

GABRIEL ANTÔNIO DA SILVA LAMOUNIER

AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE DE LINHAS DE ANCORAGEM

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo**

SÃO PAULO

2021

GABRIEL ANTÔNIO DA SILVA LAMOUNIER

AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE DE LINHAS DE ANCORAGEM

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo**

**Área de concentração: Engenharia de
Petróleo**

Orientador: Rafael dos Santos Giória

SÃO PAULO

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

--

RESUMO

Uma das principais complicações de um projeto de plataforma de produção é o sistema de ancoragem. Com o avanço do horizonte de exploração para áreas mais profundas soluções cada vez mais complexas são necessárias. Para acompanhar esse progresso, os programas de simulação de ambiente marinho e estruturas nele estão cada vez mais complexos.

Tendo esse cenário em mente, o objetivo deste trabalho é avaliar um modelo de ancoragem usando o programa Flexcom quanto a fadiga e falha e passeio, e analisar também o uso do *software*, tendo em mente um cenário simplificado, em relação aos dados, e a execução de um projeto de engenharia.

O modelo é um ULFPSO ancorado por 4 grupos de linhas lançadas em X, os dados do mar utilizados são os do mar da bacia de Santos, para as linhas em si, vários cenários são utilizados extraíndo dados de modelos da indústria. Fatores de segurança, intervalos de viabilidade e expectativa de falha serão analisadas.

Palavras-chave: Flexcom, ancoragem, simulação, passeio.

ABSTRACT

One of the main complexities of an oil floating rig project is its mooring system. With the expansion of the exploration areas to deeper zones more complex solutions are required. To support the progress, sea environment, and structures contained in it, simulators become more complex.

With that in mind, the objective of this piece is to evaluate a mooring model using the software Flexcom in regards to failure and drift analysis, bearing in mind a simplified system and the execution of an engineering project.

The model is an ULFPSO moored by 4 groups of lines placed towards the diagonals of the structure, the sea data comes from the Santos basin and the lines themselves are modeled after industry examples. Safety values, viability intervals and failure states will be analyzed.

Keywords: Flexcom, mooring, simulation, drift.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo.....	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1	Sobre o modelo	2
3	DESENVOLVIMENTO.....	4
3.1	Oceano e Ambiente.....	4
3.2	Elemento Flutuante	5
3.3	Linhas de ancoragem	8
3.4	A simulação	11
3.5	A análise	12
4	RESULTADOS	14
4.1	Uma linha	14
4.2	Duas linhas	14
4.3	Três linhas, estudo inicial	15
4.4	Três linhas, maiores linhas	16
4.5	Três linhas, passeio ajustado	16
5	DISCUSSÃO	18
6	CONCLUSÃO.....	21
7	REFERÊNCIAS	22
	ANEXO A - DADOS DA PLATAFORMA FLUTUANTE UTILIZADA	24

1 INTRODUÇÃO

Para se manter um corpo em uma posição determinada no mar é usado um sistema de ancoragem. Embora os variados tipos de sistemas de ancoragem variem dependendo das condições locais e as necessidades do projeto, tipicamente para profundidades menores linhas de ancoragem compostas de correntes e cabos de aço são utilizados. Para situações especiais ou mares profundos, linhas sintéticas de polímeros, sistemas de posicionamento dinâmico e âncoras não-convencionais, cada qual usado em condições específicas para suprir as necessidades citadas.

Manter as plataformas dentro do passeio permitido para evitar danos aos *risers* e umbilicais é uma função essencial que torna o controle de posição uma função vital para a área desde que plataformas flutuantes passaram a ser preferidas, e depois necessárias, com o aumento da profundidade das regiões exploradas. E nos últimos anos, o horizonte de exploração de petróleo vem expandido aceleradamente para regiões cada vez mais profundas, exigindo projetos cada vez mais complexos e inovações na área, como as linhas sintéticas ou softwares de simulação como o Flexcom.

Esse estudo foca na obtenção de dados pertinentes e uso de um software de nível comercial para simular cenários de ancoragem e analisar as linhas em relação ao passeio, levando em consideração falha e limite de passeio, aplicando o conhecimento obtido no curso em um cenário prático e usando ferramentas e informações disponíveis no mercado.

1.1 Objetivo

Buscar e obter os dados necessários, formular um modelo de ancoragem no software Flexcom e avaliar a relação entre o peso das linhas e o passeio da plataforma, simulando o procedimento de um projeto industrial.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sobre a revisão bibliográfica, três grandes inspirações foram utilizadas: a tese de Kristine Klingan “Automated Optimization and Design of Mooring Systems for Deep Water” (KLINGAN, 2016), a tese de Maren Olsen “Estimation of Annual Probability of Mooring Line Failure as a Function of Safety Factor” (OLSEN, 2011) e a tese de Eduardo Marçal “Estudo de Viabilidade Técnica Aplicado ao Desenvolvimento do Conceito de Plataforma ULFPSO com Utilização de Riser Rígido em Catenária Livre” (VILAMEÁ, 2017).

Muitos dos dados utilizados para possibilitar a simulação, especialmente em relação à plataforma simulada, são obtidos experimentalmente. Para manter veracidade, esses dados foram extraídos dos trabalhos citados. Dados sobre práticas da indústria e parâmetros de projetos, como o fator de segurança de uma linha de ancoragem recomendado pela API (*American Petroleum Institute*), quando não de acesso aberto, foram também retirados deles.

Mais importante, o método de desenvolvimento de um projeto foi feito após o estudo desses trabalhos já citados, buscando semelhança com um padrão já estabelecido.

Para a utilização do software, a companhia WoodGroup que oferece o software Flexcom oferece alguns tutoriais no seu canal no YouTube e dentro do programa, via um manual.

A base teórica requerida para o desenvolvimento desse estudo foi extraída dos trabalhos, já consolidados na área e usados também como referências em trabalhos citados aqui, de Faltisen (FALTINSEN, 1990) e Chakrabarti (CHAKRABARTI, 1987) e (CHAKRABARTI, 2005).

2.1 Sobre o modelo

Primeiro, o ambiente. Os dados meteoceanográficos utilizados para simular o mar dentro do Flexcom foram extraídos do Programa Nacional de Boias (PNBOIA)

que visa a coleta de dados oceanográficos e meteorológicos na costa brasileira usando uma rede de boias rastreadas por satélite (MARINHA DO BRASIL).

Desse programa, que oferece os dados abertamente, foram extraídos os dados da boia de Santos, localizada na Lat 25° 26,37' S / Lon 045° 02,17' W, que ficou em operação desde 12/04/2011 até 24/04/2019 (MARINHA DO BRASIL).

Segundo, a plataforma. O sistema flutuante utilizado teve dados extraídos do trabalho de Eduardo Marçal Vilameá “Estudo de Viabilidade Técnica Aplicado ao Desenvolvimento do Conceito de Plataforma ULFPSO com Utilização de Riser Rígido em Catenária Livre”. Os dados em questão são extraídos de experimentos feitos no Calibrador Hidrodinâmico do Tanque de Provas Numérico (CH-TPN) na Universidade de São Paulo feitos pelo autor. O autor também executou análises numéricas utilizando o software WAMIT (VILAMEÁ, 2017).

Terceiro, as linhas. Para as linhas de ancoragem, que estão em estudo, foi assumido serem feitas de aço segundo padrão comercial da indústria (KLINGAN, 2016) e recomendações (CHAKRABARTI, 2005). Foram formuladas sendo compostas de sessões de correntes ou cabos de aço, sem elementos de interligação para simplificação da simulação. Como os elementos intermediários são bem mais robustos que o resto da linha, essa simplificação segue verossímil. Para mais informações, os dados foram tirados de catálogos de empresas, buscando verossimilhança com as opções no mercado, em particular o catálogo da DaiHan e da Global Maritime Moorlink.

Quanto as falhas, o modelo foi criado dentro dos padrões de análise da DNV GL (DNV GL, 2018). Quanto aos cenários de falhas, o cenário mais observado foi o de *Ultimate Limit State* (ULS), onde analisa-se se há falha de uma linha com todas as linhas em serviço, e de *Fatigue Limit State* (FLM), onde analisa-se a capacidade das linhas de lidar com cargas cíclicas. O cenário de *Accidental Limit State* (ALS) não é analisado por estar fora do contexto do trabalho, caso qualquer falha aconteça, a simulação é interrompida. As linhas são exemplos comerciais em acordo com a regulação API.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Oceano e Ambiente

Os dados foram extraídos do PNBOIA (MARINHA DO BRASIL), vieram de períodos de operação da boia desde 21/10/2014 até 10/11/2017 na área da Bacia de Santos e precisaram ser tradados para remover erros e imprecisões. A Marinha fornece os dados após um algoritmo de controle de qualidade de dados, que marca provável imprecisão no dado (MARINHA DO BRASIL, 2019). Dados marcados que não removidos automaticamente e dados acima de dois desvios padrão do conjunto global foram removidos. O intervalo dos dados foi então comparado com o esperado e observado nas medições do estudo realizado em Metocean Measurements at Northern Santos Basin - Brazil (VOGEL, SILVEIRA, *et al.*, 2010).

Esses dados foram utilizados para gerar um ambiente no programa para simular as condições de mar da área. Para simplicidade, condições extremas de mar serão analisadas probabilisticamente de forma a não perder realismo visto que a Bacia de Santos é um mar calmo essas aproximações não geram distúrbios. Para agilizar a simulação, foi considerada apenas uma direção de vento e duas de ondas. O espectro de correntes marinhas também foi altamente simplificado, considerando apenas correntes com medidas frequentes em profundidade, direção e intensidade.

Sobre a simplificação da direção do mar cabe um adendo: a simulação do mar é feita com a sobreposição de várias construções de ondas com diferentes direções, alturas significativas e períodos. Os dados para essa construção contam no bando de dados do PNBOIA, mas para simplificar o modelo e diminuir o tempo de simulação, que se estende de forma considerável com mais modulações, uma modulação sendo uma condição unitária de mar para a composição, usa-se então duas principais, a principal direção e a segunda principal em intensidade ou a principal em intensidade e uma composição ortogonal, de forma que a composição linear das duas abrange de forma mais completa possível todos os dados. Para a simulação em questão foi usada a composição das direções principal e secundária.

A ideia do uso de composição linear para a simulação de um cenário de ambiente de ondas complexo veio de Faltinsen que trabalha a ideia do uso de um alto número de ondas simples para desenvolver uma aproximação estatística para o mar de um local através dos principais dados indicadores daquele local. Para um tempo longo de avaliação todo o espectro de resultados deve ser utilizado. (FALTINSEN, 1990)

Para a simulação, o mar foi definido com uma profundidade de 1200m. Os dados do mar foram adaptados, via regressão linear, para a nova profundidade de forma que não haja significante perda de informação. O fundo do mar é considerado sólido e rígido, as linhas não penetram sendo depositadas por gravidade, um plano regular e sem atrito.

Para condições de mar padrão, uma altura significativa média de 2.8m foi utilizada, com período de 9.78s. Para mar revolto, o maior valor registrado de altura significativa média foi usado, 6.48m com período de 13.72s.

Para simplificar o efeito do vento, ele foi definido em uma direção à 20° da principal direção de onda, com velocidade média de 3.8 m/s segundo os dados. Para definir uma frequência de variação, um desvio padrão, 1.3 m/s, do conjunto de dados tratados foi utilizado como máximo e mínimo. O programa utiliza um método próprio para definir o valor dentro desses parâmetros. Tempo de atuação não foi utilizado uma vez que o vento não muda de direção.

3.2 Elemento Flutuante

O design utilizado para a plataforma foi retirado do trabalho de Vilameá (VILAMEÁ, 2017), e os parâmetros necessários, Response Amplitude Operator (RAO), geometria, peso, foram aplicados ao programa. Por questão de simplicidade e falta de dados, o *topside* não foi considerado instalado, em concordância com os outros estudos analisados. Considerando a superfície afetada pelo vento, a presença do *topside* teria pouco impacto e é pertinente apenas à questão do peso. Ainda mais, a resposta da plataforma aos movimentos do mar, foi simplificada. Esses dados são

obtidos experimentalmente e dependem intimamente das condições do mar, portanto fogem do escopo desse trabalho.

O RAO é um dos principais operadores que atribui a movimentação da plataforma em função do movimento do mar de forma linear. Chakrabarti define RAO como uma função que relaciona a resposta do corpo flutuante quando sujeito ao ambiente de ondas, normalizada em relação à amplitude de ondas, construída para um espectro de períodos de onda (CHAKRABARTI, 1987). O RAO pode ser desenvolvido teoricamente para sistemas simples, mas para sistemas complexos deve ser analisado um modelo prático em tanque de provas sob condições bem definidas e esse modelo pode então ser expandido.

Foram extraídos os valores de RAO dos gráficos fornecidos no trabalho de (VILAMEÁ, 2017) via adaptação gráfica, usando um programa próprio de leitura de imagens e interpretação de padrões em imagens, e inseridos e tratados por um processo do próprio programa para abranger as necessidades da simulação, já que o programa usa um esquema de resposta ao movimento não-linear, e a conversão acontece automaticamente por métodos internos. Os valores usados foram os valores tabelados no trabalho original como “regulares”, sendo esses valores obtidos gerando ondas em um tanque de provas com parâmetros usuais das ondas da área da bacia de Santos, mesmo local estudado nesse trabalho.

A tabela de entrada foi a seguinte:

Tabela 1: Tabela com valores de resposta simples da estrutura flutuante

90°						
T (s)	X1 (m/m)	X2 (m/m)	X3 (m/m)	X4 (°/m)	X5 (°/m)	X6 (°/m)
8.0	-	0.04	0.05	0.11	0.004	0.0027
11.0	0.003	0.340	0.300	0.790	0.008	0.0096
12.0	0.002	0.460	0.309	0.930	0.005	0.0019
14.0	0.002	0.560	0.313	0.640	0.002	0.0080
16.0	0.018	0.650	0.220	0.430	0.006	0.0057
17.0	0.024	0.810	0.420	0.410	0.016	0.0059
18.5	0.016	0.690	1.080	0.280	0.031	0.0063
19.5	0.017	0.730	1.170	0.400	0.018	0.0065
135°						
T (s)	X1 (m/m)	X2 (m/m)	X3 (m/m)	X4 (°/m)	X5 (°/m)	X6 (°/m)
8.0	-	-	-	0.021	-	0.006
11.0	0.125	0.078	0.025	0.099	0.022	0.056
12.0	0.113	0.014	0.019	0.117	0.067	0.078
14.0	0.234	0.101	0.025	0.122	0.118	0.292
16.0	0.459	0.312	0.043	0.238	0.132	0.344
17.0	0.586	0.428	0.207	0.232	0.380	0.324
18.5	0.261	0.403	0.605	0.181	0.450	0.303
19.5	0.252	0.447	0.890	0.252	0.430	0.289
180°						
T (s)	X1 (m/m)	X2 (m/m)	X3 (m/m)	X4 (°/m)	X5 (°/m)	X6 (°/m)
8.0	-	0.0009	0.023	0.0041	-	0.00039
11.0	0.123	0.0056	0.044	0.0065	0.060	0.00227
12.0	0.216	0.0044	0.051	0.0086	0.059	0.00141
14.0	0.253	0.0038	0.053	0.0021	0.062	0.00122
16.0	0.239	0.0029	0.056	0.0143	0.150	0.00325
17.0	0.457	0.0070	0.131	0.0225	0.457	0.00688
18.5	0.183	0.0148	0.349	0.0312	0.499	0.00433
19.5	0.191	0.0079	0.669	0.0205	0.496	0.00686

Fonte: Autoria própria

O ângulo presente no topo indica o ângulo de incidência da onda em relação ao eixo de comprimento (maior lado), e pela simetria da peça flutuante e a simplicidade do mar gerado no programa, pode-se estimar que os resultados sejam

simétricos para ângulos espelhados no eixo de simetria relevante à propagação das ondas.

A coluna $T(s)$ indica o período das ondas, em segundos, e as colunas X_n indicam a resposta ao movimento, em deslocamento por altura de onda seja em metros ou em grau. O indicador n se traduz como:

- 1- deslocamento no eixo do comprimento,
- 2- deslocamento no eixo da largura,
- 3- deslocamento no eixo da altura,
- 4- deslocamento angular relativo ao eixo do comprimento,
- 5- deslocamento angular relativo ao eixo da largura,
- 6- deslocamento angular relativo ao eixo da altura.

3.3 Linhas de ancoragem

As linhas serão de aço, lançadas em catenária, com comprimento de 1650m cada compostas por 3 seções inicialmente, do contato com a plataforma para a âncora, correntes por 50m, cabos por 1100m e por fim, correntes por mais 500m.

A âncora foi feita usando um ponto fixo, sendo imóvel e infinitamente resistente, no fundo do mar. Ambas as correntes foram analisadas em malha fina, e o cabo em malha padrão.

Quanto às características mecânicas dos elementos, foram utilizados os dados dos catálogos das empresas Moorlink (MOORLINK SOLUTIONS) e DaiHan (DAIHAN, 2013) e os padrões do próprio programa, classificação *standard 1*. Junções foram desconsideradas. Dados sobre as características mecânicas relevantes foram extraídos dos próprios catálogo, figuras abaixo:

Figura 1: Dados dos cabos de aço usados na construção das linhas.

Properties of spiral strand wire rope							
Nominal Diameter mm (inch)	MBL kN	Axial Stiffness MN	Nominal Weight in kg/m		Submerged nominal weight kg/m	Nominal Steel Area mm ²	Sheathing Thickness mm
			Unsheathed	Sheathed			
76 (3)	5647	557	28.4	30.4	23.8	3377	8
82 (3.25)	6550	627	33.0	35.1	27.5	3917	8
90 (3.5)	7938	760	39.9	42.9	33.4	4747	10
95.5 (3.75)	8930	855	44.9	48.1	37.5	5341	10
102 (4)	10266	982	51.6	55.3	43.1	6139	11
108 (4.25)	11427	1093	57.5	61.3	48.0	6834	11
114 (4.5)	12775	1222	64.2	68.3	53.6	7640	11
121.5 (4.75)	14362	1353	72.2	76.5	59.7	8589	11
127 (5)	15722	1481	79.1	83.6	66.0	9403	11
133 (5.25)	17171	1599	86.8	91.5	72.4	10314	11
141 (5.5)	19180	1799	97.5	102.4	81.5	11609	11
146.5 (5.75)	20469	1940	105.1	110.2	87.7	12515	11
153 (6)	22070	2110	114.5	119.7	95.5	13616	11

Fonte: (MOORLINK SOLUTIONS)

A configuração das linhas foi feita de forma simplificada: uma vez assumindo que a plataforma foi posicionada de forma a apresentar melhor resposta ao ambiente, proa de encontro às ondas, usa-se grupos compostos por 3 linhas levemente espaçadas criados nas 4 direções diagonais usando como base as principais dimensões da plataforma, largura máxima e comprimento. O número e a configuração de linhas foram estipulados usando tentativa e erro em um modelo simplificado, feito no mesmo programa ignorando questões de resistência com apenas correntes, até encontrar um cenário favorável.

As "âncoras" foram posicionadas em um círculo de raio 900m. A distância foi estipulada usando o tamanho da linha total e as equações de catenária no livro de Chakrabarti (CHAKRABARTI, 2005) usando como guia estipulações do software Flexcom. O pré-tensionamento das linhas foi definido como *default*, ou seja, apenas o peso suspenso. Essa escolha foi feita visando agilizar a simulação e peca no quesito realismo, afinal para um projeto é importante manter uma área adequada de solo marinho para as instalações *subsea*. Para o lado físico-mecânico, não há alterações significativas, o aumento de distância horizontal entre a plataforma e as "âncoras" significaria aumento de peso de linha, que seria balanceado com diminuição da fração de correntes no final da linha. Essas alterações ocorrem naturalmente durante um projeto quando se visa otimizar o sistema e uma análise mais aprofundada de geometria de lançamento de linhas foge do escopo atual do trabalho.

Figura 2: Dados das correntes utilizadas na construção das linhas

Chain Diameter (mm)	PROOF LOAD (kN)						BREAKING LOAD (kN)						WEIGHT (kg/m)	
	ORQ	R3	R3 (ABS&DNV)	R3S	R4	R4S	R5	ORQ	R3	R3S	R4	R4S	R5	
C-factor	0,0140	0,0148	0,0156	0,0180	0,0216	0,0240	0,0251	0,0211	0,0223	0,0249	0,0274	0,0304	0,0320	
30	524	554	584	674	809	899	940	790	835	932	1,026	1,138	1,198	20
32	594	628	662	764	917	1,018	1,065	895	946	1,057	1,163	1,290	1,358	22
34	668	706	744	859	1,031	1,145	1,198	1,007	1,064	1,188	1,308	1,451	1,527	25
36	746	789	831	959	1,151	1,279	1,338	1,124	1,188	1,327	1,460	1,620	1,705	28
38	828	875	923	1,065	1,278	1,420	1,485	1,248	1,319	1,473	1,621	1,798	1,893	32
40	914	966	1,018	1,175	1,410	1,567	1,639	1,377	1,456	1,625	1,789	1,985	2,089	35
42	1,004	1,061	1,118	1,290	1,548	1,721	1,799	1,513	1,599	1,785	1,964	2,179	2,294	39
44	1,097	1,160	1,223	1,411	1,693	1,881	1,967	1,654	1,748	1,951	2,147	2,382	2,508	42
46	1,194	1,263	1,331	1,536	1,843	2,048	2,141	1,800	1,903	2,124	2,338	2,594	2,730	46
48	1,295	1,369	1,443	1,666	1,999	2,221	2,322	1,952	2,063	2,304	2,535	2,813	2,961	50
50	1,400	1,480	1,560	1,800	2,160	2,400	2,510	2,110	2,230	2,490	2,740	3,040	3,200	55
52	1,508	1,594	1,681	1,939	2,327	2,585	2,704	2,273	2,402	2,682	2,952	3,275	3,447	59
54	1,620	1,712	1,805	2,083	2,499	2,777	2,904	2,441	2,580	2,881	3,170	3,517	3,703	64
56	1,735	1,834	1,933	2,231	2,677	2,974	3,111	2,615	2,764	3,086	3,396	3,768	3,966	69
58	1,854	1,960	2,066	2,383	2,860	3,178	3,323	2,794	2,953	3,297	3,628	4,025	4,237	74
60	1,976	2,089	2,201	2,540	3,048	3,387	3,542	2,978	3,147	3,514	3,867	4,290	4,516	79
62	2,101	2,221	2,341	2,701	3,242	3,602	3,767	3,166	3,347	3,737	4,112	4,562	4,802	84
64	2,230	2,357	2,484	2,867	3,440	3,822	3,997	3,360	3,551	3,965	4,364	4,841	5,096	90
66	2,361	2,496	2,631	3,036	3,643	4,048	4,233	3,559	3,761	4,200	4,621	5,127	5,397	95
68	2,496	2,639	2,782	3,209	3,851	4,279	4,475	3,762	3,976	4,440	4,885	5,420	5,706	101
70	2,634	2,785	2,935	3,387	4,064	4,516	4,723	3,970	4,196	4,685	5,156	5,720	6,021	107
73	2,847	3,010	3,172	3,660	4,392	4,881	5,104	4,291	4,535	5,064	5,572	6,182	6,507	117
76	3,066	3,242	3,417	3,942	4,731	5,257	5,498	4,621	4,884	5,454	6,001	6,658	7,009	126
78	3,216	3,400	3,584	4,135	4,962	5,514	5,766	4,847	5,123	5,720	6,295	6,984	7,351	133
81	3,446	3,643	3,840	4,431	5,317	5,908	6,179	5,194	5,490	6,130	6,745	7,484	7,877	144
84	3,683	3,893	4,104	4,735	5,682	6,313	6,602	5,550	5,866	6,550	7,208	7,997	8,418	155
87	3,925	4,149	4,374	5,046	6,056	6,729	7,037	5,916	6,252	6,981	7,682	8,523	8,971	166
90	4,173	4,412	4,650	5,365	6,439	7,154	7,482	6,289	6,647	7,422	8,167	9,062	9,539	177
92	4,342	4,590	4,838	5,582	6,699	7,443	7,784	6,544	6,916	7,722	8,497	9,428	9,924	185
95	4,599	4,862	5,125	5,913	7,096	7,884	8,246	6,932	7,326	8,180	9,001	9,987	10,512	198
97	4,774	5,047	5,319	6,138	7,365	8,184	8,559	7,195	7,604	8,490	9,343	10,366	10,911	206
100	5,040	5,328	5,616	6,480	7,776	8,640	9,036	7,596	8,028	8,964	9,864	10,944	11,520	219
102	5,220	5,519	5,817	6,712	8,054	8,949	9,359	7,868	8,315	9,285	10,217	11,336	11,932	228
105	5,495	5,809	6,123	7,065	8,478	9,420	9,851	8,282	8,753	9,773	10,754	11,932	12,560	241
107	5,681	6,005	6,330	7,304	8,764	9,738	10,184	8,561	9,048	10,103	11,118	12,335	12,984	251
111	6,058	6,404	6,750	7,789	9,347	10,385	10,861	9,130	9,650	10,775	11,856	13,154	13,847	270
114	6,346	6,709	7,071	8,159	9,791	10,879	11,378	9,565	10,109	11,287	12,420	13,780	14,506	285
117	6,639	7,018	7,397	8,535	10,242	11,380	11,902	10,005	10,574	11,807	12,993	14,415	15,174	300
120	6,935	7,331	7,728	8,916	10,700	11,889	12,434	10,452	11,047	12,334	13,573	15,059	15,852	315
122	7,135	7,542	7,950	9,173	11,008	12,231	12,792	10,753	11,365	12,690	13,964	15,493	16,308	326
124	7,336	7,755	8,175	9,432	11,319	12,576	13,153	11,057	11,686	13,048	14,358	15,930	16,768	337
127	7,641	8,078	8,515	9,824	11,789	13,099	13,700	11,516	12,171	13,591	14,955	16,592	17,466	353
130	7,950	8,404	8,858	10,221	12,265	13,628	14,253	11,981	12,663	14,139	15,559	17,262	18,171	370
132	8,157	8,623	9,089	10,488	12,585	13,984	14,625	12,294	12,993	14,508	15,965	17,713	18,645	382
137	8,682	9,178	9,674	11,162	13,395	14,883	15,565	13,085	13,829	15,441	16,992	18,852	19,844	411
142	9,214	9,741	10,267	11,847	14,216	15,796	16,520	13,887	14,677	16,388	18,033	20,008	21,061	442
147	9,753	10,311	10,868	12,540	15,048	16,720	17,487	14,700	15,536	17,347	19,089	21,179	22,294	473
152	10,299	10,887	11,476	13,241	15,890	17,655	18,464	15,522	16,405	18,317	20,156	22,363	23,540	506
157	10,850	11,469	12,089	13,949	16,739	18,599	19,452	16,352	17,282	19,297	21,234	23,559	24,799	540
162	11,405	12,056	12,708	14,663	17,596	19,551	20,447	17,188	18,166	20,284	22,320	24,764	26,068	575
167	11,963	12,647	13,330	15,381	18,458	20,508	21,448	18,030	19,056	21,278	23,414	25,977	27,345	611
172	12,525	13,240	13,956	16,103	19,324	21,471	22,455	18,876	19,950	22,276	24,513	27,196	28,628	648
177	13,088	13,836	14,584	16,827	20,193	22,437	23,465	19,725	20,847	23,278	25,615	28,420	29,915	686
180	13,427	14,194	14,961	17,263	20,715	23,017	24,072	20,236	21,387	23,880	26,278	29,155	30,689	710

Fonte: (DAIHAN, 2013)

As linhas foram amarradas na plataforma nas extremidades, em configuração semelhante a forma que foram lançadas, e se juntam a uma estrutura que termina em uma junta telescópica amortecida localizada no eixo vertical com o centro de gravidade. A ideia é evitar criar parâmetros para calcular a deformação e estabilidade dos elementos da plataforma, fora do foco deste trabalho. Embora haja perda de informações quanto à capacidade da embarcação de lidar com momentos, o intuito é lidar com a capacidade restituidora das linhas e sua resistência. Os esforços em relação aos momentos serão verificados nas simulações apenas buscando valores absurdos.

3.4 A simulação

A simulação é efetuada usando o *software* Flexcom. Segundo a empresa responsável pelo programa John Wood Group PLC, Flexcom é um software de engenharia marinha capaz de lidar com os projetos *offshore* mais complexos e exigentes. O *software* pode ser usado para minimizar custos, reduzir ineficiências e validar designs.

É capaz de simular qualquer equipamento em ambiente *offshore* e criar, com ferramentas geométricas simples, novas formas caso necessário. O importante para esse trabalho, é que ele usa um modelo de formulação e simulação de elementos finitos, usando um elemento híbrido coluna-eixo, cobrindo tração, torque e cisalhamento. Quanto aos procedimentos, no manual interno do programa constam as fontes para a construção da ferramenta, entre elas os livros *Hydrodynamics of Offshore Structures* (CHAKRABARTI, 1987) e *Sea Loads on Ships and Offshore Structures* (FALTINSEN, 1990), ambos também consultados durante o trabalho para verificar a construção do modelo.

A simulação foi feita em 2 fases: a primeira, uma simulação estática das forças presentes no sistema, resulta nos dados de tensão e posição iniciais. A segunda fase, uma simulação do mar, correnteza e vento com a plataforma é feita imediatamente depois.

O tempo da simulação é um período de 1 ano com passo inicial de 1 segundo e depois passos de 10000 segundos, onde o estudo estático dura 1 segundo e a simulação de interação o restante do período, salvando dados a cada 10000 segundos.

As malhas utilizadas são uma malha padrão de 20 metros por unidade de computação e uma malha fina de 10 metros por unidade de computação, sendo unidades de computação os elementos unitários que compõem a linha, um elemento finito.

Os pontos finais das linhas, onde seriam as âncoras, são considerados como fixos, sem nenhuma liberdade de movimento e resistência infinita. O mesmo vale para o engate das linhas à plataforma.

O processamento de dados do programa foi mantido padrão, dando resultados sobre as linhas observadas e apenas as linhas.

A plataforma foi posicionada no eixo vertical, direção x, do centro de coordenadas, com o comprimento alinhado na direção y e alinhada com as ondas de forma a apresentar a menor resistência, ou seja, o encontro das ondas com a plataforma é paralelo entre a direção de propagação das ondas e o maior comprimento da plataforma.

Várias aproximações e simplificações, já explicitados, foram tomadas visando agilizar a simulação e diminuir o uso de memória. Em nada isso afeta o modelo que é construído de forma robusta para que essas alterações possam ser feitas de forma simples; o programa é preparado para lidar com casos mais complexos. A questão é o tempo de simulação e o tempo necessário para adequar e testar os parâmetros de simulação após feitas as alterações de cada caso.

3.5 A análise

Quanto a análise, o foco é eficiência. Para isso, a medida será a quantidade de aço utilizada nas linhas, mais aço implica em maior preço. Como o comprimento é fixo a variação se dará no diâmetro, e peso, das linhas e das correntes. Assumindo

que todas as linhas e correntes sejam feitas do mesmo tipo de aço, a densidade é a mesma e o volume pode ser estimado com o peso.

Linhas finas não suportarão às cargas impostas pelo meio ou não terão peso suficiente para provocar a reposição adequada da plataforma. Em um caso de falha da linha é apresentado no Flexcom um erro e a simulação é parada, sendo assim dados não são gerados e o sistema descartado como insuficiente. Os dados apresentados serão dos casos mínimos. A medida analisada será o perfil de passeio, o passeio médio e passeio máximo da plataforma.

O caso base contém 12 linhas. Com a progressão do trabalho, o número de linhas será reduzido, a análise repetida buscando observar se um número menor de linhas, mas linhas mais grossas e/ou correntes pesadas, seria mais peso eficiente.

Sobre os casos de falhas, em que há erro, cabe uma clarificação: o programa fornece um arquivo que conta sobre o processamento final da simulação e apresenta os graus de liberdade do centro de gravidade (CoG) do corpo flutuante, neste caso a plataforma, e de outros pontos criados pelo operador. De forma geral, quando algo vai errado, é possível descobrir qual e onde foi a falha. Erros serão comentados se pertinentes. O tipo de erro mais comum é o levantamento completo da corrente no fim da linha, o que implicaria em remoção da âncora e perda daquela linha de ancoragem em questão.

Vale reforçar que a configuração geométrica das linhas é um fator importante. Para a análise nesse trabalho, de capacidade de resistência ao movimento em relação com o peso das linhas, a configuração foi mantida a mesma em todos os cenários.

4 RESULTADOS

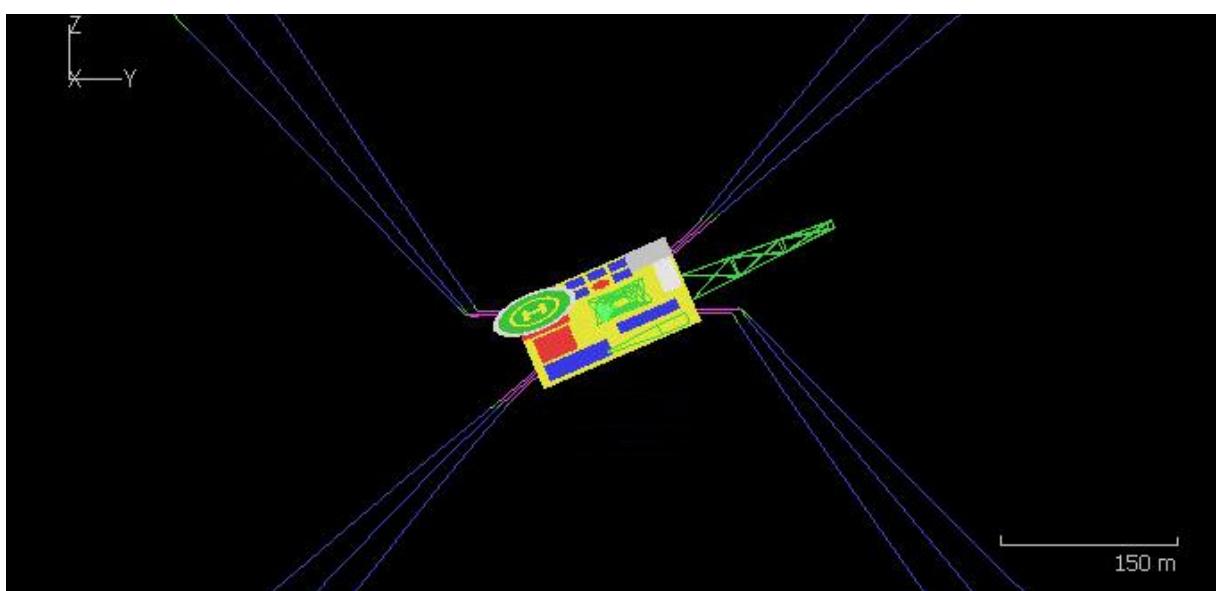
4.1 Uma linha

Utilizar apenas uma linha por diagonal não é satisfatório, e nenhum caso passou nos testes. Embora o cabo de aço suporte o peso de toda a linha, a plataforma deriva até a linha erguer-se na âncora, o que indica clara inviabilidade desse modelo de ancoragem.

4.2 Duas linhas

Utilizando duas linhas por diagonal, total de 8 linhas, não houveram resultados satisfatórios. Nos casos a carga axial nas linhas não foi problema, o sistema é incapaz de manter a plataforma em posição. Um movimento relativo angular muito alto resulta em falha catastrófica na análise, afinal, se uma plataforma gira na superfície do mar, sem ser designada para isso, por exemplo usando um *turret*, espera-se perda total dos *risers* e umbilicais. A plataforma em questão não é projetada para usar um *turret*.

Figura 3: Desvio angular da plataforma no caso de simulação com duas linhas (apesar de 3 linhas estarem desenhadas, apenas as duas exteriores de cada grupo são contabilizadas). A plataforma inicia alinhada com o eixo Y.



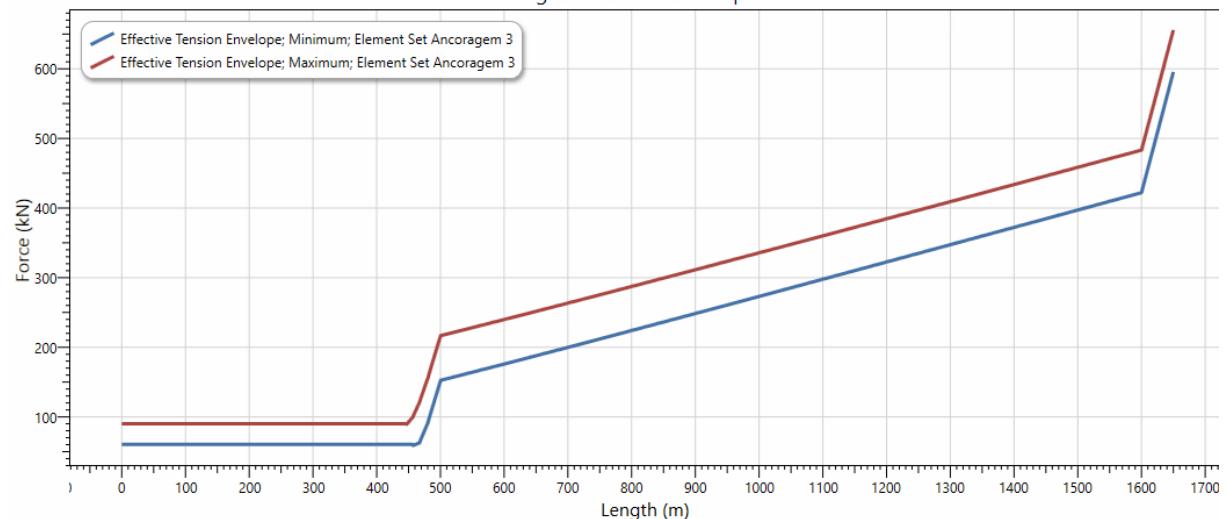
Fonte: Autoria própria

4.3 Três linhas, estudo inicial

Usando três linhas por quadrante com as correntes em um valor intermediário (337 kg/m), cabos com o menor diâmetro disponível nos catálogos utilizados, 76mm de diâmetro com peso 28.4 kg/m para um peso total de linha de 217140 kg, provou capaz de aguentar a carga: com um MBL (*Minimum Breaking Load*, máxima tensão que a linha aguenta antes de iniciar um processo de falha) estipulado em 5.6 MN e uma carga máxima durante a simulação de 900 KN (708KN foi o valor máximo em um elemento do cabo de aço) durante toda a simulação, mesmo com o fator de segurança de 1.6 recomendado, esses valores estimados não atingem valores críticos.

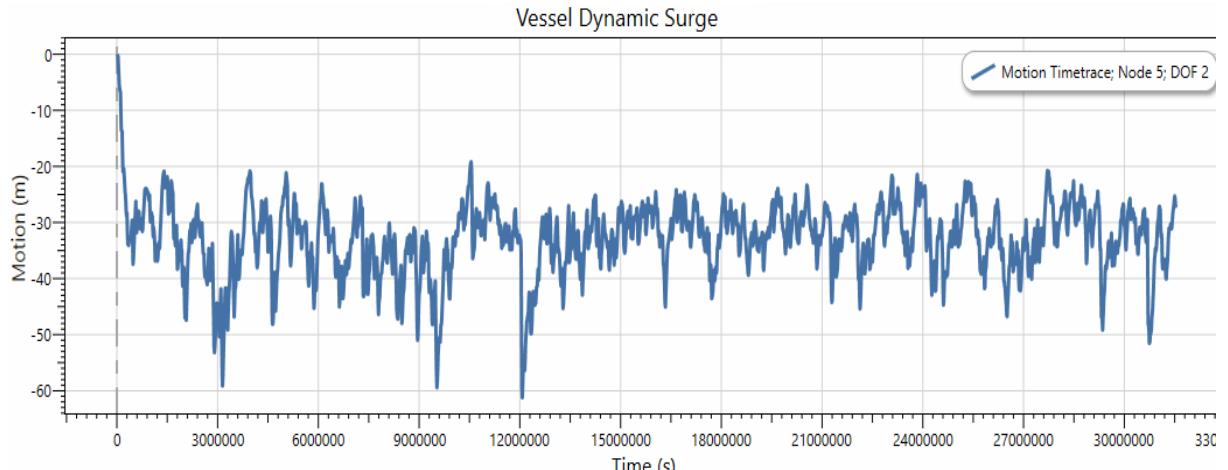
Entretanto, o passeio máximo de 28m demonstra menor capacidade de reposição do que seria aceitável. Visando mitigar esse passeio, mais um cenário utilizando linhas mais pesadas foi analisado. Observa-se ainda uma tendência de deslocamento, chamada aqui de transposição, ao longo de toda a simulação que será comentada posteriormente.

Figura 4: Tensões axiais máximas e mínimas registradas ao longo do comprimento de uma das linhas
Mooring Line Tension Envelopes



Fonte: Autoria própria.

Figura 5: Passeio na direção Y (comprimento)



Fonte: Autoria própria.

4.4 Três linhas, maiores linhas

Construindo as linhas com as correntes em um valor intermediário, peso 337 kg/m, e os cabos mais grossos (também do catálogo da MoorLink), diâmetro 153 mm, peso 114 kg/m, para um peso total por linhas de 311300 kg, usando 12 linhas. O resultado é um passeio máximo ainda de 20m com uma tendência de deslocamento absoluto significativamente menor, de 20m. Esses valores ainda são muito elevados, então outras análises foram feitas.

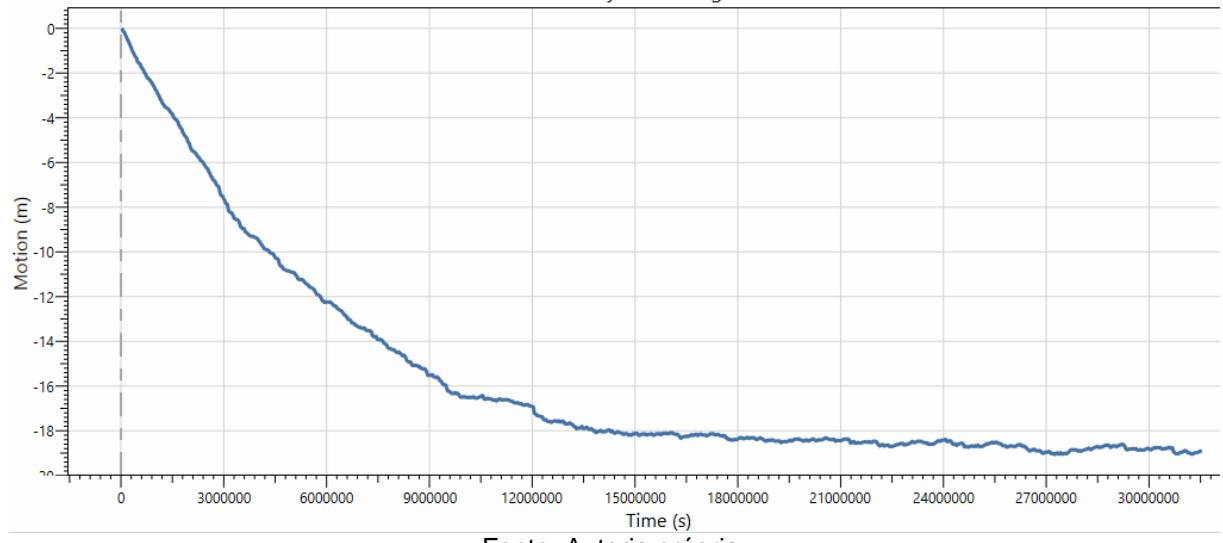
4.5 Três linhas, passeio ajustado

Para obter um resultado satisfatório mais rapidamente, uma simples aproximação linear usando os resultados anteriores de passeio e o peso da linha.

Repetido o modelo com correntes mais pesadas (710 kg/m) e cabo mais grosso (102mm, 51.6 kg/m), peso total da linha 447260 kg, o passeio foi reduzido, as tensões mantiveram dentro de parâmetros aceitáveis. O passeio foi registrado durante todo o intervalo e o sistema demonstrou alta capacidade de estabilização. Ainda é importante notar que o elemento flutuante teve um deslocamento da posição inicial que tende a 19m mas o passeio, interpretado como as variações desviantes da tendência de deslocamento, se mantém dentro de um limite de 3 metros, com maior

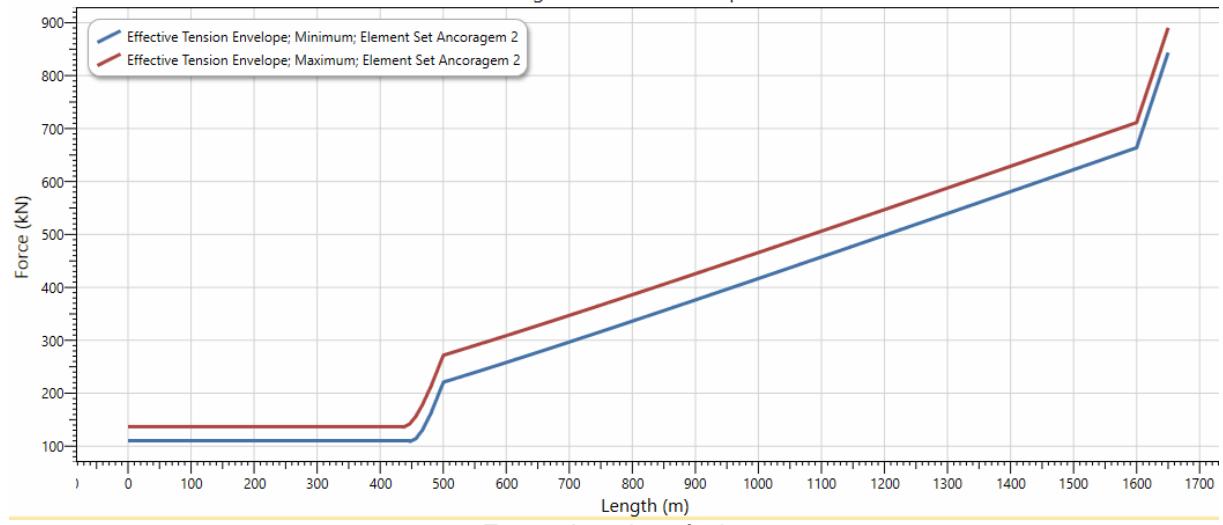
valor maior observado na incidência de uma onda extrema na faixa dos 12×10^6 s e ainda um movimento relativamente pequeno, de menos de 1m.

Figura 6: Passeio na direção Y
Vessel Dynamic Surge



Fonte: Autoria própria.

Figura 7: Tensões da linha sob maior carga
Mooring Line Tension Envelopes



Fonte: Autoria própria.

Esses foram os menores valores em peso de linha que deram um resultado de passeio dentro da margem aceitável, no caso dentro de 3m, sendo assim o considerado caso ótimo.

5 DISCUSSÃO

Primeiro, quanto aos valores dos passeios observados nas simulações, valores altos em comparação com o esperado, esses valores resultam da construção do modelo, que força um sistema de ancoragem pré-determinado em vez de construir um sistema de ancoragem para o caso em questão. Um sistema construído para cada caso naturalmente estaria dentro de parâmetros pré-definidos de passeio e segurança, a análise de viabilidade aconteceria sobre essa construção. Nesse caso, o padrão da indústria é balancear o passeio com o espaço usado pelas linhas. As instalações de fundo acabam sendo os fatores mais importantes na escolha. Dito isso, o modelo proposto é realista dentro de suas simplificações e serve ao propósito estabelecido, estudar a relação entre o peso das linhas e o passeio da plataforma.

Graças à forma que o ambiente foi simulado, a plataforma naturalmente desviará da posição inicial. Isso se dá também ao fato que a configuração geométrica das linhas não compensa o esforço não-simétrico do meio. Não será feita a correção do posicionamento, já que esse deslocamento é uma tendência clara e fácil de identificar e se tornou também parte da análise. Na realidade, a direção e energia das ondas e do vento varia de acordo com a época do ano, como pode ser visto no estudo das condições metoceânicas de Silveira e Belmiro et al. (VOGEL, SILVEIRA, et al., 2010), causando essa tendência a ser cíclica ao longo do ano, resultado em tanto percursos bem menores que o observado como influências sobre o passeio diferentes.

Com o objetivo de manter um padrão para todas as simulações, as linhas foram mantidas com a mesma construção e geometria. A comparação foi feita em quantidade de aço usada, e a análise, inicialmente, foi feita no quesito de falha, como quesito eliminatório, e depois no quesito passeio para a análise. Ainda assim vale dizer que do ponto de vista do realismo usar-se-ia mais linhas para aumentar a força restituidora, de forma que a resistência das linhas para de ser uma grande preocupação: o peso das linhas é muito inferior ao limite de escoamento e às cargas de prova de falha.

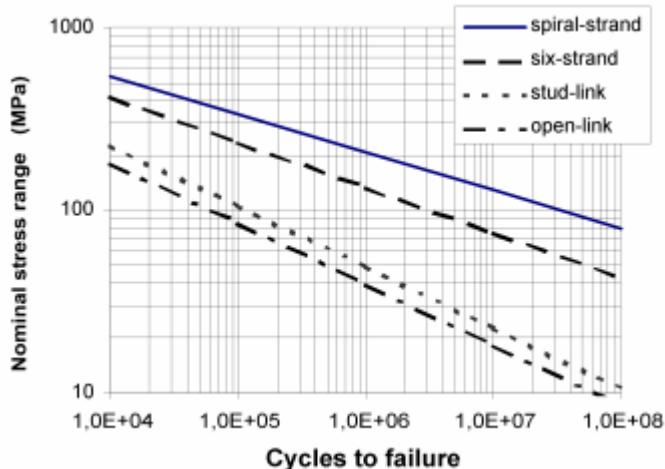
No estudo em questão, um número maior de linhas, 4 por conjunto, foi verificado em um modelo simplificado utilizado usando as mesmas configurações de linhas. A melhoria na resposta foi marginal (cerca de 1m no raio médio do passeio),

insuficiente para justificar o aumento do número de linhas, uma vez que com 3 linhas o passeio já foi ajustado de forma satisfatória.

Depois, quanto à questão da fadiga: nos próprios catálogos já vinham informações sobre a vida esperada da linha: a principal preocupação sendo corrosão e erosão, aspectos que fogem ao escopo dessa análise. Ainda assim, dados foram impressos para uma análise de fadiga, e observou-se esforços muito inferiores aos valores críticos, mesmo quando aplicados os fatores de segurança.

A função da ancoragem é controlar a movimentação do corpo flutuante no mar e para isso as linhas costumam ter resistência muito acima das cargas usuais por simples questão de construção. As condições de falha da linha foram estudadas utilizando os conceitos propostos pela DNV-GL dentro do próprio programa e nada apresentou risco nos casos mostrados.

Figura 8: Gráfico proposto de análise de fadiga para aço usual em condições base pela DNV-GL.



Fonte: (DNV GL, 2018)

Observa-se que para o cabo em questão, *spiral strand*, conta com mais de 1×10^8 ciclos em um cenário com 80 MPa de tensão nominal aplicada.

É interessante observar que o impacto do aumento de peso da linha foi muito mais intenso no passeio que na transposição, a linhas com 217140kg registraram um passeio máximo de 28m e transposição de 33m. Aumentando o peso de linha em 2.06 vezes o passeio máximo não passa de 3m, na verdade o maior passeio registrado não passa de 1m, e a transposição tem uma tendência de se

manter em 19m. A transposição, uma vez considerada, é facilmente resolvida com posicionamento estratégico.

A configuração geométrica das linhas é muito importante para o projeto, mas não foi o objetivo de análise. A razão da tomada dessa decisão foi baseada no fato que é uma análise relativamente simplista em condições ambientais, apenas uma bacia oceanográfica foi considerada e é um mar calmo, comparativamente falando. Não faria diferença para comparar as respostas das linhas, desde que todas estejam na mesma configuração. Ainda assim, vale o comentário.

As empresas cujos catálogos foram analisados foram escolhidas pois são empresas de grande porte e atuação longa no mercado. A construção dos cabos e correntes é feita de acordo com padrões internacionais, então apenas uma série de dados foi usada e as características mecânicas de aço padrões do *software* foram usadas. Mas é importante lembrar que DaiHan, embora seja uma empresa coreana, usa também o padrão chinês em anúncios e em seu site. Naturalmente, desde que a composição e os processos de produção sejam o mesmo, as características do material serão as esperadas.

6 CONCLUSÃO

Visando manter um corpo flutuante estacionário, o trabalho em questão explora o processo de simular e projetar um sistema de ancoragem de forma bem-sucedida. Uma vez estipulado o padrão de comportamento da plataforma, um sistema de reposição satisfatório pode ser brevemente projetado usando o mínimo de peso possível para a resposta ao movimento natural do mar desejada. A forma de fazer isso, seja por tentativa e erro com as opções disponíveis ou, como feito aqui, por aproximação linear usando o peso e o passeio.

Usando os métodos citados, a simulação obteve um passeio máximo dentro de 3m, parâmetro estipulado como aceitável. Com um peso total de linha de 447260 kg, usando cabo de 102mm de diâmetro e correntes de diâmetro 180 mm (segmento do elo), organizadas em 12 linhas, 4 quadrantes com 3 linhas cada. O mar utilizado é simulado usando dados da Bacia de Santos e é um resultado aparentemente exagerado, mas considerando que o ambiente foi simplificado com sazonalidade não considerada, não está fora do esperado, já que as condições ambientais ficam mais adversas para o modelo proposto.

No aspecto de simular um sistema de ancoragem e achar a melhor solução com ferramentas disponíveis no mercado, o resultado foi atingido. Entretanto, a tendência do programa de atuar como uma *blackbox*, isso é, um dispositivo que imprime resultado cujos métodos não são perfeitamente claros, torna o processo mais complicado que o necessário e muito menos claro para o utilizador do programa. Ainda mais, durante o desenvolvimento do projeto, vários fatores antes desconhecidos tornaram-se claros, a questão da disposição geométrica das linhas e a atuação na reposição angular da plataforma dos cabos. Nesses aspectos, há espaço para aprofundamento.

7 REFERÊNCIAS

CHAKRABARTI, S. K. **Handbook of Offshore Engineering**. [S.I.]: Amsterdam Elsevier, 2005.

DAIHAN. DaiHan Product Information Offshore Mooring Chain. **DaiHan Anchor Chain MFG CO. LTD**, 2013. Disponível em: <<http://www.dhac.co.kr/m32.php?pn=3&sn=2&sn2=1>>. Acesso em: 19 ago. 2019.

KLINGAN, K. E. **Automated Optimization and Design of Mooring Systems for Deep Water**. Trondheim: NTNU, 2016.

MARINHA DO BRASIL. Controle de qualidade de dados. **Marinha do Brasil - Centro de Hidrografia da Marinha**, 2019. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/u1947/controle_de_qualidade_dos_dados.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2019.

MARINHA DO BRASIL. PNBOIA. **Site da Marinha do Brasil - Centro de Hidrografia da Marinha**. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-dos-boos-brasil/pnboaia>>. Acesso em: 13 ago. 2019.

MOORLINK SOLUTIONS. Moorlink Product Catalogue. **Moorlink Global Maritim**. Acesso em: 19 ago. 2019.

OLSEN, M. K. **Estimation of annual probability of mooring line failure**. Trondheim: NTNU, 2011.

THE GLOBAL OCEANIC OBSERVATION SYSTEM. Projeto Nacional de Boias. **GOOS - Brasil**, 20013. Disponível em: <<http://www.goosbrasil.org/pnboaia/>>. Acesso em: 13 ago. 2019.

VILAMEÁ, E. M. **Estudo de Viabilidade Técnica Aplicado ao Desenvolvimento do Conceito de Plataforma ULFPSO com Utilização de Riser Rígido em Catenária Livre**. São Paulo: EdUSP, 2017.

VOGEL, M. et al. **Metocean Measurements at Northern Santos Basin - Brazil**. Offshore Technology Conference. Houston: Offshore Technology Conference. 2010.

ANEXO A - DADOS DA PLATAFORMA FLUTUANTE UTILIZADA

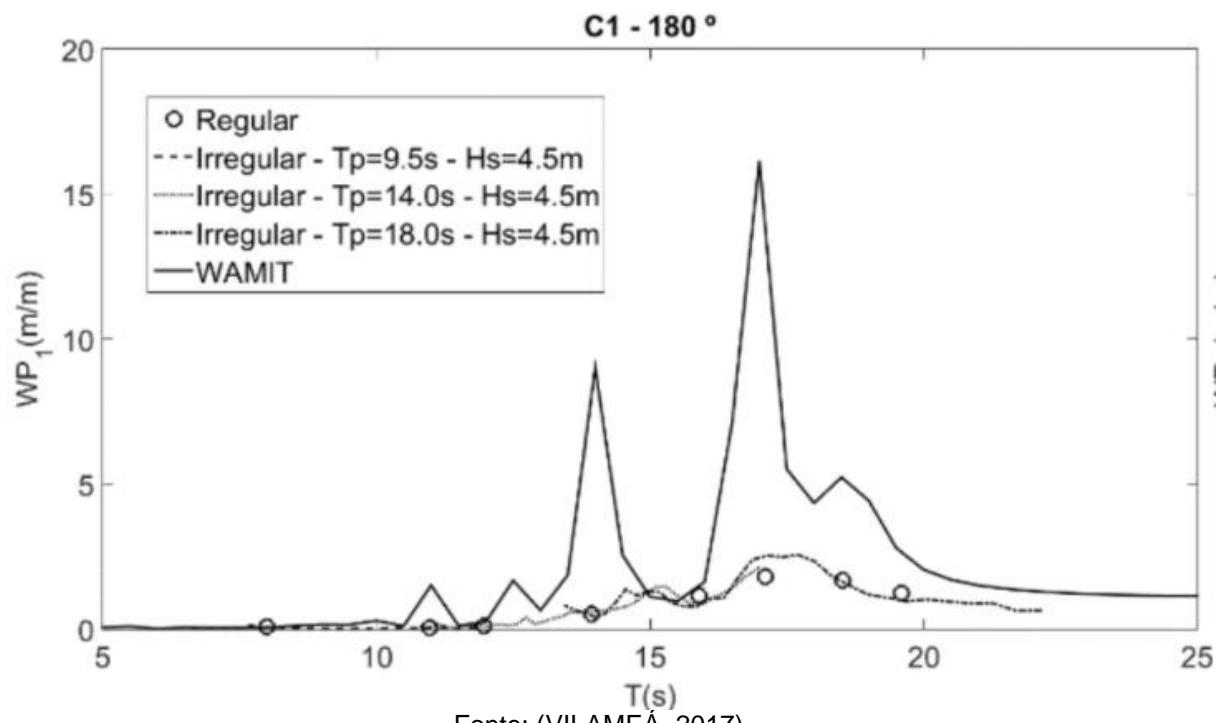
Figura 9: Tabela com dados do elemento flutuante

Item	1:100	Real	Unidade
Comprimento	0,34	340,00	m
Boca (largura)	1,00	100,00	m
Pontal (altura total)	0,40	40,00	m
Calado (altura submersa)	0,25	25,00	m
Comprimento (Moonpool)	2,95	295,0	m
Largura (Moonpool)	0,55	55,0	m
Calado	0,25	25,00	m
Deslocamento	0,569	569.700	ton
LCG*	-2,16E-02	0,00	m
TCG**	-0,59E-02	0,00	m
VCG***	20,57E-02	20,37	m
R _{xx}	33,20E-02	32,24	m
R _{yy}	102,80E-02	100,49	m
R _{zz}	105,20E-02	102,85	m
* (+) A vante da seção mestra ** (+) Bombordo *** (+) Acima da quilha			

Fonte: (VILAMEÁ, 2017)

Os dados em escala na tabela são relativos ao modelo físico criado pelo autor para os testes em tanque de prova. No caso, o eixo x é concordante ao comprimento, o y à largura e z à altura.

Figura 10: Exemplo de gráfico RAO





AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE DE LINHAS DE ANCORAGEM

Gabriel Antônio da Silva Lamounier

Orientador: Prof. Rafael dos Santos Giória

Artigo Sumário referente à disciplina PMI3349 – Trabalho de Conclusão de Curso II

Este artigo foi preparado como requisito para completar o curso de Engenharia de Petróleo na Escola Politécnica da USP.

Resumo

Uma das principais complicações de um projeto de plataforma de produção é o sistema de ancoragem. Com o avanço do horizonte de exploração para áreas mais profundas soluções cada vez mais complexas são necessárias. Para acompanhar esse progresso, os programas de simulação de ambiente marinho e estruturas nele estão cada vez mais complexos.

Tendo esse cenário em mente, o objetivo deste trabalho é avaliar um modelo de ancoragem usando o programa Flexcom quanto a fadiga e falha e passeio, e analisar também o uso do software, tendo em mente um cenário simplificado, em relação aos dados, e a execução de um projeto de engenharia.

O modelo é um ULFPSO ancorado por 4 grupos de linhas lançadas em X, os dados do mar utilizados são os do mar da bacia de Santos, para as linhas em si, vários cenários são utilizados extraíndo dados de modelos da indústria. Fatores de segurança, intervalos de viabilidade e expectativa de falha serão analisadas.

Abstract

One of the main complexities of an oil floating rig project is its mooring system. With the expansion of the exploration areas to deeper zones more complex solutions are required. To support the progress, sea environment, and structures contained in it, simulators become more complex.

With that in mind, the objective of this piece is to evaluate a mooring model using the software Flexcom in regards to failure and drift analysis, bearing in mind a simplified system and the execution of an engineering project.

The model is an ULFPSO moored by 4 groups of lines placed towards the diagonals of the structure, the sea data comes from the Santos basin and the lines themselves are modeled after industry examples. Safety values, viability intervals and failure states will be analyzed.

1. Introdução

Para se manter um corpo em uma posição determinada no mar é usado um sistema de ancoragem. Embora os diversos tipos de sistemas de ancoragem variem dependendo das condições locais e as necessidades do projeto, tipicamente para profundidades menores linhas de ancoragem compostas de correntes e cabos de aço são utilizados. Para situações especiais ou mares profundos, linhas sintéticas de polímeros, sistemas de posicionamento dinâmico e âncoras não-convencionais, cada qual usado em condições específicas para suprir as necessidades citadas.

Manter as plataformas dentro do passeio permitido para evitar danos aos risers e umbilicais é uma função essencial que torna o controle de posição uma função vital para a área desde que plataformas flutuantes passaram a ser preferidas, e depois necessárias, com o aumento da profundidade das regiões exploradas. E nos últimos anos, o horizonte de exploração de petróleo vem expandido aceleradamente para regiões cada vez mais profundas, exigindo projetos cada vez mais complexos e inovações na área, como as linhas sintéticas ou softwares de simulação como o Flexcom.

Esse estudo foca na obtenção de dados pertinentes e uso de um software de nível comercial para simular cenários de ancoragem e analisar as linhas em relação ao passeio, levando em consideração falha e limite de passeio, aplicando o conhecimento obtido no curso em um cenário prático e usando ferramentas e informações disponíveis no mercado.

2. Metodologia

Para a simulação, foram necessários criar o ambiente (mar), o corpo flutuante (plataforma), as linhas de ancoragem, além de definir os parâmetros da simulação.

O ambiente foi desenvolvido no próprio Flexcom usando os dados do Programa Nacional de Boias, da Marinha do Brasil, de dezembro de 2014 até novembro de 2017. A própria Marinha faz controle de qualidade dos dados e mais tratamento foi aplicado para remover dados suspeitos seguindo os mesmos parâmetros. O mar foi definido com profundidade de 1200m, altura significativa média de onda de 2.8m (período de 9.78s) para mar calmo e 6.48m (período de 13.72s) para mar revolto. O vento foi simplificado, direção em um deslocamento de 20° (sentido anti-horário) da principal direção de onda com velocidade média de 3.8 m/s e desvio padrão de 1.3 m/s.

O corpo flutuante foi desenvolvido segundo o modelo do trabalho Estudo de Viabilidade Técnica Aplicado ao Desenvolvimento do Conceito de Plataforma ULFPSO com Utilização de Riser Rígido em Catenária Livre (Vilameá, 2017). Para esse trabalho, as linhas foram lançadas nas quinas da plataforma, um grupo por quadrante, de forma simétrica.

As linhas foram desenvolvidas usando padrões materiais do próprio programa (aço standard 1) e componentes simulados imitando opções comerciais disponíveis no mercado, para essa pesquisa foram usados os catálogos comerciais da DaiHan (2013) e da MoorLink Solutions (2019). Estruturalmente, as linhas têm 50m de corrente seguidos por 1100m de linhas e mais 500m de corrente e a âncora, que para a simulação foi considerada um ponto imóvel de resistência infinita.

Para a simulação, são duas etapas: a primeira com 1 segundo que faz um estudo estático e a segunda com passo de 10 000 segundos durante um ano. São usadas duas malhas, uma padrão de 20m por unidade de computação, para os cabos, e uma fina de 10m por unidade de computação, para as correntes.

A análise é focada em eficiência. Para isso, busca-se o melhor resultado com menor quantidade de aço, aqui analisada via peso da linha. Para condições de interrupção, foram usadas falhas estruturais das linhas ou tentativa de movimentação das âncoras.

3. Resultados

Foram estudados múltiplos casos, com 1 linha por quadrante, com 2 linhas por quadrante e com 3 linhas por quadrante. Casos com 4 linhas por quadrante foram considerados desnecessários, uma vez que um resultado dentro dos padrões aceitáveis foi encontrado com 3 linhas por quadrante.

Sobre a questão da falha, as linhas são projetadas muito mais robustas do que as exigências do meio, de forma que não foram registradas falhas nas simulações. Os próprios catálogos exibem vida útil mais longa que a simulação.

3.1. Configuração do Caso Final

Para o caso com o passeio ajustado para os parâmetros definidos como aceitáveis (passeio menor que 5m) foram usadas as correntes de diâmetro (C-factor) 180mm e os cabos de 102mm de diâmetro para um peso total de linha 447260 kg. Com 3 linhas por quadrante, a simulação teve o desempenho exposto nas Figuras 1 e 2:

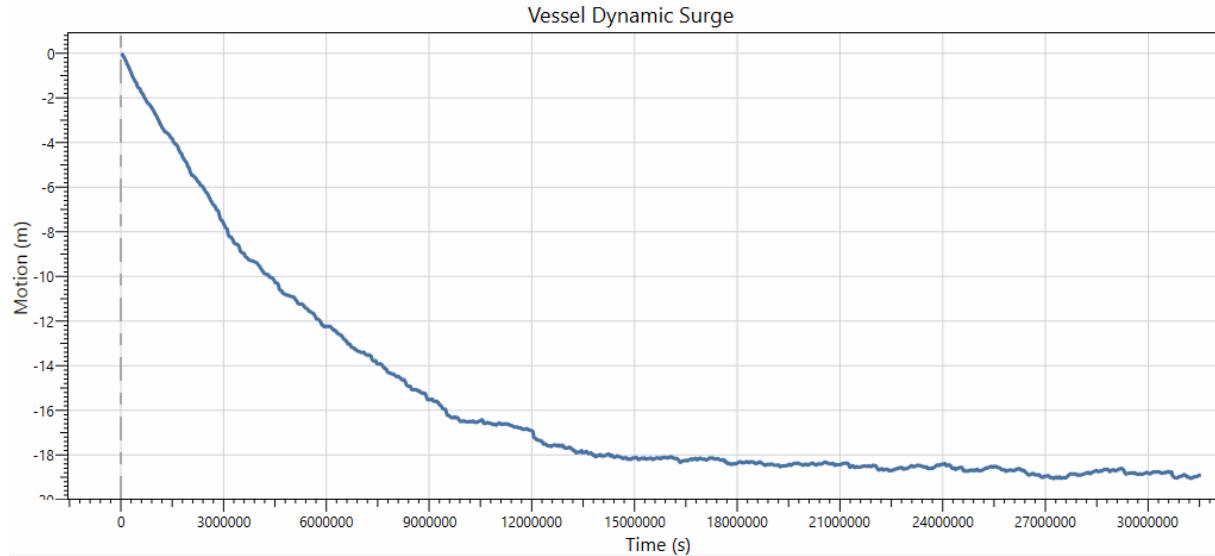
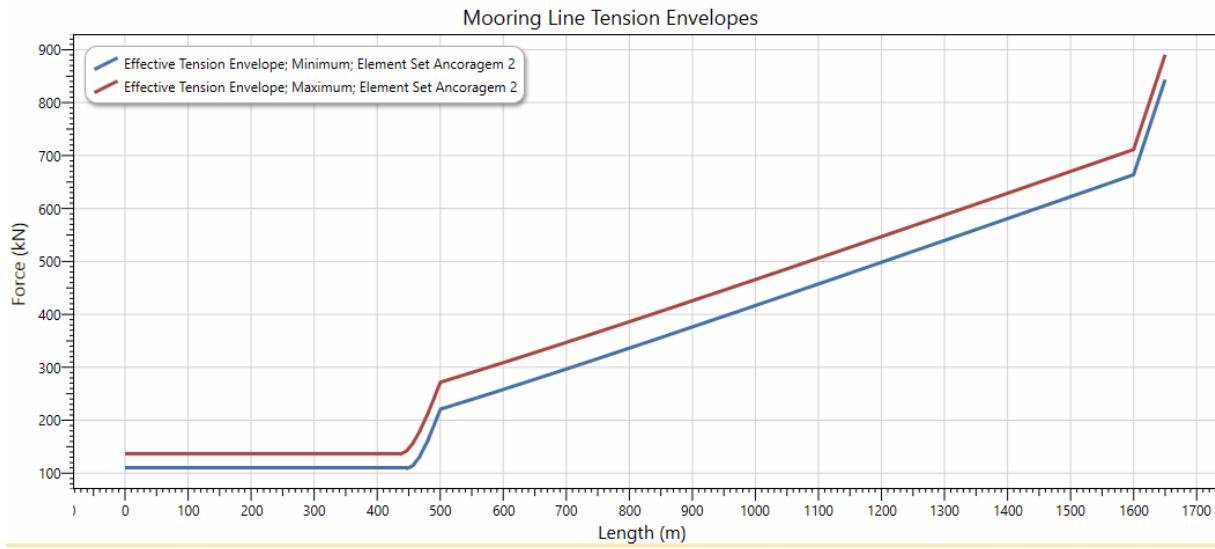


Figura 1: Passeio na direção Y

Fonte: Autoria própria.

Figura 2: Tensões da linha sob maior carga



Fonte: Autoria própria.

Nos Figuras apresentadas, vemos o desempenho do sistema em repor o posicionamento. Observa-se uma tendência a deslocar-se para uma faixa de 19m graças à construção simplificada do sistema do ambiente, mas a reposição do movimento é eficiente, observada pelas variações de curto prazo, tendo o máximo movimento de resposta a ondas sido na faixa

de 1m. Além disso, vemos a maior e menor tensão nas linhas, e esse número se encontra muito abaixo dos intervalos de risco, dados pela companhia que cria os cabos, a MoorLink.

A tendência ao deslocamento, muito aparente na Figura 1, vem da simplificação do ambiente, mas é uma tendência clara e sua influência nas análises do estudo é considerada também.

4. Conclusão

O modelo do mar foi bem simplificado para agilizar a simulação. Por isso, força condições que acarretam na clara transposição da plataforma, cerca de 19m no caso estudado. Essa transposição foi levada em consideração na decisão sobre os casos, mas apenas o passeio foi usado para definir sucesso.

Embora seja importante para um bom resultado, a configuração geométrica de lançamento das linhas não foi estudada, sendo todos os modelos com o mesmo padrão. Como a intenção é comparar entre diferentes tipos de linha, isso não afeta o resultado.

O próprio programa tem fatores de segurança e estipulações sobre falha, e em nenhum caso houve alertas. Mesmo no caso de fadiga, as linhas são feitas para uma longa vida útil nas condições de trabalho do meio, muito maiores que período da simulação.

Dito tudo isso, embora o trabalho tenha com sucesso simulado e estipulado o cenário de ancoragem encontrando a solução para o problema exposto e modelado, as condições do mar tiveram de ser simplificadas e fatores importantes, como configuração geométrica de lançamento de linhas e alternativas de sistemas de ancoragem, foram consideradas fora do escopo e não analisadas. Nesse quesito há o que aprofundar.

5. Referências

- CHAKRABARTI, S. K. *Handbook of Offshore Engineering*. [S.I.]: Amsterdam Elsevier, 2005.
- DAIHAN. DaiHan Product Information Offshore Mooring Chain. DaiHan Anchor Chain MFG CO. LTD, 2013. Disponível em: <<http://www.dhac.co.kr/m32.php?pn=3&sn=2&sn2=1>>. Acesso em: 19 ago. 2019.
- KLINGAN, K. E. *Automated Optimization and Design of Mooring Systems for Deep Water*. Trondheim: NTNU, 2016.
- MARINHA DO BRASIL. Controle de qualidade de dados. Marinha do Brasil - Centro de Hidrografia da Marinha, 2019. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/u1947/controle_de_qualidade_dos_dados.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2019.
- MARINHA DO BRASIL. PNBOIA. Site da Marinha do Brasil - Centro de Hidrografia da Marinha. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-goos-brasil/pnboaia>>. Acesso em: 13 ago. 2019.
- MOORLINK SOLUTIONS. Moorlink Product Catalogue. Moorlink Global Maritim. Acesso em: 19 ago. 2019.
- OLSEN, M. K. *Estimation of annual probability of mooring line failure*. Trondheim: NTNU, 2011.
- THE GLOBAL OCEANIC OBSERVATION SYSTEM. Projeto Nacional de Boias. GOOS - Brasil, 20013. Disponível em: <<http://www.goosbrasil.org/pnboaia/>>. Acesso em: 13 ago. 2019.
- VILAMEÁ, E. M. *Estudo de Viabilidade Técnica Aplicado ao Desenvolvimento do Conceito de Plataforma ULFPSO com Utilização de Riser Rígido em Catenária Livre*. São Paulo: EdUSP, 2017.
- VOGEL, M. et al. *Meteocean Measurements at Northern Santos Basin - Brazil*. Offshore Technology Conference. Houston: Offshore Technology Conference. 2010.