



ANÁLISE GLOBAL DE FADIGA EM LINHAS DE ANCORAGEM  
CONSIDERANDO ULTRA-BAIXAS FREQUÊNCIAS DE DADOS DE  
MOVIMENTOS MEDIDOS

Guilherme Romar Borzacchiello

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

Orientador: Breno Pinheiro Jacob

Rio de Janeiro

Julho de 2019

ANÁLISE GLOBAL DE FADIGA EM LINHAS DE ANCORAGEM  
CONSIDERANDO ULTRA-BAIXAS FREQUÊNCIAS DE DADOS DE  
MOVIMENTOS MEDIDOS

Guilherme Romar Borzacchiello

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

Examinada por:

---

Prof. Breno Pinheiro Jacob, D.Sc.

---

Prof. Fabrício Nogueira Corrêa, D.Sc.

---

Prof. Carl Horst Albrecht, D.Sc.

---

Eng. Allan Carre de Oliveira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2019

Borzacchiello, Guilherme Romar

Análise Global De Fadiga Em Linhas De Ancoragem Considerando Ultra-Baixas Frequências De Dados De Movimentos Medidos / Guilherme Romar Borzacchiello. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XI, 92 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Breno Pinheiro Jacob

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 89-92.

1. Fadiga. 2. Ancoragem. 3. Dados de Campo 4. Baixa Frequência. I. Jacob, Breno Pinheiro. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

# Agradecimentos

Aos meus pais por todo o suporte dado desde a escola até o mestrado, principalmente à minha mãe que apoiou cada uma das minhas escolhas.

Aos meus padrinhos, por terem incentivado não só a minha educação, como a de toda a família, sendo, por vezes, mais do que apoiadores, mas verdadeiros patrocinadores dos estudos.

A Carol, por todo o apoio, elogios e broncas para entregar essa dissertação, sem jamais desistir de mim e sempre ao meu lado durante esse período. Obrigado também por ter suportado toda a rotina de mestrado e pesquisa, sobretudo na reta final.

Ao meu orientador Breno e ao professor Carl, que atuou em minha orientação desde a graduação, estando sempre presente em cada etapa dos estudos e dos projetos.

Ao Laboratório de Métodos Computacionais em Sistema Offshore (LAMCSO) da COPPE/UFRJ, onde fui muito bem recebido, e a todos os amigos que fiz por lá.

À PETROBRAS, que cedeu dados importantes para elaboração dos estudos da dissertação.

À secretaria do PEC, por toda solicitude, organização e presteza ao longo desses mais de dois anos.

Aos demais professores do PEC com os quais tive a oportunidade de aprender.

Aos meus amigos, que, mesmo distante ou difíceis de encontrar, nunca deixaram de ser próximos.

À UFRJ e à COPPE por promoverem continuamente o ensino, a pesquisa e a extensão, bases para a mudança na sociedade.

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001”

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

ANÁLISE GLOBAL DE FADIGA EM LINHAS DE ANCORAGEM  
CONSIDERANDO ULTRA-BAIXAS FREQUÊNCIAS DE DADOS DE  
MOVIMENTOS MEDIDOS

Guilherme Romar Borzacchiello

Julho/2019

Orientador: Breno Pinheiro Jacob

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho visa identificar e quantificar movimentos de baixíssima frequência para uma determinada plataforma de petróleo, bem como avaliar o impacto destes na fadiga das linhas de ancoragem. Tais movimentos, de ordem superior aos de segunda ordem, teriam períodos muito longos, não sendo, portanto, detectados em uma janela de três horas de análise. Por outro lado, ao considerar movimentos tão longos, são esperados um maior deslocamento da plataforma ao longo do tempo e, conseqüentemente, uma maior variação de tração nas linhas. Através de análises dinâmicas no domínio do tempo, utilizando dados obtidos em campo, realizadas no software SITUA/PROSIM, foi feita a comparação do dano por fadiga considerando apenas os movimentos de ordens superiores (chamados de movimentos de ultra-baixas frequências) com o dano total aferido nas linhas. Por fim é analisado o dano gerado nas linhas devido aos deslocamentos medidos em campo.

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

GLOBAL FATIGUE ANALYSIS IN MOORING LINES CONSIDERING ULTRA-  
LOW FREQUENCIES FROM MEASURED MOTION DATA

Guilherme Romar Borzacchiello

July/2019

Advisor: Breno Pinheiro Jacob

Department: Civil Engineering

The present work aims to identify and quantify very low frequency motions for a certain oil platform, as well as to evaluate their contribution to the total fatigue damage in mooring lines. Such motions, above the second order, would have very long periods, not being detected by a three-hour analysis window. On the other hand, as longer period motions are considered, it is also expected larger displacements and, in consequence, a larger tension variation. Through time-domain dynamic analyses performed with the SITUA/PROSIM software, utilizing motion data from field measurements, the fatigue damage for the higher order motions (named ultra-low frequencies motions) was compared to the total damage assessed in the lines. In the end, there was also an analysis for the damage generated by the displacements obtained from field data.

# Sumário

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	CONTEXTO .....	1
1.2	MOTIVAÇÃO .....	2
1.3	OBJETIVOS .....	3
1.4	METODOLOGIA .....	3
1.5	ORGANIZAÇÃO .....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3	MOVIMENTOS DA EMBARCAÇÃO.....	10
4	CARREGAMENTOS AMBIENTAIS.....	12
4.1	ONDA.....	12
4.2	REPRESENTAÇÃO DO ESTADO DE MAR.....	13
4.3	FORMULAÇÃO DE MORISON.....	16
4.4	CORRENTE .....	17
4.5	OUTROS FATORES.....	17
5	ANCORAGEM.....	20
5.1	COMPONENTES .....	20
5.1.1	Amarra.....	20
5.1.2	Cabo de aço .....	21
5.1.3	Poliéster .....	22
5.1.4	Boias de ancoragem.....	23
5.1.5	Guincho .....	23
5.1.6	Fairlead.....	23
5.1.7	Fundações para sistemas flutuantes.....	24
5.2	TIPOS DE ANCORAGEM .....	28
5.2.1	Catenária.....	28
5.2.2	Taut-leg.....	28
5.2.3	Semi-taut.....	29
5.2.4	Vertical .....	30
5.3	SISTEMAS DE ANCORAGEM.....	30
5.3.1	Ancoragem em Ponto Único (Single Point Mooring) .....	30
5.3.2	Amarração com Quadro de Ancoragem (Spread Mooring) .....	31
5.3.3	Posicionamento Dinâmico (Dynamic Position – DP) .....	33

6	FADIGA.....	34
6.1	FADIGA DE ALTO E BAIXO CICLO .....	35
6.2	CURVAS T-N.....	35
6.3	LEI DOS DANOS CUMULATIVOS (PALMGREN-MINER).....	37
6.4	CONTAGEM DE CICLOS – MÉTODO RAINFLOW .....	38
7	ANÁLISE DE MOVIMENTOS DE DERIVA ULTRA LENTA .....	45
7.1	MODELO UTILIZADO .....	46
7.2	METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE MOVIMENTOS.....	48
7.2.1	Dados de entrada .....	48
7.2.2	Seleção de dados.....	48
7.2.3	Transformação de coordenadas e tratamento dos dados .....	49
7.2.4	Análises .....	50
7.2.5	Filtragem de dados .....	50
7.2.6	Intervalo entre os pontos .....	55
7.2.7	Validação dos resultados .....	59
7.3	IDENTIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE DERIVA ULTRA LENTA....	63
7.4	METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE FADIGA.....	68
7.4.1	Análise preliminar .....	69
7.4.2	Dano por fadiga utilizando rainflow.....	77
8	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	79
8.1	PARTICIPAÇÃO DA ULTRABAIXA FREQUÊNCIA NO DANO POR FADIGA .....	79
8.2	DANO TOTAL E VIDA ÚTIL DAS LINHAS.....	80
8.3	VALIDADE DOS RESULTADOS .....	82
8.3.1	Comparação da malha utilizada.....	82
8.3.2	Dados de campo .....	82
9	CONCLUSÃO .....	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	89

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Graus de liberdade da embarcação [7].....	11
Figura 2 - Carregamento Ambientais atuantes em uma UF [18].....	12
Figura 3 - Representação de uma Onda Regular [12] .....	14
Figura 4 - Modelo Matemático de Representação das Ondas do Mar [18].....	15
Figura 5 - Tipos de cabo de aço [1] .....	21
Figura 6 - Fairlead [1].....	24
Figura 7 - Âncora convencional (adaptado de [24]).....	25
Figura 8 - VLA [10] .....	26
Figura 9 - Estaca torpedo [24] .....	27
Figura 10 - Configuração em catenária [23].....	29
Figura 11 - Amarração com quadro de ancoragem (adaptado de [1]).....	31
Figura 12 - Vista 3D do sistema DICAS [29] .....	32
Figura 13 - Curvas T-N [1].....	36
Figura 14 - Analogia do método Rainflow com gotas de chuva caindo do telhado [7] .	38
Figura 15 - Denominações usadas no algoritmo de rainflow [7] .....	39
Figura 16 - Exemplo de série temporal [36].....	40
Figura 17 – Contabilizando o trecho A-B como meio ciclo [36].....	41
Figura 18 - Meio ciclo B-C [36].....	41
Figura 19 - Ciclo E-F contado e descartado [36].....	42
Figura 20 - Meio ciclo C-D [36].....	42
Figura 21 - Contagem dos meio-ciclos restantes [36] .....	43
Figura 22 - Algoritmo rainflow passo a passo e resultado final [36] .....	43
Figura 23 - Vista isométrica do modelo .....	46
Figura 24 - Vista superior do modelo.....	47
Figura 25 - Vista lateral do modelo .....	47
Figura 26 - Amostra de tração na linha 1 (sem média móvel) .....	52
Figura 27 - Amostra de tração na linha 1 (média móvel 300s) .....	52
Figura 28 - Amostra de tração na linha 1 (média móvel 600s) .....	53
Figura 29 - Amostra de tração na linha 1 (média móvel 1200s) .....	53
Figura 30 - Comparação entre dados brutos e após aplicação da média móvel de 600s	54
Figura 31 - Amostra de tração na linha 16 (intervalo de 1s).....	55
Figura 32 - Amostra de tração na linha 16 (intervalo de 8s).....	56
Figura 33 - Amostra de tração na linha 16 (intervalo de 100s).....	56
Figura 34 - Comparação para intervalos de 1s e 100s na linha 16 .....	57
Figura 35 - Comparação para intervalos de 1s e 100s na linha 16 (em detalhe).....	57
Figura 36 - Comparação para intervalos de 100s e 600s na linha 16 .....	58
Figura 37 - Comparação para intervalos de 100s e 600s na linha 16 (em detalhe).....	59
Figura 38 - Recorte de tração na linha 1.....	60
Figura 39 - Recorte de tração na linha 2.....	60
Figura 40 - Recorte do deslocamento da plataforma.....	61
Figura 41 - Recorte de tração na linha 10.....	61
Figura 42 - Recorte de tração na linha 16.....	62
Figura 43 - Recorte de deslocamento da plataforma em sway .....	62

Figura 44 - Deslocamentos da plataforma em surge para janeiro/2018 .....	63
Figura 45 - Deslocamentos máximos e mínimos em surge para janeiro/2018.....	65
Figura 46 - Deslocamento em surge para julho/2017 .....	66
Figura 47 - Deslocamento em surge para setembro/2017 .....	67
Figura 48 - Tração linha 10 (01/04/2017 - 05/04/2017).....	70
Figura 49 - Tração linha 16 (01/04/2017 - 05/04/2017).....	70
Figura 50 - Máximos e mínimos de tração linha 10 (01/04/2017 - 05/04/2017) .....	71
Figura 51 - Máximos e mínimos de tração linha 16 (01/04/2017 - 05/04/2017) .....	72

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros M e K para amarras segundo a API [1] .....	36
Tabela 2 - Comparação entre médias móveis .....	53
Tabela 3 - Comparação entre médias móveis .....	54
Tabela 4 - Comparação entre intervalos de gravação .....	57
Tabela 5 - Comparação entre intervalos de gravação .....	58
Tabela 6 - Comparação entre intervalos de 100s e 600s .....	59
Tabela 7 - Comparação entre intervalos de 100s e 600s .....	59
Tabela 8 - Deslocamentos máximos para surge em janeiro/2018 .....	64
Tabela 9 - Período médio das oscilações em janeiro/2018.....	64
Tabela 10 - Deslocamentos máximos em surge e amplitude do movimento para janeiro/2018.....	65
Tabela 11 - Média de deslocamentos e amplitude para janeiro/2018.....	66
Tabela 12 - Amostragem de trações (linhas 1 a 6) .....	68
Tabela 13 - Amostragem de trações (linhas 7 a 12) .....	68
Tabela 14 - Amostragem de trações (linhas 13 a 18) .....	68
Tabela 15 - Máximos e mínimos de tração linha 10 (01/04/2017 - 05/04/2017) .....	71
Tabela 16 - Máximos e mínimos de tração linha 16 (01/04/2017 - 05/04/2017) .....	72
Tabela 17 - Amplitudes de tração linhas 10 e 16 (01/04/2017 - 05/04/2017) .....	73
Tabela 18 - Amplitude média de tração linhas 10 e 16 (01/04/2017 - 05/04/2017).....	73
Tabela 19 - Dano linha 10 (análise preliminar) .....	75
Tabela 20 - Dano linha 16 (análise preliminar) .....	76
Tabela 21 - Dano anual linhas 10 e 16 (análise preliminar) .....	76
Tabela 22 - Dano anual linhas 10 e 16 (análise preliminar simplificada) .....	76
Tabela 23 - Dano linha 10 (método rainflow) .....	77
Tabela 24 - Dano linha 16 (método rainflow) .....	78
Tabela 25 - Dano anual linhas 10 e 16 (método rainflow) .....	78
Tabela 26 - Comparação de danos com e sem filtro.....	79
Tabela 27 - Dano total ao longo de toda a vida útil (20 anos).....	81
Tabela 28 - Dano total ao longo de toda vida útil (25 anos) .....	81
Tabela 29 - Vida útil das linhas 10 e 16 .....	81
Tabela 30 - Comparação de diferentes malhas de elementos finitos.....	82

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 CONTEXTO**

A exploração de petróleo desempenha um importante papel na economia mundial e as tecnologias desenvolvidas para essa atividade muitas vezes também são úteis também para diversas outras aplicações. Junto a isso, ao longo das últimas décadas, houve uma grande expansão das áreas exploradas, onde se pode destacar o avanço rumo a regiões offshore cada vez mais distantes da costa e águas mais profundas. Isso proporcionou novos desafios, em vários aspectos, tais como: o desenvolvimento de novas configurações de plataformas e equipamentos, adequação do procedimento de instalação dos mesmos, aprimoramento de logística e viabilização da integridade estrutural nestes novos cenários.

As operações offshore requerem uma série de precauções e planejamento próprios devido à sua complexidade. Além disso, as estruturas instaladas no mar necessitam suportar, com o mínimo de risco de acidentes, as condições ambientais às quais são submetidas por períodos de 20 anos ou mais. Disso, então, surge a necessidade de se avaliar a vida útil da estrutura, de forma a garantir não só o andamento pleno das operações, mas também a segurança da tripulação e do meio ambiente.

Com plataformas passando a operar em águas profundas, estruturas antes fixas passaram a ser flutuantes e, portanto, ancoradas. Assim, sistemas de ancoragem mais complexos foram exigidos para restringir o passeio da unidade flutuante, garantindo a integridade do sistema como um todo. Conforme a necessidade, tais sistemas foram sendo aperfeiçoados de modo a garantir a boa operacionalidade mesmo em lâminas d'água ultra profundas (superiores a 2000 metros de profundidade).

Dentre diversas falhas que podem ocorrer, uma comum tanto em plataformas fixas quanto em flutuantes é a fadiga. O efeito de ondas, vento e corrente na estrutura, gerando variação de tensões na estrutura, impacta diretamente nesse fenômeno. E, em se tratando de plataformas flutuantes, é preciso ter uma atenção especial com as linhas de ancoragem, pois o rompimento de uma delas pode levar a maiores passeios e, portanto, ao aumento do risco de rompimento das demais linhas, o que colocaria em risco toda a operação.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

Vários estudos já foram realizados no que diz respeito à fadiga, dentre os quais muitos visam obter uma maneira simplificada e rápida de estimar o tempo de vida útil ainda nas fases iniciais de projeto, evitando análises dispendiosas no início do trabalho. Embora muitos trabalhos apresentem maior foco em movimentos na frequência de onda (com períodos de 5 a 30 segundos) por estes serem mais numerosos, também são considerados movimentos de frequências mais baixas (segunda ordem), cujos períodos são da ordem de alguns minutos [1]. O dano total nas linhas é, portanto, o somatório da resposta a essas duas frequências de movimento.

Entretanto, uma janela padrão de análise, com intervalo de 3 horas, pode ser insuficiente para analisar esses movimentos de segunda ordem, pois o número de ciclos nesse período é pequeno [1]. Isso se deve ao fato de plataformas em águas profundas apresentarem maior taxa de amortecimento (tanto pela profundidade, quanto pelo número de linhas utilizadas), o que resulta em movimentos de baixa frequência de maior período. Em outras palavras, com maior profundidade os movimentos de baixa frequência passam a apresentar períodos maiores e, portanto, a serem menos dominantes [2], já que a ocorrência destes diminui.

Por outro lado, os deslocamentos da plataforma também se tornam mais amplos conforme o aumento da lâmina d'água, o que leva a maiores variações de tração. E, além disso, há indícios de movimentos de frequências ainda menores do que os de segunda ordem (o que será chamado de ultra-baixa frequência), cujos ciclos não seriam detectados em análises de 3 horas devido à longa duração desses. Esses movimentos de natureza ainda incerta, por apresentarem amplitude considerável, apesar de menos comuns ao longo do dia, poderiam resultar em variações de tração significativamente maiores e, por consequência, impactariam a vida à fadiga de forma contundente, o que acarretaria em problemas futuros no projeto [3].

Também é possível que haja discrepâncias entre o projeto e a plataforma em campo. Tais discrepâncias podem ser relativas ao posicionamento da unidade flutuante ou até mesmo em relação a condições ambientais não previstas. Isso pode resultar em movimentos da plataforma não compatíveis com os analisados em projeto e rompimentos inesperados de linhas de ancoragem.

### 1.3 OBJETIVOS

A constatação de que falhas não previstas ocorrem confirma e aponta a necessidade de mais estudos sobre isso e também para a melhor compreensão da dinâmica dos corpos flutuantes, tanto do ponto de vista ambiental quanto dos motivos que levam à falha das estruturas. Além disso, talvez valha a pena realizar análises preliminares mais dispendiosas, passando a considerar alguns efeitos desprezados até então, se estas apresentarem estimativas mais confiáveis e diminuïrem as chances de acidentes.

Sendo assim, a ideia do presente trabalho é abordar o que se conhece até o momento sobre fadiga e seus efeitos no sistema de ancoragem, entender as cargas ambientais envolvidas nesse aspecto e, então, avaliar o impacto de movimentos de ultrabaixa frequência na vida à fadiga das linhas de ancoragem. Ao fim, a partir da execução de análises dinâmicas no domínio do tempo utilizando dados obtidos em campo, pretende-se obter uma estimativa para dano por fadiga de uma unidade ancorada por conta desses movimentos e ver se estes possuem participação significativa no consumo de vida útil das linhas de ancoragem.

### 1.4 METODOLOGIA

Através de dados de campo e análises dinâmicas no domínio do tempo de uma unidade ancorada pretende-se chegar a uma estimativa do dano à fadiga em sistemas de ancoragem causado por oscilações ultralentas, desprezadas nas análises até então. Esse dano, se relevante, será incorporado ao cálculo atual de dano à fadiga.

Inicialmente será feita uma revisão sobre sistemas de ancoragem. Após isso, serão abordadas as falhas que ocorrem neles, sobretudo no que diz respeito à fadiga, olhando mais atentamente para esse fenômeno. Além disso, serão investigadas possíveis causas que levem a oscilações em ultrabaixa frequência, como fenômenos meteoceanográficos, de forma a melhor compreendê-los.

Em seguida, serão analisados dados de campo para o movimento de uma plataforma, buscando identificar e caracterizar oscilações de ultrabaixa frequência, ou seja, que apresentam períodos bem superiores aos de movimento de segunda ordem.

Para isso, será necessário verificar a validade dos dados, observando se há informações suficientes para os períodos analisados bem como verificando se os dados disponíveis são válidos, isto é, não apresentam variações anômalas, bruscas demais. Isso será feito a partir da aplicação de um filtro, uma média móvel, que também eliminará as oscilações referentes à alta frequência, mantendo somente aquelas de período mais longo.

O programa de análise dinâmica no domínio do tempo SITUA/PROSIM para executar análises prescritas para o modelo computacional de uma plataforma utilizando tanto os dados filtrados quanto os não filtrados. Com isso, serão recriados os movimentos reais medidos em campo, no primeiro caso, somente para os movimentos mais lentos e, no outro, para toda a movimentação da plataforma. Uma série de trações no tempo para cada uma dessas situações também será obtida, contendo todo o histórico de trações nas linhas de ancoragem.

Então serão exploradas formas para identificar e quantificar as oscilações ultralentas. A ideia é, inicialmente, realizar uma análise de máximos e mínimos para buscar um melhor entendimento do fenômeno e uma estimativa de amplitudes e duração dos movimentos. Em seguida, as variações de tração para estes serão obtidas pelo método de contagem rainflow. Por meio das curvas T-N e da regra de Palmgren-Miner será aferido o dano gerado. Por fim será analisado o impacto desses movimentos na vida útil à fadiga, através da comparação dos resultados gerados para os dados filtrados e os não filtrados, avaliando se a inclusão desse dano é relevante para os cálculos de fadiga.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO

No início, no capítulo 2, serão revisados alguns trabalhos com foco na fadiga de sistemas de ancoragem de unidades flutuante, expondo os procedimentos usuais de análise e quais os problemas encontrados atualmente.

Em seguida, nos capítulos de 3 a 6, serão apresentados conceitos importantes à realização do estudo, fundamentando a parte teórica do estudo. De forma a dar uma visão geral da dinâmica das estruturas flutuantes e sua natureza, serão apresentados os movimentos da embarcação e, depois, as cargas ambientais envolvidas, com uma rápida

abordagem sobre fenômenos meteoceanográficos. Após isso, é realizada uma revisão sucinta dos sistemas de ancoragem e seus elementos, de forma a ampliar a compreensão sobre esses. Passa-se então à fadiga, englobando sua definição, distinções e formas de cálculo.

No capítulo 7, os modelos utilizados para análise serão apresentados, juntamente com uma explicação sobre os dados de campo disponíveis. Na sequência, analisam-se os movimentos de estruturas flutuantes, primeiramente convertendo e filtrando os dados de campo, depois buscando identificar grandes oscilações na série temporal de movimento. Com os dados de deslocamento filtrados, é realizada a análise dinâmica com movimento prescrito para os modelos de plataforma, resultando em uma série temporal de trações. Para essa série será utilizado o método de contagem rainflow, de forma a quantificar, para cada um, o dano resultante no período através de curvas T-N e da regra de Palmgren-Miner.

Com a obtenção desses resultados, no capítulo 8, será feita a comparação entre o valor do dano encontrado para a baixa frequência e o dano total oriundo dos dados de campo completos. O dano obtido a partir dos dados de campo sem o filtro para baixa frequência também será extrapolado para análise da vida útil.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos trabalhos buscam obter formas mais confiáveis de se estimar a vida à fadiga de linhas de ancoragem. Xue et al. [4] apresenta uma comparação entre diferentes análises de fadiga de um sistema de ancoragem: curvas T-N, curvas S-N e mecânica da fratura. Com isso, mostrou que o tempo de vida à fadiga previsto por essas abordagens são similares quando os fatores de segurança sugeridos pela API e pela DNVGL são considerados para as curvas T-N e S-N. Além disso, a abordagem por meio de curvas de T-N se mostrou ligeiramente mais conservadora do que a feita por curvas S-N.

Em Du et al. [2] uma análise de fadiga no domínio do tempo foi conduzida nas linhas de ancoragem utilizadas em uma plataforma semissubmersível com foco no dano à fadiga em baixa frequência, considerando diversos fatores de influência, incluindo profundidade, parâmetros de espectros de onda e sistemas de risers. Através do método usual de análise no domínio do tempo, o qual consiste no método de contagem rainflow, curvas T-N e regra de Palmgren-Miner, é demonstrado que a fadiga gerada pela baixa frequência é afetada claramente pelos fatores de influência listados. O aumento de lâmina d'água e de períodos de pico espectrais, bem como a existência de risers, podem enfraquecer a contribuição dos componentes de baixa frequência ao dano à fadiga em linhas de ancoragem. Por outro lado, o dano à fadiga devido à baixa frequência é maior conforme a altura significativa de onda aumenta.

Os autores desse estudo ainda fazem observações interessantes sobre os resultados encontrados. Notam que as componentes de baixa frequência (segunda ordem) são significantes para o movimento e para a tração, mas contribuem pouco para o dano total nas linhas. Ainda destacam que uma plataforma em águas profundas apresenta menor rigidez das ancoragens, o que resulta em um maior período natural do sistema. Porém, mesmo com o aumento da variação de tração na linha conforme a profundidade, a contribuição da baixa frequência diminui devido ao maior amortecimento. Quanto a isso, um contraponto mencionado foi o da baixa amostragem de movimentos de segunda ordem na janela de análise, com duração de três horas, sem

que nenhum dos trabalhos entrasse no mérito de movimentos de ordens mais altas do que a segunda, isto é, de frequência ainda mais baixas.

Huang et al. [5] aborda a dificuldade de prever a fadiga com precisão e qual a importância de cada etapa da análise para uma melhor estimativa do dano. Sobre a contagem de ciclos, reforça que o método rainflow é considerado como a estimativa mais precisa para o dano à fadiga, pois analisa diretamente toda a série temporal. Também frisa que utilizar a curva T-N correta é de suma importância para a análise de fadiga e, portanto, mais testes deveriam ser realizados para se obter uma curva T-N confiável para amarrações de fibra sintética para sistemas taut-leg. Além disso, alerta que a falha de uma linha leva a uma mudança na configuração de ancoragem, o que pode aumentar substancialmente as trações nas linhas restantes e ocasionar um dano à fadiga notavelmente maior nelas se a falha não for identificada ou não reparada por um período longo de tempo.

Santos [6] buscou averiguar o consumo da vida à fadiga do sistema de ancoragem de uma unidade de produção de petróleo através da análise dos dados de movimentação medidos em campo. A verificação foi efetuada através da simulação do comportamento dinâmico das linhas, quando submetidas aos movimentos medidos em campo. A partir das séries históricas de tração nas linhas de ancoragem e utilizando métodos de contagem de ciclos, estimou-se o dano por fadiga em cada linha.

O trabalho mostrou que é possível estimar a vida à fadiga das linhas de ancoragem de uma unidade ancorada a partir dos movimentos medidos com um modelo numérico calibrado destas linhas. Também se pode estimar qual linha está sendo mais solicitada e medidas de prevenção podem ser tomadas antes que um acidente de rompimento ocorra, evitando expor a unidade a um risco maior. Por outro lado, o estudo ressaltou a importância de investimentos constantes para que os equipamentos de GPS gerem dados cada vez mais confiáveis, pois os mesmos precisaram ser filtrados na análise.

Além disso, outros estudos ressaltaram a importância de se rever os fenômenos atuantes na plataforma. Neles se nota o descompasso entre as condições ambientais e situações aplicadas na fase de projeto em relação à realidade.

Leal [7] realizou uma comparação entre a metodologia de projeto e os dados obtidos em campo para a análise de fadiga de um sistema de ancoragem (do tipo turret) de um FPSO. Dessa forma, realizou dois tipos de análise: análise dinâmica acoplada utilizando dados meteoceanográficos (onda, vento e corrente) e análise desacoplada com os movimentos aferidos em campo.

As diferenças referentes ao perfil de faixas de tração foram notáveis, principalmente no que se refere aos histogramas de tração. Chegou-se à conclusão que as análises realizadas, com dados de projeto e com movimentos medidos, têm resultados qualitativos não compatíveis. Verifica-se, em campo, uma grande quantidade de faixas de tração de baixa magnitude ou ausência de ciclos nas faixas de tração que compreendem de 5% a 10% da tração de ruptura, de forma diferente ao esperado em projeto, onde as faixas são mais uniformemente distribuídas.

Além disso, os resultados indicam falhas em linhas não previstas na fase de projeto. Isso demonstra uma discrepância entre as condições ambientais utilizadas em fase de projeto e deslocamentos medidos em campo.

Evangelista [3] avaliou o dano na vida em fadiga gerado por oscilações de ultra-baixa frequência no sistema de ancoragem de uma unidade de produção de petróleo através da análise dos dados de movimentação medidos em campo. Filtrando dados satisfatórios para um dia foi possível identificar oscilações de baixa frequência e a variação de tração causada por estas. O dano referente a isso foi considerado na avaliação do cálculo da vida em fadiga das linhas de ancoragem, calculando-se a porcentagem de dano causado por oscilações de ultrabaixa frequência em relação ao dano comumente calculado em projeto, que não as considera.

Estimou-se um dano devido à ultra-baixa frequência de até 6% em relação ao dano gerado para as linhas de ancoragem ao longo da vida útil da plataforma. Isso representaria cerca de um ano e meio de diferença na sua vida útil, o que poderia causar certa mudança no planejamento de reparo das linhas. Além disso, levando em consideração que outros ciclos ultralentos não foram considerados na avaliação e o fato de a análise ter se baseado em um dia de verão, com mar mais calmo, os danos devido a essas oscilações não considerados em projeto podem vir a ser ainda maiores.

Tais resultados levaram à necessidade de explorar melhor as condições ambientais impostas ao projeto. Fenômenos meteoceanográficos ainda pouco estudados podem impactar o projeto de forma significativa seja contribuindo para oscilações de ultrabaixa frequência, seja aplicando forças não previstas originalmente. Um exemplo disso, é a chegada de vórtices oriundos de regiões distantes à Corrente do Brasil.

Guerra [8] estudou a emissão de vórtices das Agulhas e seus possíveis impactos na Corrente do Brasil. Foram rastreados 90 vórtices das Agulhas entre os anos de 1992 e 2010, utilizando dados combinados de altimetria por satélite, e três deles foram estudados mais a fundo. Dessa forma, observou-se que, a despeito de seu decaimento, os vórtices das Agulhas foram capazes de transportar águas modais por mais de 4000 km até a Bacia do Brasil. Além disso, um destes interagiu com a Corrente do Brasil e com ciclones locais produzindo um jato de corrente de 1,2 m/s, três vezes a velocidade média local.

As análises dos dados altimétricos para o período sugerem que ao menos mais três vórtices podem ter atingido a Corrente do Brasil. Isto sugere que o que foi abordado nesses estudos não representa um fenômeno único, e que a chegada de vórtices, se não comum, pode ser recorrente. Assim, considerar a chegada de vórtices de origem remota significaria adicionar outra fonte de energia e vorticidade desprezadas até agora.

### **3 MOVIMENTOS DA EMBARCAÇÃO**

As unidades flutuantes, por estarem expostas a cargas ambientais, estão em constante deslocamento e, por esse motivo, é interessante que haja um monitoramento constante da posição da plataforma, garantindo maior segurança ao monitorar se a plataforma se encontra dentro de uma zona segura de operação. Em contraposição a essas cargas há a ação das linhas de ancoragem de modo a restaurar a posição da plataforma, pois um deslocamento muito extremo pode danificar risers e indicar um rompimento de linha, por exemplo. Desse modo, as diversas forças atuando na estrutura levam a uma série de movimentos tanto de alta quanto de baixa frequência, impactando diretamente no dano por fadiga nas linhas de ancoragem.

Esse monitoramento é feito por meio de sistemas GPS a todo momento, sendo comum os dados apresentarem intervalos de apenas 1 segundo entre si. Toda a informação sobre o movimento da unidade flutuante é armazenada em dois tipos de arquivos digitais distintos: GPS e GIRO. Em ambos os arquivos, as informações são fornecidas para cada segundo de medição. O arquivo GPS fornece o posicionamento em função das coordenadas UTM Leste e UTM Norte. Já no arquivo GIRO consta apenas o aproamento da plataforma, em graus.

O sistema de coordenadas UTM – Universal Transversal Mercator – baseia-se no plano cartesiano, utilizando-se do metro como unidade de medida. Como convenção, UTM Norte equivale às coordenadas Norte-Sul (ordenadas) e UTM Leste, às coordenadas Leste-Oeste (abscissas). Já o aproamento é a diferença entre a direção da embarcação e uma direção inicial de referência.

Além disso, todo corpo rígido possui seis graus de liberdade: três movimentos de translação em cada eixo (X, Y e Z) e três movimentos de rotação em torno de cada um desses eixos. No caso de uma embarcação, os movimentos de translação são surge, sway e heave, no sentido dos eixos X, Y e Z, respectivamente, e os movimentos de rotação são roll, pitch e yaw, em torno dos eixos X, Y e Z, respectivamente [7]. No caso do arquivo GIRO há apenas dados para yaw, ao contrário de arquivos OCTANS, que contém dados para os seis graus de liberdade, demonstrados na Figura 1.

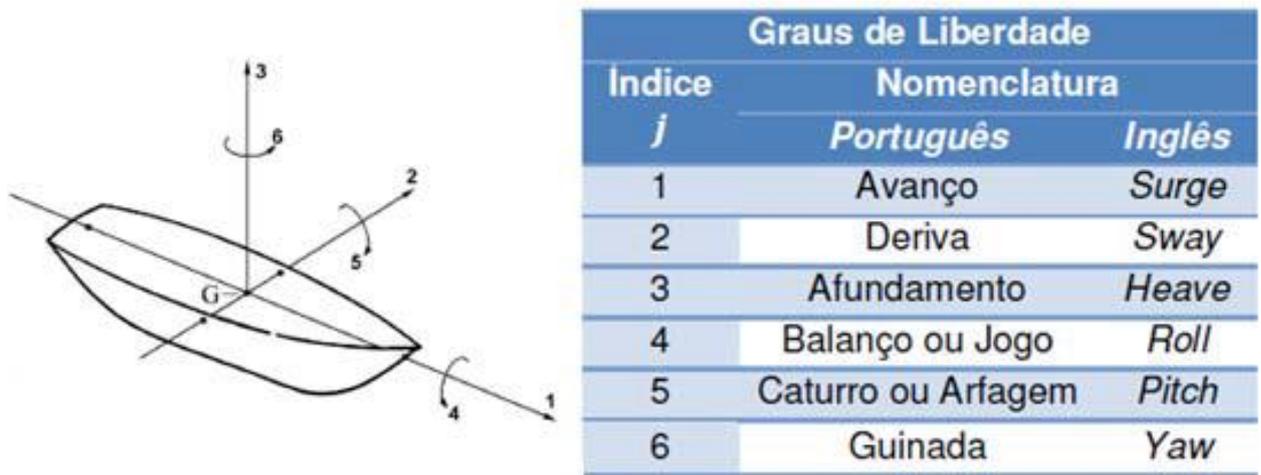


Figura 1 - Graus de liberdade da embarcação [7]

Tais informações são importantes para monitoramento e futuros estudos envolvendo os movimentos das plataformas. Entretanto, por diversas vezes, ocorrem problemas com as medições: lacunas na aquisição dos dados, falhas na hora de salvar os dados ou até mesmo obtenção de dados incorretos. Mesmo o sistema GPS, com constantes melhorias na obtenção do posicionamento, pode apresentar imprecisões na localização de até 10 metros. Por isso, é importante que se tome cuidados com dados medidos em campo e que se analise também a qualidade dos dados.

## 4 CARREGAMENTOS AMBIENTAIS

A estruturas oceânicas e seus sistemas de ancoragem estão submetidos a carregamentos gerados por ventos, ondas e correntes, como ilustrado na Figura 2 abaixo. As cargas ambientais podem ser consideradas de diferentes formas e, dentro dessas considerações, podem ser incluídas tanto as cargas de baixa frequência que excitam os períodos naturais de surge, sway e yaw da plataforma e cujos intervalos variam de 1 a 10 minutos, como também as cargas na frequência das ondas, com períodos variando de 5 a 30 segundos [1].

A corrente e as ondas atuam na parte submersa do casco bem como nas linhas de ancoragem e nos risers. Já o vento atua na parte exposta da estrutura [7] e não será abordado, mas cabe dizer que, muitas vezes, o modelo de vento utilizado é simplificado, considerando parcelas estáticas e dinâmicas (quando não só estáticas), ao passo que, no momento, modelos espectrais, considerando a influência do vento na baixa frequência, sejam mais recomendados.

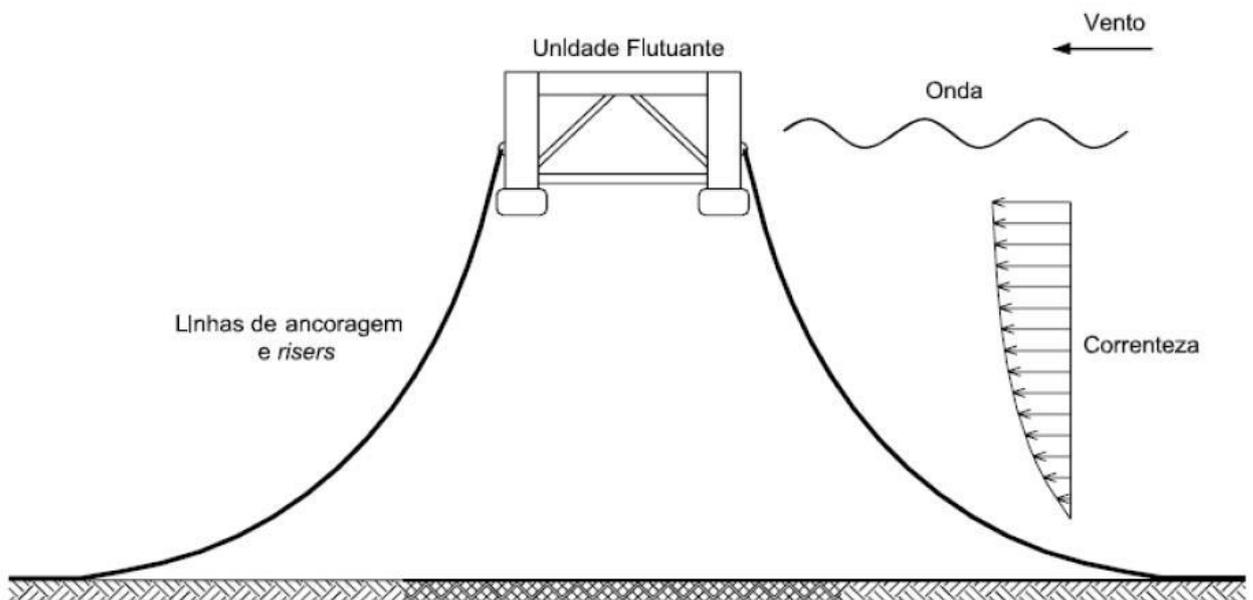


Figura 2 - Carregamento Ambientais atuantes em uma UF [18]

### 4.1 ONDA

As forças de onda que atuam na unidade flutuante apresentam três componentes [7]:

- Forças de primeira ordem na frequência da onda incidente;
- Forças de segunda ordem em frequências inferiores à frequência da onda incidente;
- Força constante de segunda ordem. (Também chamada de Força Média de Deriva)

O cálculo de cada uma dessas componentes contribui para a verificação da resposta dos movimentos da unidade flutuante e do comportamento do sistema de ancoragem. Pela solução do modelo matemático proposto em uma teoria de onda é possível obter velocidades, acelerações e pressões das partículas do fluido sem considerar a presença de um corpo. Para calcular as forças de onda que atuam no casco da plataforma, nas linhas de ancoragem e nos risers foram desenvolvidas formulações, que são verificadas e calibradas por modelos experimentais e também por meio de monitoração de plataformas em operação [9].

Em estruturas compostas por membros esbeltos (isto é, cujo diâmetro é menor do que um quinto do comprimento de onda), que não afetam o campo de ondas incidente, utiliza-se formulações semi-empíricas, como Morison. Já em estruturas que alteram significativamente o campo de ondas incidente são necessários métodos que considerem forças da onda incidente (Força de Froude-Krylov) e as forças resultantes da difração da onda [7].

#### 4.2 REPRESENTAÇÃO DO ESTADO DE MAR

A representação de ondas do mar se dá por meio de sua altura, comprimento e velocidade de propagação. Elas podem ser incorporadas tanto em modelos determinísticos (mar regular), onde uma série de ondas apresenta uma determinada altura  $H$  e um período  $T$ , quanto em modelos aleatórios (mar irregular). Esse último é composto pela superposição de ondas regulares e apresenta propriedades estatísticas próprias, sendo representado por uma função de densidade espectral [7, 12].

Avançando no que foi dito, o estado de mar regular é definido pelo comprimento de onda  $L$ , pela altura de onda  $H$  (definido pela distância vertical entre crista e cavado)

e pelo período entre cristas  $T$ ; além da profundidade  $d$ ; o nível médio MWL e a elevação da superfície  $\eta$ . Isso é demonstrado na Figura 3 a seguir:

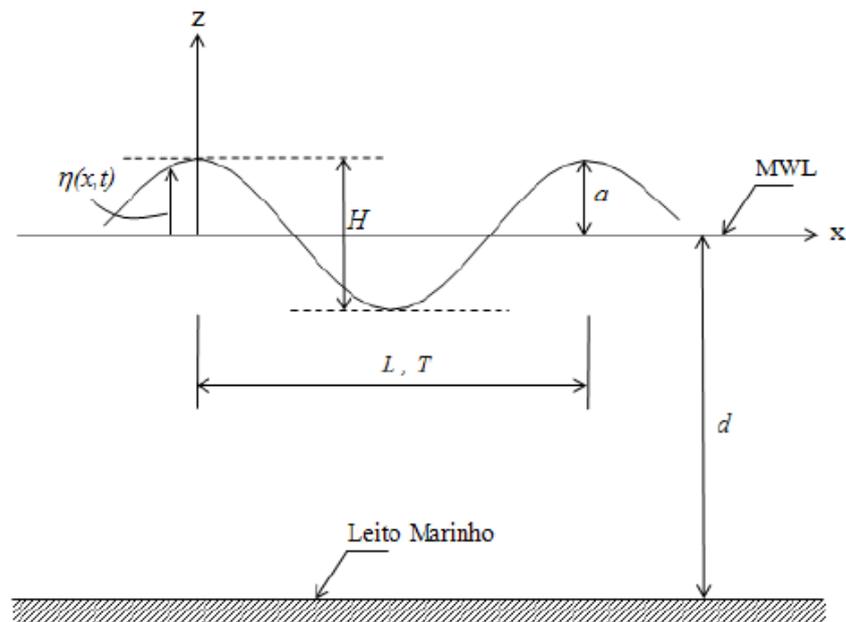


Figura 3 - Representação de uma Onda Regular [12]

Embora ondas regulares não existam na prática, elas são comumente utilizadas para estimar a resposta das estruturas offshore a carregamentos extremos. Além disso, as ondas regulares são um bom ponto de partida para o estudo de ondas irregulares, já que a representação do mar irregular se dá através da superposição de ondas regulares diversas.

Devido à natureza aleatória das ondas, é complexo prever o seu comportamento e efeito sobre estruturas offshore. Para tal, foi formulado um modelo matemático que representa o comportamento das ondas no mar [13], demonstrado na Figura 4 abaixo.

Para solucionar esse modelo são empregadas teorias de onda, que levam a uma solução aproximada e determinam o deslocamento, velocidade e aceleração das partículas de onda [13].

As teorias de onda apresentam pequenas diferenças entre si. A saber, as mais utilizadas em projetos offshore são:

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

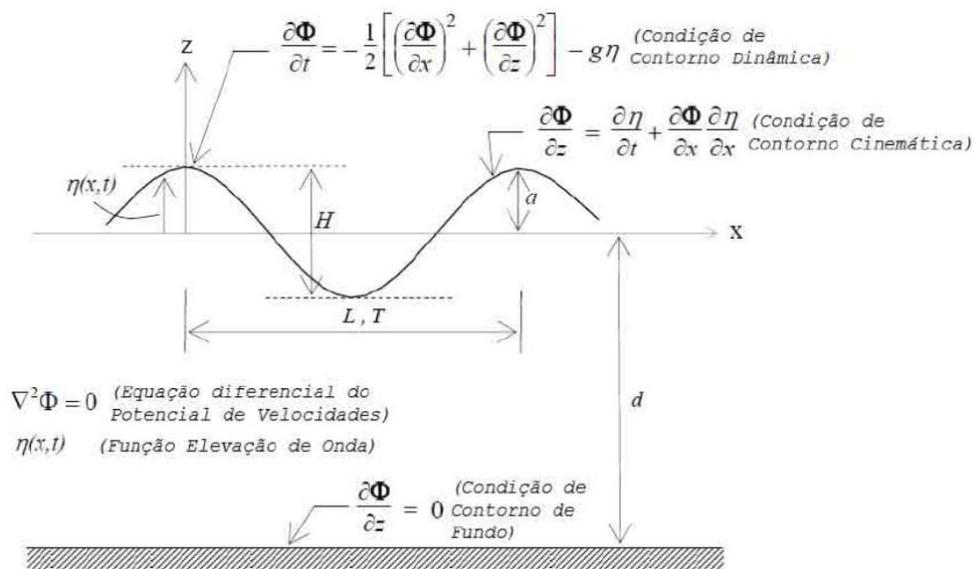


Figura 4 - Modelo Matemático de Representação das Ondas do Mar [18]

Além disso, uma forma aproximada de representar o comportamento das ondas do mar é o modelo espectral, que apresenta a distribuição de energia de onda discretizada em uma faixa de frequências.

Através da monitoração meteoceanográfica e do ajuste de parâmetros para particularizar expressões analíticas gerais é possível descrever esses espectros. Os parâmetros referidos seriam os fatores de forma espectral, a altura significativa de onda e o período de pico. Na estatística de curto prazo, estes são supostos constantes e definem um estado de mar.

As formulações para espectro de mar usualmente adotadas no Brasil são os espectros de Pierson-Moskowitz e de Jonswap.

### 4.3 FORMULAÇÃO DE MORISON

A fórmula de Morison é baseada no conceito que a força exercida pelo fluido é composta por duas parcelas: uma parcela de arrasto e uma inercial. Tais componentes são dadas por coeficientes empíricos. O coeficiente de arrasto é associado a efeito viscosos, proporcional à velocidade relativa entre o fluido e o corpo, enquanto o coeficiente de inércia é proporcional às acelerações. Aplica-se a fórmula de Morison quando a força de arrasto é significativa, quando os efeitos viscosos preponderam sobre os inerciais, como é usualmente o caso de corpos esbeltos [10].

Como dito anteriormente, um corpo é dito esbelto quando atende à seguinte relação, segundo a equação (1):

$$\frac{D}{\lambda} < \frac{1}{5} \quad (1)$$

Onde D é a dimensão transversal característica do corpo e  $\lambda$  é o comprimento de onda.

Para um escoamento retilíneo acelerado de um fluido real, a força total atuante é dada pela equação de Morison, representada na equação (2):

$$F_0(x, t) = F_a + F_i \quad (2)$$

Onde:  $F_0$  = Força de onda;

$F_a$  = Força de arrasto;

$F_i$  = Força de inércia.

A força de arrasto é dada pela equação (3):

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

A força de inércia é dada pela equação (4):

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

O termo  $\rho_w$  representa a massa específica do fluido, D se refere ao diâmetro, e  $\dot{u}$ ,  $\dot{x}$ ,  $\ddot{u}$ ,  $\ddot{x}$  são, respectivamente, as velocidades e acelerações do fluido e do corpo. Para os coeficientes é tido que  $C_d$  é coeficiente de arrasto (drag);  $C_m$  coeficiente de massa (ou inércia); e  $C_a$  coeficiente de massa adicionada (usualmente definido como  $C_m - 1$ ) [11]. Esses coeficientes são calibrados experimentalmente. Na análise de linhas de ancoragem e risers usualmente empregam-se valores de  $C_d$  variando entre 0,7 e 1,2, e valores de  $C_m$  em torno de 2,0 [7].

#### 4.4 CORRENTE

Normalmente, as cargas de corrente marítima são consideradas estáticas e aplicadas por meio de perfis poligonais de velocidades desde o fundo do mar até a superfície, atuando tanto nas linhas quanto no casco. Em geral, adota-se um perfil com a velocidade da corrente, com suas respectivas direções de incidência em função da profundidade, de acordo com a locação. Esse procedimento é adotado mesmo se sabendo que o valor da corrente pode variar, o que é desprezado até então, e que ela pode provocar fenômenos dinâmicos, como as vibrações induzidas por vórtices (VIV) [9].

Entretanto, isso é uma simplificação, pois essa área ainda apresenta muitas incertezas. As variações da corrente ao longo do dia, desprezadas nas análises, poderiam ajudar a explicar alguns deslocamentos incomuns na posição da plataforma. Esse e outros fatores podem influenciar o comportamento da plataforma.

#### 4.5 OUTROS FATORES

Como dito, não só as correntes, mas outros fenômenos oceanográficos ainda precisam ser melhor estudados. Atualmente, é possível observá-los e constatar-los, mas a real influência deles na vida útil da plataforma ainda não pode ser mensurada. Tem-se, como exemplo, a chegada e formação de vórtices na costa brasileira. Considerar a

chegada de vórtices de origem remota significaria adicionar outra fonte de energia e vorticidade desprezadas até agora [8].

Em se tratando de correntes, em um primeiro momento é possível pensar que a influência direta da Corrente do Brasil é pequena nos campos do pré-sal. Entretanto esses campos estão localizados em uma planície abissal, onde eventos extremos de correntes estão associados à passagem de redemoinhos, um fenômeno que pode ser recorrente [8], conforme visto na revisão bibliográfica. A passagem de dipolos de redemoinhos pode levar a picos de velocidade consideravelmente maiores do que a média da região [14].

Fora isso, ao menos um estudo [15] já demonstrou que grandes perturbações de vórtices na Corrente do Brasil influenciam de forma significativa a geração de correntes inesperadas perto da borda da plataforma continental na Bacia de Campos, sugerindo que a circulação dessa região seja provavelmente dominada por vórtices de retroflexão da Corrente do Brasil. Essa análise foi feita com base em dados de medidores de corrente e abordou, em termos de latitude e longitude, uma área de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  centrada em  $22^\circ\text{S } 40^\circ\text{W}$ .

E vórtices têm se mostrado traços recorrentes mesmo em áreas bem tranquilas. Quando saem do fluxo principal como anéis isolados, eles podem transladar por centenas ou milhares de quilômetros e ter períodos de vida que variam de dias a anos até perderem sua assinatura no campo de correntes [16]. Além disso, a formação de vórtices é particularmente intensa e recorrente ao largo de Cabo Frio, Cabo São Tomé (latitude de  $\sim 22^\circ\text{S}$ ) e Vitória. Porém, pouco se sabe sobre o número total de vórtices formados na região a cada ano [16].

Os vórtices formados ao largo do Cabo São Tomé, tanto os que se desprendem quanto os que são reabsorvidos, estão acima do tamanho médio de vórtices em termos de anomalia no nível do mar. Por outro lado, estão abaixo da média quanto ao raio, o que indica que eles são mais energéticos do que um vórtice médio a partir de uma perspectiva geostrófica, isto é, quando há o equilíbrio entre o efeito Coriolis e a força do gradiente de pressão. Portanto, apesar de não serem tão grandes e intensos quanto os vórtices gerados pelas correntes do Golfo, das Agulhas ou até mesmo pela própria

Corrente do Brasil na confluência Brasil-Malvinas, esses vórtices representam um sinal significativo e forte localmente [16].

Outro estudo [17] demonstrou variações de curto prazo no campo de correntes de vórtices no mar japonês. Além disso, tentou associar a velocidade do vento na região a essas alterações, descobrindo uma relação quadrática entre elas.

Entretanto, como já ressaltado anteriormente, no momento pouco se pode concluir sobre a influência de tais fenômenos meteoceanográficos na vida útil de estruturas flutuantes. O que é possível ver é que, de fato, há uma série de fatores ambientais de força considerável ainda pouco compreendidos, podendo eles serem mais ou menos frequentes.

## 5 ANCORAGEM

Para que uma unidade flutuante opere em segurança, seja ela uma plataforma semissubmersível ou uma FPSO, é necessário que esta esteja devidamente ancorada. O sistema de ancoragem mantém a plataforma dentro dos limites de operação previstos em projeto, garantindo a execução das atividades de exploração.

Para oferecer a força de restauração necessária, os sistemas de ancoragem podem ser compostos por um conjunto de linhas em catenária, linhas retesadas ou tendões. Esses, por sua vez, são presos ao solo marinho por meio de âncoras ou estacas [20].

As linhas podem ser compostas por diversos segmentos de diferentes materiais, como amarras de aço, cabos de aço e cabos de poliéster. Além disso, a composição das linhas de ancoragem varia de acordo com o tipo de embarcação, a lâmina d'água, o tipo de operação realizada, custo entre outros parâmetros [20].

Aqui será feita uma revisão sucinta dos componentes da ancoragem, seus diferentes tipos e sistemas. Outros trabalhos, como de Kochem [9] e Seckler [20], realizam uma revisão mais extensa sobre o tema.

### 5.1 COMPONENTES

#### 5.1.1 Amarra

As amarras são correntes de alta resistência fabricadas em aço e o elemento mais comum utilizado na ancoragem convencional. Podem ser do tipo com ou sem malhete, sendo o primeiro mais comumente utilizado na ancoragem de plataformas flutuantes [20]. Seu rompimento pode se dar por fadiga ou por ultrapassar o limite de ruptura [9]. O presente estudo foca na fadiga das amarras, abordando as variações de tração no ponto onde a linha de ancoragem se conecta à plataforma.

As amarras geralmente são utilizadas nos trechos iniciais e finais das linhas, pois esse material apresenta maior resistência ao atrito devido ao contato com o fundo do mar e com os guinchos da unidade flutuante [20]. Em águas rasas também podem compor a linha de ancoragem em sua totalidade, uma vez que a restauração é puramente geométrica, ou seja, dada pelo levantamento da amarra do fundo,

aumentando o peso suspenso e, por sua vez, a componente horizontal da força de restauração.

Existem muitos tipos de componentes utilizados para unir duas partes de corrente. Usualmente se emprega o elo Kenter. Estes elementos apresentam carga de ruptura igual ou superior a de uma corrente de mesma dimensão, porém a durabilidade à fadiga é sensivelmente menor. Portanto, as linhas de ancoragem devem utilizar o menor número possível desses elos.

### 5.1.2 Cabo de aço

Os cabos de aço são constituídos de fios enrolados de forma helicoidal para se formar uma perna, garantindo a este elevada rigidez axial e flexibilidade. Eles podem possuir apenas uma perna (single-strand) ou um conjunto de pernas (multi-strand) constituindo um único cabo. Além disso, há diversos tipos de cabos utilizados na ancoragem de unidades flutuantes, mas os principais são os “six strand” e “spiral strand” [1], demonstrados na Figura 5:

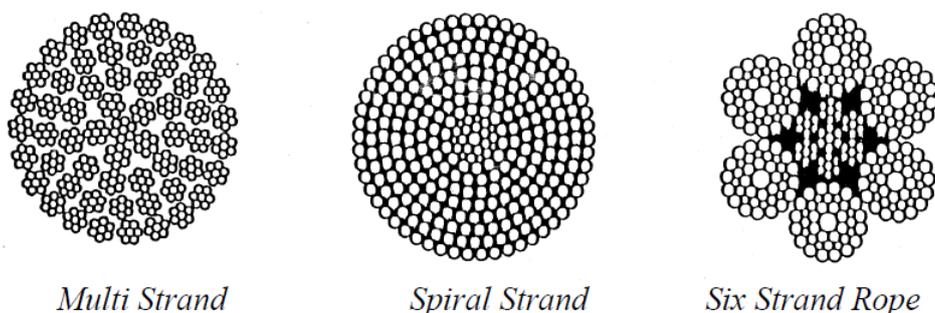


Figura 5 - Tipos de cabo de aço [1]

Os cabos de aço apresentam vida à corrosão inferior à das amarras devido à corrosão da trança metálica. Para minimizar esse problema podem ser utilizados cabos galvanizados. Já em relação à resistência dos arames que formam o cabo, normalmente são empregados dois tipos: IPS (Improved Plow Steel) ou EIPS (Extra Improved Plow Steel). O cabo com fios EIPS é mais resistente à tração e recomendado para unidades flutuantes [20].

O rompimento de cabos de aço também ocorre, sobretudo, por conta da fadiga. Entretanto, esse fenômeno tende a ser mais complexo nos cabos de aço devido aos cabos serem compostos por diversos fios de aço entrelaçados, adicionando forças de torção ao elemento. O ideal seria realizar uma análise mais local desses elementos, o que não é abordado no presente trabalho.

### 5.1.3 Poliéster

Os cabos de poliéster são cabos produzidos de materiais sintéticos, que possuem uma flexibilidade axial bem maior do que os cabos de aço ou amarras, com a mesma carga de ruptura nominal e um peso submerso por unidade de comprimento bem menor. Por outro lado, devido à viscoelasticidade, não apresentam um padrão linear para a relação entre tensão e deformação e estão sujeitos a se deformarem plasticamente (creep) [9, 20]. Esse fenômeno afeta diretamente a fadiga em cabos sintéticos e não é abordado no presente trabalho, sendo foco de outros trabalhos e estudos.

Além disso, os cabos de poliéster apresentam baixa ou nenhuma rigidez à compressão axial e, por este motivo, devem estar necessariamente, submetidos a esforços axiais de tração [10]. Também apresentam baixa resistência à abrasão, não podendo estar apoiados no solo sob o risco de rompimento devido ao atrito.

Os cabos de poliéster, em conjunto com amarras e cabos de aço, podem compor sistemas de ancoragem do tipo semi-taut e taut-Leg. Esses sistemas de ancoragem são uma boa solução para a ancoragem em águas mais profundas, evitando o uso de longas configurações em catenária como nos sistemas de amarração convencionais. A força de restauração na utilização do poliéster se dá pela elasticidade do material e não pelas características geométricas da linha, o que resulta em um menor raio de ancoragem e permite arranjos submarinos mais eficientes [9, 20].

O emprego do poliéster ocorreu quando foi necessário um material que permitisse um maior alongamento que os materiais até então utilizados. Esta característica é a principal responsável pela absorção dos movimentos dinâmicos de

uma unidade flutuante, através da pré-tração aplicada nas linhas de ancoragem, reduzindo de forma considerável o passeio desta [20].

#### 5.1.4 Boias de ancoragem

As boias utilizadas como componente do sistema de ancoragem podem ser de superfície ou submersas, elas geralmente possuem um formato cilíndrico e são fabricadas de aço, material sintético ou uma combinação de ambos [1].

As principais funcionalidades na utilização das boias de ancoragem são [1]:

- Reduzir o peso que as linhas de ancoragem transferem para a unidade flutuante, garantindo assim menores trações no topo das linhas.

- Diminuir o passeio da unidade flutuante para um dado comprimento de linha e nível de pré-tração.

- As boias de superfície possuem ainda função indicadora, buscando facilitar a visualização das linhas de ancoragem.

#### 5.1.5 Guincho

Os guinchos têm papel importante na manutenção da posição de projeto previstos nos sistemas de ancoragem. Eles são responsáveis por fornecer a tração necessária para as linhas, recolhendo ou “pagando” linha conforme a necessidade [9].

De acordo com a norma API RP 2SK [1] os guinchos podem ser classificados basicamente em dois tipos: molinete ou guincho de tambor.

#### 5.1.6 Fairlead

Os fairleads são polias conectadas na estrutura da plataforma e são responsáveis por permitir que as amarras fiquem na posição vertical para que sejam recolhidas pelos guinchos. Os fairleads devem ter uma relação entre o diâmetro da polia e o diâmetro da linha de modo a minimizar a fadiga por tração-flexão [1]. A Figura 6 ilustra um desses componentes:

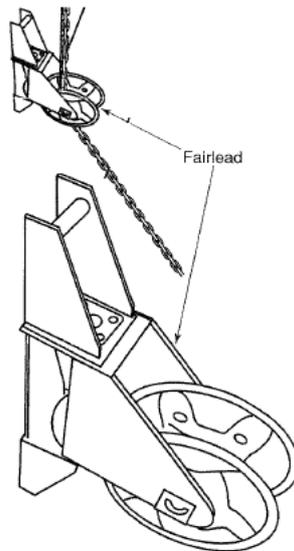


Figura 6 - Fairlead [1]

### 5.1.7 Fundações para sistemas flutuantes

A principal função das linhas de ancoragem é manter o posicionamento da unidade flutuante. Para isso, a linha deve ser fixada em um ponto no fundo do mar, transmitindo para este os esforços do sistema. Esse ponto é chamado de ponto de ancoragem e o elemento responsável por manter esse ponto fixo é chamado de âncora [23].

A capacidade de resistir a cargas verticais varia conforme a âncora. Sendo assim, a seguir são apresentados os principais tipos de âncora utilizados na fixação de unidade flutuantes.

#### 5.1.7.1 Âncora convencional

As âncoras convencionais são geralmente constituídas de uma haste (shank) fixa ou articulada, responsável por fornecer o ângulo de ataque para penetração e o enterramento no solo; de uma garra (fluke) cuja função é mobilizar a capacidade de carga do solo; de um cepo (stock) que é um braço transversal à haste, responsável por impedir a rotação da mesma após seu enterramento no leito marinho; e uma coroa (crown), que conecta as respectivas partes, fornecendo rigidez ao conjunto [24]. Uma âncora convencional pode ser vista na Figura 7:

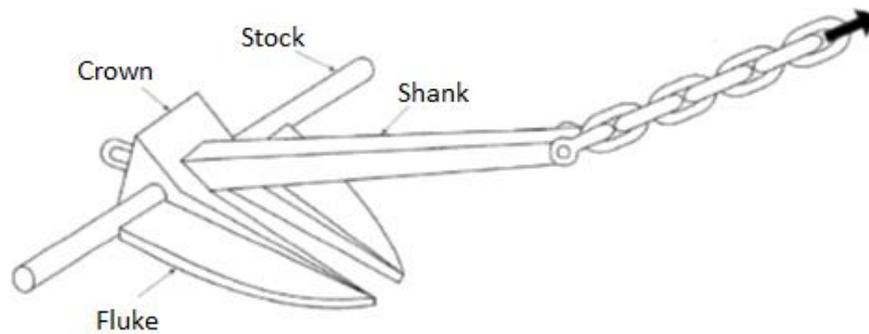


Figura 7 - Âncora convencional (adaptado de [24])

As âncoras convencionais não resistem ao carregamento vertical e, portanto, são utilizadas em linhas de ancoragem em catenária, necessitando de um longo trecho de linha apoiado no fundo do mar. Dessa forma objetiva-se que cargas verticais não atuem na âncora [25].

#### 5.1.7.2 Âncora vertical

Com a adoção de ancoragem do tipo Taut-Leg para operações offshore em águas mais profundas surgiu a necessidade de desenvolver um sistema de ancoragem que suportasse cargas com componentes verticais. Uma solução encontrada foi a utilização das âncoras verticais, conhecidas como VLA (Vertically Loaded Anchor) [26].

Essas âncoras, ao contrário das convencionais, não apresentam haste rígidas, mas sim um conjunto de cabos associados a um dispositivo que permite a mudança de ângulo de aplicação da carga para que a mesma incida perpendicularmente à placa, como visto na Figura 8. Isso torna possível resistir às componentes verticais de carga [26].

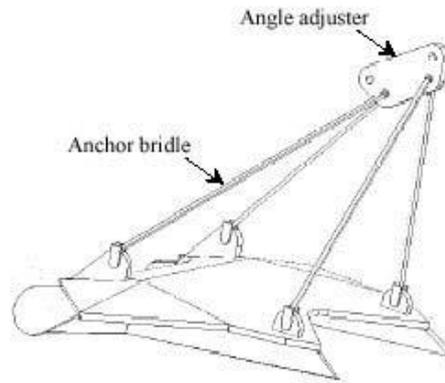


Figura 8 - VLA [10]

#### 5.1.7.3 Âncora de placa

As âncoras de placa, também conhecidas como PEA's (Plate Embedment Anchor), foram inicialmente utilizadas pela marinha americana e têm sido implantadas na indústria offshore [1].

Diferente das âncoras convencionais, que são instaladas por arrasto, estas âncoras são instaladas por cravação com o auxílio de martelos ou pelo uso de explosivos. Dentre suas principais vantagens estão à resistência a carregamentos em qualquer direção, precisão de instalação e elevada capacidade de carga [7].

#### 5.1.7.4 Estacas de sucção

As estacas desse tipo são formadas por uma estrutura metálica cilíndrica, aberta no fundo e fechada no topo, com enrijecedores internos [9].

Inicialmente esse tipo de ancoragem permanente foi instalado em menores lâminas d'água, com linhas em catenária. Entretanto, as principais vantagens desse tipo de estaca se dão em águas profundas [9].

Este sistema permite que a linha de ancoragem resista a esforços aplicados em qualquer ângulo, ou seja, desde cargas horizontais provenientes de linhas de ancoragem em catenária até cargas quase verticais resultantes de plataformas do tipo TLP's (Tension Leg Platform). Dessa forma uma aplicação bastante utilizada das estacas de sucção são ancoragens do tipo taut-leg [25].

#### 5.1.7.5 SEPLA (Suction Embedded Plate Anchor)

A SEPLA junta em uma só modelo as principais características da âncora de placa e da âncora de sucção com o objetivo de auxiliar o processo de instalação. Esse sistema utiliza uma estaca de sucção como o instalador de uma âncora de placa ao invés de usar martelos ou explosivos. Ele associa a precisão da instalação da estaca de sucção com a eficiência geotécnica e baixo custo da âncora de placa [28].

#### 5.1.7.6 Estaca torpedo

A estaca torpedo, empregada em ancoragens taut-leg, é uma estaca de aço tubular de ponta fechada com geometria cônica, preenchida com uma mistura de sucata de aço de várias dimensões e concreto, com o objetivo de atingir a maior massa específica possível. Em geral, seu comprimento é cerca de dez vezes o seu diâmetro, apresentando basicamente o comportamento de um corpo rígido [20].

A estaca torpedo é baixada até certa profundidade e, então, é solta em queda livre. Ao atingir o solo com velocidade suficiente ocorre a penetração da estaca torpedo no solo, finalizando o processo de instalação [25].

As estacas torpedos permitem a aplicação de cargas em qualquer direção. A superfície lateral da estaca torpedo pode ainda apresentar aletas, como mostra a Figura 9, o que aumenta o contato estaca-solo, com a finalidade de minimizar os problemas de baixa resistência lateral e axial, além de manter a sua verticalidade durante o lançamento [20].



Figura 9 - Estaca torpedo [24]

## 5.2 TIPOS DE ANCORAGEM

A seguir serão apresentadas as principais configurações de ancoragem empregadas em unidades flutuantes.

### 5.2.1 Catenária

A ancoragem em catenária é a técnica convencional utilizada em operações de produção ou perfuração. Este sistema foi empregado na maioria das plataformas até uma profundidade em torno de 500 metros [21].

As linhas ancoradas são presas ao fundo do mar por âncoras que resistem a carregamento horizontal, como, por exemplo, as âncoras convencionais. Com as linhas de ancoragem apresentadas na configuração de catenária livre, somente esforços horizontais são transmitidos ao sistema de fundação. Isso ocorre porque o próprio atrito do trecho de linha encostado no fundo fornece as forças de restauração responsáveis por absorver as solicitações do carregamento ambiental [27].

Este tipo de ancoragem possui um raio de ancoragem bastante elevado, de cerca de três vezes a lâmina d'água, o que acarreta em problemas com relação ao congestionamento de linhas em plataformas próximas e interfere diretamente no arranjo dos equipamentos submarinos. Com o aumento da profundidade na exploração e produção, há a necessidade de guinchos mais potentes devido ao aumento do peso nas linhas, tornando a ancoragem em catenária inviável para lâminas d'água profundas. [9, 27].

### 5.2.2 Taut-leg

De forma a superar alguns problemas do sistema em catenária desenvolveu-se a ancoragem em Taut-Leg. Esse sistema de ancoragem é constituído por linhas retesadas, as quais formam um ângulo de topo de aproximadamente 40 a 45 graus com a vertical. Dessa forma, há uma projeção horizontal menor para uma mesma ordem de grandeza

da lâmina d'água [22]. As diferenças entre catenária e taut-leg podem ser observadas na Figura 10, a seguir:

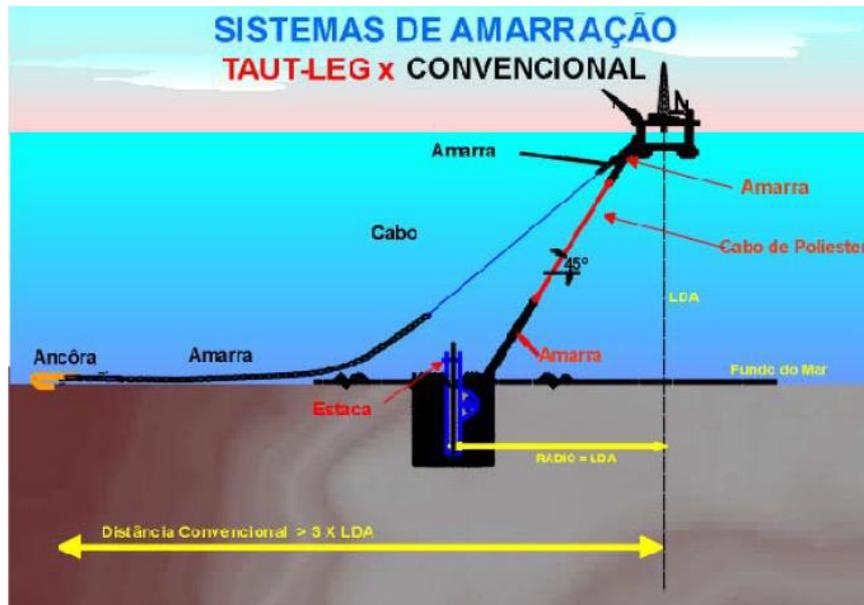


Figura 10 - Configuração em catenária [23]

Essa ancoragem proporciona maior rigidez ao sistema, limitando o passeio da embarcação a offsets menores. Neste caso, as âncoras a serem utilizadas precisam resistir a valores elevados de cargas verticais, sendo as mais utilizadas as estacas torpedo, as âncoras de sucção e as âncoras de placa. A ancoragem taut-leg é geralmente utilizada em sistemas localizados em regiões de grandes profundidades [22].

Por apresentarem um ângulo de 40° a 45°, as linhas de ancoragem podem ser compostas inteiramente de poliéster, pois o mesmo não entrará em contato com o solo marinho. Ainda assim, podem ser constituídas nas suas extremidades por cabos de aço e no seu trecho intermediário por cabos de poliéster. A adoção desse sistema implica em diminuição de custos com linhas de ancoragem, pois requer comprimentos menores, e podem ser instalados com maior facilidade em áreas congestionadas [9, 20].

### 5.2.3 Semi-taut

Um outro tipo de ancoragem, visando obter vantagens tanto do poliéster quanto das amarras, é o semi-taut. Esse tipo é composto por amarras no trecho inicial e

por cabos de poliéster no seu trecho intermediário. Além disso, o arranjo final resulta em um raio de ancoragem menor do que utilizando catenárias.

O que o diferencia do taut-leg é o apoio das amarras do solo. Isso faz com que esse tipo de ancoragem inicialmente funcione como convencional, com restauração geométrica, e depois, ao suspender toda amarra, funcione como taut-Leg, trabalhando no alongamento do poliéster, obtendo uma restauração elástica.

#### 5.2.4 Vertical

A ancoragem vertical é essencialmente utilizada em plataformas do tipo TLP e é caracterizada pela disposição das linhas de ancoragem trabalhando como tendões verticais constantemente tracionados. Isso se deve à parcela do empuxo proveniente da parte submersa da unidade flutuante [9].

Os tendões conferem ao sistema uma rigidez elevada no plano vertical, enquanto a rigidez no plano horizontal é reduzida. Isso 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) [24].

Uma de suas vantagens está em possuir o arranjo de fundo do leito marinho mais “limpo”, evitando assim possíveis congestionamentos entre outros sistemas submarinos [20].

### 5.3 SISTEMAS DE ANCORAGEM

Os sistemas de ancoragem podem ser classificados em três tipos [9]:

- Ancoragem em ponto único (Single Point Mooring)
- Amarração com quadro de ancoragem (Spread Mooring)
- Posicionamento dinâmico (Dynamic Positioning – DP)

#### 5.3.1 Ancoragem em Ponto Único (Single Point Mooring)

Esse tipo de ancoragem é caracterizado por concentrar todas as linhas em uma única posição na embarcação. Este sistema é utilizado principalmente em unidades FSO

(Floating Storage and Offloading Units) ou em navios petroleiros convertidos em unidades FPSO (Floating Production Storage and Offloading Units). Esse sistema permite que a embarcação gire livremente ao redor das linhas, de forma a se manter alinhada com os carregamentos ambientais predominantes e reduzir, assim, os esforços atuantes no casco [29].

O sistema de ancoragem em ponto único pode ainda ser subdividido em alguns tipos:

- Ancoragem com turret
- CALM (Catenary Anchor Leg Mooring)
- SALM (Single Anchor Leg Mooring)

### 5.3.2 Amarração com Quadro de Ancoragem (Spread Mooring)

Esse foi o primeiro tipo de sistema de ancoragem utilizado em plataformas flutuantes, sendo atualmente ainda o mais utilizado. Nessa ancoragem as linhas estão distribuídas ao redor da embarcação, como mostra a Figura 11 abaixo, fornecendo à unidade flutuante capacidade para resistir aos carregamentos ambientais vindos de qualquer direção.

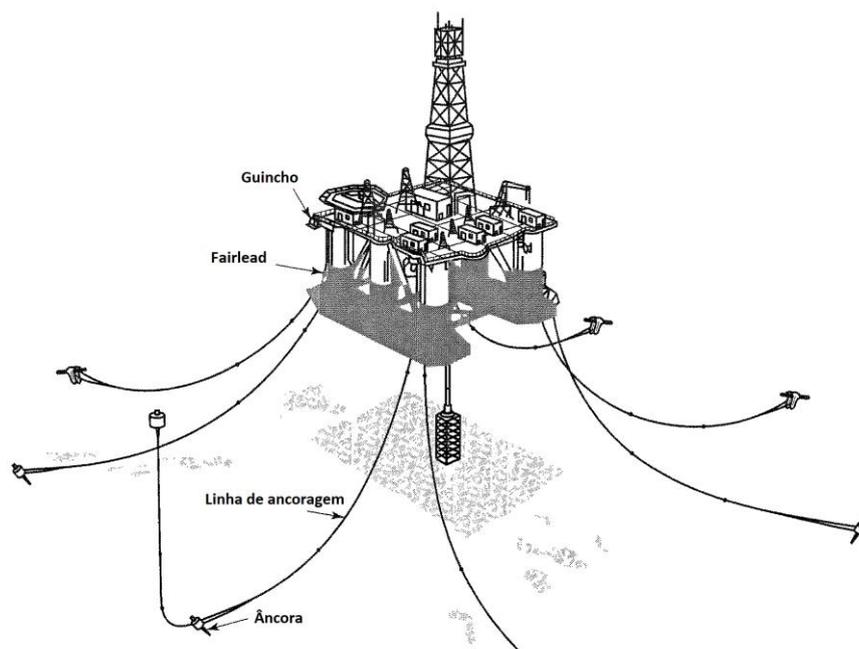
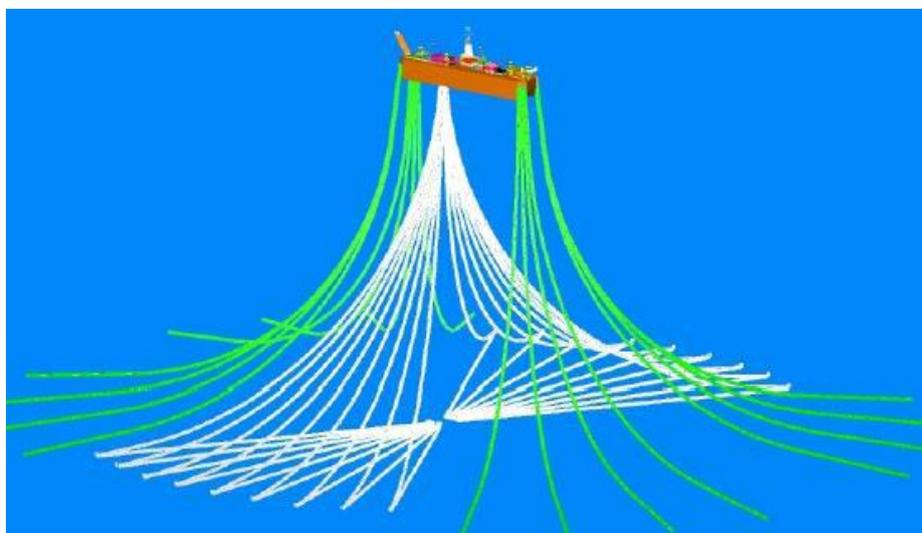


Figura 11 - Amarração com quadro de ancoragem (adaptado de [1])

Entretanto, esse tipo de ancoragem não permite o alinhamento da plataforma com a direção de incidência dos carregamentos ambientais, sendo importante o aproamento da unidade flutuante com o carregamento mais severo, de modo a otimizar o sistema de ancoragem [20].

Além disso, uma nova concepção de sistema de ancoragem spread mooring foi desenvolvida pela Petrobras com o intuito de permitir um alinhamento parcial da embarcação com a direção de incidência do carregamento ambiental mais severa. Esse sistema foi denominado DICAS (Differentiated Compliance Anchoring System) [9]. E pode ser visto a seguir na Figura 12.



*Figura 12 - Vista 3D do sistema DICAS [29]*

O sistema DICAS consiste em um conjunto de linhas de ancoragem com conexão na proa e na popa da embarcação. A colocação das linhas permite a existência de diferentes níveis de rigidez entre a popa e a proa do navio. Esta diferença na rigidez é obtida através da variação dos níveis de pré-tração das linhas, permitindo ao navio um aproamento adequado às características ambientais dentro de um limite angular de 5 a 7 graus. Isso resulta em um melhor posicionamento do navio em relação às condições ambientais mais frequentes [11].

### 5.3.3 Posicionamento Dinâmico (Dynamic Position – DP)

O sistema de posicionamento dinâmico é bastante utilizado em unidades flutuantes que permanecem ancoradas temporariamente, seja em atividade de perfuração, completação ou intervenção de poços. Esse tipo de ancoragem mantém a plataforma em posição através de um sistema de controle composto de sonares e GPS, além de um circuito de propulsores (thrusters) responsáveis por gerar impulsão na direção de surge ou sway [9].

## 6 FADIGA

A fadiga é uma mudança estrutural progressiva, localizada e permanente que ocorre em um material submetido a repetidas ou variadas deformações à tensão nominal com valor máximo inferior ao limite de resistência à tração do material. Ela pode culminar em trincas ou em fratura completa após um número suficiente de ciclos [31].

A fadiga é constituída de três estágios:

- Dano inicial da fadiga levando à iniciação de trincas;
- Propagação das trincas até um tamanho crítico (um tamanho no qual a seção-transversal sem trinca restante não suporta mais as cargas impostas);
- Fratura final e repentina da seção-transversal restante

O primeiro estágio consiste na iniciação da trinca. Sua duração em peças lisas ou levemente entalhadas submetidas a pequenas variações de tensão é da ordem de 90% da vida total da estrutura. Na maior parte dos casos, o processo de iniciação da trinca é concentrado em uma pequena área de elevada tensão [30].

Essa etapa primária gera microfissuras que podem formar uma trinca maior através de um processo de coalescência. Esta trinca se desenvolve lentamente, entretanto, à medida que a seção transversal é reduzida com o aumento da trinca, ocorre um aumento da tensão e a velocidade de propagação aumenta. A falha final, geralmente, ocorre em regiões de concentração de tensão onde a seção transversal reduzida torna-se insuficiente para resistir ao carregamento [30].

A resistência à ruptura dos materiais é, em geral, medida em ensaios estáticos. A ação de esforços repetidos em grande número sobre uma peça metálica pode levar à ruptura da mesma em tensões inferiores às obtidas nos ensaios estáticos. Além disso, a resistência à fadiga das peças é fortemente diminuída nos pontos de concentrações de tensões, provocadas, por exemplo, por variações bruscas na forma da seção ou por pequenas fraturas devido à corrosão [32].

## 6.1 FADIGA DE ALTO E BAIXO CICLO

A fadiga pode ser de alto ou baixo ciclo. A análise de fadiga de alto ciclo é originada por tensões obtidas no regime elástico e, de maneira geral, é necessário um número grande de ciclos (mais de  $10^4$ ) para levar a estrutura à ruptura. Já a análise de baixo ciclo é originada por tensões obtidas no regime elastoplástico e, normalmente, um número relativamente baixo de ciclos é necessário para levar a estrutura à ruptura [30].

As tensões nas linhas de ancoragem se encontram apenas no regime elástico para as amarras, portanto só há fadiga de alto ciclo. Isso facilita o estudo, pois este ficará restrito às curvas T-N para as amarras, sendo utilizada a variação de tração no ponto de conexão entre marras e plataforma.

## 6.2 CURVAS T-N

Para calcular o número N de ciclos até a falha são usadas as curvas T-N específicas para cada tipo de elo das amarras de aço. As curvas T-N funcionam de maneira similar às curvas S-N. Quanto maior a variação de tensão aplicada aos elos, menor será o número de ciclos necessários para ruptura [30, 33].

As curvas T-N, demonstradas mais abaixo na Figura 13, correlacionam a tração com o número máximo de ciclos até a falha, baseadas em dados experimentais oriundos de testes de fadiga nos elos de amarras. Sendo assim, para o caso de linhas de ancoragem o uso dessas curvas é o mais adequado em comparação com as curvas S-N [7]. Além disso, as curvas T-N são ligeiramente mais conservadoras do que as S-N [4].

Segundo a API 2SK [1], a equação (5) representa a curva T-N de forma a calcular o número de ciclos que um componente de ancoragem suporta é:

$$NR^M = K \quad (5)$$

Onde:

N é o número de ciclos até a falha;

R é razão entre a amplitude média de tração e a tração de ruptura;

M e K são valores fornecidos pela American Petroleum Institute [1] e demonstrados abaixo na Tabela 1.

No caso de amarras e cabos de aço, para a tração de ruptura é usada a tração mínima de ruptura (Minimum Breaking Load – MBL) [7].

Tabela 1 - Parâmetros M e K para amarras segundo a API [1]

Componente	M	K
Elo com malhete comum	3.0	1000
Elo sem malhete comum	3.0	316
Elo Kenter e Baldt	3.0	178
Cabo de Aço tipo Six Strand Rope	4.09	$10^{(3.20-2.79L_m)}$
Cabo de Aço tipo Spiral Strand Rope	5.05	$10^{(3.25-3.43L_m)}$

$L_m$  é a razão entre a carga média e a tração de ruptura para um cabo de aço.

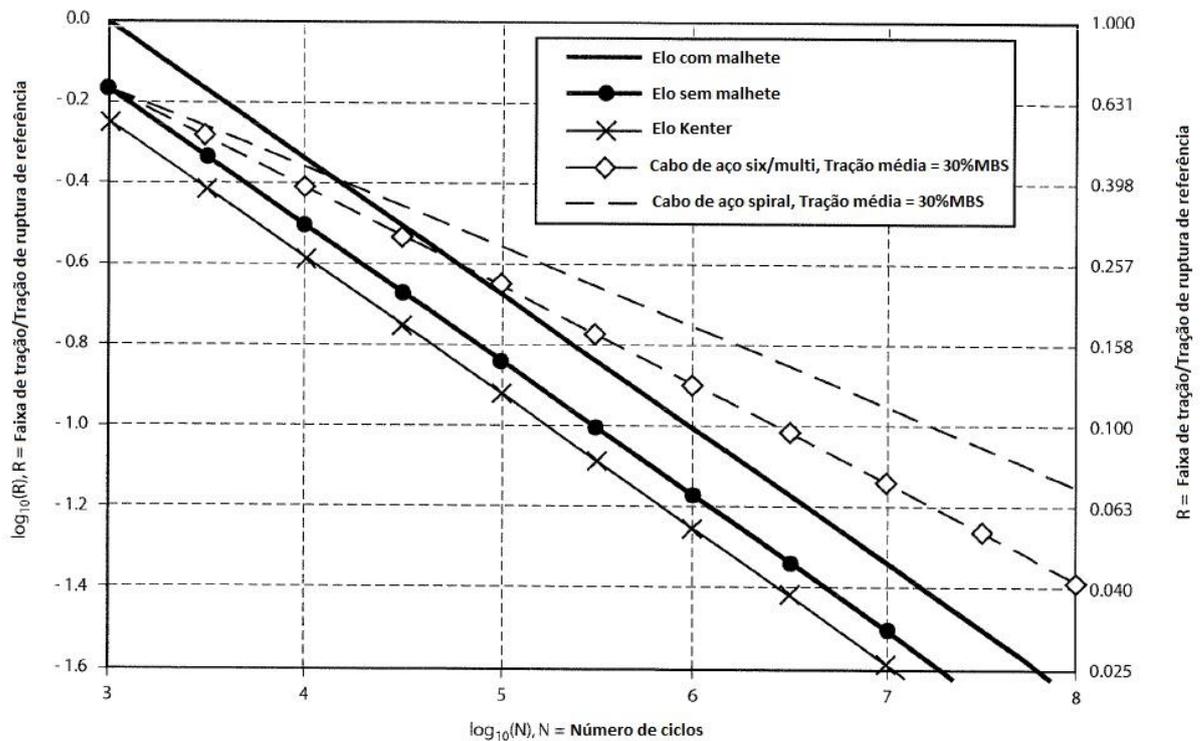


Figura 13 - Curvas T-N [1]

### 6.3 LEI DOS DANOS CUMULATIVOS (PALMGREN-MINER)

Quando uma estrutura é submetida a um número de ciclos inferior ao número necessário para sua ruptura, embora a estrutura não entre em colapso, ela sofre dano. Entretanto há um problema para calcular esse dano já que as cargas que atuam numa estrutura offshore são aleatórias, enquanto as curvas T-N são obtidas de testes com variações de cargas constantes. Para resolver isso se utiliza a regra do dano acumulado de Palmgren-Miner [30, 33].

A regra de Palmgren-Miner admite que o dano em uma estrutura submetida a uma variação de tração  $S_i$  pode ser expresso pela razão entre o número de ciclos aplicados ( $n_i$ ) e o número de ciclos para causar ruptura para esta solitação ( $N_i$ ) [30]. O dano total acumulado ( $D$ ) é a soma linear dos danos individuais de todos intervalos de tração.

A equação (6) representa o dano de uma estrutura submetida a  $i$  solitações.

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (6)$$

Onde:

$n_i$  = número de ciclos em uma estrutura submetida à uma variação de tensão  $S_i$ ;

$N_i$  = número de ciclos que uma estrutura resiste quando submetida a uma variação de tensão  $S_i$ ;

$D$  = dano acumulado de fadiga.

Segundo essa regra, a vida útil à fadiga é alcançada quando a soma do dano gerado por todos os carregamentos é igual a 1 [30].

Levando em consideração que, para determinado dano, a contagem dos ciclos tenha sido realizada num período de tempo  $T$  e que este padrão de ciclos irá se repetir ao longo do tempo, a vida útil à fadiga  $VU$  é dada por [33], na equação (7):

$$VU = \frac{1}{D} * T \quad (7)$$

Assim, a identificação e a contagem dos ciclos de variação de tensão que o elemento estrutural estará submetido ao longo de sua vida útil são essenciais para a análise de fadiga. Isso é relativamente simples no caso de carregamentos determinísticos e harmônicos, porém, no caso de carregamentos de origem aleatória, como é o caso daqueles encontrados na análise de linhas de ancoragem, este passo da análise de fadiga não é uma tarefa trivial [33].

#### 6.4 CONTAGEM DE CICLOS – MÉTODO RAINFLOW

O método Rainflow é um método numérico para contagem e identificação de ciclos de variação de tensões. O método opera diretamente sobre a série temporal (medida ou calculada) de tensões, representada somente pelos picos e vales da série original. A denominação Rainflow baseia-se na analogia entre o trajeto dos fluxos de água (ou gotas de chuva) ao caírem pelos telhados típicos japoneses, que seriam os picos e vales da série temporal [7, 33], como visto na Figura 14.

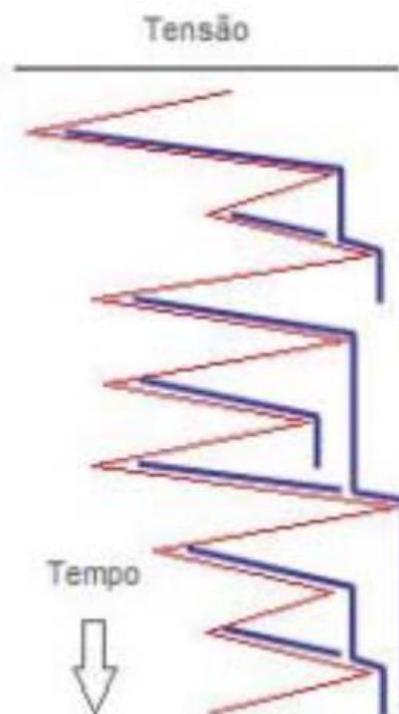


Figura 14 - Analogia do método Rainflow com gotas de chuva caindo do telhado [7]

O método Rainflow é considerado como a estimativa mais precisa para o dano à fadiga, pois analisa diretamente toda a série temporal [5], considerando o dano causado por cada ciclo. Ele identifica e conta a tração correspondente aos ciclos de histerese do material individualmente, em um processo onde as ondas e movimentos da plataforma podem ser considerados aleatórios [35]. Sendo assim, é um método comumente utilizado.

A contagem de ciclos ocorre onde há reversão do carregamento de acordo com a relação entre tração e deformação do material, incluindo os ciclos de histerese. Isso permite com que os complexos ciclos de carregamento e descarregamento sejam representados de maneira simplificada e consistente.

Mais detalhes sobre as nomenclaturas utilizadas no método podem ser vistos na Figura 15 abaixo:

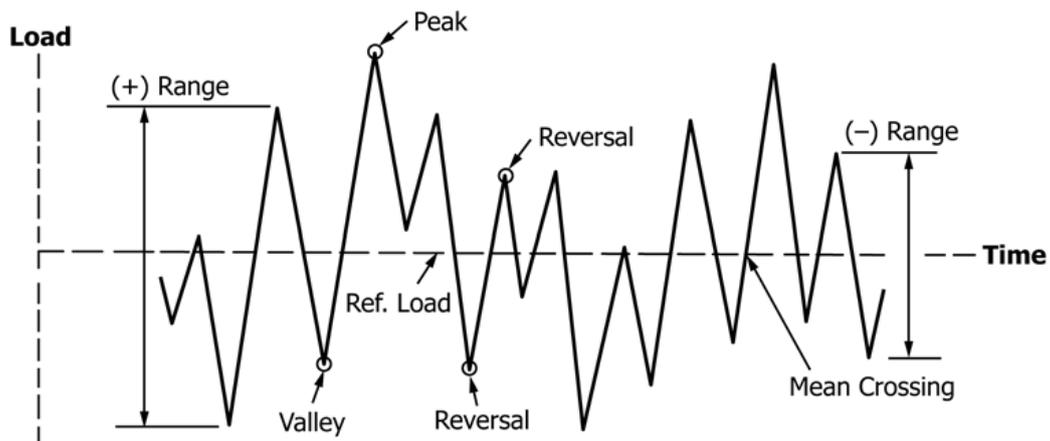


Figura 15 - Denominações usadas no algoritmo de rainflow [7]

O método Rainflow apresenta o contratempo de ser aplicado aos históricos de tração gerados pelas análises dinâmicas. Como se deseja analisar grandes intervalos de tempo, as análises tendem a ser um pouco demoradas. Por outro lado, a contagem é feita de forma integral, isto é, são considerados todos os ciclos.

De forma a realizar essa contagem existem diversos algoritmos numéricos para o método Rainflow, como apresentado por Rychlik [34]. As regras para o método segundo a ASTM, adotadas no trabalho, estão a seguir:

Denota-se X como a faixa sob consideração, Y como a faixa anterior adjacente a X; e S o ponto de início do histórico de carregamento.

- (1) Leia o próximo pico ou vale. Se não houver informação, vá para o passo (6);
- (2) Se há menos de três pontos, volte ao passo (1). Forme as faixas X e Y usando os três picos e vales mais recentes, caso não tenham sido descartados;
- (3) Compare os valores absolutos dos caminhos X e Y:
  - (a) Se  $X < Y$ , vá para o passo (1).
  - (b) Se  $X \geq Y$ , vá para o passo (4);
- (4) Se a faixa Y contiver o ponto de início S, vá para o passo (5); caso contrário, conte a faixa Y como um ciclo, descarte o pico e o vale de Y, e vá para o passo (2);
- (5) Conte a faixa Y como um meio-ciclo, descarte o primeiro ponto (do pico ou do vale) na faixa Y, mova o ponto de partida para o segundo ponto da faixa Y e vá para o passo (2);
- (6) Conte cada faixa não contada anteriormente como um meio-ciclo.

Além disso, na mesma publicação da ASTM [36] há um exemplo para ilustrar. Os detalhes para contagem então se apresentam para um exemplo de série temporal representado na Figura 16:

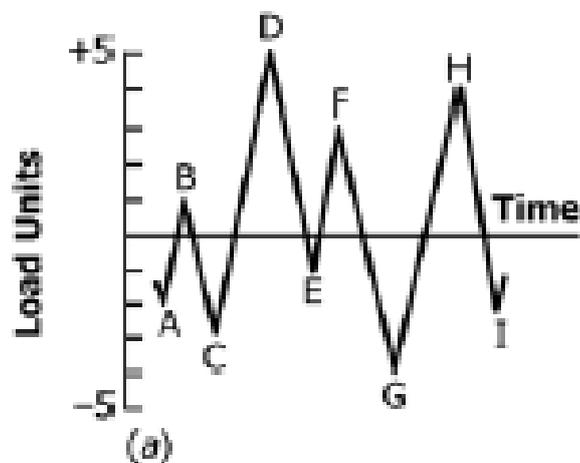


Figura 16 - Exemplo de série temporal [36]

- (1)  $S = A$ ;  $Y = |A-B|$ ;  $X = |B-C|$  e  $X > Y$ . A faixa  $Y$  contém  $S$ , que é o ponto  $A$ . Conte  $|A-B|$  como um meio-ciclo e descarte o ponto  $A$ ;  $S = B$ , demonstrado na Figura 17.

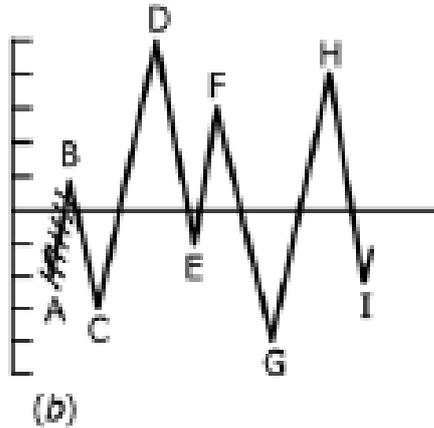


Figura 17 – Contabilizando o trecho A-B como meio ciclo [36]

- (2)  $Y = |B-C|$ ;  $X = |C-D|$  e  $X > Y$ .  $Y$  contém o  $S$ , nesse caso, o ponto  $B$ . Conte  $|B-C|$  como um meio ciclo e descarte o ponto  $B$ ;  $S = C$ , como na Figura 18.

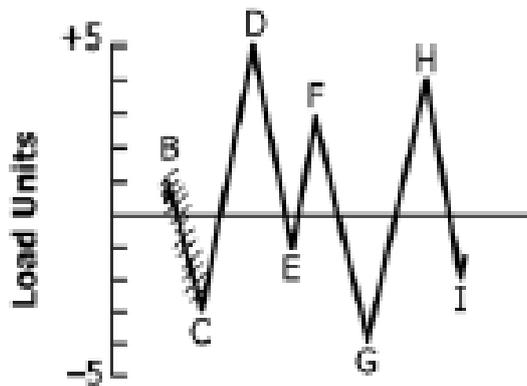


Figura 18 - Meio ciclo B-C [36]

- (3)  $Y = |C-D|$ ;  $X = |D-E|$  e  $X < Y$ .
- (4)  $Y = |D-E|$ ;  $X = |E-F|$  e  $X < Y$ .

(5)  $Y = |E-F|$ ;  $X = |F-G|$  e  $X > Y$ . Conte  $|E-F|$  como um ciclo e descarte os pontos E e F. Unir, em seguida, o ponto D ao ponto G para formar uma nova faixa, como mostrado na Figura 19.

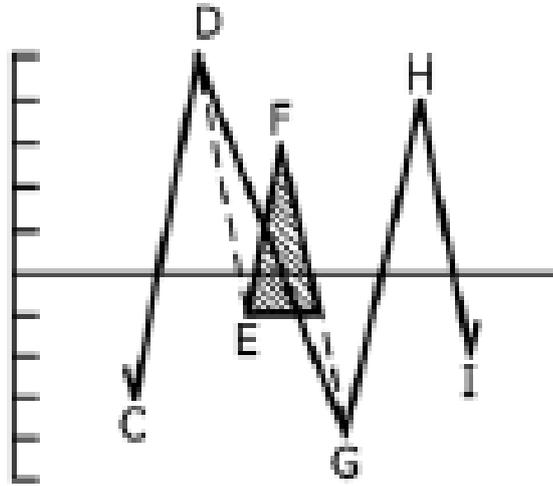


Figura 19 - Ciclo E-F contado e descartado [36]

(6)  $Y = |C-D|$ ;  $X = |D-G|$  e  $X > Y$ . A faixa Y contém o ponto S, que está localizado no ponto C. Conte  $|C-D|$  como um meio-ciclo e descarte o ponto C;  $S = D$ , como visto na Figura 20.

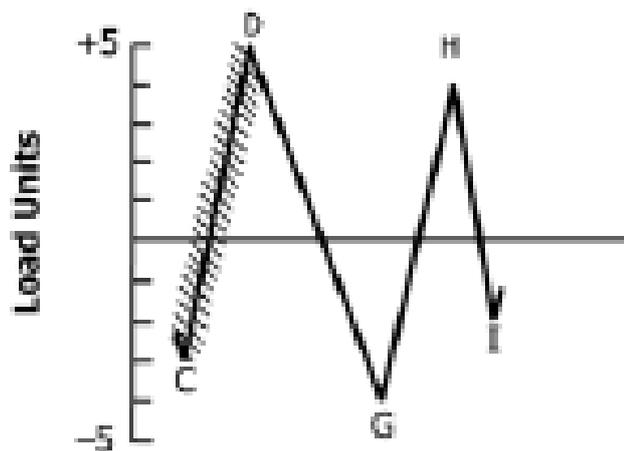


Figura 20 - Meio ciclo C-D [36]

(7)  $Y = |D-G|$ ;  $X = |G-H|$  e  $X < Y$ .

(8)  $Y = |G-H|$ ;  $X = |H-I|$  e  $X < Y$ . Término da história da carga.

(9) Conte | D-G |, | G-H | e | H-I | como meio-ciclos, como indica a Figura 21.

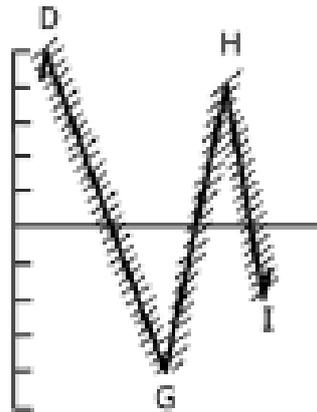


Figura 21 - Contagem dos meio-ciclos restantes [36]

(10) Fim da contagem, com um apanhado de resultados na Figura 22.

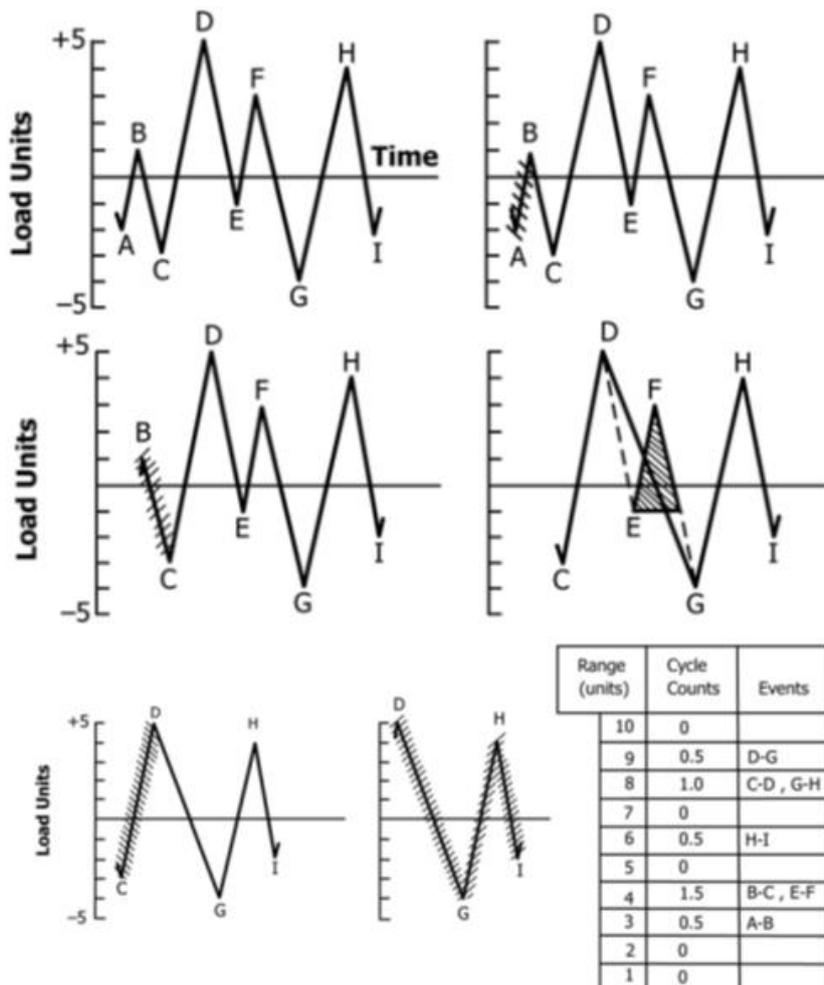


Figura 22 - Algoritmo rainflow passo a passo e resultado final [36]

Ao fim de sua aplicação, tem-se uma lista com os valores das variações dos ciclos de tensões obtidos e o seu respectivo número de ocorrências. A partir desses dados se pode calcular o dano de fadiga diretamente pela regra de Palmgren-Miner [33].

Portanto, Palmgren-Miner e Rainflow são usados em conjunto para estimar a vida à fadiga em estruturas submetidas a tensões de amplitude variável.

Em um carregamento no tempo de amplitude variável, o método Rainflow é aplicado ao histórico de trações das linhas de ancoragem, decompondo o carregamento em blocos de tração conforme sua amplitude. Cada bloco compreende uma faixa de tração e apresenta uma contagem de ciclos correspondentes. Com isso é possível organizar as faixas de tração em um histograma e calcular, para cada uma dessas faixas, as frações do dano em cada linha através da regra de Palmgren-Miner. O dano total na linha pode ser obtido ao se somar o dano para cada faixa [6].

## **7 ANÁLISE DE MOVIMENTOS DE DERIVA ULTRALENTA**

Depois de entendido como é feita a estimativa de vida útil à fadiga, é possível aplicar esses conhecimentos em um modelo para os quais se tem os dados reais, uma FPSO no caso. Através de uma simulação com movimentos prescritos para a embarcação se pode recriar as condições às quais ela está submetida em campo e, com isso, obter uma série temporal de trações para cada linha.

Para isso, é preciso, primeiro, converter os dados de movimento, transformando coordenadas UTM para o referencial da plataforma. Depois, como o interesse do estudo é somente nos movimentos de deriva ultralenta, é preciso eliminar todos os movimentos de frequências superiores. Isso será feito com a utilização de um filtro. Com os dados convertidos e filtrados, é possível conferir se há movimentos cíclicos de período mais longo e realizar análises dinâmicas com movimento prescrito de forma a obter o histórico de tração nas linhas de ancoragem.

O software utilizado para análise é o SITUA/PROSIM [37], um programa desenvolvido para a Petrobras pelo LAMCSO – Laboratório de Métodos Computacionais e Sistemas Offshore – COPPE/UFRJ. O software realiza simulações do comportamento de sistemas de produção de petróleo, por meio de análises estáticas e dinâmicas não-lineares. Essas análises são feitas considerando a interação entre o comportamento do casco e das linhas de ancoragem e risers. O programa emprega um modelo hidrodinâmico para analisar os movimentos do casco e um modelo estrutural, através da formulação de elementos finitos, para representar as linhas.

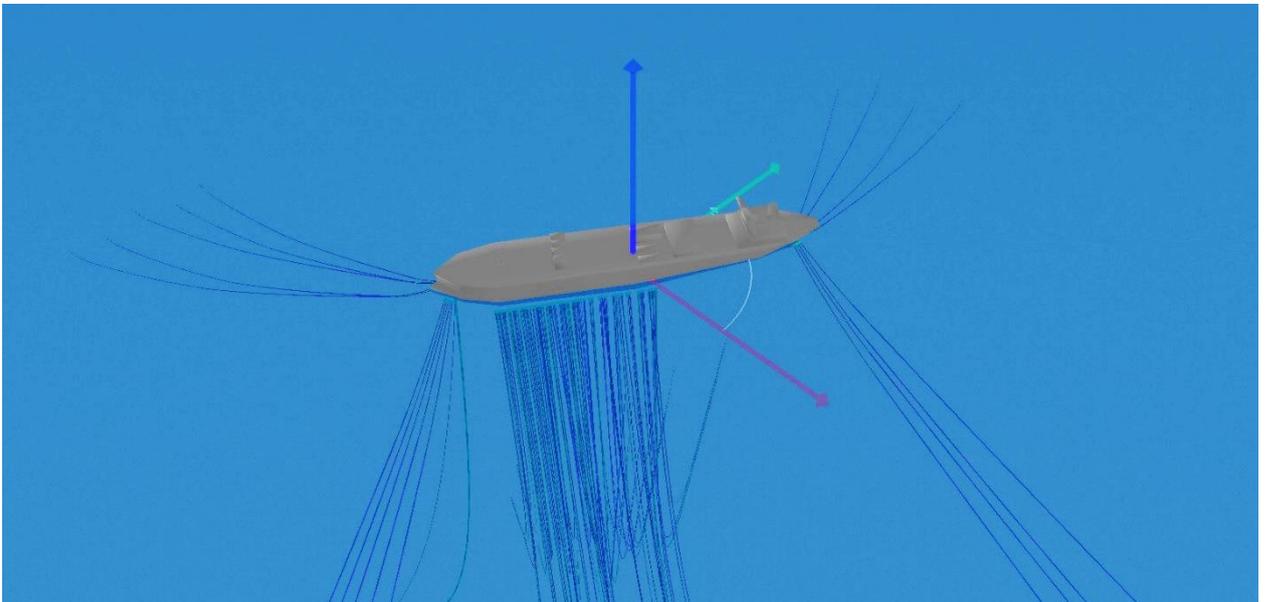
O programa PROSIM utiliza o modelo de difração para calcular as forças no casco e formulação de Morison para elementos esbeltos como as linhas de ancoragem e risers, por exemplo. Além disso, o software permite que dados prescritos sejam carregados e utilizados em um modelo de plataforma. Entretanto, há uma limitação de 10800 pontos para o tamanho do arquivo de entrada. Portanto, para realizar análises mais longas, haverá a eliminação de pontos da série temporal de movimentos.

Após obter o histórico de tração nas linhas de ancoragem, o método de contagem rainflow é aplicado de modo a contar os ciclos de tração e separá-los conforme sua amplitude. Com isso, determinando as variáveis M e K referentes à curva

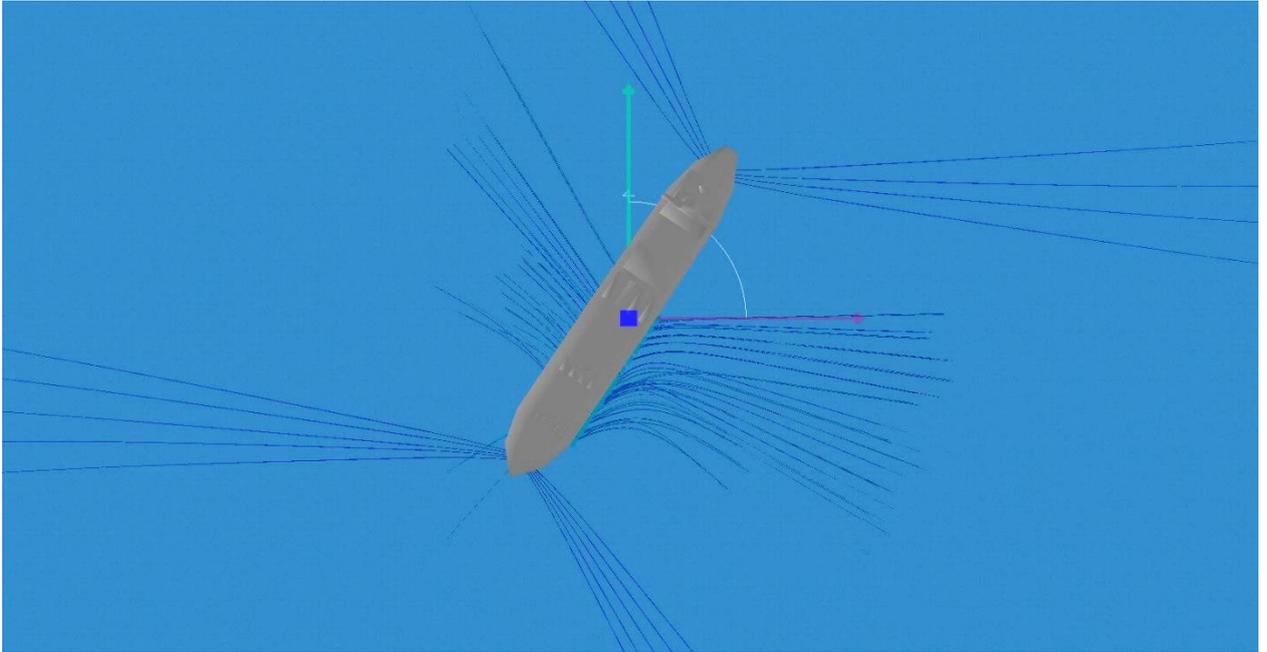
T-N adequada para amarras no topo da linha de ancoragem, o dano para cada faixa de tração pode ser calculado. E, segundo a regra dos danos acumulados de Palmgren-Miner, é possível aferir o dano total para cada uma das linhas segundo cada método.

### 7.1 MODELO UTILIZADO

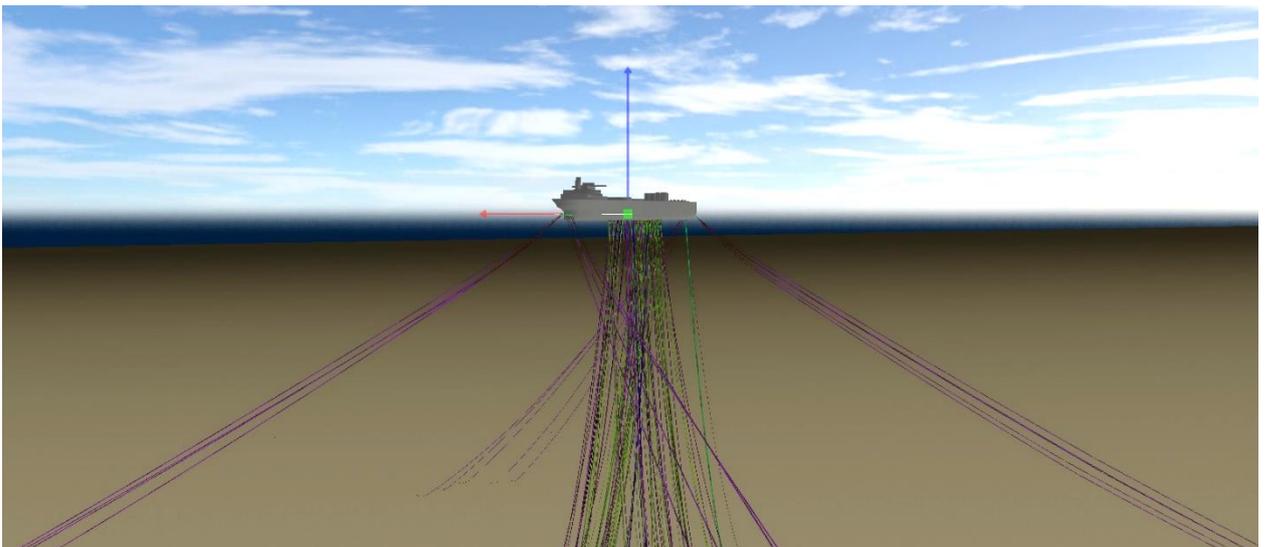
O modelo utilizado na análise foi o de uma plataforma FPSO (Floating Production Storage and Offloading) modelada, aqui, no programa SITUA/PROSIM, que apresenta lâmina d'água de aproximadamente 800 metros. O sistema de ancoragem é composto por 18 linhas de ancoragem do tipo semi taut-leg em spread mooring. O modelo é apresentado nas Figura 23, Figura 24 e Figura 25, a seguir:



*Figura 23 - Vista isométrica do modelo*



*Figura 24 - Vista superior do modelo*



*Figura 25 - Vista lateral do modelo*

Para as análises propostas no trabalho foram utilizados dados de campo fornecidos pela Petrobras, do período que vai de 01/04/2017 a 31/03/2018 (1 ano, portanto). Os dados disponibilizados encontram-se em coordenadas UTM e com o ângulo de aproamento da plataforma.

## 7.2 METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE MOVIMENTOS

Um primeiro problema que se apresenta é a determinação do conjunto de dados mais adequado para o estudo da deriva de ultrabaixa frequência e sua influência na fadiga. O objetivo é analisar movimentos cíclicos com períodos maiores do que o da segunda ordem, assim é necessário isolar estes movimentos através da determinação de um filtro nos dados que separe estes movimentos dos de segunda e primeira ordem.

Além disso, existe uma limitação de quantidade de dados que podem ser tratados pelo PROSIM em uma única análise, e é interessante para o estudo que o período de uma análise seja o maior possível para que se possa observar o maior número possível de oscilações de baixa frequência. Assim, é necessário um estudo da taxa de amostragem utilizada, ou seja, do espaçamento entre os pontos dos dados de entrada.

### 7.2.1 Dados de entrada

Para as análises propostas no trabalho foram utilizados dados de campo fornecidos pela Petrobras, do período que vai de 01/04/2017 a 31/03/2018, para a plataforma em estudo.

Os movimentos estudados no trabalho são os de ultrabaixa frequência, ou seja, movimentos que são extremamente lentos quando comparados com outros movimentos da embarcação, como roll e pitch. Portanto será observado o passeio da plataforma, buscando identificar grandes oscilações com períodos na ordem de minutos ou até mesmo horas [3].

### 7.2.2 Seleção de dados

Antes de tudo, serão selecionados os períodos a serem analisados. Como o interesse é em movimentos muito lentos, é preciso analisar alguns dias em sequência, o que significa ter dados sem intervalos para um período relativamente grande de tempo. De forma simplificada, isso pode ser obtido observando quais arquivos de dados mensais apresentam maior tamanho, pois tal fato indica que mais informações foram armazenadas continuamente (pressupondo que as medições apresentam boa qualidade).

Nesse primeiro momento foram descartados os meses de outubro e novembro de 2017 por insuficiência de dados.

### 7.2.3 Transformação de coordenadas e tratamento dos dados

A partir da posição original da plataforma e dos dados de seu posicionamento obtidos a cada segundo é possível calcular seu deslocamento segundo as coordenadas UTM. Além disso, os dados de aproamento também estão disponíveis a cada segundo.

O primeiro passo, portanto, é transformar os dados das coordenadas UTM para o referencial da plataforma. Isso é feito através de uma combinação entre as coordenadas, aproamento e posição original da plataforma.

Os deslocamentos nos eixos norte e leste das coordenadas UTM resultam da subtração entre as posições momentânea e original da plataforma. Já o aproamento é ajustado para que se forme um ângulo  $0^\circ$  com o eixo leste e que este ângulo aumente no sentido anti-horário. Agora basta converter os deslocamentos UTM para o eixo local da plataforma, obtendo os deslocamentos em surge e sway, conforme demonstrado nas equações (8) e (9).

$$Surge = \cos(\theta) * difUTM_{Leste} + \sin(\theta) * difUTM_{Norte} \quad (8)$$

$$Sway = -\sin(\theta) * difUTM_{Leste} + \cos(\theta) * difUTM_{Norte} \quad (9)$$

Onde  $difUTM$  é a diferença entre a posição momentânea e a original para determinado eixo; e  $\theta$  é o ângulo em relação ao eixo leste das coordenadas UTM.

Dessa forma, obtém-se os deslocamentos da plataforma na direção de popa-proa e de través.

Essa transformação foi feita através de um programa em Matlab. Tal programa buscava também identificar momentos onde não houve armazenamento de dados e preencher esses pontos através de uma interpolação linear. Além disso, o programa precisava eliminar pontos discrepantes da série temporal, retirando deslocamentos irreais e oscilações abruptas demais.

Feito isso, as coordenadas deveriam ser salvas em um arquivo, contendo 10800 pontos, capaz de ser importado pelo software SITUA/PROSIM. Os passos realizados para se atingir esses objetivos serão melhor explicados adiante.

#### 7.2.4 Análises

No software SITUA/PROSIM é possível realizar análises dinâmicas com movimento prescrito. Para isso, os movimentos da plataforma na direção de surge e sway serão determinadas a partir do arquivo gerado anteriormente. Os demais movimentos da embarcação serão deixados como livres, sendo afetados pela variação de tração nas linhas.

O modelo utilizado já havia sido criado e calibrado em estudos anteriores, a única alteração realizada foi a eliminação de todos os risers do modelo de modo a deixá-lo mais leve computacionalmente. A tração das linhas de ancoragem varia em função da posição da plataforma e, como já está definido o histórico de posições desta, basta que seja realizada a análise com movimento prescrito para obter o histórico de trações nas linhas, sem se preocupar com os risers nesse caso.

Ao fim das análises, obtém-se o histórico de forças atuando na embarcação e nas linhas. As forças nas conexões das linhas de ancoragem com a plataforma são obtidas no arquivo GR2. A tração para cada nó das linhas é dada no arquivo FAX.

#### 7.2.5 Filtragem de dados

A partir disso, verificou-se que os dados de saída apresentavam muito “ruído”, isto é, oscilações bruscas da plataforma em determinados momentos, pois ainda estão presentes todos os deslocamentos do corpo, tanto de alta quanto de baixa frequência. Como este trabalho foca na análise da fadiga gerada por movimentos de frequência muito baixa, foi preciso criar um filtro a fim de eliminar todas as respostas de frequências mais altas, as quais não nos interessam.

Para isso, primeiro se recorreu à média móvel, de modo a observar o deslocamento médio da plataforma em períodos mais longos, sendo adotada a média

móvel centralizada para que esta não ficasse adiantada nem atrasada em relação ao movimento. Em seguida, foi estudada a possibilidade de se adotar intervalos de pontos nos dados de entrada, permitindo análises de maior duração.

A média móvel é uma técnica bastante utilizada por economistas para apontar uma tendência existente. Essa técnica também pode ser usada em dados experimentais para eliminar ruídos na informação gerada pelo aparelho de medição, suavizando a curva de dados, ou como filtro, mantendo somente as frequências mais baixas da resposta [1].

Existem diversas formas de se calcular a média móvel de um conjunto de dados, mas apenas será abordado aqui a média móvel simples. Seja um conjunto  $V$  de  $N$  número de dados no total,  $n$  o valor do número de pontos que se quer a média móvel e  $i$  o índice dos valores da média móvel, portanto a média móvel simples é dada pela fórmula [1] a seguir, na equação 10:

$$MMSn_i = \frac{V_i + V_{i+1} + \dots + V_{i+n-1}}{n} \quad (10)$$

Uma adaptação pode ser feita para a média móvel centralizada, na equação (11):

$$MMSn_i = \frac{V_{i-\frac{n}{2}} + V_{i-\frac{n}{2}+1} + \dots + V_i + V_{i+1} + \dots + V_{i+\frac{n}{2}-1}}{n} \quad (11)$$

Onde  $i$  varia de  $N$  a  $N-n+1$

Observando os gráficos nas Figura 26, Figura 27, Figura 28 e Figura 29 a seguir é possível comprovar que uma média móvel curta varia com mais facilidade, indicando pequenas oscilações e apresentando maior desvio padrão (em relação à média absoluta). Já a média móvel longa é mais suave, porém, como a alteração de um valor tem um pequeno impacto na média calculada, apresenta uma certa demora para responder a uma nova tendência. Em outras palavras, as médias longas, apesar de mais suaves, podem subestimar o valor do deslocamento que realmente ocorreu, pois há uma perda de sensibilidade das alterações.

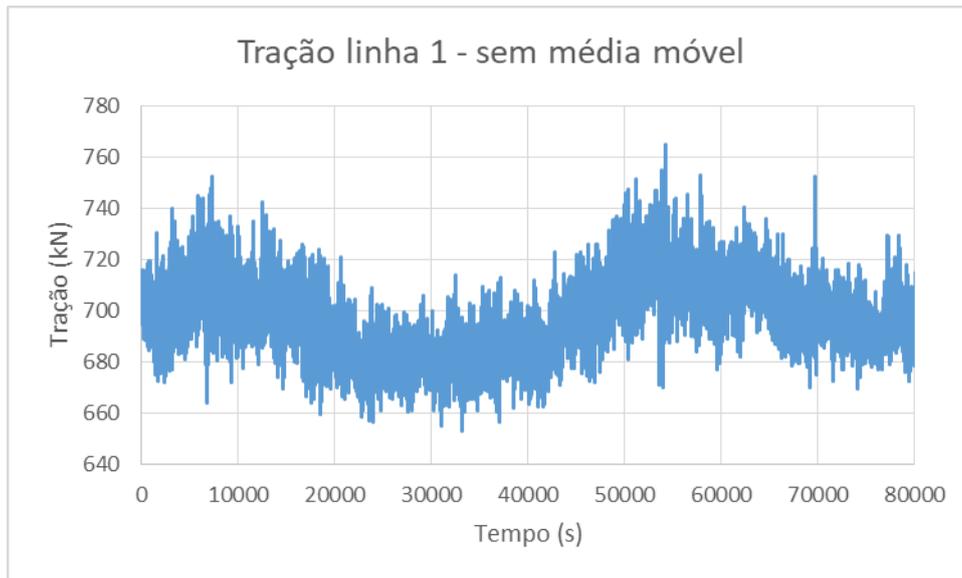


Figura 26 - Amostra de tração na linha 1 (sem média móvel)

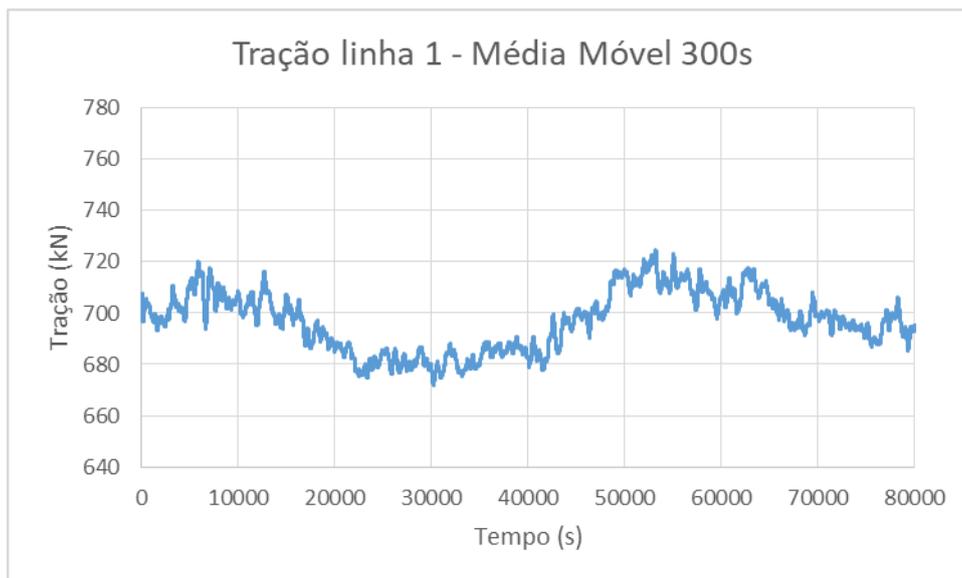


Figura 27 - Amostra de tração na linha 1 (média móvel 300s)



Figura 28 - Amostra de tração na linha 1 (média móvel 600s)



Figura 29 - Amostra de tração na linha 1 (média móvel 1200s)

Pode ser comparado o resultado das trações, nas Tabela 2 e Tabela 3:

Tabela 2 - Comparação entre médias móveis

Média móvel (s)	Média (kN)	Desvio padrão (kN)
300	697.53	11.55
600	697.53	11.32
1200	697.55	11.12

Tabela 3 - Comparação entre médias móveis

Média móvel (s)	Tração máxima (kN)	Tração mínima (kN)	Amplitude(kN)
300	724.75	671.99	52.76
600	722.79	675.39	47.40
1200	720.40	675.99	44.40

Em todos os gráficos é possível identificar grandes picos de oscilação e pequenas diferenças em seus valores, mantendo uma média de valores bem próxima. Entretanto é preciso tomar cuidado com médias móveis muito grandes, pois podem levar à supressão de pontos de extremo. Uma pequena perda de sensibilidade é admissível desde que isso não afete a amplitude máxima de trações de forma significativa. Portanto, de maneira a eliminar movimentos mais abruptos, originados pela resposta de alta frequência, sem perder tanta sensibilidade quanto aos pontos de extremo, adotou-se uma média móvel de 600s. Seu resultado para um trecho pode ser visto na Figura 30:

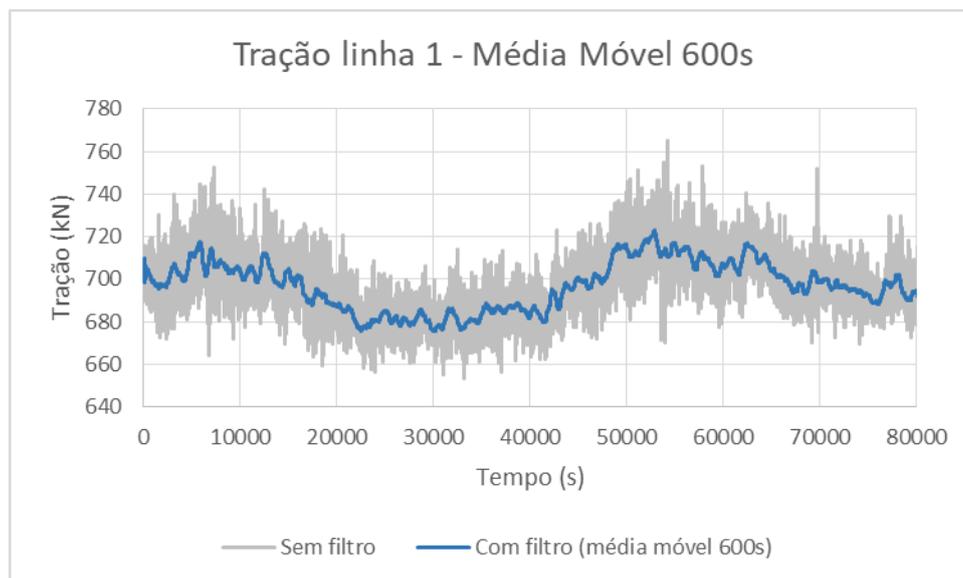


Figura 30 - Comparação entre dados brutos e após aplicação da média móvel de 600s

Como será necessário comparar mais adiante os dados filtrados com os dados brutos também se buscou eliminar pontos discrepantes para esses últimos. Os pontos não condizentes com os movimentos da plataforma foram eliminados através da definição de um limite de deslocamento, definindo um limite para o deslocamento entre

um segundo e outro em seu histórico de posições, além de limitar quanto determinada posição poderia variar em relação à média de pontos ao redor. Os pontos eliminados foram substituídos pela média móvel correspondente àquele instante (há outras técnicas de identificação e substituição de outliers, como z-score, mas não se mostraram práticas devido ao tempo de execução, ao menos no Matlab).

### 7.2.6 Intervalo entre os pontos

O interesse no estudo é, sobretudo, nos movimentos de baixíssima frequência e, além disso, há um limitante de 10800 pontos no arquivo de entrada para o movimento prescrito no software SITUA/PROSIM. Dessa forma, é preciso avaliar um intervalo maior do que 1 segundo para os pontos de entrada, o que permitiria uma análise de maior duração e que suprimiria as oscilações de menores períodos.

Aplicando a média móvel de 600 segundos e variando o intervalo de gravação de pontos para o arquivo de entrada é possível avaliar o quanto os resultados são afetados pelo espaçamento entre os pontos de gravação. Será observado, nas Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34 e Figura 35 a seguir, como se comporta o histórico de trações para a linha 16, a linha com maior variação de tração, para os intervalos de 1s, 8s e 100s:



Figura 31 - Amostra de tração na linha 16 (intervalo de 1s)

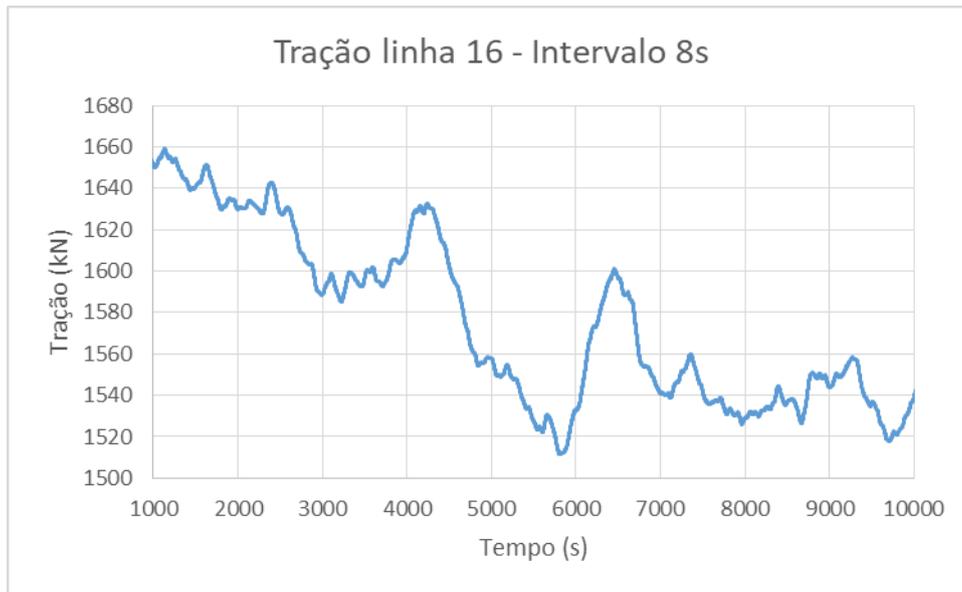


Figura 32 - Amostra de tração na linha 16 (intervalo de 8s)



Figura 33 - Amostra de tração na linha 16 (intervalo de 100s)

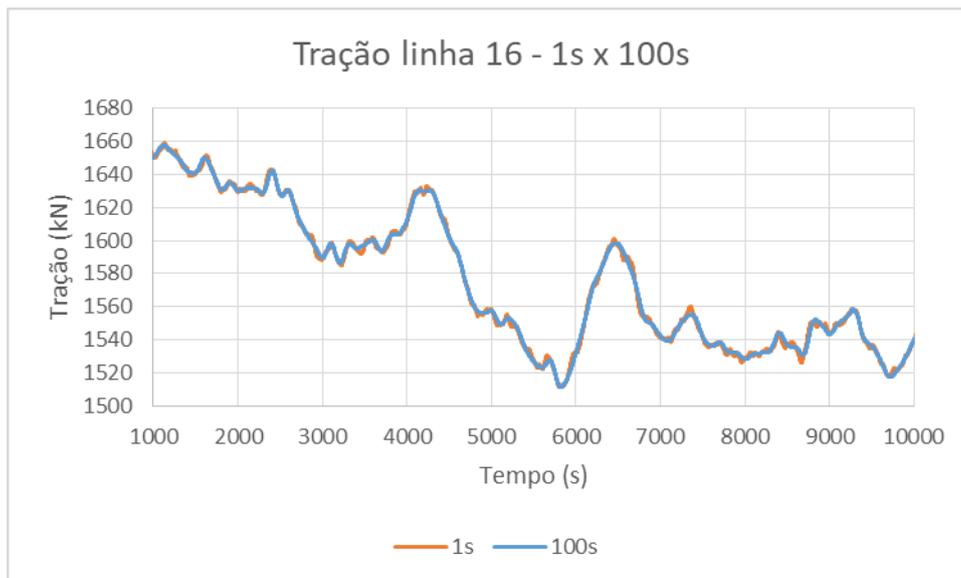


Figura 34 - Comparação para intervalos de 1s e 100s na linha 16

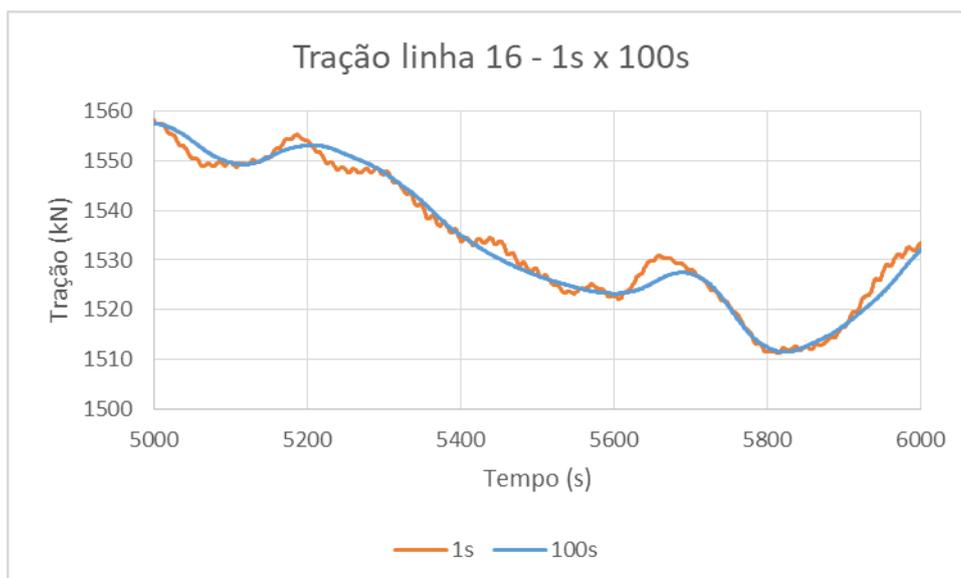


Figura 35 - Comparação para intervalos de 1s e 100s na linha 16 (em detalhe)

E comparando as trações, nas Tabela 4 e Tabela 5:

Tabela 4 - Comparação entre intervalos de gravação

Intervalo (s)	Média (kN)	Desvio padrão (kN)
1	1576.47	40.97
8	1576.47	40.97
100	1576.49	40.89

Tabela 5 - Comparação entre intervalos de gravação

Intervalo (s)	Máximo (kN)	Mínimo (kN)	Amplitude (kN)
1	1659.20	1511.19	148.01
8	1659.11	1511.47	147.64
100	1657.49	1511.43	146.06

Portanto, observa-se que a adoção de um intervalo de gravação de pontos de até 100 segundos praticamente não afeta os resultados finais para as trações no caso de oscilações ultralentas. Isso garante análises contínuas de até 12,5 dias.

A comparação foi feita também para um intervalo de 600 segundos, como demonstrado nas Figura 36 e Figura 37:



Figura 36 - Comparação para intervalos de 100s e 600s na linha 16

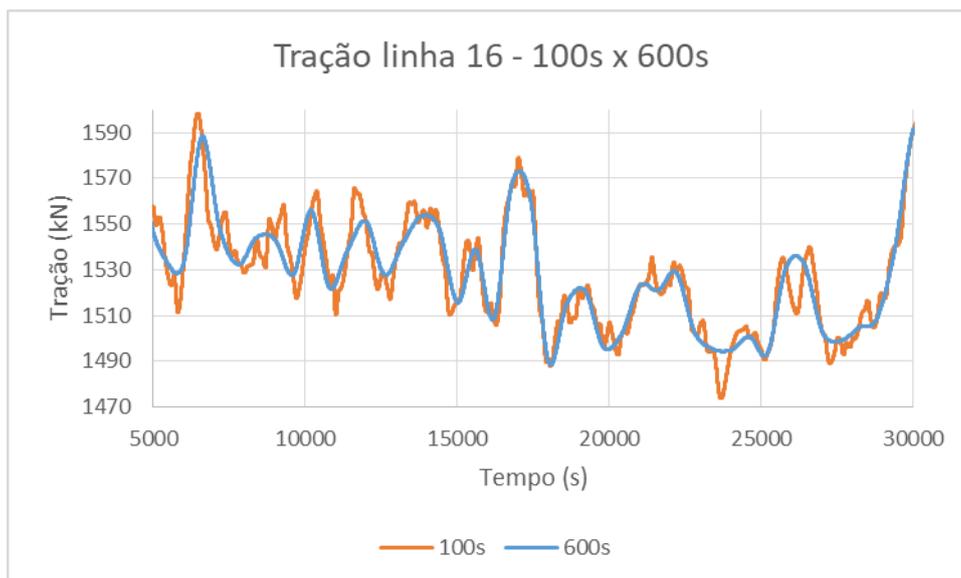


Figura 37 - Comparação para intervalos de 100s e 600s na linha 16 (em detalhe)

Porém, para esse intervalo, os resultados obtidos para os pontos de máximo e mínimo diferem notoriamente, como pode ser visto nas Tabela 6 e Tabela 7:

Tabela 6 - Comparação entre intervalos de 100s e 600s

Intervalo (s)	Média (kN)	Desvio padrão (kN)
100	1586.08	69.51
600	1586.18	69.51

Tabela 7 - Comparação entre intervalos de 100s e 600s

Intervalo (s)	Máximo (kN)	Mínimo (kN)	Amplitude (kN)
100	1788.35	1473.80	314.55
600	1783.49	1488.61	294.88

Assim sendo, a média móvel adotada foi de 600 segundos e o intervalo de gravação para o arquivo de entrada foi de 40 pontos, de modo a obter um arquivo com 10800 pontos para uma análise de 5 dias.

### 7.2.7 Validação dos resultados

Para atestar a qualidade dos resultados é preciso conferir se há conformidade entre a tração nas linhas de ancoragem e o deslocamento da plataforma. É esperado

que a tração aumente conforme a plataforma se afaste de sua posição original. Sendo assim, olha-se para um recorte dos gráficos de tração e posição, nas Figura 38, Figura 39 e Figura 40:



Figura 38 - Recorte de tração na linha 1



Figura 39 - Recorte de tração na linha 2

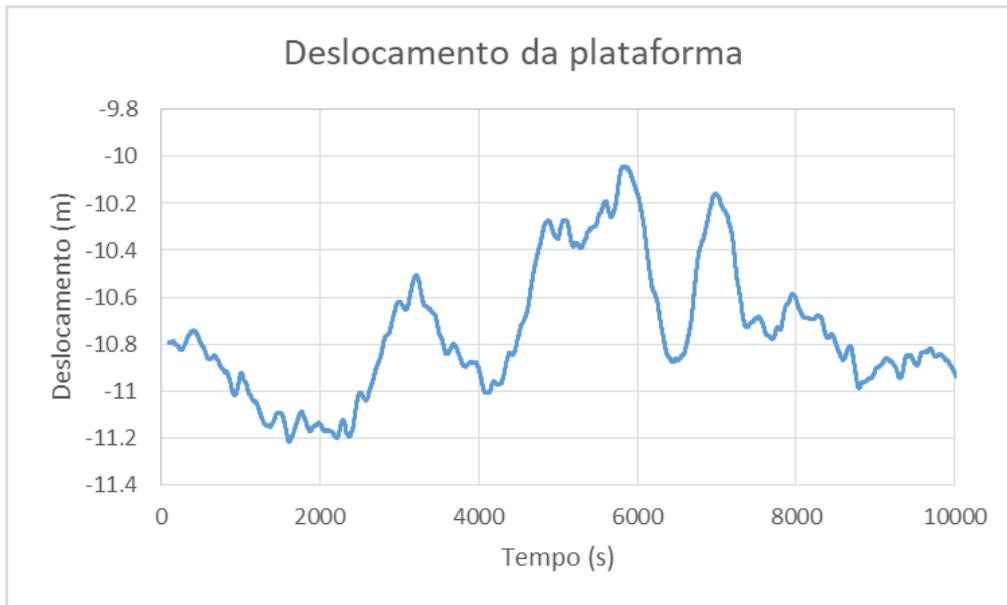


Figura 40 - Recorte do deslocamento da plataforma

O esperado acontece: mesmo em faixas de trações diferentes, as linhas 1 e 2 colocadas como exemplo apresentam uma variação de tração proporcional ao deslocamento da plataforma. Isso valida as análises. Em valores absolutos para a tração nas linhas de ancoragem tal conformidade também pôde ser observada para as linhas mais tracionada (linha 10, na Figura 41) e com maior variação de tração (linha 16, na Figura 42), com atenção para a esta última que, por estar posicionada mais para um dos bordos da plataforma, mostra variações de tração em maior alinhamento com o sway (como observado na Figura 43).

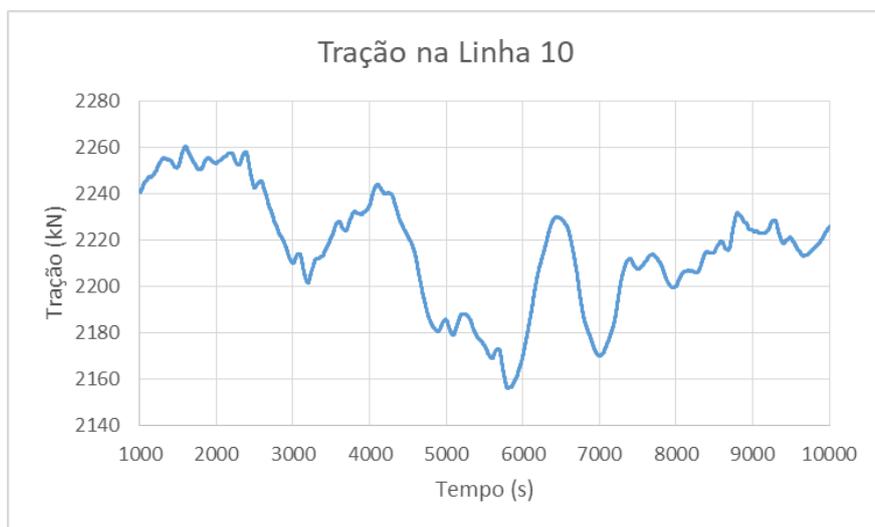


Figura 41 - Recorte de tração na linha 10



Figura 42 - Recorte de tração na linha 16

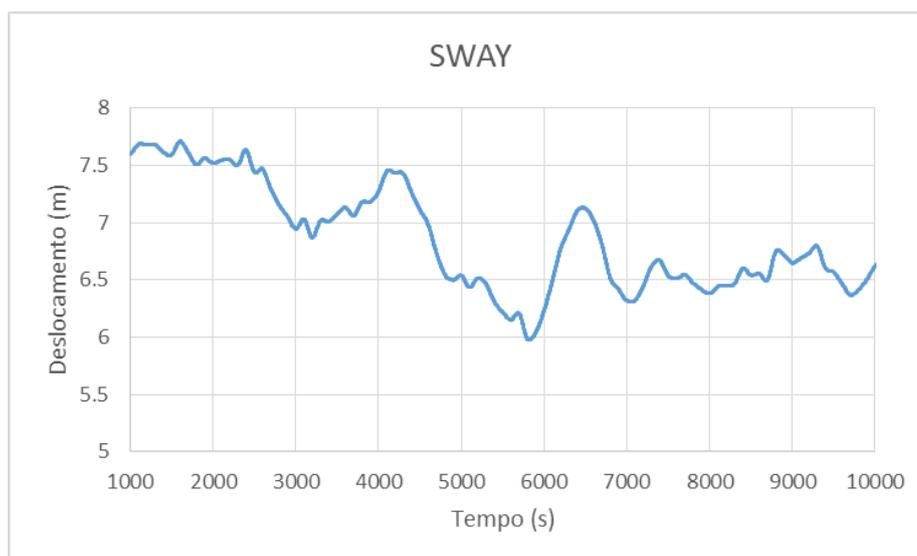
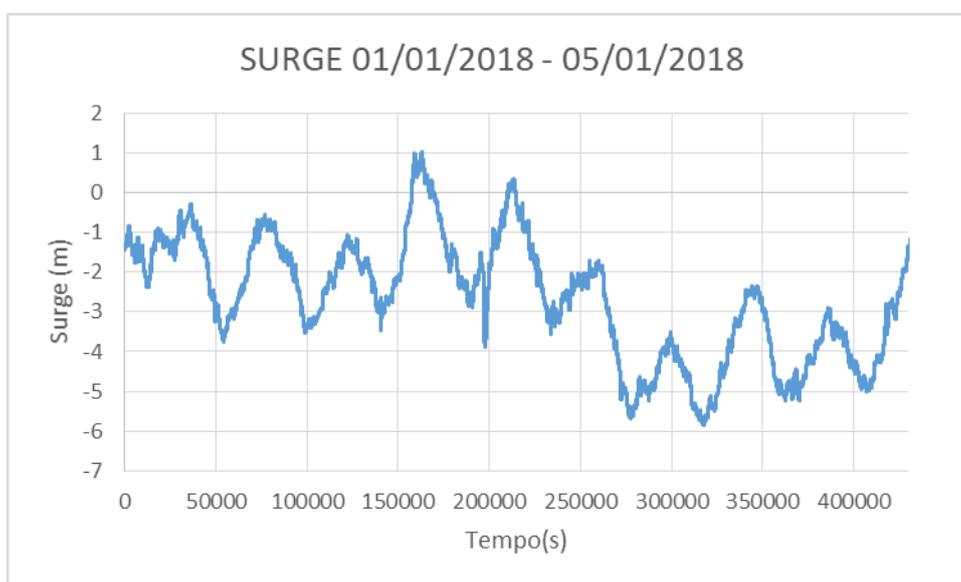


Figura 43 - Recorte de deslocamento da plataforma em sway

Isso valida o procedimento de análise de movimento e é possível dar prosseguimento ao trabalho. Para a análise de fadiga serão considerados os resultados do histórico de tração para intervalos de 5 dias, sendo aplicada uma média móvel de 600 segundos aos dados de entrada. Para o caso de 5 dias, o que resulta em 432000 pontos originalmente, será usado um intervalo de 40 segundos, garantindo os 10800 pontos para a análise sem perdas significativas de informação.

### 7.3 IDENTIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE DERIVA ULTRALENTA

Um dos objetivos desse estudo era analisar os movimentos de deriva ultralenta da embarcação, observando a amplitude do movimento e a sua duração, de forma a avaliar se existe uma periodicidade. Isso pode ser feito através da análise dos dados de movimento da plataforma depois deles serem devidamente tratados, ou seja, através do arquivo PLD gerado a partir da transformação dos dados de GPS. Além disso, devido ao deslocamento ocorrer com maior intensidade em surge, os movimentos ficam mais visíveis nessa direção e, portanto, essa parte da análise restringiu-se a ela. Um recorte pode ser observado na Figura 44:



*Figura 44 - Deslocamentos da plataforma em surge para janeiro/2018*

A partir dos pontos de máximo ao longo do movimento se podem obter valores para o período das oscilações, isto é, o tempo transcorrido entre um ponto de máximo e o seguinte. Os períodos para cada oscilação e o período médio são apresentados nas Tabela 8 e Tabela 9:

Tabela 8 - Deslocamentos máximos para surge em janeiro/2018

Máximo (m)	Tempo(s)	Período (s)
-0.276515	36314	-
-0.543868	77049	40735
-1.069806	122428	45379
1.012759	162914	40486
0.337456	213220	50306
-1.693779	255019	41799
-3.509505	299408	44389
-2.339628	347145	47737
-2.8984	386013	38868
-1.125238	431974	45961

Tabela 9 - Período médio das oscilações em janeiro/2018

Período médio (s)
43962

Para os primeiros cinco dias de janeiro de 2018 o período das oscilações apresentou uma variação considerável para o período analisado. Sua duração ficou compreendida entre 38000 e 51000 segundos, aproximadamente entre 10 e 14 horas, portanto. E o período médio foi por volta de 44000 segundos, um pouco superior a 12 horas. Porém a plataforma não demonstrou deslocamentos tão grandes, como mostrado pelos pontos de máximo e mínimo na Figura 45 a seguir. A amplitude média dos movimentos foi por volta de 1,60 m apenas, como pode ser visto nas Tabela 10 e Tabela 11, mais adiante.

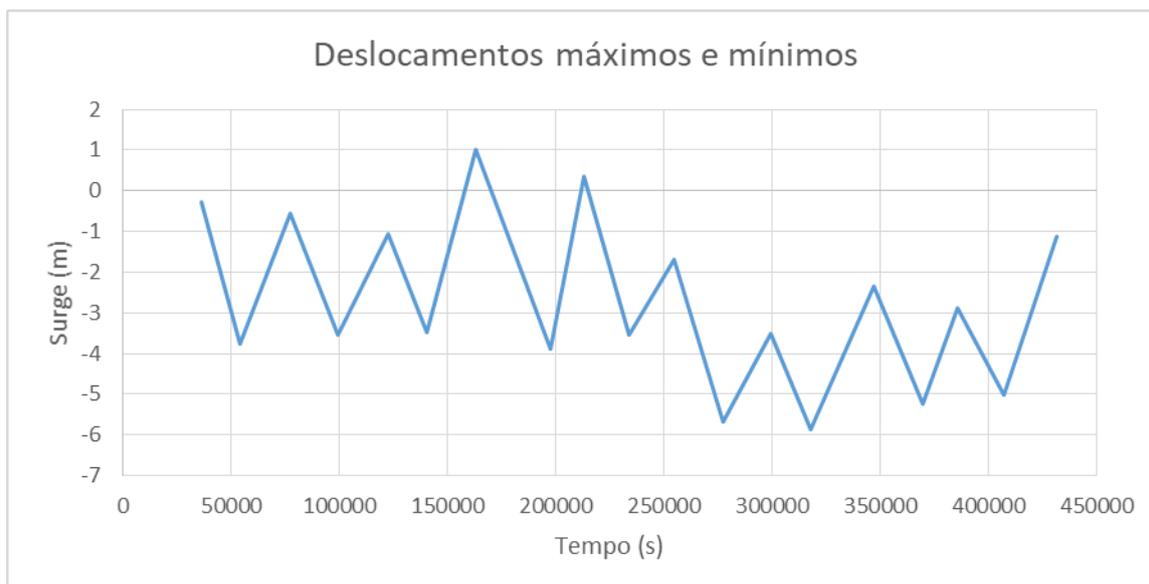


Figura 45 - Deslocamentos máximos e mínimos em surge para janeiro/2018

Tabela 10 - Deslocamentos máximos em surge e amplitude do movimento para janeiro/2018

Pontos	Surge (m)	Deslocamento (m)	Amplitude (m)
1	-0.276515	-	-
2	-3.754861	3.48	1.74
3	-0.543868	3.21	1.61
4	-3.529734	2.99	1.49
5	-1.069806	2.46	1.23
6	-3.466316	2.40	1.20
7	1.012759	4.48	2.24
8	-3.895706	4.91	2.45
9	0.337456	4.23	2.12
10	-3.551776	3.89	1.94
11	-1.693779	1.86	0.93
12	-5.678593	3.98	1.99
13	-3.509505	2.17	1.08
14	-5.862524	2.35	1.18
15	-2.339628	3.52	1.76
16	-5.241344	2.90	1.45
17	-2.8984	2.34	1.17
18	-5.021524	2.12	1.06
19	-1.125238	3.90	1.95

Tabela 11 - Média de deslocamentos e amplitude para janeiro/2018

Média	Deslocamento (m)	Amplitude (m)
	3.18	1.59

Além disso, ao observar outras séries temporais de deslocamento ao longo do ano, foi possível perceber que o comportamento da plataforma varia muito. De forma muito esporádica a embarcação apresenta um grande passeio, de até 10 metros, com ciclos menores ao longo desse movimento, ou uma maior incidência de pequenas variações, mesmo após os dados filtrados. No mês de julho de 2017, por exemplo, é possível observar, na Figura 46, movimentos da ordem de grandeza constatada anteriormente, mas estes parecem pequenos perto dos valores extremos para o trecho visto.

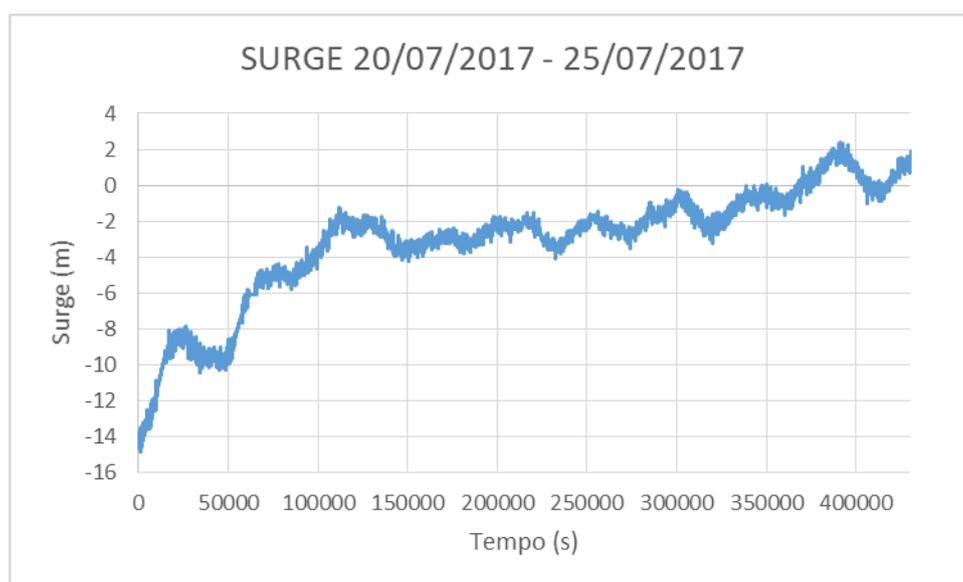
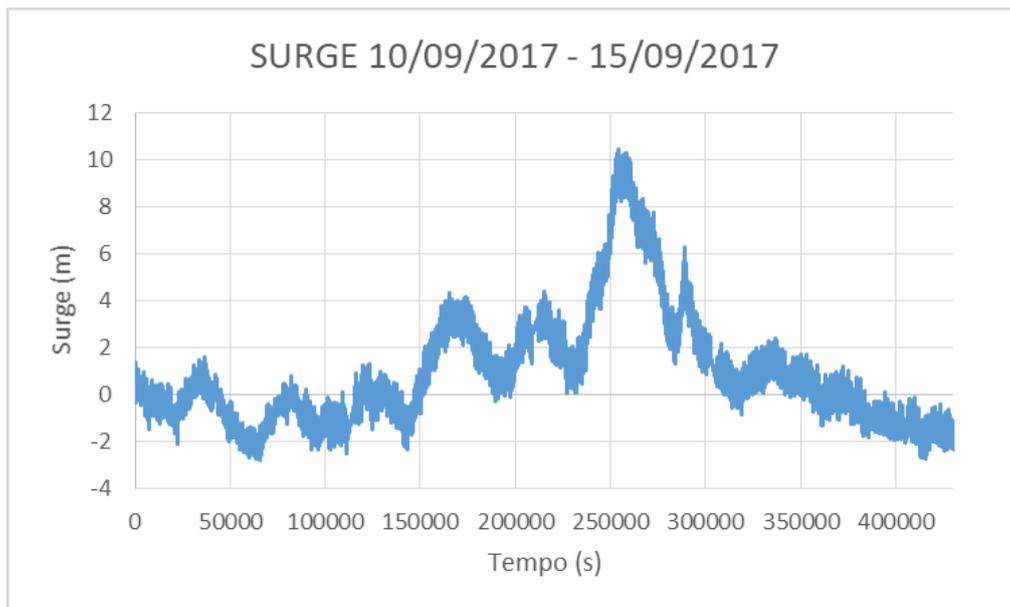


Figura 46 - Deslocamento em surge para julho/2017

No caso de meados de setembro de 2017, como se vê na Figura 47, não só é possível constatar movimentos cíclicos como também notar que tanto a amplitude quanto o período destes apresentam um padrão.



*Figura 47 - Deslocamento em surge para setembro/2017*

O fenômeno observado só pode ser atribuído a cargas ambientais, mas é difícil definir um só fator ambiental como o responsável por esses deslocamentos de tão longa duração. As condições de mar, com maiores alturas de onda, ou mesmo um evento de alteração das correntes (assumindo que estas podem variar devido a algum fenômeno meteorológico) em um determinado dia podem levar a embarcação a se mover mais para longe de seu ponto original do que de costume, por exemplo.

Entretanto, não se pode negar que há movimentos recorrentes de grande amplitude, com certa periodicidade, sendo estes visíveis nos gráficos. A questão é: o quanto esses movimentos podem afetar a vida à fadiga? Inicialmente se nota apenas que há uma certa incidência de deslocamentos com amplitudes inferiores a 2 metros em intervalos de tempo que podem chegar a 14 horas. Muito mais esporádicos são movimentos de amplitudes realmente grandes, com alguns ultrapassando 10 metros. Isso seria o suficiente para afetar o dano por fadiga de forma a esse fator ser incluído em futuras estimativas de vida útil das linhas? Para tal é preciso analisar o dano gerado por esses movimentos, comparando-o com o dano causado pelos movimentos de primeira e de segunda ordem.

#### 7.4 METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE FADIGA

Depois de definida a média móvel (600s), o intervalo de pontos (40s) e o período de tempo (5 dias) a ser analisado, é possível realizar a análise da fadiga resultante dos movimentos ultralentos.

Análises de 5 dias foram executadas no SITUA/PROSIM a cada 10 dias, isto é, para cada 5 dias analisados havia 5 de intervalo. Uma análise nos primeiros 5 dias do mês, outra do dia 11 ao dia 15 e mais uma do dia 21 ao dia 25 de cada mês.

A partir dos arquivos GR2 é possível obter o histórico de trações nas conexões de cada linha de ancoragem com a plataforma e, com isso, o dano em cada uma delas. A análise se concentrará nas linhas 10 (mais tracionada) e 16 (com maior variação de tração), conforme indicado por uma amostra dos dados, visíveis nas Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14:

*Tabela 12 - Amostragem de trações (linhas 1 a 6)*

Linhas	1	2	3	4	5	6
Tração máxima (kN)	737.13	846.02	964.33	855.82	756.10	1453.28
Tração mínima (kN)	675.43	772.92	873.51	755.94	698.87	1157.37
Diferença de trações (kN)	61.70	73.11	90.82	99.88	57.23	295.91
Tração média (kN)	707.63	812.22	923.24	808.11	730.04	1308.94

*Tabela 13 - Amostragem de trações (linhas 7 a 12)*

Linhas	7	8	9	10	11	12
Tração máxima (kN)	1306.87	972.11	1501.67	<b>2389.42</b>	1105.54	1944.24
Tração mínima (kN)	1024.85	796.00	1086.75	2062.22	977.02	1659.34
Diferença de trações (kN)	282.02	176.11	414.92	327.20	128.52	284.90
Tração média (kN)	1168.15	897.03	1299.23	<b>2207.97</b>	1029.90	1773.73

*Tabela 14 - Amostragem de trações (linhas 13 a 18)*

Linhas	13	14	15	16	17	18
Tração máxima (kN)	1028.07	1508.18	1392.36	1977.17	998.26	1183.95
Tração mínima (kN)	944.78	1093.27	1059.62	1322.16	831.59	937.11
Diferença de trações (kN)	83.29	414.91	332.74	<b>655.01</b>	166.67	246.84
Tração média (kN)	976.51	1258.56	1193.12	1597.64	910.17	1036.50

#### 7.4.1 Análise preliminar

Para a análise de fadiga é preciso, primeiro, contar o número de ciclos de tração. Para isso será primeiro realizada uma análise preliminar, de modo a visualizar os ciclos de tração e entender o cálculo do dano por fadiga. Depois será aplicado o rainflow para a contagem do ciclos e estimativa real do dano.

Esse estudo deseja focar nos movimentos de maior amplitude, de forma a avaliar o impacto dessas oscilações no dano total. Dessa forma, pode adotar-se uma metodologia preliminar de análise dos movimentos através dos pontos mínimos e máximos de tração e utilizá-los para estimar, grosseiramente, o dano nas linhas de ancoragem. Utilizando o software Excel ou qualquer outro software que auxilie a gerar e visualizar gráficos, é possível obter os valores para as trações máximas e mínimas nas linhas, bem como o período de um ciclo, isto é, o tempo que demora para a série histórica de trações sair de um ponto de máximo, passar por um ponto de mínimo e retornar para um de máximo. Isso visa buscar um maior entendimento inicial acerca da ordem de grandeza das trações.

A contagem de ciclos será feita ao longo de todo o período, considerando a diferença de um ponto máximo para um ponto de mínimo para escalas de tempo compatíveis com os movimentos que se quer analisar. Cada diferença dessas apresenta uma amplitude de tração, mas não um ciclo completo, sendo consideradas como meio ciclos. Dessa forma, para calcular o dano, é preciso, primeiro, separar os movimentos em faixas de amplitude e depois contabilizá-los como meio ciclos, cujo valor é igual à média de valores incluídos nessa faixa.

Em seguida, essa análise preliminar busca dar uma visão geral do processo do cálculo do dano de forma simples, passando pelas etapas desse cálculo. Lembrando sempre que nesse momento não são considerados todos os ciclos, somente pontos mais visíveis de máximo e mínimo, portanto não servindo para determinar a vida à fadiga do sistema de ancoragem.

Portanto, de início se tem os primeiros 5 dias do mês de abril de 2017 (01/04/2017 - 05/04/2017), para a linha 10 na Figura 48 e para a linha 16 na Figura 49.



Figura 48 - Tração linha 10 (01/04/2017 - 05/04/2017)

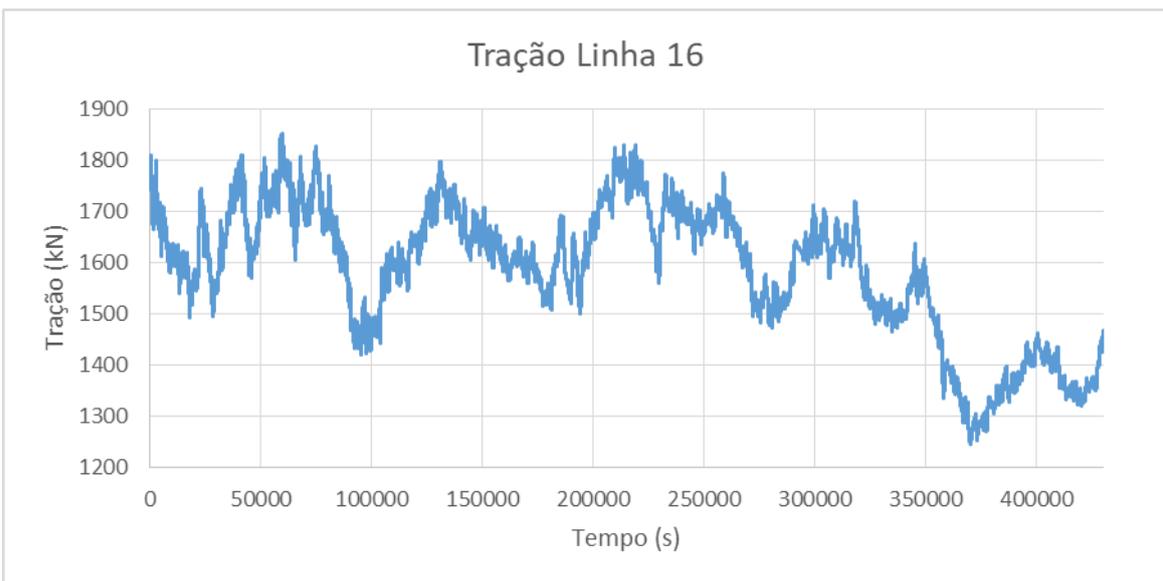


Figura 49 - Tração linha 16 (01/04/2017 - 05/04/2017)

Pode-se destacar os pontos de máximo e mínimo nesses gráficos, como feito nas Figura 50 e Figura 51, e listar as trações nesses pontos de extremo, como feito nas Tabela 15 e Tabela 16:



Figura 50 - Máximos e mínimos de tração linha 10 (01/04/2017 - 05/04/2017)

Tabela 15 - Máximos e mínimos de tração linha 10 (01/04/2017 - 05/04/2017)

Tempo (s)	Extremos (kN)
13245	1514.9
41678	1867.0
82775	1540.7
139130	1839.9
168737	1562.4
221730	1921.7
263781	1619.5
318890	2073.2
353799	1791.2
417554	2165.1



Figura 51 - Máximos e mínimos de tração linha 16 (01/04/2017 - 05/04/2017)

Tabela 16 - Máximos e mínimos de tração linha 16 (01/04/2017 - 05/04/2017)

Tempo (s)	Extremos (kN)
18247	1493.6
60051	1851.5
95441	1420.1
131599	1796.4
194135	1500.0
218994	1830.3
229620	1559.5
258913	1774.6
280580	1472.3
318016	1718.9
334768	1465.5
345118	1638.2
370022	1245.6
400510	1461.7

Além disso, registra-se as amplitudes de tração para esse período, na Tabela 17 a seguir:

Tabela 17 - Amplitudes de tração linhas 10 e 16 (01/04/2017 - 05/04/2017)

<b>Amplitude (kN)</b>	<b>Amplitude (kN)</b>
<b>Linha 10</b>	<b>Linha 16</b>
176	179
163	216
150	188
139	148
180	165
151	135
227	108
141	151
187	123
	127
	86
	196
	108

Como se vê na Tabela 18 abaixo, a linha 10 apresentou uma amplitude média de tração por volta de 170 kN, enquanto a linha 16 apresentou 150 kN. Devido à localização das linhas, os esforços não ocorreram no mesmo padrão, inclusive variando bastante em relação ao tempo de ocorrência.

Tabela 18 - Amplitude média de tração linhas 10 e 16 (01/04/2017 - 05/04/2017)

<b>Linha</b>	<b>Amplitude Média (kN)</b>
10	168.13
16	148.55

Agora que já existe um primeiro resultado, prossegue-se por um procedimento similar, mas de forma simplificada, para os demais períodos analisados. Isso será feito para o resto do histórico de trações, em uma estimativa grosseira, servindo somente para um entendimento inicial do cálculo de fadiga e do dano.

Feita a análise de máximos e mínimos em todo o histórico, há uma grande quantidade de movimentos onde cada um deles é praticamente único. Dessa forma, para calcular o dano, os movimentos primeiro precisam ser separados em faixas de

amplitude de tração, onde eles serão contabilizados como meio ciclos cujo valor é igual à média dos valores-limite da faixa.

A separação das bandas de tração ocorrerá, aqui, em função da tração mínima de ruptura (MBL - minimum breaking load), onde cada uma compreenderá 0,5% do MBL. Para calcular o dano em cada faixa dessas se deve utilizar as curvas T-N apresentadas na API [1].

No caso desse projeto, avalia-se amarras do tipo sem malhete (studless), o que significa uma curva com os seguintes parâmetros M e K, segundo a API [1]:

$$M = 3.0$$

$$K = 316$$

Dessa forma é possível calcular o número de ciclos até a falha (N) pela equação (7), manipulada para a equação (12):

$$N = \frac{K}{R^M} \quad (12)$$

Onde  $R$  é a razão entre a amplitude de tração da faixa considerada e a tração de ruptura (igual à tração MBL). MBL para essa amarra é igual a 9937 kN.

Então, com o cálculo do número de ciclos  $N$  até a falha, é possível calcular a fração do dano  $n/N$  em cada faixa de tração bem como o dano total em cada linha, que, segundo a regra de Palmgren-Miner, será a soma dos danos para todas as faixas de tração.

O cálculo será feito passo a passo, a seguir, para uma das faixas da linha 10, sendo contabilizados todos os ciclos para um ano:

- 1) Selecionar uma das faixas de tração:

$$Faixa = 0 - 49.7 \text{ kN}$$

- 2) Amplitude média da faixa de tração, equação (13):

$$\frac{0 + 49.7}{2} = 24.85 \quad (13)$$

- 3) Razão entre a amplitude de tração da faixa considerada e a tração de ruptura, equação (14):

$$R = \frac{24.8}{9937} = 2,496 \times 10^{-3} \quad (14)$$

- 4) Número de ciclos até a falha, substituindo os valores na equação (12) para obter o número de ciclos, na equação (15):

$$N = \frac{K}{R^M} = \frac{316}{(2,496 \times 10^{-3})^3} = 2.02 \times 10^{10} \text{ ciclos} \quad (15)$$

- 5) Fração do dano, equação (16):

$$\frac{n}{N} = 4.94 \times 10^{-10} \quad (16)$$

O mesmo procedimento é feito para as demais faixas e, ao final, a soma do dano para todos os 150 dias analisados será extrapolada para o ano todo, como pode ser observado nas Tabela 19 e Tabela 20 adiante. O dano anual para as duas linhas está em destaque na Tabela 21, na sequência.

Tabela 19 - Dano linha 10 (análise preliminar)

Linha 10								
MBL	Faixa		n	Amplitude média de tração (kN)	N	n/N	Soma n/N	Ano
0.5%	0	49.7	10	24.8	2.02E+10	4.94E-10	2.82E-06	6.85E-06
1.0%	49.7	99.4	96	74.5	7.49E+08	1.27E-07		
1.5%	99.4	149.1	67	124.2	1.62E+08	4.11E-07		
2.0%	149.1	198.7	30	173.9	5.90E+07	5.00E-07		
2.5%	198.7	248.4	12	223.6	2.77E+07	4.33E-07		
3.0%	248.4	298.1	4	273.3	1.52E+07	2.30E-07		
3.5%	298.1	347.8	2	323.0	9.21E+06	1.63E-07		
4.0%	347.8	397.5	3	372.6	5.99E+06	4.17E-07		
4.5%	397.5	447.2	2	422.3	4.12E+06	3.64E-07		
5.0%	447.2	496.9	1	472.0	2.95E+06	1.70E-07		

Tabela 20 - Dano linha 16 (análise preliminar)

Linha 16								
MBL	Faixa		n	Amplitude média de tração (kN)	N	n/N	Soma n/N	Ano
0.5%	0.0	49.7	6.5	24.8425	2.02E+10	3.21E-10	2.96E-06	7.21E-06
1.0%	49.7	99.4	90	74.5275	7.49E+08	1.20E-07		
1.5%	99.4	149.1	80	124.2125	1.62E+08	4.94E-07		
2.0%	149.1	198.7	31.5	173.8975	5.90E+07	5.34E-07		
2.5%	198.7	248.4	13	223.5825	2.77E+07	4.69E-07		
3.0%	248.4	298.1	8	273.2675	1.52E+07	5.27E-07		
3.5%	298.1	347.8	3	322.9525	9.21E+06	3.26E-07		
4.0%	347.8	397.5	1.5	372.6375	5.99E+06	2.50E-07		
4.5%	397.5	447.2	1	422.3225	4.12E+06	2.43E-07		
5.0%	447.2	496.9	0	472.0075	2.95E+06	0.00E+00		

Tabela 21 - Dano anual linhas 10 e 16 (análise preliminar)

Linha	Dano anual
10	6.85E-06
16	7.21E-06

Uma análise ainda mais simplificada também pode ser feita, não considerando a divisão em faixas de tração, mas considerando a amplitude média de todos os ciclos e a contagem total. Dessa forma, os resultados na Tabela 22 foram:

Tabela 22 - Dano anual linhas 10 e 16 (análise preliminar simplificada)

Linha	n	Amplitude média de tração (kN)	N	n/N	Dano anual
10	223	238	2.30E+07	9.71E-06	2.36E-05
16	234.5	248	2.04E+07	1.15E-05	2.80E-05

Agora resta fazer o mesmo procedimento utilizando um método de contagem confiável para se obter uma estimativa do dano por fadiga gerado pelos movimentos de ultra-baixa frequência.

#### 7.4.2 Dano por fadiga utilizando rainflow

No método rainflow todos os movimentos são considerados e o procedimento para calcular o dano será feito da forma apresentada anteriormente. Primeiro os ciclos serão contados e separados em faixas de tração. O número de ciclos até a falha para cada faixa de tração é obtido pelas curvas T-N e, pelo número de ciclos contabilizados, tem-se o dano gerado para cada uma. Através da regra de Palmgren-Miner se obtém o dano acumulado na linha.

O algoritmo rainflow utilizado separa as faixas de tração de acordo com a maior variação de tração encontrada, isto é, a diferença entre a maior e a menor trações obtidas na série temporal. Porém, como isso implica na contagem de um meio ciclo entre esses pontos mais extremos, além desse meio ciclo ser desconsiderado, há algumas faixas de tração nas quais a contagem de ciclos fica zerada. Sendo assim, a maior faixa de tração considerada apresenta limite superior igual a 2/5 dessa variação máxima e a menor delas, um limite superior igual ao valor da maior variação encontrada dividido por 500.

Inicialmente se apresenta o dano para os primeiros 5 dias de abril de 2017 para as linhas 10 e 16, como colocado nas Tabela 23 e Tabela 24:

*Tabela 23 - Dano linha 10 (método rainflow)*

Linha 10						
Faixa		<i>n</i>	Amplitude média de tração	<i>N</i>	<i>n/N</i>	Soma <i>n/N</i>
0	1.977	4104	0.9885	3.21E+14	1.28E-11	3.40E-08
1.977	3.955	822	2.966	1.19E+13	6.92E-11	
3.955	5.932	365.5	4.9435	2.57E+12	1.42E-10	
5.932	7.91	186.5	6.921	9.35E+11	1.99E-10	
7.91	9.887	131	8.8985	4.40E+11	2.98E-10	
9.887	11.865	110.5	10.876	2.41E+11	4.58E-10	
11.865	15.82	162	13.8425	1.17E+11	1.39E-09	
15.82	19.774	97.5	17.797	5.50E+10	1.77E-09	
19.774	39.549	157	29.6615	1.19E+10	1.32E-08	
39.549	79.098	24.5	59.3235	1.49E+09	1.65E-08	
79.098	197.744	0.5	-	-	-	
197.744	395.488	0	-	-	-	

Tabela 24 - Dano linha 16 (método rainflow)

Linha 16						
Faixa		<i>n</i>	Amplitude média de tração	<i>N</i>	<i>n/N</i>	Soma <i>n/N</i>
0	1.451	3080.5	0.7255	8.12E+14	3.79E-12	1.35E-07
1.451	2.902	278.5	2.1765	3.01E+13	9.26E-12	
2.902	4.353	170.5	3.6275	6.50E+12	2.62E-11	
4.353	5.804	120.5	5.0785	2.37E+12	5.09E-11	
5.804	7.254	104	6.529	1.11E+12	9.34E-11	
7.254	8.705	95.5	7.9795	6.10E+11	1.56E-10	
8.705	11.607	155.5	10.156	2.96E+11	5.25E-10	
11.607	14.509	122	13.058	1.39E+11	8.76E-10	
14.509	29.018	346	21.7635	3.01E+10	1.15E-08	
29.018	58.035	158	43.5265	3.76E+09	4.20E-08	
58.035	145.088	23.5	101.5615	2.96E+08	7.94E-08	
145.088	290.176	0.5	-	-	-	

O mesmo procedimento é realizado para todas as análises de 5 dias. Ao final, o dano para todas as análises realizadas é somado, depois extrapolado para um ano. Assim, tem-se na Tabela 25:

Tabela 25 - Dano anual linhas 10 e 16 (método rainflow)

Linha	Soma danos	Dano anual
10	1.62E-06	3.93E-06
16	3.06E-06	7.45E-06

## 8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 8.1 PARTICIPAÇÃO DA ULTRABAIXA FREQUÊNCIA NO DANO POR FADIGA

A avaliação sobre o dano será feita com base nos resultados obtidos pela contagem rainflow para as séries de tração dos movimentos filtrados, como discutido anteriormente.

Normalmente, depois de se calcular o dano por fadiga para um determinado período, é realizado um cálculo de vida à fadiga, isto é, a partir dessa amostragem seria estimado o tempo que levaria para a linha atingir o valor unitário de dano. Para isso basta calcular o inverso do dano acumulado no período.

Entretanto, aqui não foi estudado o dano total gerado ao longo do período em questão, mas sim uma pequena parte, pela qual os movimentos de ordem muito mais lenta são responsáveis. Sendo assim, para os dados brutos, isto é, não filtrados, também foi feita uma análise do dano, contabilizando todos os movimentos, de modo a ver qual o peso que os movimentos relativos à baixíssima frequência, aqueles remanescentes após a aplicação do filtro, teriam no dano total.

Foram executadas 60 simulações de 10800 segundos com os dados não filtrados ao longo do ano. Depois os resultados foram extrapolados também para o período anual e comparados, como está na Tabela 26:

*Tabela 26 - Comparação de danos com e sem filtro*

Participação no dano (anual)			
Linha	Dano total	Dano com filtro	Participação (%)
10	5.23E-03	0.0039E-03	0.08
16	6.96E-03	0.0074E-03	0.11

É possível ver que o impacto dos movimentos de ultrabaixa frequência para o dano por fadiga é irrisório, chegando a pouco mais de 0.1% de participação no total do dano que uma linha sofre. Poderia ser discutido se os usos da média móvel e da eliminação de pontos podem ter afetado muito esse resultado, mas tais recursos foram utilizados com o propósito de eliminar ruídos no sinal e permitir análises mais longas, respectivamente, o que garantiria investigar se movimentos maiores e mais aparentes impactariam de fato no dano, o que não ocorreu. Uma análise preliminar com o uso

integral dos dados, sem nenhum filtro, além de consumir muito tempo ainda correria o risco de considerar movimentos inexistentes, computados por falhas de medição.

Outro ponto é que, com a utilização da média móvel para filtrar os dados iniciais, um grande número de variações bem pequenas foi detectado pelo algoritmo de rainflow. Essas variações, apesar de numerosas, apresentam dano de ordem de grandeza muito menor do que as demais. Nesse sentido, pode-se dizer que o filtro foi eficiente para retirar movimentos de menor amplitude e duração.

Portanto, a contribuição dos movimentos mais longos não se faz relevante para o problema de fadiga. É possível observar longos passeios da plataforma nas análises mais duradouras, entretanto os pontos mais extremos do deslocamento são pouco frequentes e não necessariamente a tração nesses pontos será tão maior do que a usual, o que termina por impactar pouco no dano total. Isso mostra que a atual janela de análise de três horas se apresenta como suficiente para considerar os deslocamentos relevantes para o dano por fadiga, mesmo com menores amplitudes dos movimentos, porém sendo estes muitos mais numerosos.

## 8.2 DANO TOTAL E VIDA ÚTIL DAS LINHAS

De modo a complementar as análises, foi feita uma avaliação dos resultados obtidos pelo método rainflow utilizando os dados brutos. Entretanto, ao ser feita a extrapolação do dano para períodos de 20 e 25 anos, considerando o coeficiente de segurança, notou-se que os danos acumulados tanto da linha 10 quanto da linha 16 superaram o valor unitário, isto é, foram maiores do que o máximo que a linha suportaria.

Para chegar a esse valor, o dano de 1 ano foi extrapolado para o tempo de vida útil estimado. Em seguida, como é estipulado um coeficiente de segurança de 10 para amarras não inspecionáveis [1], multiplica-se o resultado anterior por esse valor. Os valores obtidos são demonstrados nas Tabela 27 e Tabela 28:

Tabela 27 - Dano total ao longo de toda a vida útil (20 anos)

Linha	Dano anual	Dano 20 anos	Dano 20 anos com fator de segurança
10	5.23E-03	0.105	1.05
16	6.96E-03	0.139	1.39

Tabela 28 - Dano total ao longo de toda vida útil (25 anos)

Linha	Dano anual	Dano 25 anos	Dano 25 anos com fator de segurança
10	5.73E-03	0.143	1.43
16	6.96E-03	0.174	1.74

Já para estimar a vida útil o procedimento consiste em calcular o inverso do dano, como dito. A verificação se dá pelo tempo até a falha da linha: se este for maior do que 200 anos (ou 250 anos, a depender do projeto) a linha atende aos critérios de projeto, caso contrário, não há conformidade com estes.

Tabela 29 - Vida útil das linhas 10 e 16

Linha	Vida útil (anos)
10	191
16	144

Portanto, ao se observar a Tabela 29 acima, observou-se que, para essa análise com dados reais, as linhas 10 e 16 não atenderiam aos critérios de projeto, confirmando o que o dano aferido anteriormente demonstrou. Porém, é muito difícil afirmar que isso de fato ocorre. Seria interessante uma revisão mais detalhada dos dados utilizados e da análise realizada antes de se tirar qualquer conclusão.

Além disso, foi possível demonstrar que justamente a linha 16, a de maior amplitude de tração, é a que apresenta maior dano. Tanto ela quanto a linha 10, a mais tracionada, não estão de acordo com a norma vigente.

### 8.3 VALIDADE DOS RESULTADOS

#### 8.3.1 Comparação da malha utilizada

Para verificar se os resultados são válidos, é importante rever alguns pontos das análises de modo a encontrar algum ponto que possa impactar nos valores finais encontrados. Um desses pontos é a gradação da malha utilizadas nas linhas de ancoragem no modelo de elementos finitos. Um maior refinamento entregaria resultados muito diferentes?

Para tirar essa dúvida foi feita uma análise de sensibilidade da gradação da malha das linhas. A malha utilizada nas análises apresentava gradação média e elementos de 40 metros. Foram testadas, para uma simulação de 10800 segundos, malhas finas (20m) e muito finas (10m), segundo as denominações do programa empregado nas análises. No fim, as diferenças entre os resultados ficaram, no geral, dentro de uma margem de 10%, com mostrado para a linha 10 na Tabela 30:

*Tabela 30 - Comparação de diferentes malhas de elementos finitos*

Linha 10		
Gradação da malha	Dano 10800s	Variação
Média	1.48E-06	-
Fina	1.38E-06	-6.87%
Muito fina	1.39E-06	-6.24%

Como os valores obtidos para o dano foram muito pequenos, tal variação se torna ainda menos relevante para os resultados finais.

#### 8.3.2 Dados de campo

Uma outra possibilidade seria um problema com os dados obtidos em campo. Mesmo assumindo que o equipamento GPS esteja funcionando adequadamente, este ainda pode apresentar erros de precisão, prejudicando um pouco até a obtenção correta dos movimentos relativos da plataforma. De forma a amenizar isso, períodos que careciam de informações foram descartados e todos os dados utilizados foram tratados para remover pequenos trechos sem informação e movimentos incompatíveis. Portanto, o problema pode ser justamente uma incompatibilidade entre os dados

utilizados em projeto e os dados reais obtidos em campo, como já fora apontado por Leal [7]. Ao não conseguir recriar os esforços ambientais de forma fidedigna no modelo computacional, o projeto pode ter subestimado o dano ao qual as linhas estariam submetidas.

## 9 CONCLUSÃO

O objetivo inicial do trabalho era estudar os movimentos de ultrabaixa frequência, avaliando possíveis danos que estes causariam nas linhas de ancoragem. O trabalho foi útil não só nesse sentido, mas também como forma de elaborar possíveis análises mais longas a partir de dados de campo. A primeira etapa foi justamente focada na análise dos dados de campo, sua conversão para as coordenadas da embarcação e na confiabilidade dos dados, desconsiderando conjuntos com poucas informações, preenchendo trechos sem dados e eliminando movimentos fora da realidade. Junto a isso, se buscou isolar os movimentos de ultra-baixa frequência, bem como viabilizar análises mais longas.

Isso foi possível pela adoção de uma média móvel como filtro de movimentos e de um intervalo de gravação de pontos para permitir maiores séries de movimento com menos pontos. Ao se adotar uma média grande, são obtidas oscilações mais lentas, o que contribui para que a eliminação de pontos não retire informações. Se o movimento não varia apenas e forma lenta e gradual, não são necessários pontos a todo instante.

Assim, se, por um lado, a média móvel amortiza os movimentos, por outro, a eliminação de pontos pode vir a ser útil para desconsiderar oscilações pequenas demais, pois seria possível analisar movimentos mais longos da plataforma de forma mais simplificada, porém sem perder qualidade, já que variações de tração muito pequenas não impactam de forma significativa no dano. Inclusive, o procedimento de filtragem de dados e eliminação de pontos pode se mostrar como uma forma de analisar movimentos extremos, isto é, aqueles que levam as linhas de ancoragem a atingirem valores de tração mais significativos em relação à carga de ruptura, como em um caso de ruptura de uma das linhas, por exemplo.

Sobre os movimentos em si, ao se observar os dados de campo foi possível ver que a plataforma apresenta, sim, grandes deslocamentos com frequência bem baixa. Porém, como visto, tais movimentos, embora não tenham influenciado a fadiga, impactam a análise estrutural, que avalia os valores máximos obtidos. Ainda sobre as oscilações de frequência muito baixa, apesar de serem observados fenômenos oceanográficos de interação com a corrente do Brasil, não se pode atribuir tais movimentos unicamente a essas cargas ambientais. Nesse aspecto, cabe reforçar a ideia

de monitoramento extensivo e contínuo dos oceanos, o que pode ser feito por satélites e boias.

Isso é importante não só para a obtenção de dados confiáveis, mas também para melhorar a compreensão acerca de fenômenos ambientais e do impacto de mudanças climáticas. Estudos oceanográficos mais recentes apontam que ainda há muito a ser estudado sobretudo no que diz respeito à circulação de água nos oceanos. Algumas regiões de importante circulação de corrente estão sendo exploradas mais a fundo para melhor compreensão desse mecanismo ou até mesmo revistos devido a novos dados [38]. Além disso, eventos esporádicos [8] podem fazer com que forças de corrente atuem em diferentes direções em linhas e risers, com consequências ainda incertas.

Mais do que isso, análises históricas das condições ambientais apontam para uma piora delas, no sentido de que estão se tornando mais severas. Isso é indicado pelo aumento da energia acumulada de ondas, que pode ser relacionado ao aumento da temperatura na superfície do mar e, conseqüentemente, à maior velocidade dos ventos [39], o que também gera maiores alturas de onda. Esse aspecto é relevante não só operações afastadas da costa, como também preocupa regiões costeiras, mais suscetíveis aos efeitos de tempestades.

Também foi abordado o cálculo de fadiga para linhas de ancoragem, comparando os danos gerados pelos movimentos de ultra-baixa frequência com o dano total. Sobre o impacto desses movimentos, vê-se que, embora haja deslocamentos realizados muito lentamente pela plataforma ao longo de sua vida, estes não resultam necessariamente em variações muito maiores de posição e tração. Além disso, movimentações realmente grandes não são muito recorrentes, não causando impacto significativo na fadiga.

Uma análise de grande duração para os dados reais, portanto, poderia ser útil a fim de notar cargas mínimas ou extremas nas linhas, verificando se estas respeitam um valor máximo ou mínimo (como no caso de segmentos feitos de poliéster). Seria possível, por exemplo, eliminar a primeira ordem de movimentos através de um filtro e observar os deslocamentos restantes mais extremos. Nesse sentido, seria importante garantir o armazenamento de dados de campo com boa qualidade, permitindo futuras

análises comparativas entre projeto e situação real de modo a melhorar os modelos de projeto.

Em relação ao método utilizado para se fazer as estimativas do dano, o método rainflow se mostrou de fácil entendimento, simples implementação e adaptação à situação. Isso colaborou para agilizar o cálculo de fadiga.

Além disso, o estudo constatou que danos maiores do que os esperados podem ocorrer para o cálculo da vida à fadiga ao se utilizar os dados de campo. Isso corrobora o que foi encontrado por Leal [7] e indica que há uma falta de compatibilidade entre os dados utilizados em projeto e as condições ambientais reais às quais a plataforma é submetida. Entretanto, cabem algumas observações e críticas sobre esse resultado, que levanta algumas discussões, mas que não pode ser considerado conclusivo.

Primeiramente, é muito difícil afirmar que isso realmente ocorre e mais ainda que ofereça um grande risco para plataformas instaladas hoje, pois as linhas, além de serem inspecionadas com regularidade, também são substituídas segundo um cronograma, garantindo a segurança. E, sobre os resultados encontrados, a própria metodologia pode ser aperfeiçoada e realizada em maiores detalhes, observando mais de perto as propriedades e o dano de cada elemento da linha, checando seus fatores de segurança, separando as faixas de tração em grupos mais restritos e até mesmo sendo feita uma revisão mais cuidadosa das curvas T-N adequadas. Outro ponto é que o trabalho abordou apenas uma plataforma em específico e ainda o fez para os dados de apenas um ano que, além disso, não se encontravam completos. A eliminação de dois meses próximos ao verão (outubro e novembro), com águas mais calmas, pode ter levado a resultados para o ano maiores do que a realidade e isso foi extrapolado, exacerbando o erro. Além disso, é importante frisar que os próprios dados de GPS podem apresentar pequenos erros, o que impacta diretamente no dano, o que, depois da extrapolação, pode resultar em uma parcela importante.

O estudo também mostrou que um dano maior pode ocorrer em outra linha que não a mais tracionada. Isso leva a crer que, quanto ao procedimento de análise de dano por fadiga, seria interessante dar mais atenção à análise da linha cuja variação de tração é maior. Por outro lado, pode-se argumentar que, em uma fase inicial do projeto e até

mesmo em operação, não é simples identificar qual linha é essa. Portanto, tal análise deve ser feita para todas as linhas, não só para uma em específico.

Ainda em relação a falhas não previstas em linhas de ancoragem, podem existir outros motivos, passíveis de mais estudos, como: erros de fabricação, corrosão ou fadiga multiaxial. Este último, inclusive, considera não só os esforços gerados por flexão no plano da linha, mas também os fora dele. Mais do que isso, pode haver uma confluência desses fatores em uma das linhas, fazendo com que esta apresente um dano maior do que o previsto e levando a um rompimento antes do esperado.

Em relação a análises com dados de campo uma análise ainda mais completa seria recriar os movimentos obtidos por dados reais bem como aplicar as cargas ambientais previstas para a localização da plataforma. Isso exige cautela, pois são precisos dados ambientais adequados para cada momento do histórico analisado. Então, o aconselhável é se partir de algo mais simples e, aos poucos, caminhar para um modelo mais complexo.

De forma mais simplificada, uma análise interessante seria executar análises com movimento prescrito e com diferentes correntes atuando para cada uma, mesmo a corrente sendo constante ou até mesmo um perfil simples. Disso poderia se observar o efeito da corrente no dano à fadiga e até mesmo se partir para perfis mais complicados de corrente ou, até mesmo, variações na velocidade dessa. Em seguida, a adição de ondas regulares e de um modelo simplificado de vento adicionariam mais cargas ao modelo. Por fim, análises com mar irregular e considerando a influência do vento na baixa frequência representariam, talvez, o cenário mais complexo possível. É um longo caminho a ser seguido em pesquisas.

Em suma, o estudo mostrou:

- Há movimentos cíclicos de grande deslocamento e longa duração da plataforma, mas não há a identificação de um fator ambiental único que seja a causa desses.

- Estes movimentos, mesmo sendo consideravelmente maiores do que os captados usualmente em uma janela de 10800s, não são frequentes o suficiente tão pouco geram variações de tração significativamente maiores para afetar a vida à fadiga,

ao menos para a plataforma semi-taut analisada (impacto pode ser maior em plataformas com ancoragem de maior pré-tração ou em águas mais rasas, pois sofrem maior influência de efeitos de segunda ordem).

- Movimentos de ultrabaixa frequência não apresentam impacto significativo no dano à fadiga, representando menos de 0.15% do dano total no caso analisado.

- O método de contagem rainflow é prático e útil para o cálculo do dano por fadiga, sendo de fácil implementação.

- A linha que apresenta maior dano é a linha com a maior variação de tração.

- As simulações realizadas com base em dados de campo indicam que pode haver danos em linhas maiores do que os esperados em projeto. Tal resultado, mesmo inconclusivo e passível de críticas e revisões, não pode passar despercebido e levanta suspeitas acerca da compatibilidade entre os dados utilizados em projeto e os dados reais, o que, juntamente com o estudo de fenômenos ambientais, reforça a ideia de que se deve investir em tecnologia para monitoração de condições meteoceanográficas e em análises mais complexas envolvendo dados de campo, tanto de posição quanto ambientais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] API RP 2SK, *Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures*, 3rd ed., American Petroleum Institute, 2005.
- [2] DU, J., WANG, S., CHANG, A., LI, H., “An Investigation on Low Frequency Fatigue Damage of Mooring Lines Applied in a Semi-Submersible Platform”, *J. Ocean Univ. China (Oceanic and Coastal Sea Research)*, 2016.
- [3] EVANGELISTA, L. T., *Avaliação de Oscilações de Ultrabaixa Frequência de Unidades Ancoradas no Consumo de Vida a Fadiga de Linhas de Ancoragem*. Projeto Final de Graduação, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2017.
- [4] XUE, X., CHEN, N., WU, Y., XIONG, Y., GUO, Y., “Mooring system fatigue analysis for a semi-submersible”. *Ocean Engineering*, v. 156, 550–563, 2018
- [5] HUANG, W., LIU, H., SHAN, G., HU, C., “Fatigue Analysis of the Taut-Wire Mooring System Applied for Deep Waters”. *China Ocean Eng.*, v. 25, No. 3, pp. 413 – 426, 2011.
- [6] SANTOS, M. B., *Análise do Consumo da Vida à Fadiga do Sistema de Ancoragem de uma Unidade de Produção de Petróleo*. Projeto Final de Graduação, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2016.
- [7] LEAL, G. S., *Avaliação de Metodologia de Projeto de Sistemas de Ancoragem de Plataformas Flutuantes em relação à fadiga*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2016.
- [8] GUERRA, L. A. A., *Vórtices das Agulhas colidem com a Corrente do Brasil*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- [9] KOCHER, R. M., *Estudo de Diferentes Concepções de Sistemas de Ancoragem em Lâmina D’água Profunda*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2016.
- [10] BAHIANSE, R. A., *Implementação e Avaliação de uma Metodologia Fortemente Acoplada para Análises de Sistemas Flutuantes Offshore*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

- [11] GIRÓN, A. R. C., *Aplicação de Metodologia de Projeto Integrado de Sistemas de Ancoragem e Risers na Exploração Offshore*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.
- [12] BATALHA, A. F., *Análise de Fadiga de Estruturas Offshore Tipo Topside*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.
- [13] CHAKRABARTI, S. K., *Handbook of Offshore Engineering*, Elsevier Ltd, v. 2, 2005.
- [14] ANDRIONI, M., LIMA, J., GUERRA, L.A., RIBEIRO, E., MANOEL PAIVA NUNES, L., BELO, W., REGO, V., MANOEL DE OLIVEIRA JR, S., "Ocean Eddies' Influence on Lula Field, Santos Basin, Brazil". *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*. 5. 10.1115/OMAE2012-83480, 2012.
- [15] VIANNA, M. L., DE MENEZES, V. V., *Shelf edge circulation off the Campos basin from altimetry and current meter moorings*. 2004.
- [16] MILL, G. N., DA COSTA, V. S., LIMA, N. D., GABIOUX, M., GUERRA, L. A. A., PAIVA, A. M., "Northward migration of Cape São Tomé rings, Brazil". *Continental Shelf Research*, v. 106, p. 27-37, 2015.
- [17] PARK, J., PARK, K., ULLMAN, D.S., CORNILLON, P.C., PARK, Y., "Observation of diurnal variations in mesoscale eddy sea-surface currents using GOCI data", *Remote Sensing Letters*, 2016.
- [18] ELLWANGER, G. B., LIMA, A. L., *Tópicos Básicos de Hidrodinâmica Aplicados a Estruturas Offshore*. Notas de Aula. Programa de Engenharia Civil - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. Brasil, 2007.
- [19] ROSSI, R. R., *Cabos de Poliéster para Ancoragem de Plataformas Oceânicas em Águas Ultraprofundas*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
- [20] SECKLER, C. S., *Metodologia Baseada em Inspeção e Retroanálise para Verificação e Ajustes de Sistemas de Ancoragem de Unidades Flutuantes de Produção Offshore*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

- [21] LACERDA, T. A. G., *Análise de Sistemas de Ancoragem de Plataformas Flutuantes*, Projeto Final de Graduação, Escola Politécnica, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- [22] CARBONO, A. J. J., *Otimização da Disposição de Linhas de Ancoragem Utilizando Algoritmos Genéticos*, Dissertação de Mestrado, PUC, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- [23] ALBRECHT, C. H., *Algoritmos Evolutivos aplicados à Síntese e Otimização de Sistemas de Ancoragem*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- [24] KAWASAKI, P. Y., *Análise de Linhas de Ancoragem de Plataformas Oceânicas Considerando Diversos Tramos e o Trecho Enterrado da Linha*. Projeto Final de Graduação, Escola Politécnica, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.
- [25] COSTA, R. G. B. *Análise Paramétrica das Condições de Ancoragem de Plataformas Offshore Utilizando Estacas Torpedo a Partir de Modelos em Elementos Finitos*. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- [26] DEGENKAMP, G., RUINEN, R., "Installation of Vertical Loaded Anchors Using a Subsea Tensioning Device in Ultra-Deepwaters in the Gulf of Mexico". *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*, Paper 13274, Houston, Texas, 30 April - 3 May, 2001.
- [27] KUNITAKI, D. M. K. N., *Tratamento de Incertezas no Comportamento Dinâmico de Estacas Torpedo para Ancoragem de Sistemas Flutuantes na Exploração de Petróleo Offshore*. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.
- [28] LIMA, A. D. *Avaliação de Formulações de Análise e Metodologias de Projeto de Sistemas de Ancoragem de Plataformas Offshore Considerando Aspectos do Projeto de Risers*. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- [29] CORRÊA, F. N. *Aplicação de Metodologias Híbridas em Estudos Paramétricos sobre o Comportamento de Sistemas Offshore*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.
- [30] DE BARROS, M. R. C., *Análise de Fadiga em Estruturas Offshore Tipo Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência (FPSO)*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

- [31] BOARDMAN, B., "Fatigue Resistance of Steels", In: ASM handbook, v. 1, *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, ASM Handbook Committee, p. 673-688, 1990.
- [32] PFEIL, W., PFEIL, M., *Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático*, 8a ed., LTC, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.
- [33] RUBI, V. A. S., *Comparação entre métodos de cálculo da vida útil à fadiga de linhas de ancoragem considerando espectros bi-modais de tração*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2013
- [34] RYCHLIK, I., "A new definition of the rainflow cycle counting method". *International Journal of Fatigue*, v. 9, Issue 2, p. 119-121, 1987.
- [35] THIES, P. R., JOHANNING, L., HARNOIS, V., SMITH, H. C. M., PARISH, D. N., "Mooring line fatigue damage evaluation for floating marine energy converters: Field measurements and prediction". *Renewable Energy*, v. 63, p.133-144, 2014.
- [36] ASTM, *Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis*, ASTM International, 2017.
- [37] Jacob, B.P., Bahiense, R.A., Correa, F.N., Jacovazzo, B.M., "Parallel Implementations of Coupled Formulations for the Analysis of Floating Production Systems, Part I: Coupling Formulations". *Ocean Engineering*, v. 55, pp. 206-218, 2012.
- [38] M. S. Lozier, F. Li, S. Bacon, F. Bahr, A. S. Bower, S. A. Cunningham, M. F. de Jong, L. de Steur, B. deYoung, J. Fischer, S. F. Gary, B. J. W. Greenan, N. P. Holliday, A. Houk, L. Houpert, M. E. Inall, W. E. Johns, H. L. Johnson, C. Johnson, J. Karstensen, G. Koman, I. A. Le Bras, X. Lin, N. Mackay, D. P. Marshall, H. Mercier, M. Oltmanns, R. S. Pickart, A. L. Ramsey, D. Rayner, F. Straneo, V. Thierry, D. J. Torres, R. G. Williams, C. Wilson, J. Yang, I. Yashayaev, J. Zhao., "A sea change in our view of overturning in the subpolar North Atlantic", *Science*, Vol. 363, Issue 6426, pp. 516-521, 2019.
- [39] Reguero, Borja G.; Losada, Iñigo J.; Méndez, Fernando J., "A recent increase in global wave power as a consequence of oceanic warming", *Nature communications*, Vol.10 (1), pp.205, 2019.