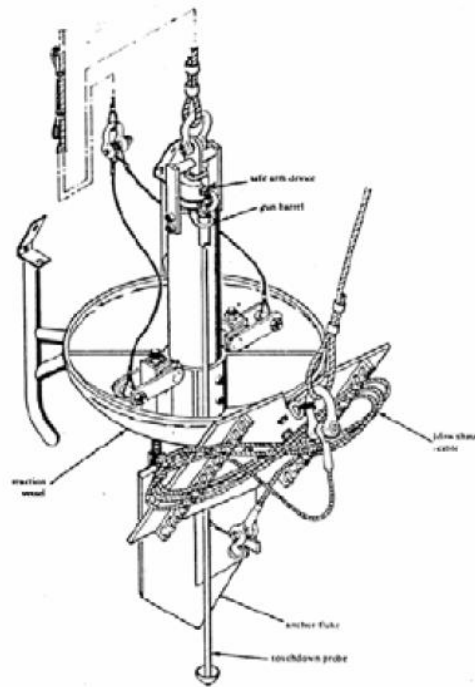


Figura 2.11- Âncora de placa com sistema de detonação [14]

2.2.7.4 Estacas de Sucção (Suction Pile)

As estacas cravadas por sucção, Figura 2.12, apresentam uma estrutura metálica de geometria cilíndrica aberto no fundo e fechada no topo com enrijecedores internos. Sua seção transversal pode ter qualquer forma poligonal fechada, mas em geral são circulares.



Figura 2.12- Estaca de Sucção [4]

O processo de instalação, Figura 2.13, é iniciado com uma penetração parcial devido ao seu peso próprio submerso. Com o auxílio de uma bomba centrífuga de sucção, conectada ao topo da estaca, a água contida dentro da âncora é bombeada gerando um diferencial de pressão que, ao superar o valor da resistência do solo, faz com que a estaca atinja a penetração total finalizando o processo de cravação. [10]

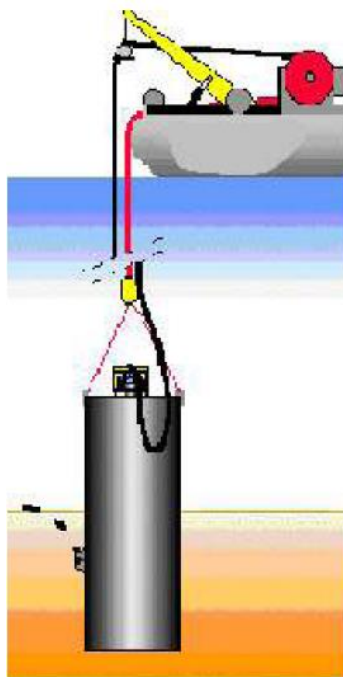


Figura 2.13- Instalação de uma Estaca de Sucção [14]

As primeiras estacas cravadas por sucção para ancoragem permanente foram instaladas em lâmina d'água de pequena profundidade com linhas em catenária. No entanto, as principais vantagens desse tipo de estaca se dão em águas profundas. Diante do elevado custo de cravações de estaca utilizando martelos em lâminas d'água com grande profundidade e a substituição das plataformas fixas pelas flutuantes, adotou-se à estaca cravada por sucção como uma solução economicamente viável. [14]

Este sistema permite que a linha de ancoragem resista a esforços aplicados em qualquer ângulo, ou seja, desde cargas horizontais provenientes de linhas de ancoragem em catenária até cargas quase verticais resultantes de plataformas do tipo TLP's (*Tension Leg Platform*). Dessa forma uma aplicação bastante utilizada das estacas de sucção são ancoragens do tipo *Taut-Leg*, onde a linha de ancoragem tem uma angulação entre 30° e 50°. [12]

2.2.7.5 SEPLA (*Suction Embedded Plate Anchor*)

A SEPLA, Figura 2.14, reúne as principais características da âncora de placa e da âncora de sucção com o objetivo de auxiliar o processo de instalação. Este sistema utiliza uma estaca de sucção como o instalador de uma âncora de placa, associando as vantagens de precisão da instalação da estaca de sucção com a eficiência geotécnica e baixo custo da âncora de placa. [10]



Figura 2.14- Âncora SEPLA [11]

A instalação, Figura 2.15, é feita através da conexão da âncora de placa com a linha de ancoragem, na base da estaca de sucção. A estaca de sucção serve apenas para auxiliar no processo de cravação, sendo retirada quando o processo é finalizado. Ao atingir a profundidade de projeto, a linha de ancoragem é tracionada, fazendo com que a âncora atinja sua configuração e nível de tração final. [11]

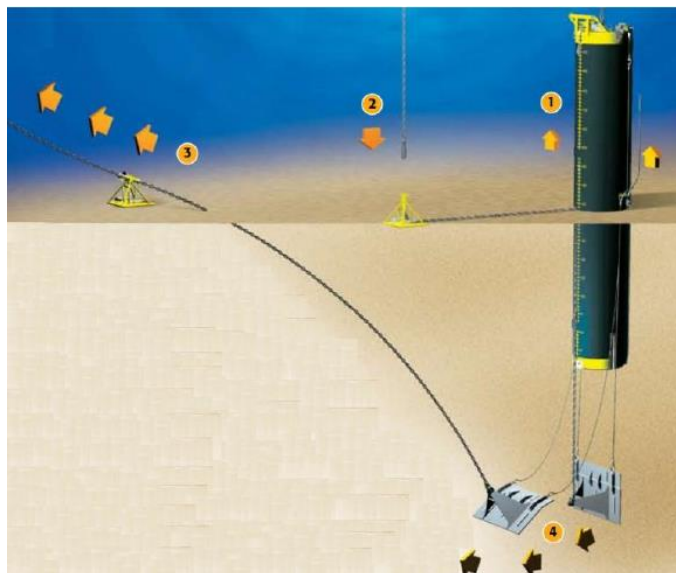


Figura 2.15- Instalação da Âncora SEPLA [10]

2.2.7.6 Estaca Torpedo

As estacas torpedo, Figura 2.16, representam um tipo mais recente de tecnologia, patenteada pela Petrobrás, é utilizada tanto em MODU's como em semissubmersíveis e FPSO's.

A estaca torpedo consiste em uma estrutura de aço tubular de ponta fechada com geometria cônica, preenchida com uma mistura de sucata de aço de várias dimensões e concreto, cujo objetivo é atingir a maior massa específica possível. Em geral, seu comprimento é cerca de 10 vezes o seu diâmetro, apresentando basicamente o comportamento de um corpo rígido. [2]



Figura 2.16- Estaca Torpedo [11]

O processo de instalação, Figura 2.17, é feito utilizando-se um rebocador para o transporte e lançamento da estaca e uma embarcação dotada de um ROV (Remote Operated Vehicle) para o acompanhamento e monitoramento do processo. [11] A âncora torpedo é conectada à embarcação através de uma linha de ancoragem. Esse cabo amarrado à estaca deve ter comprimento suficiente para alcançar toda a profundidade de cravação esperada, determinada através de simulações numéricas, somadas à altura da lâmina d'água do local de sua instalação. [12] A estaca torpedo é baixada até certa profundidade e, então, é solta em queda livre. Ao atingir o solo com velocidade suficiente ocorre a penetração da estaca torpedo no solo, finalizando o processo de instalação. [11]

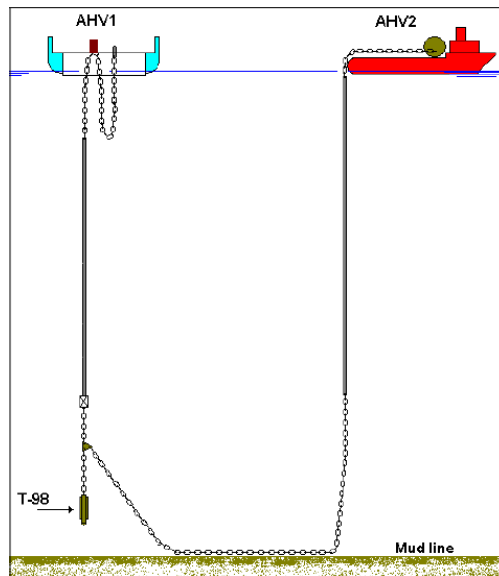


Figura 2.17- Processo de Instalação de uma Estaca Torpedo [12]

As estacas torpedos, assim como, as âncoras verticais permitem a aplicação de cargas em qualquer direção. A superfície lateral da estaca torpedo pode apresentar ainda aletas, o que aumenta o contato estaca-solo, com a finalidade de minimizar os problemas de baixa resistência lateral e axial, além de manter a sua verticalidade durante o lançamento.

2.3 Tipos de Ancoragem

A seguir serão apresentadas as principais configurações de ancoragem empregadas em unidades flutuantes. As ancoragens com boia e com peso são descritas no capítulo 5.

2.3.1 Ancoragem em Catenária

A ancoragem em catenária é a técnica convencional utilizada em operações de produção ou perfuração. Este sistema foi empregado na maioria das plataformas até uma profundidade em torno de 500 metros. [4] Quando as linhas de ancoragem se apresentam sob a configuração de catenária livre, elas transmitem ao sistema de fundação somente esforços horizontais, isto se deve ao fato de que o próprio atrito do trecho de linha encostado no fundo, fornece as forças de restauração responsáveis por absorver as solicitações do carregamento ambiental. Este tipo de ancoragem possui um raio de ancoragem bastante elevado, cerca de três vezes a lâmina d'água, o que acarreta em problemas com relação ao congestionamento de linhas em plataformas próximas e interfere diretamente no arranjo dos equipamentos submarinos. Com o aumento da profundidade na exploração e produção há a necessidade de guinchos mais potentes devido ao aumento do peso nas linhas, tornando a ancoragem em catenária inviável para lâmina d'água profunda.

As linhas ancoradas são presas ao fundo do mar por âncoras que resistem a carregamento horizontal, por exemplo, as âncoras convencionais.

2.3.2 Ancoragem *Taut-Leg*

Para contornar as desvantagens do sistema em catenária utiliza-se a ancoragem em *Taut-Leg*. Neste sistema, as linhas se encontram retesadas, formando um ângulo de topo de aproximadamente 40° a 45° com a vertical, tendo assim uma projeção horizontal menor, para uma mesma ordem de grandeza da lâmina d'água. Este tipo de ancoragem proporciona maior rigidez ao sistema, sendo o passeio da embarcação limitado a offsets menores (deslocamentos menores no plano horizontal). Neste caso, as âncoras a serem utilizadas precisam resistir a valores elevados de cargas verticais, sendo as mais utilizadas, as estacas torpedo, as âncoras de sucção e as âncoras de placa. A ancoragem *Taut-Leg* é geralmente utilizada em sistemas localizados em regiões de grandes profundidades. [6]

As linhas da ancoragem *Taut-Leg* são constituídas nas suas extremidades por cabos de aço ou amarras e no seu trecho intermediário por cabos de poliéster. A adoção

desse sistema implica em diminuição de custos com linhas de ancoragem, pois requer comprimentos menores, e podem ser instalados com maior facilidade em áreas congestionadas. [2]

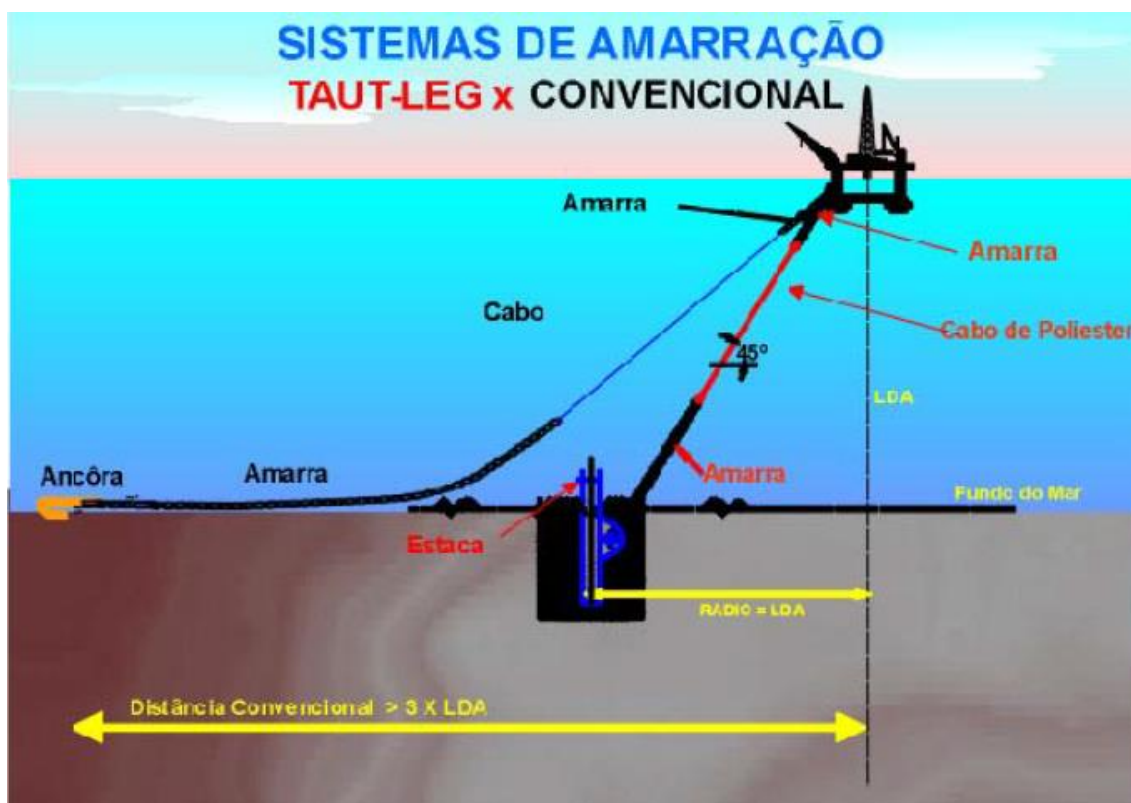


Figura 2.18- Configuração em Catenária x *Taut-Leg* [7]

2.3.3 Ancoragem Vertical

O tipo de ancoragem vertical é caracterizado pela disposição das linhas de ancoragem trabalhando como tendões verticais constantemente tracionados, em decorrência da parcela do empuxo proveniente da parte submersa da unidade flutuante. Os tendões conferem ao sistema uma rigidez elevada no plano vertical, enquanto a rigidez no plano horizontal é reduzida, 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 movimentos de *Surge*, *Sway* e *Yaw* sejam altos (da ordem de 100 segundos). [11]

A ancoragem vertical é essencialmente utilizada em plataformas do tipo TLP, podendo ser também empregada em ancoragens de boias e monoboias. [15]

A Figura 2.19 apresenta a referida ancoragem descrita, na qual se pode perceber uma de suas vantagens em possuir o arranjo de fundo do leito marinho mais “limpo”, evitando assim possíveis congestionamentos entre outros sistemas submarinos.

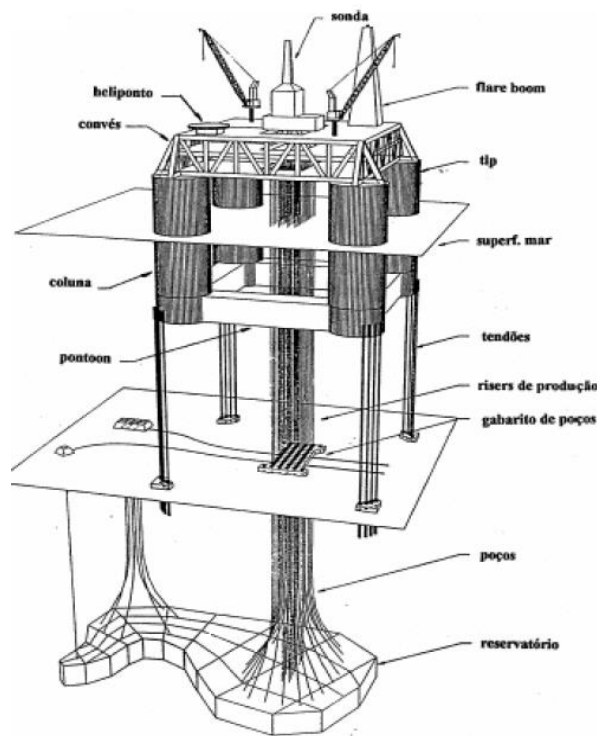


Figura 2.19- Ancoragem Vertical em uma TLP [17]

2.4 Sistemas de Ancoragem

Descritos os tipos de ancoragem, pode-se iniciar o estudo de sistemas de ancoragem utilizados em plataformas flutuantes.

Os sistemas de ancoragem podem ser classificados em três tipos:

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

2.4.1 Ancoragem em Ponto Único (SPM)

A ancoragem em ponto único (SPM) é caracterizada por concentrar todas as linhas em uma única posição na embarcação. Este sistema é utilizado principalmente em unidades FSO (*Floating Storage and Offloading Units*) ou em navios petroleiros convertidos em unidades FPSO (*Floating Production Storage and Offloading Units*). Este sistema de ancoragem permite que a embarcação gire livremente ao redor das linhas, alinhando-se com os carregamentos ambientais predominantes, reduzindo dessa forma os esforços atuantes no casco. [15]

Existem alguns tipos de ancoragem SPM, que serão apresentados nos itens subsequentes.

2.4.1.1 Ancoragem com Turret

Este tipo de sistema de ancoragem é definido pela ligação das linhas de ancoragem e *risers* a um equipamento chamado *turret*, podendo estar posicionado na proa, na popa (*turret* externo) ou internamente ao navio (*turret* interno), de modo que possibilite a rotação do mesmo em torno do seu eixo. Os *turrets* podem ser fixos ou desconectáveis a embarcação e ainda a estrutura da ligação das linhas pode estar posicionada acima ou abaixo do nível d'água. [11]

A Figura 2.20 apresenta exemplos de UF ancoradas com o sistema SPM, e a Figura 2.21 mostra o posicionamento do *turret* na embarcação.



Figura 2.20- Exemplos de *turret* interno e externo [10]

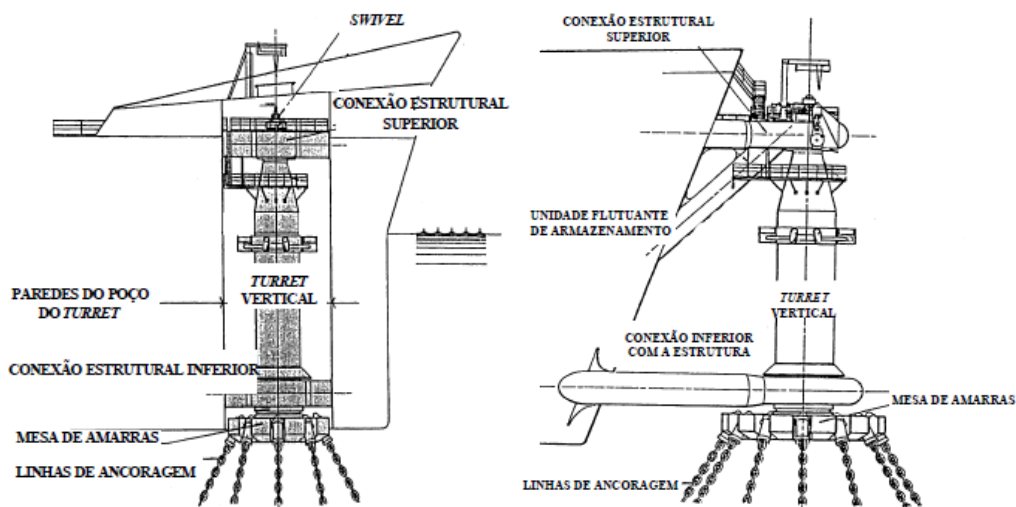


Figura 2.21- *Turret* interno e externo [15]

2.4.1.2 Sistema CALM (*Catenary Anchor Leg Mooring*)

O sistema CALM, Figura 2.22, baseia-se em uma boia de grandes dimensões que suportam determinado número de linhas de ancoragem em catenária e *risers* conectados na parte inferior da boia. A amarração entre a boia e o navio é feita através de um cabo de material sintético (*hawser*) ou de uma estrutura fixa. [15]

O sistema apresenta limitações quando sujeito a carregamentos ambientais severos, isto se deve ao fato da boia e a UF apresentar movimento relativo horizontal sob influência das ondas, em casos extremos é necessário desconectar a boia da embarcação. Outra forma de mitigar essa limitação é utilizar estruturas rígidas de acoplamento dotadas de articulações (*yoke*), com o intuito de eliminar o movimento vertical entre boia e a Unidade Flutuante.

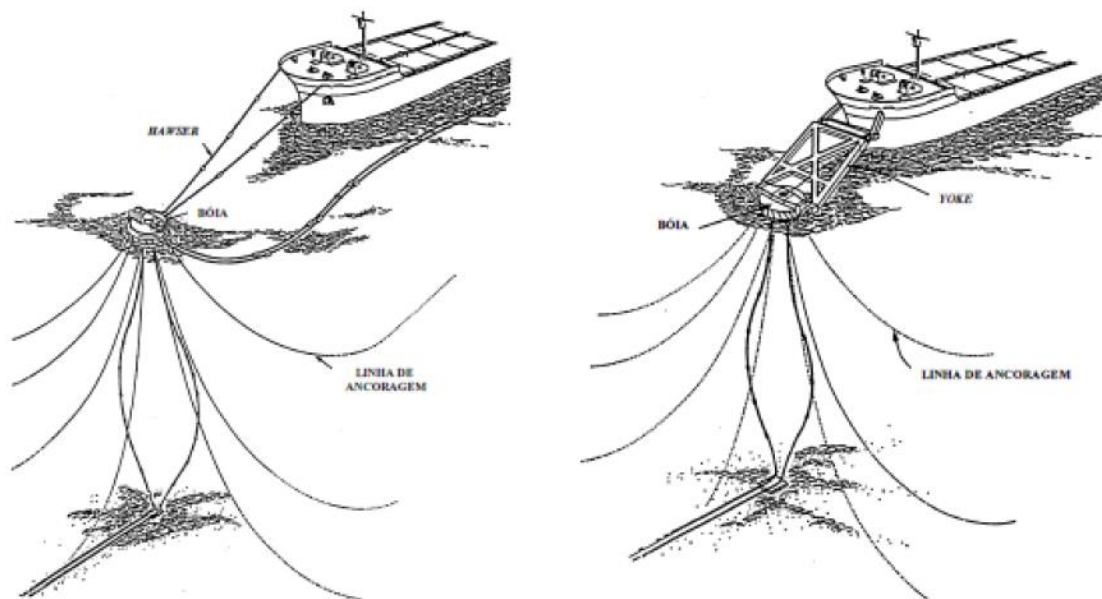


Figura 2.22- Ancoragem tipo CALM fixada com *Hawser* e com *Yoke* [15]

2.4.1.3 Sistema SALM (*Single Anchor Leg Mooring*)

O sistema SALM consiste em uma configuração com *riser* vertical que possui ampla capacidade de flutuação próxima à superfície ou, em alguns casos, é mantido por um *riser* pré-tracionado. O sistema é conectado à embarcação através da mesma forma que o sistema CALM, ou seja, é utilizado o *yoke*, como demonstrado na Figura 2.23. [14]

O mecanismo de funcionamento do sistema é similar ao de um pêndulo invertido. Quando o sistema se desloca lateralmente, a força restauradora resultante dos flutuadores tende a retificá-lo, colocando-o de volta na posição original. [11]

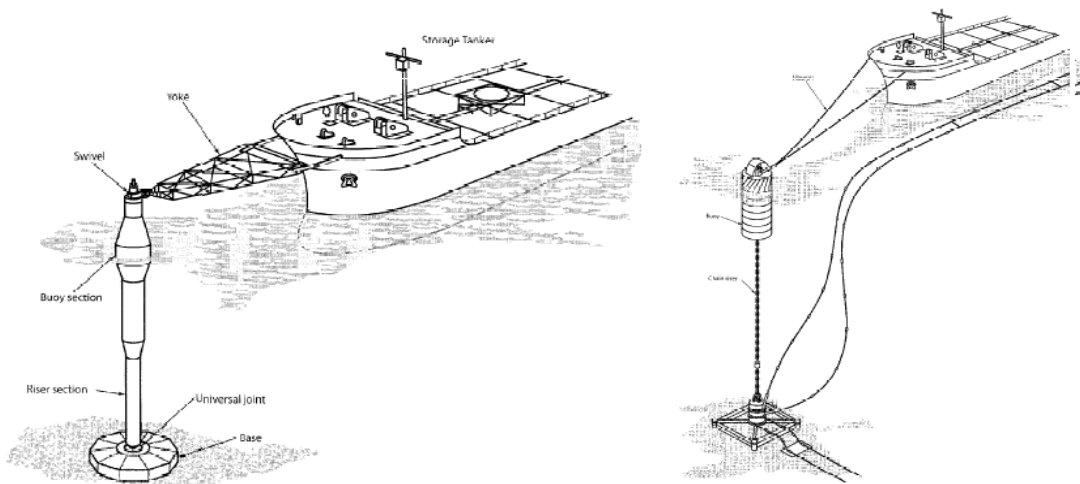


Figura 2.23- SALM com riser pré-tracionado e com flutuação através de boia [11]

2.4.2 Amarração com Quadro de Ancoragem (SM)

A Amarração com Quadro de Ancoragem foi o sistema de ancoragem pioneiro utilizado em plataformas flutuantes, sendo que atualmente ainda é o mais utilizado. Na ancoragem SM as linhas estão distribuídas ao redor da embarcação, fornecendo a UF capacidade para resistir aos carregamentos ambientais vindos de qualquer direção. Este tipo de ancoragem não permite o alinhamento da plataforma com a direção de incidência dos carregamentos ambientais, sendo importante o aproamento da UF com o carregamento mais severo, de modo a otimizar o sistema de ancoragem. [2]

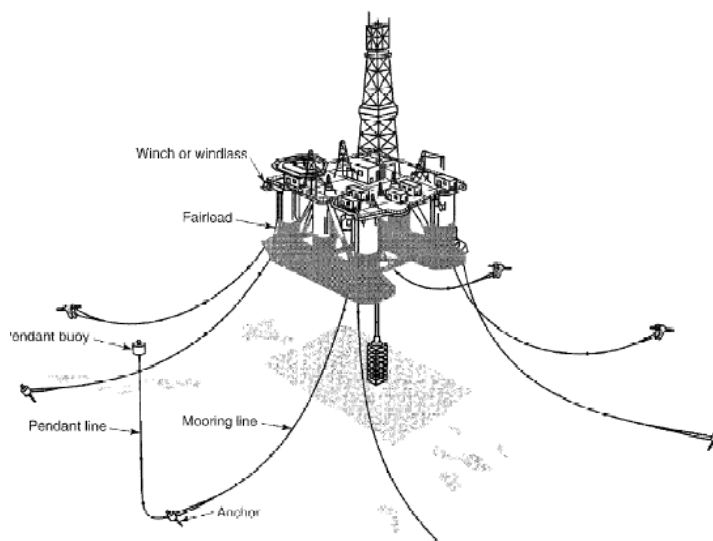


Figura 2.24- Amarração com Quadro de Ancoragem (*Spread Mooring*) [3]

2.4.2.1 Sistema Dicas

Uma nova concepção de sistema de ancoragem SM foi desenvolvida pela Petrobrás com o intuito de permitir um alinhamento parcial da embarcação com a pior direção de incidência do carregamento ambiental, esse sistema foi denominado DICAS (*Differentiated Compliance Anchoring System*).

O sistema DICAS, Figura 2.25, consiste em um conjunto de linhas de ancoragem com conexão na proa e na popa da embarcação. A locação das linhas permite a existência de diferentes níveis de rigidez entre a popa e a proa do navio, esta diferença de rigidezes é obtida através da variação dos níveis de pré-tração das linhas, permitindo ao navio um aproamento adequado às características ambientais dentro de um limite angular de 5 a 7 graus, resultando em um melhor posicionamento do navio em relação às condições ambientais mais frequentes [1]

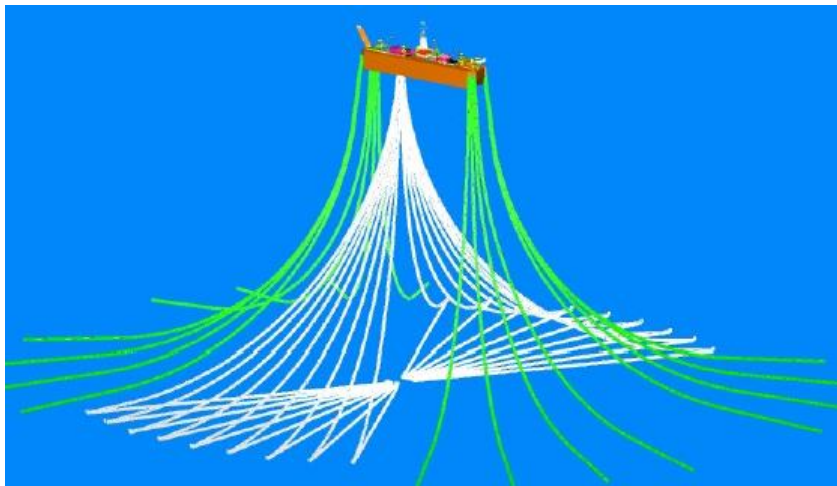


Figura 2.25- Vista 3D do sistema DICAS [15]

2.4.3 Posicionamento Dinâmico (DP – *Dynamic Position*)

O sistema DP, Figura 2.26, é bastante utilizado em UF's que permanecem ancoradas temporariamente, em atividade de perfuração, completação e intervenção de poços. Esse tipo de ancoragem mantém a UF em posição através de um sistema de controle composto de sonares e GPS, além de um circuito de propulsores (*thrusters*), que são responsáveis por gerar impulsão no sentido longitudinal e transversal do navio. Em essência, o sistema DP pode ser considerado como um controle em *loop* fechado com realimentação. Em operação, uma posição de referência é selecionada e constitui a entrada do sistema de controle, (é como se fosse a origem de um sistema de coordenadas cartesianas). Esta entrada é comparada instantaneamente com a posição da sonda, havendo diferença entre ambas, um sinal de erro é gerado. O sinal de erro é processado gerando a informação necessária ao controlador que move a plataforma no

sentido de corrigir esse erro, retornando a posição de entrada. Em condições de operação, a posição da unidade flutuante nunca será estável, sendo assim, a plataforma moverá constantemente em torno de um ponto de referência [16].



Figura 2.26- Sistema DP [11]

3 Carregamentos Ambientais

3.1 Introdução

Este capítulo apresenta alguns conceitos importantes para determinação dos carregamentos ambientais (onda, corrente e vento) em sistemas *offshore*. A maior parte das forças externas que atuam em tais sistemas são provenientes de condições ambientais que podem ser descritas por variáveis físicas de natureza estatística.

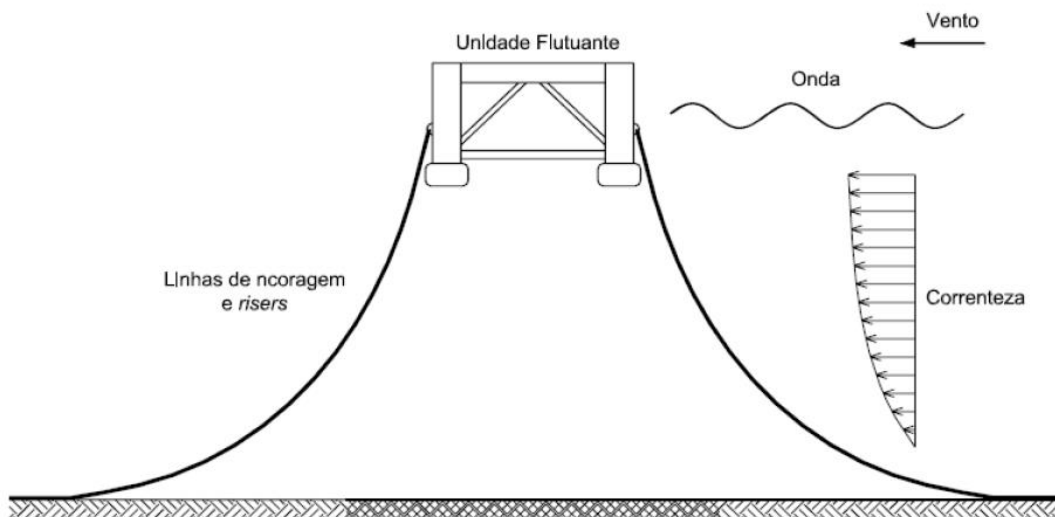


Figura 3.1- Carregamento Ambientais atuantes em uma UF [18]

3.2 Corrente

As forças de corrente marítima são consideradas estáticas e aplicadas por meio de perfis poligonais de velocidades medidas desde o fundo do mar até a superfície, aplicando cargas tanto nas linhas quanto na UF. Em geral, adota-se uma tabela com a velocidade da corrente, com suas respectivas direções de incidência em função da profundidade, de acordo com a locação. A corrente também pode variar e o valor de sua aceleração pode ser negligenciado no cálculo dos esforços devidos à sua ação, entretanto em estruturas esbeltas ela pode provocar fenômenos dinâmicos, como por exemplo, as vibrações induzidas por vórtices (VIV). [19]

Na maioria dos projetos, os carregamentos de corrente podem ser calculados pela Formulação de *Morison*, utilizando a componente da força de arrasto para as linhas, já as cargas totais impostas a UF são consideradas pela soma vetorial de cada componente individual de onda, vento e corrente. No entanto, em alguns casos mais complexos, a interação física entre estes componentes não pode ser desprezada,

principalmente quando se tem velocidades de corrente elevadas. Em CHAKRABARTI [19] encontra-se disponível a descrições de métodos para avaliação da interação física entre onda e corrente.

3.3 Representação do Estado de Mar

Cada onda do mar pode ser descrita por sua altura, comprimento e velocidade de propagação. Um estado de mar incorporando ondas pode supô-las uma infinidade de ondas iguais, que fundamentam os modelos chamados de determinísticos (mar regular), ou por uma combinação de várias ondas aparentemente aleatórias, mas que possuem propriedades estatísticas como média e desvio padrão, e físicas, como energia transportada, que caracterizam o chamado mar irregular, usados na análise aleatória. [20]

Como descrito, o estado de mar regular é definido pelo comprimento de onda L , a altura de onda H (definido pela distância vertical entre crista e cavado), o período entre cristas T ; a profundidade d ; o nível médio MWL e a elevação da superfície η , conforme *Figura 3.2*.

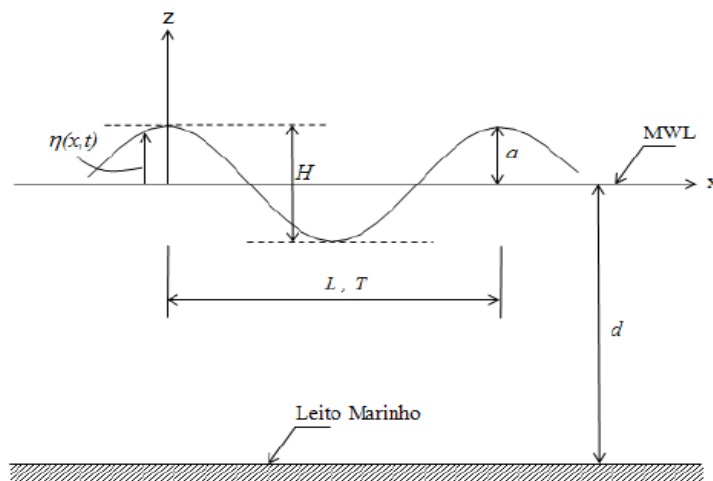


Figura 3.2- Representação de uma Onda Regular [20]

Embora ondas regulares não existam na prática, elas são comumente utilizadas para estimar a resposta das estruturas *offshore* a carregamentos extremos, além disso, o estudo de ondas regulares é um importante ponto de partida para o entendimento das ondas irregulares, sendo usual a simulação de mares irregulares através da superposição de várias ondas regulares com diferentes períodos, amplitudes e fases, mas que em conjunto possuem uma média, desvio padrão e outras propriedades estatísticas. [21]

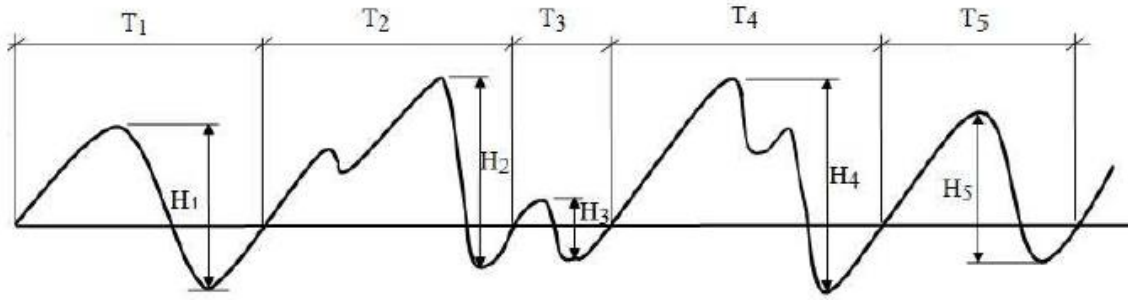


Figura 3.3- Representação de uma Onda Irregular [20]

Na Figura 3.3, os valores $T_1, T_2... T_5$ são referentes a períodos de cruzamento zero ascendente de ondas individuais, e $H_1, H_2... H_5$ são as respectivas alturas de onda. Os períodos de onda são definidos como sendo o período decorrido entre sucessivos cruzamentos do nível médio do mar. Da mesma forma, as alturas de onda individuais são definidas como sendo a diferença entre as elevações máximas e mínimas para um dado período de cruzamento. [20]

Devido à natureza aleatória das ondas, é complexo prever o seu comportamento e efeito sobre estruturas *offshore*. Para tal, foi formulado um modelo matemático que representa o comportamento das ondas no mar, que pode ser encontrado em CHAKRABARTI [19] e ELLWANGER[18], e é esquematizado na *Figura 3.4*.

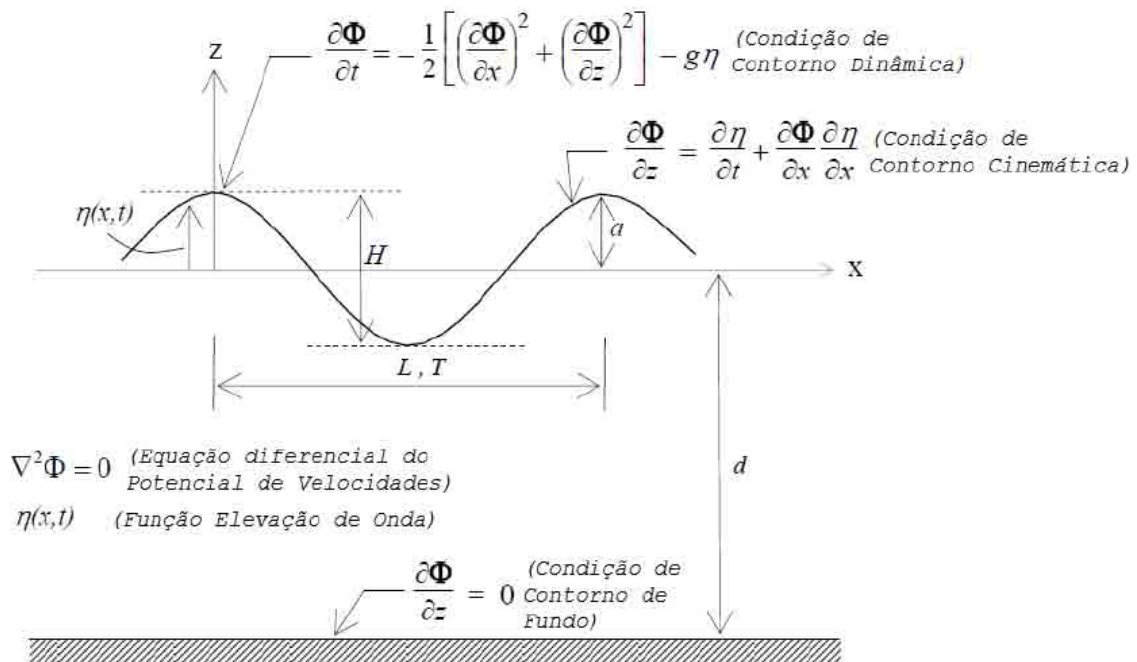


Figura 3.4- Modelo Matemático de Representação das Ondas do Mar[18]

Para solucionar o modelo matemático do comportamento das ondas do mar são empregadas as teorias de onda, que são responsáveis pelo desenvolvimento de uma solução aproximada para o modelo matemático e determinam o deslocamento, velocidade e aceleração das partículas de onda.

As teorias de onda mais utilizadas em projetos *offshore* são:

- Teoria Linear de *Airy*, teoria de primeira ordem, está baseada na premissa de que a altura de onda é pequena comparada com a profundidade;
- Teoria de Stokes, teorias não-lineares de segunda, terceira ou quinta ordem.

As teorias de onda citadas podem ser encontradas com mais detalhes em CHAKRABARTI [19].

3.3.1 Representação Espectral

Uma representação aproximada à realidade das ondas do mar é descrita por um modelo espectral, que representa a distribuição de energia de onda discretizada numa faixa de frequências.

Uma descrição do espectro de mar pode ser feita depois de um trabalho de monitoração meteoceanográfica e ajuste de parâmetros, que particularizam expressões analíticas gerais. Pode-se citar como tais parâmetros, os fatores de forma espectral, a altura significativa de onda e o período de pico. Na estatística de curto prazo, estes são supostos constantes, caracterizando um estado de mar [22].

As formulações para espectro de mar usualmente adotadas no Brasil são os espectros de *Pierson-Moskowitz* e de *Jonswap*. A definição desses espectros é descrita a seguir:

O espectro de *Pierson-Moskowitz* é dado pela seguinte equação:

$$S(w) = \frac{H_s^2}{4} \left(\frac{2\pi}{T_z} \right) w^{-5} \exp \left(- \left(\frac{2\pi}{T_z} \right) w^{-4} \right) \quad 3-1$$

onde: $S(w)$ – função densidade espectral;

w – frequência angular (circular) da onda;

H_s – altura de onda significativa;

T_z – Período;

O espectro de *Jonswap* é representado abaixo:

$$S(w) = \alpha \frac{g^2}{2\pi^4 w^5} \exp\left(-1,25 \left(\frac{w}{w_p}\right)^{-4}\right) \gamma \exp\left(-\frac{(w-w_p)^2}{2\sigma^2 w_p^2}\right) \quad 3-2$$

Esta expressão fornece a partir de um valor de frequência w (em Hz), a densidade de energia correspondente $S(w)$. Os parâmetros variáveis do espectro são a frequência de pico w_p (em Hz) e os parâmetros de forma α e γ (este último conhecido como o “parâmetro de pico”). O parâmetro de forma σ é fixo, sendo determinado em função da relação entre a frequência w e a frequência de pico w_p . [22]

3.3.2 Cálculo das Forças Geradas pelas Ondas

Mediante a solução do modelo matemático das ondas através de uma teoria de onda, obtêm-se velocidades, acelerações e pressões das partículas do fluido, mas sem considerar a presença de um corpo. Para calcular as forças geradas pelas ondas que atuam no casco da plataforma e nas linhas de ancoragem e *risers* foram desenvolvidas formulações, que são verificadas e calibradas por modelos experimentais e também por meio de monitoração de plataformas em operação.

As formulações adequadas para representar as forças devidas à movimentação do fluido sobre sistemas *offshore* são apresentadas na sequência, e podem ser encontradas com mais detalhes em [19].

3.3.2.1 Formulação de Morison

A fórmula de *Morison* é baseada no conceito que a força exercida pelo fluido é composta por uma parcela de arrasto e uma parcela inercial. Tais componentes são dadas por coeficientes empíricos, com o coeficiente de arrasto associado a efeito viscosos, proporcional à velocidade do fluido e do corpo, e o coeficiente de inércia, proporcional às acelerações do fluido e do corpo. Geralmente, considera-se que a fórmula de *Morison* é mais aplicável quando a força de arraste é significativa, e os efeitos viscosos preponderam sobre os inerciais, como é usualmente o caso de corpos esbeltos. [17]

Um critério usualmente empregado para definir um corpo esbelto em sistemas *offshore* consiste em verificar se a seguinte relação é atendida:

$$\frac{D}{L} < 5$$

onde: D é a dimensão transversal característica do corpo;
L é o comprimento de onda.

Para um escoamento retilíneo acelerado de um fluido real, a força total atuante é dada pela equação de *Morison*:

$$F_0(x, t) = F_a + F_i \quad 3-3$$

onde: F_0 = Força de onda;

F_a = Força de arrasto;

F_i = Força de inércia.

A força de arrasto é dada por:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_w D C_d |\dot{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{x}}| (\dot{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{x}}) \quad 3-4$$

A força de inércia é dada por:

$$F_i = \rho_w \frac{\pi D^2}{4} (C_m \ddot{\mathbf{u}} - C_a \ddot{\mathbf{x}}) \quad 3-5$$

O termo ρ_w representa a massa específica do fluido, D é o diâmetro, e $\dot{\mathbf{u}}$, $\dot{\mathbf{x}}$, $\ddot{\mathbf{u}}$, $\ddot{\mathbf{x}}$ são, respectivamente, as velocidades e acelerações do fluido e do corpo, C_d coeficiente de arraste (*drag*); C_m coeficiente de massa (ou inércia); e C_a coeficiente de massa adicionada (usualmente definido como $C_m - 1$). [1]

3.3.2.2 Formulação de Froude-Krylov

De acordo com Chakrabarti [19], para estruturas onde as forças inerciais são preponderantes sobre as forças viscosas e a estrutura não altera significativamente o fluxo de partículas fluídas, a formulação de *Froude-Krylov* pode ser aplicada. Nesta formulação a força atuante no corpo é proveniente da pressão gerada pela passagem da onda incidente sobre a superfície do corpo. A força total na estrutura numa determinada direção é obtida pela integração do componente de pressão naquela direção da parte submersa do corpo.

Em Chakrabarti [19] são mostradas expressões para calcular os componentes de força de onda pela formulação de *Froude-Krylov* para várias configurações de membros, por exemplo, para cilindro horizontal e vertical.

3.3.2.3 Teoria da Difração-Radiação

Para estruturas de grandes dimensões parcialmente submersas, como por exemplo, os navios FPSO's, deve-se considerar a presença do corpo e os efeitos que acarretam a alteração na passagem da onda, tais como, a difração e a radiação. Para o cálculo das forças induzidas pela movimentação das partículas do fluido devida às ondas considerando os efeitos de difração e radiação, desenvolve-se um modelo matemático tridimensional baseado na Teoria Potencial, compondo um modelo matemático (PVC), com a equação de Laplace tridimensional e as condições de contorno associadas, considerando a presença do corpo. [19]

O cálculo das forças de onda por este método é mais complexo e, atualmente, é obtido pela utilização de programas numéricos baseados na Teoria da Difração-Radiação, como é o caso do WAMIT. [10]

Com o modelo de Difração podem ser calculadas as cargas de primeira e segunda ordem que resultam da movimentação do fluido induzida pelas ondas, assim como o amortecimento do sistema flutuante. [1]

Segundo CHAKRABARTI [19] as forças de primeira ordem são obtidas através da aplicação da teoria potencial linearizada, atuam na mesma faixa de frequência da onda (*wave frequency*) e é linearmente proporcional à amplitude de onda. Programas que resolvem o modelo de Difração-Radiação como o WAMIT, calculam os movimentos na frequência da onda gerados pelas forças de primeira ordem e fornecem funções de transferência denominadas de RAO (*Response Amplitude Operator*). Estas funções apresentam, para diferentes frequências e direções de incidência das ondas, a resposta da embarcação sob a ação de uma onda de altura unitária para cada um de seus seis graus de liberdade.

Em soluções de segunda ordem são observadas parcelas de carga atuando em diferentes faixas de frequência, são elas: deriva média, deriva lenta e *springing*.

A força de deriva média consiste numa parcela estática obtida numericamente a partir de coeficientes conhecidos como Funções de Transferência Quadrática (*Quadratic Transfer Functions - QTF*). Sua magnitude é dependente da frequência e proporcional ao quadrado da amplitude da onda.

Em estados de mar irregulares, com espectro representado por uma superposição de vários componentes de ondas lineares, além das cargas de deriva média resultantes da ação de cada um dos componentes de onda, surgem outras cargas que variam no tempo oscilando em diferentes frequências. As forças que atuam em frequências mais baixas, correspondentes à diferença das frequências das ondas que representam o espectro, são denominadas de forças de “deriva lenta” (*slowdrift*). Já as frequências mais altas, correspondentes à soma das frequências das ondas, podem excitar movimentos usualmente referidos como de “*springing*” ou “*ringing*”, como no caso de plataformas flutuantes ancoradas com alta rigidez vertical (como *TLPs*). [19]

3.3.2.4 Modelo Híbrido para Cálculo das Forças na Embarcação

Existem sistemas *offshore*, tais como plataformas semissubmersíveis, *TLPs* e *Spars*, em que o casco é composto por membros estruturais de vários tamanhos, por exemplo, membros reticulados e membros flutuantes (*pontoons*). Para analisar tais sistemas em programas computacionais é conveniente combinar as formulações de cálculo de forças induzidas pela incidência de ondas, e assim, além de considerar as características positivas de cada formulação, utilizar a mais adequada dependendo das dimensões de cada membro do casco. [1]

De maneira geral o modelo híbrido faz uso das vantagens de cada formulação da seguinte forma:

- Formulação de *Morison*. Forças de primeira ordem, particularmente as forças viscosas de arraste.
- Formulação de *Froude-Krylov*. Força definida a partir da pressão p gerada pela passagem da onda, considerando que a presença do corpo não afeta o fluxo, ou seja, este é o termo da força de inércia que depende apenas da aceleração da partícula.
- Teoria da Difração. Modelo associado à Teoria Potencial, utilizando a equação de Laplace tridimensional e considerando a presença do corpo, para o cálculo de forças de segunda ordem.

3.4 Vento

As cargas de vento são de natureza aleatória e atuam sobre a área exposta do casco e do convés da UF. Assim como as cargas provenientes das ondas, os efeitos dinâmicos decorrentes do vento são importantes e um espectro adequado deve ser utilizado. A norma API RP 2SK [3] sugere um espectro de vento apropriado para projetos onde são consideradas as cargas de vento.

As cargas de vento geram duas parcelas de resposta:

- Parcela estática: constante ao longo do tempo gera carregamentos estáticos e é calculada com base na velocidade média de um minuto;
- Parcela dinâmica: também denominada efeito de rajada, diz a respeito à componente variável do vento ao longo do tempo, somada a parcela estática gera movimentos de baixa frequência. É calculada a partir da velocidade média de uma hora, mais uma componente variando no tempo.

No projeto de estruturas *offshore* deve-se avaliar se as cargas dinâmicas do vento contêm energia com frequências próximas as frequências naturais da plataforma (baixas frequências e períodos longos). [10]

O cálculo dos esforços gerados na estrutura segue as recomendações da API RP 2A [23] e é dado pela equação 3.4, sendo necessário o uso de um coeficiente adimensional de força (força/velocidade²) em determinadas direções de incidência do vento. Este coeficiente é calibrado a partir de ensaios em túneis de vento.

$$F_{vento} = \frac{1}{2} \rho C_D A U_w^2 \quad 3-6$$

Onde ρ é a densidade do fluido (neste caso do vento); A é a área exposta normal ao fluxo do vento; U_w é a velocidade média do vento (a 10m de altura); e C_D é um coeficiente de arraste que depende da configuração do corpo exposto.

4 Projeto de Sistemas de Ancoragem

4.1 Introdução

O sistema de ancoragem é o responsável por manter a UF posicionada dentro dos limites operacionais, de tal forma que, não afete a exploração e a produção de campos de petróleo. Um projeto adequado deve tornar o sistema de ancoragem suficientemente complacente para evitar forças excessivas na plataforma, além de rígido o bastante, com o intuito de não permitir passeios muito grandes, que podem causar danos aos equipamentos de fundo e *risers*.

Projetos de sistemas de ancoragem podem utilizar diferentes estratégias de análise, que se diferem tanto pela formulação utilizada, quanto pela sua metodologia e ter diferentes graus de integração com o projeto de *risers*.

Neste capítulo serão abordadas as combinações de carregamento, as condições e os critérios de projeto, segundo a norma API RP 2SK [3] e API RP 2SM [25], além de apresentar uma concepção de projeto integrando as disciplinas de ancoragem e *riser* descrita em GIRÓN [1].

Apesar do uso da metodologia de projeto integrado aperfeiçoar o projeto do sistema de ancoragem e *risers*, nesta dissertação ainda foi utilizada a metodologia e critérios de projeto propostos na norma API RP 2SK [3].

4.2 Combinações de Carregamento Utilizadas em Projeto

Na análise de uma estrutura *offshore*, de forma geral, os carregamentos dinâmicos envolvidos são provenientes de ações ambientais como ondas, correntes marítimas e vento. Tais carregamentos são de natureza cíclica e randômica, e por esta razão, devem ser avaliados através de estudos estatísticos. As normas API RP 2 SK [3] e DNV OS E301 [24] recomendam que as combinações de carregamento atuantes em um sistema *offshore* sejam baseadas num período de retorno de 100 anos.

A condição máxima de projeto é definida como uma combinação de vento, onda e corrente para a qual o sistema de ancoragem é projetado. É a condição extrema que o sistema deve suportar os carregamentos ambientais sem danos.

De acordo com as normas API RP 2 SK [3] e DNV OS E301 [24] para cada conjunto de combinações, uma dessas ações ambientais deve ser considerada dominante (período de retorno centenário), sendo as demais tratadas por suas respectivas condições moderadas (períodos de retorno decenários ou anuais).

Geralmente em projetos de sistemas de ancoragem são adotadas as seguintes combinações extremas:

- Carregamentos de onda e vento com períodos de retorno de 100 anos e corrente com período de retorno de 10 anos;
- Carregamentos de onda e vento com períodos de retorno de 10 anos e corrente com período de retorno de 100 anos.

4.3 Condições de Projeto

As normas API RP 2SK [3] e DNV OS-E301 [24] estabelecem as condições de projeto que devem se desenvolver as análises para o dimensionamento do sistema de ancoragem. São estas:

4.3.1 Condição Intacta

É a condição em que todas as linhas são consideradas intactas, e a posição de equilíbrio da embarcação sob cargas permanentes é baseada no conhecimento do comportamento carga-passeio do sistema de ancoragem.

4.3.2 Condição de Avaria

Nesta situação considera-se que houve o rompimento da linha de ancoragem mais tracionada ou a falha de um *thruster*, fazendo com que a embarcação busque uma nova posição de equilíbrio. Nessa condição o sistema deve conter uma reserva suficiente para suportar esta situação, ou seja, a nova posição de equilíbrio não deve provocar danos em equipamentos submarinos e *risers*. Atualmente já se avalia também a situação com o rompimento da segunda linha de ancoragem mais tracionada, nesse caso, a linha de ancoragem mais tracionada não deve exceder o valor estabelecido nos critérios de projeto.

4.3.3 Condição Transiente

Nesta condição a plataforma é analisada sendo submetida a movimentos transientes causados pelo rompimento da linha mais tracionada ou falhar de um *thruster*.

[3]

4.4 Critérios de Projeto

Nesta seção são definidos os critérios de projeto estabelecidos nas normas API RP 2SK [3] e API RP 2SM [25], para determinar o máximo passeio permitido e as trações nas linhas de ancoragem, aplicados para as condições intacta e de avaria.

O passeio é a distância horizontal que a unidade percorre desde a sua posição de projeto até a posição de equilíbrio sob o carregamento ambiental. Este passeio é normalmente medido como um percentual da lâmina d'água.

Quanto mais rígido for o sistema de ancoragem menor será o passeio. No entanto, o tipo de material utilizado nas linhas de ancoragem determinará o limite superior para a rigidez do sistema, pois aumentar a rigidez implica em aumentar as trações aplicadas às linhas, aumentando conseqüentemente as tensões internas. Estas tensões devem permanecer dentro de um intervalo de segurança.

Como a proposta do uso de um sistema *Taut-Leg* com boia e com peso, foco desta dissertação, em LDA profunda é recente, não existem normas que dizem respeito ao posicionamento da boia e do peso, respectivamente. Na seção 5.3.1 será apresentada uma proposta de um critério de projeto adicional para o posicionamento da boia que leva em consideração a identificação de linha rompida. Quanto ao posicionamento do peso, será discutido na seção 5.4.1.

4.4.1 Máximo Passeio Permitido

A limitação dos passeios máximos é necessária para prevenir danos aos *risers* de perfuração e produção e os equipamentos submarinos, além de garantir que a unidade flutuante não colida com outras plataformas ou estruturas próximas. Para estes casos, uma margem de segurança de passeio máximo 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 passeio admissível máximo, normalmente dado como percentual da lâmina d'água, para que o sistema flutuante atue sem influenciar na operação destes *risers*. [10]

Os procedimentos para a determinação do máximo passeio obtido (*offset* máximo) dependem do método utilizado para simular a dinâmica da UF. No caso utilizado neste trabalho é feito uma abordagem no domínio do tempo para simular o

comportamento dinâmico da plataforma, neste caso a determinação do máximo passeio obtido é realizado através de um processamento estatístico da série temporal de movimentos obtidos nas simulações.

A *Figura 4.1* apresenta uma estimativa média de offsets admissíveis em porcentagens de lâmina d'água, para que seja garantido que a operação dos *risers* de perfuração e produção ocorra sem interrupções. [3]

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%

Figura 4.1- Estimativa de passeio admissíveis para operação com Risers [3]

4.4.2 Máxima Tração nas Linhas de Ancoragem

A limitação da tração máxima em linhas de ancoragem é expressa como um percentual da resistência nominal em cada linha, chamado de MBL (*Minimum Breaking Load*). No caso das amarras, o MBL pode ser considerado igual à carga de rompimento de teste BTL (*Breaking Test Load*). [3]

As máximas trações admissíveis e os equivalentes fatores de segurança para as condições de projeto são apresentados na *Figura 4.2*.

	Analysis Method	Tension Limit (Percent of MBS)	Equivalent Factor of Safety
Intact	Quasi-static	50	2.0
Intact	Dynamic	60	1.67
Damaged	Quasi-static	70	1.43
Damaged	Dynamic	80	1.25

Figura 4.2- Trações admissíveis e fatores de segurança [3]

A determinação da máxima tração nas linhas de ancoragem é análoga à determinação do máximo passeio permitido, ou seja, o cálculo da tração máxima na linha é realizado através do processamento estatístico da série temporal completa de tração.

4.4.3 Tração Mínima nas Linhas de Ancoragem

Segundo a norma API RP 2SM [23] as trações mínimas estão limitadas a 5% do MBL em cabos de poliéster e 10% do MBL em materiais sintéticos com módulo de elasticidade mais elevado. Esta limitação é um critério de segurança que visa evitar falhas do sistema de ancoragem por fadiga ou compressão nas linhas.

4.5 Projeto Integrado de Linhas de Ancoragem e *Risers*

4.5.1 Introdução

Com o incremento da lâmina d'água e o número de *risers* nas unidades flutuantes desenvolveu-se uma nova metodologia na análise de sistemas de ancoragem considerando a integração entre os projetos de *riser* e de ancoragem. Nos tópicos a seguir serão discutidas as ferramentas necessárias para promover uma metodologia integrada de projeto [1].

4.5.2 Zona de Segurança Operacional (SAFOP)

De acordo com SENRA [22] a Zona de Segurança Operacional (ZOR) ou SAFOP (*Safe Operational Zone*), consiste na envoltória dos passeios máximos horizontais dentro do qual o topo do *riser* deve permanecer para evitar violar um de seus critérios de projeto. O SAFOP pode ser visto como uma ferramenta importante no projeto de ancoragem, sendo tratado como um critério adicional para o seu dimensionamento, visto que, ele permite a verificação do sistema de ancoragem definindo uma configuração que melhor atenda os objetivos de projeto e mantenha os *risers* dentro de uma zona segura operacional segura.

O procedimento para gerar o SAFOP consiste em realizar análises estáticas e dinâmicas de um conjunto de *risers*, onde são aplicados incrementalmente deslocamentos no topo e um perfil de correnteza. As análises são realizadas aplicando os movimentos prescritos devido à ação da onda no casco e a onda diretamente sobre o *riser*. A análise é interrompida quando o algum critério de projeto do *riser* é violado. Este procedimento é repetido para várias direções de offset e carregamento ambiental, por exemplo, de 30° em 30°.

O procedimento de geração destes diagramas pode ser encontrado com mais detalhes em [1] e [10].

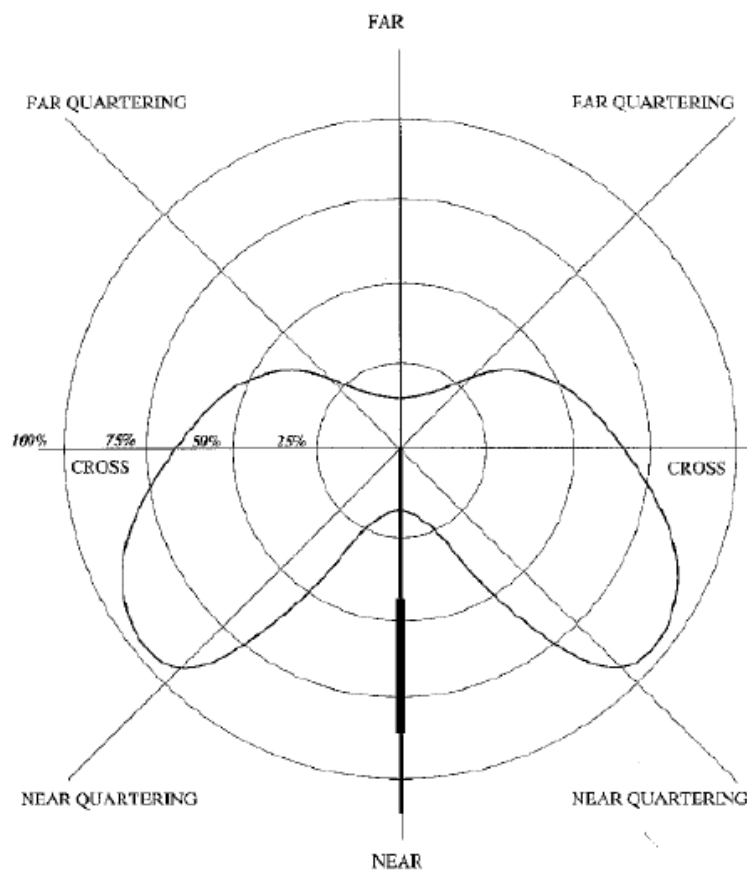


Figura 4.3- Representação do diagrama SAFOP de um riser [10]

4.5.3 Diagrama de *Ofsset*

Diagrama de *offsets* é a envoltória das médias dos passeios máximos estatísticos de uma unidade flutuante decorrente da solicitação dos carregamentos ambientais definidos em projeto para várias direções de incidência. Os diagramas caracterizam o grau de complacência do sistema de ancoragem da embarcação e são realizados a partir de análises acopladas, considerando a interação do sistema flutuante, linhas de ancoragem, *risers* e solo. [1]

A construção de diagrama de *offsets* é realizada através de uma análise dinâmica não-linear de um modelo acoplado para cada combinação de carregamento, obtendo assim a média dos passeios máximos estatísticos da UF em cada direção considerada e as trações nas linhas de ancoragem, que são comparadas com os limites estabelecidos em norma (conforme descrito na seção 4.4.2).

De acordo com a norma API RP 2SK [3], os diagramas de *offset* podem ser obtidos para duas condições: Sistema Intacto e Sistema Avariado. Para cada uma dessas condições são gerados dois diagramas: o primeiro é resultante da atuação dos carregamentos ambientais extremos e o segundo é baseado na ação dos carregamentos ambientais moderados ou de operação.

4.5.4 Cruzamento de Diagramas de Offset e SAFOP

Em GIRÓN [1] foi proposta uma metodologia onde é realizado o cruzamento dos diagramas de offsets com o SAFOP, como um critério adicional ao projeto de sistemas de ancoragem, *Figura 4.4*. Esta metodologia possibilitaria a otimização do sistema de ancoragem mantendo a integridade do sistema de *risers*. As pré-trações de linhas poderiam ser reduzidas, dando menor rigidez ao sistema e maior complacência no passeio da UF, além de aumentar o número de configurações possíveis do projeto de ancoragem, já que seria desnecessário optar por uma configuração simétrica.

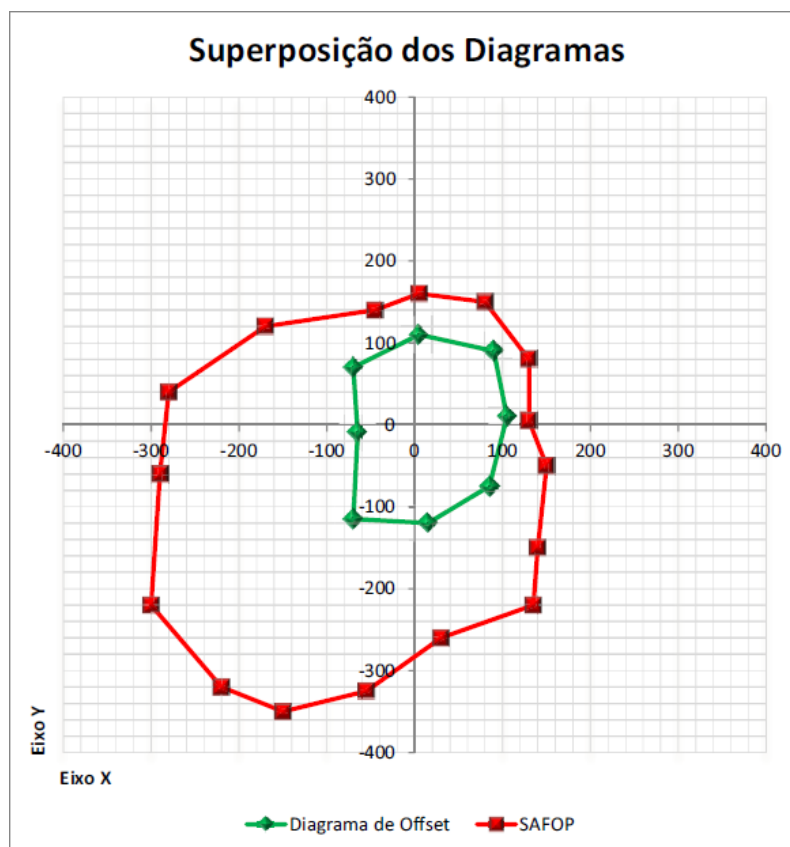


Figura 4.4- Superposição do Diagrama de Offset com o SAFOP [10]

Além de identificar facilmente uma possível falha nos *risers*, o cruzamento de diagramas permite que, dentro do projeto do sistema de ancoragem, sejam executados

ciclos de verificação de diferentes propostas de configurações do sistema e pré-trações nas linhas. Estes ciclos de verificação irão conduzir ao projetista à configuração que melhor atende aos objetivos do projeto. [1]

5 Sistemas de Ancoragem Estudados

5.1 Introdução

Conforme mencionado no capítulo 1, o objetivo deste trabalho é comparar três diferentes tipos de ancoragem, a ancoragem *Taut-Leg* tradicional, a ancoragem *Taut-Leg* com boia e a ancoragem *Taut-Leg* com peso.

Neste capítulo será descrita a modelagem destes três tipos de ancoragem e os principais parâmetros do sistema flutuante utilizado nesta dissertação.

O sistema de ancoragem utilizado nos três modelos apresenta amarração em quadro de ancoragem (*Spread Mooring*), composta por 24 linhas de ancoragem com uma diferença de 2° de abertura de linha.

Cabe observar que para atingir esta configuração com um ângulo de abertura de 2°, foram realizados estudos preliminares – que não serão apresentados nesta dissertação – com o intuito de otimizar tanto as configurações utilizadas quanto a seleção dos materiais que compõe o sistema de ancoragem. Nestes estudos, inicialmente os modelos contavam com 20 linhas de ancoragem e materiais mais robustos, além de uma abertura entre uma linha e outra de 5°. No entanto, este tipo de sistema não atendia aos critérios de projeto e, portanto, foi aprimorado até atingir a configuração apresentada neste trabalho.

O sistema de produção apresenta 20 *risers* idênticos dispostos em catenária livre, posicionado a boreste da unidade flutuante.

Os estudos apresentados nas próximas seções estão baseados em uma unidade estacionária de produção ancorada em uma lâmina d'água de 2000m e com aproamento de 45° em relação ao norte. Este aproamento foi escolhido de forma a alinhar a embarcação com a direção onde atuam os carregamentos ambientais de maior intensidade.

A *Figura 5.1* ilustra o arranjo geral e a numeração das linhas utilizadas nos sistemas de ancoragem utilizados na realização desta dissertação.

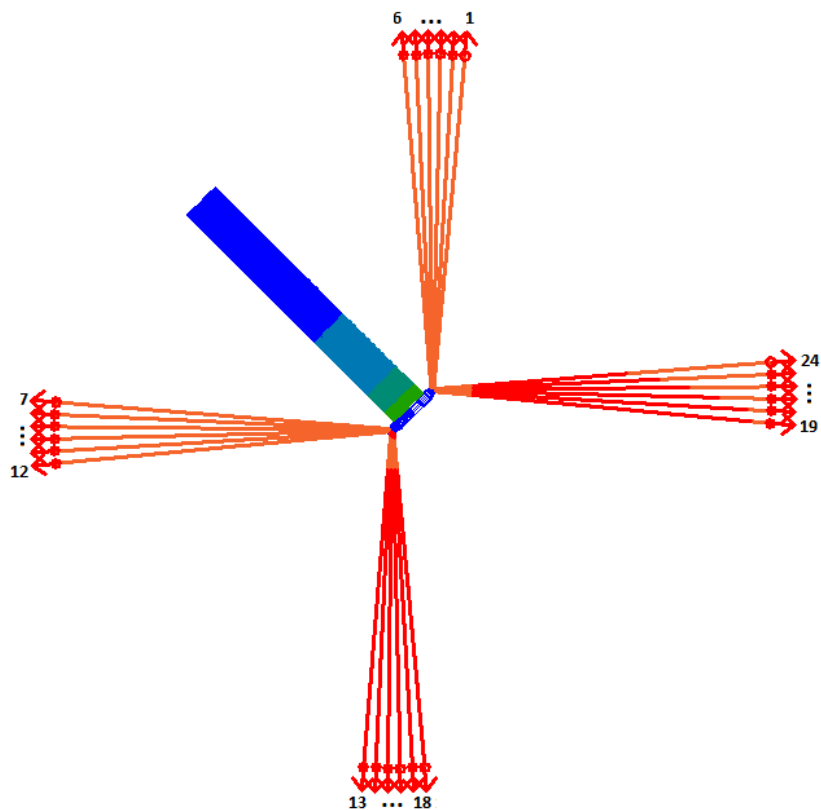


Figura 5.1- Arranjo Geral dos Sistemas de Ancoragem e numeração das linhas

Um dos modelos estudados corresponde à ancoragem do tipo *Taut-Leg* que é utilizada com o intuito de diminuir os raios de ancoragem, comparados à ancoragem convencional, proporcionando um menor congestionamento de linhas no fundo do mar, além de dar maior rigidez ao sistema limitando o passeio da unidade flutuante.

Visando um raio de ancoragem ainda menor, além de diminuir a pré-tração inicial aplicada, foi desenvolvida uma segunda configuração, que consiste em um modelo que utiliza boias nos segmentos intermediários das linhas de ancoragem, essa configuração ainda apresenta vantagens para o caso de haver linha rompida como será explicado nos itens subsequentes.

A terceira configuração apresentada nesta dissertação consiste em inserir um peso em determinada região da linha, deste modo, o tracionamento da linha seria feito em duas etapas, conforme explicado na seção 5.4.3, possibilitando, uma pré-tração inicial menor para colocar a plataforma na posição de projeto, utilizando guinchos menos robustos. Além disso, a configuração assumida pela linha neste tipo de ancoragem proporciona um raio de ancoragem menor em relação à ancoragem *Taut-Leg* tradicional.

As três configurações citadas foram desenvolvidas simultaneamente respeitando as mesmas propriedades dos materiais, carregamentos e condições de projeto, no capítulo 6 é realizado um estudo comparativo entre todas as configurações estudadas.

Os modelos numéricos do presente trabalho foram desenvolvidos através da ferramenta computacional SITUA-Prosim, que incorpora em uma única estrutura de código e dados um modelo hidrodinâmico do casco acoplado a uma malha de elementos finitos para representação das linhas de ancoragem e *risers*. O processador Prosim é responsável pela execução das análises estáticas e dinâmicas não-lineares no domínio do tempo, através da integração numérica das equações de movimento da unidade flutuante, sob a ação dos carregamentos ambientais. [27]

As características dos materiais utilizados e a geometria das linhas, além de todas as características dos modelos podem ser encontradas nos itens subsequentes. Para o caso dos segmentos contendo poliéster, por se tratar de um trabalho meramente acadêmico, foi considerada uma rigidez axial (EA) constante.

5.2 Modelo de Ancoragem Taut Leg Convencional

O modelo com o tipo de ancoragem *Taut-Leg* é apresentado na *Figura 5.2* e *Figura 5.3*.

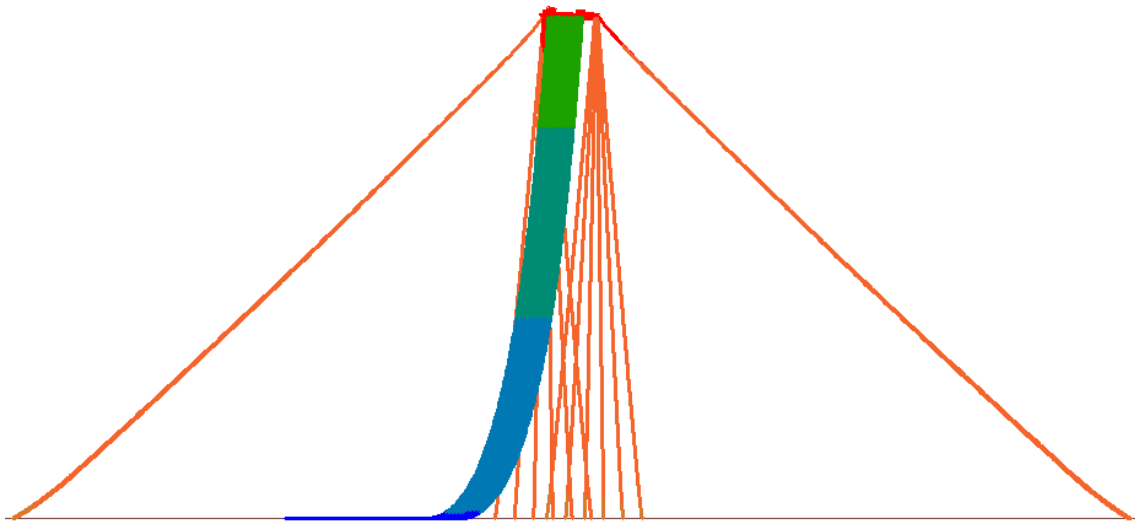


Figura 5.2- Vista Lateral - Modelo Taut Leg

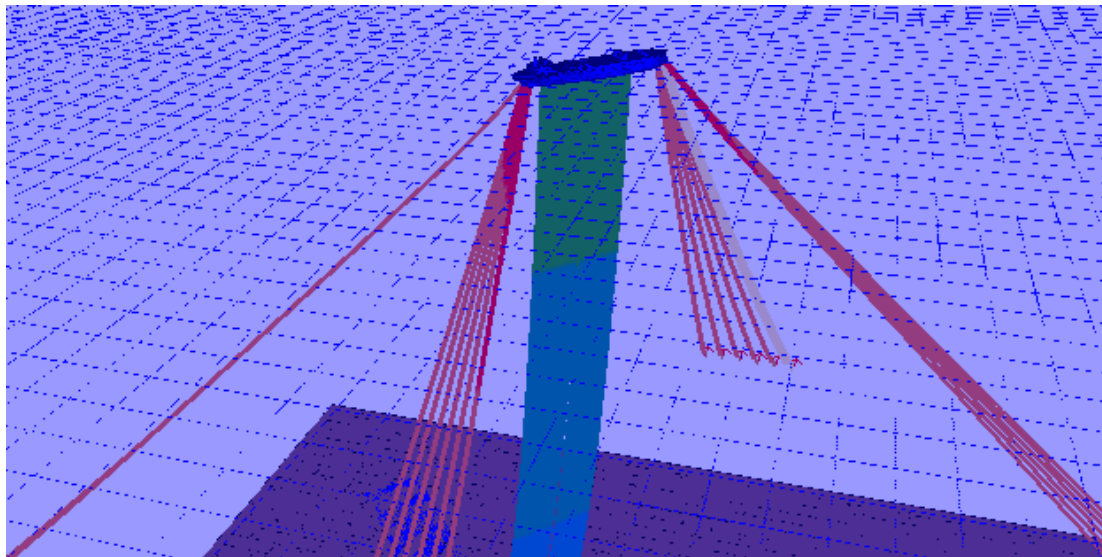


Figura 5.3- Vista 3D - Modelo Taut Leg

5.2.1 Composição das Linhas

As linhas da ancoragem *Taut-Leg* são constituídas nas suas extremidades por cabos de aço ou amarras e no seu trecho intermediário por cabo de poliéster. As características físicas e geométricas de cada material são mostradas na Tabela 5-1. Os materiais utilizados na modelagem são retirados do banco de dados do programa SITUA-Prosím [27].

Tabela 5-1. *Características Físicas e Geométricas das linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg*

Nome	Diâm. Ext. (m)	Diâm. Hidro. (m)	Coef. Poisson	EA (kN)	MBL (kN)	Peso Ar (kN/m)	Peso Ag (kN/m)	CD
Poliéster	0.218	0.218	0.3	207345	12753	0.3061	0.0805	1.2
Amarra	0.114	0.2	0.3	919077.1	12420	2.5498	2.2183	1.7

A discretização da malha nas linhas de ancoragem é realizada através do módulo de geração de malha automática do SITUA conforme Tabela 5-2.

Tabela 5-2. *Divisão por Segmentos e refino de malha das linhas de ancoragem*

Tipo de Material	Comp. Segmento (m)	Malha Inicial (m)	Malha Final (m)
1 - Amarra	220	12.72	5
2 - Poliéster	65	15	12.72
	1135	10	15
3 - Amarra	10	10	10
4 - Poliéster	800	15	15
	325	5.42	15
5 - Amarra	12	5	5.42
	288	5	5

5.2.2 Pré-Trações

A Tabela 5-3 mostra as pré-trações e os azimutes característicos de cada linha pertencente ao sistema de ancoragem com a configuração *Taut-Leg* tradicional. Os valores de pré-tração foram definidos de forma que todos os critérios de projeto sejam atendidos.

Tabela 5-3. Azimute e Pré-Tensões das Linhas de Ancoragem – Modelo Taut Leg

	Azimute	Pré-Tensão (kN)
Linha 1	4.77°	3380.84
Linha 2	2.77°	3339.70
Linha 3	0.78°	3304.37
Linha 4	358.78°	3273.34
Linha 5	356.79°	3245.96
Linha 6	354.8°	3224.15
Linha 7	275.15°	3241.22
Linha 8	273.17°	3258.87
Linha 9	271.18°	3281.50
Linha 10	269.19°	3308.69
Linha 11	267.19°	3340.89
Linha 12	265.2°	3376.20
Linha 13	185.23°	3608.34
Linha 14	183.23°	3649.27
Linha 15	181.22°	3684.23
Linha 16	179.22°	3718.45
Linha 17	177.21°	3746.33
Linha 18	175.2°	3775.57
Linha 19	94.83°	3761.55
Linha 20	92.82°	3746.34
Linha 21	90.82°	3723.68
Linha 22	88.82°	3695.99
Linha 23	86.81°	3662.54
Linha 24	84.8°	3626.10

A *Figura 5.4* mostra a distribuição da tração ao longo da linha em uma linha de ancoragem do tipo *Taut-Leg*. Observa-se que a posição onde os valores de tração são maiores se encontram próximos ao topo.

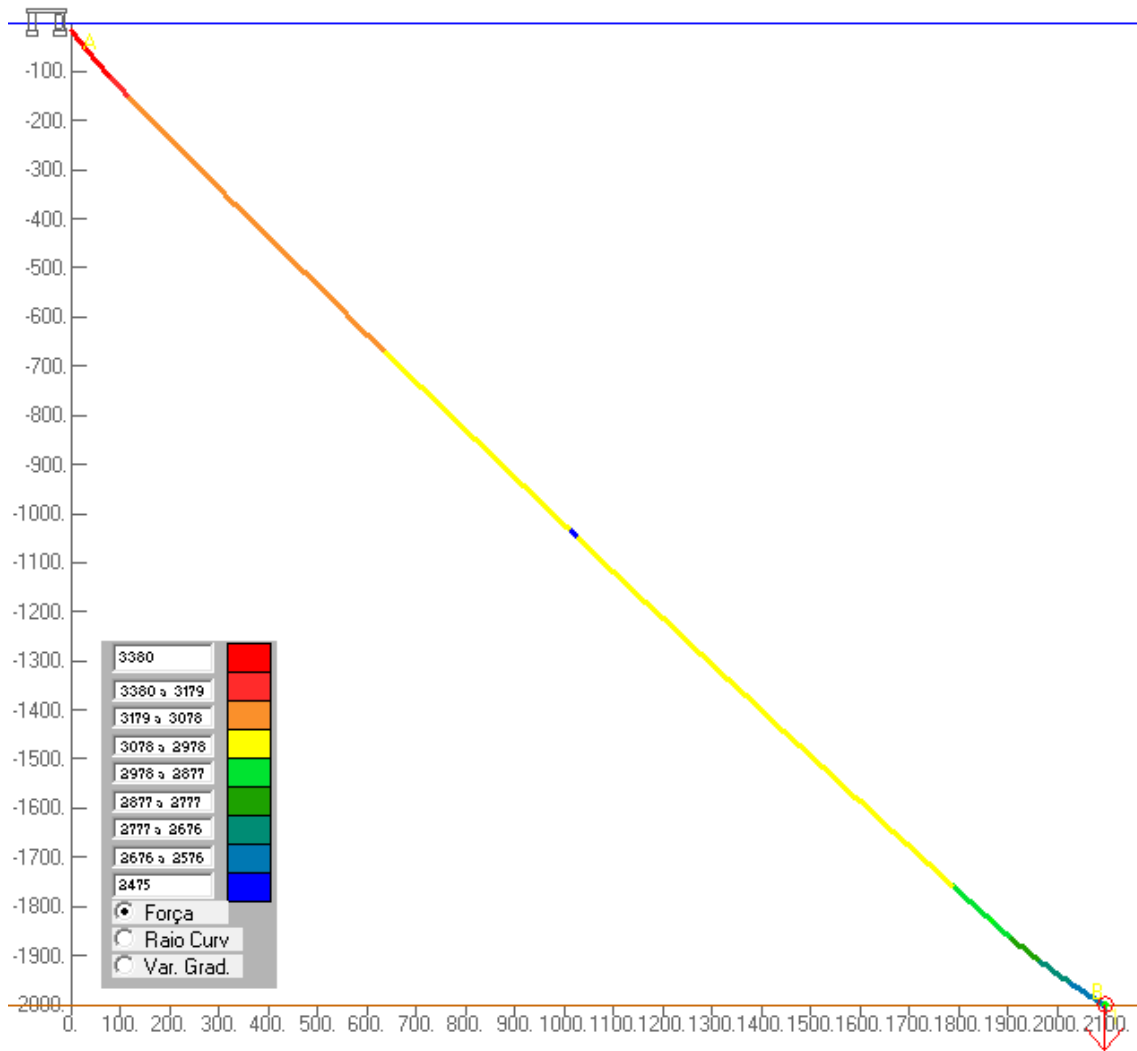


Figura 5.4- Linha de Ancoragem Modelo Taut-Leg – Trações na Linha

5.3 Modelo de Ancoragem *Taut-Leg* com Boia

A ancoragem utilizando boias surgiu como uma opção para diminuir as trações de topo e os raios de ancoragem das linhas, visto que, com o aumento das profundidades de operação das unidades flutuantes, estes se tornaram uma importante variável de projeto.

As boias devem ser projetadas para atingir a flutuabilidade desejada para as condições intacta e de avaria e os seus critérios de segurança são realizados através de testes hidrostáticos. Os critérios para a fabricação e operação de sistemas de ancoragem utilizando boias podem ser encontrados com mais detalhes na norma API RP 2SK [3].

O modelo com o tipo de ancoragem com boia é apresentado na *Figura 5.5* e *Figura 5.6*. É importante salientar que o emprego de boias nas linhas de ancoragem altera o modo como as forças de restauração agem para manter a plataforma dentro de uma zona segura, além da elasticidade do poliéster a variação da configuração geométrica das linhas conforme a plataforma “passeia” colabora para restaurar a posição da unidade flutuante.

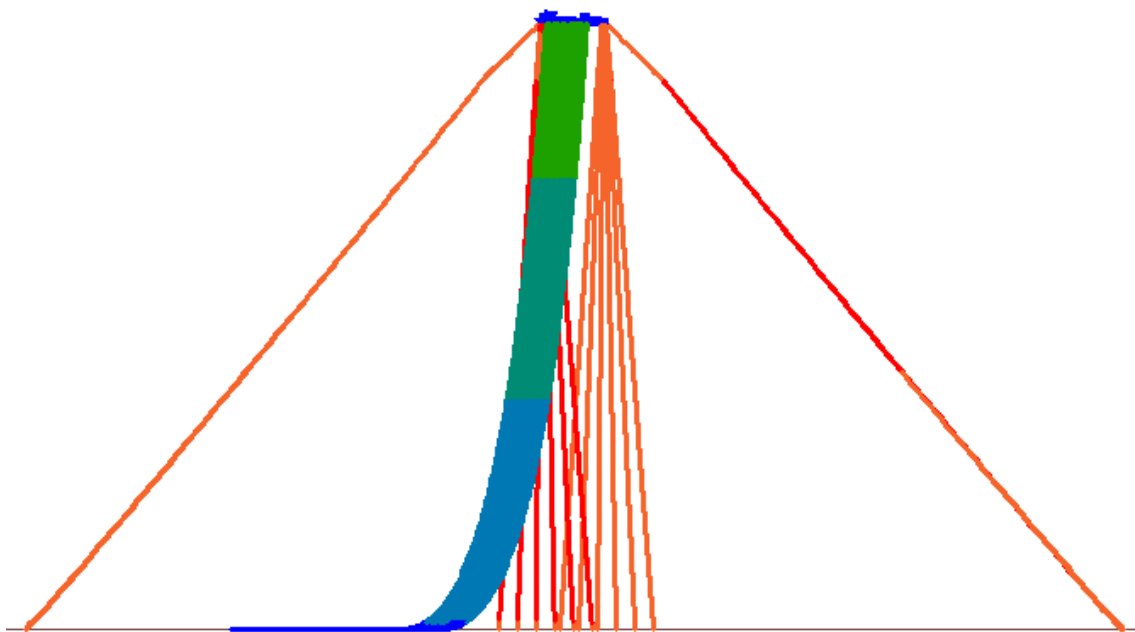


Figura 5.5- Vista Lateral do Modelo com Boia Auxiliar

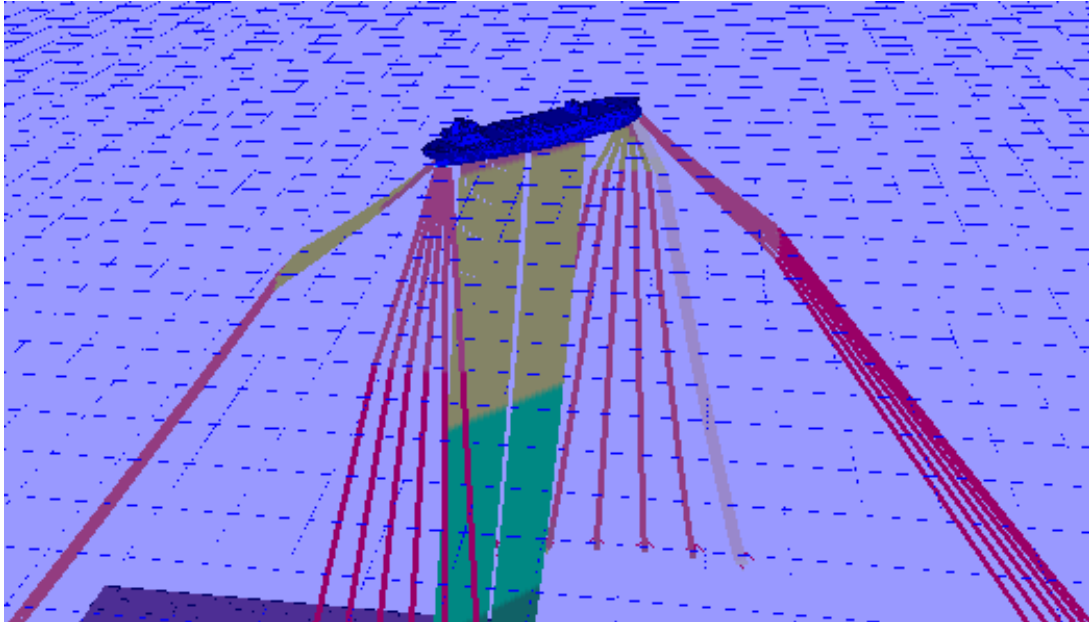


Figura 5.6- Vista 3D do Modelo com Boia Auxiliar

5.3.1 Posicionamento da Boia

Há diversas vantagens em utilizar boias na ancoragem tipo *Taut-Leg*, além de diminuir a pré-tração e o raio de ancoragem em relação à configuração *Taut-Leg* tradicional, a ancoragem tipo *Taut-Leg* com boia ainda poderá permitir a identificação dos casos de rompimento da linha de maneira rápida e eficiente.

O critério de posicionamento da boia ao longo da linha não é citado em norma. Com o intuito de identificar o rompimento de qualquer linha do sistema, esta dissertação sugere um critério de projeto adicional para o posicionamento da boia. Conforme demonstrado na *Figura 5.7*, este critério consiste em garantir que o comprimento de linha da boia até a âncora (S_2) deva ser maior que a lâmina d'água (LDA), proporcionando assim a visualização da boia em caso de avaria de algum componente do sistema de ancoragem através de sua emergência até a superfície.

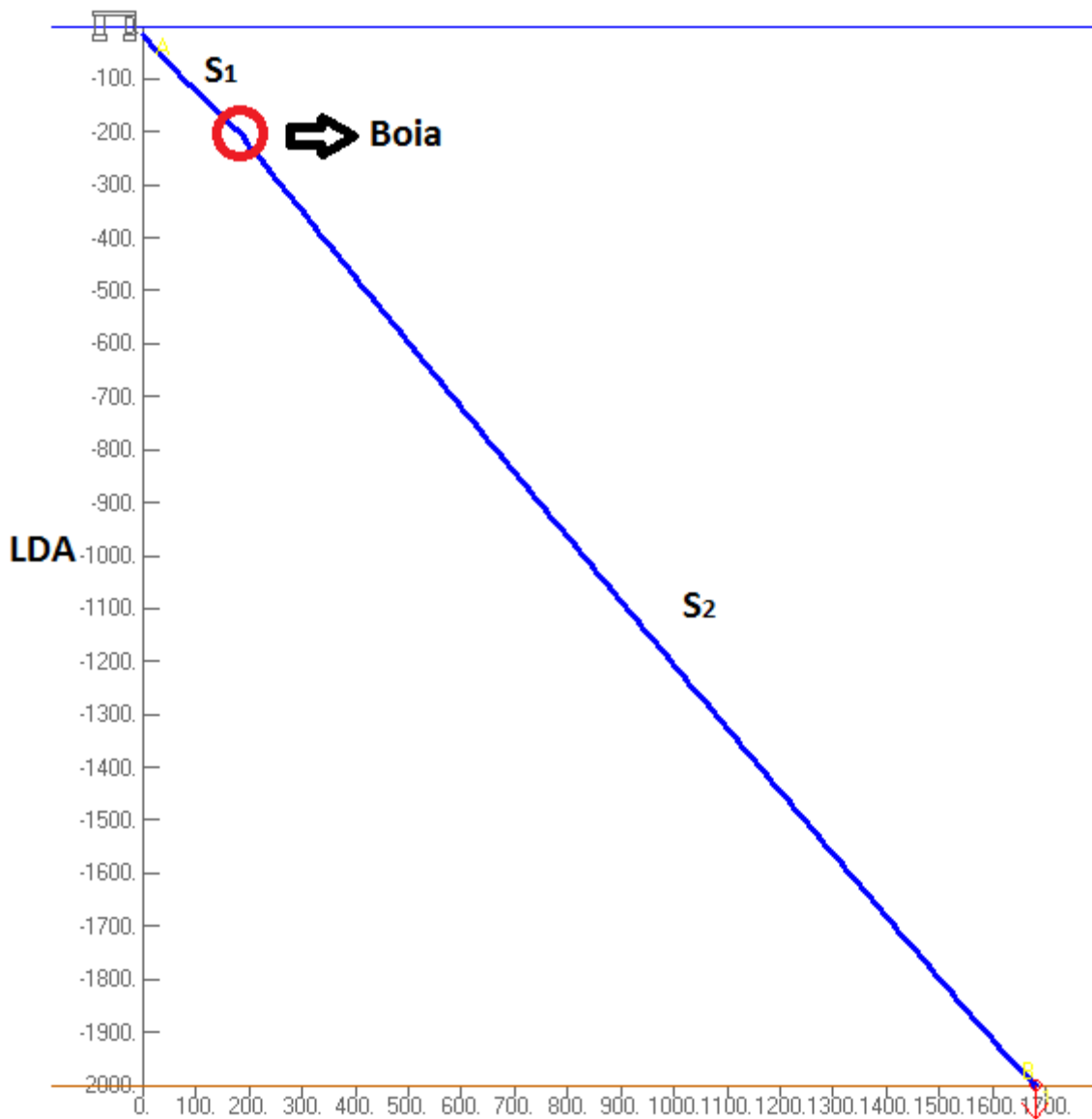


Figura 5.7- Modelo Taut-Leg com boia

5.3.2 Composição das Linhas

As linhas da ancoragem do modelo tipo *Taut-Leg* com boias são constituídas nas suas extremidades por amarras e no seu trecho intermediário por cabos de poliéster, cabos de aço e a boia. A discretização da malha nas linhas de ancoragem do modelo com boias é mostrada na Tabela 5-4.

Tabela 5-4. *Divisão por Segmentos e refino de malha das linhas de ancoragem – Modelo com Boia*

Tipo de Material	Comp. Segmento (m)	Malha Inicial (m)	Malha Final (m)
1 – Amarra	47.93	6.99	5
2 – Cabos de Aço	200	15	6.99
3 – Boia	4.15	4.15	4.15
4 - Cabos de Aço	50	15	15
5 - Poliéster	100	15	15
	2015	15	15
6 - Amarra	49	15	15
	100	5	15

As características físicas e geométricas de cada material utilizado no modelo com boia são mostradas na Tabela 5-5. Os materiais utilizados na modelagem são retirados do banco de dados do programa Situa-Prosim, com exceção da boia que foi dimensionada de modo que fossem atendidos todos os critérios de projeto do sistema de ancoragem.

Tabela 5-5. *Características Físicas e Geométricas das linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg com Boias*

Nome	Diâm. Ext. (m)	Diâm. Hidro. (m)	Coef. Poisson	EA (kN)	MBL (kN)	P Ar (kN/m)	P Ag (kN/m)	CD
Amarra	0.114	0.2	0.3	919077.1	12420	2.549	2.21	1.7
Cabo de Aço	0.127	0.127	0.3	1402337	12910	0.836	0.6717	1.2
Poliéster	0.218	0.218	0.3	207345	12753	0.306	0.0805	1.2
Boia	10.59	10.59	0.3	200000	2442.7	127.9	-150	1.2

5.3.3 Pré-Trações

A Tabela 5-6 mostra as pré-trações e os azimutes característicos de cada linha pertencente ao sistema de ancoragem na configuração *Taut-Leg* com boia. Os valores de pré-tração aplicados foram definidos de forma que todos os critérios de projeto fossem atendidos, inclusive com relação ao posicionamento da boia.

Tabela 5-6. Azimute e Pré-Trações das Linhas de Ancoragem – Modelo com Boia Auxiliar

Linhas	Azimute	Pré-Tração (kN)	Tração Abaixo da boia (kN)
1	5.33°	2951.21	3232.7
2	3.36°	2943.15	3224.7
3	1.32°	2936.32	3217.8
4	359.32°	2929.98	3211.5
5	357.31°	2923.29	3205.1
6	355.29°	2918.29	3199.8
7	274.58°	2670.8	2943.2
8	272.56°	2684.32	2956.7
9	270.56°	2697.98	2970.4
10	268.56°	2711.3	2983.7
11	266.53°	2724.42	2996.8
12	264.53°	2739.99	3012.4
13	184.63°	3273.99	3545.9
14	182.66°	3281.83	3553.8
15	180.68°	3288.83	3560.8
16	178.69°	3295.62	3567.5
17	176.7°	3301.92	3573.8
18	174.7°	3307.73	3579.6
19	95.43°	3117.15	3389.2
20	93.43°	3103.62	3375.7
21	91.43°	3090.28	3362.4
22	89.44°	3076.11	3348.2
23	87.44°	3062.16	3334.3
24	85.45°	3047.23	3319.4

A tração máxima obtida para o modelo *Taut-Leg* com boia encontra-se no ponto imediatamente inferior a boia, conforme pode ser observado na *Figura 5.8*, isto se deve a configuração geométrica que a linha assume; o empuxo provocado pela boia ajuda a sustentar o peso da linha diminuindo a tração no topo. A nova configuração assumida pela linha neste tipo de ancoragem permite ainda o emprego de menores raios de ancoragem.

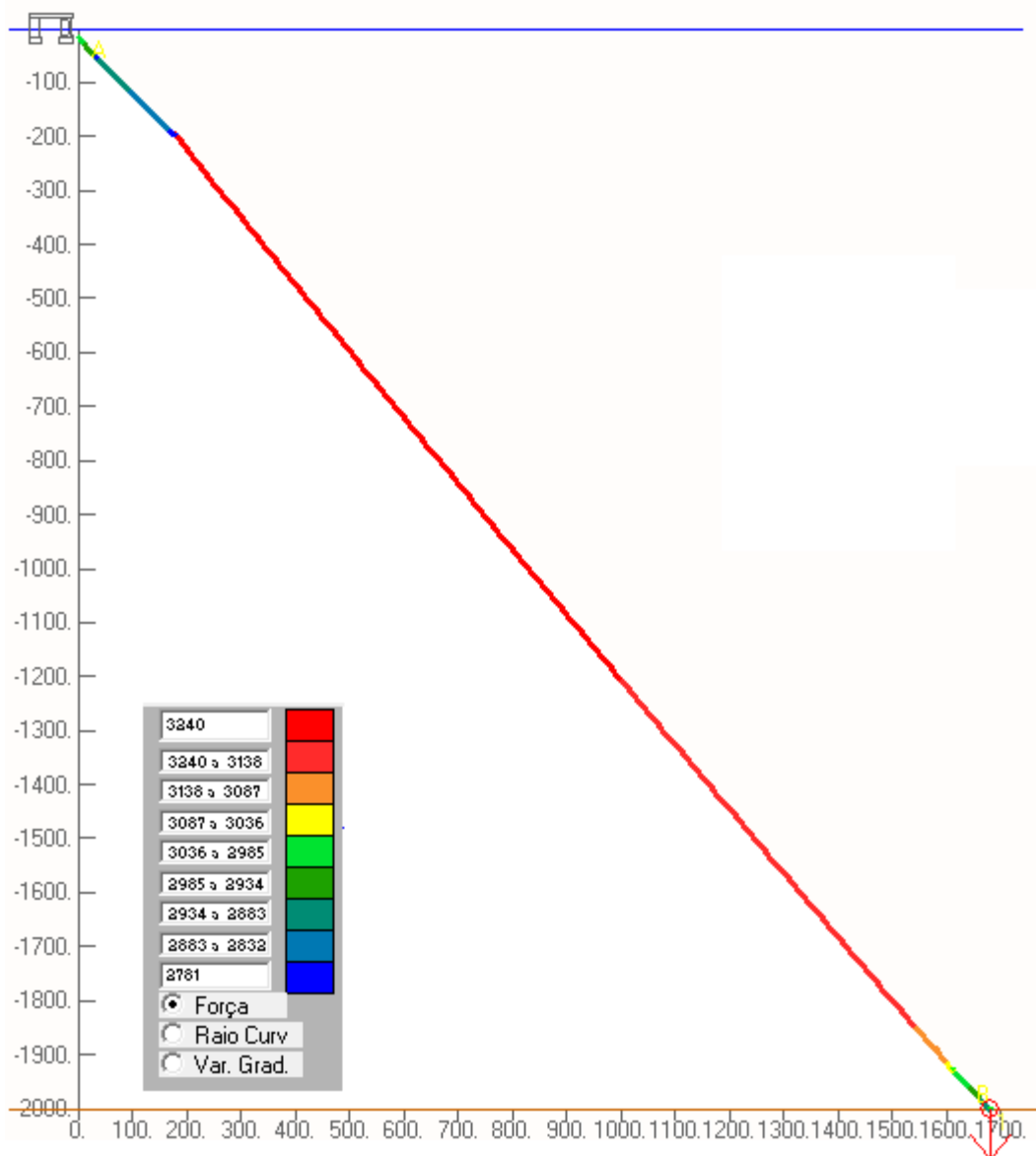


Figura 5.8- Linha de Ancoragem com Boia- Trações na Linha

5.4 Modelo de Ancoragem *Taut-Leg* com Peso

O modelo com o tipo de ancoragem utilizando Peso é apresentado na *Figura 5.9* e *Figura 5.10*.

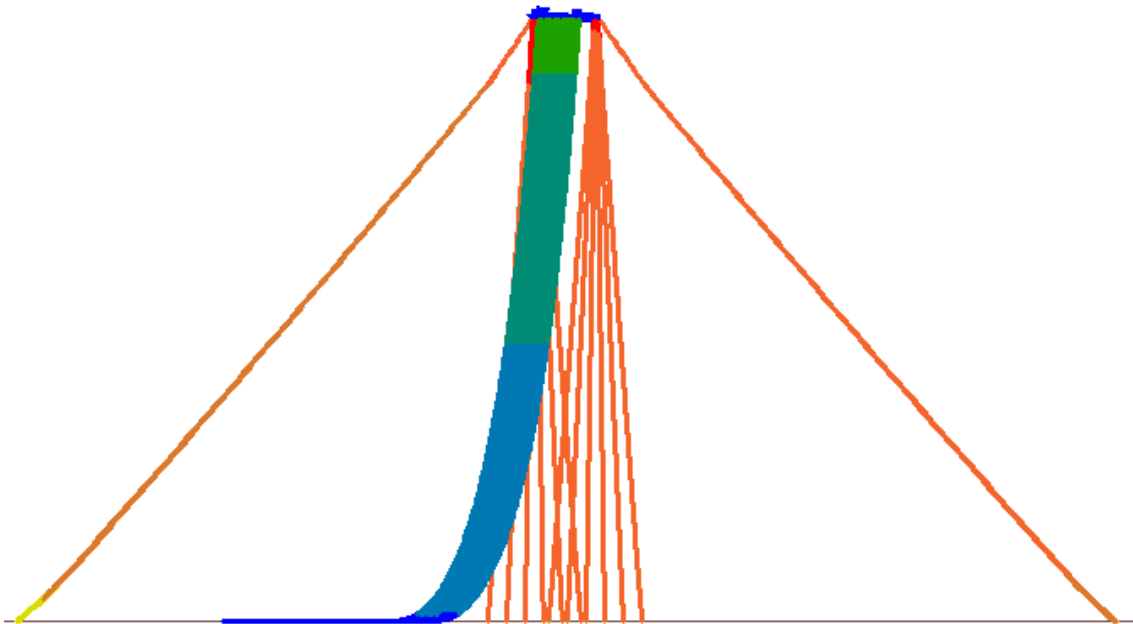


Figura 5.9- Vista Lateral do Modelo com Peso

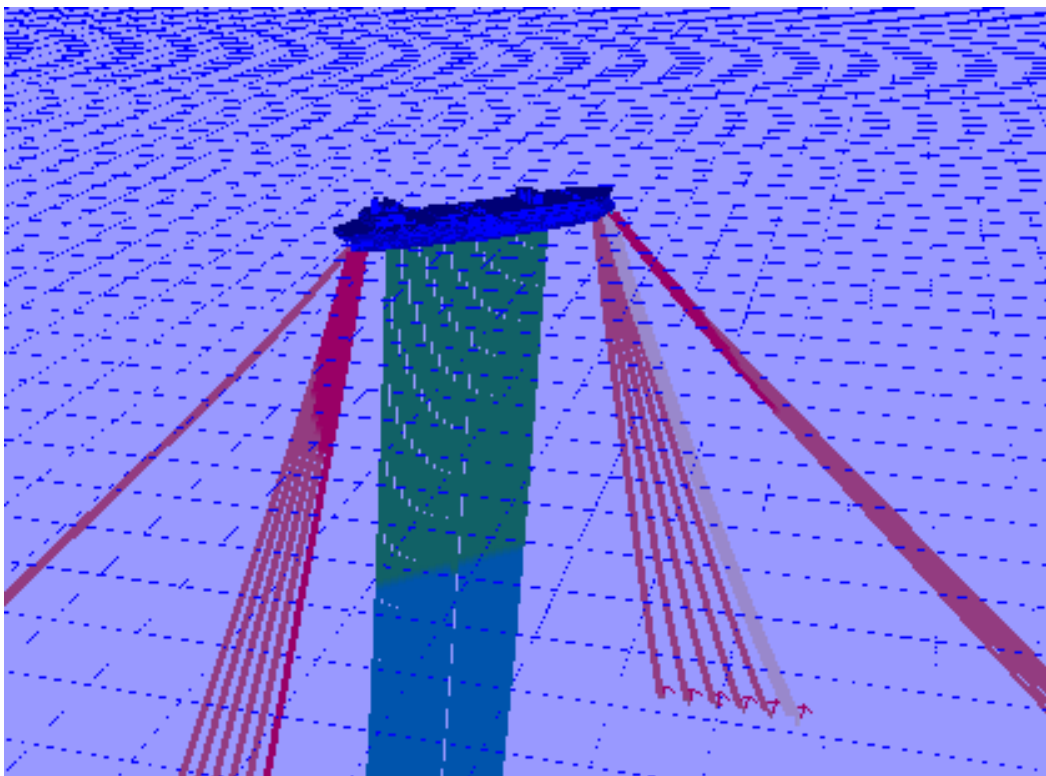


Figura 5.10- Vista 3D do Modelo com Peso

5.4.1 Posicionamento do Peso

A ancoragem tipo *Taut-Leg* com peso é um conceito proposto inicialmente pela Petrobrás. Suas principais vantagens com relação à ancoragem *Taut-Leg* tradicional consistem na redução do raio de ancoragem das linhas e na aplicação de uma pré-tensão inicial menor.

Nesta dissertação, por conveniência para a modelagem, foi adotada para a posição do peso a mesma posição da boia modelada na seção anterior. Não é interesse deste trabalho, avaliar a influência da posição do peso nem seu tipo (poita, grupo de amarras, etc.) na resposta do sistema flutuante, desta forma não há critérios pré-definidos para o posicionamento do peso, devendo este ser avaliado de acordo com o caso que se deseja estudar.

A configuração com ancoragem tipo *Taut-Leg* com peso é mostrada na *Figura 5.11*.

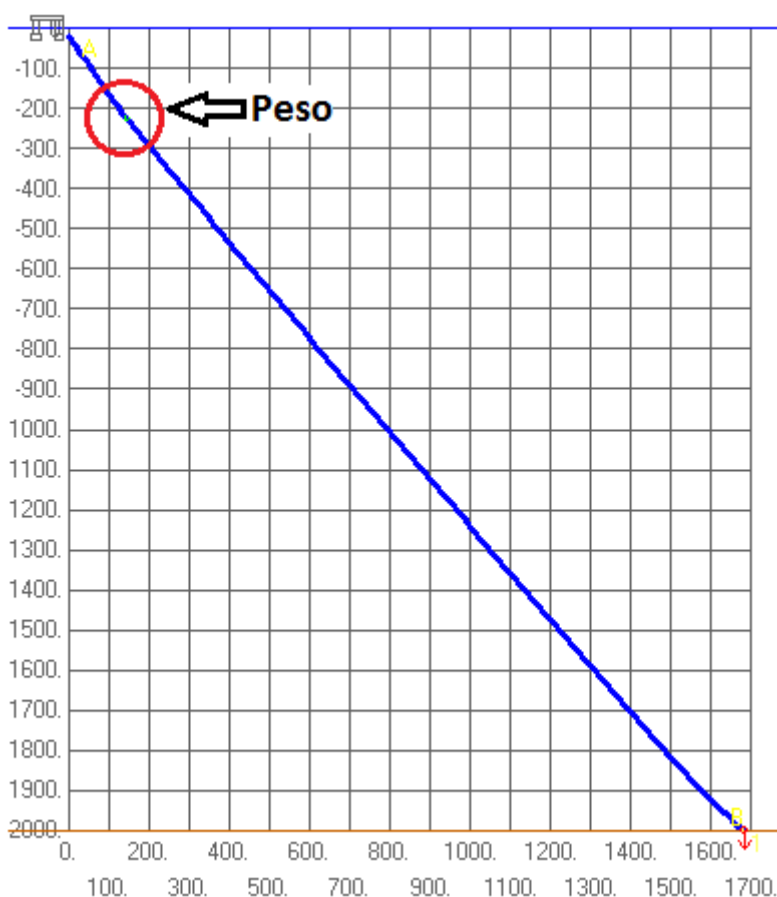


Figura 5.11- Configuração da Linha de Ancoragem com Peso

5.4.2 Composição das Linhas

As linhas da ancoragem do modelo *Taut-Leg* com peso são constituídas nas suas extremidades por amarras e no seu trecho intermediário por cabos de poliéster, cabos de aço e o peso. Um motivo para o uso de peso nas posições intermediárias das linhas de ancoragem é utilizar guinchos menos robusto para recolher a linha até uma determinada pré-tração (menor que a pré-tração final) e colocar a unidade flutuante na posição de projeto. Depois de posicionada a unidade flutuante o peso será instalado chegando assim a pré-tração definida no projeto. O peso utilizado na modelagem para chegar a configuração final é de 373.5 kN.

A discretização da malha nas linhas de ancoragem do modelo *Taut-Leg* com peso é mostrada na Tabela 5-7.

Tabela 5-7. *Divisão por Segmentos e refino de malha das linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg com Peso*

Tipo de Material	Comp Segmento (m)	Malha Inicial (m)	Malha Final (m)
1 - Amarra	47.93	6.99	5
2 - Cabo de Aço	200	15	6.99
3 - Peso	4.15	4.15	4.15
4 - Cabo de Aço	50	15	15
5 - Poliéster	100	15	15
	1915	15	15
6 - Amarra	49	15	15
	200	5	15

As características físicas e geométricas de cada material utilizado no modelo com peso são mostradas na Tabela 5-8. Os materiais utilizados na modelagem são retirados do banco de dados do programa Situa-Prosím, com exceção do peso que foi ajustado para que todos os critérios de projeto do sistema de ancoragem fossem atendidos.

Tabela 5-8. *Características Físicas e Geométricas das linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg com Peso*

Nome	Diâm. Ext. (m)	Diâm. Hidro. (m)	Coef. Poisson	EA (kN)	MBL (kN)	P Ar (kN/m)	P Ag (kN/m)	CD
Amarra	0.114	0.2	0.3	919077.1	12420	2.5498	2.2183	1.7
Cabo de Aço	0.127	0.127	0.3	1402337	12910	0.83679	0.6717	1.2
Poliéster	0.218	0.218	0.3	207345	12753	0.3061	0.0805	1.2

5.4.3 Pré-Trações

A Tabela 5-9 mostra as pré-trações antes e depois de instalados os pesos, e os azimutes característicos de cada linha pertencente ao sistema de ancoragem na configuração com peso. Os valores de pré-tração foram definidos de forma que todos os critérios de projeto fossem atendidos.

Tabela 5-9. Azimute e Pré-Trações das Linhas de Ancoragem – Modelo com Peso

Linhas	Azimute	Pré-Tração (kN)	Pré-Tração sem o Peso (kN)
1	4.95°	3338.9	2914.1
2	2.94°	3331.1	2905.7
3	0.93°	3321.2	2898.4
4	358.92°	3315.6	2889.2
5	356.91°	3308.6	2881.8
6	354.9°	3303.6	2876.5
7	274.68°	3301.7	2874.2
8	272.67°	3309.4	2882.4
9	270.67°	3316.6	2890.1
10	268.66°	3322.8	2896.6
11	266.68°	3331.2	2905.7
12	264.68°	3338.6	2913.5
13	184.96°	3737.9	3336.9
14	182.97°	3734.7	3333.5
15	180.99°	3742.8	3342.0
16	179.08°	3750.5	3350.1
17	177.09°	3758	3358.1
18	175.11°	3765.2	3365.7
19	95.33°	3767.1	3367.7
20	93.32°	3759.7	3360.0
21	91.32°	3752.2	3352.1
22	89.33°	3744.6	3343.6
23	87.33°	3736.3	3335.3
24	85.32°	3728.5	3326.9

Na utilização de linha de ancoragem do tipo *Taut-Leg* com peso a pré-tração é realizada em duas etapas. Em um primeiro momento a unidade flutuante é colocada em posição com uma pré-tração menor do que a estipulada em projeto, exigindo guinchos menos potentes para recolher a linha. Posteriormente são instalados pesos em uma determinada posição da linha, compensando a baixa pré-tração aplicada anteriormente e chegando ao valor definido em projeto, possibilitando a operação do sistema com segurança.

A Figura 5.12 mostra a distribuição da tração ao longo da linha em uma linha de ancoragem do tipo *Taut-Leg*.

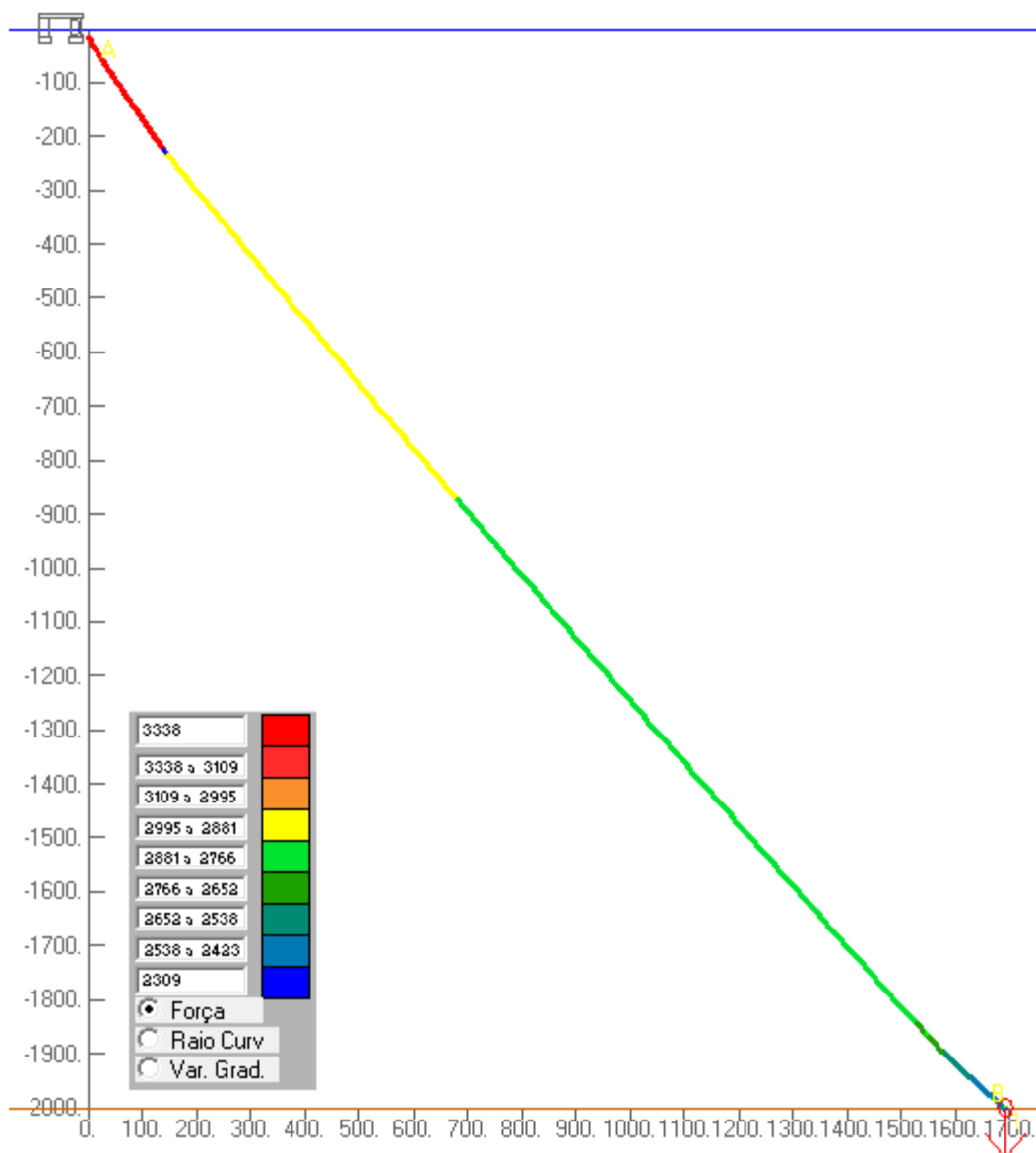


Figura 5.12- Linha de Ancoragem com Peso – Trações na Linha

5.5 Demais Dados dos Modelos Numéricos

Nesta seção são apresentados os demais dados dos modelos numéricos pertinentes à modelagem do sistema flutuante e *risers*.

5.5.1 Características Geométricas do Navio

A *Figura 5.13* mostra uma vista 3D da unidade flutuante.

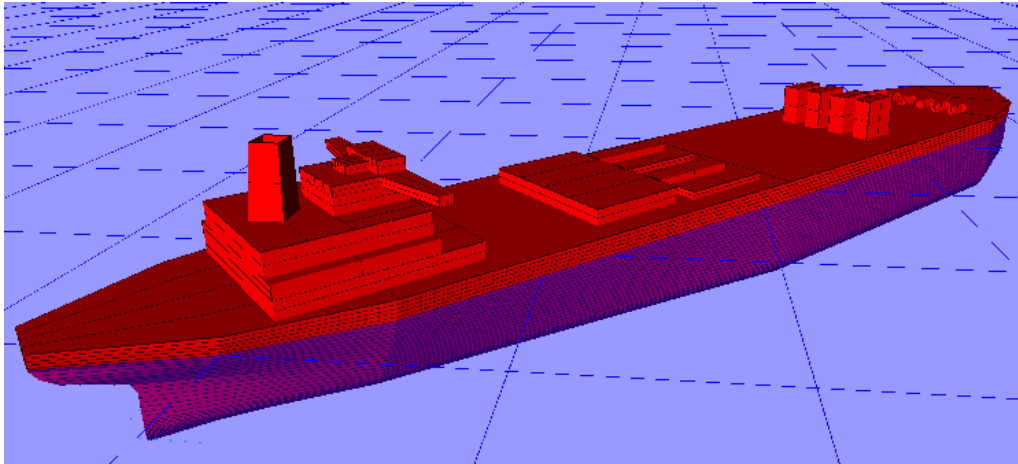


Figura 5.13- Vista 3D da Unidade Flutuante

As principais características geométricas do navio são mostradas nas tabelas a seguir.

Tabela 5-10. *Propriedades Geométricas da Unidade Flutuante*

Propriedades	Valores
Comprimento	335,00 m
Calado	21,00 m
Boca	54,50 m
Altura	53,00 m
Peso	2989928.67 kN

A matriz de raio de giração, considerando apenas os termos da diagonal, e as coordenadas do CG são apresentadas na Tabela 5-11 e Tabela 5-12 sem levar em consideração a influência das linhas.

Tabela 5-11. *Matriz de Raios de Giração em Relação ao CG*

	Valores
RXX	21.07
RYY	80.39
RZZ	80.18

Tabela 5-12. *Posição do Centro de Gravidade em Relação ao Eixo Estrutural (m)*

	Valores
XG	10.43
YG	0.00
ZG	15.18

As forças geradas pela passagem das ondas, correntes e vento são calculadas através dos modelos matemáticos descritos no Capítulo 3 e são encontrados com mais detalhes em [10] e [22]. Os coeficientes de força de deriva média e lenta e a matriz de amortecimento potencial são determinados no programa WAMIT [28], baseando-se na Teoria Potencial, sendo em seguida importados para o SITUA por um arquivo de extensão (*.wnf).

5.5.2 Característica dos *Risers*

Nos três modelos simulados nessa dissertação foram utilizados 20 *risers* de produção que possuem o mesmo comprimento e características físicas, descrita na Tabela 5-13. Estas linhas foram modeladas em elementos finitos e o comprimento de cada segmento é otimizado através do módulo de geração de malha automática no SITUA, com isto as regiões no topo e no TDP apresentam malhas mais refinadas, conforme Tabela 5-14.

Tabela 5-13. *Características Físicas e Geométricas dos Risers*

<i>Risers</i>	Comp. (m)	Diâm. Ext. (m)	Diâmetro Hidro. (m)	Coef. Poisson	EA (kN)	Peso seco (kN/m)	Peso molhado (kN/m)	CM	CD
Todos	3000	0.2153	0.2153	0.3	238095.2	0.9002	0.5341	2	1.2

Tabela 5-14. Divisão por segmentos e refino de malha dos Risers

Nome do Segmento	Comp. Segmento (m)	Malha Inicial (m)	Malha Final (m)
Transição Topo	221	15	5
Uniforme	1586	15	15
Transição TDP	221	5	15
Região TDP	356	5	5
Transição Fundo	221	15	5
Trecho Apoiado	395	15	15

A Figura 5.14 apresenta a configuração geométrica dos risers utilizados neste trabalho.

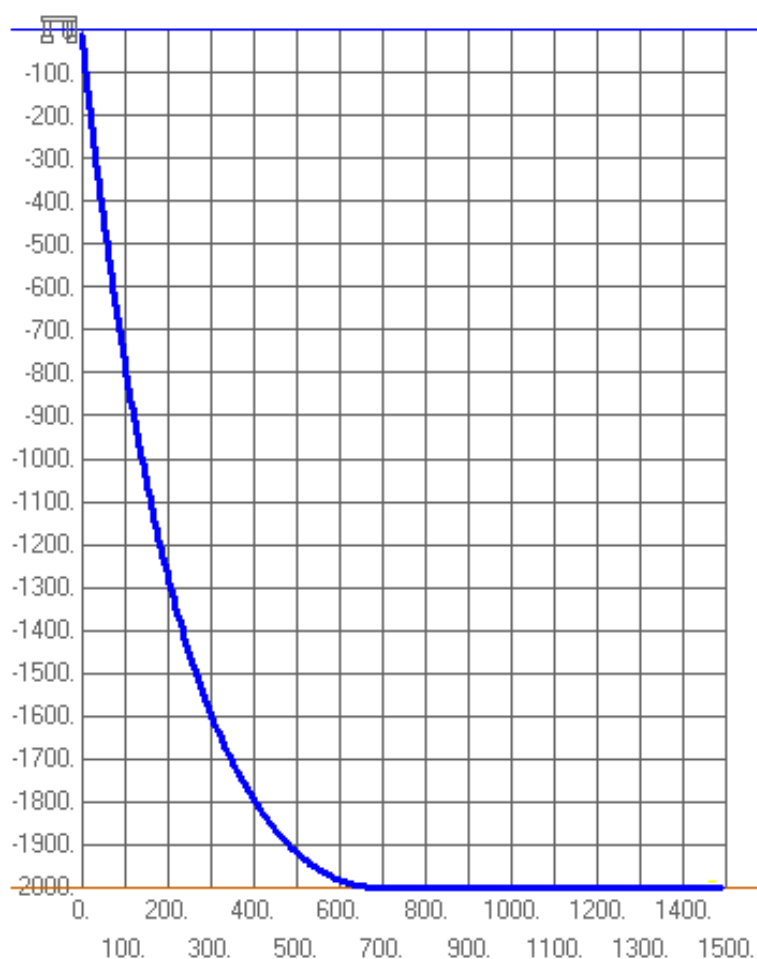


Figura 5.14- Geometria dos Risers

5.6 Combinações de Carregamentos

A modelagem dos carregamentos ambientais de onda, corrente e vento corresponde a valores típicos da bacia de campos e tem períodos de recorrência predefinidos (anual, decenário ou centenário). No modelo numérico desta dissertação foram feitas 80 combinações de carregamento. Foram considerados carregamentos alinhados, e com defasagem de 22.5° de onda e vento em relação a corrente.

Com o intuito de diminuir o custo computacional das análises foram realizados estudos prévios, onde foram identificados 24 casos de carregamentos mais severos, baseado nesses carregamentos foram feitos os estudos comparativos entre os três sistemas de ancoragem.

Projetos mais recentes têm se baseado em uma quantidade maior de combinações de carregamento, o presente trabalho por apresentar objetivos acadêmicos apresenta somente às combinações citadas a seguir:

- Combinações alinhadas, cujas ações de onda, corrente e vento possuem período de recorrência anual;
- Combinações desalinhadas (onda e vento em relação à corrente) $22,5$ graus à direita, cujas ações de onda e vento possuem período de retorno decenário e a corrente com período de retorno centenário;
- Combinações desalinhadas (onda e vento em relação à corrente) $22,5$ graus à esquerda, cujas ações de onda e vento possuem período de retorno decenário e a corrente com período de retorno centenário;
- Combinações desalinhadas (onda e vento em relação à corrente) $22,5$ graus à direita, cujas ações de onda e vento possuem período de retorno centenário e a corrente com período de retorno decenário;
- Combinações desalinhadas (onda e vento em relação à corrente) $22,5$ graus à esquerda, cujas ações de onda e vento possuem período de retorno centenário e a corrente com período de retorno decenário.

5.7 Descrição das Análises Envolvidas

Realizado o processo de ajuste dos parâmetros físicos, geométricos e hidrodinâmicos da UF e das linhas, além da definição dos carregamentos ambientais atuantes, os modelos numéricos acoplados encontram-se preparados para a etapa das simulações dinâmicas não-lineares no domínio do tempo, através da ferramenta computacional SITUA-PROSIM. Para a integração numérica das linhas, utilizou-se o algoritmo implícito de *Newmark* com intervalo de integração de 0,1 segundos e uma simulação total de 10900 segundos, sendo que os primeiros 100 segundos consistem numa rampa de aplicação dos carregamentos ambientais impostos a plataforma. Considera-se que um tempo de simulação de 10800 segundos é o tempo necessário para que se obtenha uma confiabilidade estatística no processamento da série temporal. Para a integração numérica do casco, utiliza-se o algoritmo HTF-GA [26].

As simulações dinâmicas no domínio do tempo resultam num histórico de tração ou deslocamento, que devem ser tratados estatisticamente para a obtenção dos seus respectivos valores extremos. Para este fim, utilizou-se a Distribuição de Picos de *Weibull* para a execução da Estatística de Extremos nos históricos de tração ou deslocamentos gerados.

De modo a simplificar as análises foi adotado um único MBL (*Minimum Break Load*) para toda a linha, como sendo o menor valor entre os seguimentos que se encontram suspensos para cada modelo. Esta premissa visa garantir níveis seguros de tração ao longo de toda linha.

Nas análises da condição de avaria foi simulado o rompimento da linha mais tracionada dos sistemas de ancoragem, para avaliar o *offset* máximo da unidade flutuante, assegurando a integridade dos *risers* e equipamentos submarinos. Foi avaliado também o rompimento da segunda linha mais tracionada, nesse caso, de modo a sobrecarregar a linha mais tracionada (do sistema intacto) e investigar se ela excede o valor estabelecido nos critérios de projeto.

6 Comparação dos Modelos

6.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado um estudo comparativo entre os três tipos de ancoragem estudados (Modelo *Taut-Leg*, Modelo *Taut-Leg* com Boia e Modelo *Taut-Leg* com Peso), parâmetros tais quais, tração de topo e raio de ancoragem são analisados. Os resultados da estatística de extremos das trações máximas, trações mínimas (poliéster) e passeio, obtidos em cada configuração são expostos e comparados com o valor admissível segundo a API RP 2SK [3].

Nestes estudos foram consideradas as condições intacta e de avaria, conforme previsto nas condições de projeto apresentadas na seção 4.3.

Para os estudos envolvendo o tipo de ancoragem com boia foram realizadas ainda análises para as condições em que há o rompimento de linha e o caso em que há a inundação da boia.

6.2 Estudo Comparativo

6.2.1 Raio de Ancoragem

Conforme dito no capítulo 1, um projeto de sistemas de ancoragem deve ter o intuito de minimizar os raios de ancoragem, viabilizando maiores possibilidade de arranjos submarinos, evitando congestionamento de linhas de unidades próximas, além de minimizar custos, devido a menor quantidade de material utilizado nas linhas.

A *Figura 6.1* apresenta as três configurações propostas nesta dissertação. Observa-se, através da Tabela 6-1, que os tipos de ancoragem *Taut-Leg* com boia e *Taut-Leg* com peso reduziram o raio de ancoragem em aproximadamente 20%, isto se deve a nova configuração assumida pelas linhas.

Tabela 6-1. Raios de Ancoragem – Linha 1

Tipo de Ancoragem	Raio de Ancoragem (m)	Diferença em %
<i>Taut-Leg</i> Tradicional	2097.7	-
<i>Taut-Leg</i> com Boia	1679.8	-19.9
<i>Taut-Leg</i> com Peso	1681.7	-19.8

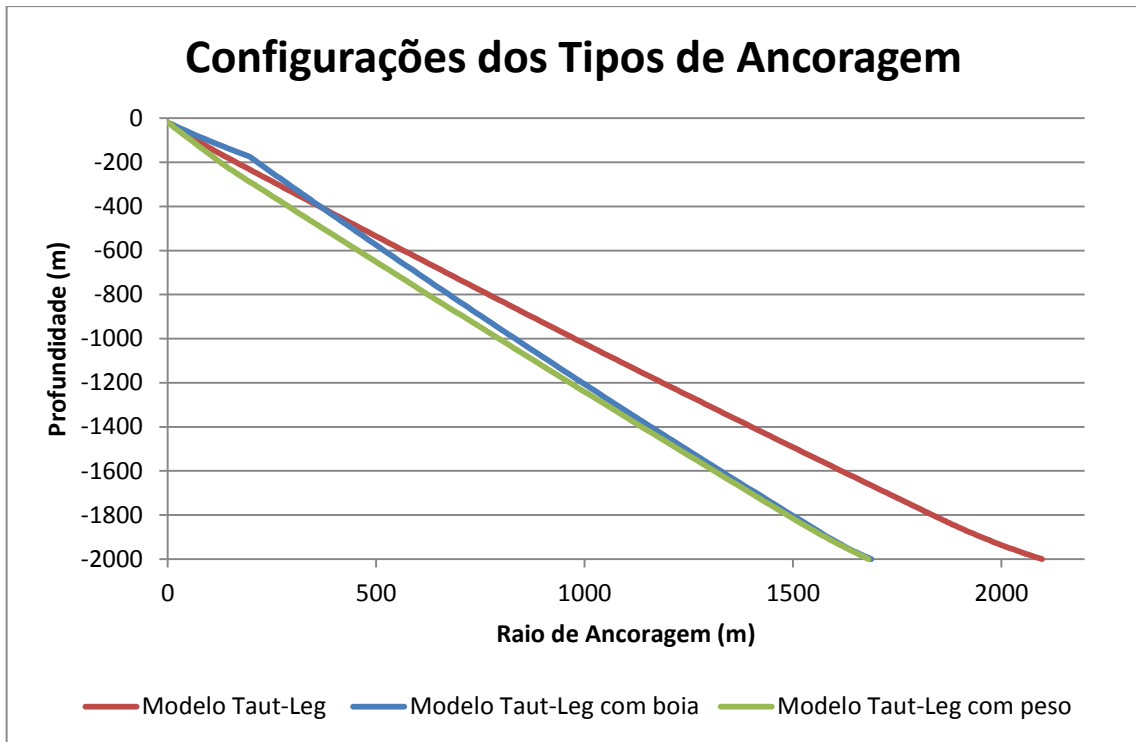


Figura 6.1- Configurações dos Tipos de Ancoragem Estudados – Linha 1

A Tabela 6-2 apresenta o comprimento total das linhas nos três modelos estudados, explicitando a diferença em porcentagem dos modelos *Taut-Leg* com boia e *Taut-Leg* com peso em relação ao modelo *Taut-Leg* tradicional.

Tabela 6-2.Comprimento das Linhas de Ancoragem – Linha 1

Tipo de Ancoragem	Comprimento da Linha (m)	Diferença em %
<i>Taut-Leg</i> Tradicional	2889.7	-
<i>Taut-Leg</i> com Boia	2599.4	-10
<i>Taut-Leg</i> com Peso	2609.5	-9.7

6.2.2 Pré-Tração Inicial

A pré-tração consiste na tração submetida às linhas de ancoragem no momento em que a plataforma se encontra em posição de projeto. Ela possui fundamental importância na manutenção da UF em sua posição de equilíbrio. Valores muito elevados de pré-tração elevam o custo da implantação do sistema *offshore*, uma vez que, desta forma, haveria a necessidade de guinchos mais potentes para o pagamento e recolhimento destas linhas. Em razão disto, busca-se trabalhar com os menores valores de pré-tração possível, sem colocar em risco a integridade do sistema flutuante.

A Tabela 6-3 mostra os valores de pré-tração aplicados à plataforma para os três tipos de ancoragem e a diferença percentual dos modelos com boia e peso para o modelo tradicional.

Tabela 6-3. Pré-Tração Inicial - Linha 1

Condição de Projeto	Tipo de Ancoragem	Pré-Tração (kN)	Diferença em %
Intacto	<i>Taut-Leg</i>	3380.8	-
	<i>Taut-Leg</i> com Boia	2951.2	-12.7
	<i>Taut-Leg</i> com Peso	2914.1*/ 3338.9	-13.8* / -1.28

* *Taut-Leg* com peso: valor da pré-tração inicial desconsidera o peso, sendo este o responsável posteriormente por atingir o nível de pré-tração estabelecido no projeto.

6.3 Resultados Estatísticos

6.3.1 Tração Máxima Extrema

Após o tratamento estatístico das séries temporais de tração, foram obtidas as respectivas trações extremas em cada linha de ancoragem e comparadas com o valor de referência (60% do MBL para sistema intacto). O MBL utilizado como valor de referência foi o menor valor dentre os MBL's dos componentes pertencentes às linhas de ancoragem, como pode-se observar na Tabela 6-4. Nesta mesma tabela é apresentado o valor admissível de referência da tração máxima.

Tabela 6-4. MBL dos materiais utilizados nas linhas de ancoragem

Material	MBL (kN)	60% MBL (kN)
Amarra	12420	7452
Cabo de Aço	12910	7746
Poliéster	12753	7651.8

A Tabela 6-2, Tabela 6-3 e Tabela 6-4 apresentam os valores encontrados para

tração extrema em cada linha dos sistemas de ancoragem e a relação em porcentagem entre estes e os seus respectivos MBL's.

Tabela 6-5. *Trações Máximas Extremas nas linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg Convencional*

Linhas	Tração Máxima (kN)	% MBL
1	3894.20	31.4
2	3834.70	30.9
3	3780.40	30.4
4	3730.50	30.0
5	3683.30	29.7
6	3642.80	29.3
7	3877.10	31.2
8	3927.90	31.6
9	3984.60	32.1
10	4046.50	32.6
11	4115.00	33.1
12	4187.60	33.7
13	6190.60	49.8
14	6288.40	50.6
15	6376.70	51.3
16	6459.00	52.0
17	6533.90	52.6
18	6607.20	53.2
19	6890.60	55.5
20	6796.30	54.7
21	6685.90	53.8
22	6562.90	52.8
23	6435.20	51.8
24	6292.30	50.7

Tabela 6-6. Trações Máximas Extremas nas linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg
com Boia

Linhas	Tração Máxima (kN)	% MBL
1	3740.70	30.1
2	3710.70	29.9
3	3680.90	29.6
4	3652.00	29.4
5	3622.60	29.2
6	3593.90	28.9
7	3766.90	30.3
8	3817.00	30.7
9	3868.00	31.1
10	3919.30	31.6
11	3971.70	32.0
12	4027.40	32.4
13	6270.30	50.5
14	6330.00	51.0
15	6390.10	51.5
16	6444.60	51.9
17	6494.70	52.3
18	6541.00	52.7
19	6754.10	54.4
20	6658.30	53.6
21	6562.00	52.8
22	6460.50	52.0
23	6356.20	51.2
24	6246.60	50.3

Tabela 6-7. Trações Máximas Extremas nas linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg com Peso

Linhas	Tração Máxima (kN)	% MBL
1	4344.30	35.0
2	4312.20	34.7
3	4281.90	34.5
4	4249.70	34.2
5	4219.90	34.0
6	4191.20	33.7
7	4085.10	32.9
8	4145.60	33.4
9	4205.90	33.9
10	4265.10	34.3
11	4326.90	34.8
12	4388.40	35.3
13	6802.50	54.8
14	6843.50	55.1
15	6902.40	55.6
16	6953.90	56.0
17	7001.60	56.4
18	7053.90	56.8
19	7302.80	58.8
20	7197.10	57.9
21	7075.20	57.0
22	6957.00	56.0
23	6834.10	55.0
24	6673.30	53.7

Verifica-se que os maiores valores encontrados para as trações extremas nas linhas de ancoragem foram na linha 19 e os três modelos analisados apresentaram trações máximas inferiores a máxima tração admissível de 7452 kN, conforme Tabela 6-4.

Vale ressaltar que para o modelo *Taut-Leg tradicional* e o modelo *Taut-Leg com peso*, às trações máximas foram obtidas no topo das linhas, já para o modelo *Taut-Leg com boia*, as trações máximas foram obtidas e devem ser sempre investigadas no ponto imediatamente abaixo da mesma, conforme explicado na seção 5.3.

A combinação de carregamentos ambientais que mais solicitou o sistema de ancoragem foi a 44, aquela cuja correnteza teve período de retorno de 10 anos e direção indo para oés-noroeste e onda e vento com período de retorno de 100 anos e direção vindo de sudeste.

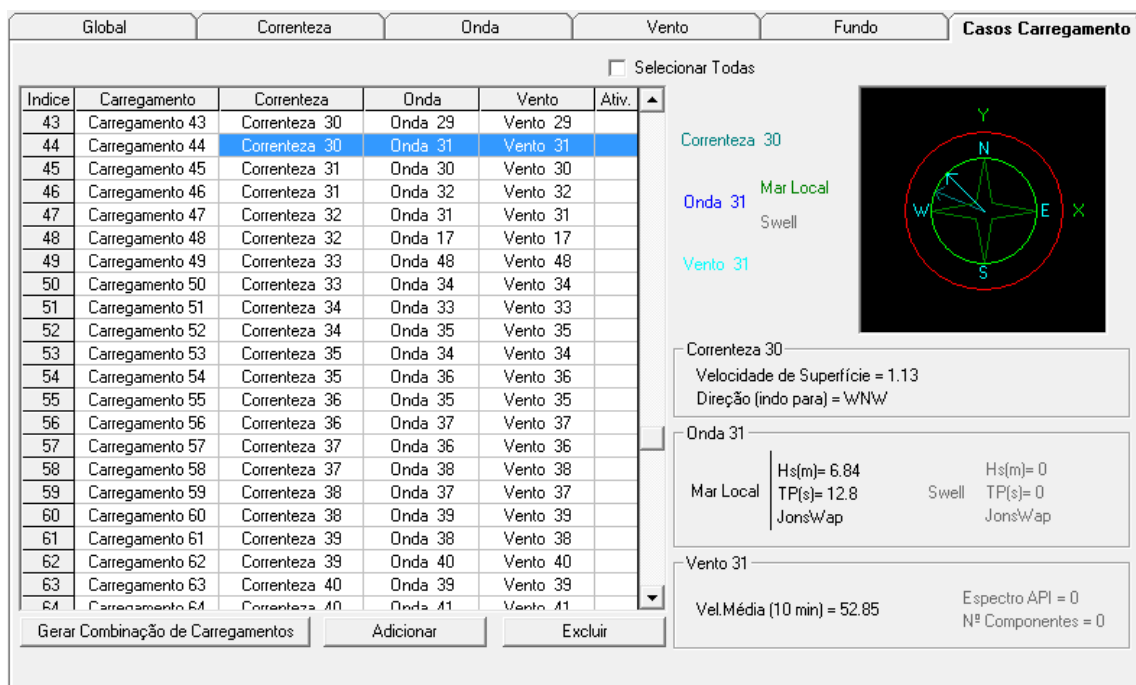


Figura 6.2- Combinação de Carregamento Predominante

6.3.2 Tração Mínima Extrema

Conforme descrito na seção 5.4.3, há uma limitação da tração mínima para cabos de poliéster de 5% do MBL da linha. A Tabela 6-8 apresenta o valor de tração mínimo admissível, tomando como base o valor do MBL do poliéster.

Tabela 6-8. Tração Mínima Admissível

Material	MBL (kN)	5% do MBL (kN)
Poliéster	12753	637.65

A Tabela 6-9 Tabela 6-10 e Tabela 6-11 apresentam os valores extremos de tração mínima encontrados e a relação em porcentagem entre estes e os seus respectivos MBL's.

Tabela 6-9. Trações Mínimas Extremas nas linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg

Convencional

Linhas	Tração Mínima (kN)	% MBL
1	874.70	6.9
2	840.75	6.6
3	811.49	6.4
4	785.49	6.2
5	763.12	6.0
6	744.20	5.8
7	844.68	6.6
8	871.27	6.8
9	901.48	7.1
10	936.50	7.3
11	977.33	7.7
12	1022.20	8.0
13	2604.40	20.4
14	2660.90	20.9
15	2712.10	21.3
16	2762.70	21.7
17	2808.60	22.0
18	2855.90	22.4
19	2718.90	21.3
20	2684.90	21.1
21	2640.00	20.7
22	2573.70	20.2
23	2501.30	19.6
24	2426.10	19.0

Tabela 6-10. Trações Mínimas Extremas nas linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg
com Boia

Linhas	Tração Mínima (kN)	% MBL
1	915.57	7.2
2	887.23	7.0
3	860.83	6.8
4	837.83	6.6
5	815.29	6.4
6	794.94	6.2
7	822.76	6.5
8	853.39	6.7
9	883.31	6.9
10	916.32	7.2
11	952.95	7.5
12	992.36	7.8
13	2877.80	22.6
14	2902.90	22.8
15	2927.90	23.0
16	2952.70	23.2
17	2978.20	23.4
18	3004.00	23.6
19	2846.50	22.3
20	2792.70	21.9
21	2738.20	21.5
22	2682.50	21.0
23	2626.60	20.6
24	2569.40	20.1

Tabela 6-11. Trações Mínimas Extremas nas Linhas de Ancoragem – Modelo Taut-Leg
com Peso

Linhas	Tração Mínima (kN)	% MBL
1	913.25	7.2
2	876.53	6.9
3	844.14	6.6
4	813.16	6.4
5	782.71	6.1
6	759.19	6.0
7	647.45	5.1
8	674.96	5.3
9	707.20	5.5
10	741.44	5.8
11	779.91	6.1
12	822.69	6.5
13	2965.40	23.3
14	2980.10	23.4
15	3005.10	23.6
16	3028.90	23.8
17	3053.30	23.9
18	3077.80	24.1
19	2700.40	21.2
20	2651.50	20.8
21	2580.70	20.2
22	2508.00	19.7
23	2435.00	19.1
24	2361.10	18.5

De acordo com a *Figura 5.4*, *Figura 5.8* e *Figura 5.12*, é possível afirmar que os valores de tração diminuem conforme a proximidade das linhas com o fundo do mar, portanto, os valores de tração mínima foram obtidos na extremidade inferior do segmento correspondente ao poliéster, como ilustrado na *Figura 6.3*.

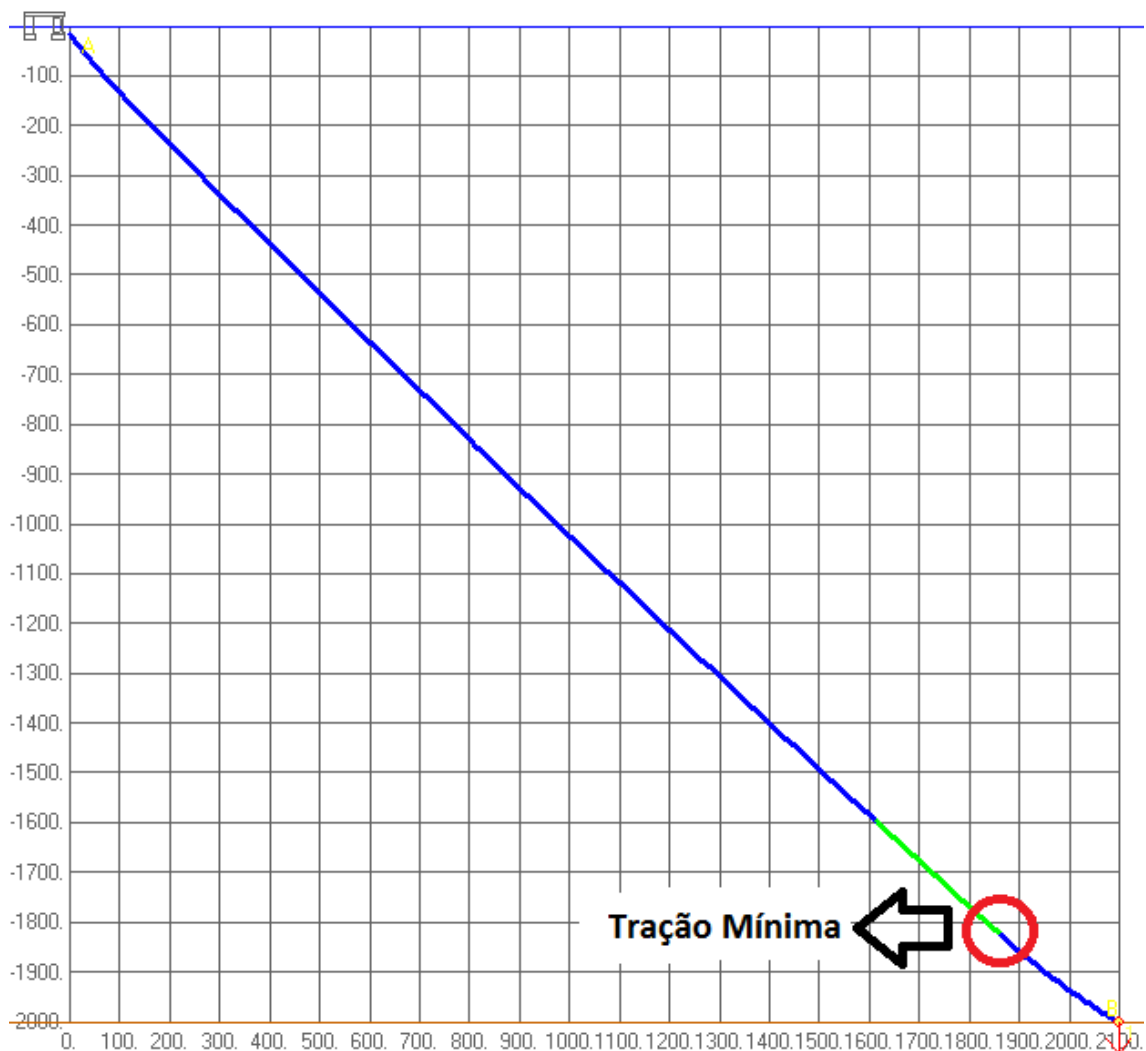


Figura 6.3- Tração Mínima – Modelo Taut Leg

Como pode ser observado nas tabelas apresentadas, os valores extremos obtidos para a tração mínima se encontram na linha 6 para os modelos de ancoragem tipo *Taut-Leg* tradicional e tipo *Taut-Leg* com boia, já para o modelo de ancoragem tipo *Taut-Leg* com peso a tração mínima foi obtida na linha 7. Os valores extremos encontrados para a tração mínima são superiores ao valor mínimo admissível de 637.65 kN.

A combinação de carregamento onde foram encontradas as trações mínimas para a ancoragem tipo *Taut-Leg* tradicional e *Taut-Leg* com boia foi à combinação 17, já para a ancoragem tipo *Taut-Leg* com peso a combinação 44 foi a que apresentou as trações mínimas na linha.

6.3.3 Passeio Máximo Extremo

A verificação do máximo passeio permitido é feita de acordo com a norma API RP 2SK [3] e é descrita na seção 5.4.1. Da mesma forma que a verificação das trações máximas é realizada um tratamento estatístico da série temporal dos movimentos da embarcação e os valores extremos são encontrados e comparados com valores pré-definidos em projeto (percentual da lâmina d'água). A Tabela 6-12 mostra o máximo valor admissível para o passeio da plataforma levando em consideração a lâmina d'água de 2000m e a utilização de *risers* flexíveis.

Tabela 6-12. *Passeio Máximo Admissível*

Tipo de <i>Riser</i>	Offset Admissível % LDA	Offset Admissível (m)
<i>Riser</i> Flexível	10% - 15%	200 - 300

A Tabela 6-13 apresenta os valores extremos de passeio da embarcação encontrados e a relação em porcentagem entre estes e a lâmina d'água.

Tabela 6-13. *Valores Extremos Encontrados para o Passeio – Sistema Intacto*

Condição de Projeto	Tipo de Ancoragem	Passeio (m)	% Lâmina d'água
Intacto	<i>Taut-Leg</i>	62.6	3.13
	<i>Taut-Leg</i> com Boia	61.8	3.09
	<i>Taut-Leg</i> com Peso	62.7	3.13

Os valores extremos encontrados para os passeios de todos os sistemas de ancoragem utilizados encontram-se dentro dos limites impostos pelos critérios de projeto (200m).

6.4 Análise de Condição de Avaria

Através da seção 6.2.1 foi constatado que para a condição intacta a linha que apresenta a maior tração atuante, foi à linha 19. Desta forma, para a análise do sistema de ancoragem em condição de avaria, esta linha é retirada do modelo numérico com o intuito de caracterizar o seu rompimento, e posteriormente realizar uma nova simulação dinâmica com a incidência da combinação de carregamento que mais solicitou a estrutura (combinação de carregamento 44).

De acordo com a seção 4.3.2 a condição de avaria considera o rompimento das duas linhas mais tracionadas. De acordo com as tabelas 6.2, 6.3 e 6.4 a segunda linha

que apresentou os maiores níveis de tração foi à linha 20, para esta análise também foi considerada a combinação de carregamento 44.

Para o caso de rompimento da linha mais tracionada os critérios de projeto exigem que o sistema seja redundante, ou seja, mesmo após o rompimento o sistema deve conter uma reserva suficiente para suportar esta condição, deste modo, deve ser avaliada a nova posição de equilíbrio da unidade flutuante, a fim de evitar danos aos *risers* e equipamentos submarinos. Quando há o rompimento da segunda linha mais tracionada a avaliação consiste em verificar a tração na linha mais tracionada e compará-la com os valores estipulados em norma, ambos os casos são avaliados a seguir.

6.4.1 Rompimento da linha mais tracionada

Conforme dito anteriormente foi realizada uma nova simulação dinâmica dos modelos acoplados considerando o rompimento da linha mais tracionada (linha 19), mostrada *Figura 6.4*, obtendo uma nova série temporal de movimentos da plataforma.

Após o tratamento estatístico da mesma, foram obtidos os valores extremos e comparados com valores pré-definidos em projeto conforme Tabela 6-12 da seção 6.2.3.

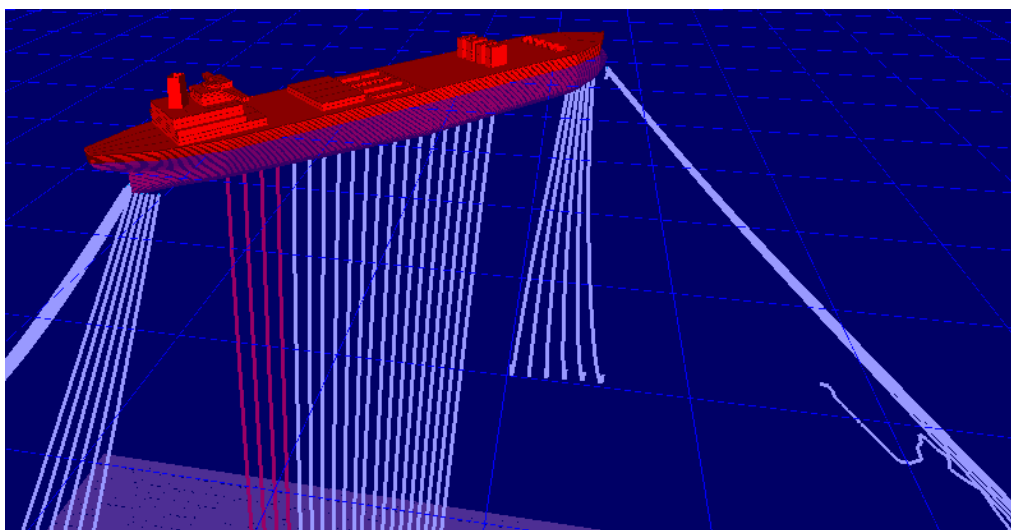


Figura 6.4- Modelo Representando Rompimento da Linha mais Tracionada

A Tabela 6-14 apresenta os valores extremos de passeio da embarcação para o sistema avariado e a relação em porcentagem entre estes e a lâmina d'água.

Tabela 6-14. Valores Extremos Encontrados para o Passeio – Sistema Avariado

Tipo de Ancoragem	Passeio (m)	% Lâmina d'água
<i>Taut-Leg</i>	71.24	3.56
<i>Taut-Leg com Boia</i>	70.26	3.51
<i>Taut-Leg com Peso</i>	70.49	3.52

Os valores extremos encontrados para os passeios de todos os sistemas de ancoragem na condição de avaria encontram-se dentro dos limites impostos pelos critérios de projeto (200m).

6.4.2 Rompimento da Segunda Linha mais Tracionada

Para a condição de avaria onde temos o rompimento da segunda linha mais tracionada do sistema, foi realizado o mesmo procedimento explicado na seção anterior, porém desta vez as análises dinâmicas consideram o rompimento da linha 20.

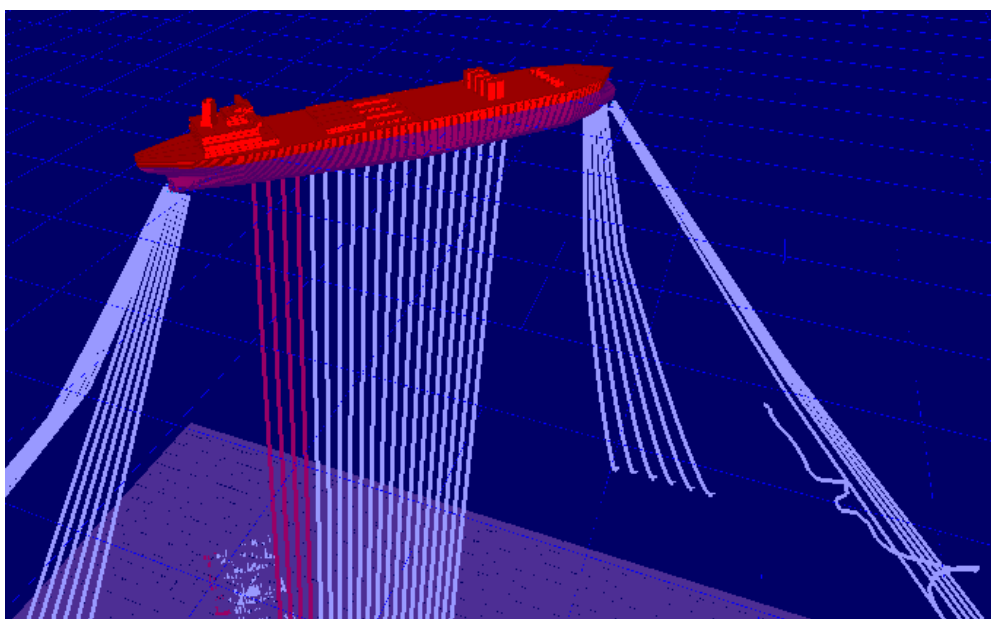


Figura 6.5- Modelo Representando Rompimento da Segunda Linha mais Tracionada

Após o tratamento estatístico das séries temporais de tração, foram obtidas as respectivas trações extremas em cada linha de ancoragem e comparadas com o valor de referência (80% do MBL para sistema avariado). Assim como na seção 6.2.1 o MBL utilizado como valor de referência foi o menor valor dentre os MBL's dos componentes pertencentes às linhas de ancoragem, a Tabela 6-15 apresenta o MBL dos materiais utilizados e o valor máximo admissível para a condição de avaria.

Tabela 6-15. *MBL dos materiais utilizados nas linhas de ancoragem – Sistema Avariado*

Material	MBL (kN)	80% MBL (kN)
Amarra	12420	9936
Cabo de Aço	12910	10328
Poliéster	12753	10202.4

A Tabela 6-16 Tabela 6-17 e Tabela 6-18 apresentam os valores encontrados para tração extrema em cada linha dos sistemas de ancoragem e a relação em porcentagem entre estes e os seus respectivos MBL's para a condição de avaria.

Tabela 6-16. Trações Máximas Extremas nas linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg
Convencional (Condição de Avaria)

Linhas	Tração Máxima (kN)	% MBL
1	3465	27.9
2	3406.2	27.43
3	3351.7	26.99
4	3304.1	26.6
5	3260.7	26.25
6	3223.4	25.95
7	3003.2	24.18
8	3017.5	24.3
9	3037.3	24.45
10	3061.3	24.65
11	3091.1	24.89
12	3124.8	25.16
13	5551.9	44.7
14	5714.4	46.01
15	5872.7	47.28
16	6025.8	48.52
17	6171.1	49.69
18	6315.5	50.85
19	7719.4	62.15
20	-	-
21	7503.3	60.41
22	7380.3	59.42
23	7251.6	58.39
24	7086.1	57.05

Tabela 6-17. Trações Máximas Extremas nas linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg com Boia (condição de avaria)

Linhas	Tração Máxima (kN)	% MBL
1	3230.8	26.0
2	3198.1	25.7
3	3167.3	25.5
4	3139.1	25.3
5	3110.9	25.0
6	3085	24.8
7	2756.6	22.2
8	2769.8	22.3
9	2784.7	22.4
10	2801	22.6
11	2817.5	22.7
12	2837.1	22.8
13	5585.3	45.0
14	5710.2	46.0
15	5834.4	47.0
16	5958.1	48.0
17	6076.3	48.9
18	6197.8	49.9
19	7533.6	60.7
20	-	-
21	7339.3	59.1
22	7237	58.3
23	7128.5	57.4
24	7014.5	56.5

Tabela 6-18. Trações Máximas Extremas nas linhas de ancoragem – Modelo Taut-Leg com Peso (Condição de Avaria)

Linhas	Tração Máxima (kN)	% MBL
1	3886.8	31.3
2	3850.1	31.0
3	3816.9	30.7
4	3782.3	30.5
5	3751.6	30.2
6	3724.5	30.0
7	3221.3	25.9
8	3247.5	26.1
9	3274.7	26.4
10	3300.9	26.6
11	3330	26.8
12	3359.9	27.1
13	6204.7	50.0
14	6322.8	50.9
15	6448.2	51.9
16	6563.5	52.8
17	6687.8	53.8
18	6803.7	54.8
19	8103.4	65.24
20	-	-
21	7827.1	63.0
22	7696.3	62.0
23	7573.2	61.0
24	7443.6	59.9

Verifica-se que os maiores valores encontrados para as trações extremas nas linhas de ancoragem foram na linha 19, e os três modelos analisados apresentaram trações máximas inferiores a máxima tração admissível de 9936 kN, conforme estipulado na norma e mostrado na Tabela 6-15.

6.4.3 Identificação de Linha Rompida

Após as análises descritas nas seções anteriores, verificou-se que todos os modelos atenderam aos critérios de projeto para a condição de avaria segundo a norma API RP 2SK, porém para manter o sistema flutuante funcionando de forma segura é essencial a rápida identificação e manutenção de eventuais casos em que haja o rompimento de linha. A identificação de linha rompida em uma unidade flutuante não é tarefa fácil.

Cabe recordar, conforme descrito no item 5.3.1, que a ancoragem do tipo *Taut-Leg* com boia apresenta uma vantagem adicional neste contexto, pois facilita a identificação visual do rompimento de qualquer linha do sistema de maneira quase instantânea.

Para tal, ela deve ser projetada de maneira que o comprimento de linha da boia até a âncora seja maior que a lâmina d'água para em caso de rompimento da linha a boia emerja e atinja a superfície, é importante salientar também que o empuxo gerado pela boia deve ser maior que o peso da linha para que a boia alcance a superfície.

A *Figura 6.6*, *Figura 6.7* e *Figura 6.8* mostram a evolução no tempo do evento que caracteriza o rompimento da linha em uma região acima da boia.

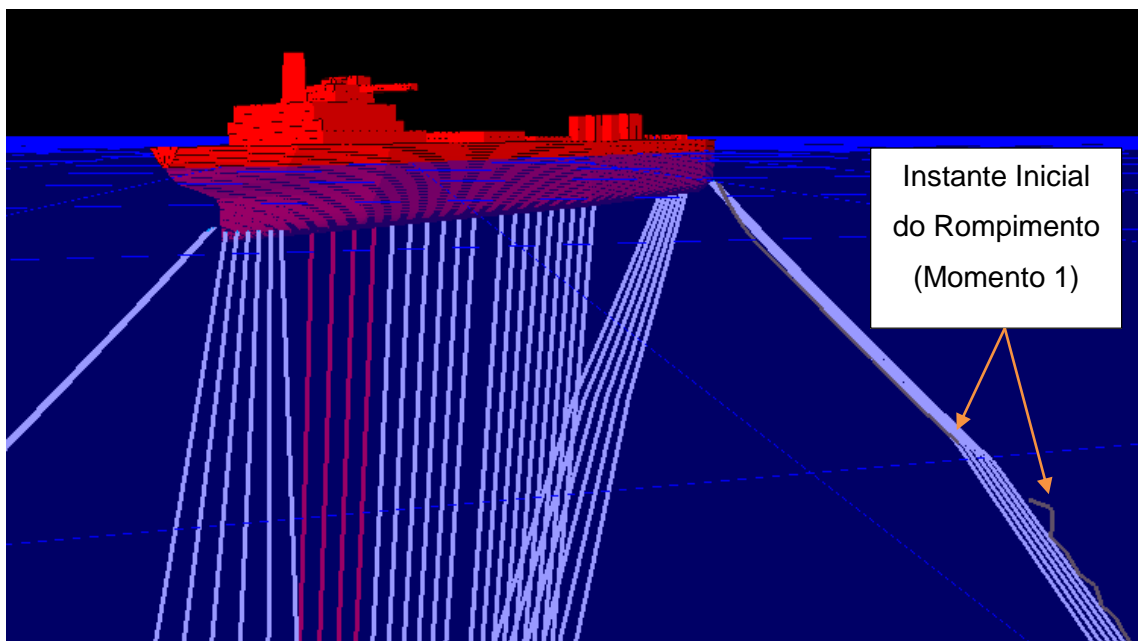


Figura 6.6- Rompimento de Linha Acima da Boia – Momento 1

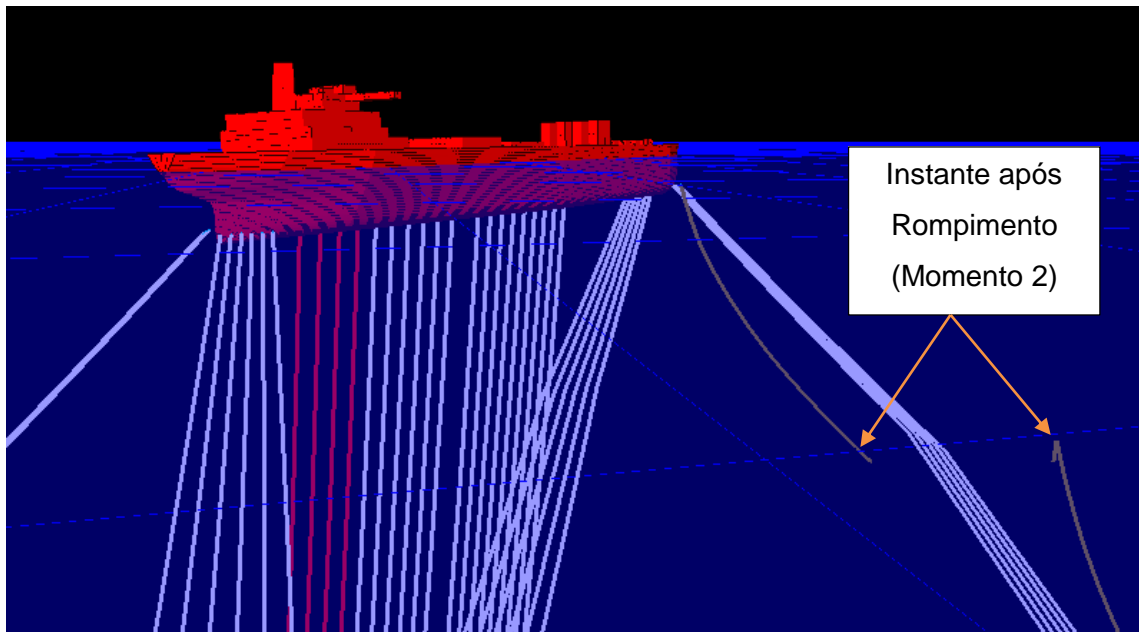


Figura 6.7- Rompimento de Linha Acima da Boia – Momento 2

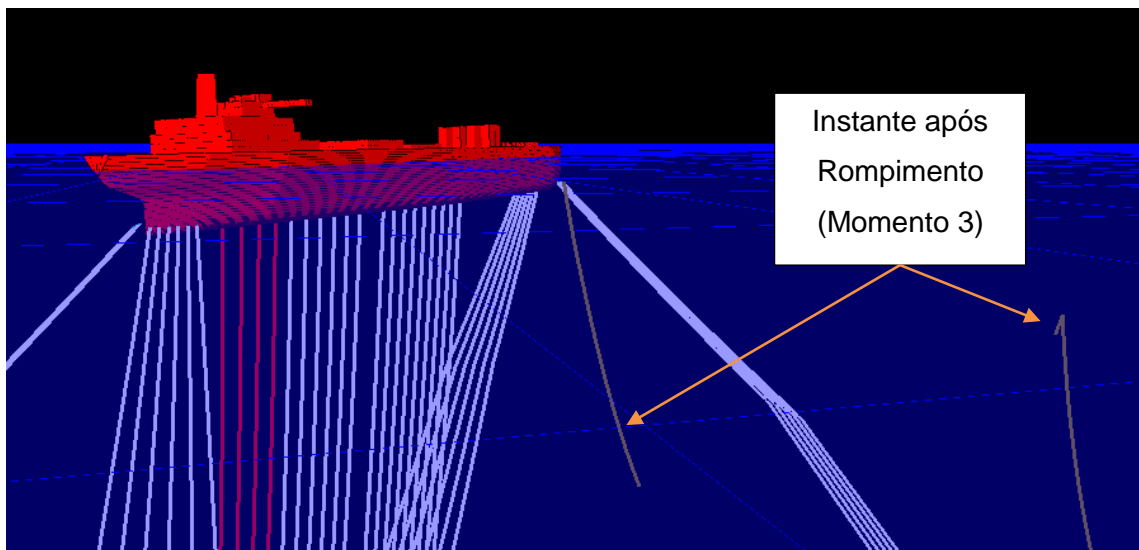


Figura 6.8- Rompimento de Linha Acima da Boia – Momento 3

A *Figura 6.9* ilustra a emersão da boia até a superfície, fato este que possibilitará a identificação visual do rompimento da linha de ancoragem.

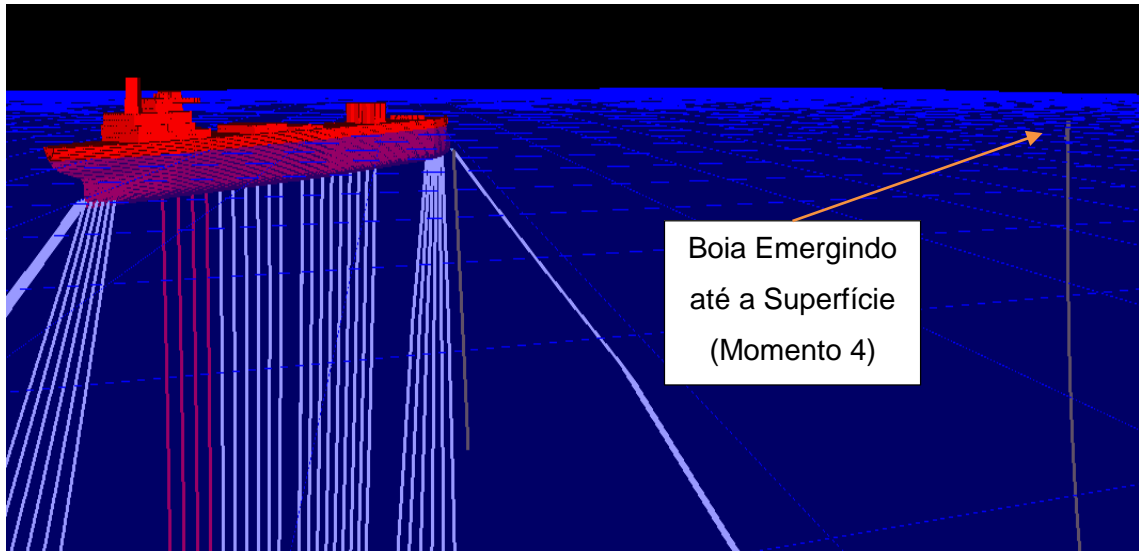


Figura 6.9- Rompimento de Linha Acima da Boia – Momento 4

Foi simulado também o caso em que há o rompimento da linha em uma posição abaixo da boia. A *Figura 6.10*, *Figura 6.11* e *Figura 6.12* mostram a evolução no tempo do evento que caracteriza o rompimento da linha em uma região abaixo da boia.

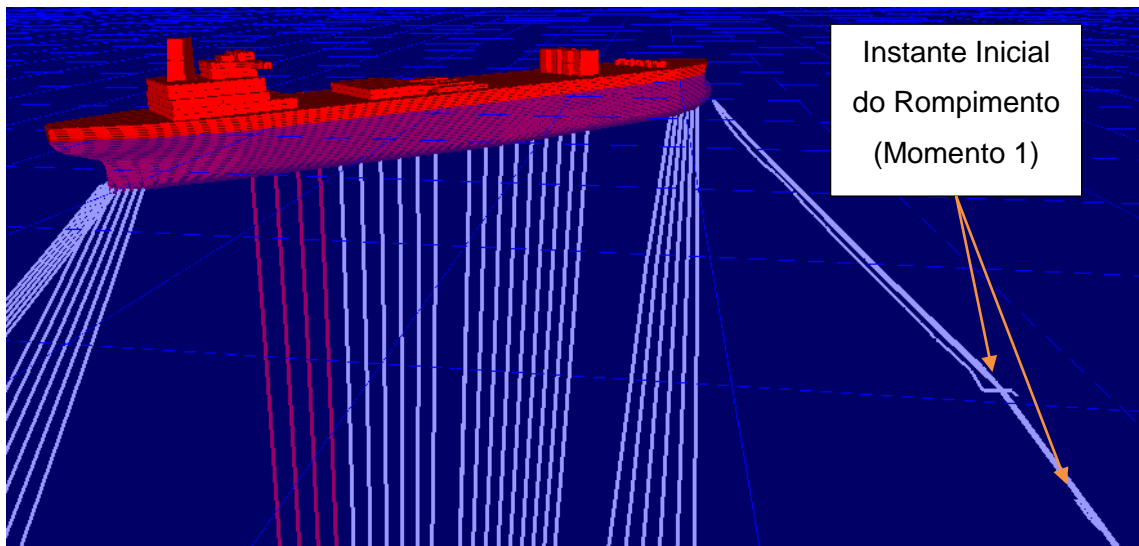


Figura 6.10- Rompimento de Linha Abaixo da Boia – Momento 1

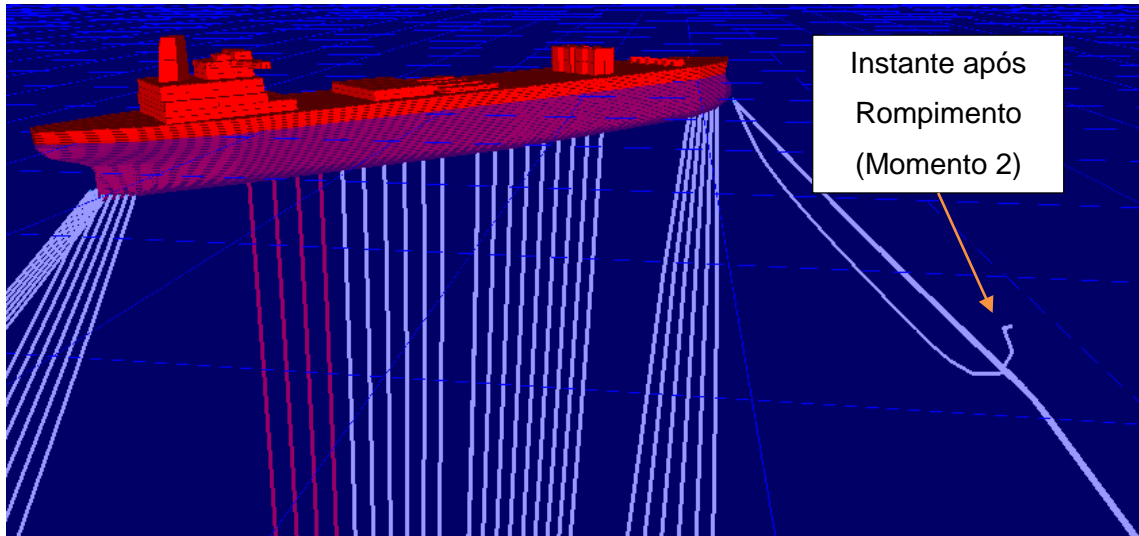


Figura 6.11- Rompimento de Linha Abaixo da Boia – Momento 2

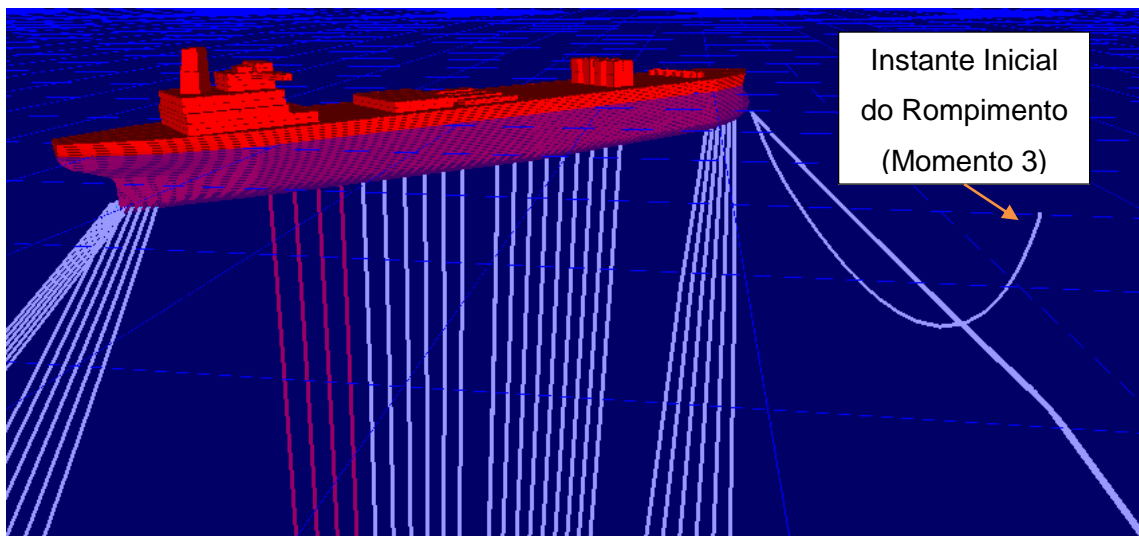


Figura 6.12- Rompimento de Linha Abaixo da Boia – Momento 3

A Figura 6.13 ilustra a emersão da boia até a superfície.

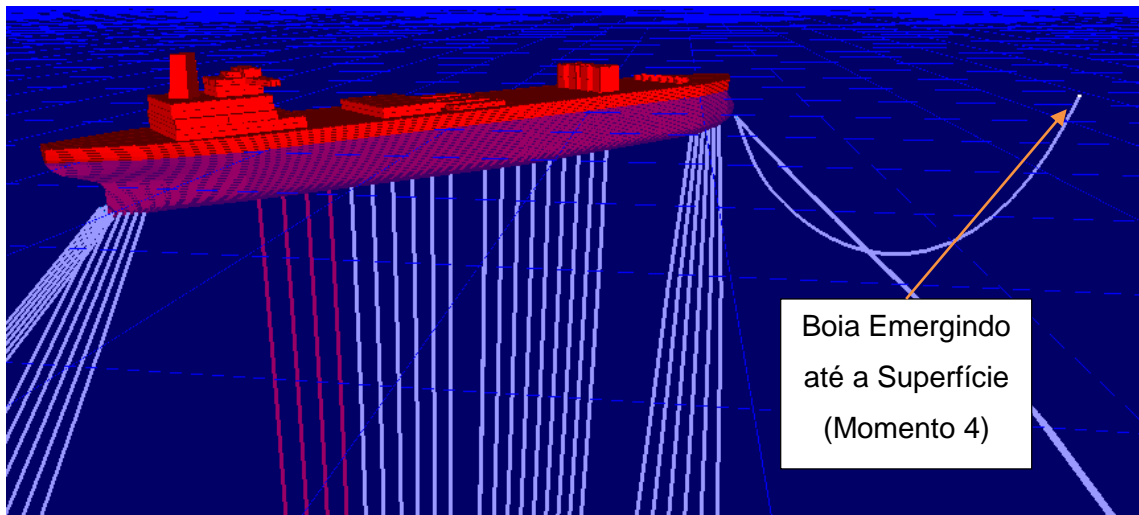


Figura 6.13- Rompimento de Linha Abaixo da Boia – Momento 4

6.5 Análise de Inundação da Boia

Uma importante questão que deve ser analisada quando se propõe a utilização de uma ancoragem com boia é a falha da mesma. Nesta seção serão avaliadas as consequências da perda da boia por inundação em uma das linhas. A linha escolhida para a inundação da boia foi a linha 19, *Figura 6.14*. Os dados referentes à boia inundada podem ser encontrados na Tabela 6-19.

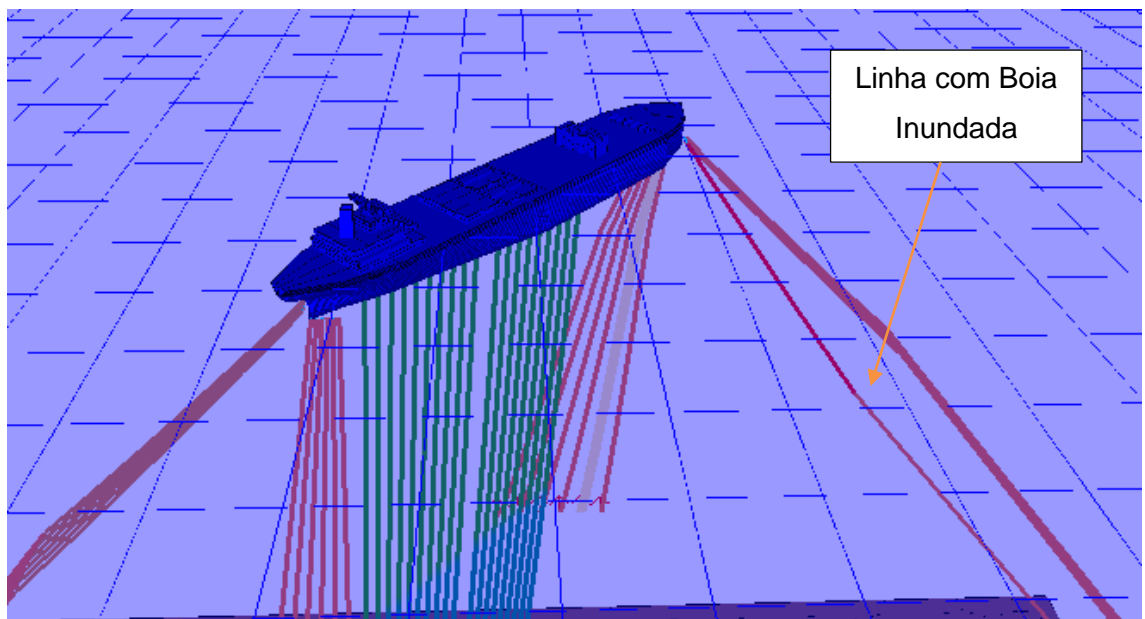


Figura 6.14- Modelo Representando a Inundação da boia (Linha 19)

Tabela 6-19. *Características Físicas e Geométricas – Boia Inundada*

Nome	Comp. (m)	Diâm. Ext. (m)	Diâm. Hidro. (m)	Coef. Poisson	EA (kN)	MBL (kN)	P Ar (kN/m)	P Ag (kN/m)	CD
Boia Inundada	12.56	10.59	10.59	0.30	200000	2442.69	128.0	111.3	1.2

Da mesma forma que para as análises anteriores, foram realizadas simulações dinâmicas de modelos com formulação acoplada no domínio do tempo, e através do tratamento estatístico das séries temporais de tração e de movimento da unidade flutuante foi verificada a influência que a falha por inundação da linha mais tracionada exercerá no sistema de ancoragem. A Tabela 6-20 apresenta as trações extremas do modelo apresentando uma boia inundada e o percentual dos valores encontrados com relação a 60% do MBL da linha.

Tabela 6-20. Trações Máximas Extremas – Boia Inundada

Linhas	Tração Máxima (kN)	% MBL
1	3369	27.1
2	3350.9	27.0
3	3333.5	26.8
4	3318.1	26.7
5	3303.8	26.6
6	3290.8	26.5
7	3019.5	24.3
8	3033.4	24.4
9	3048	24.5
10	3063	24.7
11	3078.2	24.8
12	3096.1	24.9
13	5751.9	46.3
14	5863.8	47.2
15	5971.3	48.1
16	6076.9	48.9
17	6179.7	49.8
18	6282.2	50.6
19	6763.6	58.1
20	6652	53.6
21	6554.9	52.8
22	6454.1	52.0
23	6349.6	51.1
24	6239.8	50.2

Considerando que, a boia correspondente à linha 19 perdeu sua função, a análise da tração máxima extrema foi realizada no topo desta linha, conforme ilustrado na *Figura 6.15*, enquanto que nas demais linhas a análise foi realizada abaixo da boia por ser a região que apresenta maiores valores de tração, conforme mostrado na seção 5.3.

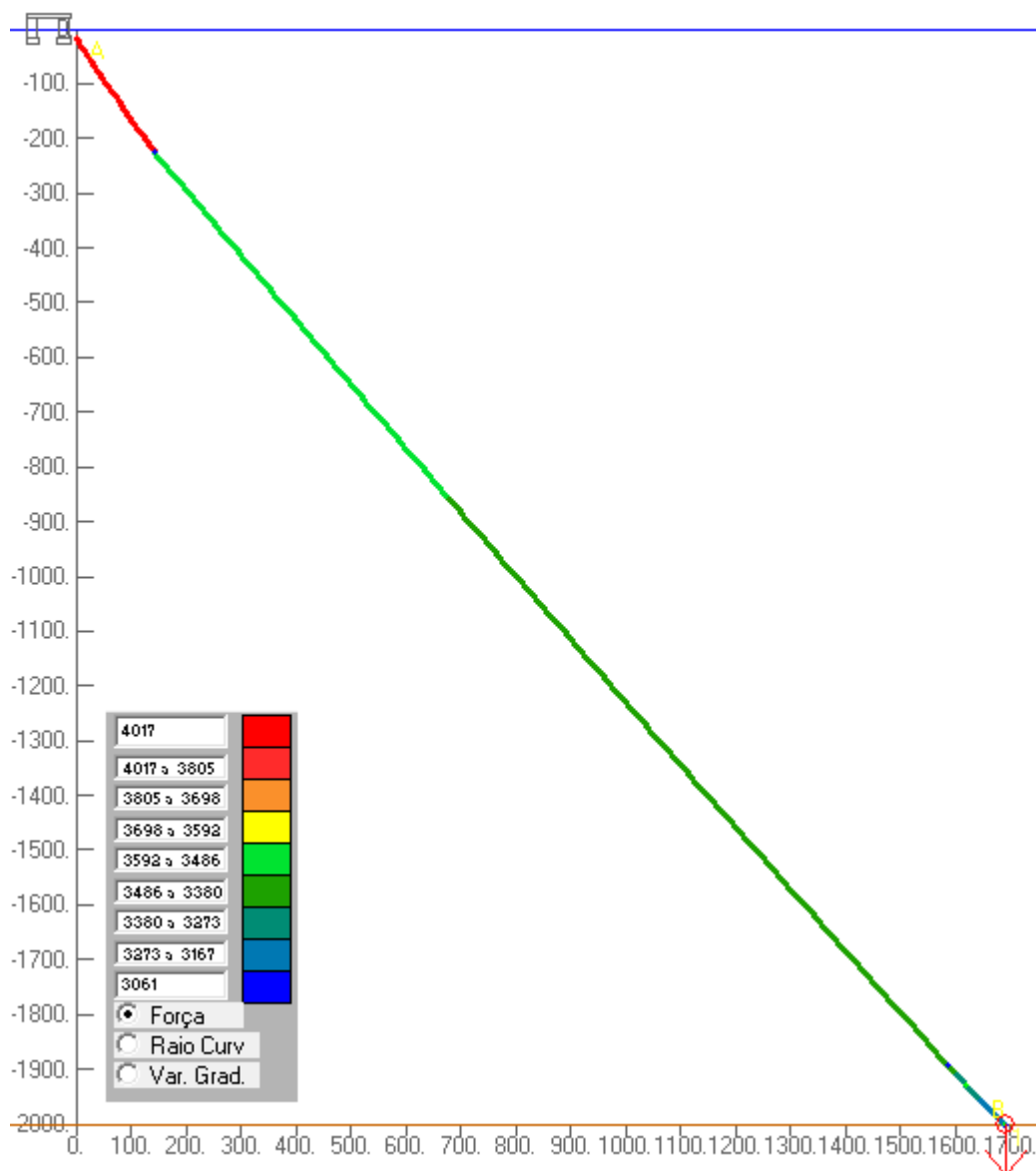


Figura 6.15- Modelo Inundação da boia – Trações na Linha

Verifica-se que, os maiores valores encontrados para as trações extremas nas linhas de ancoragem do modelo com a boia inundada, apresentou valores inferiores a máxima tração admissível de 7452 kN, estipulada na Tabela 6-4.

A Tabela 6-21 mostra os resultados encontrados para o passeio extremo da unidade flutuante considerando a inundação da boia na linha 19. Observa-se que os valores encontrados para o passeio da unidade flutuante não sofreram grandes alterações em relação ao modelo intacto.

Tabela 6-21. Passeio Máximo Extremo – Boia Inundada

Condição de Projeto	Tipo de Ancoragem	Passeio (m)	% Lâmina d'água
Boia Inundada	Taut-Leg com Boia	61.81	3.1

A inundação da boia não prejudicou o atendimento dos critérios de projeto estipulados na norma API RP 2SK. Porém o critério de projeto adicional proposto nesta dissertação fica comprometido, já que com a inundação da boia não há a possibilidade de identificação de linha rompida, como observa-se na *Figura 6.16*.

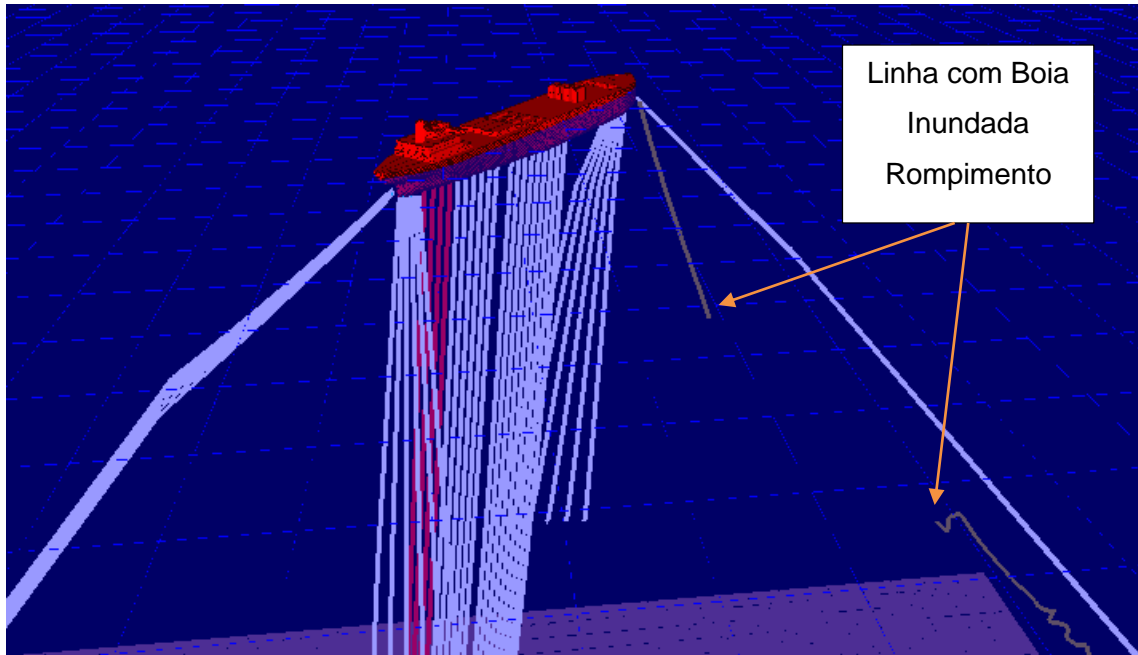


Figura 6.16- Modelo Inundação da boia – Rompimento

7 Conclusões

7.1 Conclusões do trabalho proposto

Esta dissertação teve por objetivo estudar duas variações da ancoragem tipo Taut-Leg em um sistema com Quadro de Ancoragem (Spread Mooring) em lâmina d'água profunda. Para tal, foi proposta a utilização de sistema de ancoragem Taut-Leg com boia e um sistema de ancoragem Taut-Leg com peso, com o intuito de otimizar parâmetros tais quais raio de ancoragem e pré-tração inicial aplicada na linha.

Foram realizadas análises acopladas no domínio do tempo dos dois tipos de ancoragens citados acima, além de uma ancoragem tipo Taut-Leg tradicional. Os modelos estudados foram apresentados no capítulo 5 e os resultados das análises são mostrados no capítulo 6. Dito isto, os parágrafos subsequentes exibem os comentários a respeito do estudo realizado e identificam as vantagens e desvantagens de cada tipo de ancoragem.

Verificaram-se através dos resultados obtidos que todos os critérios de projeto foram atendidos para os três modelos estudados (tanto para a condição de avaria quanto para a condição intacta), apresentando resultados semelhantes. Desta forma, tornou-se possível a comparação entre tais modelos estudados, identificando as vantagens e desvantagens de cada configuração.

Vale ressaltar que para a condição de avaria o modelo que apresentou maiores valores extremos de tração foi o *Taut-Leg* com peso, com 65.24% do MBL da linha, nível de tração bem inferior ao máximo estipulado pela norma para esta condição (80% do MBL). Desta maneira, recomenda-se uma discussão da necessidade de coeficientes de segurança tão rigorosos para a tração máxima e mínima de um sistema intacto Taut-Leg com poliéster. O estabelecimento de valores mais apropriados para estes coeficientes poderá aprimorar projetos de sistemas de ancoragem, podendo reduzir o número de linhas, e o custo do sistema de ancoragem.

Com relação à ancoragem tipo *Taut-Leg* com boia, foi verificada uma redução no raio de ancoragem de 19.9% (417.9 metros) e uma redução na pré-tração de 12.7% (429.6 kN) em relação à ancoragem tipo *Taut-Leg* tradicional, atendendo aos objetivos propostos no trabalho. Acrescenta-se ainda à ancoragem tipo *Taut-Leg* com boia, a proposta de adicionar um novo critério de projeto, com o objetivo de identificar qualquer linha rompida do sistema de ancoragem, através da emersão da boia, conforme especificado na seção 6.4.3.

A ancoragem tipo *Taut-Leg* com peso apresentou uma redução do raio de ancoragem de 19.8% (416 metros) e uma redução da pré-tração inicial aplicada as linhas de ancoragem de 13.8% (466.7 kN) em relação a ancoragem tipo *Taut-Leg* tradicional, satisfazendo os objetivos propostos para este tipo de ancoragem. Cabe ressaltar, ainda, que o procedimento utilizado para atingir os valores de pré-tração na ancoragem tipo *Taut-Leg* com peso são realizados em duas etapas, conforme seção 5.4.3.

A redução do raio de ancoragem verificada nos modelos *Taut-Leg* com boia e *Taut-Leg* com peso permite menores comprimentos de linha, possibilitando a redução de custo devido as maiores possibilidades de arranjos submarinos. Com relação a pré-tração aplicada às linhas, valores mais baixos representam a utilização de guinchos menos potentes para o pagamento e recolhimento das linhas, liberando maior espaço no convés da plataforma e reduzindo custos referentes a estes equipamentos.

O uso do tipo de ancoragem *Taut-Leg* com boia em lâminas d'água profunda é recente e o uso da ancoragem tipo *Taut-Leg* com peso é inovador, portanto, problemas operacionais podem representar desvantagens em relação à ancoragem tipo *Taut-Leg* tradicional, já consolidada. Além disso, podem surgir dificuldades no processo de instalação e manuseio das linhas, além da fabricação dos novos componentes (boia ou peso – dependendo do tipo de ancoragem).

No âmbito deste trabalho, não foram realizados estudos de viabilidade econômica nem avaliações experimentais para consolidação destes tipos de ancoragem como uma opção tecnológica, que venha a superar a ancoragem *Taut-Leg* tradicional.

Diante do exposto nesta dissertação, conclui-se que o presente trabalho cumpriu os objetivos propostos, propondo a utilização do sistema de ancoragem boia como excelente alternativa para águas profundas e ultra profundas, visto que, proporcionará a utilização de menores valores de raio ancoragem e de pré-tração, viabilizando maiores possibilidades de arranjos submarinos e o emprego de guinchos menos potentes. Além disso, a ancoragem *Taut-Leg* com boia viabiliza a identificação de linha rompida de qualquer linha do sistema de ancoragem de maneira rápida e eficiente.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Seguindo a linha de pesquisa proposta nesta dissertação, trabalhos futuros poderão abordar os tópicos citados a seguir:

- Efetuar as análises de fadiga para as novas configurações propostas nesta dissertação.
- Estudar os efeitos da ancoragem tipo Taut-Leg com boia e tipo Taut-Leg com peso com relação à tração vertical na âncora, pois devido à nova configuração assumida pela linha haverá um aumento da tração neste local.
- Propor a utilização de uma configuração que combine o uso de boia, para atender os objetivos descritos neste trabalho junto com o uso de peso, com o intuito de diminuir a tração vertical na âncora.
- Realizar estudos paramétricos afim de quantificar o quanto a posição da boia e/ou peso influencia nas variáveis de projeto.
- Desenvolver uma ferramenta de otimização da ancoragem tipo *Taut-Leg* com boia e *Taut-Leg* com peso, de forma a obter maior eficiência em termos de raio de ancoragem e trações na linha, tomando como variáveis de projeto a pré-tração, o azimute das linhas e o posicionamento das boias.
- Realizar estudos de viabilidade econômica e avaliações experimentais para consolidação destes tipos de ancoragem como uma opção tecnológica factível.
- Analisar o projeto de ancoragem proposto conforme metodologia estabelecida pelo Projeto Integrado de Linhas de Ancoragem e *Risers*, mencionado na seção 4.5.

8 Referência Bibliográfica

- [1] GIRÓN, A. R. C., *Aplicação de Metodologia de Projeto Integrado de Sistemas de Ancoragem e Risers na Exploração Offshore*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.
- [2] SECKLER, C. S., *Metodologia Baseada em Inspeção e Retroanálise para Verificação e Ajustes de Sistemas de Ancoragem de Unidades Flutuantes de Produção Offshore*. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- [3] API RP 2 SK, *Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures*, 3rd ed., American Petroleum Institute, 2005.
- [4] LACERDA, THIAGO A. G. DE, *Análise de Sistemas de Ancoragem de Plataformas Flutuantes, Projeto Final de Graduação*, Escola Politécnica, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- [5] Arranjo Geral (Sistemas de Fundeio). Disponível em <www.oceanica.ufrj.br> Acesso em 07/02/2015
- [6] CARBONO, ALONSO J. J. *Otimização da Disposição de Linhas de Ancoragem Utilizando Algoritmos Genéticos*, Dissertação de Mestrado, PUC, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- [7] ALBRECHT, C.H., *Algoritmos Evolutivos aplicados à Síntese e Otimização de Sistemas de Ancoragem*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- [8] MONTEIRO, B. F., *Aplicação do Método do Enxame de Partículas na Otimização de Sistemas de Ancoragem de Unidades Flutuantes para Exploração de Petróleo Offshore*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- [9] ROSSI, R. R., *Cabos de Poliéster para Ancoragem de Plataformas Oceânicas em Águas Ultraprofundas*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
- [10] LIMA, A. D., *Avaliação de Formulações de Análise e Metodologias de Projeto de Sistemas de Ancoragem de Plataformas Offshore Considerando Aspectos do Projeto de Risers*. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

- [11] KAWASAKI, P. Y., *Análise de Linhas de Ancoragem de Plataformas Oceânicas Considerando Diversos Tramos e o Trecho Enterrado da Linha*. Projeto Final de Graduação, Escola Politécnica, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.
- [12] COSTA, R. G. B., *Análise Paramétrica das Condições de Ancoragem de Plataformas Offshore Utilizando Estacas Torpedo a Partir de Modelos em Elementos Finitos*. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- [13] DEGENKAMP, G., RUINEN, R., 2001, "Installation of Vertical Loaded Anchors Using a Subsea Tensioning Device in Ultra-Deepwaters in the Gulf of Mexico". In: Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, Paper 13274, Houston, Texas, 30 April - 3 May.
- [14] KUNITAKI, D. M. K. N., *Tratamento de Incertezas no Comportamento Dinâmico de Estacas Torpedo para Ancoragem de Sistemas Flutuantes na Exploração de Petróleo Offshore*. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.
- [15] 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.
- [16] FIGUEIREDO, M. W., *Estudo de Cargas em Cabeça de Poço Submarino em Operações de Completação*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.
- [17] BAHIENSE, R. A., *Implementação e Avaliação de uma Metodologia Fortemente Acoplada para Análises de Sistemas Flutuantes Offshore*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [18] ELLWANGER, G. B., LIMA, A. L., *Tópicos Básicos de Hidrodinâmica Aplicados a Estruturas Offshore*. Notas de Aula. Programa de Engenharia Civil - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. Brasil, 2007
- [19] CHAKRABARTI, S. K., *Handbook of Offshore Engineering*, 2005
- [20] BATALHA. A. F., *Análise de Fadiga de Estruturas Offshore Tipo Topside*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.
- [21] BARLTROP, N. D. P., ADAMS, A. J., *Dynamics of Fixed Marine Structures*. Third Edition.1991.

- [22] SENRA, S. F., *Metodologia de Análise e Projeto Integrado de Sistemas Flutuantes para Exploração de Petróleo Offshore*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
- [23] API RP 2A, *Recommended Practice for Planning Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design*. Twenty Second Edition, American Petroleum Institute, 2014.
- [24] DNV-OS-E301, *Position Mooring*. DNV Offshore Standard, July, 2015.
- [25] API RP 2SM, *Recommended Practice for Design, Manufacture, Installation and Maintenance of Synthetic Fiber Ropes for Offshore Mooring*. First Edition, American Petroleum Institute, March, 2001.
- [26] CORRÊA, F. N., *Ferramentas Computacionais para Análise Acoplada de Sistema Offshore*. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- [27] 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.
- [28] WAMIT, *A Radiation-Diffraction Panel Program for Wave-Body Interactions. Version 5.3*, Department of Ocean Engineering Massachusetts Institute of Technology, 1995.