

ESTUDO DE UMA NOVA CONFIGURAÇÃO DE LINHAS DE ANCORAGEM PARA PLATAFORMAS DE PETRÓLEO EM ÁGUAS PROFUNDAS

Rodrigo Moretti Kochem

Fabício Nogueira Correa

Breno Pinheiro Jacob

rodrigomk@lamcso.coppe.ufrj.br

fabicio@lamcso.coppe.ufrj.br

breno@lamcso.coppe.ufrj.br

*COPPE/UFRJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
PEC – Programa de Engenharia Civil, Cidade Universitária – Ilha do Fundão, Avenida Pedro Calmon,
S/N, CEP 21941-596, Rio de Janeiro – RJ - Brasil*

Resumo. O petróleo é o principal recurso natural utilizado para suprir a demanda da matriz energética mundial. Com o aumento progressivo para lâminas d'água cada vez maiores, obstáculos são revelados, solicitando a engenharia offshore tecnologias cada vez mais sofisticadas para lidar com essa nova realidade. Dentro desse contexto encontra-se novos desenvolvimentos relacionados ao posicionamento da unidade flutuante. O sistema de ancoragem é responsável pelo posicionamento da plataforma dentro dos limites operacionais, proporcionando segurança na exploração de petróleo. Para grandes profundidades é utilizada uma configuração da linha de ancoragem denominada configuração *Taut-Leg*, na qual as linhas se encontram retesadas e apresentam em sua composição materiais mais leves, esta configuração é composta nas extremidades por cabos de aço ou amarras e no seu trecho intermediário por cabos de poliéster. A configuração *Taut Leg* das linhas de ancoragem tem o intuito de diminuir o raio da ancoragem, garantindo maiores possibilidades de arranjos submarinos, e fornecer maior rigidez vertical a plataforma garantindo menores passeios. Este trabalho tem por objetivo estudar os efeitos de um sistema de ancoragem *spread mooring* com uma variação da configuração *Taut Leg*, que consiste em inserir um peso, propondo uma nova configuração da linha de ancoragem. Esta nova configuração, tem por objetivo diminuir 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. Para expor as vantagens e desvantagens da configuração proposta, foram realizadas análises acopladas no domínio do tempo com o intuito de comparar a configuração proposta com uma configuração *Taut Leg*. Para tal, foi utilizado o programa SITUA-PROSIM.

Palavras-chave: Sistemas de Ancoragem, Sistemas Offshore, Análise Acoplada

1 Introdução

Nas últimas décadas o petróleo tem sido um fator estratégico, político e econômico primordial para todos os países. A exploração e exploração tem atingido lâminas d'água cada vez maiores e nesse contexto novas tecnologias surgem como objeto de estudo para a viabilização nesse novo cenário.

O emprego dos sistemas offshore em lâminas d'água profundas inviabilizou a utilização de plataformas fixas, pois o período natural das mesmas se aproximou dos períodos das ondas, fato este que poderia ocasionar fenômenos como a ressonância, levando a estrutura ao colapso. Desta forma, foram desenvolvidas novas soluções para a exploração de petróleo em grandes profundidades, uma das primeiras soluções encontradas e que atualmente é uma das mais empregadas consiste na utilização de sistemas flutuantes ancorados. Kochem [1]

O primeiro tipo de ancoragem desenvolvido foi a ancoragem em catenária, que é composto por amarras e cabos de aço, utilizado em lâminas d'água até uma profundidade em torno de 500 metros. Lacerda [2]. 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 elevado peso das linhas, e raios de ancoragem muito elevados, causando problemas de arranjo submarino. Para contornar esses problemas, foi desenvolvido uma ancoragem denominada *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. Carbono [3]

Diante do exposto, 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. 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 (UF) 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.

Contextualizado pelos parágrafos anteriores, o objetivo deste trabalho consiste em propor uma configuração das linhas de ancoragem inovadora que diminua o raio de ancoragem, além de aplicar uma pré-tração menor do que a prevista em projeto, sendo esta diferença suplantada pela inserção de um peso em determinado ponto da linha, possibilitando o emprego de guinchos menos potentes. O presente trabalho é baseado na dissertação de mestrado de Kochem [1].

A inserção de peso em linhas de ancoragem foi abordada inicialmente em Finn [4], com o propósito de aumentar as forças de restauração em ancoragens em catenária para carregamentos extremos. Ji *et al* [5] apresentou um sistema de ancoragem inovador no qual a composição das linhas de ancoragem apresentava massas concentradas de diferentes pesos próxima a extremidade ancorada da linha. Esse sistema de ancoragem mostrou uma redução no passeio da plataforma, porém aumentou a tração nas linhas de ancoragem. Yuan *et al* [6] apresentou um sistema de ancoragem híbrido incluindo pesos e boias. Os efeitos da boia e do peso na dinâmica da unidade flutuante foram estudados.

2 Ancoragem de Sistemas Flutuantes

Os sistemas flutuantes ancorados de exploração ou mesmo de produção offshore, de acordo com os carregamentos ambientais (onda, corrente e vento) sofre um deslocamento horizontal denominado deriva, passeio ou offset, sendo assim, um correto dimensionamento do sistema de ancoragem de forma a manter a integridade do sistema é fundamental. Seckler [7]

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 variam de acordo com os diversos parâmetros que permeiam o projeto de um sistema de exploração *offshore*. Em alguns sistemas são empregadas boias de ancoragem, que têm como intuito, reduzir o peso transmitido das linhas para a unidade flutuante, diminuindo assim as trações nos topos das linhas. Outro componente importante de um sistema de ancoragem são os guinchos, que são responsáveis por fornecer a tração necessária para as linhas, mantendo a plataforma na posição projetada. Lima [8]

2.1 Configurações das linhas de ancoragem

Quanto as configurações das linhas de ancoragem empregadas em sistemas offshore se divide em 3 tipos: Ancoragem em catenária ou convencional, ancoragem *Taut-Leg* e ancoragem vertical.

Na ancoragem em catenária tem-se uma projeção horizontal de cerca de três vezes a lâmina d'água e as forças de restauração responsáveis por manter a plataforma na posição de projeto são decorrentes do peso próprio da linha e do atrito do trecho de linha encostado no fundo do mar. Este tipo de ancoragem apresenta problema com relação ao congestionamento de linhas com plataformas próximas, afetando o arranjo submarino. Outra questão importante se dá com relação a necessidade de guinchos mais potentes devido ao aumento do peso das linhas em profundidades maiores. Lima [8]

Na configuração *Taut-Leg* as linhas de ancoragem se encontram retesadas e formam um ângulo de topo de aproximadamente 45°, desta forma, a projeção horizontal da linha é da mesma ordem de grandeza da lâmina d'água. As forças de restauração nesse tipo de configuração se dá pelo alongamento da linha de poliéster, que apresenta comportamento elástico. Este tipo de ancoragem proporciona maior rigidez ao sistema, limitando a embarcação a menores offsets. 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.

A ancoragem vertical é caracterizada 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). Kawasaki [9]

2.2 Sistemas de ancoragem

Os sistemas de ancoragem utilizados em unidades flutuantes são classificados em três tipos principais Girón [10]:

- *Single Point Mooring* (Ancoragem em Ponto Único), é caracterizado por concentrar todas as linhas de ancoragem em uma pequena área da embarcação, sendo assim, permite o alinhamento da unidade flutuante com os carregamentos ambientais predominantes, permitindo complacência de giro no plano horizontal e conseqüentemente diminuindo o impacto das forças decorrentes dos carregamentos ambientais no casco;
- *Spread mooring* (Amarração com Quadro de Ancoragem), as linhas estão distribuídas ao redor da embarcação nos *corners* resistindo assim aos carregamentos ambientais vindos de qualquer direção;
- *Dynamic Position* (Posicionamento Dinâmico) mantém a plataforma 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 nos sentidos longitudinal e transversal do navio.

2.3 Projetos de sistema de ancoragem

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. As normas

API RP 2SK [11] e DNV OS-E301 [12] estabelecem as condições de projeto que devem se desenvolver as análises para o dimensionamento do sistema de ancoragem. São estas:

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.

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. Atualmente avalia-se 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.

Crítérios de Projeto

As normas API RP 2SK [11] e API RP 2SM [13] definem os critérios de projeto para determinar o máximo passeio permitido e as trações nas linhas de ancoragem, aplicados para as condições intacta e de avaria.

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.

Os procedimentos para a determinação do máximo passeio obtido (*offset* máximo) dependem do método utilizado para simular a dinâmica da UF. No estudo de 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 Fig. 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.

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 1. Estimativa de passeios admissíveis para operação com *Risers* [11]

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*).

As máximas trações admissíveis e os equivalentes fatores de segurança para as condições de projeto são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Trações admissíveis e fatores de segurança [11]

Sistema	Método de Análise	Tração Limite (% do MBL)	Fator de Segurança
Intacto	Quasi-Estática	50	2.0
Intacto	Dinâmico	60	1.67
Avariado	Quasi-Estática	70	1.43
Avariado	Dinâmico	80	1.25

3 Metodologia

O objetivo deste trabalho é avaliar uma nova configuração de linha de ancoragem e compará-la com uma configuração *Taut-Leg* já consolidada. Nos parágrafos subsequentes serão apresentados a modelagem das duas ancoragens estudadas e os principais parâmetros da plataforma utilizada. O sistema de ancoragem utilizado nos dois modelos apresenta amarração em quadro de ancoragem (*Spread mooring*), composta por 24 linhas de ancoragem com uma diferença de 2° de abertura de linha.

Os modelos numéricos do presente trabalho foram desenvolvidos através da ferramenta computacional SITUA-Prosim [14], 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.

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. Mais detalhes a respeito da metodologia e do estudo de caso podem ser encontrados em Kochem [1] e nos itens subsequentes.

4 Estudo de caso

4.1 Sistema de Produção

O modelo do sistema de produção utilizado para o estudo de caso apresenta 20 *risers* idênticos dispostos em catenária livre, posicionado a boreste da unidade flutuante, posicionada a uma lâmina d'água de 2000m 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 Fig. 2 ilustra o arranjo geral e a numeração das linhas utilizadas nos sistemas de ancoragem utilizados neste trabalho.

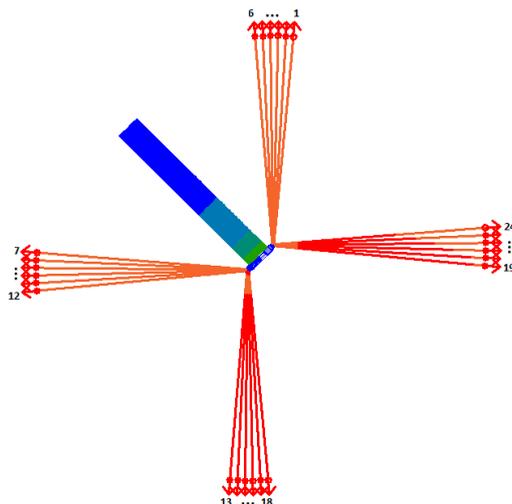


Figura 2. Arranjo Geral dos Sistemas de Ancoragem e numeração das linhas

As principais características geométricas do navio são mostradas na Tabela2.

Tabela 2. 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 Tabela3 e Tabela4 sem levar em consideração a influência das linhas.

Tabela 3. Matriz de raios de giração em relação ao CG

	Valores
RXX	21.07
RYY	80.39
RZZ	80.18

Tabela 4. Posição do centro de gravidade em relação ao eixo estrutural (m)

	Valores
XG	10.43
YG	0.00
ZG	15.18

4.2 Característica dos Risers

Os risers utilizados nos modelos simulados possuem o mesmo comprimento e características físicas, expostas na Tabela5. Estas linhas foram modeladas em elementos finitos apresentando malhas mais refinadas nas regiões de topo e na região onde há o contato do riser com o solo marinho, conforme pode ser observado na Tabela6.

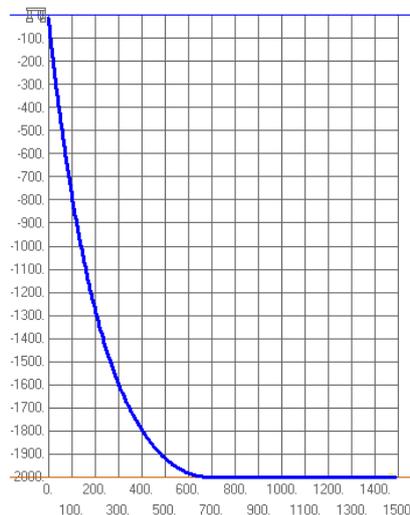
Tabela 5. Características Físicas e Geométricas dos *Risers*

Comp (m)	Diam. Ext(m)	Diâmetro Hidro. (m)	Coef. Poisson	EA (kN)	Peso seco (kN/m)	Peso molhado (kN/m)	CM
3000	0.2153	0.2153	0.3	238095.2	0.9002	2	1.2

Tabela 6. Divisão por segmentos e refino de malha dos *Risers*

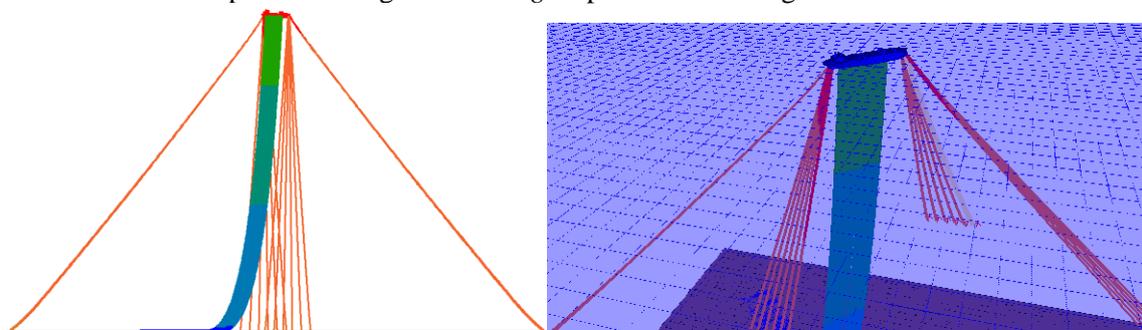
Nome do Segmento	Comp. Segmento (m)	Malha Inicial (m)	Malha Final (m)
Transição Topo	221	15	5
Uniforme	1586	15	15
Transição TDP	221	5	15
Região TDP	356	5	5
Transição Fundo	221	15	5
Trecho Apoiado	395	15	15

A Fig.3 apresenta a configuração geométrica dos *risers* utilizados neste trabalho.

Figura 3. Geometria dos *Risers*

4.3 Descrição do sistema de ancoragem *Taut-Leg*

O modelo com o tipo de ancoragem *Taut-Leg* é apresentado na Fig.4.

Figura 4. Vistas lateral e 3D – Modelo *Taut-Leg*

As características físicas e geométricas de cada material utilizado no modelo *Taut-Leg* são mostradas na Tabela7. Os materiais utilizados na modelagem são retirados do banco de dados do programa SITUA-Prosím.

Tabela 7. Características Físicas e Geométricas das linhas de ancoragem – Modelo *Taut-Leg*

NOME	Diam. Ext(m)	Diâmetro Hidro. (m)	Coef. Poisson	EA (kN)	MBL(kN)	Peso seco (kN/m)	Peso molhado (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 Tabela8.

Tabela 8. Divisão por segmentos e refino da 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

A Tabela9 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 9. Azimute e Pré-Trações das linhas de ancoragem – Modelo *Taut-Leg*

Linhas	Azimute	Pré-Tração (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

4.4 Descrição do sistema de ancoragem *Taut-Leg* com peso

O modelo com o tipo de ancoragem utilizando Peso é apresentado na Fig.5.

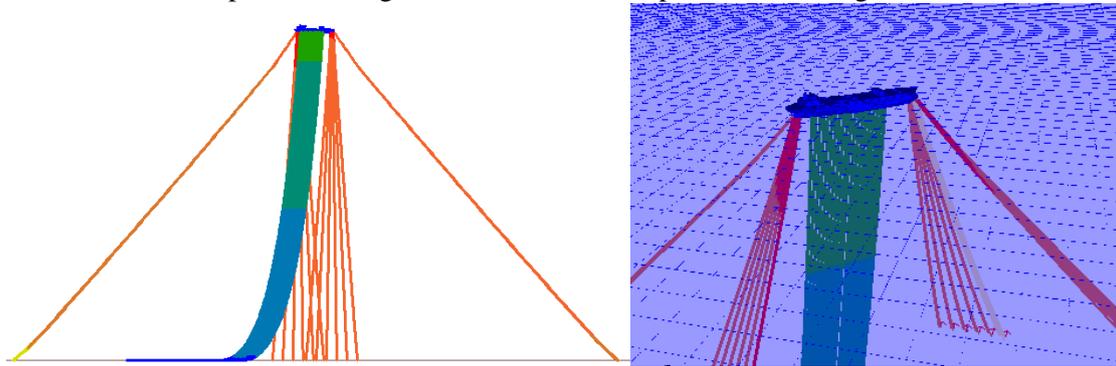


Figura 5. Vistas lateral e 3D – Modelo *Taut-Leg* com peso

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.

As características físicas e geométricas de cada material utilizado no modelo com peso são mostradas na Tabela 10. Os materiais utilizados na modelagem são retirados do banco de dados do programa Situa-Proxim, com exceção do peso que foi ajustado para que todos os critérios de projeto do sistema de ancoragem fossem atendidos.

Tabela 10. Características físicas e geométricas das linhas de ancoragem – Modelo *Taut-Leg* com peso

NOME	Diam. Ext(m)	Diâmetro Hidro. (m)	Coef. Poisson	EA (kN)	MBL(kN)	Peso seco (kN/m)	Peso molhado (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

A discretização da malha nas linhas de ancoragem do modelo *Taut-Leg* com peso é mostrada na Tabela 11.

Tabela 11. Divisão por segmentos e refino da 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

A Tabela 12 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 12. Azimute e Pré-Trações das linhas de ancoragem – Modelo *Taut-Leg* 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

As principais vantagens estudadas da ancoragem utilizando peso com relação à ancoragem *Taut-Leg* tradicional consistem na redução do raio de ancoragem das linhas e na aplicação de uma pré-tração inicial menor. 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 seu posicionamento foi definido de forma arbitrária, podendo este ser avaliado de acordo com o caso que se deseja estudar.

O posicionamento do peso na ancoragem e a distribuição de trações ao longo da linha é mostrado na Fig.6.

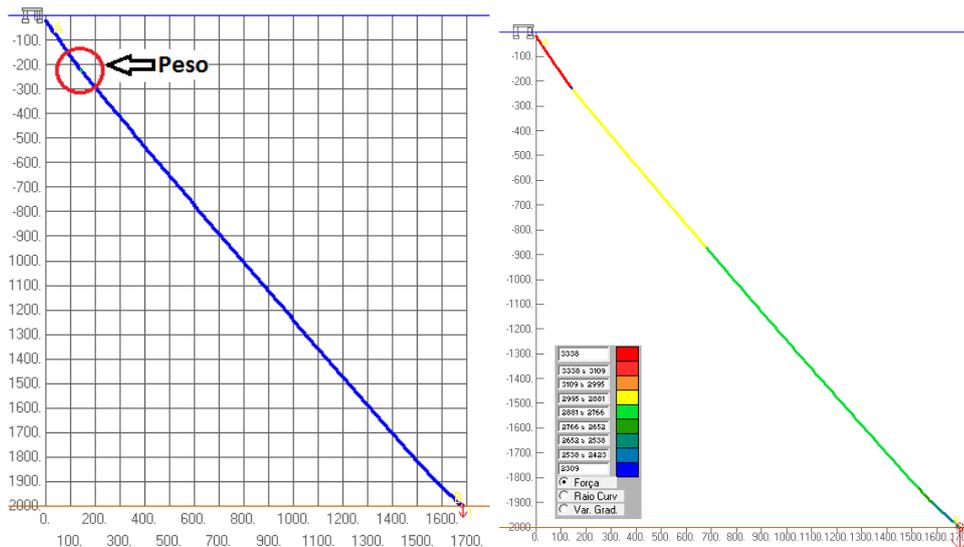


Figura 6. Configuração da linha de ancoragem com peso e distribuição das trações

4.5 Descrição das análises envolvidas

Após realizar o processo de ajuste dos parâmetros físicos, geométricos e hidrodinâmicos da UF e das linhas, pode-se prosseguir a definição dos carregamentos ambientais utilizado nas análises.

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 utilizados neste trabalho 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.

Definido os casos de carregamento ambientais utilizados, 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. Corrêa [15]

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 a ela excede o valor estabelecido nos critérios de projeto, que podem ser encontrados com mais detalhes na norma API 2SK [11].

5 Resultado.

Nesta seção serão apresentados os estudos comparativos entre os dois sistemas de ancoragem estudados, além dos resultados estatísticos para trações máxima, mínimas e passeio máximo. Também será apresentado o estudo da condição de avaria.

5.1 Estudo comparativo

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.

As Tabela13 e Tabela14 mostram os raios de ancoragem e os comprimentos das linhas de ancoragem.

Tabela 13. Raios de Ancoragem – Linha 1

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

Tabela 14. Comprimento das linhas de ancoragem – Linha 1

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

Observa-se através das tabelas acima que o tipo de ancoragem *Taut-Leg* com peso reduziu o raio de ancoragem em aproximadamente 20% e o comprimento da linha de ancoragem em 9,7%, isto se deve a nova configuração assumida pelas linhas.

A Fig.7 apresenta as duas configurações propostas neste trabalho.

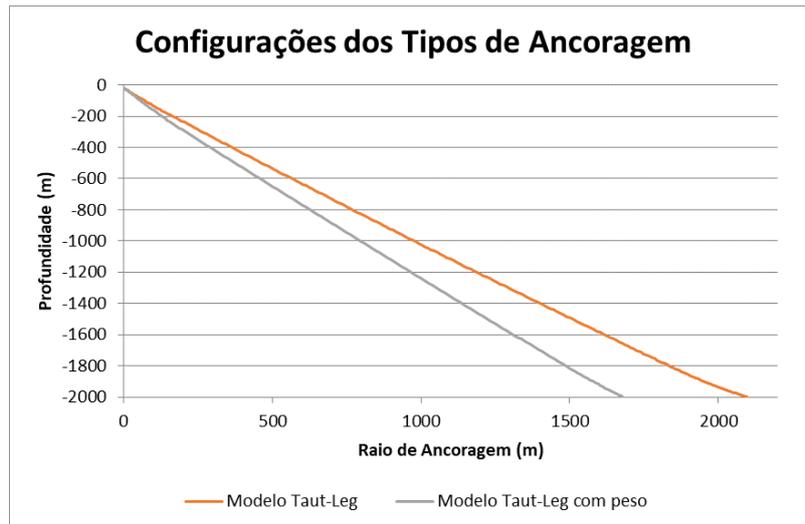


Figura 7. Configurações do modelo *Taut-Leg* e *Taut-Leg* com peso

Com relação a pré-tração aplicada nas linhas de ancoragem, 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 15 mostra os valores de pré-tração aplicados à plataforma para os dois tipos de ancoragem e a diferença percentual dos modelos com boia e peso para o modelo tradicional.

Tabela 15. Pré-Tração inicial – Linha 1

Condição de Projeto	Tipo de Ancoragem	Pré-Tração (kN)	Diferença
Intacto	<i>Taut-Leg</i>	3380.8	-
	<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.

5.2 Resultados Estatísticos

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 segundo a norma API RP 2SK [11]). 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 16. Nesta mesma tabela é apresentado o valor admissível de referência da tração máxima.

Tabela 16. 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 17 apresenta os valores encontrados para tração extrema em cada linha dos modelos *Taut-Leg* convencional e *Taut-Leg* com peso e a relação em porcentagem entre estes e os seus respectivos MBL's.

Tabela 17. Trações Máxima extrema nas linhas de ancoragem

Linhas	Modelo <i>Taut-Leg</i> Convencional		Modelo <i>Taut-Leg</i> com peso	
	Tração Máxima (kN)	% MBL	Tração Máxima (kN)	% MBL
1	3894.20	31.4	4344.30	35.0
2	3834.70	30.9	4312.20	34.7
3	3780.40	30.4	4281.90	34.5
4	3730.50	30.0	4249.70	34.2
5	3683.30	29.7	4219.90	34.0
6	3642.80	29.3	4191.20	33.7
7	3877.10	31.2	4085.10	32.9
8	3927.90	31.6	4145.60	33.4
9	3984.60	32.1	4205.90	33.9
10	4046.50	32.6	4265.10	34.3
11	4115.00	33.1	4326.90	34.8
12	4187.60	33.7	4388.40	35.3
13	6190.60	49.8	6802.50	54.8
14	6288.40	50.6	6843.50	55.1
15	6376.70	51.3	6902.40	55.6
16	6459.00	52.0	6953.90	56.0
17	6533.90	52.6	7001.60	56.4
18	6607.20	53.2	7053.90	56.8
19	6890.60	55.5	7302.80	58.8
20	6796.30	54.7	7197.10	57.9
21	6685.90	53.8	7075.20	57.0
22	6562.90	52.8	6957.00	56.0
23	6435.20	51.8	6834.10	55.0
24	6292.30	50.7	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 dois modelos analisados apresentaram trações máximas inferiores a máxima tração admissível de 7452 kN, conforme Tabela16.

Vale ressaltar que como o esperado, os modelos *Taut-Leg* tradicional e *Taut-Leg* com peso, às trações máximas foram obtidas no topo das linhas. 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.

Tração Mínima Extrema

Com relação a tração mínima há uma limitação de 5% do MBL para cabos de poliéster. A Tabela18 apresenta o valor de tração mínima admissível, tomando como base o valor do MBL do poliéster.

Tabela 18. Tração mínima admissível

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

A Tabela19 apresenta os valores extremos de tração mínima encontrados e a relação em porcentagem entre estes e os seus respectivos MBL's.

Tabela 19. Trações Mínimas extrema nas linhas de ancoragem

Linhas	Modelo <i>Taut-Leg</i> Convencional		Modelo <i>Taut-Leg</i> com peso	
	Tração Mínima (kN)	% MBL	Tração Mínima (kN)	% MBL
1	874.70	6.9	913.25	7.2
2	840.75	6.6	876.53	6.9
3	811.49	6.4	844.14	6.6
4	785.49	6.2	813.16	6.4
5	763.12	6.0	782.71	6.1
6	744.20	5.8	759.19	6.0
7	844.68	6.6	647.45	5.1
8	871.27	6.8	674.96	5.3
9	901.48	7.1	707.20	5.5
10	936.50	7.3	741.44	5.8
11	977.33	7.7	779.91	6.1
12	1022.20	8.0	822.69	6.5
13	2604.40	20.4	2965.40	23.3
14	2660.90	20.9	2980.10	23.4
15	2712.10	21.3	3005.10	23.6
16	2762.70	21.7	3028.90	23.8
17	2808.60	22.0	3053.30	23.9
18	2855.90	22.4	3077.80	24.1
19	2718.90	21.3	2700.40	21.2
20	2684.90	21.1	2651.50	20.8
21	2640.00	20.7	2580.70	20.2
22	2573.70	20.2	2508.00	19.7
23	2501.30	19.6	2435.00	19.1
24	2426.10	19.0	2361.10	18.5

Como pode ser observado nas tabelas apresentadas, o valor extremo obtido para a tração mínima se encontra na linha 6 para o modelo de ancoragem tipo *Taut-Leg* tradicional, já para o modelo com ancoragem do 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.

Passeio Máximo Extremo

A verificação do máximo passeio permitido é feita de acordo com a norma API RP 2SK [11]. 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 Tabela20 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 20. Passeio Máximo Admissível

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

A Tabela21 apresenta os valores extremos de passeio da embarcação encontrados e a relação em porcentagem entre estes e a lâmina d'água.

Tabela 21. MBL dos materiais utilizados nas linhas de ancoragem

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

Análise da Condição de Avaria

De acordo com a norma API RP 2SK [11], a condição de avaria considera o rompimento das duas linhas mais tracionadas. Desta forma, para a análise do sistema de ancoragem em condição de avaria, as duas linhas mais tracionadas (linhas 19 e 20, como pode ser observados na Tabela17) foram retiradas do modelo numérico separadamente com o intuito de caracterizar o rompimento de ambas. Posteriormente foram realizadas novas simulações dinâmicas com a incidência da combinação de carregamento que mais solicitou a estrutura, obtendo uma nova série temporal de movimentos da plataforma e trações ao longo das linhas de ancoragem.

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.

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), mostrado na Fig.8. Deste modo foram obtidas novas séries temporais movimentos da plataforma. Após o tratamento estatístico da mesma, foram obtidos os valores extremos e comparados com valores pré-definidos através da norma [3].

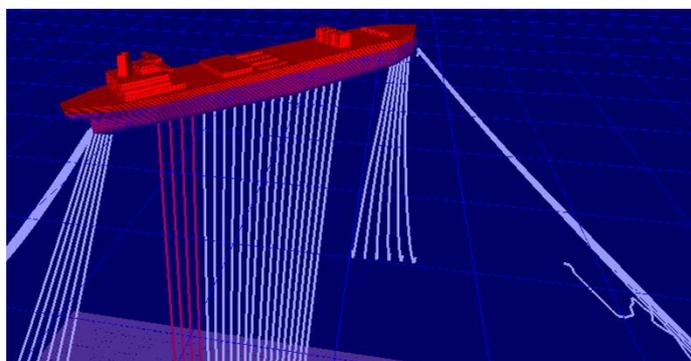


Figura 8. Modelo representando rompimento da linha mais tracionada

A Tabela22 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 22. Valores extremos 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 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).

Rompimento da segunda linha mais tracionada

Para a condição de avaria onde temos o rompimento da segunda linha mais tracionada (linha 20), foi realizada uma nova simulação dinâmica dos modelos acoplados considerando o rompimento da mesma. 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). O valor de MBL utilizado como valor de referência foi o menor dentre os MBL's dos componentes pertencentes às linhas de ancoragem, a Tabela 23 apresenta o MBL dos materiais utilizados e o valor máximo admissível para a condição de avaria.

Tabela 23. Valores extremos para o passeio – Sistema avariado

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

A Tabela 24 apresenta 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 24. Trações Máxima extrema nas linhas de ancoragem – Sistema Avariado

Linhas	Modelo <i>Taut-Leg</i> Convencional		Modelo <i>Taut-Leg</i> com peso	
	Tração Mínima (kN)	% MBL	Tração Mínima (kN)	% MBL
1	3465	27.9	3886.8	31.3
2	3406.2	27.43	3850.1	31.0
3	3351.7	26.99	3816.9	30.7
4	3304.1	26.6	3782.3	30.5
5	3260.7	26.25	3751.6	30.2
6	3223.4	25.95	3724.5	30.0
7	3003.2	24.18	3221.3	25.9
8	3017.5	24.3	3247.5	26.1
9	3037.3	24.45	3274.7	26.4
10	3061.3	24.65	3300.9	26.6
11	3091.1	24.89	3330	26.8
12	3124.8	25.16	3359.9	27.1
13	5551.9	44.7	6204.7	50.0
14	5714.4	46.01	6322.8	50.9
15	5872.7	47.28	6448.2	51.9
16	6025.8	48.52	6563.5	52.8
17	6171.1	49.69	6687.8	53.8
18	6315.5	50.85	6803.7	54.8
19	7719.4	62.15	8103.4	65.24
20	-	-	-	-
21	7503.3	60.41	7827.1	63.0
22	7380.3	59.42	7696.3	62.0
23	7251.6	58.39	7573.2	61.0
24	7086.1	57.05	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.

6 Conclusões

Este trabalho teve por objetivo estudar uma variação 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 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 utilizando o software SITUA/PROSIM [14].

Verificaram-se através dos resultados obtidos que todos os critérios de projeto foram atendidos para os dois 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.

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 descrito no item 4.4.

A redução do raio de ancoragem verificada no modelo *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.

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.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Petrobras, à Fundação COPPETEC e ao CNPq pelo suporte financeiro fundamental para a realização deste trabalho.

Referências

- [1] R. M. Kochem. *Estudo de diferentes concepções de sistemas de ancoragem em lâmina d'água profunda*. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, 2016.
- [2] T. A. G. Lacerda. *Análise de sistemas de ancoragem de plataformas flutuantes*. Projeto final de graduação, Poli-UFRJ, 2005.
- [3] A. J. J. Carbono. *Otimização da disposição de linhas de ancoragem utilizando algoritmos genéticos*. Dissertação de mestrado, PUC-RJ, 2005.
- [4] L. D. Finn. *A new deepwater offshore platform – the guyed tower*. Proceedings of the offshore technology conference. 1976.
- [5] C. Y. Ji, Z. M. Yuan, Xu Sheng, Huang Shan. *Concept design and hydrodynamic analysis of a novel mooring system for deep water floating system*. Ocean Engineering 92, p. 245-254, 2014.

- [6] Z. M Yuan, A. Incecik, C. Y. Ji. *Numerical study on a hybrid mooring system with clump weights and buoys*. Ocean Engineering 88, p. 1-11, 2014.
- [7] C. S. Seckler. *Metodologia baseada em inspeção e retroanálise para verificação e ajustes de sistemas de ancoragem de unidades flutuantes de produção de petróleo offshore*. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, 2011.
- [8] A. D. Lima. *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, 2011.
- [9] P. Y. Kawasaki. *Análise de linhas de ancoragem de plataformas oceânicas considerando diversos tramos e o trecho enterrado da linha*. Projeto final de graduação, Poli-UFRJ, 2010.
- [10] A. R. C. GIRÓN. *Aplicação de metodologia de projeto integrado de sistemas de ancoragem e risers na exploração offshore*. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, 2009.
- [11] API RP 2SK. *Design and analysis of stationkeeping systems for floating structures*. 3. ed., American Petroleum Institute, 2005.
- [12] DNV-OS-E301, *Position mooring*. DNV Offshore standard, 2015.
- [13] API RP 2SM. *Recommended practice for design, manufacture, installation and maintenance of synthetic fiber ropes for offshore mooring*. 1. ed., American Petroleum Institute, 2001.
- [14] B. P. Jacob, R. A. Bahiense, F. N. Corrêa, B. M. Jacovazzo. *Parallel implementations of coupled formulations for the analysis of floating production systems, part I: coupling formulations*. Ocean Engineering 55, p. 206-218, 2012.
- [15] F. N. CORRÊA. *Ferramentas computacionais para análise acoplada de Sistema offshore*. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, 2008.