COPPE UFRJ
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

ELABORAÇÃO DE DIAGRAMAS DE LIMITE OPERACIONAL PARA PROCEDIMENTOS DE IÇAMENTO OFFSHORE

Leonardo Roncetti da Silva

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

Orientadores: Breno Pinheiro Jacob
Fabrício Nogueira Corrêa

Rio de Janeiro
Junho de 2014

ELABORAÇÃO DE DIAGRAMAS DE LIMITE OPERACIONAL PARA PROCEDIMENTOS DE IÇAMENTO OFFSHORE

Leonardo Roncetti da Silva

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 Correa, D.Sc.

Prof. Carl Horst Albrecht, D.Sc.

Prof. Walnório Graça Ferreira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2014

Roncetti, Leonardo

Elaboração de diagramas de limite operacional para procedimentos de içamento offshore / Leonardo Roncetti da Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

XVII, 160 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Breno Pinheiro Jacob

Fabrício Nogueira Corrêa

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 117-123.

1. Análise dinâmica. 2. Içamento de Pessoas. 3. Guindastes *Offshore*. I. Jacob, Breno Pinheiro *et al*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Aos meus pais e Adagilzia

AGRADECIMENTOS

Ao Deus da Bíblia, Jeová, pelo sustento e providência em absolutamente tudo neste empreendimento.

À minha futura esposa, Adagilzia, pela paciência e orações.

Aos professores Breno Jacob, Fabrício Corrêa e Carl Albrecht pela valiosa orientação e incentivo.

Ao professor Walnório, por transmitir de maneira empolgante seu conhecimento sobre dinâmica das estruturas.

Aos meus pais que também me sustentaram muitíssimo neste período.

Aos meus funcionários, que se esforçaram nas minhas muitas ausências.

A Jeová pertence a salvação!

Profeta Jonas em algum lugar offshore.

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

ELABORAÇÃO DE DIAGRAMAS DE LIMITE OPERACIONAL PARA PROCEDIMENTOS DE IÇAMENTO OFFSHORE

Leonardo Roncetti da Silva

Junho/2014

Orientadores: Breno Pinheiro Jacob
Fabrício Nogueira Corrêa

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho visa desenvolver uma metodologia para elaboração de diagramas de limites operacionais de içamento em função da altura significativa de onda (Hs) e do período de pico (Tp), via análise dinâmica no domínio do tempo, para içamento de pessoas e cargas rotineiras utilizando um guindaste instalado em uma unidade flutuante tipo *floating production, storage and offloading* (FPSO). O içamento de pessoas com guindaste para transbordo entre a unidade flutuante e o barco de apoio é uma opção muito utilizada nas operações *offshore*, tanto no Brasil como no exterior, sendo em muitos casos, a única alternativa além do transbordo aéreo. Devido às recentes ocorrências de acidentes fatais nestas operações em plataformas no Brasil, torna-se fundamental a pesquisa sobre o assunto, contribuindo para o aumento da segurança das operações de içamento. Os estados de mar foram escolhidos abrangendo alturas significativas de ondas e períodos de pico limites para operações de içamento. A aplicação da metodologia utilizou o *software* SITUA / Prosim para obtenção das respostas dinâmicas da cesta de içamento com pessoas em uma unidade FPSO típica. Através de programa desenvolvido pelo autor, implementou-se a geração automática dos diagramas em função dos limites operacionais. Conclui-se que, com a utilização da metodologia, pode-se alcançar maior eficácia no projeto e execução do içamento, aumentando a segurança e aumentando a janela meteorológica disponível.

Palavras-chave: Içamento de pessoas. Guindastes *offshore*. Análise dinâmica.

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

DEVEPLOPMENT OF OPERATIONAL LIMIT DIAGRAMS FOR OFFSHORE LIFTING PROCEDURES

Leonardo Roncetti da Silva

June/2014

Advisors: Breno Pinheiro Jacob
Fabrício Nogueira Corrêa

Department: Civil Engineering

This paper aims to develop a method to design offshore crane operational limit diagrams for lifting of personnel and usual loads, in function of significant wave height and wave peak period, using time domain dynamic analysis, for a crane installed on a FPSO unit. The lifting of personnel with crane to transfer between a floating unit and a support vessel is a very used option in offshore operations, both in Brazil and abroad, and this is in many cases, the only alternative beyond the helicopter. Due to recent fatal accidents with this operations in platforms in Brasil, it is essential the study about this subject, contributing to the increase of safety in lifting operations. The sea states were chosen covering usual significant wave heights and peak periods limits for lifting operations. The methodology used the SITUA / Prosim software to obtain the dynamic responses of the personnel transfer basket lifting on a typical FPSO. Through program developed by the author, it was implemented the automatic generation of diagrams as a function of operational limits. It is concluded that using this methodology, it is possible to achieve greater efficiency in the design and execution of personnel and load lifting, increasing safety and the weather window available.

Key words: Lifting of people. *Offshore Crane*. Dynamic Analysis.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 CONTEXTO 1
1.2 OBJETIVOS E MOTIVAÇÕES 4
1.3 O SOFTWARE SITUA/Prosim 6
1.4 PANORAMA ATUAL DA PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS NO BRASIL 6
1.5 UNIDADES FLUTUANTES TIPO FPSO 7
1.5.1 Aspectos gerais 7
1.5.2 Sistemas de ancoragem e posicionamento 10
1.6 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO 14
2 TRANSBORDO DE PESSOAS EM PLATAFORMAS *OFFSHORE* 16
2.1 INTRODUÇÃO 16
2.2 MEIOS DE TRANSBORDO 17
2.2.1 Helicóptero 17
2.2.2 Dispositivos *surfer* 18
2.2.3 Cesta de transporte de pessoal 20
2.2.4 Passadiço e escada de portaló 25
2.2.5 Outros meios de transbordo 26
2.3 NORMAS, PROCEDIMENTOS E RECOMENDAÇÕES 29
2.3.1 EN 13852-1 29
2.3.2 API *Specification* 2C 30
2.3.3 ISO 19901-6 32
2.3.4 NORSOK Standard R-002 e R-003 34
2.3.5 GL Rules for classification and construction 35
2.3.6 NBR 10876 36
2.3.7 NR-12 36
2.3.8 NR-38 36
3 CARACTERIZAÇÃO DO IÇAMENTO EM FPSO 37
3.1 CARACTERÍSTICAS QUE INFLUENCIAM O IÇAMENTO 37

3.2 GUINDASTES *OFFSHORE* 38
3.2.1 Tipos de guindastes 39
3.3 OPERAÇÃO DO GUINDASTE EM FPSO 42
3.3.1 Execução do içamento 45
4 CARREGAMENTOS AMBIENTAIS 48
4.1 INTRODUÇÃO 48
4.2 ONDAS 49
4.2.1 Características e parâmetros 51
4.2.2 Espectros 55
4.2.3 Distribuição probabilística 58
4.2.1 Simulação numérica de séries temporais 62
4.2.2 Função de transferência de movimento (RAO) 63
5 ANÁLISE DINÂMICA 65
5.1 ANÁLISE MODAL DO CABO DO GUINDASTE 66
5.2 DINÂMICA DO CORPO HUMANO 70
6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 72
6.1 DIAGRAMA OPERACIONAL LIMITE DE GUINDASTE OFFSHORE 72
6.2 ELABORAÇÃO DO DOLGO 73
7 ESTUDO DE CASO 78
7.1 PARÂMETROS DA UNIDADE FLUTUANTE 79
7.2 PARÂMETROS DO GUINDASTE 80
7.2.1.1 Características dinâmicas do guindaste 84
7.3 PARÂMETROS DA CARGA IÇADA 87
7.4 CARREGAMENTO AMBIENTAL 89
7.5 SIMULAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO 89
7.6 LIMITAÇÕES OPERACIONAIS CONSIDERADAS 90
8 RESULTADOS 93
8.1 MOVIMENTOS DO FPSO 93

8.2 TRAJETÓRIA DA CESTA DE TRANSPORTE 96
8.3 VELOCIDADE DA CESTA DE TRANSPORTE 98
8.4 FORÇA NO CABO DO GUINDASTE 101
8.5 DIAGRAMAS DE CONTORNO LIMITE 105
8.6 DIAGRAMAS OPERACIONAIS LIMITE 107
8.7 APLICAÇÕES PRÁTICAS 111
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS ... 114
9.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS 114
9.2 TRABALHOS FUTUROS 115
REFERÊNCIAS 117
GLOSSÁRIO 124
APÊNDICE A – RAO DO FPSO EM ESTUDO 128
APÊNDICE B - CASOS DE CARGA CONSIDERADOS 137
APÊNDICE C - RESULTADO DOS DELOCAMENTOS DO FPSO 138
APÊNDICE D - RESULTADO DA VELOCIDADE MÁXIMA DA CESTA 141
APÊNDICE E - ESTATÍSTICA DE VALORES EXTREMOS 144
APÊNDICE F - CÓDIGO FONTE DO PÓS-PROCESSADOR 146

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cesta tipo *Billy Pugh* utilizada para içamento de pessoas em plataformas *offshore*. . 1

Figura 2. Guindaste em ressonância durante transbordo de tripulação em plataforma FPSO. .. 3

Figura 3. Plataforma FPSO Cidade Angra dos Reis MV22. 9

Figura 4. Indicação dos movimentos de um FPSO nos seis graus de liberdade..... 10

Figura 5. Esquema da ancoragem convencional em catenária. 11

Figura 6. Esquema da ancoragem taut-leg. 12

Figura 7. Detalhe da proa de FPSO com sistema de ancoragem SPM com torreta externa. ... 13

Figura 8. FPSO P-50 da PETRORAS, com sistema de ancoragem SMS, para o campo de Albacora Leste. 14

Figura 9. Pouso forçado de aeronave em heliponto de plataforma offshore no Brasil. 17

Figura 10. Autor preparando-se para desembarque em plataforma fixa offshore. 19

Figura 11. Lancha tipo *surfer* atracada para desembarque de pessoal. 20

Figura 12. Principais tipos de acidentes na operação de transbordo de pessoal com cesta 22

Figura 13. Principais causas de acidentes na operação de transbordo de pessoal com cesta... 22

Figura 14. Cesta de transporte de pessoal tipo *Billy Pugh*. 23

Figura 15. Cesta de transporte de pessoal tipo *Esvagt*. 24

Figura 16. Cesta de tranporte tipo *Frog*. 24

Figura 17. Componentes da cesta de transporte de pessoal 25

Figura 18. Transbordo de pessoas entre plataformas por passadiços com compensadores hidráulicos de movimento. 27

Figura 19. Barco de resgate rápido sendo içado após operação. 28

Figura 20. Uso da escada de quebra-peito para transbordo em navio em movimento. 28

Figura 21. Uso da técnica “pulo de corda” para transbordo em plataforma no nordeste do Brasil. 29

Figura 22. Velocidade de içamento com uma perna de cabo 33

Figura 23. FPSO OSX-1. Em primeiro plano dois guindastes tipo *knuckle boom* de grande porte e altura 38

Figura 24. Principais dimensões do guindaste com lança tipo caixa 40

Figura 25. Principais partes de um guindaste com lança articulada 41

Figura 26. Principais partes de um guindaste treliçado 42

Figura 27. Projeto de içamento *offshore* mostrando longo comprimento de cabo necessário para retirada de carga do barco de apoio 43

Figura 28. Curva de área permitida exposta ao vento em função da carga bruta tabelada. 45

Figura 29. Operação de içamento offshore sendo realizada com guindaste com lança tipo caixa, retirando carga do barco de apoio 46

Figura 30. Sequência correta da retirada da carga do barco de apoio..... 47

Figura 31. Sequência correta da colocação da carga do barco de apoio..... 47

Figura 32. Ângulos de incidência das ações ambientais 49

Figura 33. Somatório de várias ondas simples resultando no mar irregular. 50

Figura 34. Características de uma onda harmônica. 51

Figura 35. Representação do estado de mar no domínio do tempo e frequência 55

Figura 36. Exemplo do espectro de onda de JONSWAP ajustado para Bacia de Campos, com Tp = 12 s..... 57

Figura 37. Exemplo do espectro de onda de JONSWAP ajustado para Bacia de Campos, com Hs = 5,0 m. 57

Figura 38. Diagrama de dispersão para a Bacia de Campos e Santos 61

Figura 39. Períodos naturais do cabo do guindaste com massa acoplada, para vibração de pêndulo. 68

Figura 40. Período natural do cabo do guindaste para vibração axial. 69

Figura 41. Sensibilidade a períodos de vibração de várias partes do corpo humano. 70

Figura 42. Tolerância humana às velocidades de impacto..... 71

Figura 43 - Fluxograma para elaboração do diagrama operacional limite de guindaste *offshore*..... 74

Figura 44 – Exemplo de área e volume de segurança aplicado à construção naval e offshore. 75

Figura 45 – Exemplo de diagrama de contorno limite de velocidade máxima extrema da cesta de transporte durante o içamento. 76

Figura 46. Exemplo de diagrama operacional limite de guindaste offshore com limite adicional de segurança (amarelo) e limite de emergência (laranja)..... 77

Figura 47 - Fluxograma para tomada de decisão pela execução da operação de içamento. 77
Figura 48. Esquema de um guindaste em uma unidade FPSO 79
Figura 49. Vista frontal do içamento. 80
Figura 50.Sistema de referência utilizado pelo SITUA/Prosim. 80
Figura 51. Modelo do içamento no SITUA/Prosim. 83
Figura 52. Modelo dos elementos finitos das linhas simulando o cabo do guindaste. 83
Figura 53. Modos de vibração para ângulo da lança de 45º sobrepostos com eixo indeformado. 85
Figura 54. Casos de carga considerados para a simulação dinâmica. 90
Figura 55. Vetores de deslocamento, velocidade e força no cabo para içamento da cesta de transporte. 92
Figura 56. Séries temporais dos movimentos de *heave, roll e pitch* do FPSO para o caso de carga Onda 40 e Onda 72. 94
Figura 57. Diagrama com contorno limite do movimento máximo extremo de *heave*. 95
Figura 58. Diagrama com contorno limite do movimento máximo extremo de *roll*. 95
Figura 59. Diagrama com contorno limite do movimento máximo extremo de *pitch*. 96
Figura 60. Trajetória do fundo da cesta para o caso de carga Onda 50. 97
Figura 61. Trajetória do fundo da cesta para o caso de carga Onda 54. 97
Figura 62. Trajetória do fundo da cesta para o caso de carga Onda 38. 97
Figura 63. Gráfico de contorno da velocidade resultante máxima extrema do fundo da cesta em função de Hs, Tp e do comprimento do cabo para içamento de 1 pessoa. 99
Figura 64. Diagrama com contorno limite da velocidade máxima extrema do fundo da cesta. 100
Figura 65. Trajetória do fundo da cesta para os casos de carga Onda 46 a Onda 48. 101
Figura 66. Gráfico de contorno da força máxima extrema do cabo em função de Hs, Tp e do comprimento do cabo para içamento de 1 pessoa. 102
Figura 67. Série temporal da força no cabo em função para o caso de carga Onda 36 e comprimentos de 32,5 e 35 metros. 103
Figura 68. Diagrama com contorno limite da força máxima extrema no cabo. 103

Figura 69. Diagrama com contorno limite do fator de amplificação dinâmica máximo extremo. 104

Figura 70. Diagrama operacional intermediário com contornos limites para operação nominal. 105

Figura 71. Diagrama operacional intermediário com contornos limites para operação de emergência. 106

Figura 72. Diagrama operacional intermediário com contornos limites para operação segura ou de segurança. 107

Figura 73. Diagrama operacional limite de guindaste offshore, incluindo limitação de Hs. . 108

Figura 74. Diagrama operacional limite de guindaste offshore, sem limitação de Hs. 109

Figura 75. Diagrama operacional intermediário com contornos limites para operação nominal de içamento de *container offshore*, com limitação de Hs. 110

Figura 76. Diagrama operacional limite de guindaste offshore, sem limitação de Hs, para içamento de *container offshore*. 110

Figura 77. Diagrama operacional limite de guindaste offshore, com limitação de Hs e com áreas operacionais das aplicações propostas em destaque. 111

Figura 78. Diagrama operacional limite de guindaste offshore, sem limitação de Hs e com áreas operacionais das aplicações propostas em destaque. 112

Figura 79. RAO de *surge* em função da frequência. 128

Figura 80. RAO de *sway* em função da frequência. 129

Figura 81. RAO de *heave* em função da frequência. 129

Figura 82. RAO de *roll* em função da frequência. 130

Figura 83. RAO de *pitch* em função da frequência. 130

Figura 84. RAO de *yaw* em função da frequência. 131

Figura 85. RAO de *surge* em função do período. 131

Figura 86. RAO de *sway* em função do período. 132

Figura 87. RAO de *heave* em função do período. 132

Figura 88. RAO de *roll* em função do período. 133

Figura 89. RAO de *surge* em função do período. 133

Figura 90. RAO de *yaw* em função do período. 134

Figura 91. RAO de *heave* em função do período para aproamento de 0°, 15° e 30°. 134

Figura 92. RAO de *roll* em função do período para aproamento de 0°, 15° e 30°..... 135

Figura 93. RAO de *pitch* em função do período para aproamento de 0°, 15° e 30°..... 135

Figura 94. Gráfico com a relação entre período de pico (Tp) e período de cruzamento zero (Tz)..... 136

Figura 95. Exemplo de diagrama de contorno de velocidade máxima do fundo da cesta..... 145

Figura 96. Exemplo de diagrama de contorno de velocidade máxima extrema do fundo da cesta..... 145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Períodos naturais dos cabos para o primeiro modo de vibração. 67

Tabela 2. Características da unidade flutuante tipo FPSO utilizada na análise..... 79

Tabela 3. Características físicas e geométricas do cabo de aço do guindaste. 81

Tabela 4. Comprimento das linhas utilizadas para simular o cabo do guindaste. 82

Tabela 5. Características dos guindastes analisados. 84

Tabela 6. Modos de vibração e períodos naturais para o guindaste de Langen (2003). 86

Tabela 7. Modos de vibração e períodos naturais para o guindaste deste trabalho. 87

Tabela 8. Características da carga içada. 88

Tabela 9. Limites utilizados para elaboração do diagrama operacional limite. 91

Tabela 10. Casos de carga considerados na análise. 137

Tabela 11. Deslocamentos máximos do FPSO para içamento de 1 pessoa. 138

Tabela 12. Velocidade resultante máxima extrema do fundo da cesta. 141

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

O içamento de pessoas com guindaste para transbordo entre a unidade flutuante e o barco de apoio (*supply boat*) ou outra estrutura, faz parte das operações *offshore*, sendo muito utilizadas tanto no Brasil como no exterior (IMCA, 2010).

Segundo a *International Marine Contractors Association (IMCA)* , as operações de transbordo podem ter finalidades diversas como movimentação do pessoal para troca de turno, realização de trabalhos, salvamento, entre outras, movimentando o pessoal entre plataformas, estruturas *offshore*, barcaça, embarcações de transporte de pessoal e cais, sendo, em muitos casos, a única alternativa além do transbordo aéreo.

Um dos dispositivos mais utilizados é a cesta de transporte de pessoal tipo *Billy Pugh*, fixada ao moitão do guindaste, como indicado na Figura 1, que consiste em uma estrutura flexível de cabos sintéticos, acessórios de içamento e uma plataforma com função de piso e flutuador. O passageiro prende-se à cesta através dos próprios braços e mãos, geralmente sem nenhum outro dispositivo de fixação, sendo transferido do ponto de embarque até o destino que pode ser uma plataforma, barco de apoio, barcaça ou outra estrutura.

Figura 1. Cesta tipo *Billy Pugh* utilizada para içamento de pessoas em plataformas *offshore*.

As operações de içamento em plataformas flutuantes são muito mais complexas que aquelas realizadas em plataformas fixas, principalmente pela influência combinada dos vários movimentos da embarcação de apoio, da unidade flutuante e de seu guindaste, notadamente o movimento relativo entre a plataforma e o barco de apoio.

Tratando-se do içamento de pessoas em unidades flutuantes, o risco cresce, sendo consideradas operações de alto risco (STANDARDS NORWAY, 2004), devendo ser elaborado um planejamento minucioso e supervisão rigorosa da operação a realizar (OGP, 2006), sob pena de ocorrência de situações perigosas que podem gerar acidentes.

Alguns fatores aumentam a complexidade e risco dessas operações, tais como: a altura cada vez maior de instalação dos guindastes sobre as plataformas, aumento do comprimento da lança dos guindastes e o aumento da frequência das operações, que muitas vezes devem ser feitas em condições meteorológicas e oceânicas adversas.

Mesmo em condições ambientais consideradas satisfatórias podem ocorrer situações de perigo, pois outros fatores influenciam na operação, tais como, o estado de conservação do guindaste e acessórios de içamento e a capacitação da tripulação para realizar a operação. Destaca-se o operador do guindaste, que pode influenciar sobremodo nos movimentos do guindaste e da carga, atenuando ou amplificando os fenômenos dinâmicos durante o içamento.

A Figura 2 mostra o exemplo de uma cesta de transporte de pessoal em ressonância, içada por um guindaste de um FPSO em condição ambiental favorável, transportando a tripulação da plataforma para o barco de apoio. No início do içamento o comprimento do cabo era de aproximadamente 9,5 metros e o ângulo deste com a vertical era de aproximadamente 60 graus, o que é totalmente inadmissível, podendo ter levado à queda dos passageiros. Alguns segundos depois, o comprimento do cabo era de 18 metros e o ângulo com a vertical de 30 graus e ao atingir um comprimento de 22 metros, o ângulo atingiu 15 graus.

O período de vibração no início da operação era de aproximadamente 3,8 segundos e ao final da operação chegou a aproximadamente 7,8 segundos, antes de chocar-se com a água.

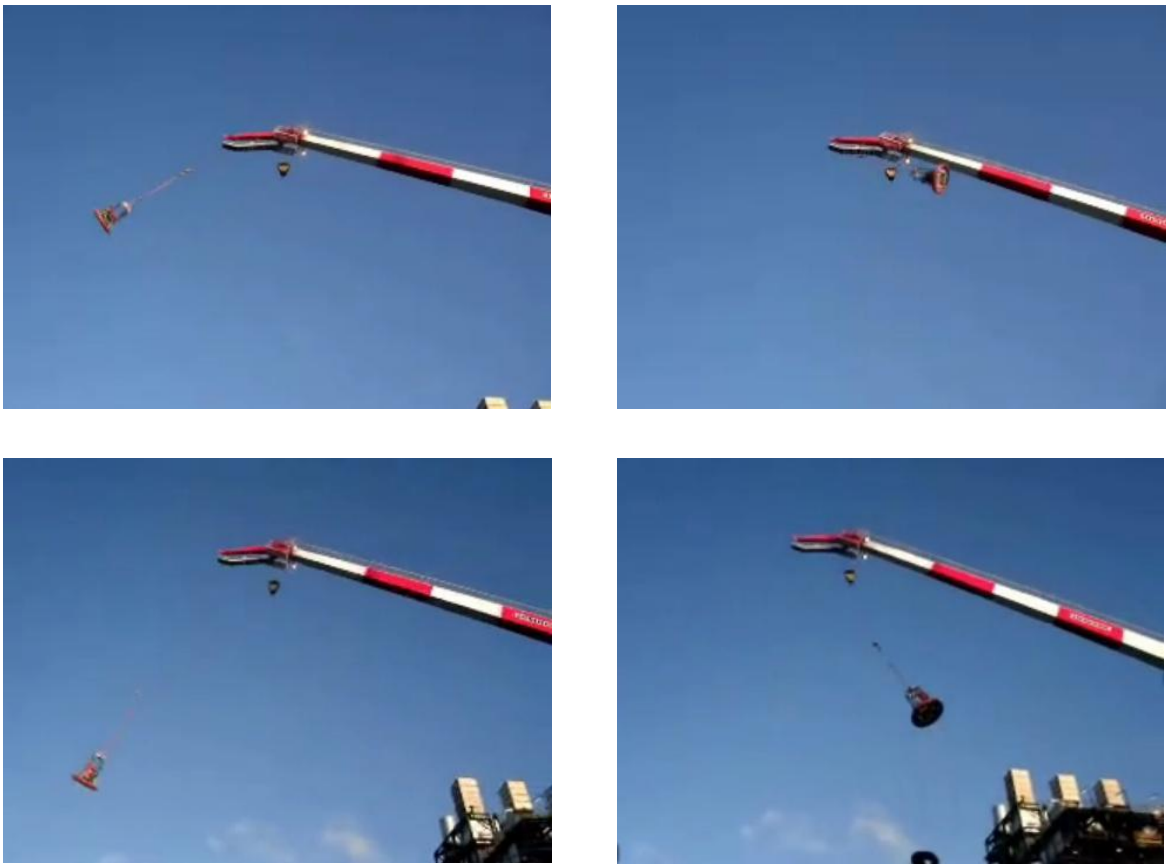

Figura 2. Guindaste em ressonância durante transbordo de tripulação em plataforma FPSO.

Em 26 de dezembro de 2011, ocorreu um acidente com uma vítima fatal e uma vítima ferida em uma plataforma *offshore*, quando uma pessoa caiu da cesta de transporte de pessoal após haver descontrole e colisão da cesta contra a estrutura da plataforma, durante o içamento para transbordo entre a embarcação de apoio e a plataforma (G1, 2011).

Outro acidente é relatado em acórdão do Tribunal Marítimo (BRASIL, 2000), onde um tripulante caiu no mar após se desprender da cesta de transbordo, em operação de içamento realizada com ondas de dois a três metros de altura, na transferência da lancha catamarã para o flotel.

No campo operacional, a simulação e o domínio da técnica de içamento com segurança acarretam economia de tempo e recursos, uma vez que se pode viabilizar uma operação de içamento em determinado estado de mar que, sem o conhecimento necessário, poderia ser indevidamente proibida. Por outro lado, a simulação pode antever situações de alto risco em condições aparentemente seguras.

Existem outros meios de transbordo de pessoal tais como helicóptero, dispositivos tipo *surfer*, passadiços, escadas e cordas. Com exceção do helicóptero, estes meios são menos flexíveis e tem desvantagens consideráveis quando comparados às cestas de transporte, tais como menor segurança, dificuldade de implantação e menor produtividade.

1.2 OBJETIVOS E MOTIVAÇÕES

O presente trabalho visa desenvolver uma metodologia para elaboração de diagramas de limites operacionais de içamento em função da altura significativa de onda (Hs) e do período de pico (Tp), via análise dinâmica no domínio do tempo, calculando movimentos, fatores de amplificação dinâmica e velocidades, durante o içamento de pessoas utilizando um guindaste instalado em uma unidade flutuante tipo *floating production, storage and offloading* (FPSO).

Este diagrama é denominado pelo autor de "diagrama operacional limite de guindaste offshore" (DOLGO), ou em inglês "*offshore crane operational limit diagram*" (OCOLD) e pode ser definido como diagrama que indica a envoltória de vários limites operacionais como movimentos máximos do FPSO, movimentos máximos da carga içada, velocidades, acelerações máximas, entre outros, em função da altura significativa de onda (Hs) e do período de pico (Tp), para uma dada configuração da operação, com parâmetros pré-determinados como raio de operação, peso da carga, calado etc. O objetivo do DOLGO é indicar se uma operação de içamento é segura do ponto de vista dos limites considerados, quando consultado com os parâmetros de Hs e Tp.

Para cumprimento do objetivo do trabalho, serão adotados os seguintes procedimentos:

a) escolha de uma unidade FPSO com parâmetros dinâmicos e operacionais conhecidos, tais como, funções de transferência de movimento (RAO) para um calado definido, raio de operação do guindaste, comprimento mínimo e máximo do cabo do guindaste e peso das cargas a serem içadas;

b) determinação dos limites operacionais para movimentos da cesta, movimentos do FPSO, velocidades e acelerações máximas da cesta, carga bruta tabelada do guindaste, entre outros;

c) realização do pré-processamento no SITUA/Prosim, com entrada dos dados das etapas descritas anteriormente e casos de carga;

d) realização a análise dinâmica no domínio do tempo para as combinações de raio de operação e peso da carga;

e) pós-processamento dos resultados, com determinação dos limites operacionais individuais para cada parâmetro e elaboração de diagrama operacional limite com a envoltória de valores máximos admissíveis;

f) Aplicação da metodologia em um estudo de caso.

Como as operações de transbordo envolvem vidas humanas, as motivações deste trabalho são diversas, sendo que um maior conhecimento dos esforços atuantes durante o içamento offshore resultará em maior segurança para estas operações, que via de regra, são de alto risco.

A principal motivação deste trabalho está no fato da capacidade de carga dos guindastes *offshore* se basearem, quanto às ondas, apenas na altura significativa de onda (Hs), desprezando o período da mesma. Esta limitação pode levar a operações inseguras caso o período da onda seja próximo ao período natural do FPSO, causando ressonância, ou pode levar a falsa inviabilidade de uma operação que seria segura, quando Hs é considerável, mas o período da onda está distante do período ressonante do FPSO. Daí a importância de desenvolver um diagrama prático que mitigue esta deficiência.

É notável também, que as tabelas de carga dos guindastes não levam em conta outras condições como calado, aproamento, direção de incidência de ondas, vento, corrente, velocidade máxima da carga, entre outros que podem diminuir a segurança da operação. Para suprir esta deficiência, devem-se levar em conta estes fatores no planejamento do içamento, aumentando-se a capacidade bruta requerida do guindaste e dos acessórios de içamento.

Neste trabalho, escolheu-se uma operação de içamento em uma unidade flutuante tipo FPSO motivado pela grande quantidade deste tipo de plataforma implantadas e em implantação, tendendo a ser as plataformas flutuantes mais utilizadas em águas brasileiras, aliada ao fato de que este tipo tem amplitudes de movimentos maiores quando comparados às unidades semissubmersíveis ou plataformas de pernas tensionadas (TLP).

Não obstante, o domínio da técnica de içamento com segurança acarreta em economia de tempo e recursos, uma vez que se pode viabilizar uma operação de içamento em

determinado estado de mar que, sem o conhecimento necessário, seria indevidamente inviabilizada.

Pode-se ainda aplicar este conhecimento no planejamento e execução de operações de içamento rotineiro ou ainda na utilização dos guindastes da unidade FPSO para içamentos não rotineiros, podendo-se dispensar, em alguns casos, a utilização de balsas guindaste ou navios de construção, que tem custo operacional altíssimo.

1.3 O SOFTWARE SITUA/PROSIM

A simulação dinâmica no domínio do tempo é realizada pelo software SITUA/Prosim, que foi desenvolvido pelo Laboratório de Métodos Computacionais e Sistemas *Offshore* (LAMCSO) pertencente a COPPE/UFRJ (JACOB, 2006), e desde então é muito usado pela Petrobras em vários de seus projetos e pesquisas de sistemas flutuantes *offshore*.

Através do acoplamento de um modelo hidrodinâmico, para a representação do casco das unidades flutuantes, e um modelo de elementos finitos, para a representação das linhas de ancoragem e *risers*, o programa executa análises estáticas e dinâmicas não-lineares do comportamento das linhas. Nessa análise o programa leva em consideração a influência das componentes de movimento transmitidas pelo casco, a ação de onda, corrente e peso próprio.

Com essa simulação o programa fornece os movimentos da unidade flutuante sob a influência da resposta estrutural das linhas de ancoragem, sendo possível, dessa maneira, analisar o comportamento hidrodinâmico e estrutural do conjunto, gerado pela interação casco, linhas de ancoragem e *risers*.

Entre os vários resultados da análise dinâmica emitidos pelo SITUA/Prosim para cada intervalo de tempo da simulação, estão os movimentos do centro de movimento do FPSO, deslocamentos, velocidades, acelerações e esforços em qualquer nó das linhas, bem como dados que permitem gerar a animação dessas grandezas.

1.4 PANORAMA ATUAL DA PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS NO BRASIL

Desde a antiguidade há relatos de utilização dos produtos fósseis pela humanidade. Em um dos mais antigos relatos, no livro bíblico de Êxodo, piche e betume foram utilizados

para impermeabilização de um cesto que transportou o hebreu Moisés pelo rio Nilo até ser encontrado pela filha do faraó (BÍBLIA, 2005).

No Brasil, há um relato datado de 1858, tratando da concessão dada a José de Barros Pimentel pelo Marquês de Olinda de extração de betume das margens do rio Marau, na Bahia (ALMEIDA, 2008).

Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Combustível (ANP, 2014a ; 2014b), atualmente a produção de petróleo no Brasil é de 2.089.694 barris por dia, sendo 91,7% produzidos em mar. Já a produção de gás natural é de 83.248,33 Mm^3/dia.

Dentre os muitos sistemas desenvolvidos para a exploração e produção de petróleo e gás, notadamente em águas marinhas, fora da costa, ou *offshore*, destacam-se as plataformas flutuantes, desenvolvidas a partir da necessidade de se trabalhar em águas cada vez mais profundas.

No Brasil, segundo Morais (2013), a primeira unidade estacionária de produção (UEP) flutuante foi utilizada no campo de Enchova, em 1977, em lâmina d'água de 120 metros. A plataforma, uma semissubmersível, antes utilizada para perfuração, foi adaptada para produção, o que permitiu economia e flexibilidade na implantação do projeto.

1.5 UNIDADES FLUTUANTES TIPO FPSO

Uma unidade estacionária de produção (UEP) do tipo FPSO (*floating production, storage and offloading*), ou unidade flutuante de produção, armazenagem e transferência, é uma planta industrial flutuante com capacidade de produzir, processar, armazenar e transferir petróleo ou gás para navio aliviador ou oleoduto.

Conforme Paik e Thayamballi, (2007) os componentes principais de um FPSO são o casco (*hull*); *topsides*, incluindo planta de processo, acomodações, instalações de maquinário e heliponto (*helideck*); sistema de ancoragem ou posicionamento; sistema de transferência (*offloading*) e sistemas submarinos e linhas de dutos.

1.5.1 Aspectos gerais

A grande maioria das unidades FPSO tem o formato de navio, utilizando cascos de navios tanques existentes que atingiram o final da vida útil ou a partir de navios de casco simples quando estes foram desativados, utilizando-se predominantemente os petroleiros do

tipo *very large crude carries* (VLCC) com capacidades de carga entre 175 mil e 300 mil toneladas de porte bruto (TPB) ou *ultra large crude carriers* (ULCC) com capacidades acima de 300 mil TPB (PAIK; THAYAMBALLI, 2007).

Por outro lado, a construção de cascos novos de FPSO vem se sobrepondo a tendência de se converter navios antigos. Um dos novos conceitos em termos de casco é apresentar simetria longitudinal e transversal, o que maximiza a capacidade de armazenamento e reduz os custos de construção. Além disso, ficou demonstrado que a razão Boca/Calado abaixo de 2,5 maximiza o amortecimento de balanço (*roll)*, reduzindo a amplitude deste movimento (GROVE, 2005).

Com a extensão das fronteiras de exploração e produção, e profundidade crescente, iniciou-se a utilização de unidades FPSO. Paik e Thayamballi (2007) relatam que a primeira unidade reutilizando casco de navio foi o FPSO *Castellon*, com ancoragem tipo *single-point mooring* (SPM), operada na costa da Espanha, instalada em 1976 e produzindo a partir de 1977.

No início do ano 2000 havia mais de 90 unidades FPSO em operação no mundo e cerca de 20 sendo construídas (PAIK; THAYAMBALLI, 2007) e atualmente são 147 unidades FPSO distribuídas em 27 países distintos, 28 delas operando na costa do Brasil, sendo o país com o maior número de unidades, seguido do Reino Unido e China, com 14 FPSO cada (*OFFSHORE MAGAZINE*, 2013).

O atual recorde mundial de profundidade da lâmina d'água pertence ao FPSO BW PIONEER, com 2515 metros, instalado no campo *Cascade & Chinook*, no Golfo do México americano, estando em operação desde 2012 pela Petrobras (REITZE et al, 2011).

No Brasil a unidade ancorada operando em maior lâmina d'água (2150 metros) é o FPSO CIDADE ANDRA DOS REIS, mostrada na Figura 3. Esta plataforma está em operação desde 2010 no campo de Tupi na região do pré-sal da Bacia de Santos, afretada pela Petrobras e operada pela MODEC (*OFFSHORE MAGAZINE*, 2013).

Figura 3. Plataforma FPSO Cidade Angra dos Reis MV22.

Um caso peculiar no Brasil é o FPWSO DYNAMIC PRODUCER (PIPA-2), operando em lâmina d'água de 2500 metros, com sistema de posicionamento dinâmico. Trata-se de uma plataforma diferenciada, já que ela opera não só na exploração como também na perfuração dos poços de petróleo, daí o "W" do FPWSO, significando *well intervention*. A plataforma opera desde 2011, no campo Carioca NE na Bacia de Santos, em teste de longa duração (*OFFSHORE MAGAZINE*, 2013).

Com as crescentes descobertas na costa brasileira, a Petrobrás, sozinha, informa que iniciará a operação de 18 plataformas entre 2014 e 2017, três delas só no ano de 2014. Entre 2014 e 2020 serão 31 novas plataformas ou navios-plataformas (PEREIRA, 2014).

Estima-se que as plataformas de produção tipo FPSO representarão 80% do mercado, considerando quantidade de unidades instaladas e os investimentos de capital (Capex) (WESTWOOD, 2014).

Remery e Quintela (apud Morais, 2013, p. 119) descrevem vantagens na implantação de campos de petróleo em quatro regiões do mundo por meio de adaptação de navio petroleiro como plataforma de produção FPSO: amplo espaço no convés, capacidade para cargas pesadas, tanques para armazenagem de petróleo, estabilidade em casos de tempestade, conveniência para a transferência de carga para petroleiros de alívio e reduzidos investimentos de capital.

Outras vantagens podem ser citadas: menor investimento de construção quando feita a partir de um casco existente, facilidade de transporte e instalação no local de operação e

possibilidade de permitir o alinhamento do navio com a condição ambiental dominante (JACOB, 2011).

Quando o FPSO possui forma de navio, seus movimentos são semelhantes a este, com variação de comportamento dependendo do tipo de sistema de ancoragem utilizado para posicionamento.

A Figura 4 mostra os movimentos de um FPSO nos seis graus de liberdade, bem como os termos comumente adotados para designá-los em português e inglês. Para as operações de içamento, os movimentos de balanço (*roll*), arfagem (*pitch*) e afundamento (*heave*) são os mais importantes, pois causam maiores efeitos dinâmicos nos guindastes e nas cargas içadas.

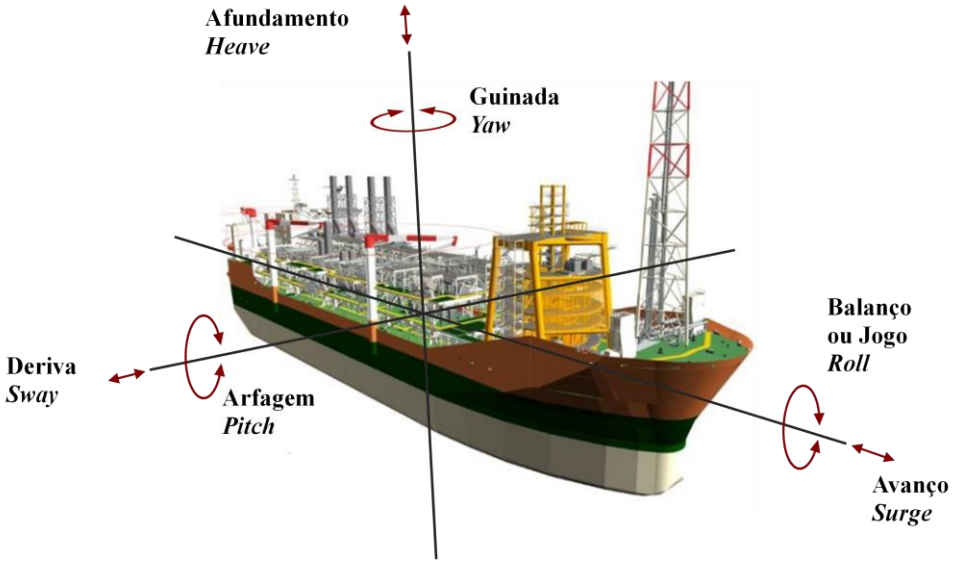

Figura 4. Indicação dos movimentos de um FPSO nos seis graus de liberdade. (Roncetti, 2012).

1.5.2 Sistemas de ancoragem e posicionamento

Os sistemas de posicionamento das unidades flutuantes visam limitar o movimento das mesmas a valores admissíveis, mantendo-as posicionadas na área de operação. Pode-se distingui-los de maneira geral, por aqueles em que há fixação ao leito do mar, chamados sistemas de ancoragem, ou aqueles onde não há qualquer fixação, chamados de posicionamento dinâmico ou *dynamic position* (DP).

Recentemente, há o desenvolvimento de sistemas híbridos que combinam do posicionamento dinâmico e a ancoragem, notadamente nos FPSO desprovidos de torreta (GROVE, 2005).

Nos sistemas com fixação no leito do mar, as linhas de ancoragem têm a função estrutural de fornecer forças de restauração para manter em posição os sistemas flutuantes tais como plataformas semissubmersíveis, navios, *spar buoys*, monoboias, etc. Para oferecer a força de restauração necessária, as linhas são dispostas em catenária (ancoragem convencional) ou utilizadas como linhas retesadas (*taut-leg*) (LIMA, 2006).

A ancoragem convencional, mostrada esquematicamente na Figura 5, é formada por linhas de ancoragem em catenária, que mantém a unidade flutuante em uma locação através da força de restauração das linhas. As linhas ancoradas são presas ao fundo do mar por âncoras de resistência horizontal. Esta técnica de ancoragem é utilizada em operações de produção ou perfuração, porém, normalmente é necessário um raio de ancoragem razoavelmente grande para atender aos critérios de projeto, o que pode gerar um congestionamento em um campo de exploração de petróleo (ALBRECHT, 2005).

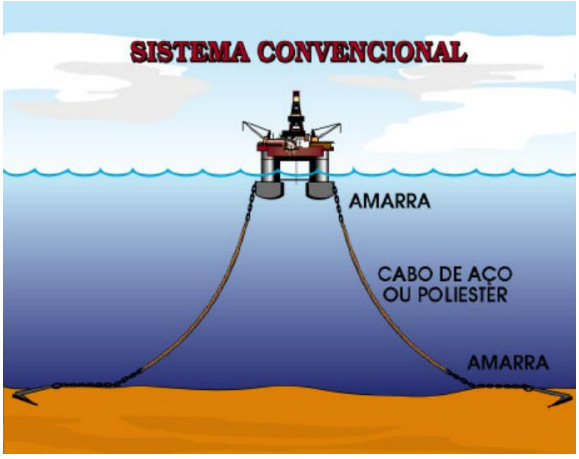

Figura 5. Esquema da ancoragem convencional em catenária.

A ancoragem *taut-leg*, mostrada esquematicamente na figura Figura 6, é constituída por linhas retesadas com um ângulo de topo de aproximadamente 45º com a vertical. Consequentemente tem-se uma projeção menor do que a obtida com a ancoragem convencional, considerando-se a mesma ordem de grandeza da profundidade da lâmina d'água. As linhas de ancoragem *taut-leg* são constituídas por cabos de aço ou amarras nas suas extremidades e cabos de poliéster ou aço no seu trecho intermediário. Ela é geralmente

empregada em sistema de grandes profundidades, pois a ancoragem em catenária demandaria um raio de ancoragem muito grande. A grande desvantagem da *taut-leg* é a necessidade de âncoras que suportem o esforço vertical, por isso se fazem necessárias as estacas de sucção, v*ertically loaded anchor* (VLA) ou estacas de fundeio para fixação das linhas ao leito marinho (ALBRECHT, 2005).

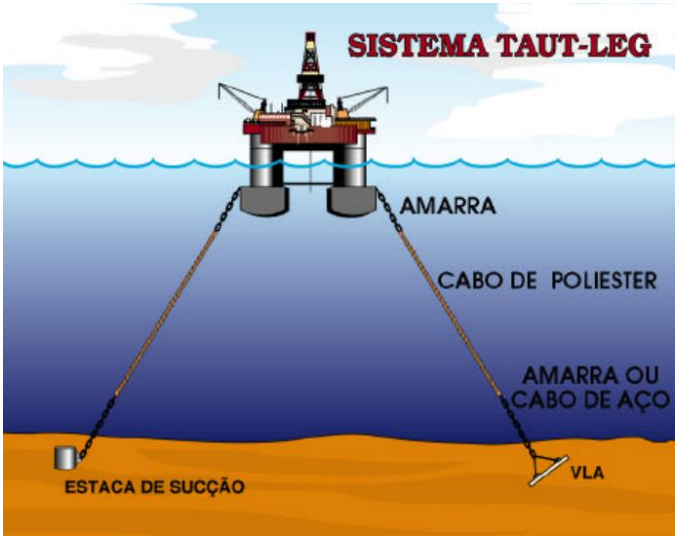

Figura 6. Esquema da ancoragem taut-leg.

Outra forma de classificação das ancoragens é conforme a disposição ou distribuição das linhas no casco, que pode ser por ponto único de ancoragem (*Single Point Mooring* ou SPM), amarração com quadro de ancoragem (*Spread Mooring System* ou SMS) e sistema de posicionamento híbrido.

No sistema por ponto único de ancoragem (SPM), são utilizadas bóias ou torretas (*turrets*). No SPM com boia o navio é conectado a esta, que por sua vez está ancorada no fundo do mar por diversas linhas de ancoragem. Quando essas diversas linhas são catenárias, o sistema é denominado *catenary anchor leg mooring* (CALM), que é usado em terminais oceânicos onde normalmente o navio é ancorado a bóia por um cabo sintético denominado *hawser* (LIMA, 2006).

No SPM com torreta, o navio é conectado a uma estrutura em forma de torre, sendo que todas as linhas de ancoragem e *risers* são presas na torreta, que pode fazer parte da estrutura ancorada ou pode ser provisoriamente incorporada a ela. A torreta permite que a embarcação gire 360º em torno das linhas de ancoragem e produção, alinhando-se a condição

ambiental resultante, atenuando os movimentos. A torreta pode ser montada interna ou externamente a embarcação.

A Figura 7 ilustra um FPSO com sistema de ancoragem SPM utilizando uma torreta externa, suportada por estrutura fixada ao casco na região da proa.

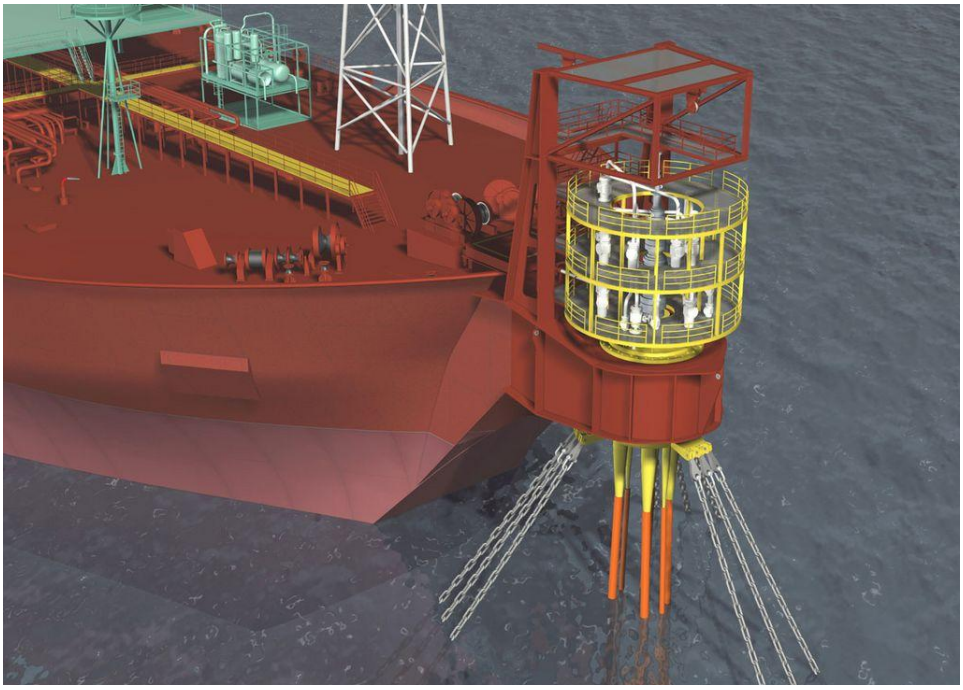

Figura 7. Detalhe da proa de FPSO com sistema de ancoragem SPM com torreta externa.

Na amarração com quadro de ancoragem (SMS), ilustrado na Figura 8, as linhas de ancoragem se encontram distribuídas em pontos de conexão em torno da embarcação. O número de linhas utilizado varia de acordo com a necessidade do sistema, geralmente adota-se entre 8 a 20 linhas de ancoragem para cada unidade (BAHIENSE, 2007).

O sistema de ancoragem descrito anteriormente é bastante eficiente, entretanto o seu custo é bastante elevado. A PETROBRAS desenvolveu um novo sistema de ancoragem chamado DICAS, que se constitui num sistema com complacência diferenciada entre as linhas de popa e proa da embarcação.

O DICAS foi desenvolvido a partir da experiência adquirida pela PETROBRAS na operação de um FSO no campo de Caravelas na Bacia de Campos em 1993. As linhas de popa oferecem uma resistência menor aos movimentos da embarcação, permitindo que a mesma se alinhe com as cargas ambientais dentro de um limite angular (5 a 7 graus). Apesar do custo menor, o sistema só pode ser empregado em locações com pequena variação angular média da resultante do carregamento (ALBRECHT, 2005).

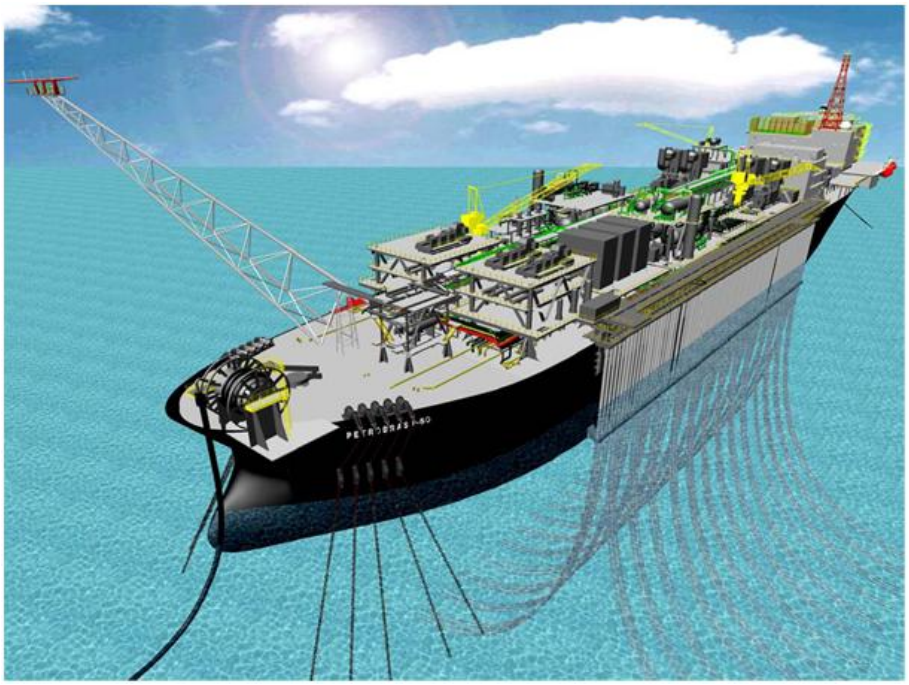

Figura 8. FPSO P-50 da PETRORAS, com sistema de ancoragem SMS, para o campo de Albacora Leste.

1.6 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A continuidade deste texto está organizada da forma descrita a seguir.

O Capítulo 2 detalha os meios de transbordo de pessoal mais utilizados no Brasil e no mundo, indicando suas principais características, riscos, perigos, estatísticas de acidentes no cenário nacional e internacional, além de descrever as principais preconizações das normas técnicas no que interessa ao içamento de pessoas.

O Capítulo 3 descreve as principais características das operações de içamento em unidades FPSO, detalhando as características físicas que influenciam o içamento, características, vantagens e desvantagens dos principais tipos de guindastes *offshore* e descrição da execução das operações.

O Capítulo 4 descreve as principais características dos carregamentos ambientais que influenciam as operações de içamento, enfatizando ondas.

O Capítulo 5 trata da análise dinâmica de corpos discretos e suas principais características envolvidas nas operações de içamento,principalmente quanto à dinâmica de cabos.

O Capítulo 6 apresenta a metodologia desenvolvida e proposta para elaboração dos diagramas operacionais limites de guindastes *offshore*.

O Capítulo 7 é um estudo de caso para aplicação da metodologia desenvolvida no Capítulo 6, tomando-se uma unidade FPSO real e parâmetros práticos para atestar a aplicabilidade dos diagramas desenvolvidos. Relata todos os parâmetros adotados para o FPSO, guindaste, cesta de transporte, limites operacionais entre outros.

O Capítulo 8 expõe os resultados encontrados nas simulações do Capítulo 7, avaliando-os e comentando-os quanto ao objetivo proposto.

O Capítulo 9 apresenta as considerações finais e propõe temas para trabalhos futuros visando o desenvolvimento e aprofundamento do estudo.

Nos apêndices são apresentados dados e resultados complementares tais como RAO e casos de carga utilizados nas simulações, resultados intermediários e o código fonte do pós-processador de resultados.

2 TRANSBORDO DE PESSOAS EM PLATAFORMAS *OFFSHORE*

Neste capítulo são abordadas as técnicas adotadas pela indústria *offshore* mundial para a realização das operações de transbordo de pessoas entre a plataforma e o meio de transporte, que pode ser um barco de apoio, lancha, barcaça, flotel entre outros.

2.1 INTRODUÇÃO

Em 1998, ocorreu um *blowout* seguido de explosão e incêndio na Plataforma Central de Enchova (DE LUCA, 2011). Antes da explosão, o acesso por helicóptero à plataforma não era possível devido a falta de visibilidade, sendo necessário o pouso em outra unidade, em seguida embarque e translado por barco de apoio até o flotel próximo à unidade acidentada, transbordo por cesta de transporte ao flotel e finalmente acesso via passarela móvel ao local do sinistro.

Outro acidente na Bacia de Campos, ocorrido em junho de 2012 (NASCENTE, 2012), ilustra a necessidade do domínio das técnicas de transbordo de pessoas. Durante uma manobra do navio tanque aliviador, este abalroou o FPSO Marlim Sul, na bacia de Campos, danificando além do casco, o heliponto, impossibilitando qualquer operação aérea.

A partir do sinistro, todas as operações de transbordo do pessoal tiveram que ser feitas por cesta de transporte de pessoal até um navio posicionado ao lado da plataforma, que levava ou trazia os funcionários à outra plataforma próxima, e de lá tomavam o transporte aéreo.

Em outro exemplo, ocorrido em 2010 na Islândia, houve grandes erupções do vulcão *Eyjafjallajökull*, resultando em uma nuvem de cinzas que cobriu grande parte da Europa, fechando o espaço aéreo e impedindo a realização de voos, inclusive os de helicópteros para atendimento às plataformas (MURDOCH, 2012).

Para contornar o problema, restou como alternativa mais prática e rápida de implantação, o transbordo de pessoas por cesta e guindaste. Porém, surgiram diversas dúvidas quanto ao planejamento, procedimento de execução e adequabilidade dos equipamentos, indicando que a indústria offshore teria que pesquisar mais sobre o tema.

2.2 MEIOS DE TRANSBORDO

2.2.1 Helicóptero

O helicóptero é o modal mais utilizado para transbordo em plataformas *offshore*. Esse é o meio de maior eficiência devido à rapidez e segurança. Segundo Sena (2011), quando houve início da exploração da Bacia de Campos, em meados de 1970, a Petrobrás utilizava tanto embarcações como helicópteros. Entretanto, na década de 90, verificou-se por meio de estudos internos, que o transporte aéreo superava o marítimo em tempo, custo e flexibilidade. Então o transbordo por helicóptero passou a ser o único meio utilizado para plataformas mais distantes da costa.

Apenas na Bacia de Campos, são transportadas cerca de 40.000 pessoas por mês, em mais de 6.000 voos, entre o continente e às plataformas (MORAIS, 2013). Com o aumento da distância entre a costa e as plataformas, este modal deverá ser revisto devido a inviabilidade do processo atual de atingir grandes distâncias, como por exemplo as plataformas instaladas na região do pré-sal na Bacia de Santos. A Figura 9 mostra um helicóptero sobre o heliponto em um pouso de emergência.

Figura 9. Pouso forçado de aeronave em heliponto de plataforma offshore no Brasil.

Esse modal é também o meio mais seguro para o transbordo, visto que as pessoas embarcam ou desembarcam diretamente sobre a plataforma, sem necessidade de equipamentos especiais.

No transbordo *offshore* com helicóptero, a incidência de acidentes é baixíssima em todo mundo. No Brasil a taxa de acidentes nos anos de 2000 a 2013, foi aproximadamente, um acidente a cada 100 mil horas de voo. No mesmo período a taxa da *International Association Of Oil and Gas Producers (OGP)* foi 1,65 acidentes a cada 100 mil horas de voo. A taxa mundial calculada pela *International Helicopter Safety Team* entre os anos 2001-2012 foi aproximadamente 8,05 acidentes a cada 100 mil horas de voo, para todos os tipos de aplicação civil (ROQUE, 2013).

Diante destes números, nota-se que a aviação na área offshore, apesar das condições de operação geralmente desfavoráveis em relação às demais áreas da aviação civil, apresenta bom nível de controle da segurança na atividade de transbordo.

2.2.2 Dispositivos *surfer*

O termo *surfer* denomina um conjunto de dispositivos estruturais de reação, compostos de 2 partes: uma delas, aproximadamente côncava, é fixada na plataforma, navio ou barcaça onde se vai embarcar ou desembarcar, dispondo de escada vertical e corrimão; a outra, convexa, é adaptada na forma da proa da embarcação de transbordo (IMCA, 2010).

A Figura 10 mostra uma situação de transbordo em plataforma fixa com lancha. Ao fundo vê-se a estrutura de tubos para reação da lancha *surfer*, em tubos pretos com marcação de vermelho a bombordo e verde à boreste.

A embarcação de transbordo, que pode ser de pequeno ou médio porte, aproxima-se da unidade onde vai atracar, e de maneira lenta, acopla com ela, mantendo os motores com grande força à vante, estabelecendo uma ligação por atrito entre as estruturas, cuja intenção é evitar que haja movimento relativo, independentemente das ondas, permitindo o transbordo seguro.

Figura 10. Autor preparando-se para desembarque em plataforma fixa offshore.
(Acervo do autor, 2011).

A Figura 11 mostra a mesma lancha da Figura 10 atracada no *surfer* para desembarque de pessoal em plataforma offshore. Nota-se a grande turbulência gerada pelos motores, pressionando a embarcação contra a estrutura de suporte pela proa.

Como sempre há risco de acidente, é necessária uma equipe de suporte e auxílio ao pessoal que está embarcando ou desembarcando, bem como a utilização dos equipamentos de proteção individual.

O maior risco é a ocorrência do desacoplamento, fazendo com que a embarcação se desloque subitamente, podendo ocasionar a prensagem da pessoa entre a estrutura e o barco, podendo causar graves ferimentos ou morte.

Bagagens e demais itens são movimentados via corda, manualmente pela tripulação de apoio ou são transportados por cestas de içamento (IMCA, 2010).

Figura 11. Lancha tipo *surfer* atracada para desembarque de pessoal.
(Acervo do autor, 2011).

2.2.3 Cesta de transporte de pessoal

A NBR 10876 (ABNT, 2011) define cesta de transporte de pessoal como o "dispositivo movimentado por meio de içamento compatível, capaz de transportar pessoas, com segurança, de uma unidade marítima para uma embarcação e vice-versa".

No Brasil há quatro empresas fornecedoras de cestas de transporte de pessoal homologadas pela Marinha do Brasil, sendo três brasileiras e uma norueguesa.

O transbordo de pessoal em operações marítimas é uma atividade que envolve alguns riscos e por conta disso, registram-se com certa frequência, acidentes envolvendo estas operações. Segundo Catherall (2013), no período de 1993 até 2013, foram registrados 115 acidentes dessa operação com cestas, das quais 15 foram fatais.

As estatísticas de acidentes com cestas mostram que 68% dos acidentes relacionados ao transbordo de pessoal em plataformas de petróleo, ocorrem no próprio barco de apoio. Os dados também indicam que muitos destes acidentes foram causados pelo movimento pendular, gerado pelo desalinhamento entre cabo do guindaste e o dispositivo usado na transferência (cestas).

Ainda de acordo com Catherall (2013), dos acidentes com cestas, quase 55% são de quedas de passageiros, 40% por impactos laterais e aproximadamente 16% por impactos verticais *(heavy landing*). Os acidentes com impactos verticais normalmente causam lesões mais brandas nas vítimas, tais como fraturas e lesões nas costas. Já os acidentes com impactos laterais, normalmente resultam em quedas de grandes alturas e consequentemente em lesões mais graves e até fatalidades.

Outro acidente, que embora seja menor número, apenas 7% do total aproximadamente, tem um alto risco de fatalidade é na ocorrência de queda em mar (*immersion*), principalmente em locais onde o carregamento ambiente é desfavorável, como exemplo o mar do norte.

Existem ainda acidentes decorrentes do emaranhamento do passageiro no embarque e desembarque do dispositivo de transporte (*trip entanglement*), que representa 9% dos custos. Pouco mais de 5% envolvem a tripulação do convés e 7% por motivos desconhecidos.

Analisando as causas destes acidentes, temos que a principal delas, pouco mais de 30% são por conta do projeto do equipamento utilizado na operação, seguido por erros de operação do guindaste e falta de treinamento, com quase 25%.

Existem ainda causas de planejamento e preparação, 15%, movimento do navio, quase 10%, condições meteorológicas, 7,5%, comunicação, 4% e falha do equipamento, aproximadamente 2%.

Em situações anormais de operação na plataforma, onde há necessidade de realizar um abandono preventivo, pode-se utilizar a cesta como alternativa à baleeira, tendo-se como vantagem que, uma vez sanada a ameaça, aqueles que desembarcaram podem retornar rapidamente à unidade. Caso o desembarque fosse realizado por baleeira, esta só poderia ser evacuada em terra, uma vez que os dispositivos de içamento da baleeira para bordo têm capacidade limitada ao peso da embarcação e três tripulantes.

A Figura 12 e a Figura 13 mostram gráficos com as estatísticas expostas acima.

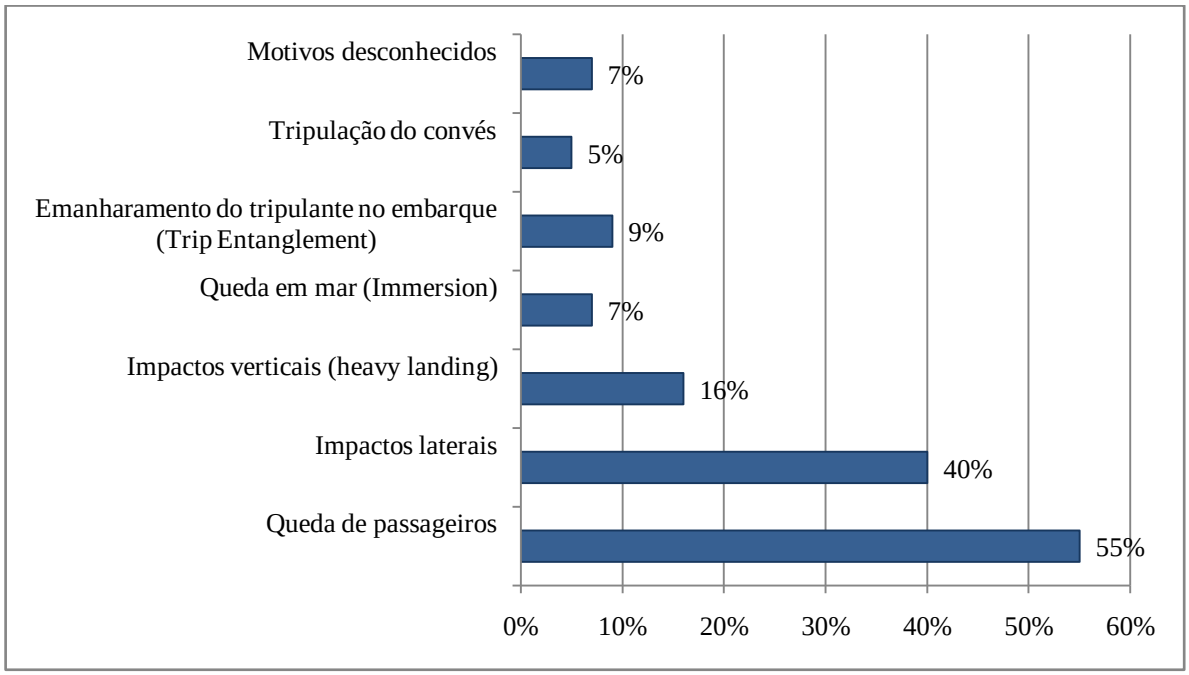

Figura 12. Principais tipos de acidentes na operação de transbordo de pessoal com cesta (CATHERALL, 2013).

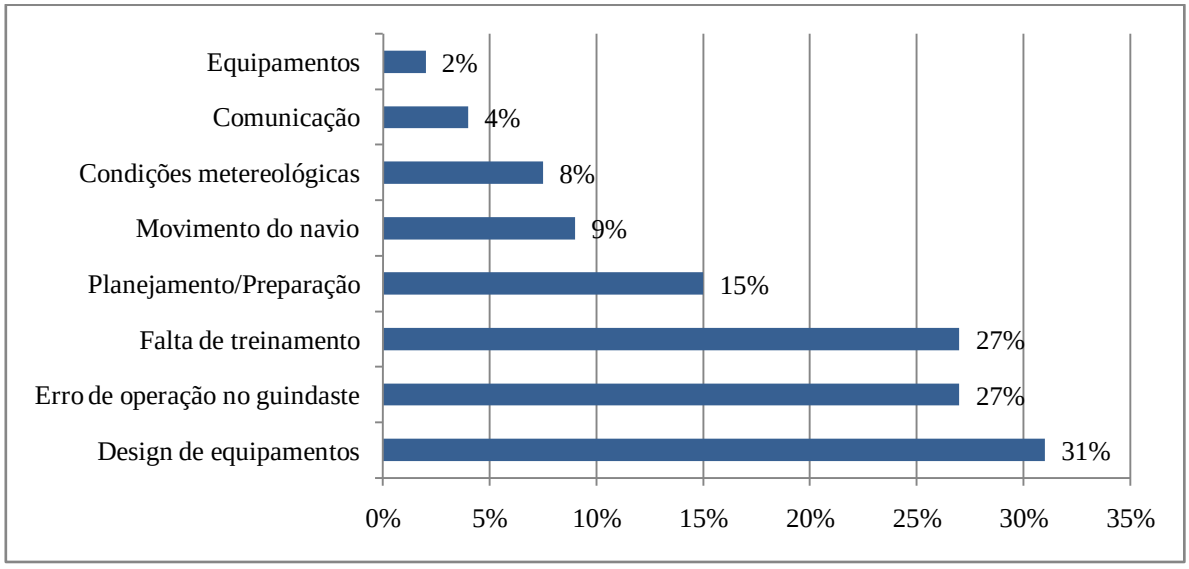

Figura 13. Principais causas de acidentes na operação de transbordo de pessoal com cesta (CATHERALL, 2013).

A cesta de transporte de pessoal, tipo *Billy Pugh*, mostrada em operação na Figura 14, é a mais utilizada, embora não seja a mais segura, nessa modalidade de transporte. A cesta permite o transporte de pessoal através de uma estrutura composta por uma rede flexível e uma base de material flutuante. Os tripulantes se apóiam sobre a base e se prendem às redes com o auxilio das mãos e braços. O que gera certo grau de insegurança nesse modelo de

transporte é o fato de os usuários serem responsáveis pela sua própria fixação na parte externa da estrutura, aumentando os riscos de queda ao mar, ou ainda a ocorrência da perda de equilíbrio por movimentos bruscos e ainda a possibilidade de vertigem e desmaio devido a aceleração durante o içamento.

A cesta de transporte tipo Esvagt é muito semelhante ao modelo *Billy Pugh* embora seja mais segura. A Esvagt consiste em uma estrutura rígida sobre uma base de material flutuante, semelhante à da *Billy Pugh*. O que torna este modo mais seguro é o fato de os usuários serem colocados dentro da estrutura metálica diminuindo assim, principalmente, o risco de queda. A Figura 15 mostra esta cesta em operação.

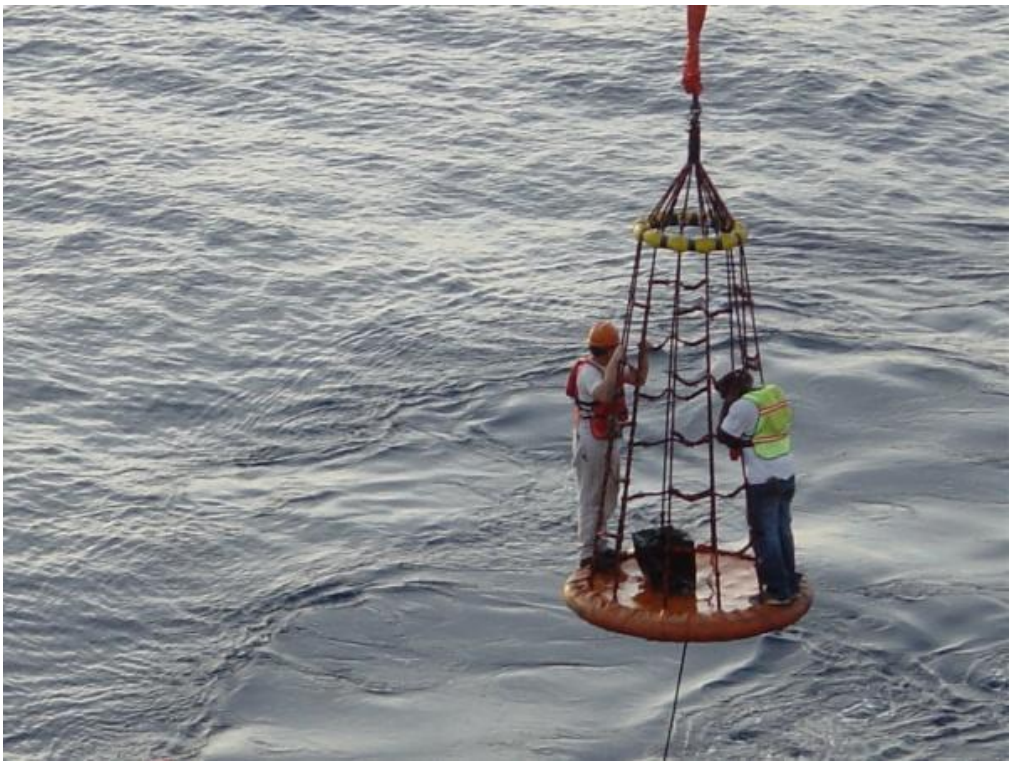

Figura 14. Cesta de transporte de pessoal tipo *Billy Pugh*.

A cesta de transporte por cápsulas, também conhecida como *Frog* (Figura 16), é um dos meios mais seguros deste tipo de transferência, realizado através de um guindaste, que é capaz de transportar até nove pessoas ao mesmo tempo - dependendo da unidade usada. Nesse modelo de transporte o tripulante é transportado sentado e com cinto de segurança.

Figura 15. Cesta de transporte de pessoal tipo *Esvagt*.

Embora seja o mais seguro, ainda não é o mais utilizado por ter o custo mais elevado da categoria e menor flexibilidade para as operações, além de ocupar mais espaço de armazenamento.

Figura 16. Cesta de tranporte tipo *Frog*.

A Figura 17 mostra as principais partes de uma cesta tipo *Billy Pugh*.

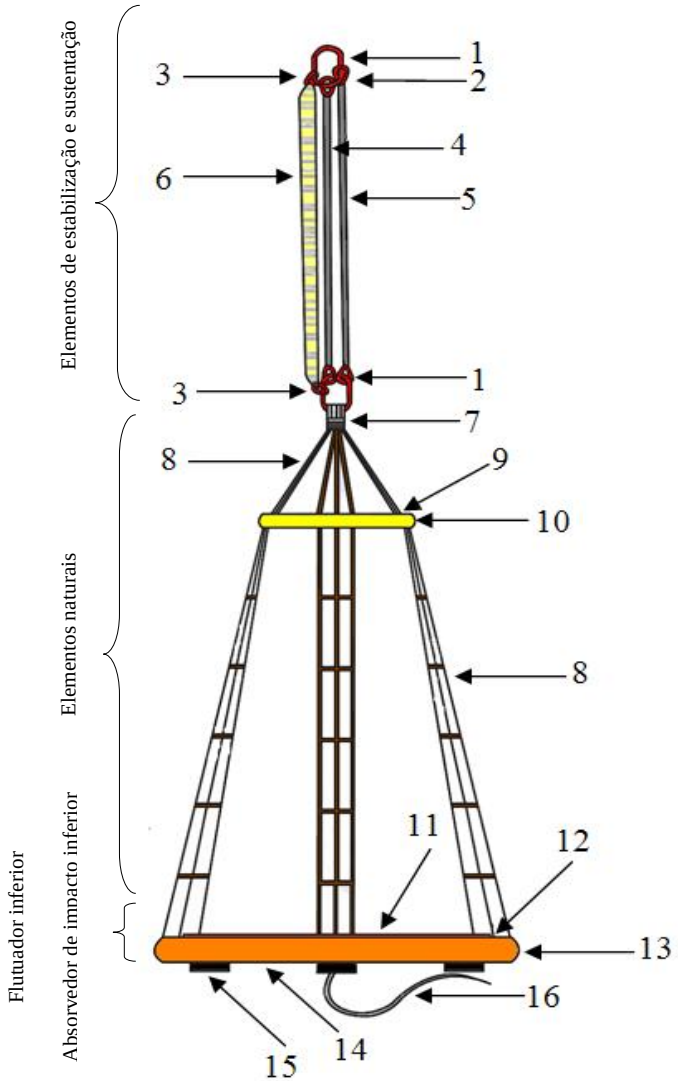

Figura 17. Componentes da cesta de transporte de pessoal (ABNT,2011).

Legenda: 1– anel de carga; 2 – olhal com sapatilho e presilha; 3 – manilha de carga tipo curva com porca e contra-pino; 4 – cabo de sustentação (linga de cabo de aço); 5 – cabo de segurança (linga de cabo de aço); 6 – conjunto estabilizador; 7– alça de sustentação; 8 – rede cônica; 9 – aro superior; 10 – flutuador superior; 11 – flutuador inferior; 12 – aro Inferior; 13– absorvedor de impacto; 14 – rede de fundo; 15 – batente do aro inferior; 16 – cabo-guia.

2.2.4 Passadiço e escada de portaló

Passadiços (*gangways*) e escadas de portaló (*accommodation ladder*) são os principais meios para o transbordo de pessoal entre o cais e as plataformas de exploração de petróleo, quando estão atracadas, ocasionalmente são usadas para o transbordo entre as próprias plataformas. Existem vários modelos de passadiços e escadas de portaló, mas todas elas devem ser fabricadas em material apropriado, com piso antiderrapante e corrimão. Estes

equipamentos devem passar por inspeção e manutenção regularmente para garantir a segurança do seu uso. No caso de possibilidade de queda de pessoas, redes de segurança devem ser utilizadas e também, quando necessário, devem estar disponíveis bóias salva vidas, equipadas com retinida e luzes ativadas pela água (IMCA, 2010).

Escadas de portaló e passadiços devem ser adequadamente iluminados, seus acessos devem estar desobstruídos e seguros. Estes equipamentos não devem ser usados com ângulos de inclinação que interfiram na segurança do seu uso. Todos os equipamentos e usuários devem ser monitorados e controlados, bem como seus acessórios, tais como balaustres e corrimãos.

Algumas plataformas maiores possuem grandes passadiços (50 metros) para realizar o transbordo de pessoal. Estes passadiços são fixos em uma extremidade e deslizam sobre rolos na outra extremidade para permitir um movimento relativo da mesma. Cada equipamento pode ser controlado hidraulicamente, içado e suportado por um guindaste ou podem ter seu próprio mecanismo de suporte. Esses passadiços devem ser equipados com sistemas de alarmes, ativados por determinada quantidade de movimento, e devem ser monitorados e controlados continuamente.

Existem também passadiços projetados especificamente para o transbordo de pessoal entre duas plataformas de exploração. Estes passadiços são projetados com sistemas hidráulicos que, através de compensação de movimento, permitem ajustes tanto em seu comprimento quanto em seu ângulo de inclinação, para se adequar aos movimentos de uma plataforma em relação à outra. Cada equipamento possui um sistema de iluminação de alerta, que é acionado para informar quando a passarela está sendo ajustada e impedir assim a circulação de pessoas nestes momentos. A Figura 18 apresenta uma passarela com compensador de movimentos ligando um barco de apoio à uma plataforma fixa.

2.2.5 Outros meios de transbordo

Além dos meios anteriormente citados, que são os mais empregados, pode-se recorrer a outros meios de transbordo em situações especiais tais como emergências, condições climáticas extremas, falha em outros dispositivos de transbordo, manutenção não prevista dos equipamentos de transbordo, entre outras.

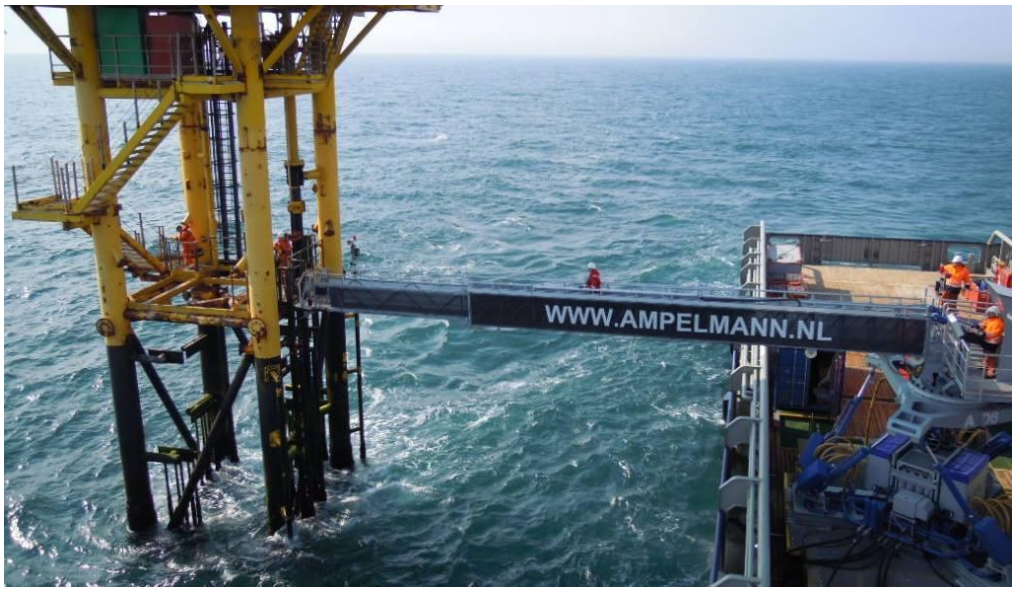

Figura 18. Transbordo de pessoas entre plataformas por passadiços com compensadores hidráulicos de movimento.

Segundo a IMCA (IMCA, 2001), o barco de resgate pode ser utilizado para o içamento de pessoas para transbordo em situações de emergência, além da tripulação mínima necessária a este dispositivo de salvatagem. A Figura 19 mostra a utilização do barco de resgate para o içamento de pessoas na operação de transbordo.

Em situações de emergência, quando não há possibilidade de pouso do helicóptero, é possível utilizar seu guincho para realizar o transbordo, seja recolhendo ou baixando o pessoal.

Outra possibilidade, também em situação especial, é a utilização de escada de quebra-peito (*embarkation ladder*). Menos comum na área *offshore*, é muito utilizada para acesso dos práticos aos navios mercantes (IMPA, 2012).A Figura 20 mostra a utilização da escada de quebra-peito em operações de transbordo.

Por último, algumas empresas tem permitido e recorrido à técnica conhecida como "pulo de corda" (*swing rope*), embora proibido ou não recomendado por várias outras empresas e entidades internacionais, como a IMCA (IMCA, 2010), em função da grande quantidade de acidentes ocorridos.

O "pulo de corda" consiste na utilização de uma corda que é amarrada na plataforma, onde a pessoa se pendura e em seguida se projeta ao local de destino em movimento pendular. A Figura 21 mostra a utilização deste método nas operações de transbordo.

Figura 19. Barco de resgate rápido sendo içado após operação.

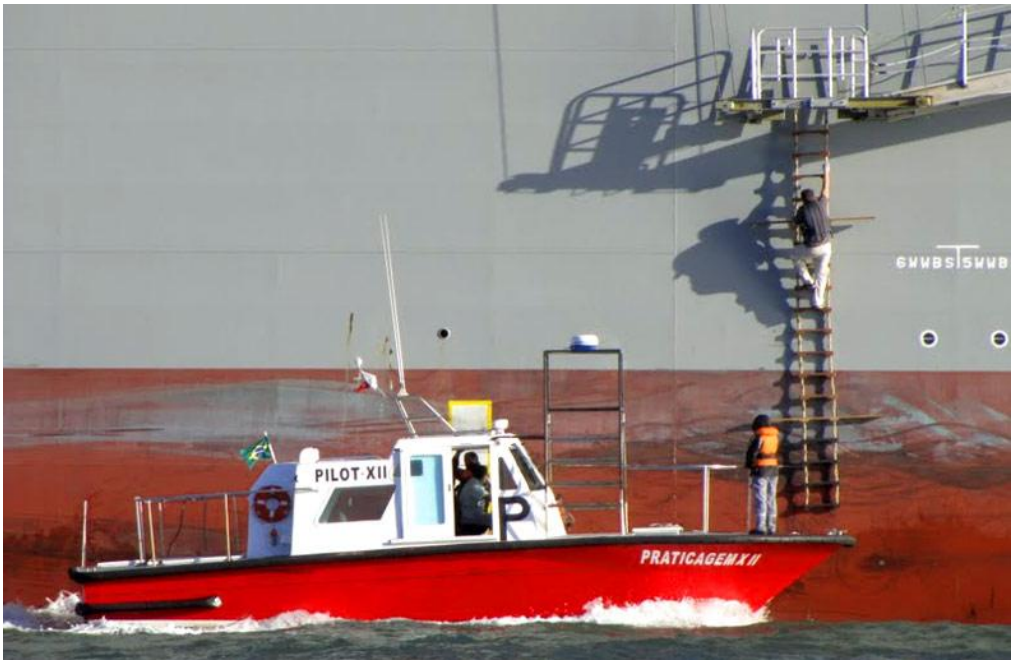

Figura 20. Uso da escada de quebra-peito para transbordo em navio em movimento.

Ainda é utilizado no Brasil, principalmente nos campos do Nordeste, porém, em função da quantidade de acidentes e alto risco, as empresas que adotam esta técnica vem sendo alvo de ações judiciais (BRASIL, 2012; 2013a).

O projeto da norma regulamentadora NR-38 (BRASIL, 2013c), que está em consulta pública, proíbe o uso do "pulo de corda" em qualquer situação.

Figura 21. Uso da técnica “pulo de corda” para transbordo em plataforma no nordeste do Brasil.

2.3 NORMAS, PROCEDIMENTOS E RECOMENDAÇÕES

A indústria mundial *offshore* é caracterizada pela dependência das operações de içamento que tem objetivo de suprir a plataforma com os materiais necessários à exploração, produção, manutenção do pessoal a bordo, bem como realizar as atividades de movimentação rotineira,tais como rearranjo da carga do convés,movimentação de tubos,resíduos e etc.

Estas operações, via de regra, são atividades de alto risco, cuja falha tem consequências que acarretam danos materiais, ferimentos, morte, danos ambientais e outros fatores negativos.

Com a necessidade de estabelecer padrões, regras e procedimentos baseados na experiência e nas técnicas empregadas ao longo do desenvolvimento do setor, a fim de minimizar os acidentes, várias normas, procedimentos e recomendações para operação de içamento, foram publicados, sendo os principais descritos a seguir.

2.3.1 EN 13852-1

A parte 1 desta norma europeia tem como título "guindastes *offshore* - Parte 1: guindastes offshore de uso geral" ou no original "*offshore cranes - Part 1: General-purpose offshore cranes*" (CEN, 2004).

Esta norma, cujo cumprimento é obrigatório no território da Comunidade Européia, especifica os requisitos para guindastes offshore de uso geral incluindo as estruturas de suporte tipo pedestal, bem como os requisitos para içamento de pessoas.

O código especifica os requisitos de segurança da estrutura, mecanismos, equipamentos, dispositivos de comando, ergonomia e conforto e sistema de proteção contra sobrecargas mecânicas. Norteia também a determinação dos fatores de amplificação dinâmica (FAD) a serem utilizados no projeto dos diversos elementos, cargas e velocidades. Aborda também as ações ambientais a serem consideradas, análise dos modos de falha, escolha dos materiais, entre outras especificações.

Quanto ao içamento de pessoas, a norma especifica os requisitos de segurança para carga máxima de trabalho (CMT), dispositivos de freio secundário, cilindros hidráulicos, dispositivos eletrônicos de controle e resgate de pessoal.

Especifica que a capacidade bruta requerida (CBR) do içamento de pessoas não deve exceder a 50% da capacidade bruta tabelada (CBT) para o içamento de cargas, nas mesmas condições de raio e altura significativa de onda (Hs).

Exceto para o caso de emergência, ou condições especiais consideradas pelo fabricante do guindaste, devem-se considerar as seguintes limitações operacionais (CEN, 2004, p. 39):

a) máxima velocidade média do vento: 10,0 m/s;

b) máxima altura significativa de onda: 2,0 m;

c) visibilidade: diurna.

O içamento de pessoas somente deve ser realizado com equipamentos específicos para este fim, tais como cestas, devendo necessariamente atender a norma EN 14502-1 (CEN,2010).

2.3.2 API *Specification* 2C

Esta norma estadunidense tem como título "especificação para guindastes *offshore* montado sobre pedestal" ou no original "*specification for offshore pedestal mounted cranes*" (API, 2004).

O código detalha os requisitos para projeto, fabricação, montagem e teste de guindastes *offshore* fixados sobre pedestal, instalados em unidades fixas ou flutuantes.

Prevê o içamento de pessoas, introduzindo aumento nos coeficientes de segurança da estrutura do guindaste, componentes mecânicos e cabos de aço.

A norma traz requisitos definindo apresentação da tabela de cargas, cargas a serem consideradas na situação do guindaste em operação e fora de operação, vento, gelo e sismo. Define as tensões admissíveis para os vários componentes bem como as diretivas para autenticação do projeto e testes.

Possui coeficientes de segurança maiores que a EN 13852-1, resultado em estruturas mais robustas, em contrapartida exigindo menos dispositivos de segurança ou controles eletrônicos.

A capacidade bruta requerida (CBR) do içamento de pessoas não deve exceder a 33% da capacidade bruta tabelada (CBT) para o içamento de cargas, nas mesmas condições de raio e altura significativa de onda (Hs).

Não estabelece nenhum limite operacional para o içamento de pessoas, determinando apenas a velocidade do vento para içamento de cargas que deve ser considerada para projeto, que é 17,86 m/s para Hs até 3,05 m e 26,79 m/s para Hs 6,1 m.

Considerando o método geral de projeto (*general method*), quando não se dispõe dos parâmetros dinâmicos da plataforma a receber o guindaste, o fator de amplificação dinâmica (FAD) para projeto do guindaste em unidade FPSO, para içamento *offboard*, é dado pela Equação (1).

$$C_v = 1{,}33 + 0{,}0129\ Hs^2 \geq 1{,}40 \qquad (1)$$

Onde:

C_v - Fator de amplificação dinâmica que multiplica a carga máxima de trabalho para determinação da carga vertical de projeto.

Hs - Altura significativa da onda, em metros.

A aceleração horizontal mínima da ponta da lança do guindaste a ser utilizada no projeto deve ser conforme a Equação (2).

$$\alpha_h = 0{,}037\, Hs^{1,1} \geq 0{,}03\, g \qquad (2)$$

Onde:

α_h - Aceleração horizontal mínima da ponta da lança do guindaste, como fração da aceleração da gravidade (g).

g - Aceleração da gravidade, considerada 9,81 m/s².

Além da aceleração horizontal, deve-se considerar no projeto do guindaste, o efeito da inclinação do FPSO através do ângulo de banda (*heel*) que deve ter valor mínimo de 2,5° e para o ângulo de *trim* um valor mínimo de 1°.

A aceleração vertical mínima aplicada aos componentes do guindaste para projeto deve ser conforme a Equação (3).

$$\alpha_v = 1{,}00 + 0{,}0129\, Hs^2 \geq 1{,}07\, g \qquad (3)$$

Onde:

α_v - Aceleração vertical mínima aplicada aos componentes do guindaste, como fração da aceleração da gravidade (g)

2.3.3 ISO 19901-6

Tem como título "requisitos específicos para estruturas offshore - operações marítimas", sendo o título original "s*pecific requirements for offshore structures – marine operations*". Em sua primeira edição, foi publicada em 2009 (ISO, 2009) e tem como objetivo fornecer requisitos e orientações para o planejamento e projeto de operações marítimas, abrangendo o projeto e análise dos componentes, sistemas, equipamentos e procedimentos requeridos para realizar operações marítimas de maneira segura, dentre as quais as atividades de içamento.

É aplicável em operações marítimas de uma grande variedade de estruturas *offshore* tais como estruturas de gravidade, plataformas de pernas tensionadas (TLP), semissubmersíveis, FPSO (*floating production, storage and offloading*), FPS (*floating and production systems*), MOU (*mobile offshore unit*), *templates* submarinos, estruturas de

fundações, sistemas de ancoragem, *topsides* e qualquer outro elemento componente dessas estruturas.

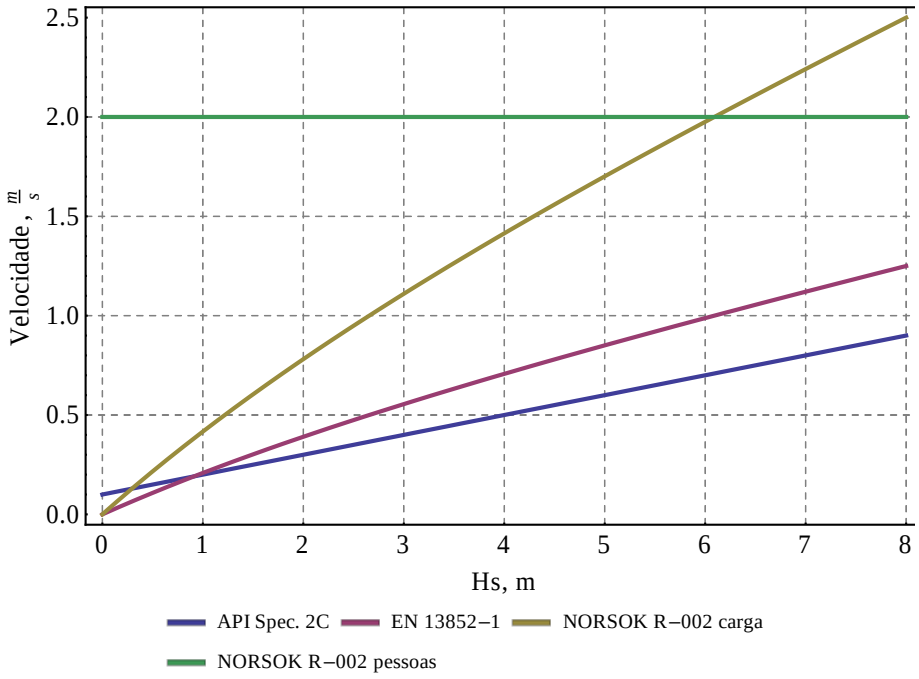

Figura 22. Velocidade de içamento com uma perna de cabo

Não é aplicável nas atividades de construção *onshore*, nas atividades de perfuração e produção, atividades rotineiras durante a vida útil da estrutura, nas atividades de perfuração por MODU (mobile offshore drilling unit), instalações de dutos, *risers* e umbilicais e atividades de mergulho.

Trata das principais atividades das operações marítimas realizadas na indústria *offshore*, tais como, estabilidade dos meios de transporte das estruturas, operações de lastro, *loadout* por vários métodos, transporte, ancoragem provisória, instalação do tipo *float-over*, içamento e finalmente descomissionamento e remoção das estruturas.

Referente ao içamento, abrange o projeto e execução de operações de içamento em terra (*onshore*), em águas abrigadas (*inshore*) e mar aberto (*offshore*), realizadas por navios guindastes, incluindo balsas guindastes, e guindastes em unidades flutuantes.

Em suma, constitui o mais completo guia para as operações marítimas, inclusive de içamento *offshore*, devendo ser a preferida para projetos e verificações de içamento não rotineiro.

Não aborda diretamente as operações de içamento com pessoas, porém, traz importantes informações sobre dados meteorológicos e oceanográficos a considerar, planejamento das operações de içamento, bem como dimensionamento de cabos de aço e acessórios de içamento.

Estabelece que, não havendo estudo específico, deve-se adotar fator de amplificação dinâmica mínimo de 1,30, para projeto das operações offshore com peso içado máximo de 1000 kN, com utilização de um único guindaste. Este fator não deve ser sobreposto aos fatores de amplificação dinâmica já incorporados nas cargas máximas de trabalho dos equipamentos utilizados.

2.3.4 NORSOK Standard R-002 e R-003

Estas normas norueguesas têm como título "equipamentos de içamento" e "uso seguro de equipamentos de içamento" ou no original, "*lifting equipment*" (STANDARDS NORWAY, 2012) e "*safe use of lifting equipment*" (STANDARDS NORWAY, 2004) respectivamente.

A norma NORSOK R-002 detalha os requisitos para equipamentos de içamento e seus acessórios instalados em unidades fixas ou flutuantes, MODU, barcaças, navios e instalações em terra, onde são realizadas operações da cadeia de petróleo e gás.

Trata ainda dos equipamentos de içamento para lançamento e recolhimento de dispositivos de salvatagem bem como das fundações e suportes dos equipamentos abordados.

Estabelece os parâmetros para dimensionamento de guindastes e seus acessórios, bem como os acessórios de içamento, incluindo limites operacionais, combinações de carga, coeficientes de segurança, coeficientes de risco, fatores de amplificação dinâmica, inclusive para içamento de pessoas.

Estabelece um coeficiente de risco (γ_n) mínimo de 1,5 para içamento de pessoas e determina requisitos mínimos para projeto da cesta de transbordo tais como altura significativa de onda mínima de 3,0 metros, carga mínima de projeto de 20,0 kN entre outros.

Quanto ao içamento de pessoas, é a norma que apresenta maior coeficiente de segurança global, bem como restringe o tipo de cesta utilizada, permitindo apenas cestas rígidas com assento e que tenham capacidade de flutuar na posição vertical quando imersas no mar.

A norma NORSOK R-003 trata do planejamento do uso e uso seguro dos equipamentos e acessórios de içamento nas atividades da cadeia de petróleo e gás. Detalha os procedimentos específicos de segurança e operacionais a serem seguidos para diversas situações de içamento.

Possui requisitos gerais e específicos para operações de içamento de pessoas, tratando do planejamento, supervisão, comunicação, equipamentos e acessórios. Define as responsabilidades e atribuições de cada pessoa envolvida, direta ou indiretamente, com a atividade de içamento.

2.3.5 GL Rules for classification and construction

Este guia da Germanischer Lloyd (GERMANISCHER LLOYD, 2011), em sua parte 6, capítulo 9, apresenta técnicas fundamentais para o uso e aplicação de equipamentos de elevação, principalmente para transbordo de pessoal. Essas técnicas devem ser aplicadas tanto nas embarcações de apoio como nas plataformas offshore.

Estabelece parâmetros para o projeto e operação dos equipamentos, bem como velocidades máximas de içamento em transbordo de pessoal (0,5 m/s). Determina que a velocidade máxima do vento para operação seja de 10m/s e a altura significativa de onda seja de até 2 metros. Além disso, estabelece vários outros dispositivos quem devem ser adotados para uso em caso de situações de emergência.

Especifica os critérios e situações que devem ser levados em consideração para escolha do material a ser usado na fabricação dos equipamentos, tais como: o tipo e a magnitude da carga a ser transportada, a propriedades mecânicas do material, entre outros. Em relação à soldas a norma diz que elas devem ser distribuídas de forma que minimize as tensões residuais e deformações excessivas.

Para a operação dos equipamentos de elevação e processo de transbordo, a norma preconiza que a transferência de pessoas entre a embarcação e a plataforma, e vice-versa, deva ser realizada somente com boa visibilidade, iluminação e com condições climáticas favoráveis. O operador de guindaste jamais deverá deixar a cabine de comando com carga sendo içada. Os equipamentos devem passar por inspeção de pessoa qualificada e vários critérios devem ser analisados para garantir a segurança da operação.

As regras que estão contidas neste guia podem ser aplicadas para outros sistemas, desde que sejam observadas as condições do contorno da situação.

O guia sugere que tanto as normas nacionais como internacionais também devem ser levadas em consideração e em caso de conflitos deste guia com outras normas o mesmo deve ser desconsiderado, se isto gerar maior segurança.

2.3.6 NBR 10876

A norma brasileira 10876, “Estruturas oceânicas – Cesta de transporte de pessoal – Especificações” (ABNT, 2011), da Associação Brasileira de Normas Técnicas, especifica as características da cesta utilizada para o transbordo de pessoal entre plataformas marítimas e embarcações.

A norma estabelece os requisitos de fabricação das cestas para transporte de quatro a oito pessoas.

2.3.7 NR-12

A Norma Regulamentadora 12, "Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos", do Ministério do Trabalho e Emprego (BRASIL, 2011), em seu anexo II, trata do içamento de pessoas com a utilização de cesta, especialmente para operações em terra, onde não há alternativa técnica de acesso dos trabalhadores.

Quanto ao içamento de pessoas em mar, restringe-se a requerer que as cestas atendam aos requisitos da NORMAM-05, da Marinha do Brasil (BRASIL, 2010) e que embarcações sejam adaptadas para este tipo de operação.

2.3.8 NR-38

A norma regulamentadora 38, “Segurança e saúde em plataformas de petróleo”, estabelece os requisitos mínimos de segurança e saúde no trabalho a bordo de plataformas utilizadas com a finalidade de exploração e produção de petróleo e gás em operações nas águas Jurisdicionais Brasileiras.

Quanto ao transbordo de pessoal com cesta, o item 13.4, estabelece diversas normas e critérios que devem ser seguidos para garantir a segurança dos tripulantes neste tipo de operação.

3 CARACTERIZAÇÃO DO IÇAMENTO EM FPSO

Abordam-se neste capítulo as características principais do içamento de pessoas e cargas rotineiras em FPSO, iniciando com uma fundamentação sobre este tipo de UEP, descrevendo como suas particularidades interagem e afetam as operações de içamento. Descrevem-se também as características dos principais tipos de guindastes utilizados em FPSO bem como a sua operação e os fatores que nela influenciam.

3.1 CARACTERÍSTICAS QUE INFLUENCIAM O IÇAMENTO

Quando o FPSO tem formato de navio, podem ser relacionadas as seguintes implicações nas operações de içamento, que devem ser levadas em conta no projeto, planejamento e execução das mesmas:

a) os guindastes geralmente são instalados nos bordos, visando o apoio sobre as cavernas e vaus, onde reforços estruturais podem ser adicionados sem interferirem com os tanques de armazenagem. Para definição dos elementos estruturais de navios, ver FONSECA, 1989. Esta posição favorece a operação de içamento *offboard* por necessitar de um raio de operação menor. A Figura 23 ilustra o exemplo de um FPSO com três guindastes de grande porte com lança articulada, sendo dois instalados no bordo de boreste e um na alheta de bombordo;

b) os guindastes instalados nos bordos são mais solicitados, com consequente aumento das forças dinâmicas durante a operação, devido a maior intensidade do movimento de balanço (*roll*), comparado a outros tipos de unidades flutuantes como semissubmersíveis ou TLP (*tension leg platform*);

c) os guindastes são mais solicitados, com consequente aumento das forças dinâmicas durante a operação, devido ao movimento de afundamento (*heave*) ser amplificado em função do período natural deste tipo de embarcação, em relação à outros tipos de cascos (FALTINSEN, 1993);

d) O sistema de posicionamento do FPSO exerce forte influência nos movimentos do mesmo e consequentemente nos movimentos dos guindastes e cargas, sendo importante que as respostas de movimento através dos RAO considerem o sistema de ancoragem;

e) Em FPSO com turret há possibilidade de realizar opração de *pull back*, alterando o aproamento da unidade em relação à condição ambiental governante, atenuando os movimentos. Em FPSO com ancoragem em quadro esta operação permite uma mudança limitada do aproamento.

Figura 23. FPSO OSX-1. Em primeiro plano dois guindastes tipo *knuckle boom* de grande porte e altura (SGUERRI, 2011).

3.2 GUINDASTES *OFFSHORE*

Os guindastes instalados em unidades FPSO geralmente são montados sobre pedestal, que é a estrutura de ligação com o casco e que suporta todo o guindaste. Podem ser projetados e fabricados conforme a norma americana API *Specification* 2C ou a norma européia EN 13852-1, sendo as duas amplamente adotadas mundialmente, porém variando quanto à robustez da estrutura e dispositivos eletrônicos de segurança exigidos.

Em ambos os casos, o único parâmetro de projeto e operação quanto a onda é sua altura significativa (Hs), não levando em conta o período da mesma. Portanto, a carga bruta tabelada (CBT) dependerá, para uma mesma configuração, apenas do raio de operação e de Hs, desprezando o período da onda. As normas, para fins de praticidade, estabelecem um valor aproximado para fatores de amplificação dinâmica para cada tipo plataforma, o que

deixa ainda uma grande faixa de variação de períodos, cujos fatores de amplificação dinâmica (FAD) não previstos serão absorvidos por coeficientes de segurança elevados.

Para efeito de operação de içamento de pessoas, considerando as ações na carga, a não consideração do período da onda pode levar a situações inseguras, onde para um determinado Hs o guindaste tem capacidade de carga para atender ao içamento, porém os movimentos podem ser amplificados, podendo ocasionar acidentes. Por outro lado, pode-se limitar um determinado içamento devido ao Hs, porém, com um período de onda afastado do período ressonante do FPSO, pouco efeito causaria na carga, inviabilizando indevidamente a operação.

A capacidade de carga dos guindastes usuais pode variar de 100 kN até 3000 kN, sendo a faixa mais comum de 150 kN a 500 kN na condição mais favorável de raio de operação e altura de onda. A determinação da capacidade do guindaste a ser instalado no FPSO é baseada nas cargas rotineiras a serem içadas, previsão de manutenção ou substituição de equipamentos estratégicos, entre outros. Os comprimentos das lanças variam de 20 metros a 70 metros, e são determinados em função da geometria da planta de processo, posição das áreas de carga e descarga (*lay down areas*), tipos de operações marítimas necessárias, podendo o raio de operação chegar a 50 metros.

3.2.1 Tipos de guindastes

Os principais tipos de guindastes instalados em FPSO são guindastes com lança tipo caixa, guindastes com lança treliçada e guindastes com lança articulada. Em menor número e em situações especiais, empregam-se também guindastes com lança telescópica e ainda guindastes com fins específicos como guindastes de manuseio de tubos e *risers* (*pipe handling and riser handling cranes*).

O guindaste com lança tipo caixa (*box boom crane*) possui lança com seção retangular, geralmente variável ao longo do comprimento, reduzindo altura e largura no sentido da ponta da lança. A inclinação da lança se dá através de pistão hidráulico, geralmente um ou dois. Nesta configuração, a lança é submetida predominantemente à flexo-compressão ou flexo-compressão com torção durante o içamento.

Dos três tipos de guindastes citados, este é o mais flexível, sendo esperado que tenha períodos naturais maiores que os guindastes treliçados e de lança articulada, considerando um

mesmo porte e capacidade. A Figura 24 mostra um guindaste com lança tipo caixa típico montado sobre pedestal, indicando as principais referências e medidas.

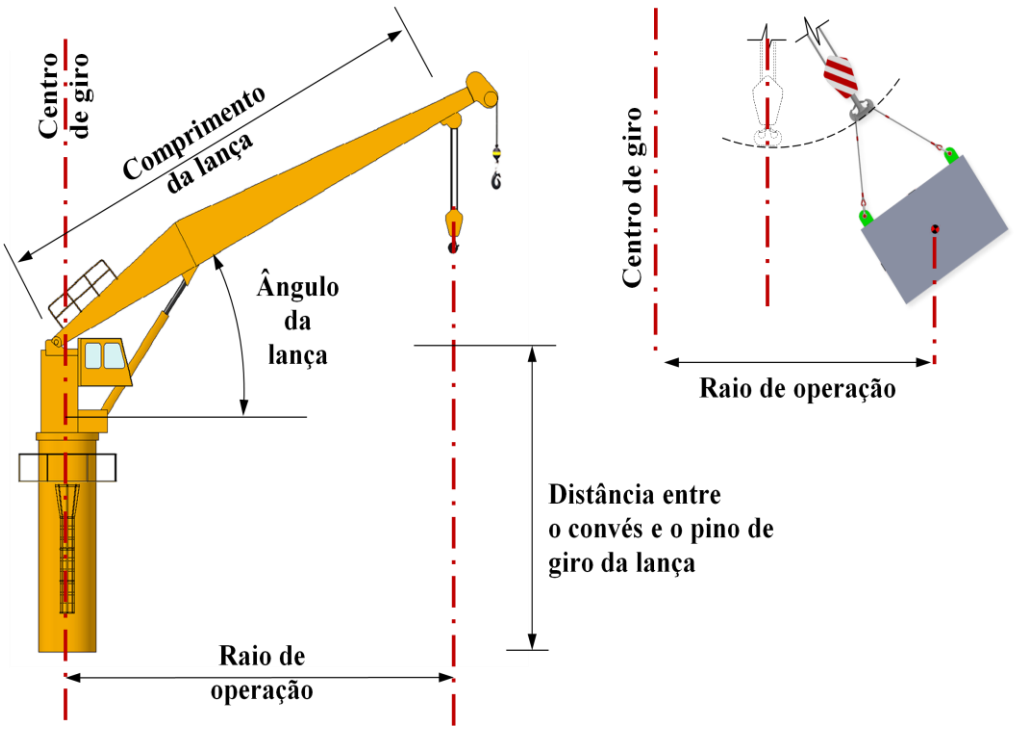

Figura 24. Principais dimensões do guindaste com lança tipo caixa (Roncetti, 2011).

As principais vantagens do guindaste com lança tipo caixa são bom manuseio de cargas altas, facilidade de manutenção da estrutura da lança, controle preciso do movimento da lança devido aos cilindros hidráulicos, menos partes móveis facilitando a movimentação, pode-se aplicar carga em qualquer ponto da lança e menos danos no caso de colisão de cargas descontroladas. Como desvantagem pode-se citar maior peso da estrutura comparado com outros de mesmo porte (NOV, 2011; RONCETTI, 2011).

O guindaste de lança articulada (*knuckle boom cranes)* também possui lança com seção retangular, geralmente variável ao longo do comprimento. A lança é divida em duas partes, sendo ambas articuladas. A inclinação das lanças se dá através de pistões hidráulicos independentes para cada seção, sendo o ajuste do raio de operação feito com a combinação de inclinações diferentes de cada seção, podendo ter raios iguais para inclinações e comprimentos de lança diferentes. As lanças podem estar submetidas à flexo-compressão ou flexo-tração, combinadas com torção durante o içamento, dependendo da geometria.

São menos flexíveis que os guindastes com lança tipo caixa, devendo ter períodos naturais maiores que estes. A Figura 25 mostra um guindaste de lança articulada de grande porte e suas principais partes.

Figura 25. Principais partes de um guindaste com lança articulada (RONCETTI, 2011).

As principais vantagens do guindaste com lança articulada são menor espaço necessário para operação e armazenagem no apoio, a carga pode ser posicionada próxima à ponta da lança, reduzindo o efeito de pêndulo, menor comprimento de cabo necessário para raios curtos diminuindo também o efeito de pêndulo, bem como maior flexibilidade de acesso a áreas restritas por obstáculos. Como desvantagens, podem-se citar maior dificuldade para cargas altas ou raios pequenos, maior necessidade de manutenção e mais partes móveis (NOV, 2011; RONCETTI, 2011).

O guindaste com lança treliçada (*lattice boom crane*) ou simplesmente guindaste treliçado, tem sua lança formada por perfis lineares, soldados, formando uma treliça espacial, sustentada por pendentes de cabo de aço. O ajuste da inclinação da lança e consequentemente do raio de operação, é feito através de cabos de aço e polias ligados aos pendentes. A Figura 26 mostra as principais partes de um guindaste treliçado, mostrando também uma extensão opcional da lança, denominada '*jib*'.

Algumas vantagens do guindaste treliçado são o menor custo de fabricação da lança, maior relação carga / peso do guindaste, estrutura da lança mais leve quando comparado aos outros tipos do mesmo porte e capacidade, lança modular, menos manutenção hidráulica e melhor visão do operador. Algumas desvantagens são a menor resistência da lança a impactos e aplicação da carga somente na ponta da lança.

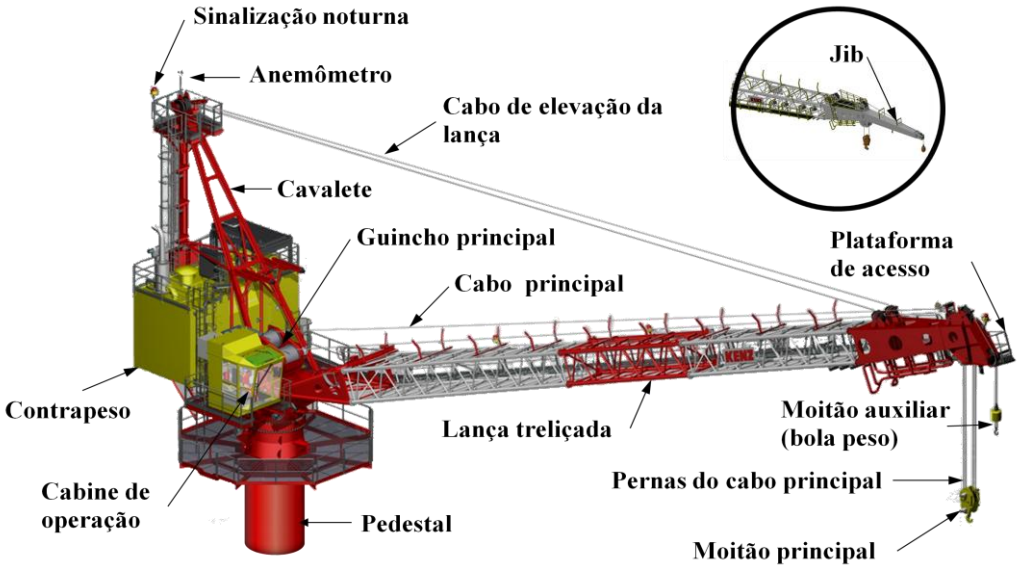

Figura 26. Principais partes de um guindaste treliçado (RONCETTI, 2011).

Os guindastes com lança reta, de comprimento fixo têm desvantagem quando operando com raio curto, pois o comprimento do cabo deve ser longo para permitir a colocação ou retirada da carga do convés do barco de apoio, conforme exemplifica a Figura 27. Trata-se de projeto real de içamento utilizando guindaste treliçado com lança de 60 metros de comprimento e raio de operação de 28 metros, onde foi necessário pagar cabo até o comprimento de 76 metros mais o comprimento das lingas de cabo de aço de amarração da carga, totalizando 93 metros.

3.3 OPERAÇÃO DO GUINDASTE EM FPSO

As operações de içamento são fundamentais para o funcionamento das plataformas, pois a grande maioria dos insumos, equipamentos e a movimentação interna são feitas por guindastes. Para que haja segurança nas operações de içamento é necessária uma sistemática técnica que defina parâmetros e procedimentos a serem seguidos. A seguir são discutidos alguns aspectos desta sistemática para sucesso das operações de içamento.

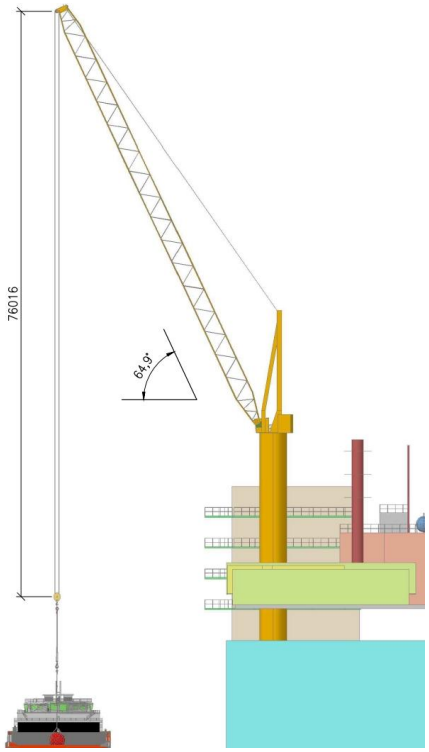

Figura 27. Projeto de içamento *offshore* mostrando longo comprimento de cabo necessário para retirada de carga do barco de apoio (projeto do Autor, 2013).

Os içamentos podem ser classificados sob vários aspectos, entre eles o local onde a carga é movimentada, sendo classificados como *onboard* e *offboard*, ou classificados quanto a complexidade, podendo ser rotineiros ou não-rotineiros.

O içamento *onboard* é o içamento da carga da plataforma para a própria plataforma na qual está fixado o guindaste, não havendo movimento relativo significativo da carga em relação ao guindaste, além do movimento da ponta do mesmo. Neste içamento deve-se utilizar a tabela de carga específica para este tipo, que geralmente é a que permite maior capacidade do guindaste.

O içamento *offboard* é o içamento da carga de ou para outro lugar que não a plataforma onde o guindaste está fixado, como por exemplo, o barco de apoio mostrado na Figura 29, uma barcaça ou outra plataforma. Neste caso há o movimento relativo entre a carga e a ponta do guindaste, aumentando consideravelmente a solicitação neste e consequentemente diminuindo sua capacidade. Neste caso, deve-se utilizar a tabela de cargas para içamento *offboard*, cujos valores de capacidade são em função do raio de operação e da altura significativa de onda (Hs).

O içamento rotineiro é aquele repetitivo, não complexo, feito por guindaste sobre pedestal, conduzido por plano de rigging padrão, podendo este ser genérico. Geralmente é utilizado para cargas padronizadas, como containeres *offshore*, cestas de carga, dutos, entre outras.

O içamento não rotineiro é aquele não repetitivo, conduzido por plano de rigging específicamente para a operação.

O içamento de pessoas é uma operação especial conduzida por critérios diferentes daqueles utilizados para cargas e deve ter planejamento específico, o qual é tratado à frente neste trabalho.

A Influência do vento sobre a carga içada e o guindaste deve ser sempre levada em conta para garantir que este não seja sobrecarregado. Os métodos de consideração da carga de vento variam com a norma adotada para projeto de guindaste. O procedimento mais simples é o adotado pela API *Specification* 2C (API, 2004), onde no projeto do guindaste, uma área exposta ao vento é definida em função da capacidade do mesmo. Caso a carga possua área exposta maior que a área de projeto, reduz-se a velocidade máxima permitida para o vento durante a operação. A Figura 28 mostra a curva de área permitida exposta ao vento (Ap) em função da carga bruta tabelada (CBT) . Caso a área seja maior, a velocidade do vento deve ser reduzida conforme a Equação (4).

$$V_R = V_P \sqrt{\frac{A_w}{A_P}} \tag{4}$$

Onde:

V_R - Velocidade reduzida do vento a ser adotada.

V_P - Velocidade máxima permitida de projeto.

A_w - Área da carga exposta ao vento (m²).

A_P - Área máxima permitida de projeto (m²).

Esta formulação leva em conta apenas o efeito estático da força do vento. No planejamento, deve-se levar em conta o possível efeito dinâmico na carga e no guindaste, bem como cuidados para evitar o descontrole da carga com giro descontrolado. Nota-se ainda que o vento pode ser um componente de amortecimento deste conjunto dinâmico.

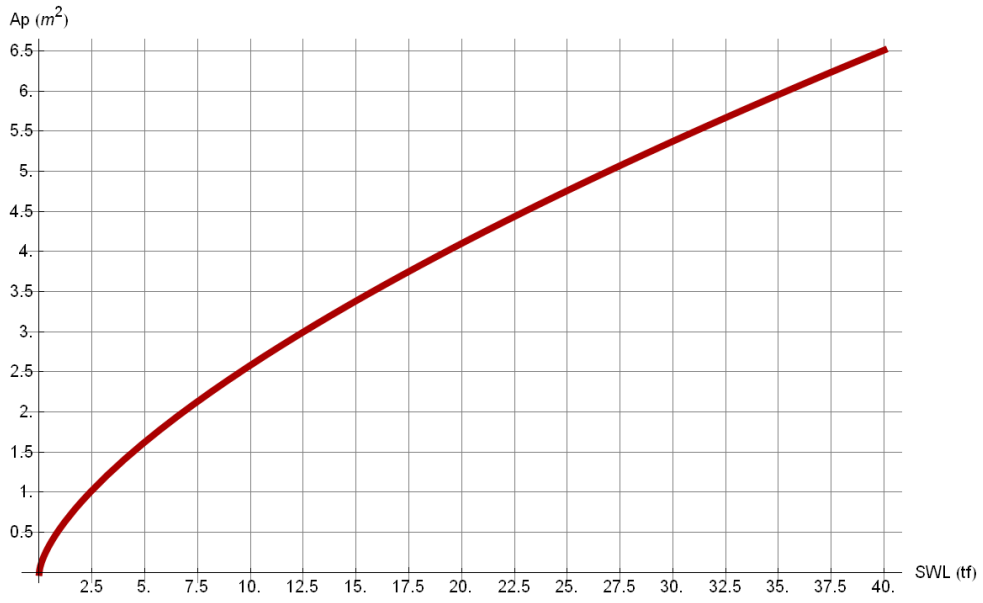

Figura 28. Curva de área permitida exposta ao vento em função da carga bruta tabelada.

Uma possibilidade para reduzir o efeito do vento e da onda no içamento é utilizar o bordo de sotavento para realizar a operação, pois quando estes dois carregamentos estiverem alinhados, o próprio FPSO fornecerá abrigo atenuando seus efeitos, o que é conhecido como "fazer sombra".

Outro fator que deve ser considerado é a posição em que o guindaste está instalado no FPSO, pois em função do movimento predominante pode-se escolher o guindaste que sofre menos influência, como exemplo, em uma situação com movimento predominante de arfagem (pitch) pode-se escolher o guindaste mais próximo da meia-nau.

3.3.1 Execução do içamento

Um dos momentos críticos da operação de içamento é a da colocação ou retirada da carga do barco de apoio, devido ao movimento relativo da carga com a embarcação, que pode amplificar muito os esforços envolvidos, bem como ocasionar choques que danificarão a carga ou poderão causar acidentes.

Portanto, é fundamental o sincronismo do movimento da carga com o movimento do barco de apoio, tarefa que fica a cargo do operador do guindaste, dependendo muitíssimo da habilidade do mesmo.

A Figura 29 mostra uma operação de içamento *offshore* típica em FPSO para retirada de carga do barco de apoio utilizando um guindaste com lança tipo caixa. Nota-se na figura que o cabo do guindaste não está na vertical, o que causará sobrecarga. Offload e subload.

Figura 29. Operação de içamento offshore sendo realizada com guindaste com lança tipo caixa, retirando carga do barco de apoio (acervo do Autor, 2014).

A Figura 30 mostra a sequência em que deve ser realizada a retirada da carga do convés do barco de apoio ou outra embarcação. O operador do guindaste mantém o cabo folgado, conectado à carga (1); a onda chega ao barco, que realiza movimento ascendente, com o cabo ainda folgado (2); no ápice do movimento ascendente, o operador recolhe cabo deixando-o na iminência de erguer a carga (3); no início do movimento descendente do barco de apoio, o operador recolhe o cabo erguendo a carga com velocidade máxima, a fim de evitar que o barco colida com a carga durante o próximo movimento ascendente, que pode ocorrer subitamente.

A Figura 31 mostra a sequência em que deve ser realizada a colocação da carga no convés do barco de apoio ou outra embarcação. O operador do guindaste aproxima a carga sobre o barco de apoio, próximo ao local onde deseja armazená-la (1); a onda chega ao barco, que realiza movimento ascendente, com a carga sobre ele (2); no ápice do movimento descendente, o operador paga cabo deixando a carga mais próxima possível do convés (3); no início do movimento descendente do barco de apoio, o operador paga cabo, baixando a carga

sobre o convés, folgando o cabo, a fim de evitar que o mesmo tracione novamente durante o próximo movimento descendente, que pode ocorrer subitamente.

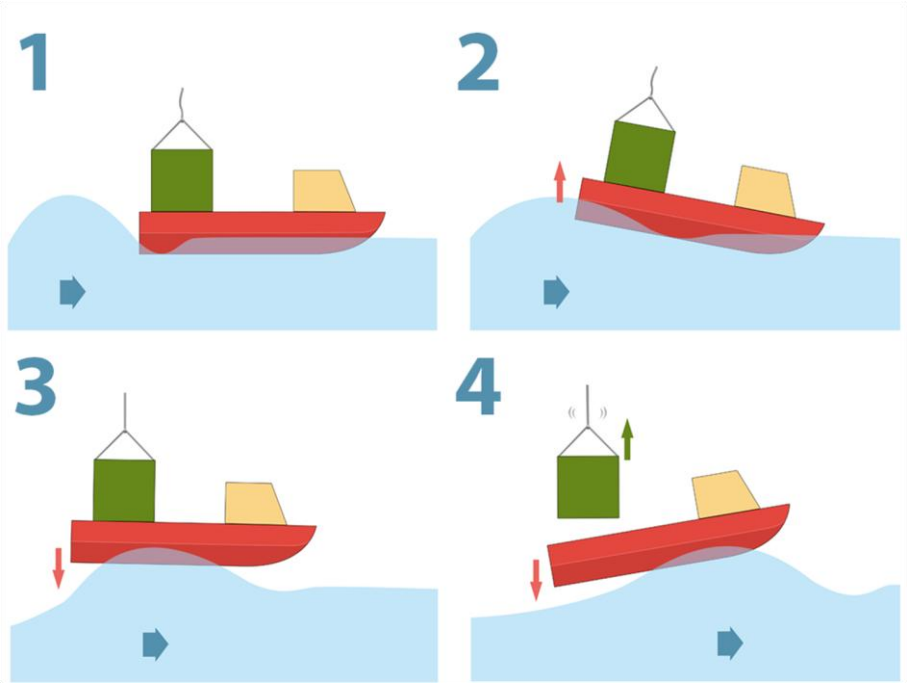

Figura 30. Sequência correta da retirada da carga do barco de apoio (RONCETTI, 2011).

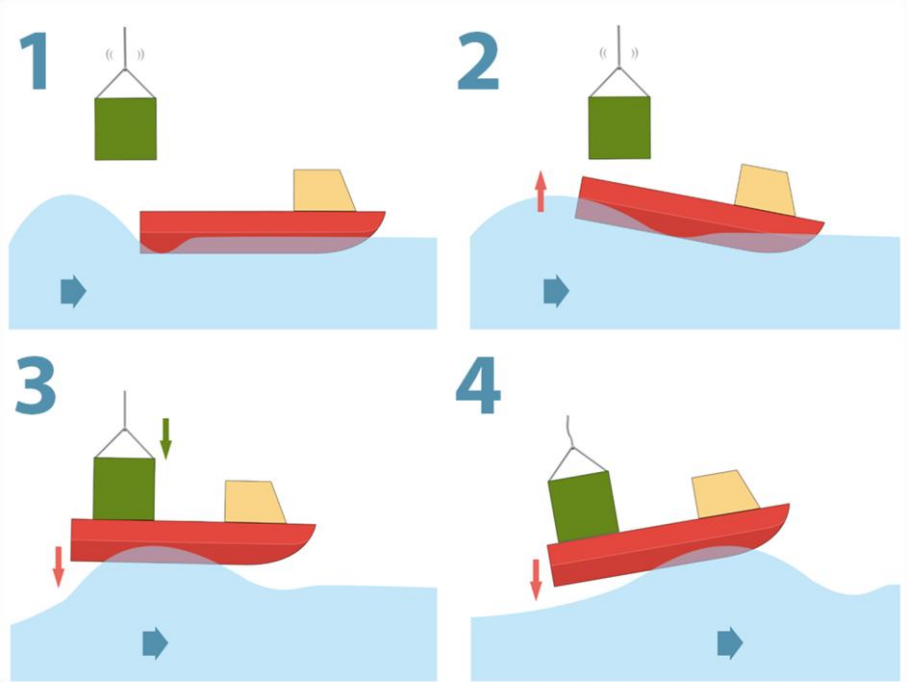

Figura 31. Sequência correta da colocação da carga do barco de apoio (RONCETTI, 2011).

4 CARREGAMENTOS AMBIENTAIS

4.1 INTRODUÇÃO

Toda estrutura flutuante em operação está sujeita a uma série de carregamentos ambientais que introduzem nela movimento ou forças, devendo ser conhecidas e consideradas direta ou indiretamente no projeto, planejamento e execução das operações de içamento offshore.

Segundo Albrecht (2005), a corrente marítima, ou neste texto simplesmente corrente, pode ser considerada como carregamento estático, apesar de existirem alguns efeitos dinâmicos a ela associados, como exemplo vibrações induzidas por vórtices (VIV). Para interesse do içamento, o mais importante é a direção da corrente, pois esta influenciará no aproamento da unidade e consequentemente no seu movimento, e este diretamente no movimento do guindaste e da carga.

O carregamento devido ao vento influencia o içamento em três aspectos: agindo diretamente sobre a carga e o guindaste, agindo como componente da resultante ambiental para aproamento e agindo diretamente no movimento do FPSO. Considerações detalhadas do vento no içamento são feitas no Capítulo 3.

No planejamento e execução das operações de içamento, deve-se levar em conta a direção de cada carregamento ambiental bem como o tipo de sistema de ancoragem da unidade, pois a resultante ambiental geralmente definirá o aproamento do FPSO e este influenciará seus movimentos. A Figura 32 mostra a direção (suell) e sentido de referência para as ações ambientais de vento, mar local (sea), marulho e corrente.

Um exemplo de situação desfavorável para o içamento é quando há forte vento governando o aproamento, formando um ângulo de 90 graus com a direção do marulho. Neste caso as ondas incidirão de través, isto é, transversalmente, causando grandes amplitudes de afundamento (*heave*) e balanço (*roll*), aumentando os efeitos dinâmicos no içamento. Nota-se que as tabelas de carga dos guindastes não levam em conta estas condições, pois somente tem como parâmetro ambiental a altura significativa de onda, devendo este aumento ser levado em conta no planejamento do içamento, aumentando a carga bruta (CBR) requerida do guindaste.

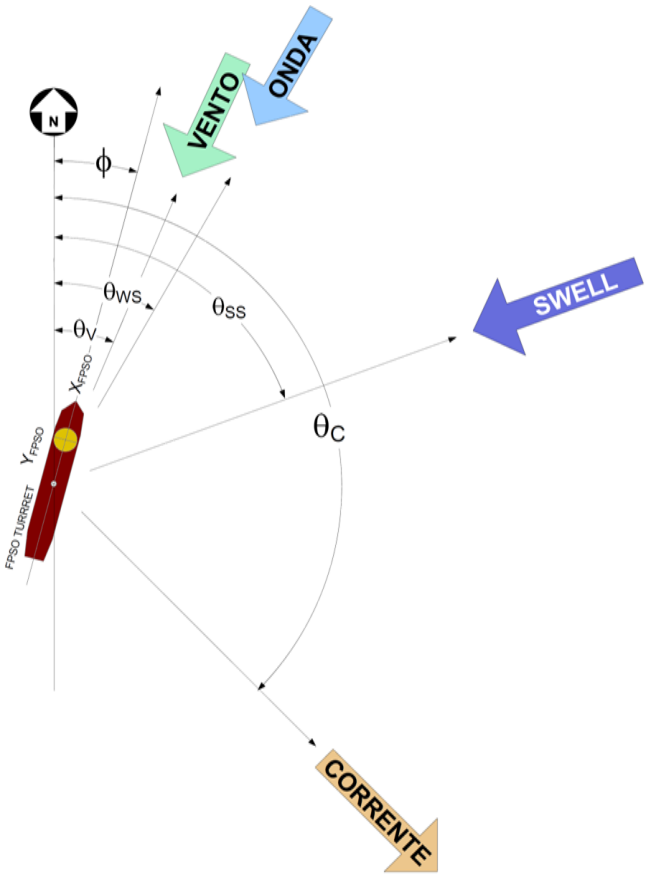

Figura 32. Ângulos de incidência das ações ambientais (adaptada de PAPALEO, 2009)

4.2 ONDAS

Todo tipo de estrutura *offshore*, seja ela fixa ou flutuante, é solicitada com cargas periódicas causadas pelas ondas do oceano. Segundo Journée e Massie (2001) mesmo as estruturas consideradas rígidas respondem de alguma maneira às cargas periódicas causadas pelas ondas, sofrendo acelerações, deslocamentos e consequente aumento dos esforços internos. Portanto, é de extrema importância o conhecimento do comportamento das ondas para resolução de diversos problemas relacionados às estruturas *offshore*.

Journée e Massie (2001) classificam as ondas geradas por ventos em duas categorias básicas: mar local (*sea*) e marulho (*swell*).

Mar local é uma série de ondas geradas pelo campo de ventos local. Tais ondas normalmente possuem cristas pequenas, com o tamanho de 2 a 3 vezes o comprimento aparente da onda. As cristas podem se propagar em direções diferentes entre si, com desvio de até 10º da direção média. Tanto o período como o comprimento dessas ondas variam continuamente.

Marulho (*swell*) é a onda que se propaga para fora da área local onde foi gerada, já não dependendo mais do vento para se propagar, podendo afetar áreas centenas de quilômetros distantes de onde fora gerada. As ondas individuais são mais regulares e as cristas das ondas são mais arredondadas se comparadas com as ondas de mar local, e possuem cristas grandes, de 6 a 7 vezes o comprimento da onda.

Ondas geradas por ventos, via de regra, são muito irregulares, mas mesmo assim podem ser vistas como a superposição de várias ondas harmônicas mais simples, cada uma com suas próprias características como frequência e comprimento, como mostrado na Figura 33. Esse conceito é explorado em diversas aplicações, por permitir que comportamentos irregulares complexos sejam tratados com a teoria de ondas mais simples. Para essa análise é necessário conhecer algumas propriedades das ondas harmônicas, como a relação entre comprimento e período da onda, energia transportada, pressão no fluido, entre outras.

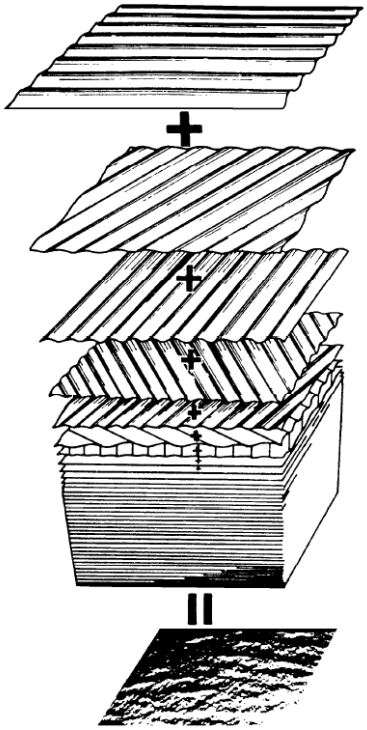

Figura 33. Somatório de várias ondas simples resultando no mar irregular.

Com relação a essas propriedades, ondas são frequentemente classificadas entre duas categorias: ondas de águas profundas e ondas de águas rasas. Ondas de águas profundas são ondas situadas em locais onde a lâmina d'água é maior que a metade do comprimento da onda. O fundo do mar exerce pouca influência em tais ondas. Já ondas de águas rasas são

ondas situadas em locais onde a lâmina d'água é menor que 1/20 do comprimento da onda. O fundo do mar tem ampla influência nas características dessas ondas.

4.2.1 Características e parâmetros

Algumas definições precisam ser feitas para resolução de problemas de engenharia relacionados à ondas harmônicas. A Figura 34 mostra o esquema de uma onda harmônica unidimensional se propagando. O ponto mais alto da onda é chamado de crista, o mais baixo de cavado. A posição de equilíbrio corresponde ao nível da água caso não houvesse ondas presentes (caso hipotético). Na prática, essa posição é tomada como o nível médio da água. O fundo do mar encontra-se a uma distância "d" da posição de equilíbrio. A amplitude de uma onda é a distância da posição de equilíbrio à crista ou ao vale (Ac e At, respectivamente). Em ondas senoidais: Ac = At = A.

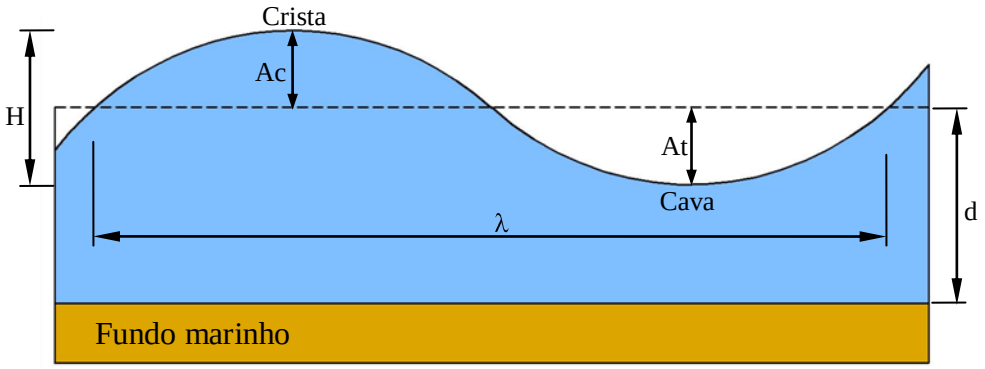

Figura 34. Características de uma onda harmônica.

A altura da onda (H) é medida verticalmente da crista ao vale. Assim, para ondas senoidais:

$$H=2\cdot A \tag{5}$$

Onde:

H - Altura da onda.

A - Amplitude da onda.

A distância horizontal, medida na direção de propagação da onda, entre dois vales sucessivos, ou duas cristas sucessivas, é chamada de comprimento de onda (λ). O tempo que a onda leva para propagar o seu comprimento uma vez, ou seja, completar um ciclo, é chamado de

período da onda (T). A frequência da onda (f) é o inverso do período. A relação entre altura da onda e comprimento de onda (H/ λ) é conhecida como declividade da onda.

Ondas senoidais são expressas em termos dos argumentos angulares, o comprimento de onda é convertido para ângulos usando:

$$k\lambda = 2\pi \;\Rightarrow\; k = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{6}$$

$$\omega T = 2\pi \;\Rightarrow\; \omega = \frac{2\pi}{T} \tag{7}$$

Onde:

k - Número de onda, em rad/m.

ω - freqüência angular, em rad/s.

λ - Comprimento de onda, em metros.

T - Período da onda, em segundos.

Por definição a onda se move um comprimento de onda por período, assim calcula-se a velocidade da onda com:

$$v = \lambda \cdot f = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} \tag{8}$$

Onde:

v - Velocidade da onda, em m/s.

O perfil da onda pode ser obtido, considerando sua propagação no eixo x e no tempo t, como:

$$y = A \cdot \cos(kx - \omega t) \tag{9}$$

Onde:

x - Valor da abscissa no eixo de propagação da onda.

t - Tempo.

y - Elevação da onda na posição x e no tempo t.

Muitas ondas são medidas de um lugar fixo, com instrumentação muito simples, obtendo apenas a elevação da superfície da água como função do tempo naquele ponto. Porém esse tipo de medida retorna apenas valores escalares, não determinando a direção de propagação da onda. É possível medir (ou inferir) a direção da onda usando instrumentos mais sofisticados obtendo, por exemplo, a velocidade em duas direções perpendiculares e relacionando essas medidas com os dados da elevação da superfície (JOURNÉE; MASSIE, 2001).

Quando está disponível o histórico de uma onda irregular é possível realizar uma análise estatística nesses dados. Os dados retirados de campo devem ter um histórico no mínimo cem vezes maior que o período da onda para que os dados sejam estatisticamente confiáveis (JOURNÉE; MASSIE, 2001).

O período de cruzamento zero (Tz), que é o tempo entre duas passagens sucessivas, em ascensão, pela posição de equilíbrio, pode ser encontrado fazendo-se a média dos períodos de uma medição de onda. Os dados da altura passam por um tratamento mais sofisticado: os valores medidos são colocados em ordem crescente e divididos em grupos com determinados intervalos (por exemplo: 0,5 m). Então o número de medições em cada grupo é dividido pelo número total de medições para obter a função densidade de probabilidade. Finalmente esses quocientes são somados cumulativamente para obter a função de distribuição das alturas.

Com esses dados probabilísticos é possível obter algumas características importantes, como a altura média, que é a média aritmética das alturas medidas em um período, e a altura significativa de onda (Hs), que é a altura média das ondas da terça parte com as maiores ondas que ocorrem num um determinado período na região medida. A altura significativa da onda tem um papel importante em várias aplicações práticas. Frequentemente verifica-se uma correlação entre Hs e uma altura de onda estimada visualmente por um observador (JOURNÉE; MASSIE, 2001).

Sendo uma onda irregular qualquer a soma de ondas harmônicas, é possível dizer que sua elevação quando se propagando numa direção x é conforme a Equação (10):

$$y = \sum_{i=0}^{n} A_i \cdot \cos(k_i x - \omega_i t + \varepsilon_i) \tag{10}$$

Onde:

y - Elevação da onda.

n - Número total de ondas superpostas.

ε - Fase aleatória do ângulo componente.

ou seja, uma somatória das elevações de cada uma das ondas harmônicas naquele mesmo ponto, conforme Equação (9).

As fases aleatórias de ângulos são distribuídas entre 0 e 2π e são constantes com o tempo. Para águas profundas ω e k se relacionam pela Equação (11) (FALTINSEN, 1993):

$$\frac{\omega^2}{g} = k \tag{11}$$

Onde:

g - Aceleração da gravidade no local.

O estado do mar é descrito pelo conceito de função de densidade espectral de potência S(ω), que representa a distribuição de energia por intervalo de freqüência Δω.

Faltinsen (1993) expressa o espectro de uma onda harmônica pela relação:

$$\frac{1}{2}{A_i}^2 = \mathrm{S}(\omega) \cdot \Delta\omega \quad \Rightarrow \quad \mathrm{S}(\omega) = \frac{{A_i}^2}{2\Delta\omega} \tag{12}$$

Onde:

Δω - Diferença constante entre duas frequências sucessivas.

S - Espectro da onda.

A elevação instantânea da onda tem distribuição Gaussiana com média zero e variância $\sigma^2 = \int_0^\infty \mathrm{S}(\omega)\mathrm{d}\omega$ (FALTINSEN, 1993), sendo a função contínua S(ω) obtida fazendo Δω → 0 na Equação (12).

O período de pico (Tp) é o período correspondente a frequência de maior energia no espectro da onda. A Figura 35 mostra uma relação entre uma onda medida no tempo (Equação (10)) e o espectro S(ω) da onda no domínio da frequência.

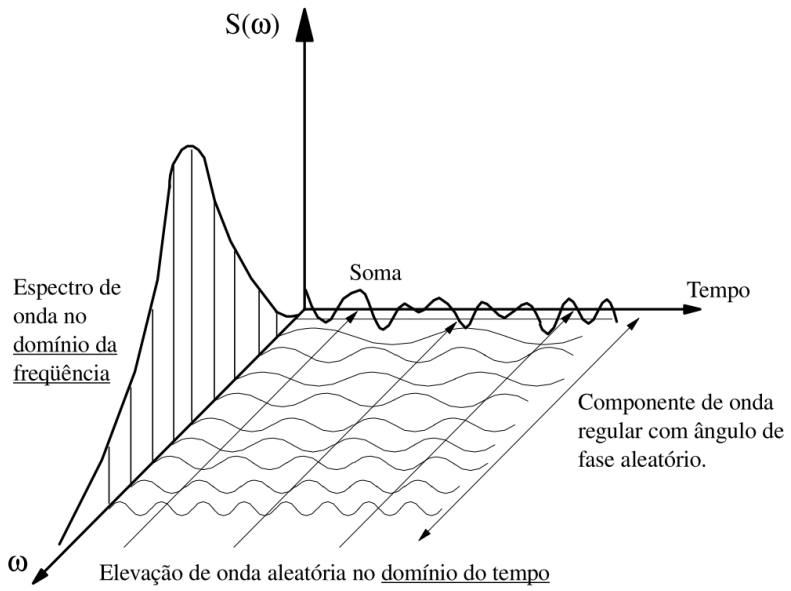

Figura 35. Representação do estado de mar no domínio do tempo e frequência (DANTAS, 2004).

4.2.2 Espectros

O ajuste do modelo espectral é feito em termos de parâmetros estatísticos, tais como fatores de forma espectral, altura significativa de onda e período de pico. Na situação real eles estão variando constantemente, dificultando o uso dos dados. Considera-se então, para estatísticas de curto prazo, que alguns desses valores permanecem constantes (GIRÓN, 2009).

A escolha dos parâmetros a serem variados é feita em função do fenômeno que se deseja estudar. Um espectro muito comum, por exemplo, é o de Pierson-Moskowitz (PM), baseado na altura significativa de onda ou na velocidade do vento.

O espectro utilizado nesse texto foi proposto pelo ITTC em 1984 para mares não plenamente desenvolvidos como decorrência dos resultados do programa *Joint North Sea Wave Project*, e ficou conhecido como JONSWAP. Esse espectro usa 5 parâmetros, porém 3 são considerados constantes, e leva em consideração uma pista eólica de desenvolvimento limitada e profundidades pequenas (SANTIAGO, 2008). Sua formulação original é valida para as condições do Mar do Norte, porém a Petrobras propôs a utilização do espectro JONSWAP na Bacia de Campos, fazendo algumas adaptações para que a formulação se adequasse as condições de mar predominantes neste local. (SENRA, 2004).

Sendo assim, o espectro de ondas JONSWAP ajustado para a Bacia de Campos, em sua forma expandida, é dado pela equação 13:

$$S(f) = \frac{5}{16} \cdot Hs^2 \cdot T_p \cdot \left(\frac{f_p}{f}\right)^5 \cdot (1 - 0{,}287\, ln\, \gamma) \cdot e^{-1{,}25 \cdot \left(\frac{f_p}{f}\right)^{-4}} \cdot \gamma^{e^{\left(\frac{-(f-f_p)^2}{2 \cdot \sigma^2 \cdot f_p{}^2}\right)}} \tag{13}$$

Sendo:

$$\sigma = 0{,}07 \quad para \quad f \leq f_p; \;\; 0{,}09 \quad para \quad f > f_p \tag{14}$$

$$\gamma = 6{,}4 \cdot T_p{}^{-0{,}491} \tag{15}$$

Onde:

f - Frequência, em Hz.

fp - Frequência de pico, em Hz.

γ - Parâmetro de pico ou fator de destaque de pico.

σ - Parâmetro de forma ou largura de pico.

Tp - Período de pico, em s.

A Figura 36 e Figura 37 mostram o espectro de JONSWAP conforme a Equação ((13).

A Bacia de Campos está localizada na costa norte do estado do Rio de Janeiro, região sudeste do Brasil, limitada entre as latitudes de aproximadamente 22° S e 24° S, tendo a costa como fronteira oeste e, à leste a longitude aproximada de 38° W (PINHO, 2003). As ondas de maiores alturas são provenientes da direção sudoeste. Para um período de retorno de um ano elas apresentam Hs igual a 5,70 m, Tp igual a 13,70 s e altura máxima de 10,70 m. Para um período de retorno de cem anos, as ondas de sudoeste apresentam Hs igual a 7,80 m, Tp igual a 15,35 s e altura máxima de 14,60 m.

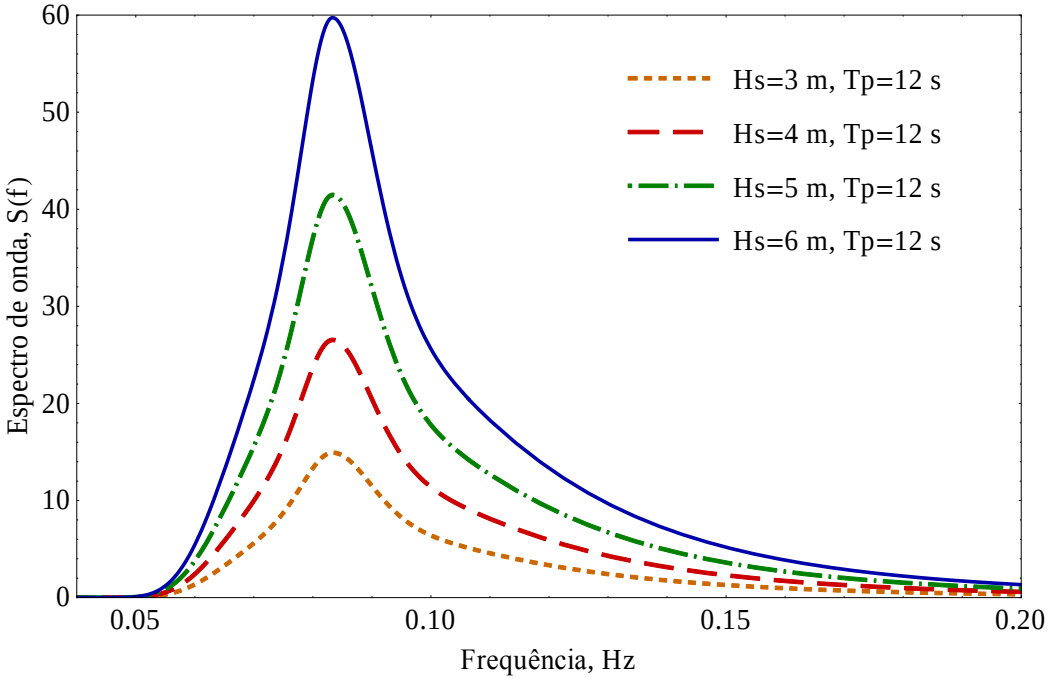

Figura 36. Exemplo do espectro de onda de JONSWAP ajustado para Bacia de Campos, com Tp = 12 s.

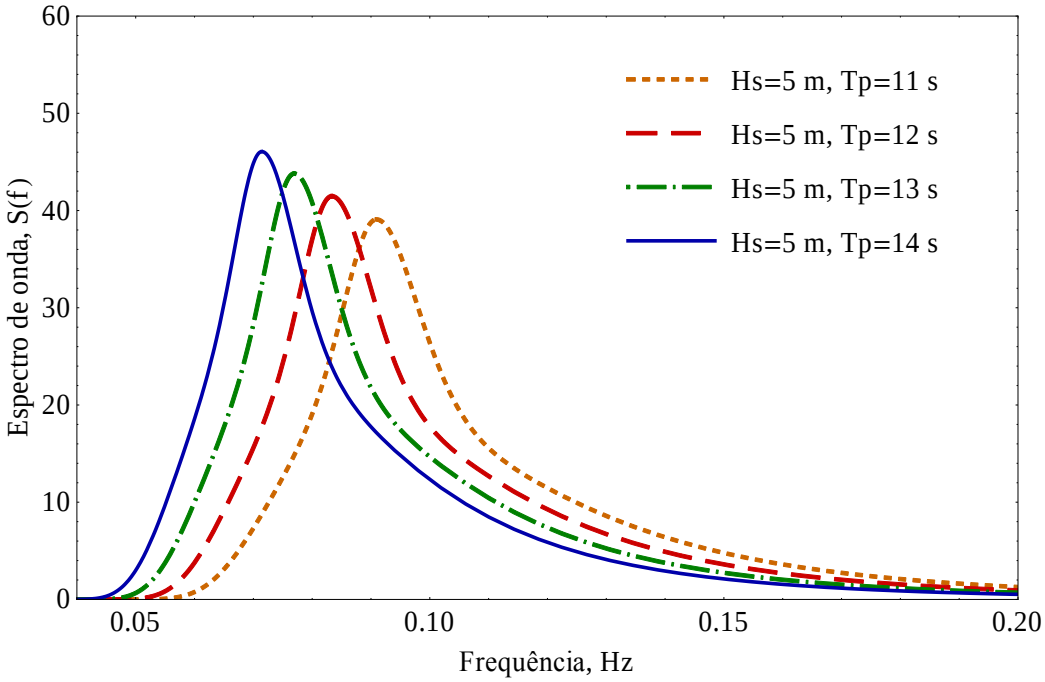

Figura 37. Exemplo do espectro de onda de JONSWAP ajustado para Bacia de Campos, com Hs = 5,0 m.

4.2.3 Distribuição probabilística

Uma das técnicas de suma importância para entendimento do clima de ondas de uma região é a distribuição conjunta de probabilidades de altura significativa (Hs) e período de pico (Tp). Usando essa metodologia podem-se inferir pares extremos de Hs e Tp, ou permitir a interpolação de valores que se desejam conhecer.

A distribuição de probabilidades de valores extremos está relacionada ao ajuste de uma distribuição referente aos dados contidos em uma amostragem de valores extremos observados. Dessa forma, para determinar a distribuição de uma variável aleatória, utiliza-se um conjunto de dados com valores máximos ou mínimos registrados para que uma distribuição de probabilidades seja ajustada a esses valores (OLIVEIRA, 2009).

Exemplos de aplicação prática são as análises de esforços extremos, fadiga, estabilidade de uma estrutura oceânica entre ondas, que requerem informações sobre o estado de mar. Nessas aplicações é fácil perceber que as ondas com maiores alturas oferecem certos riscos devido à grande energia que possuem, porém uma estrutura capaz de resistir a grandes ondas pode se desestabilizar com ondas pequenas que tenham Tp próximo ao período natural de vibração da estrutura (RIBEIRO et al, 2005).

Considera-se medições que gerem amostras com n elevações y, obtidas com intervalos constantes de tempo iguais a Δt, que são as séries temporais. Como mencionado anteriormente, o tempo de medição deve ser pelo menos cem vezes o maior período de onda observado durante a medição. Quando mais longa a medição maior a precisão, inclusive para ser levar em conta a mudança no nível das marés. A média dos n valores de elevações dará a posição de equilíbrio.

O desvio padrão é dado pela equação:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} {y_i}^2} \tag{16}$$

Onde:

σ - Desvio padrão.

Journée e Massie (2001) estabelecem uma relação entre o desvio padrão e altura significativa mostrada abaixo:

$$Hs = 4 \cdot \sigma \tag{17}$$

Com os dados dessa medição faz-se uma distribuição probabilística para cálculo de probabilidade. Existem diversos tipos de distribuição que podem ser usadas para tal finalidade. Depois de escolhida a função f(x) para a distribuição, a probabilidade P de um valor real de onda ser maior que determinado valor a é dada por:

$$P(y > a) = \int_a^{\infty} f(x)dx \tag{18}$$

Algumas distribuições usuais são mostradas abaixo:

A distribuição Gaussiana, também conhecida como distribuição normal, é extremamente importante no estudo de estatística, não só para ondas marítimas, pois qualquer outra distribuição de probabilidade se aproxima da Gaussiana quando a amostra é suficientemente grande, como provado pelo Teorema Limite Central. A função densidade de probabilidade para a distribuição Gaussiana é dada por (JOURNÉE; MASSIE, 2001):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left[-\left(\frac{x}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2\right]} \tag{19}$$

Onde:

σ - Desvio padrão.

μ - Média.

x - Variável a ser estudada.

Como mencionado anteriormente, no estudo de elevações de ondas marítimas, a média dessas elevações é a posição de equilíbrio e, portanto, corresponde a elevação zero.

A distribuição de Rayleigh também é bastante usada, especialmente quando a faixa de frequências em um campo de ondas não é muito larga, condição chamada de espectro de frequências de banda estreita. Ondas, sejam elas de mar local ou marulho, frequentemente satisfazem essa condição, e nesse caso distribui-se a elevação normalmente e a amplitude por

Rayleigh. A expressão da função densidade de probabilidade para a distribuição de Rayleigh é dada por (JOURNÉE; MASSIE, 2001):

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} \cdot e^{\left[-\left(\frac{x}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2\right]} \tag{20}$$

Onde:

σ - Desvio padrão.

x - Variável a ser estudada.

A distribuição de Weibull foi proposta em 1951 a *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) pelo engenheiro sueco Ernst Hjalmar Waloddi Weibull, que a usou em sete casos distintos para mostrar empiricamente sua eficácia. A função densidade de probabilidade de Weibull é dada por (BAILEY E DELL, 1973 apud BINOTI ET AL, 2010):

$$f(x) = \frac{\gamma}{\beta} \cdot \left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)^{\gamma-1} \cdot e^{\left[-\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)^{\gamma}\right]} \tag{21}$$

Onde:

σ - Desvio padrão.

x - Variável a ser estudada.

α - Parâmetro de locação.

β - Parâmetro de escala.

γ - Parâmetro de forma.

Após a escolha da distribuição apropriada, aplicação da função densidade de probabilidade e cálculo das probabilidades é possível prever os valores extremos de altura e período de pico das ondas solicitantes em estruturas offshore, tanto fixas como flutuantes, tendo em mente um determinado período de retorno. Portanto é possível a prevenção de falhas estruturais devido ao efeito dinâmico das cargas das ondas, como a ressonância ou a fadiga, que muitas vezes são críticas para tais estruturas.

Os conjuntos de valores das características das ondas podem ser agrupados e organizados numa tabela como a mostrada na Figura 38, que é baseada em dados da Bacia de Campos e de Santos. O número em cada célula dessa tabela indica a chance, com base no total

de observações (32623 nesse caso), que uma onda tenha altura significante entre os valores na coluna da esquerda e esteja na faixa de período listada, no topo e no fundo da tabela.

DIAGRAMA DE DISPERSAO: EIXO HORIZONTAL: tp
BACIA DE CAMPOS EIXO VERTICAL: hs

HS TOTAL (m)	2.0 3.0	3.0 4.0	4.0 5.0	5.0 6.0	6.0 7.0	7.0 8.0	8.0 9.0	9.0 10.0	10.0 11.0	11.0 12.0	12.0 13.0	13.0 14.0	14.0 15.0	15.0 16.0	16.0 17.0	17.0 18.0	18.0 19.0	19.0 20.0	freq	%
.00 .25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00
.25 .50	0	1	0	0	0	0	0	1	1	2	5	1	0	2	0	0	0	0	13	.04
.50 .75	0	1	23	26	53	32	59	17	21	26	22	12	18	6	2	0	0	0	318	.97
.75 1.00	0	5	159	247	176	219	184	104	60	86	58	52	37	12	5	0	0	0	1404	4.30
1.00 1.25	0	0	154	941	937	506	259	199	175	187	219	102	67	22	5	4	1	0	3778	11.58
1.25 1.50	0	0	36	1047	1927	998	413	236	230	261	265	162	97	23	11	6	2	0	5714	17.52
1.50 1.75	0	0	2	303	2254	1534	408	236	250	237	264	219	108	37	10	2	0	0	5864	17.98
1.75 2.00	0	0	0	59	1353	1558	404	233	240	217	211	168	117	18	7	3	1	0	4589	14.07
2.00 2.25	0	0	0	3	458	1566	535	230	219	186	206	115	74	26	7	7	1	0	3633	11.14
2.25 2.50	0	0	0	1	89	1223	401	218	184	151	159	87	40	25	12	1	0	0	2591	7.94
2.50 2.75	0	0	0	0	16	610	454	185	160	106	130	64	38	24	3	0	2	0	1792	5.49
2.75 3.00	0	0	0	0	0	114	443	120	140	90	78	56	49	9	3	2	1	0	1105	3.39
3.00 3.25	0	0	0	0	0	12	233	121	98	78	62	46	29	11	4	5	0	0	699	2.14
3.25 3.50	0	0	0	0	0	1	71	95	78	67	48	42	14	3	2	1	0	0	422	1.29
3.50 3.75	0	0	0	0	0	1	17	87	56	36	28	20	17	3	0	3	0	0	268	.82
3.75 4.00	0	0	0	0	0	0	3	25	31	31	19	20	13	6	5	1	0	0	154	.47
4.00 4.25	0	0	0	0	0	0	0	7	24	24	14	8	14	11	5	0	0	0	107	.33
4.25 4.50	0	0	0	0	0	0	0	5	12	14	21	8	8	5	7	2	0	0	82	.25
4.50 4.75	0	0	0	0	0	0	0	0	4	9	7	4	1	4	0	0	0	0	29	.09
4.75 5.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	6	2	7	2	4	0	0	0	28	.09
5.00 5.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	4	1	0	0	0	0	0	10	.03
5.25 5.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	2	1	0	0	0	0	7	.02
5.50 5.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	3	1	0	0	0	0	11	.03
5.75 6.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	3	.01
6.00 6.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	.01
6.25 6.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00
6.50 6.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00
6.75 7.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00
7.00 7.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00
7.25 7.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00
freq.	0	7	374	2627	7263	8374	3884	2119	1983	1818	1827	1200	756	254	92	37	8	0	32623	
%	.00	.02	1.15	8.05	22.26	25.67	11.91	6.50	6.08	5.57	5.60	3.68	2.32	.78	.28	.11	.02	.00		
hs medio	.00	.75	1.02	1.28	1.56	1.89	2.08	2.11	2.13	2.05	2.00	2.04	2.07	2.26	2.46	2.35	1.99	.00		

Figura 38. Diagrama de dispersão para a Bacia de Campos e Santos (BOMBOS, 1999 apud SOUZA, 2014).

Essa tabela é chamada de diagrama de dispersão, e pode ser usada para determinar a probabilidade das ondas excederem certo estado de mar em longos prazos. A probabilidade é calculada dividindo o número da célula pela soma de todos os números de todas as células na tabela. Por exemplo, para a tabela mostrada, a probabilidade de uma onda ter Hs entre 2,0 e 2,25 m e período entre 6 s e 7 s é dada por:

$$P\{2{,}0 < Hs < 2{,}25 \;\&\; 6 < Tz < 7\} = \frac{458}{32623} = 0{,}014 = 1{,}4\%$$

Caso seja necessário calcular, por exemplo, a probabilidade de ondas com Hs maior que 5 m ocorram basta apenas somar os valores de todas as casas com ondas maiores que 5 m e dividir o valor pela soma total, assim:

$$P\{Hs > 5\,m\} = \frac{10 + 7 + 11 + 3 + 2}{32623} = 0{,}001 = 0{,}1\%$$

4.2.1 Simulação numérica de séries temporais

Devido à complexidade da dinâmica de superfície das ondas tornou-se comum a pratica de simular estados de mar para obter informações de várias estatísticas que não poderiam ser obtidas analiticamente. Essas simulações podem ser algumas vezes feitas em laboratório, mas na maioria das vezes, é preferível uma simulação numérica em computadores.

Existem diversos métodos de simular digitalmente séries temporais aleatórias, efetuar a discretização do espectro e determinar períodos, amplitudes e fase de cada componente da onda regular. Em geral, as fases são geradas aleatoriamente a partir de uma distribuição uniforme de probabilidade no intervalo (0, 2π) radianos. Em seguida as amplitudes de cada componente de onda são determinadas a partir da parcela de energia a ela associada no espectro.

A discretização do espectro de mar, em termos de um somatório de várias componentes de uma onda regular, é uma das etapas mais importantes da análise aleatória. Em termos gerais, o procedimento consiste em dividir o espectro em n faixas com intervalo de frequência Δw_n. Cada uma destas faixas corresponde a uma componente de onda regular, para a qual devem ser determinados os períodos, as amplitudes e as fases (SENRA, 2004).

Como a geração de fases é aleatória, deve-se determinar as amplitudes a partir dos intervalos de frequência arbitrados, ou, inversamente, determinar os intervalos de frequência a partir das amplitudes arbitradas. De qualquer maneira será obtido um valor de frequência a ser escolhido no intervalo desejado.

Para que sejam determinados esses intervalos, os métodos mais usuais, inclusive usados pelo PROSIM, são (SENRA, 2004):

a) Considerar intervalos de freqüências constantes;

b) Considerar intervalos de freqüências constantes, com o valor da frequência tomado aleatoriamente dentro do intervalo;

c) Considerar amplitudes constantes.

4.2.2 Função de transferência de movimento (RAO)

O FPSO apresenta movimento de corpo rígido quando sofre a incidência das ondas, por isso a unidade flutuante sofre diversos tipos de deslocamento. Portanto é possível calcular a resposta da estrutura quando submetida a uma onda. Se uma função da resposta dinâmica da estrutura, devido à incidência de ondas sobre uma embarcação, for construída a partir de um intervalo de frequências de interesse dadas para uma estrutura offshore, então esta é chamada de Operadores de Amplitude de Resposta – RAO (do inglês: *Response Amplitude Operator*) – ou Função de Transferência de Movimento. A função é assim chamada porque permite que uma função do comportamento da excitação se transforme em uma função que descreve a resposta dinâmica da estrutura para uma onda de amplitude unitária. (CHAKRABARTI, 1987 apud BATALHA, 2009).

Quando computados os RAO, as ondas são consideradas regulares e o intervalo de frequências é discretizado de tal forma que a função de transferência seja gerada para o intervalo de frequências com respostas dinâmicas relevantes para o problema. Segundo Batalha (2009), no campo a função de transferência é construída da seguinte forma:

a) Para uma dada condição de carregamento ou operação dos tanques da unidade, é definida a posição do centro de movimentos, em torno do qual o navio se movimenta. A leitura dos movimentos será realizada para este ponto.

b) É definido também o aproamento do navio e o ângulo de incidência das ondas.

c) Para um dado intervalo de frequências, são medidas as amplitudes de resposta da unidade devido à incidência de ondas de altura unitária (ou amplitude unitária, dependendo do método adotado) para cada freqüência. A discretização do intervalo vai depender do comportamento do navio e da forma do espectro de mar em cada intervalo de frequências.

Também é possível calcular o RAO para uma embarcação usando a Teoria das Faixas. A Teoria das Faixas é um método computacional no qual as forças e movimentos de corpos flutuantes tridimensionais podem ser determinados usando resultados da teoria potencial bidimensional. Ela é desenvolvida para resolver problemas não lineares de movimento de embarcações no domínio do tempo (BANDYK, 2009).

O desenvolvimento da teoria assume que o navio é um conjunto de um número finito de segmentos bidimensionais que são conectados uns aos outros rigidamente. Cada um

desses segmentos tem forma igual à seção transversal do navio que ele representa. Cada seguimento é tratado hidrodinamicamente como um cilindro flutuante infinitamente longo. O modelo hidrodinâmico usa condições de superfícies livres linearizadas para eficiência computacional e estabilidade, e também condições de contorno de corpo exatas para contemplar eventos como culapagem (*slamming*) e submersão (BANDYK, 2009).

No apêndice A são apresentados os RAOs para a unidade FPSO em estudo.

5 ANÁLISE DINÂMICA

A dinâmica é o ramo da mecânica que estuda o movimento de um corpo e as causas desse movimento. Portanto, um sistema dinâmico é aquele que tem partículas que variam de posição com o tempo. Desse modo uma estrutura ao ser submetida a carregamentos dinâmicos também responde a tais carregamentos dinamicamente, ou seja, as tensões e deformações que ela sofre irão variar com o tempo.

Segundo Clough (2010), existem duas diferenças principais entre a análise estática e a análise dinâmica de estruturas. A primeira é que, ao contrário da estática, a análise dinâmica apresenta mais de uma solução, pela própria natureza dos carregamentos que variam com o tempo, fazendo com que seja necessário determinar as tensões e deformações em todo o histórico útil da estrutura. A segunda, mais relevante, é que ao ser submetida a um carregamento dinâmico a estrutura apresentará forças inerciais que irão se opor as acelerações impostas aos elementos da estrutura. Portanto os esforços internos devem equilibrar não apenas os carregamentos externos, mas também as forças inerciais resultantes da aceleração da estrutura.

A análise de um sistema contínuo submetido à vibração é portanto muito complexa, visto que as forças inerciais dependem dos deslocamentos aos quais a estrutura foi submetida e os deslocamentos, por sua vez, também variam com a magnitude das forças inerciais. Tal problema só pode ser formulado com o uso de equações diferenciais parciais. Porém é comum que na prática faça-se uma discretização do sistema com o objetivo de simplificar a parte matemática do problema.

Qualquer objeto formado por um material elástico, e mesmo as pequenas moléculas que formam os objetos macroscópicos, possuem uma certa vibração natural. Quando perturbado, o objeto continuará a vibrar, com sua própria frequência particular, sem a ação de forças externas. Essa frequência com que ele oscila é chamada frequência natural, e seu valor depende de vários fatores tais como a elasticidade, forma e peso do sistema. Ao período associado à frequência natural denomina-se período natural (RAO, 2009).

Quando a frequência de movimento de um sistema aproxima de sua frequência natural de vibração, existe uma tendência do sistema de oscilar em amplitudes cada vez mais altas. Dize-se então que o sistema entrou em ressonância. É importante que o carregamento dinâmico aplicado a uma estrutura não tenha frequências próximas as naturais, para que a

estrutura não entre em ressonância, o que pode causar graves falhas estruturais devido ao excesso de deslocamento com a alta amplitude da vibração.

Se, durante a vibração, nenhuma energia do sistema for perdida ou dissipada dize-se que a vibração é livre. Caso haja alguma dissipação dize-se que a vibração é amortecida. Em alguns sistemas a quantidade de amortecimento é tão pequena que pode ser desprezada, porém considerar o amortecimento é essencial em sistemas próximos à ressonância. Quando se trabalha com vibrações amortecidas é comum o uso da frequência natural amortecida, que é uma fração da frequência natural livre diminuída devido ao amortecimento (RAO, 2009).

5.1 ANÁLISE MODAL DO CABO DO GUINDASTE

Com objetivo de definir os períodos naturais e modos de vibração do conjunto cabo e carga, executa-se a seguir, análise modal numérica para cabos com comprimentos que se pretende utilizar no presente trabalho.

O conjunto cabo do guindaste e carga pode ser representado estruturalmente por uma viga vertical com a extremidade superior apoiada com apoio de terceiro gênero com restrição de translação e na outra extremidade, livre, com uma massa concentrada representando a carga.

Para a obtenção correta dos períodos naturais, no modelo numérico é necessário realizar a análise considerando a rigidez do cabo tracionado, o que é feito aplicando-se uma tração inicial no mesmo, equivalente ao peso da massa.

A desconsideração da massa na extremidade inferior do cabo ou a desconsideração da pré-tração, aumenta significativamente o período natural ou conduz a resultados inadequados para o modelo do conjunto cabo e carga, conforme comprovado através de formulação apresentada por Karnovsky (2001).

A análise modal do cabo foi realizada no software Midas Gen (MIDASOFT, 2014) para diferentes comprimentos de cabo (5, 15, 20, 25, 30, 35 e 40 metros) e diferentes massas: 0,3518 kN/g, 0,4742 kN/g, 0,5966 kN/g, 0,7189 kN/g e 10,0000 kN/g, sendo g a aceleração da gravidade. Levou-se em conta no modelo a massa do cabo, conforme propriedade indicada na Tabela 3.

Para efeito de comparação com os modelos numéricos, foi utilizado um modelo analítico de pêndulo simples para pequenas angulações, cujo período natural de vibração é calculado pela Equação (22).

$$T_s = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \tag{22}$$

Onde:

T_s - Período natural fundamental do pêndulo, em segundos.

L - Comprimento do pêndulo, em metros.

g - Aceleração da gravidade, em m/s^2.

O uso desse modelo é justificável devido a pequena diferença de resultado entre o modelo analítico de pêndulos com grandes deslocamentos: a diferença no período natural é de no máximo 0,25 segundos para o comprimento de 40 metros, diminuindo com o comprimento.

A Tabela 1 mostra os períodos naturais para o primeiro modo de vibração, obtidos pela análise considerando tração inicial nos cabos, para os diferentes comprimentos e cargas analisados. O primeiro modo de vibração é pendular e os demais modos são em forma de onda, sendo que a curva do segundo modo tem dois nós. Os períodos naturais dos modos mais altos são bem inferiores ao do primeiro modo, por exemplo, para o cabo com 40 metros de comprimento 2,58 s, 1,33 s e 0,89 s para o segundo, terceiro e quarto modos de vibração respectivamente.

Tabela 1. Períodos naturais dos cabos para o primeiro modo de vibração.

Comp. do Cabo	**Período natural, s**				
	Massa içada pelo cabo, kN/g				
	0,35	**0,47**	**0,60**	**0,72**	**10,00**
5 m	4,53	4,52	4,51	4,51	4,44
15 m	7,99	7,93	7,90	7,88	
20 m	9,30	9,21	9,17	9,14	
25 m	10,50	10,38	10,31	10,26	
30 m	11,60	11,44	11,35	11,29	
35 m	12,63	12,44	12,32	12,25	
40 m	13,62	13,38	13,24	13,15	12,60

Nota-se que a variação da massa considerada na ponta do cabo tem pouca influência sobre o período natural do sistema, o que se aproxima do comportamento de um pêndulo simples ideal, cujo período independe da massa do objeto que oscila na ponta do cabo. De fato, os valores de períodos obtidos estão bem próximos dos períodos de pêndulo simples com mesmo comprimento de cabo, conforme mostrado na Figura 39, justificando a adoção da Eq. (22) para análise dos cabos desde trabalho.

O gráfico da Figura 39 mostra a variação do período natural de movimento de pêndulo simples do cabo do guindaste em função do comprimento, para vibração de pêndulo simples para a faixa de comprimento adotada. Nota-se que os períodos naturais estão dentro da faixa de períodos das ondas adotadas e tem coincidente o período natural de *heave* do FPSO para aproamento de 30°, igual a 11,5 segundos, com o período natural do cabo de comprimento 32,8 metros.

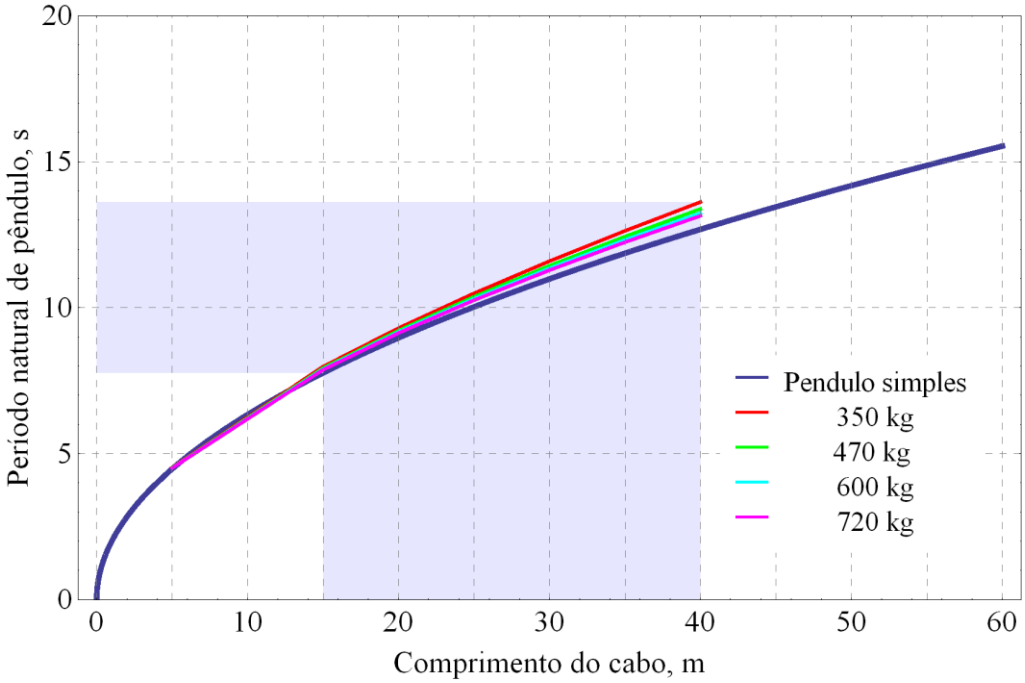

Figura 39. Períodos naturais do cabo do guindaste com massa acoplada, para vibração de pêndulo.

Para determinação dos períodos naturais de vibração axial ao cabo para cada peso de carga, foi utilizada a formulação de vibração de sistema com um grau de liberdade. Os resultados da análise desconsiderando a tração inicial, estão expostos no gráfico da Figura 40. Devido à rigidez axial do cabo, os períodos de outros modos de vibração são muito menores que os períodos de pêndulo, não trazendo influências significativas ao içamento.

No cálculo do período natural axial, deve-se considerar um cabo equivalente quando houver mais de uma perna de cabo entre o moitão e a ponta da lança. Neste caso, tem-se um conjunto de molas paralelas, cuja rigidez equivalente é a soma da rigidez individual.

O período natural axial para o cabo equivalente é calculado pela Equação (23).

$$T_A = 2\pi\sqrt{\frac{L\,(\frac{P}{g} + \gamma\frac{L}{3g})}{n\,E\,A}} \tag{23}$$

Onde:

T_A - Período natural fundamental axial do cabo, em segundos.

L - Comprimento do cabo, em metros.

P - Peso da massa içada pelo cabo, em kN.

γ - Peso específico do cabo, kN/m.

n - Número de pernas de cabo.

E - Módulo de elasticidade do cabo, kN/m^2.

A - Área da seção transversal do cabo, m^2.

g - Aceleração da gravidade, em m/s^2.

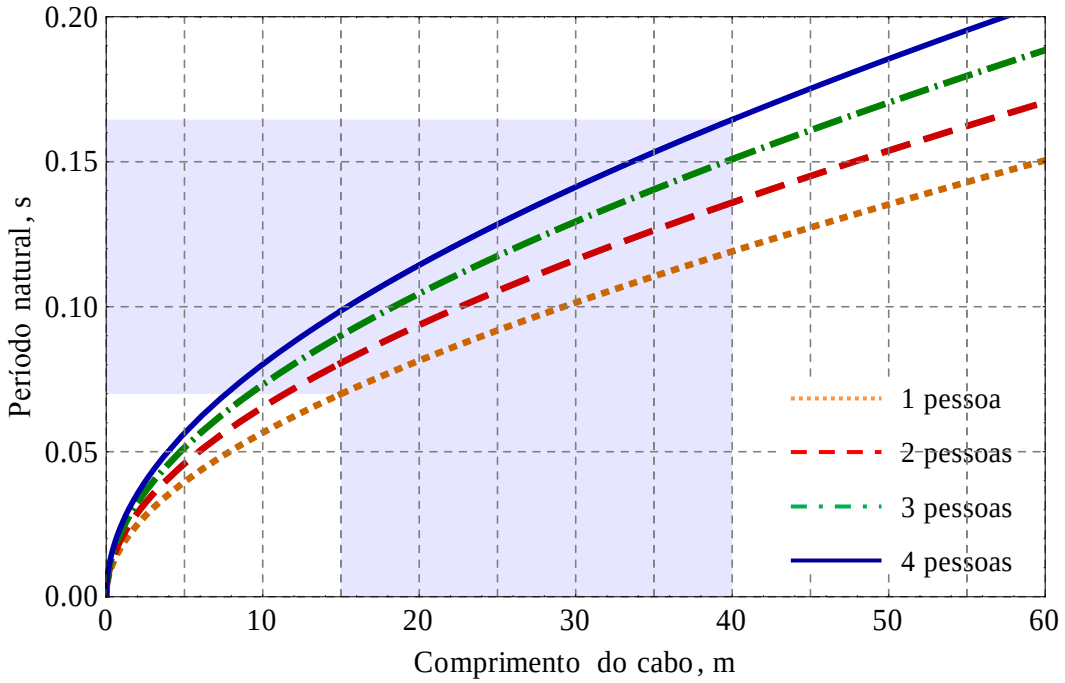

Figura 40. Período natural do cabo do guindaste para vibração axial.

5.2 DINÂMICA DO CORPO HUMANO

O passageiro da cesta, quando içado, estará submetido a uma série de solicitações dinâmicas e como no modelo mais comum de cesta de transporte o próprio passageiro é responsável por sua fixação a ela, deve-se dar especial atenção ao caso.

A vibração da cesta em si não é constatada na prática, sendo portanto o passageiro submetido à mesma vibração do conjunto, o seja, vibração de pêndulo, com períodos descritos acima no texto.

A Figura 41, adaptada de RAO (2009, pág. 307), apresenta os períodos naturais de algumas partes do corpo humano. Nota-se que o maior período é de 0,5 segundos, cujo valor está bem afastado dos períodos de vibração esperados durante as operações de içamento. Portanto, não é de se esperar que haja respostas significativas do corpo a estas vibrações, o que de fato é constatado na prática.

É verificado também que o efeito da aceleração não é significativo quanto às forças internas no corpo conforme estudo apresentado em NASA (1992). Cuidado deve ser tomado pelo fato de altas acelerações exigirem mais força do passageiro para se segurar na cesta, quando for utilizado o equipamento tipo Billy pugh.

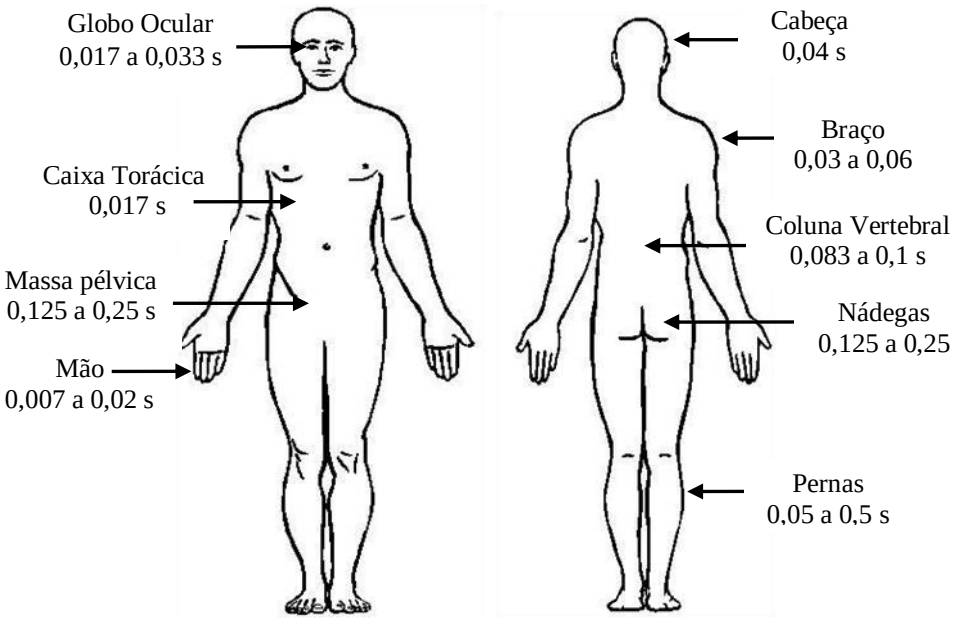

Figura 41. Sensibilidade a períodos de vibração de várias partes do corpo humano.

Um fator mais relevante que a aceleração é a velocidade da cesta, pois em uma colisão com obstáculos, a velocidade será determinante na magnitude do risco de morte do passageiro acidentado.

De fato, este parâmetro é muito significativo, visto que nos acidentes com cestas, em 16% dos casos ocorreu impacto vertical e em 40% ocorreu impacto lateral, conforme relatado no Capítulo 2.

O gráfico da Figura 42, encontrado em NASA (1992), apresenta a tolerância humana às velocidades de impacto, mostrando os limites e riscos em função da componente horizontal e vertical da velocidade de impacto.

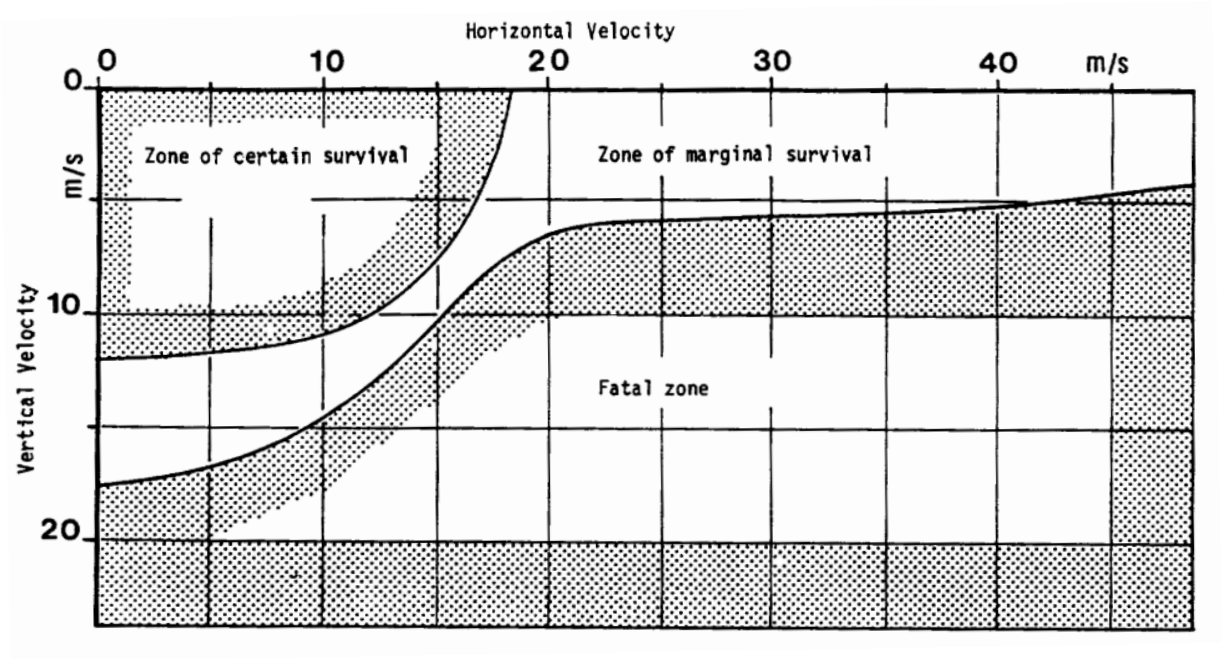

Figura 42. Tolerância humana às velocidades de impacto (NASA, 1992, p. 36).

6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Por se tratarem de operações de alto risco, todos os içamentos devem ser projetados e planejados para mitigar o perigo e aumentar a confiabilidade, preservando as vidas, as cargas e os equipamentos envolvidos.

Conforme Roncetti (2011), o projeto e planejamento são sempre necessários, variando-se a quantidade de documentação, análises e condicionantes em função da complexidade do içamento. Por exemplo, um içamento simples e rotineiro pode ser projetado e planejado uma única vez, com documentação bem simples e, se as condições de execução não variarem, este projeto continua válido indefinidamente.

No projeto, planejamento e execução do içamento, deve-se garantir que os equipamentos e acessórios não serão sobrecarregados; não haverá choques da carga com quaisquer obstáculos, inclusive o próprio guindaste; a carga não será submetida a velocidades e acelerações excessivas entre outras situações indesejadas.

A informação geralmente disponível para o proprietário do guindaste ou quem vai realizar o projeto do içamento, limita-se a tabela de cargas e alguns limites operacionais como altura significativa de onda (Hs), velocidade máxima do vento, ângulos máximos de *trim* e banda. Portanto, não leva em conta uma série de outros fatores que podem influenciar diretamente na segurança do içamento, como período da onda, aproamento, comprimento mínimo e máximo do cabo do guindaste, velocidade máxima da carga, entre outros fatores.

6.1 DIAGRAMA OPERACIONAL LIMITE DE GUINDASTE OFFSHORE

Propõe-se neste trabalho o diagrama operacional limite de guindaste offshore ou DOLGO, em inglês, *offshore crane operational limit diagram* (OCOLD), que tem por objetivo levar em conta todos os fatores que afetam a operação de içamento, contemplando seus efeitos em um único diagrama, onde uma envoltória que atende a todos os critérios de segurança é estabelecida, que servirá como base para a tomada de decisões no projeto, planejamento e execução de uma determinada operação.

O DOLGO pode ser utilizado no projeto e planejamento do içamento, indicando valores de Hs e Tp que atendam aos critérios operacionais pré-definidos e uma vez definidos os Hs e Tp, pode-se definir a janela meteorológica (*weather window*), baseando-se nos dados

metoceânicos disponíveis para o local da operação. Pode-se ainda fazer o percurso inverso, isto é, a partir de informações metoceânicas para um determinado período e valores de Hs e Tp esperados, determinar quais as condições que podem limitar a operação, como raio de operação, peso da carga, entre outros.

O DOLGO também pode ser utilizado antes dos içamentos rotineiros para atestar que uma operação encontra-se dentro da envoltória de segurança para uma determinada condição ambiental e operacional.

6.2 ELABORAÇÃO DO DOLGO

A Figura 43 mostra o fluxograma para elaboração do diagrama operacional limite de guindaste *offshore*. Supondo que os limites operacionais normais e de emergência sejam constantes, o diagrama é elaborado para um guindaste específico da unidade e para um calado e aproamento fixos.

As informações necessárias da unidade estacionária de produção (UEP) ou para unidades de perfuração (MODU), são: calado, locação do guindaste em relação ao centro de movimento, comprimento mínimo e máximo do cabo durante a operação, raio mínimo e raio máximo de operação, bem como o peso de carga a ser considerada.

Quanto aos carregamentos ambientais, deve-se fornecer o espectro de mar que representa a região geográfica considerada. O efeito do vento, diretamente sobre a carga, não é considerado neste trabalho e seu efeito sobre a unidade, é levado em conta indiretamente no aproamento.

Fazem parte também da entrada de dados para a geração do DOLGO, os limites de operação e limites estabelecidos pelas normas e fabricantes dos equipamentos de içamento. Os limites operacionais podem ser quantos forem estabelecidos pela operadora da UEP e podem limitar, por exemplo: inclinação, velocidade e aceleração da carga, proximidade com obstáculos como costado ou superestrutura (limitação do passeio), podendo ter valores diferentes para operação normal e operação em emergência.

As normas técnicas estabelecem limites de fatores de amplificação máximos, altura significativa de onda máxima, e os fabricantes podem estabelecer banda e *trim* máximos, capacidade do guindaste, entre outros.

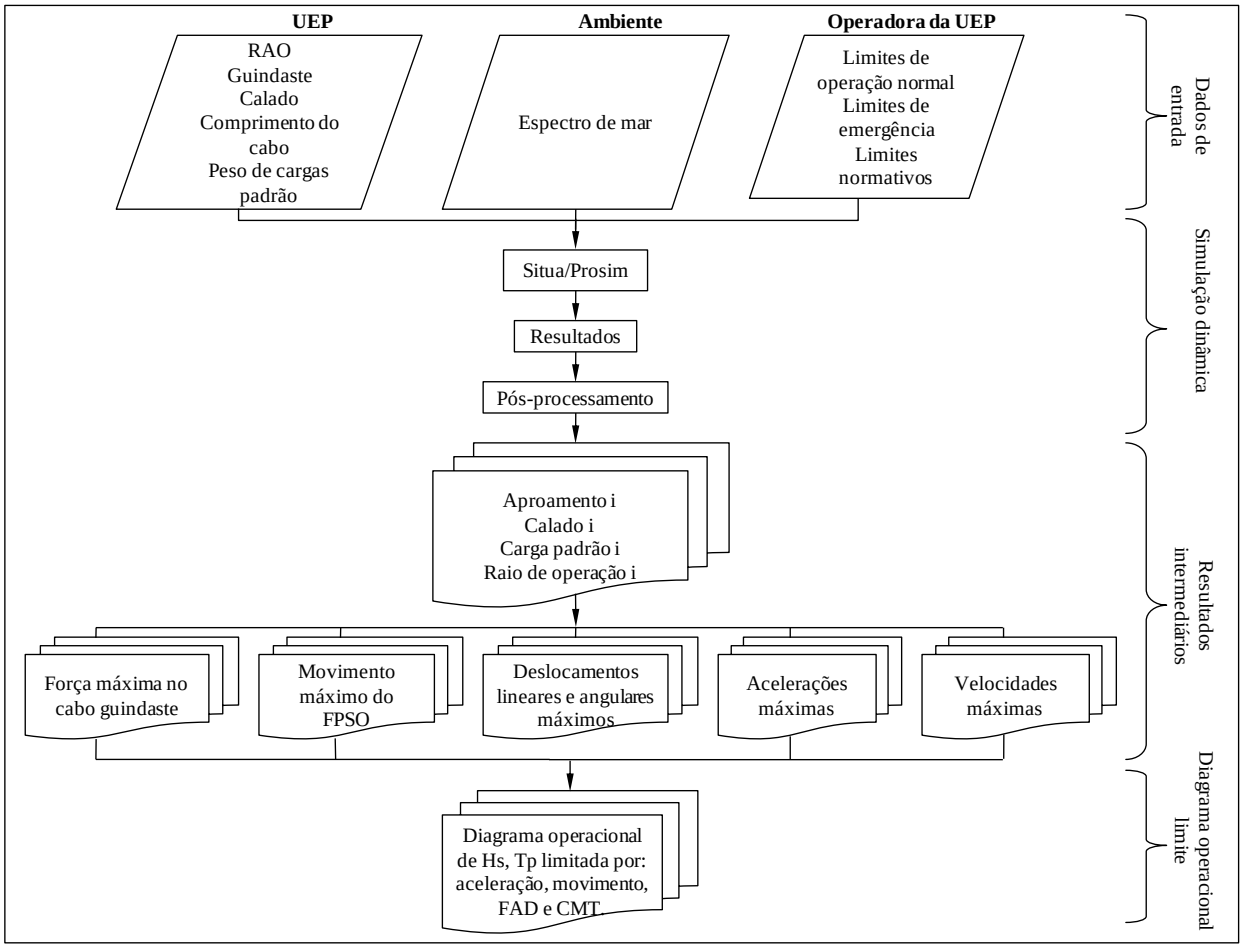

Figura 43 - Fluxograma para elaboração do diagrama operacional limite de guindaste *offshore*.

Uma vez que 56% dos acidentes com cestas ocorrem por colisão, podem ser estabelecidos limites com múltiplos volumes de segurança, negativos ou positivos, onde a cesta não poderá alcançar, no caso negativo, ou não poderá sair, no caso positivo. Este conceito foi desenvolvido por Roncetti para simulação em projetos de içamento (RONCETTI, 2011), sendo um exemplo mostrado na Figura 44 aplicado em construção naval e offshore.

A consideração deste limite na elaboração do DOLGO pode ser feita da seguinte forma: para cada caso de carga, é verificada a violação dos volumes de segurança, ficando estes casos sem representação no diagrama. Forma-se o contorno com as combinações de maiores Hs que atendam aos limites geométricos. Este contorno não possui valor escalar.

Este mesmo processo pode ser utilizado para determinação do contorno limite do passeio da cesta, isto é, amplitudes máximas de movimento permitidas.

A partir dos dados de entrada, elabora-se o modelo estrutural para a simulação dinâmica no SITUA/Prosim. Os casos de carga são as variações dos pares de Hs e Tp que, juntamente com o espectro escolhido, gerará o carregamento de ondas que atuarão no FPSO.

É possível em um único modelo estrutural, incluir todas as combinações de parâmetros, como aproamentos, cargas, cabos do guindaste com diversos comprimentos, raios de operação diversos, cargas variadas entre outros, permitindo que em uma única execução do programa sejam obtidos todos os resultados necessários.

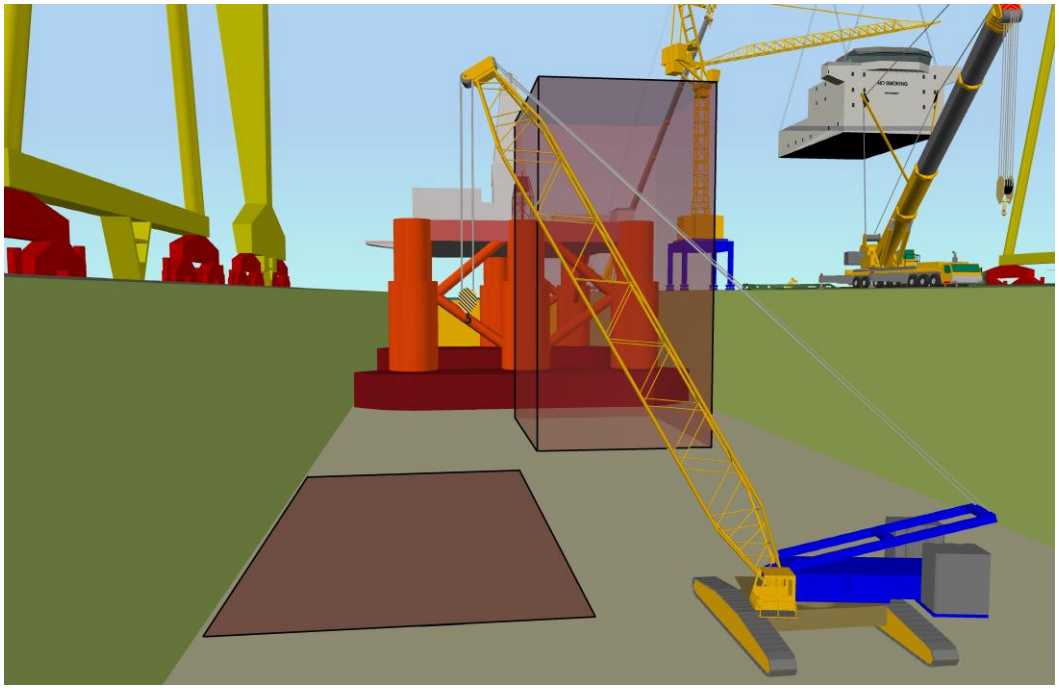

Figura 44 – Exemplo de área e volume de segurança aplicado à construção naval e offshore.

Após a simulação dinâmica, os resultados, denominados de intermediários, são separados e processados pelo módulo de pós-processamento desenvolvido pelo Autor, cujo código fonte se encontra no Apêndice F. Para cada conjunto de dados que definirá um diagrama, é feito o cálculo dos valores máximos extremos dos limites definidos como velocidade, aceleração, deslocamento, etc. sendo estes cálculos feitos para cada carga, raio de operação e comprimento de cabo.

Em seguida, calcula-se por interpolação linear ou quadrática, um diagrama de contorno em função de Hs e Tp para determinação de cada limite operacional. A Figura 45 ilustra um exemplo de diagrama e contorno em função de Hs e Tp, mostrando em destaque o contorno para velocidade da cesta para os limites de operação de segurança, operação nominal

e operação de emergência. Todos os valores deste diagrama são os máximos extremos encontrados para cada Hs e Tp variando-se o comprimento do cabo do guindaste.

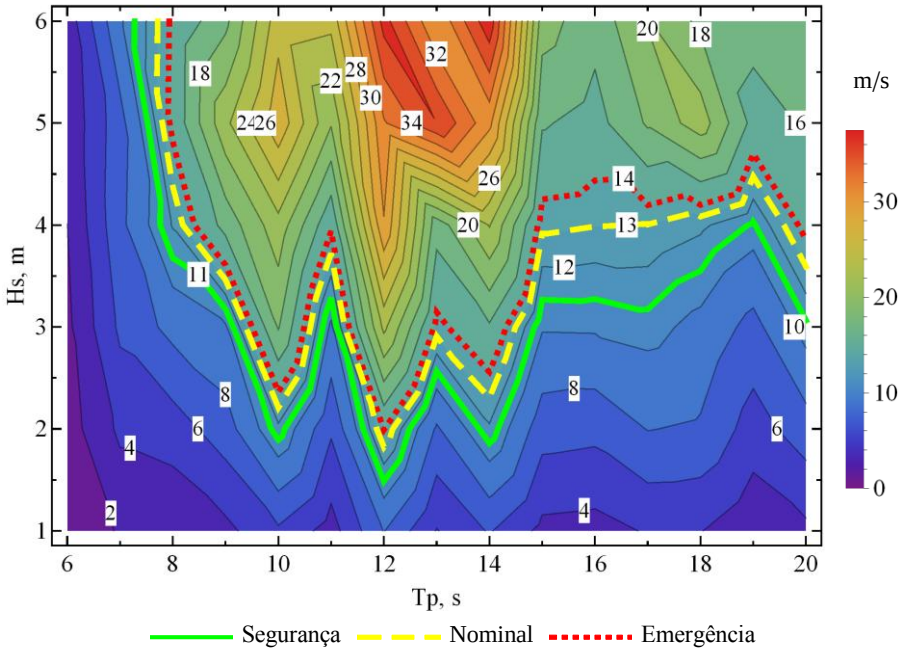

Figura 45 – Exemplo de diagrama de contorno limite de velocidade máxima extrema da cesta de transporte durante o içamento.

Obtidos os contornos de cada limite operacional, calcula-se a envoltória de segurança, que corresponde para cada Tp, o menor Hs que esteja abaixo de todos os limites simultaneamente. A Figura 46 mostra um exemplo de DOLGO.

Uma vez elaborado o DOLGO, este poderá ser utilizado indefinidamente desde que não haja alteração nas propriedades iniciais. A tomada de decisão para içamentos rotineiros pode seguir o fluxograma indicado na Figura 47. Conhecidos os dados da operação, tais como raio de operação, peso da carga, aproamento e outros previamente estabelecidos, escolhe-se o diagrama correspondente à configuração. Em seguida, conhecidos Hs e TP, verifica-se se este par encontra-se sob a área segura da envoltória. Caso esteja na área segura, procede-se com o içamento. Do contrário, se for possível alterar algum parâmetro, como raio de operação, peso da carga ou outro, faz-se nova consulta ao DOLGO. Do contrário, deve-se aguardar condição de mar mais favorável ou abortar a operação.

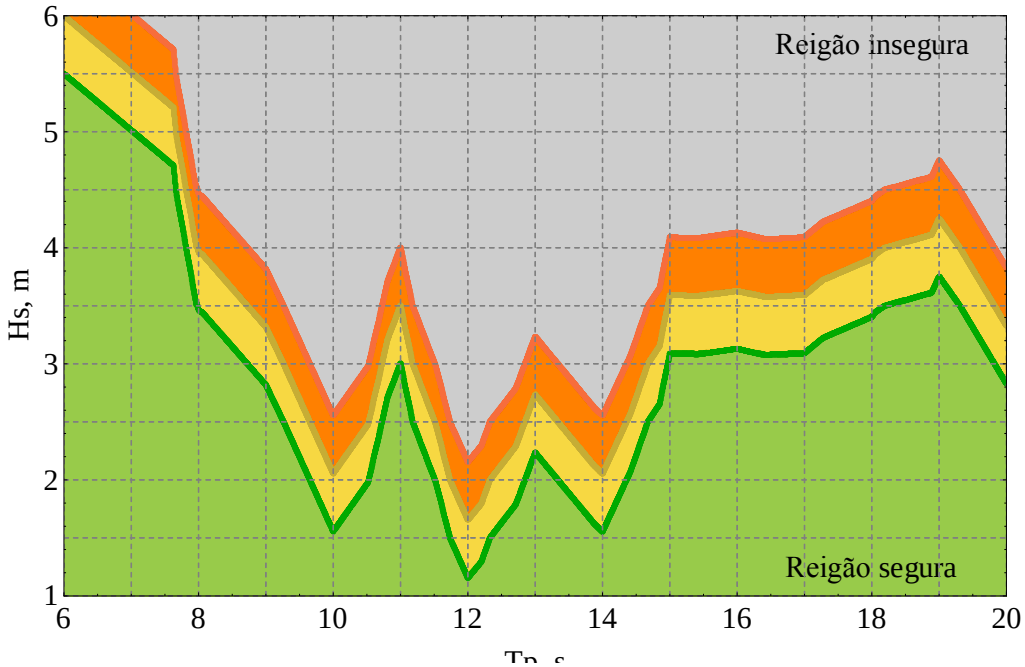

Figura 46. Exemplo de diagrama operacional limite de guindaste offshore com limite adicional de segurança (amarelo) e limite de emergência (laranja).

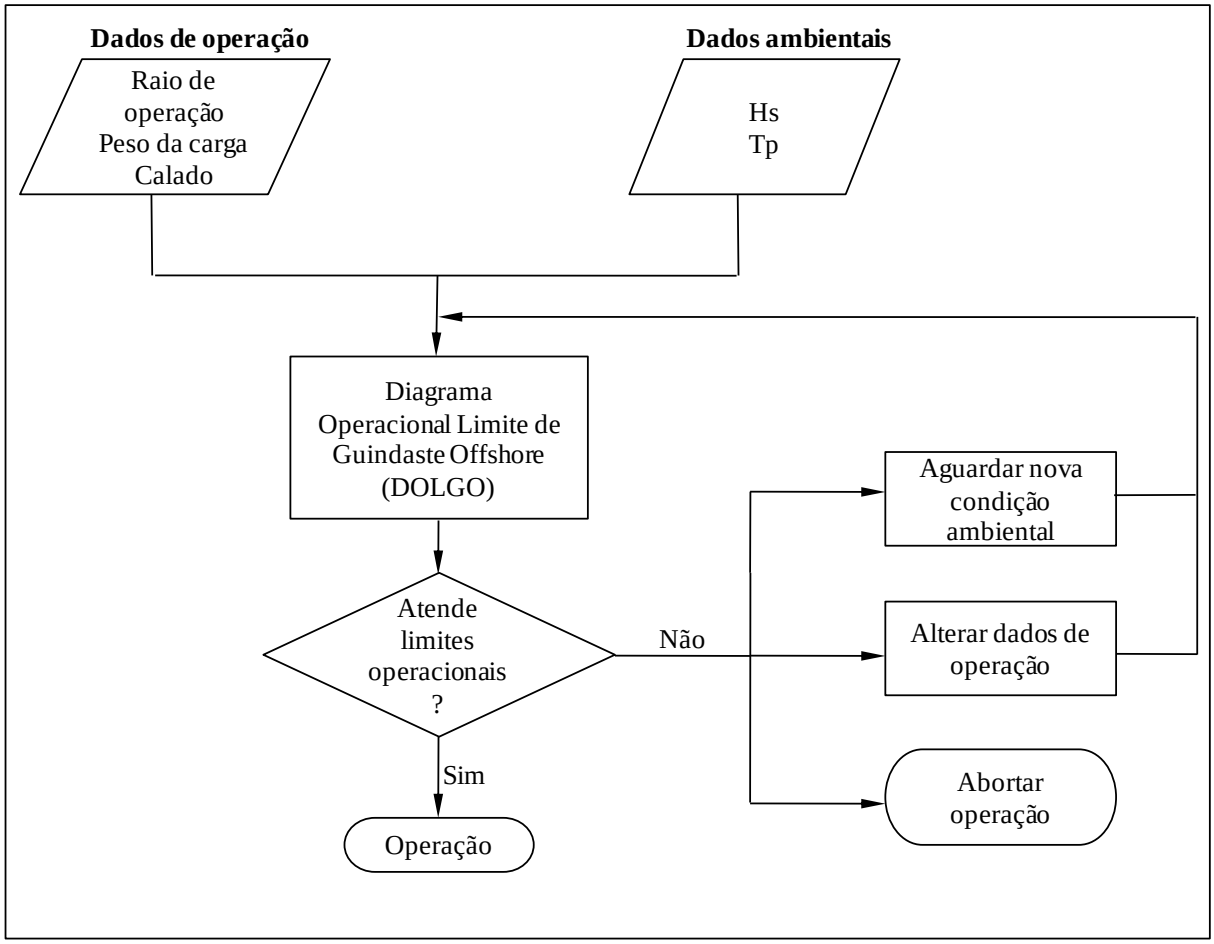

Figura 47 - Fluxograma para tomada de decisão pela execução da operação de içamento.

7 ESTUDO DE CASO

Apresenta-se neste capítulo um estudo de caso para elaboração de diagramas de limite operacional de guindaste *offshore*, aplicando a metodologia apresentada no Capítulo 6, para içamento de pessoas com dados de um FPSO real. São descritos a seguir as características e parâmetros utilizados na simulação do içamento.

São realizadas simulações numéricas considerando a variação dos seguintes parâmetros:

a) raio de operação do guindaste (R), tendo valores de 20 e 30 metros, conforme Figura 48;

b) ângulo de rotação da lança no plano horizontal (β) de 90°, conforme Figura 48;

c) comprimento do cabo do guindaste, considerando o comprimento necessário para a retirada da cesta do convés da FPSO e colocação sobre o convés do barco de apoio. No caso em estudo, o comprimento mínimo do cabo é de 13 metros na situação de retirada ou colocação da cesta no convés do FPSO, e comprimento máximo de 38 metros na situação de retirada ou colocação da cesta no barco de apoio. Como a cesta tem 2 metros, os comprimentos totais estão entre 15 e 40 metros;

d) peso da carga içada, que considera o içamento de 1 a 4 pessoas, com peso médio de 0,8 kN cada, mais 0,4 kN de bagagem por pessoa, totalizando 0,12 kN por pessoa, conforme estabelece a EN 14502-1 (CEN, 2010). Portanto, os valores da carga a ser içada, exceto o peso da cesta, são: 0,12 kN; 0,24 kN; 0,36 kN e 0,48 kN;

e) aproamento do FPSO, considerando ângulo de 30°;

f) Rigidez do guindaste, considerando o mesmo uma estrutura rígida;

g) Casos de carga considerando período de pico (Tp) entre 6 e 20 segundos, com incremento de 1 segundo e altura significativa de onda (Hs) entre 1 e 6 metros com incremento de 1 metro.

A seguir são detalhados os parâmetros resumidos acima.

7.1 PARÂMETROS DA UNIDADE FLUTUANTE

A unidade flutuante é do tipo FPSO e possui as características indicadas na Tabela 2. Trata-se de uma unidade convertida a partir de um VLCC. Um esquema dos parâmetros geométricos do FPSO é mostrado na Figura 48

A vista esquemática frontal da unidade é apresentada na Figura 49. A Figura 50 o sistema de coordenadas e referências utilizadas no software SITUA/Prosim.

Tabela 2. Características da unidade flutuante tipo FPSO utilizada na análise.

Parâmetro	**Valor**
Tipo de casco convertido	VLCC
Comprimento total (m)	335,0
Boca moldada (m)	54,5
Pontal Moldado (m)	26,00
Borda Livre (m)	5,00
Deslocamento (TPB)	270.000
Calado durante o içamento (m)	21,0
X_0 (m)	100,0
Y_0 (m)	25,0
β	90°
Raio de operação, R (m)	20,0 e 30,0
Aproamento	30°

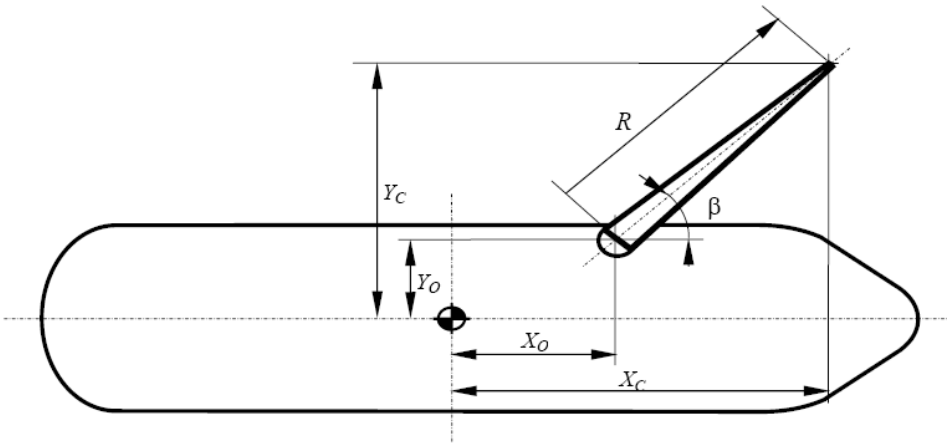

Figura 48. Esquema de um guindaste em uma unidade FPSO (LANGEN et al, 2003).

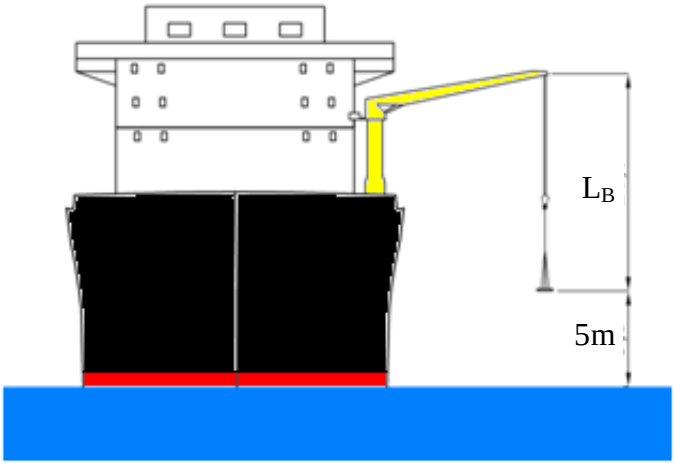

Figura 49. Vista frontal do içamento.

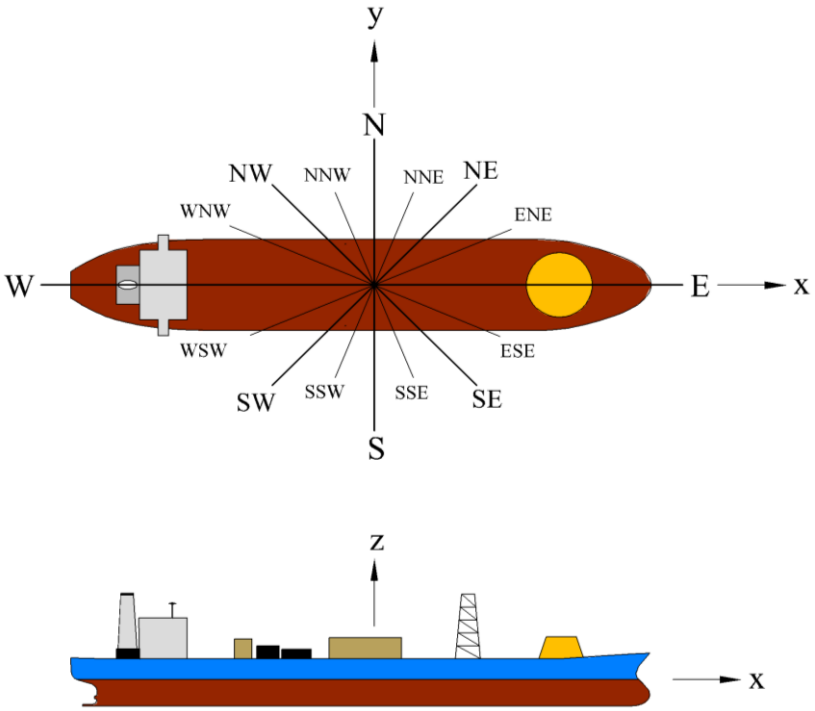

Figura 50.Sistema de referência utilizado pelo SITUA/Prosim.

7.2 PARÂMETROS DO GUINDASTE

Para a modelagem do cabo de aço do guindaste para elevação da carga, este foi discretizado utilizando elementos finitos de treliça espacial. As características físicas e geométricas do cabo são apresentadas na Tabela 3. O coeficiente de Poisson adotado foi o do aço constituinte dos arames do cabo, visto que a consideração deste coeficiente considerando

as interações dos arames e pernas não é necessária (ARGATOV, 2011). A rigidez flexional e rigidez torsional do cabo não foram consideradas.

Tabela 3. Características físicas e geométricas do cabo de aço do guindaste.

Parâmetro	**Valor**
Designação	Dyform 34LR
Classe de construção	34x7
Alma do cabo	Aço
Diâmetro nominal do cabo de aço (mm)	28,0
Área de aço da seção transversal (mm²)	456
Módulo de elasticidade (kN/m²)	$9{,}86842*10^7$
Coeficiente de Poisson	0,30
Peso linear (kN/m)	0,03844
Rigidez axial (kN) (carregado com 20% da carga de ruptura)	45000
Categoria de resistência	1960
Força mínima de ruptura (kN)	722

Fonte: (BRIDON, 2011, p. 18)

Com objetivo de considerar a influência do comprimento do cabo nas forças de içamento, foram modeladas 11 linhas com comprimentos variando de 13 a 38 metros, com incremento de 2,5 metros. A Tabela 4 mostra os comprimentos de cada linha que simula o cabo do guindaste. As linhas 1 a 11 simulam o raio de operação de 20 metros e as linhas 12 a 22 o raio de operação de 30 metros.

A extremidade superior do cabo está fixada à unidade flutuante na posição equivalente à da ponta da lança do guindaste, conforme o ângulo de inclinação da lança na horizontal (β) e o raio de operação (R), mostrados na Figura 48. Os movimentos do FPSO são transmitidos a este ponto de conexão, isto é, a ponta da lança, por transformação de coordenadas, supondo a unidade e o guindaste corpos rígidos. A Figura 51 mostra extrato da interface gráfica indicando o FPSO, o ponto de conexão com o mesmo (ponto vermelho) e o cabo do guindaste em verde, para o raio de 20 metros, sendo que as diversas linhas estão sobrepostas.

Tabela 4. Comprimento das linhas utilizadas para simular o cabo do guindaste.

Linha	**Comprimento total incluisve carga, m**	**Comprimento do cabo, m**
1	40.00	38.00
2	37.50	35.50
3	35.00	33.00
4	32.50	30.50
5	30.00	28.00
6	27.50	25.50
7	25.00	23.00
8	22.50	20.50
9	20.00	18.00
10	17.50	15.50
11	15.00	13.00
12	40.00	38.00
13	37.50	35.50
14	35.00	33.00
15	32.50	30.50
16	30.00	28.00
17	27.50	25.50
18	25.00	23.00
19	22.50	20.50
20	20.00	18.00
21	17.50	15.50
22	15.00	13.00

Na simulação deste trabalho são utilizados elementos de treliça espacial para modelagem do cabo guindaste. Estes elementos possuem três graus de liberdade por nó, representando cada um os deslocamentos lineares nas direções x, y e z, não possuindo graus de liberdade quanto à rotação, isto é, sem rigidez à flexão, o que os torna adequados para simulações do cabo em estudo.

A extremidade inferior do cabo está ligada à carga içada, sendo que cada elemento de treliça espacial que forma o cabo e a carga, possuem 0,5 metros de comprimento. A Figura 52 mostra a discretização de um dos cabos em elementos finitos. Também foram realizadas simulações com elementos com comprimentos de 0,1 e 0,05 metros para o cabo e carga respectivamente, sem alterar significativamente os resultados, ficando a diferença devido ao refinamento da malha abaixo de 0,5%.

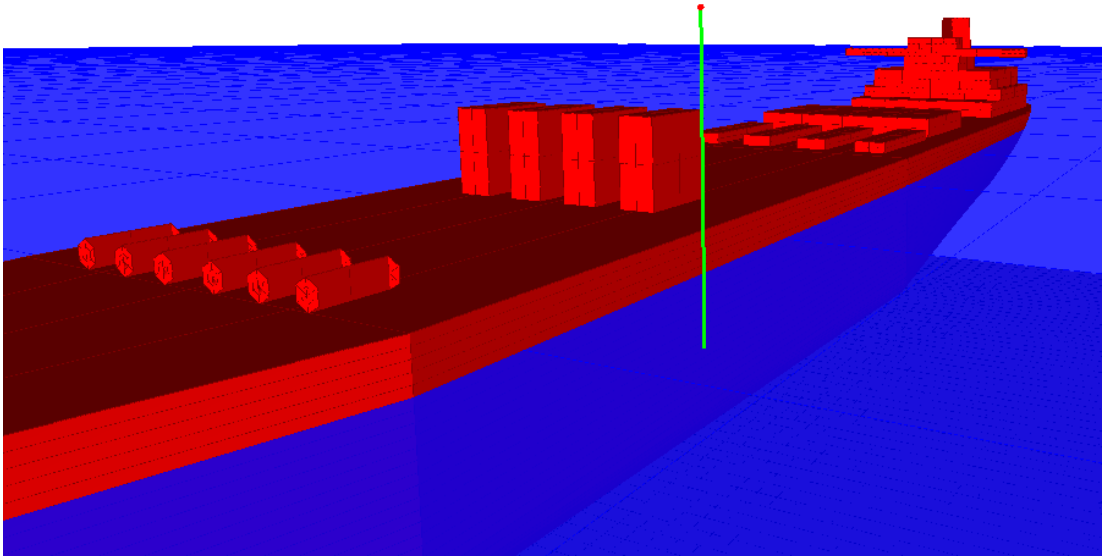

Figura 51. Modelo do içamento no SITUA/Prosim.

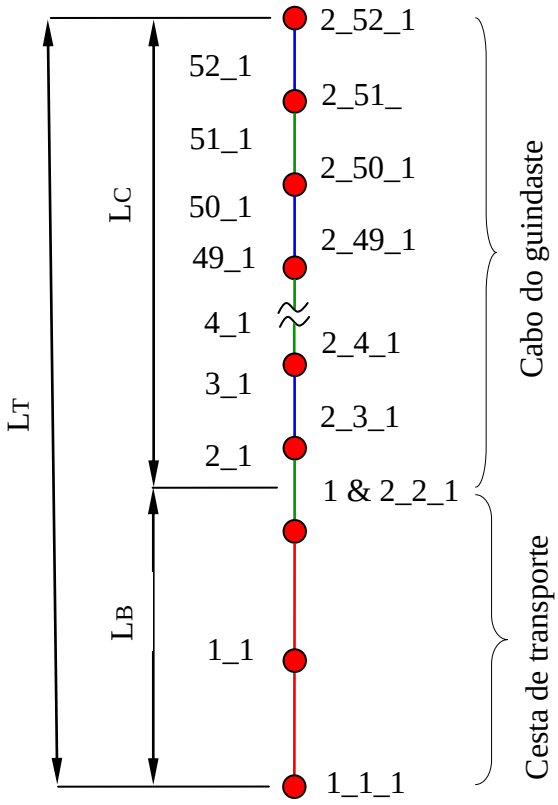

Figura 52. Modelo dos elementos finitos das linhas simulando o cabo do guindaste.

Uma análise mais detalhada das características dinâmicas do cabo foi realizada e está descrita no Capítulo 5, onde estão mostrados os períodos naturais para diversos comprimentos de cabos com diferentes massas em suas extremidades. Também é feita uma comparação

entre os valores obtidos no modelo e os da formulação analítica de um pêndulo simples equivalente.

7.2.1.1 Características dinâmicas do guindaste

A seguir faz-se a análise da necessidade de levar em consideração a influência da estrutura do guindaste nos esforços dinâmicos do içamento, analisando as frequências naturais de guindastes *offshore* sobre pedestal. Para essa análise foi escolhido um guindaste com lança tipo caixa (Figura 24) por trabalhar predominantemente a flexão e, portanto, ser menos rígido, o que deve levar a períodos naturais maiores quando comparados aos de guindastes treliçados e guindastes com lança articulada.

O guindaste foi modelado no software Midas Gen (MIDASOFT, 2014) com o objetivo de determinar seus períodos naturais. Um estudo similar foi feito por Langen (2003) em outro guindaste do mesmo tipo e é usado aqui como parâmetro de comparação. O método de análise usado no Midas Gen foi o Lanczos, que usa matrizes tridiagonais para fazer a análise dos autovalores. Esse método é bem efetivo quando usado em análises de autovalores para modos de vibrações mais baixos.

Na análise modal, foi considerado o efeito de tração no cabo causado pela carga de 10 kN suspensa pelo cabo do guindaste, posicionada em sua extremidade inferior, bem como o efeito inercial desta massa.

Há disponíveis poucos dados sobre amortecimento de guindastes *offshore*, contudo a experiência indica que três distintas amplitudes de vibração são visíveis na vibração livre. O amortecimento usado foi de 12,0% para o cabo e os cilindros hidráulicos, 2,0% para a lança e 1,5% para o pedestal, que são valores obtidos através de simulações de vibrações livres, seguindo os valores estabelecidos pelo estudo usado para comparação (LANGEN, 2003).

Os parâmetros físicos e geométricos de ambos os guindastes analisados estão mostrados na tabela abaixo:

Tabela 5. Características dos guindastes analisados.

Guindaste	**Roncetti**	**Langen (2003)**
Comprimento da Lança (m)	18,00	47,04
Ângulo da Lança	25º, 45º e 75º	25º, 45º e 75º
Raio de Operação (m)	16,3; 12,7 e 4,7	46,6; 33,3 e 12,2
Peso próprio (kN)	460	913

Foram analisados diversos modos de vibração, para as três inclinações de lança utilizadas. Alguns dos modos de vibração descritos abaixo estão ilustrados na Figura 53 para o guindaste com lança inclinada a 45º.

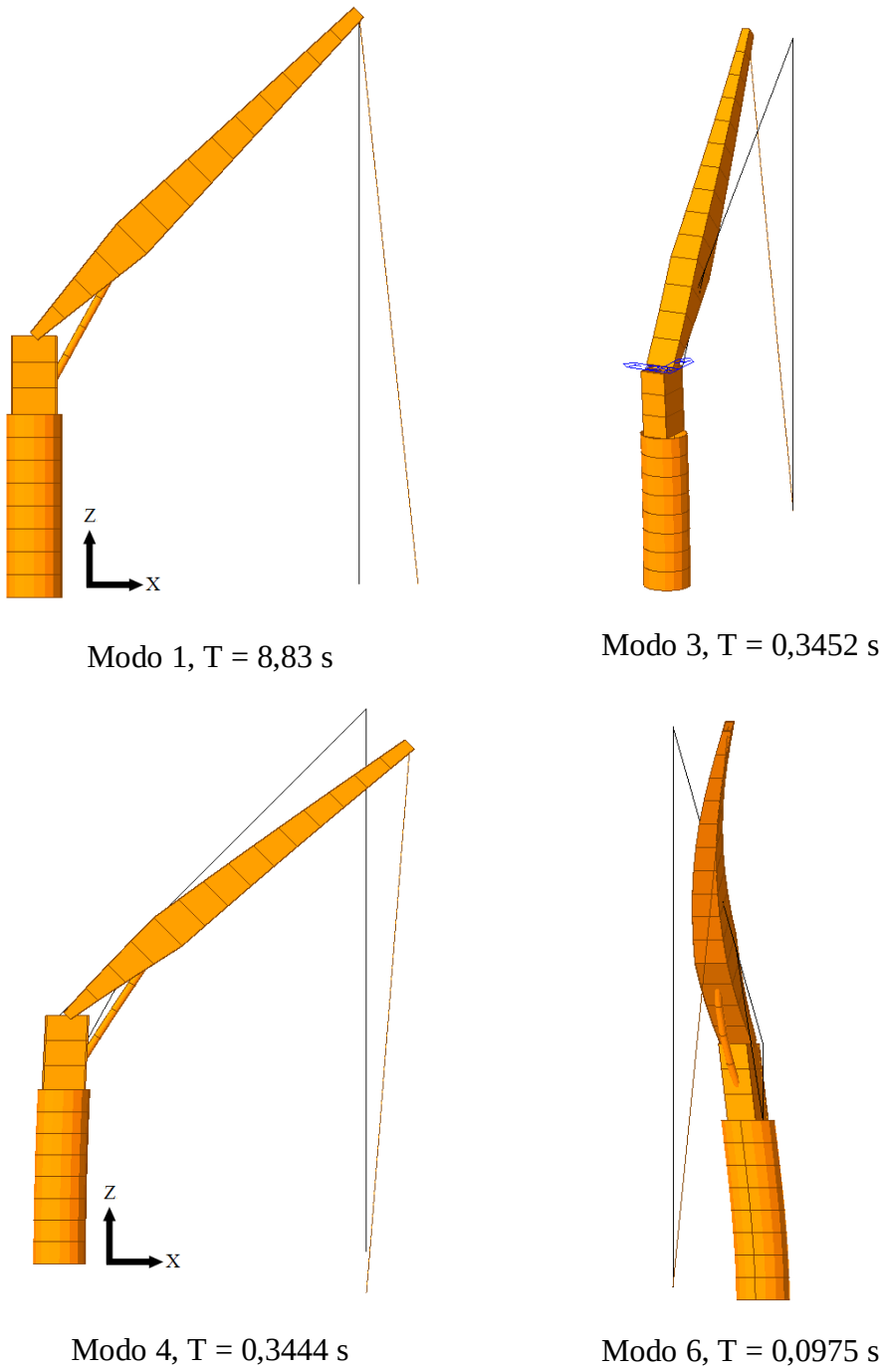

Figura 53. Modos de vibração para ângulo da lança de 45º sobrepostos com eixo indeformado.

Para todas as inclinações de lança o primeiro modo corresponde à vibração de pêndulo simples, oscilando no plano XZ (para $\beta = 0$, mostrado na Figura 48), e o segundo

modo corresponde ao pêndulo oscilando no plano YZ. Ambos os modos tem um período entre 8,83 e 11,18 segundos.

O terceiro modo corresponde à flexão lateral da lança e tem períodos muito menores, da ordem de 0,3 s, conforme mostrado na Tabela 7. No quarto modo também ocorre flexão na lança, porém no plano XZ e combinada com pequena flexão do pedestal no mesmo plano, com períodos da ordem de 0,3 s. Especificamente para o guindaste com a lança a 75º o terceiro e quarto modos são invertidos em relação às demais inclinações da lança.

O quinto modo corresponde, para todas as inclinações, à flexão do pedestal no plano XZ, com períodos da ordem de 0,1 s. O sexto modo é uma combinação entre a flexão lateral da lança e a flexão do pedestal no plano YZ. O sétimo modo também é uma combinação entre flexão da lança e do pedestal, mas no plano XZ. Especificamente para o guindaste com a lança a 75º o sexto e sétimo modos também são invertidos em relação às demais inclinações da lança.

No oitavo modo existem três elementos fletindo lateralmente ao mesmo tempo: o pedestal, a lança e o cilindro hidráulico. Finalmente no nono modo os três elementos fletem no plano XZ. Para o guindaste com a lança inclinada a 75º, nos modos oito e nove, a deformação no cilindro hidráulico é muito maior que as deformações no pedestal e na lança.

A Tabela 6 e Tabela 7 mostram os períodos naturais de cada guindaste para os três casos de inclinação de lança estudados:

Tabela 6. Modos de vibração e períodos naturais para o guindaste de Langen (2003).

Modo	**25º**	**45º**	**75º**
1	13,14	15,06	16,53
2	13,12	15,04	16,47
3	1,36	1,59	2,25
4	1,02	1,05	1,06
5	1,08	0,59	0,68
6	0,36	0,36	0,36
7	0,33	0,33	0,33
8	0,21	0,20	0,20
9	0,19	0,20	0,18

Tabela 7. Modos de vibração e períodos naturais para o guindaste deste trabalho.

Modo	**25º**	**45º**	**75º**
1	8,83	10,09	11,18
2	8,83	10,09	11,18
3	0,33	0,35	0,40
4	0,31	0,34	0,35
5	0,13	0,13	0,14
6	0,10	0,10	0,10
7	0,09	0,09	0,09
8	0,05	0,05	0,06
9	0,04	0,04	0,06

Pode-se perceber que com o aumento do ângulo de inclinação da lança, os períodos aumentaram discretamente, o que é de se esperar visto o aumento da flexibilidade, porém longe de qualquer período natural importante do FPSO em análise. Percebe-se também que o guindaste de Langen (2003) tem períodos naturais maiores, comparados ao guindaste deste trabalho. Isso se deve principalmente ao fato do guindaste de Langen ser de maior porte, possuindo maior peso, maiores dimensões e ser mais flexível.

Baseado nos RAO mostrados no Apêndice A, percebe-se que os baixos períodos apresentados nos modos de vibração analisados não devem gerar amplificação dinâmica significativa, indicando que a modelagem da estrutura do guindaste pode ser omitida da análise para o caso em estudo.

Nos guindastes treliçados os elementos predominantemente trabalham a tração e compressão, sendo submetidos a esforços de flexão apenas pelo peso próprio e vento. Assim, eles têm estruturas muito mais rígidas que as dos guindastes com lança tipo caixa, sendo esperado que tenham períodos naturais ainda menores que estes tipos.

7.3 PARÂMETROS DA CARGA IÇADA

A carga içada constitui-se da cesta para transporte de pessoal com uma a quatro pessoas embarcadas e respectivas bagagens conforme descrito a seguir, dependendo do caso analisado. A cesta é flexível, do tipo *Billy Pugh*, descrita no Capítulo 2, prevista pela NBR 10876 (ABNT, 2011).

A fim de avaliar a aplicação do DOLGO no içamento de cargas que não sejam pessoas, também se faz a simulação dinâmica para içamento de um *container offshore* típico com 5 pés de largura por 6 pés de comprimento e peso bruto (peso próprio mais carga) de 60 kN.

A carga içada foi modelada de maneira simplificada, uma vez que se considera que sua estrutura não afeta os esforços dinâmicos resultantes da operação de içamento, o que é constatado na prática. Portanto, modela-se a cesta como elemento de treliça espacial com propriedades equivalentes à cesta real. Os parâmetros adotados estão resumidos na Tabela 8. A carga adotada para pessoas foi a especificada pela EN 14502-1 (CEN, 2010) e o peso da cesta já inclui todos os dispositivos de içamento da carga.

É necessário adicionar à carga o moitão, que é o elemento que conecta a carga ao cabo do guindaste. Neste caso foi utilizado um moitão tipo "bola-peso" (*overhall ball*) do fabricante Crosby, modelo UB-550S, com carga máxima de trabalho de 61,78 kN e peso de 1,05 kN. Para o caso do *container offshore* deve-se utilizar 2 pernas de cabo e moitão com 3,00 kN de peso.

Tabela 8. Características da carga içada.

Parâmetro	**Pessoas**				***Container offshore***
	1	2	3	4	
Peso de pessoas (kN)	0,80	1,60	2,40	3,20	-
Peso de bagagem (kN)	0,40	0,80	1,20	1,60	-
Peso da cesta de transporte (kN)	1,20	1,20	1,20	1,20	-
Peso do cabo do guindaste (kN)	1,46	1,46	1,46	1,46	2,92
Peso do moitão (kN)	1,05	1,05	1,05	1,05	3,00
Carga bruta estática, CBE (kN)	4,91	6,11	7,31	8,51	65,92
Peso linear (kN/m)	1,725	2,325	2,925	3,525	-
Diâmetro externo nominal (m)	1,60				1,80
Coeficiente de *Poisson*	0,30				0,30
Rigidez axial (kN)	25000				80000

É de interesse notar que o peso médio de uma pessoa para efeitos de cálculo segundo a IMO (IMO, 1997) era originalmente 0,75 kN, sofrendo posterior modificação para 0,825 kN através da resolução MSC.293(87) (IMO, 2010), afim de tornar mais realístico o carregamento.

A norma de projeto de cestas de içamento de pessoas, utilizada na comunidade europeia, EN 14502-1 (CEN, 2010), exige que seja considerado um peso mínimo de 0,8 kN para cada pessoa mais 0,4 kN como peso de equipamentos para cada pessoa, sendo que no projeto da cesta, deve-se ainda utilizar um fator multiplicador destas cargas com valor mínimo de 2,0.

A norma norueguesa de projeto de guindastes, NORSONK R-002 (STANDARDS NORWAY, 2012) exige que para cestas de içamento, seja considerado um peso mínimo de 1,0 kN para cada pessoa mais 0,4 kN como peso de equipamentos para cada pessoa, sendo que no projeto da cesta, deve-se ainda utilizar um coeficiente de risco para todos os componentes com valor mínimo de 1,5.

A norma brasileira NBR 10876 (ABNT, 2011) exige que seja considerado um peso mínimo de 0,75 kN por pessoa mais 0,25 kN para bagagem.

7.4 CARREGAMENTO AMBIENTAL

Para determinação do carregamento ambiental considerou-se apenas o efeito das ondas, desprezando-se o vento e a corrente. Foi adotado o espectro de onda de JONSWAP adaptado para Bacia de Campos (JACOB, 2006) e considerados 90 casos de carga com pares de Hs e Tp dentro de uma faixa considerada de interesse para as atividades de içamento, cujos valores estão enquadrados em períodos de recorrência de 1 ano, indicado para as situações operacionais conforme a ISO 19901-6 (ISO, 2009).

A Figura 54 mostra um gráfico com os valores de Hs e Tp adotados para cada caso de carga. O Apêndice B traz uma tabela com estes valores.

7.5 SIMULAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO

A simulação no SITUA/Prosim foi realizada no domínio do tempo, sendo feita a análise estática e dinâmica. Para a análise dinâmica, o algoritmo de integração no tempo utilizado foi o de Newmark, com coeficiente de amortecimento numérico $\alpha\beta$ igual a -0,3 e zero para os amortecimentos proporcionais à massa e rigidez.

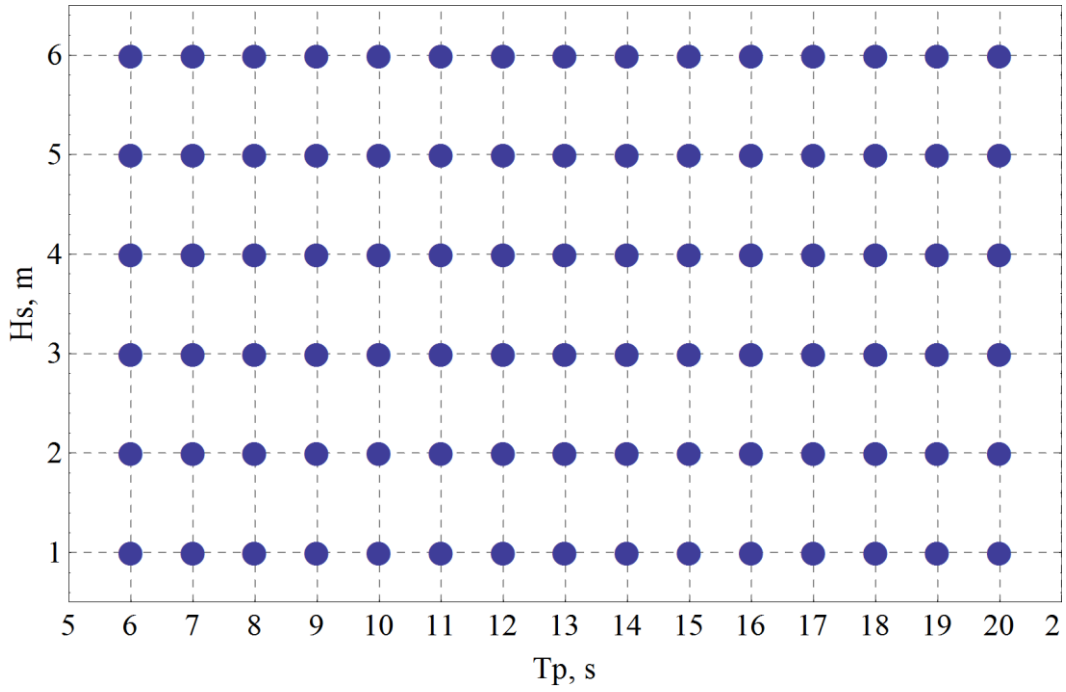

Figura 54. Casos de carga considerados para a simulação dinâmica.

O intervalo de integração é de 0,05 segundos, tendo 200 segundos de rampa para aplicação do carregamento e 1000 segundos de tempo total de simulação, com saída de resultados a cada 0,1 segundo.

7.6 LIMITAÇÕES OPERACIONAIS CONSIDERADAS

Para geração do diagrama operacional limite de guindaste *offshore*, é necessário o estabelecimento de limites superiores operacionais como velocidade, aceleração, deslocamentos, forças, entre outros, definidos a critério do operador da UEP e baseados nas normas técnicas.

Os limites operacionais considerados neste trabalho são mostrados na Tabela 9. Nota-se que para o içamento do container offshore não há necessidade de estabelecimento de situações diferentes de operação, como no içamento de pessoas.

O limite da velocidade da cesta é determinado conforme o gráfico da Figura 42 e o limite de velocidade para o *container* é arbitrado. O valor limite de balanço e fator de amplificação dinâmica foram tomado conforme a API *Specification* 2C (API, 2004) e o valor limite para arfagem é arbitrado.

Os valores limites da capacidade bruta tabelada são valores típicos de guindastes offshore reais, configurados para içamento de pessoas e cargas conforme cada caso.

Tabela 9. Limites utilizados para elaboração do diagrama operacional limite.

Parâmetro	**Limite**			***Container offshore***
	Segurança	**Nominal**	**Emergência**	
Velocidade do fundo da cesta (m/s)	8,0	8,5	9,0	15,0
Aceleração do fundo da cesta (m/s^2)	NC*	NC	NC	NC
Balanço (*roll*)	1,5°	2,0°	2,5°	2,0°
Arfagem (pitch)	4,0°	5,0°	5,0°	5,0°
Altura sig. máxima de onda, Hs (m)	2,0	2,5	3,0	3,0
Capacidade bruta tabelada, CBT (kN)	8,0	8,5	9,0	67,0
Fator de amplificação dinâmica	1,25	1,3	1,4	1,4
Imersão da cesta	considerado	considerado	considerado	considerado
Passeio máximo da cesta (m)	NC	NC	NC	NC
Offlead	NC	NC	NC	NC
Sidelead	NC	NC	NC	NC

**NC - Não considerado na análise.*

Outros limites operacionais podem ser incluídos em função do tipo de operação de içamento a ser realizada. No caso de içamento de pessoas, pode-se incluir como fator limitante, não só a velocidade e aceleração, mas também o ângulo de inclinação em relação à vertical (θ) da cesta de transporte, conforme a Figura 55, que mostra também o vetor deslocamento (d) e velocidade (v) do fundo da cesta.

Faz-se necessária uma sistemática para a determinação de limites que atualmente não são considerados nos içamentos, como velocidade e aceleração, cujos valores sejam específicos para içamento de pessoas e cargas.

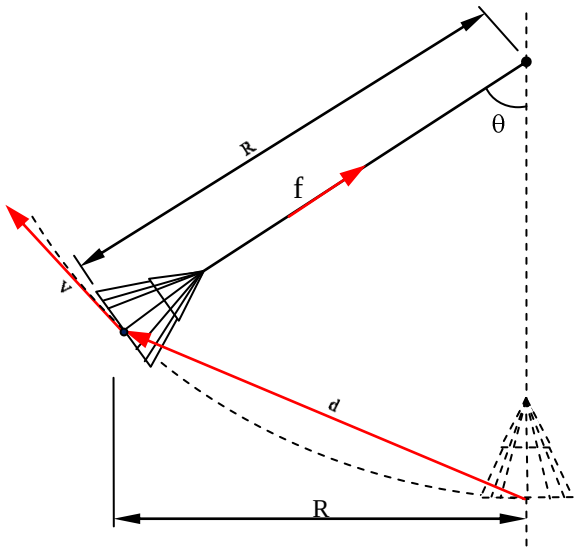

Figura 55. Vetores de deslocamento, velocidade e força no cabo para içamento da cesta de transporte.

8 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e comentados os resultados da simulação do içamento proposto no Capítulo 7, para exemplificação da aplicação da metodologia para elaboração do diagrama operacional limite de guindaste *offshore* (DOLGO).

Para o pós-processamento dos resultados, desenvolveu-se um sistema de manipulação numérica em ambiente computacional paralelo (WOLFRAM RESEARCH, 2012), que foi capaz de processar uma enorme quantidade de informações em um tempo reduzido se comparado com sistemas convencionais. O código fonte do sistema de pós-processamento encontra-se transcrito no Apêndice F.

O tempo de processamento em paralelo foi 287% a 544% mais rápido quando comparado com o processamento convencional, dependendo do tipo de sub-rotina.

Inicialmente são expostos e comentados os resultados intermediários, conforme fluxograma da Figura 43, que são processados para determinação dos valores máximos extremos para cada condição e caso de carga, dando origem aos diagramas de contorno com cada limite operacional estabelecido. Em seguida são expostos os diagramas de contorno e finalmente os diagramas operacionais limite de guindaste *offshore* para o caso em estudo.

A seguir são apresentados os resultados intermediários diversos para ilustração e os resultados necessários à elaboração dos diagramas limites operacionais de guindaste offshore.

8.1 MOVIMENTOS DO FPSO

Na composição do DOLGO não são considerados os limites de movimento *de surge, sway, heave e yaw* do FPSO, apesar de seus efeitos serem considerados na análise dinâmica.

A Figura 56 mostra séries temporais dos movimentos de *heave, roll e pitch* do FPSO para o caso de carga Onda 40 e Onda 72, sendo o primeiro um par típico de ocorrência na bacia de campos para período de recorrência de 1 ano e o segundo, o caso de carga que causa o maior movimento de *roll*.

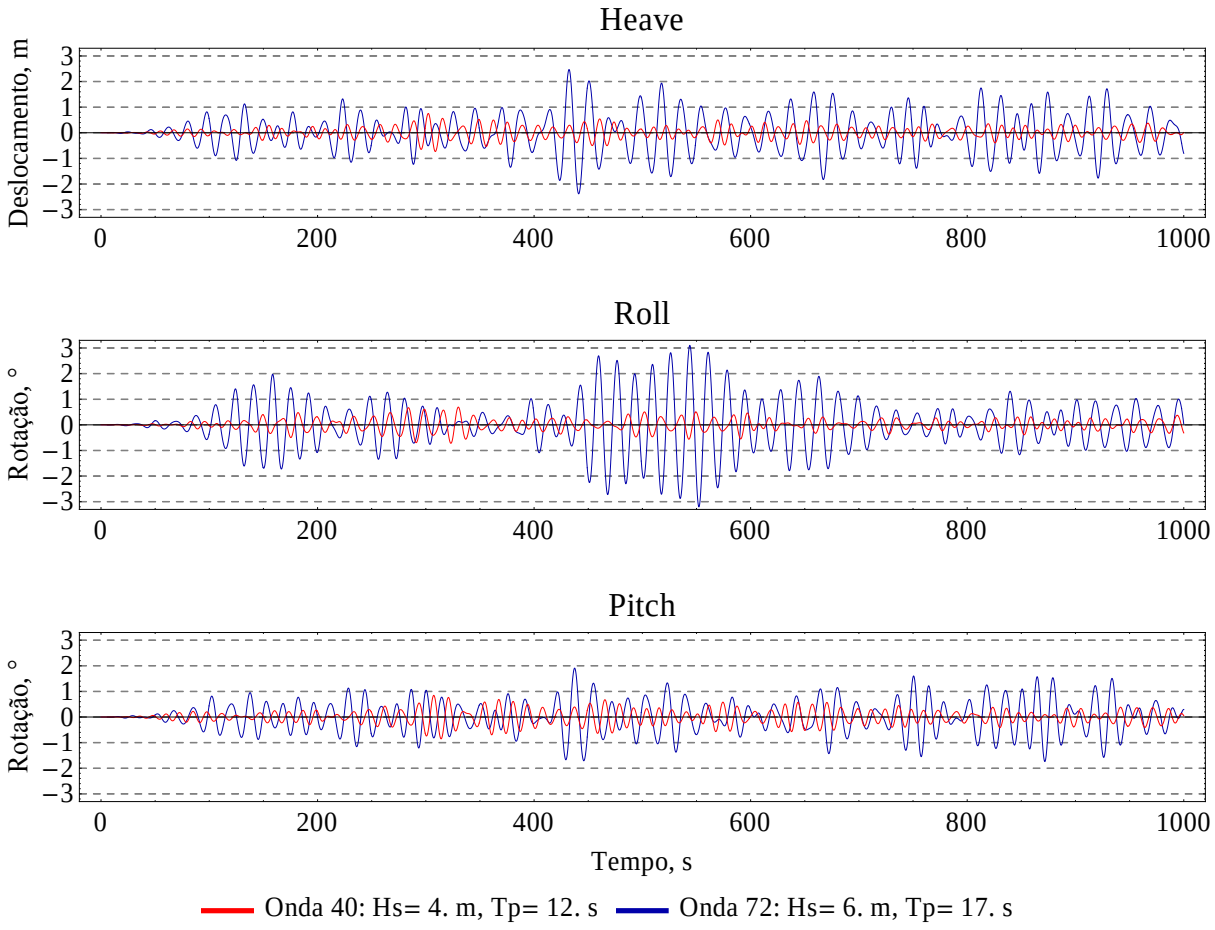

Figura 56. Séries temporais dos movimentos de *heave, roll e pitch* do FPSO para o caso de carga Onda 40 e Onda 72.

Para o cálculo dos deslocamentos máximos extremos do FPSO, representado pelo seu centro de gravidade, ou centro de movimento, fez-se análise de extremos das 90 séries temporais para cada movimento de interesse (*heave, roll e pitch*), determinando o valor máximo extremo para cada combinação, que forma o diagrama de contornos de cada movimento. O Apêndice C apresenta os resultados de deslocamento do FPSO de forma tabulada.

Apesar de não fazer parte de qualquer limite na criação do DOLGO, é exposto na Figura 57, o diagrama de contornos para o movimento de *heave* em função de Hs e Tp.

A Figura 58 apresenta o diagrama de contornos para o movimento máximo extremo de *roll*, que faz parte da lista de limites, destacando os contornos limites para operação segura, nominal e emergência. Os contornos representam a limitação de Hs e Tp que atende ao critério para cada tipo de operação, conforme a Tabela 9, sendo que a área aceitável localiza-se abaixo do respectivo contorno no sentido decrescente de Hs.

Pelo diagrama, vê-se que o limite mínimo ocorre justamente no período de 17 segundos, que é o período ressonante de *roll* do FPSO.

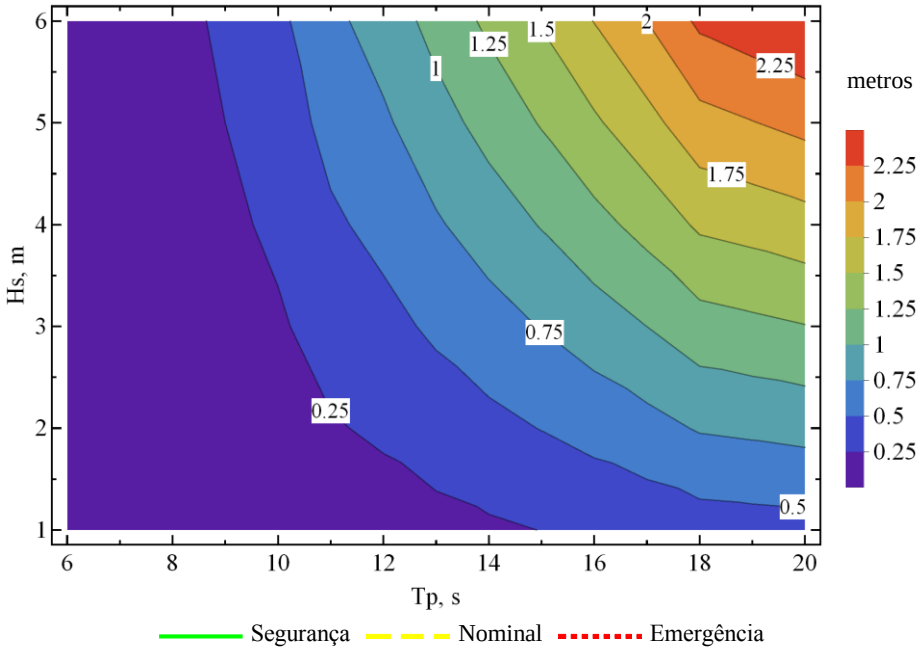

Figura 57. Diagrama com contorno limite do movimento máximo extremo de *heave*.

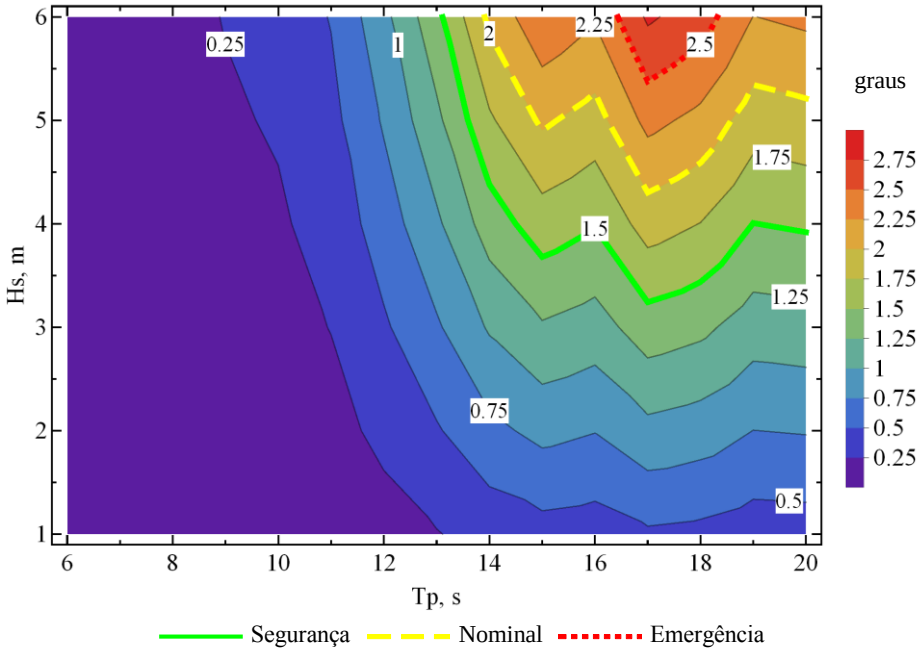

Figura 58. Diagrama com contorno limite do movimento máximo extremo de *roll*.

A Figura 59 apresente a diagrama de contornos para o movimento máximo extremo de *pitch*. Nota-se que não foram atingidos nenhum dos limites, tanto para operação segura,

nominal ou emergência, e consequentemente, não haverá influência deste movimento na formação da envoltória limite do DOLGO, apesar de seus efeitos afetarem os demais parâmetros pelo deslocamento angular causado.

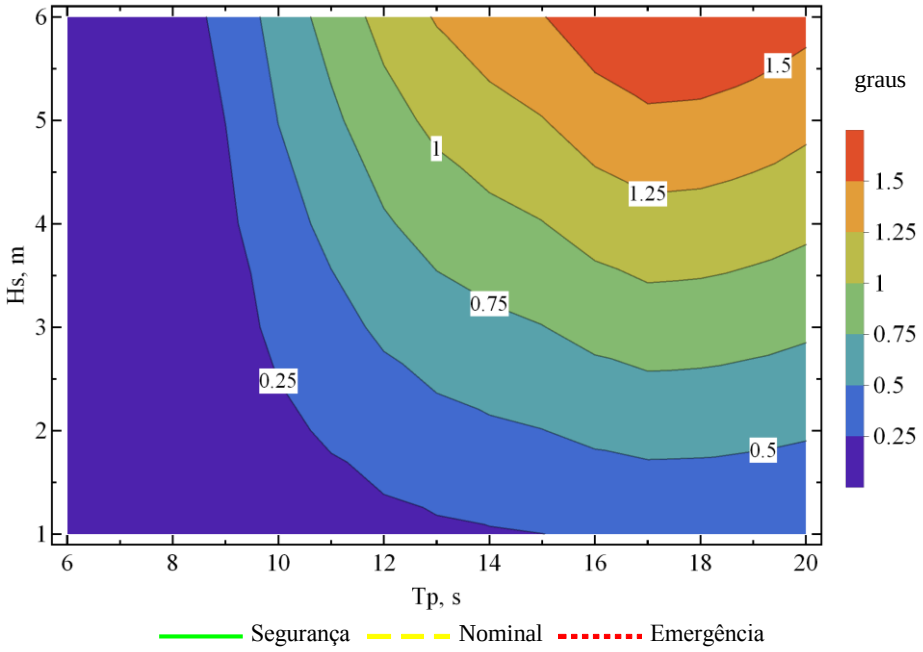

Figura 59. Diagrama com contorno limite do movimento máximo extremo de *pitch*.

8.2 TRAJETÓRIA DA CESTA DE TRANSPORTE

A seguir são mostrados exemplos dos resultados do deslocamento do fundo da cesta, mostrando sua trajetória ao longo de toda a simulação, em vista superior e vista frontal no sentido proa-popa. O circulo vermelho representa a ponta da lança do guindaste. A observação da trajetória é importante para se evitar situações de risco de colisão com o casco ou demais obstáculos, além de verificar a imersão da carga. A consideração do limite de movimento da cesta pode ser feita conforme explicado no item 6.2.

A Figura 60 mostra a trajetória do fundo da cesta para o caso de carga Onda 50, com Hs igual a 2,0 metros e Tp igual a 14,0 segundos. Esta é a combinação com maior Hs possível para período de 14 segundos para atender o DOLGO, cujo contorno limitante neste ponto foi a velocidade do fundo da cesta.

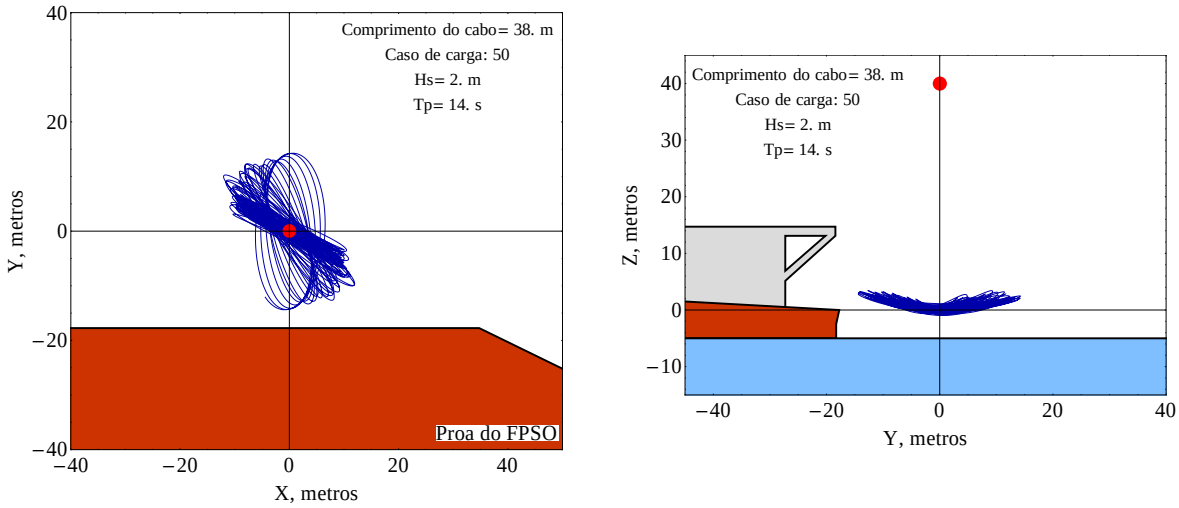

Figura 60. Trajetória do fundo da cesta para o caso de carga Onda 50.

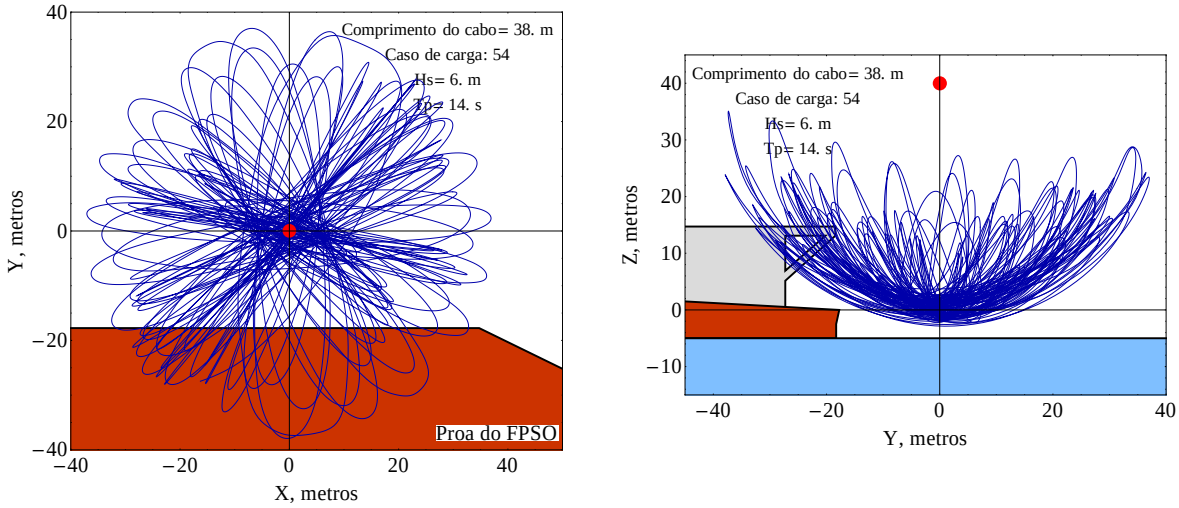

Figura 61. Trajetória do fundo da cesta para o caso de carga Onda 54.

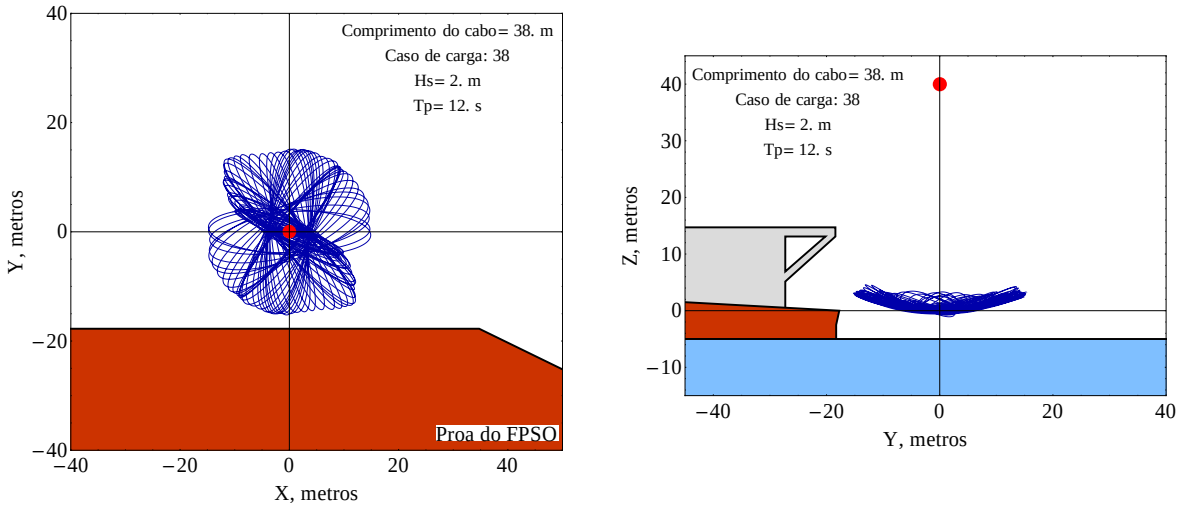

Figura 62. Trajetória do fundo da cesta para o caso de carga Onda 38.

A Figura 61 apresenta a trajetória do fundo da cesta para o caso de carga Onda 54, com Hs igual a 6,0 metros e Tp igual a 14,0 segundos, que apresenta o maior valor de amplitude de movimento. Obviamente, esta operação não seria admitida pelo DOLGO e foi mostrada para ilustração. O período de 14 segundos é o período natural para *pitch* do FPSO e como o guindaste encontra-se próximo à proa, esta grande amplificação de movimentos é justificada.

A Figura 62 ilustra a trajetória do fundo da cesta para o caso de carga Onda 38, com Hs igual a 2,0 metros e Tz igual a 12,0 segundos. Esta combinação não atende o DOLGO, cuja Hs mínimo deveria ser de 1,3 metros, e foi incluída para comparação com a combinação Onda 54. O período de 12,0 segundos é o período natural para *heave* do FPSO.

8.3 VELOCIDADE DA CESTA DE TRANSPORTE

A velocidade da cesta é um importante parâmetro para a elaboração do DOLGO, visto que 40% dos acidentes ocorrem por impacto lateral e 16% por impactos verticais. Portanto, limitar a velocidade diminui o risco de acidentes e gravidade das lesões, conforme mostrado na Figura 42.

Para cálculo da velocidade resultante máxima extrema do fundo da cesta durante o içamento, fez-se análise de extremos das 90 séries temporais para cada comprimento de cabo, determinando o valor máximo extremo para cada combinação. Para o içamento de 1 pessoa, a velocidade máxima extrema em função de Hs, Tp e do comprimento do cabo é mostrada na Figura 63.

Verifica-se no gráfico de contorno que em algumas situações, a velocidade diminui com o aumento do comprimento do cabo, como no caso de Hs igual a 6,0 metros e Tp igual a 11 segundos (caso de carga Onda 36), sendo a velocidade para comprimento de 32,5 metros maior que no cabo com 35,0 metros. O período natural de pêndulo para o cabo mais curto é de 11,4 segundos, praticamente igual ao período ressonante de *heave*, que é de 11,5 segundos, justificando o resultado encontrado. Pela análise da série temporal de ambas as linhas verifica-se que a mais curta está em ressonância e a mais longa não.

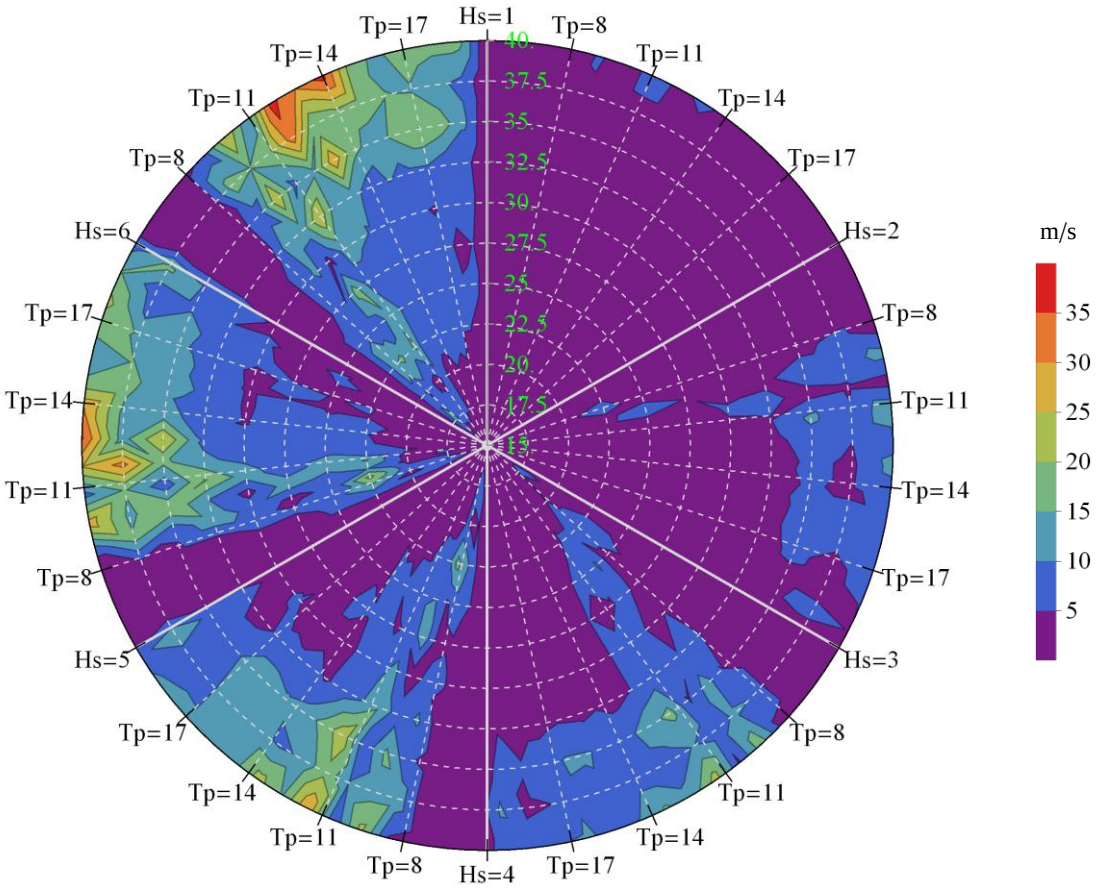

Figura 63. Gráfico de contorno da velocidade resultante máxima extrema do fundo da cesta em função de Hs, Tp e do comprimento do cabo para içamento de 1 pessoa.

Para o cálculo do diagrama de contornos de velocidade resultante máxima extrema, procede-se semelhantemente ao processo de geração do gráfico da Figura 63, porém com uma disposição retangular, e adotando como valor de velocidade para cada par de Tp e Hs, o valor máximo entre todos os comprimentos de cabo. O gráfico, portanto, fica com 3 dimensões, uma dimensão a menos (comprimento do cabo) que o gráfico polar, que tem 4 dimensões.

No mesmo gráfico, determinam-se os contornos de cada limite operacional: segurança, nominal e emergência. A Figura 64 mostra o diagrama de contornos das velocidades resultantes com os limites operacionais destacados.

Notam-se no período de 10, 12 e 13 segundos que o valor da velocidade para Hs de 5,0 metros é maior que a velocidade para Hs de 6,0 metros, o que é aparentemente contraditório, visto que para um mesmo período, o aumento de Hs deveria gerar aumento na resposta dinâmica e não diminuição.

Este fato pode ser explicado pelo comportamento descontrolado do cabo para os casos de carga com estes períodos e Hs de 5,0 e 6,0 metros. Neste caso, trata-se do cabo com comprimento de 40 metros, cujo período natural de pêndulo é de 12,7 segundos, portanto ressonante com o período de pico desses casos de carga. Em função da ressonância, o conjunto cabo e carga funciona como pêndulo duplo, sendo que a carga executa movimento de corpo rígido, com grande inclinação em relação à direção do cabo.

Com o refinamento da malha, utilizando elementos 5 vezes menores, o fenômeno permanece, sem praticamente alterar os valores obtidos com a malha menos refinada.

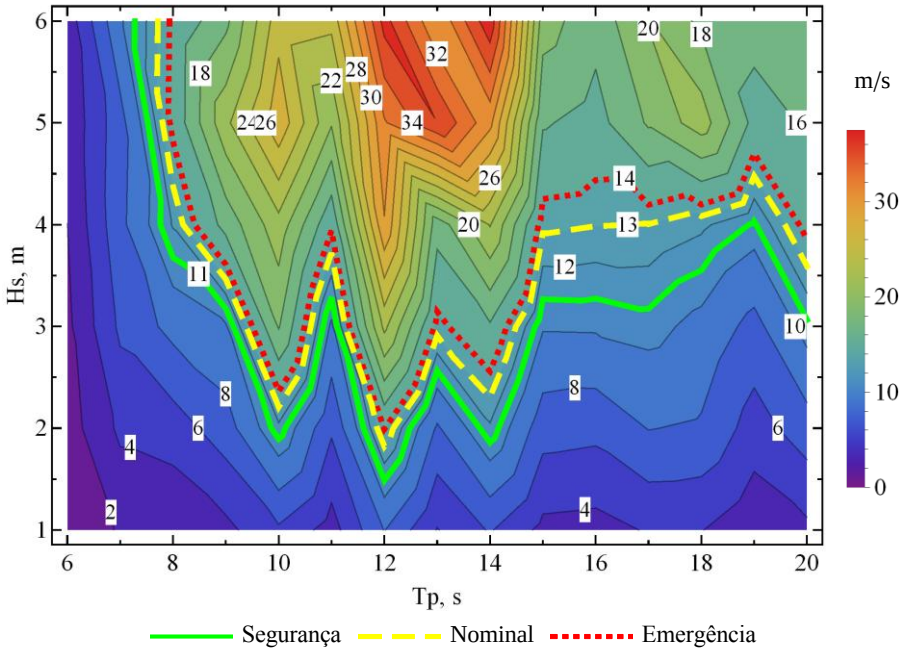

Figura 64. Diagrama com contorno limite da velocidade máxima extrema do fundo da cesta.

Com período de 13 segundos e Hs igual a 6,0 metros, a amplitude do deslocamento é maior e o movimento da cesta é feito com curvas de raios maiores, o que diminui o movimento relativo com o cabo, diminuindo a velocidade. Com Hs igual a 5,0 metros a trajetória tem menor amplitude e mudança de trajetória mais brusca causando um efeito de chicoteamento da carga, aumentando a força. Para Hs com valores inferiores a 5,0 metros, este fenômeno não ocorre. A Figura 65 mostra a trajetória do fundo da cesta para esses casos de carga.

Como estes casos de carga na prática não permitem operações de içamento, para o presente trabalho o fato descrito pode ser relevado, porém pode ser mais bem avaliado em trabalhos futuros.

Além disso, no içamento de pessoas, não é comum o guindaste permanecer com o mesmo comprimento de cabo por longo tempo durante a operação, o que diminui a amplificação dinâmica. Em içamentos de construção e montagem, deve-se analisar com atenção esta situação, pois muitas vezes, para posicionamento da carga e ajustes, é necessário que a mesma fique suspensa por períodos consideráveis.

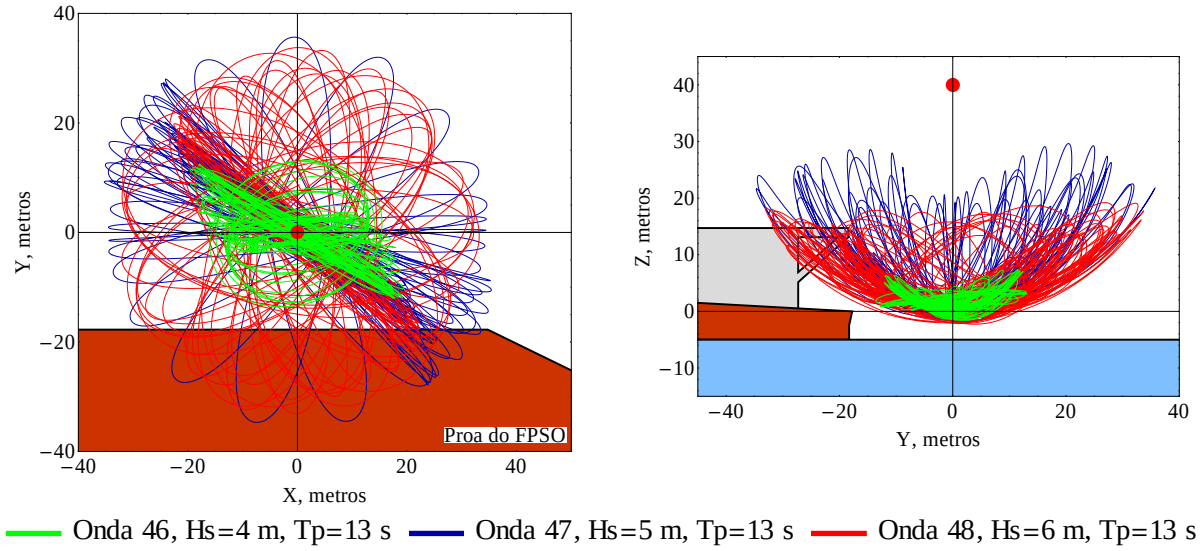

Figura 65. Trajetória do fundo da cesta para os casos de carga Onda 46 a Onda 48.

8.4 FORÇA NO CABO DO GUINDASTE

Para cálculo da força máxima extrema atuante no cabo durante o içamento, fez-se análise de extremos das 90 séries temporais para cada comprimento de cabo, determinando o valor máximo extremo para cada combinação. Para o içamento de 1 pessoa, a força máxima extrema em função de Hs, Tp e do comprimento do cabo é mostrada na Figura 66.

Nesse caso, a força estática máxima para o cabo com comprimento de 15 metros, incluindo a carga, é de 3,95 kN e para o cabo de 40 metros, a força estática máxima é de 4,91 kN.

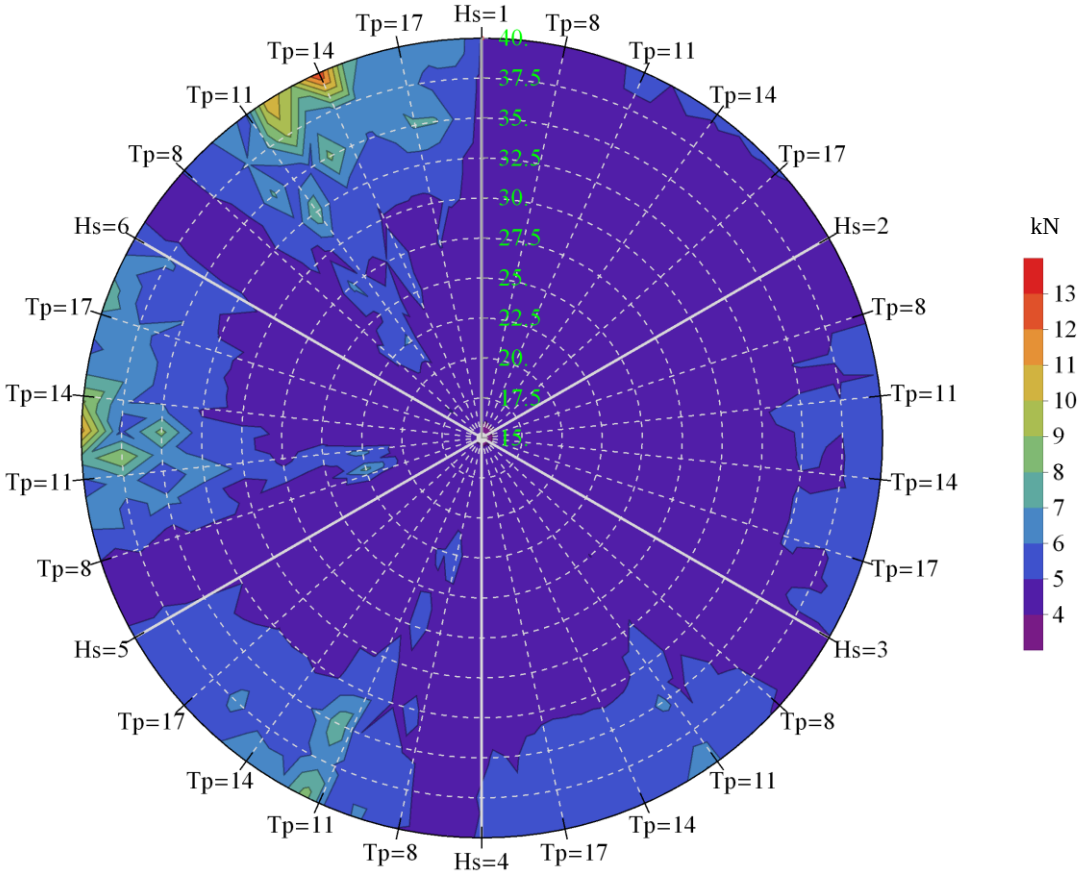

Figura 66. Gráfico de contorno da força máxima extrema do cabo em função de Hs, Tp e do comprimento do cabo para içamento de 1 pessoa.

Nota-se que para Hs até 4,0 metros não há amplificação significativa da tração no cabo em relação à força estática, tendo valor máximo de 7,0 kN, ocorrendo no cabo com comprimento de 40 metros, caso de carga Onda 39, Hs 3,0 metros e Tp 12 segundos, que é o período ressonante de *heave*. O fator de amplificação dinâmica correspondente é de 1,43.

Verifica-se também no gráfico de contorno, que em algumas situações a força diminui com o aumento do comprimento do cabo, como no caso de Hs igual a 6,0 metros e Tp igual a 11,0 segundos (caso de carga Onda 36), sendo a força para comprimento de 32,5 metros maior que no cabo com 35,0 metros. O período natural de pêndulo para o cabo mais curto é de 11,4 segundos, praticamente igual ao período ressonante de *heave*, que é de 11,5 segundos, justificando o resultado encontrado.

A Figura 67 apresenta a série temporal da força no cabo para o caso acima, sendo notável a diferença de magnitudes. Observando-se a animação da linha, constata-se claramente a ressonância do cabo com comprimento de 32,5 metros, com grandes amplitudes de movimento, diferentemente do cabo mais longo.

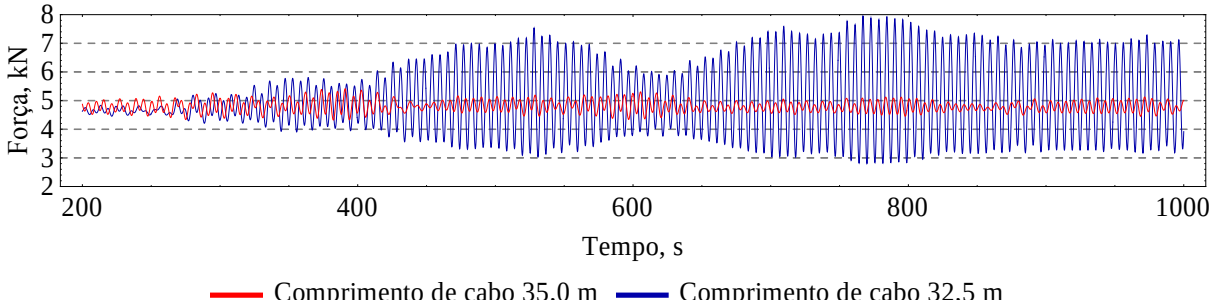

Figura 67. Série temporal da força no cabo em função para o caso de carga Onda 36 e comprimentos de 32,5 e 35 metros.

Para o cálculo do diagrama de contornos de força, procede-se semelhantemente ao processo de geração do gráfico da Figura 66, porém com uma disposição retangular, e adotando como valor de força para cada par de Tp e Hs, o valor máximo entre todos os comprimentos de cabo. O gráfico, portanto, fica com uma dimensão a menos (comprimento do cabo) que o gráfico polar.

No mesmo gráfico, determinam-se os contornos de cada limite operacional: segurança, nominal e emergência. A Figura 68 mostra o diagrama de contornos com os limites operacionais.

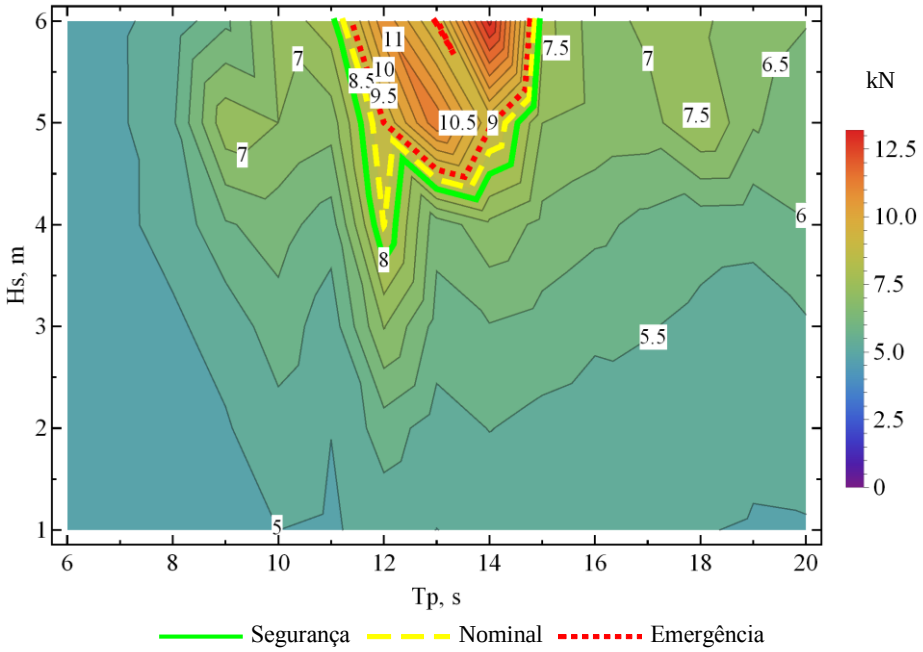

Figura 68. Diagrama com contorno limite da força máxima extrema no cabo.

Nota-se no período de 13 segundos que o valor da força para Hs de 5,0 metros é maior que a força para Hs de 6,0 metros, o que é aparentemente contraditório, visto que para

um mesmo período, o aumento de Hs deveria gerar aumento na resposta dinâmica e não diminuição.

Este fato pode ser explicado pelo comportamento descontrolado do cabo para os casos de carga com período de 13 segundos e Hs de 5,0 e 6,0 metros. Neste caso, trata-se do cabo com comprimento de 40 metros, cujo período natural de pêndulo é de 12,7 segundos, portanto ressonante com o período de pico do caso de carga. Em função da ressonância, o conjunto cabo e carga funciona como pêndulo duplo, sendo que a carga executa movimento de corpo rígido, com grande inclinação em relação à direção do cabo.

Outros comentários sobre este fenômeno são apresentados no item 8.3.

A partir da força no cabo e baseado na carga estática para os diversos comprimentos de cabos, pode-se elaborar o diagrama de contorno da amplificação dinâmica (FAD) e estabelecer os limites operacionais. Para cada ponto do diagrama, o valor estático de referência corresponde ao cabo que foi mais solicitado. A Figura 69 apresenta o diagrama de contorno do FAD e os limites operacionais.

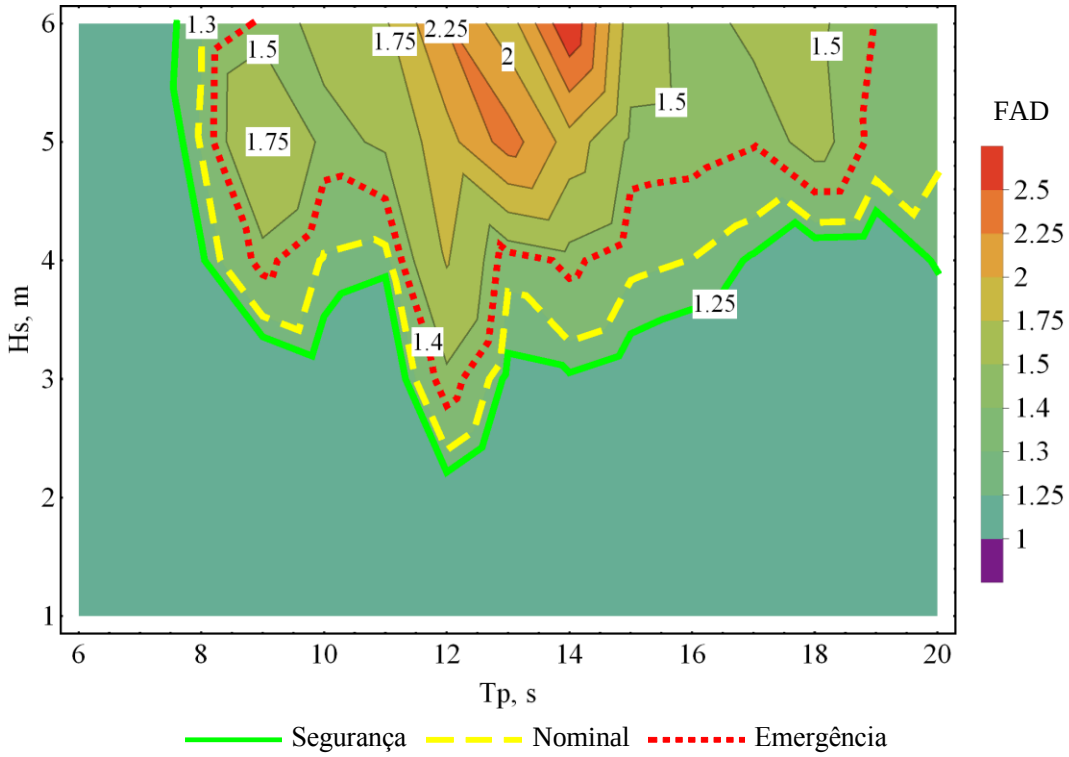

Figura 69. Diagrama com contorno limite do fator de amplificação dinâmica máximo extremo.

8.5 DIAGRAMAS DE CONTORNO LIMITE

Uma vez calculados os contornos operacionais de segurança, nominal e emergência para cada limite considerado, faz-se o cálculo da envoltória para cada situação operacional. A envoltória é formada calculando-se para cada valor de Tp, o maior valor de Hs que seja inferior a todos os contornos limites da situação operacional em análise. A envoltória é calculada automaticamente pelo programa de pós-processamento.

Nota-se que, atualmente, as normas técnicas definem limites de Hs para as operações de içamento de pessoas, devendo estes limites serem considerados no cálculo da envoltória. A limitação de Hs pela tabela de carga do guindaste é levada em conta indiretamente pela limitação da força no cabo nas tabelas de carga.

A Figura 70 mostra os contornos dos limites adotados para a situação nominal, que é obtida através de valores sem coeficiente de segurança. A região amarela indica a área operacional permitida, que atende a todos os limites nominais, neste caso, limitada por Hs e pela velocidade do fundo da cesta.

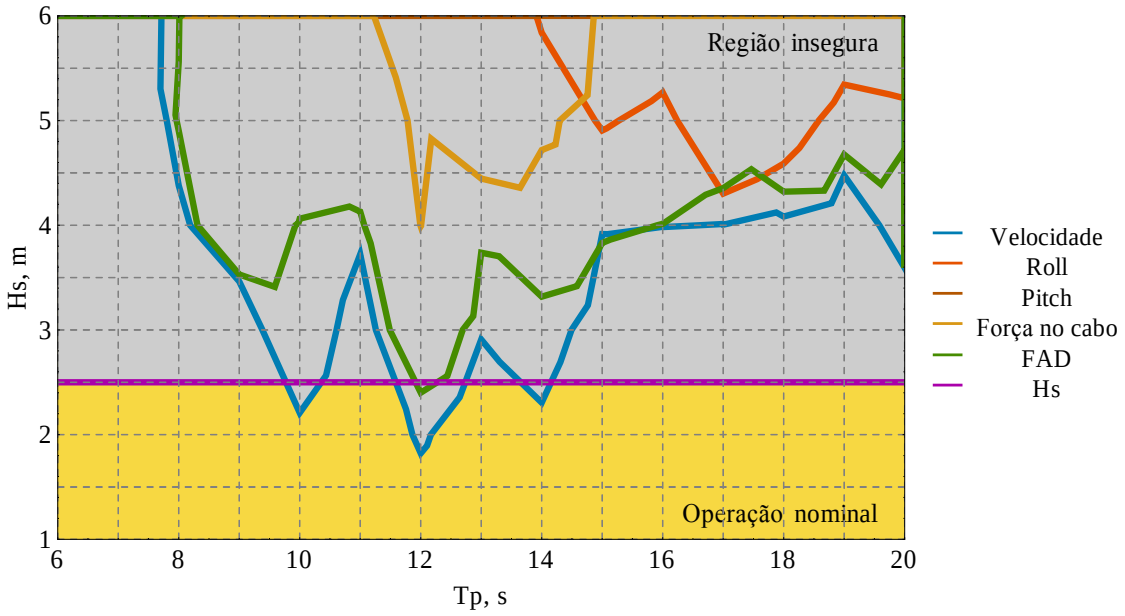

Figura 70. Diagrama operacional intermediário com contornos limites para operação nominal.

A Figura 71 mostra os contornos dos limites adotados para a situação de emergência, que é determinada pela utilização de valores menos conservadores, porém ainda dentro de uma situação controlada de risco à critério da operadora do FPSO. A região cor laranja indica

a área operacional permitida, que atende a todos os limites da operação de emergência, neste caso, limitada por Hs e pela velocidade do fundo da cesta.

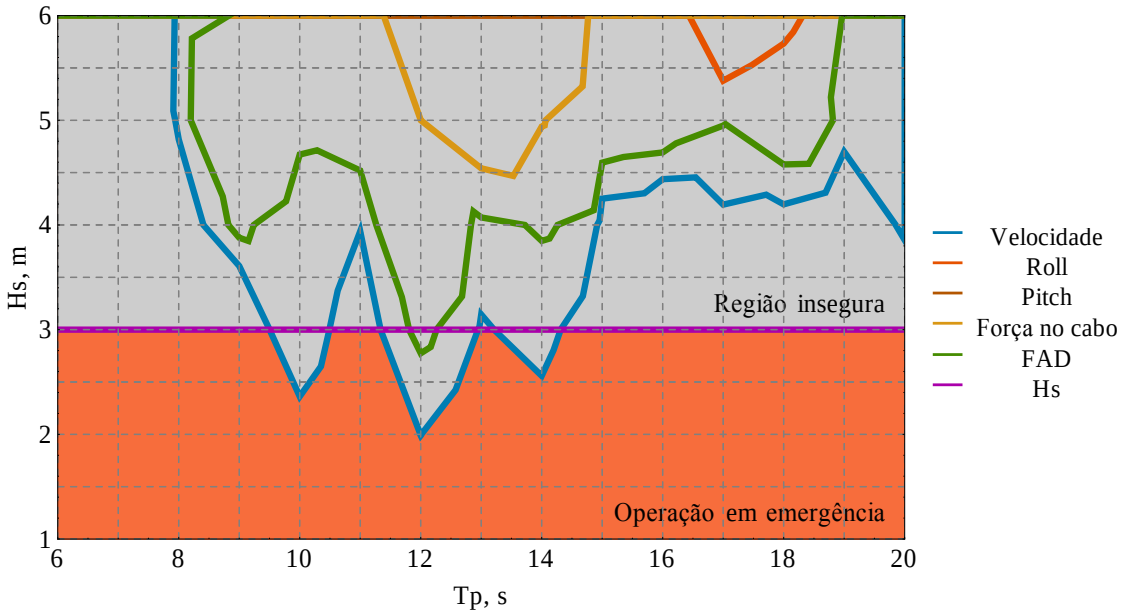

Figura 71. Diagrama operacional intermediário com contornos limites para operação de emergência.

A Figura 72 mostra os contornos dos limites adotados para a situação de operação de segurança ou operação segura, que é determinada pela utilização de valores mais conservadores que os valores nominais a fim de compensar incertezas do processo e a variabilidade na determinação de períodos naturais, alturas de onda, RAO da unidade entre outros, à critério da operadora do FPSO. A região verde é a área operacional permitida, que atende a todos os limites de operação segura, neste caso, limitada por Hs e pela velocidade do fundo da cesta.

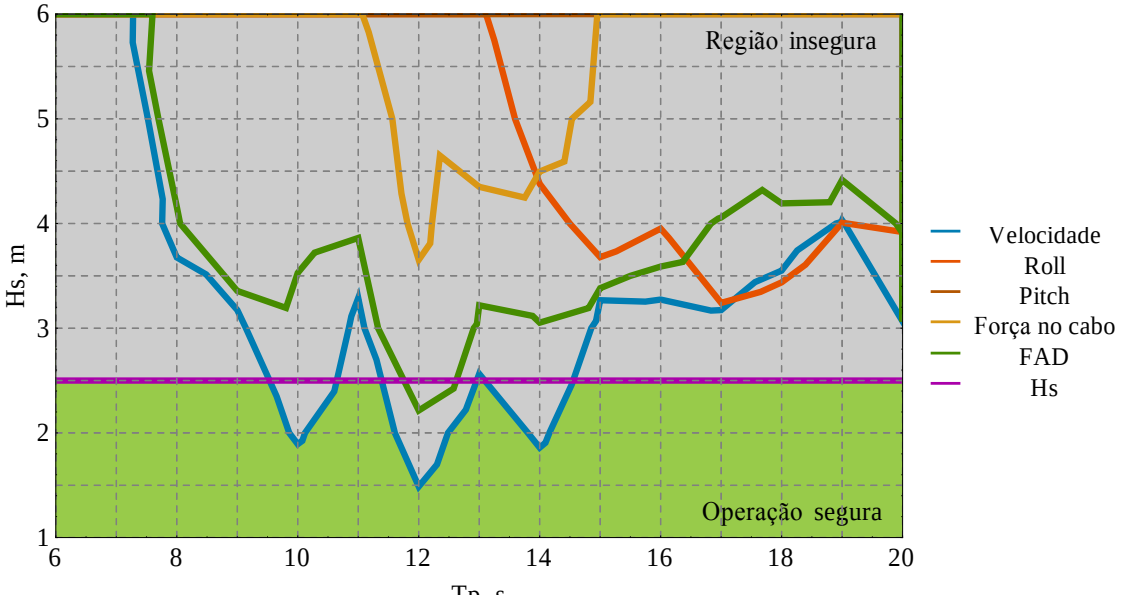

Figura 72. Diagrama operacional intermediário com contornos limites para operação segura ou de segurança.

Nota-se que em todos os casos, os limitadores operacionais foram Hs e a velocidade da cesta, portanto devem ter seus valores limites bem avaliados, para não inviabilizarem operações que seriam seguras ou não autorizarem operações inseguras. Nota-se também que em nenhuma condição ocorreu a imersão da carga, que é nitidamente identificada na série temporal de força no cabo ou através da posição do fundo da cesta em relação à altura de onda.

8.6 DIAGRAMAS OPERACIONAIS LIMITE

Estabelecidas as envoltórias para cada situação operacional, pode-se reuni-las em um único diagrama denominado diagrama operacional limite de guindaste *offshore* ou DOLGO. Neste diagrama, a representação dos contornos operacionais limites já não é mais necessárias.

Um DOLGO deve ser desenvolvido para cada condição e parâmetros da unidade e carga. No presente caso, levou-se em conta o calado, através do RAO, o raio de operação de 20 metros, o peso da carga (1 pessoa mais equipamentos), comprimentos máximos e mínimos do cabo do guindaste e aproamento. A Figura 73 mostra o DOLGO resultante para o caso em estudo.

Para qualquer par de Hs e Tp que cruzam-se abaixo da situação operacional escolhida (segura, nominal ou emergência), a operação de içamento de pessoas pode ser realizada.

O DOLGO apresentado considera as limitações de Hs para as situações operacionais de segurança, nominal e de emergência, com valores de 2,0, 2,5 e 3,0 metros respectivamente, conforme Tabela 9.

Nota-se no DOLGO que a limitação normativa de Hs a 2,0 metros é violada para Tp de 12 segundos e Hs de 1,8 metros para a operação nominal e Hs de 1,5 metros para operação segura. Considerando-se a Norma Regulamentadora 38 (BRASIL, 2013), a violação ocorre com períodos de 10, 12 e 14 segundos.

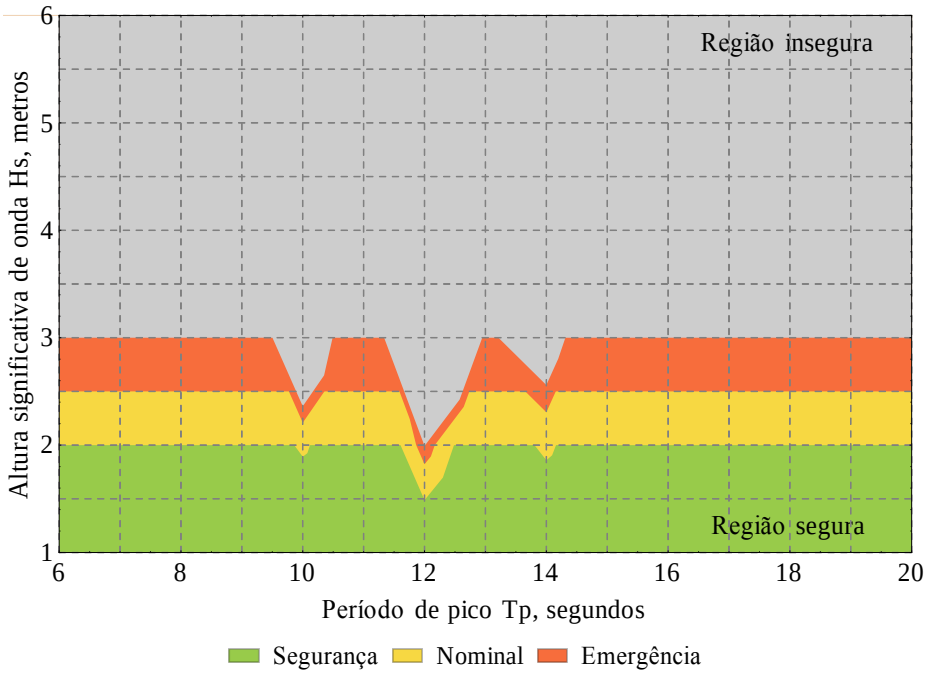

Figura 73. Diagrama operacional limite de guindaste offshore, incluindo limitação de Hs.

A proposta deste trabalho é que o parâmetro Hs não faça parte diretamente da limitação operacional e sim, juntamente com Tp, tenha seus efeitos considerados na resposta dinâmica da carga, cabo e guindaste. Fazendo assim, todas as regiões operacionais se expandem, ampliando a janela meteorológica disponível. A Figura 74 mostra o DOLGO sem a limitação de Hs.

O valor permitido de Hs expande-se significativamente em relação ao DOLGO com limitação, principalmente para valores abaixo de 9 segundos e valores acima de 15 segundos, mostrando que quando o período de onda está fora da faixa de períodos ressonantes do FPSO

e cabo do guindaste, é possível utilizar alturas de onda maiores sem comprometer a segurança da operação para o caso analisado.

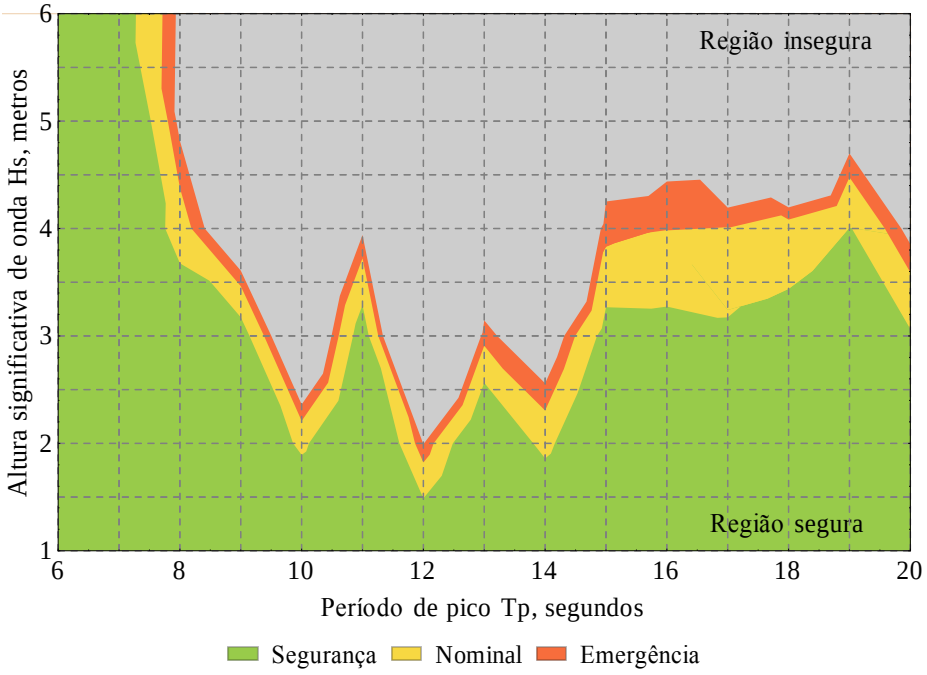

Figura 74. Diagrama operacional limite de guindaste offshore, sem limitação de Hs.

Para o içamento do *container offshore*, procede-se de maneira análoga ao içamento de pessoas, fazendo a adoção dos limites adequados. Neste caso não é necessário ou usual o estabelecimento de situações de emergência ou de segurança, sendo utilizados os valores nominais dos limites, que já contemplam os coeficientes de segurança para cada componente do içamento.

É mostrado na Figura 75 o diagrama operacional intermediário com contornos limites para operação nominal de içamento de *container offshore* contemplando a limitação de Hs. Nota-se que a limitação para períodos abaixo de 11 segundos se dá pela velocidade, até 15 segundos se dá pelo FAD, até 18,4 segundos pelo movimento de *roll* e a partir daí se dá novamente pelo FAD.

Como este exemplo escolhido utiliza dados reais de um guindaste *offshore*, vê-se claramente a coerência entre o limite de 3,0 m para Hs advindo da tabela de cargas do guindaste e o resultado do DOLGO diante da análise dinâmica.

Embora haja esta aderência entre resultados, deve-se ressaltar que o RAO da unidade é para a situação de calado máximo. Como a tabela de cargas não leva isto em consideração, numa situação de calado menor, provavelmente haverá pontos da envoltória que estarão

abaixo do limite de Hs de 3,0m, podendo levar a um içamento inseguro. Com a utilização do DOLGO este problema fica sanado.

A Figura 76 mostra o DOLGO sem a limitação de Hs, indicando que há grande folga operacional com a extensão de Hs além do limite da tabela de carga.

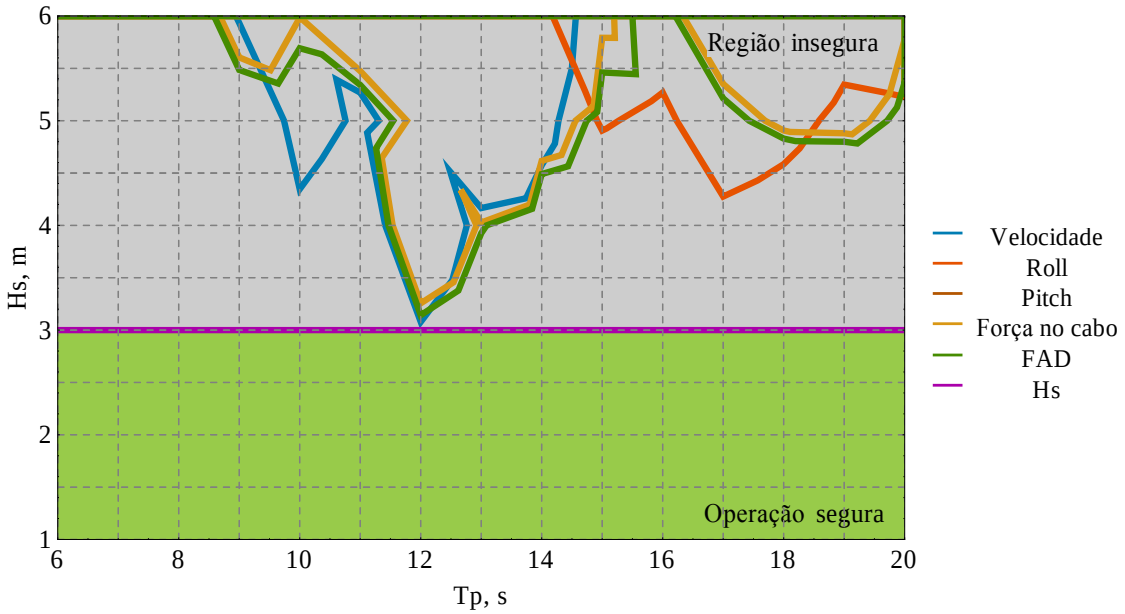

Figura 75. Diagrama operacional intermediário com contornos limites para operação nominal de içamento de *container offshore*, com limitação de Hs.

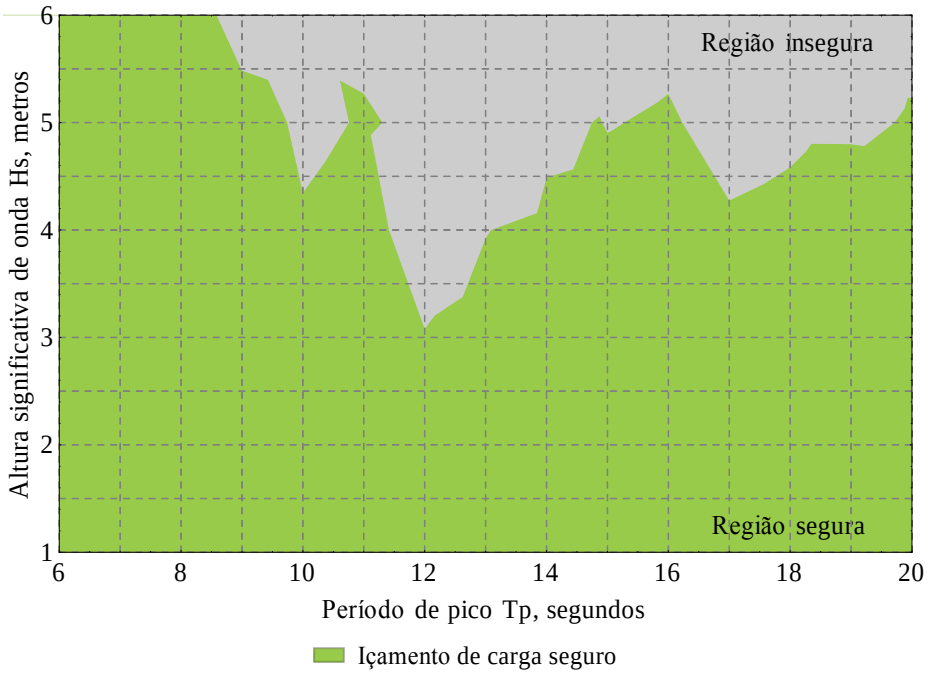

Figura 76. Diagrama operacional limite de guindaste offshore, sem limitação de Hs, para içamento de *container offshore*.

8.7 APLICAÇÕES PRÁTICAS

A seguir, faz-se duas aplicações práticas com os DOLGO desenvolvidos, utilizando a metodologia descrita no Capítulo 6, para situações típicas em unidades *offshore*.

Aplicação 1: Supõe-se que a unidade em análise está prestes a executar o içamento de 1 pessoa. O período de pico de onda, medido por radar instalado no FPSO, varia de 8 a 9 segundos, com Hs variando de 2,0 a 3,1 metros, dependendo da velocidade do vento. Deve ser verificado se é possível realizar esta operação na situação de segurança.

Aplicação 2: O FPSO em estudo sofre incidência de marulho (*swell*) com Tp de 16 a 17 segundos e Hs variando de 3,5 a 4,1 metros. Devido a uma emergência médica por causa de um acidente em barco de apoio que serve à unidade, um tripulante necessita ser transportado para bordo do FPSO. Deve ser verificado se é possível realizar esta operação de içamento na situação de emergência.

A Figura 77 e Figura 78 mostram os DOLGO com e sem limitação de Hs, bem como as áreas operacionais (valores de Hs e Tp) para as aplicações propostas.

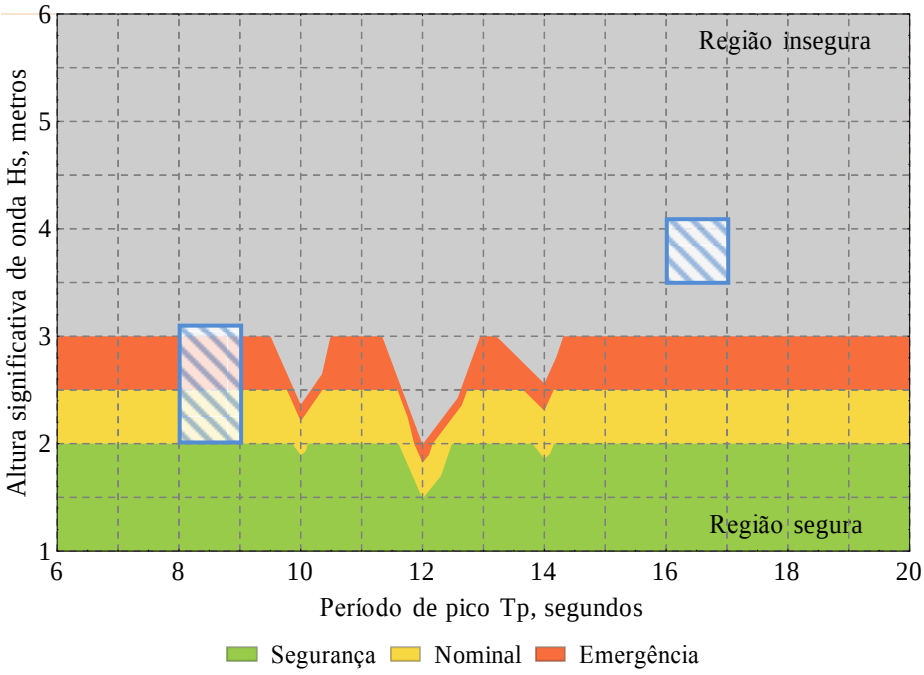

Figura 77. Diagrama operacional limite de guindaste offshore, com limitação de Hs e com áreas operacionais das aplicações propostas em destaque.

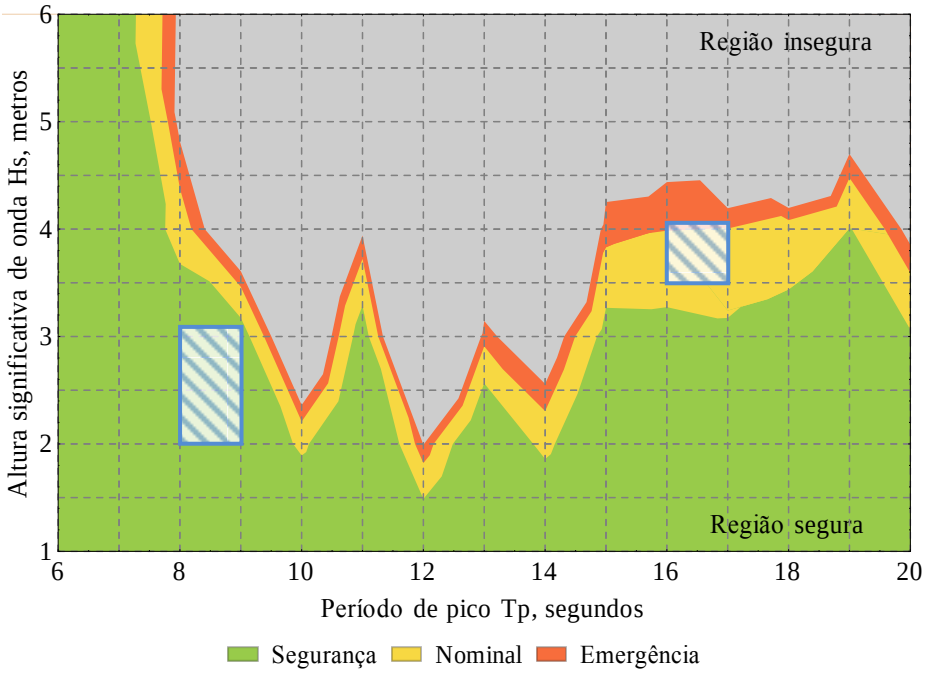

Figura 78. Diagrama operacional limite de guindaste offshore, sem limitação de Hs e com áreas operacionais das aplicações propostas em destaque.

Nota-se na Figura 77 que em nenhuma das duas aplicações é possível fazer o içamento. Na primeira, o valor de Hs mínimo medido é igual ao Hs do limite operacional de segurança, o que inviabilizaria a operação. Na segunda aplicação, devido a restrição de Hs, a área operacional fica completamente na região insegura, também inviabilizando a operação.

A Figura 78 mostra o DOLGO sem limitação de Hs, expandido seus valores admissíveis, fazendo com que as duas operações sejam viabilizadas, ainda com certa margem de segurança.

Para efeito de ilustração da importância do DOLGO das aplicações expostas, pode-se citar o exemplo da Bacia de Campos, que possui altura significativa de onda média com valores entre 2,0 a 2,2 metros, no período de maio a novembro. No caso de regiões com condições ambientais mais adversas, maior é a importância de consideração dos períodos de onda, e consequentemente de aplicação da metodologia do DOLGO.

Com estas aplicações, mostra-se a necessidade de aprimoramento da metodologia utilizada atualmente para limitação das operações de içamento offshore, que utilizam primordialmente Hs como parâmetro de decisão, desprezando o período das ondas.

Mesmo quando o fabricante utiliza os parâmetros dinâmicos específicos de uma unidade offshore para projeto do guindaste, geralmente a tabela de carga disponibilizada pelo

operador não contempla o período da onda, mas só a altura significativa, perdendo o benefício de uma previsão mais eficaz da segurança do guindaste e da operação de içamento.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são feitas as considerações finais sobre o içamento analisado e sobre os resultados oriundos da aplicação numérica do mesmo e da viabilidade de aplicação do diagrama operacional limite de guindaste *offhosre*. São feitas também sugestões para trabalhos futuros, que podem estender o conhecimento sobre as operações com guindastes em unidades flutuantes, trazendo maior segurança e confiabilidade para os içamentos.

9.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando a metodologia aplicada para a elaboração do diagrama operacional limite de guindaste *offshore* e o içamento considerado no estudo de caso, bem como os parâmetros que influenciam o comportamento dinâmico do mesmo, considera-se que foram alcançados os objetivos propostos de incluir outros parâmetros além da altura significativa de onda, permitindo melhor análise no projeto, planejamento e execução de içamentos. Também é possível fazer as seguintes considerações:

a) Quanto à normalização estudada para içamento de pessoas, há diferenças numéricas significativas entre os critérios de projeto e operação, sendo a mais conservadora a NORSOK R-002 e R-003, seguidas da EN 13852-1, todas limitando Hs em 2,0 metros. O projeto de Norma Regulamentadora 38 limita a altura de onda a 2,5 metros e a norma mais arrojada é a API RP 2C não estabelecendo limites de altura de onda;

b) Nenhuma das normas ou guias consultados considera diretamente o período da onda no projeto dos guindastes e operações de içamento.

c) As normas brasileiras não englobam todas as etapas de projeto e operação de içamento de pessoas, devendo ser complementadas por normas e guias internacionais;

d) o Software SITUA/Prosim mostrou-se uma ferramenta eficaz na análise dinâmica do içamento, mostrando resultados totalmente coerentes na faixa usual de operações reais de içamento;

e) após execução da análise de valores extremos, os resultados das diversas execuções do programa de análise dinâmica, tiveram variação muito baixa entre si, sendo da ordem de 1% a 3%;

f) Os períodos naturais dos cabos combinados com os períodos naturais do FPSO e contribuíram predominantemente para determinação dos contornos limites operacionais;

g) A metodologia de elaboração e aplicação do DOLGO mostrou-se prática e eficaz, podendo contribuir para o aumento da segurança e melhor utilização do potencial dos equipamentos de içamento;

h) A análise de valores extremos deve ser sempre realizada, pois não há como garantir que os valores de pico conduzirão sempre a projetos a favor da segurança, conforme análise no Apêndice E;

i) A não consideração do período de pico da onda, mas somente sua altura significativa, pode levar a situações de perigo durante o içamento, visto que para alguns períodos de pico não é possível realizar a operação mesmo estando dentro de Hs limitado pelas normas;

j) A não consideração do período de pico da onda, mas somente sua altura significativa, pode levar a situações conservadoras, proibindo desnecessariamente a operação de içamento, visto que para alguns períodos de pico é possível realizar a operação mesmo estando acima de Hs limitado pelas normas.

9.2 TRABALHOS FUTUROS

Diante da complexidade e importância do tema, além da quantidade de parâmetros envolvidos no içamento, recomenda-se que sejam abordados em trabalhos futuros:

a) Análise considerando movimentos contínuos de rotação e translação da lança do guindaste, bem como da variação contínua do comprimento do cabo;

b) consideração da ação do operador do guindaste na atenuação dos movimentos do guindaste e da carga durante a operação;

c) consideração dos esforços devido ao movimento do barco de apoio para elaboração do DOLGO, principalmente na retirada da cesta do convés;

d) inclusão no DOLGO de outros limites operacionais, como imersão da cesta, passeio máximo, volume de segurança, *offlead*, *sidelead* entre outros;

e) determinação dos critérios admissíveis e limites a serem atendidos no içamento para situação de segurança, nominal e emergência, como por exemplo velocidade e inclinação máxima admissível, passeio máximo, entre outros, uma vez que a literatura não aborda o tema;

f) estabelecimento de parâmetros para consideração da elasticidade e amortecimento da estrutura do guindaste através de elemento tipo *general link*, com rigidez translacional em 3 direções e amortecimento, posicionando entre o ponto de conexão com a unidade flutuante e a linha que representa o cabo do guindaste, com objetivo de substituir a estrutura deste na simulação, não deixando de considerar sua flexibilidade;

g) instrumentação e monitoração dinâmica de um guindaste e embarcação em operação para obtenção de dados em tempo real e comparação com os dados numéricos;

h) estudo da modelagem e análise dinâmica da cesta de transporte e cabo quanto à formação de pêndulo duplo, detectado em alturas significativas de onda altas;

i) aprimoramento do método de detecção da imersão da cesta ou contato da cesta com o mar.

j) refinamento da malha de Hs e Tp para formação dos casos de carga, diminuindo o intervalo entre valores;

k) elaboração do DOLGO em função do movimento de Heave ao invés de Hs, e período de Heave ao invés de Tp, objetivando facilitar a medição destes parâmetros e considerar automaticamente condições que afetam o comportamento dinâmico do FPSO como o calado.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10876:** estruturas oceânicas - cesta de transporte de pessoal - especificação**.** Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 13541-1:** linga de cabo de aço, parte 1: requisitos e métodos de ensaio**.** Rio de Janeiro, 2014.

ALBRECHT, C. H. **Algoritmos Evolutivos Aplicados à síntese e Otimização de Sistemas de Ancoragem.** 2005.179p. Tese (doutorado em engenharia civil) –COOPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

ALMEIDA, C. A. M. **Tratamento do efeito da flexibilidade de juntas tubulares na análise de estruturas fixas offshore**.2008.102 p. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Combustível**. Produção de petróleo e gás natural por poço – terra**. 2014. Disponível em: < http://www.bdep.gov.br>. Acesso em: 28 abr. 2014.

_____. **Produção de petróleo e gás natural por poço - mar**. 2014. Disponível em: < http://www.bdep.gov.br>. Acesso em: 28 abr. 2014.

API - American Petroleum Institute. **API Specification 2C: s**pecification for offshore pedestal mounted cranes. 6th ed. Washington, 2004.

_____. **API Recommended Practice 2D:** operation and maintenance of offshore cranes. 6th ed. Washington, 2007.

ARGATOV, I. **Response of a wire rope strand to axial and torsional loads: Asymptotic modeling of the effect of interwire contact deformations**, Volume 48, Issue 10, 15 May 2011, Pages 1413–1423

BAHIENSE, R. A. **Implantação e avaliação de uma metodologia fortemente acoplada para análise de sistemas flutuantes offshore.** 2007. 127p. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – COOPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

BANDIK, P. J. . **A body-exact strip theory approach to ship motion computations.** Tese (doutorado), University of Michigan, Michigan, 2009.

BARROS,G. L. M. **Navegar é fácil**. 11ª edição. Rio de Janeiro: Edições marítimas, 2005.

BATALHA, A. F. **Análise de fadiga de estruturas offshore tipo topside**. Rio de Janeiro, 2009. 168 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BÍBLIA. Êxodo. Português. **Bíblia Shedd, antigo e novo testamento**. São Paulo: Ed. Vida Nova, 2005. 2. ed.

BINOTI, D. H. B. ET AL**.** Uso da função weibull de três parâmetros em um modelo de distribuição diamétrica para plantios de eucalipto submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, 2009,vol.34, nº1, p.147-156,2009.

BRASIL. Tribunal Marítimo. **Acórdão**. Processo nº 17.076/96. Rio de Janeiro, 13 abr. 2000. Disponível em: < http://www.mar.mil.br/tm/download/anuario/17076.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2014.

BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora 12**: segurança no trabalho em máquinas e equipamentos. Brasília, 2011.

BRASIL. Tribunal Marítimo. **Acórdão**. Processo nº 25.719/11. Rio de Janeiro, 12 jun. 2012. Disponível em: < http://www.mar.mil.br/tm/download/anuario/25719.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2014.

BRASIL. Supremo Tribunal Superior do Trabalho. **Recurso ordinário em mandado de segurança**. Nº TST-RO-9-62.2012.5.20.0000. Ministério Público do trabalho da 20ª região e Petróleo Brasileiro S.A. Relator: Alberto Luiz Bresciani de Fontan Pereira. Aracaju, 22 out. 2013.

BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora 38**: segurança e saúde em plataformas de petróleo. Proposta de texto. Brasília, 2013.

BRIDON. **Crane rope catalogue**. South Yorkshire, UK. 2011

CATHERRALL, RORGER.**Incidents with marine personnel transfer.** Aberdeen,2013. Disponível em :<http://www.reflexmarine.com/industry-expertise/crew-transfer-safety/>. Acesso em:14 maio 2014.

CEN, European Committee for Standardization. **EN 13852-1**: offshore cranes, part 1: general-purpose offshore cranes. Brussels, Belgium, 2004.

_____. **EN 14502-1**: Equipment for the lifting of persons, part 1. Brussels, Belgium, 2010.

CLOUGH, RW; PENZIEN, J. **Dynamics of structures**. 2*nd* ed. California: Computers and structures, 2010.

DANTAS, C. M. S.. **Metodolodia de análise de fadiga de risers rígidos no domínio da freqüência com utilização de modelos hidrodinâmicos tridimensionais linearizados.** 2004. 233p. Dissertação (doutorado em engenharia civil) –COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

DE LUCA, J. C. Aprendendo com Os acidentes: O segundo acidente Na plataforma DE enchova. In: Morais, José Mauro de. **Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore**. Brasília: Ipea: Petrobras, 2013. p. 309-312.

FALTINSEN, O. M. **Sea loads on ships and offshore structures**. Cambridge: University Press, 1993.

FONSECA, M. M. **Arte Naval**. 5. ed. Rio de Janeiro: Serviço de Documentação Geral da Marinha, 1989. 2 v. V. 1.

GERMANISCHER LLOYD. **Rule for classification and construction industrial services**. Hamburg: GL, 2011.

GIRÓN, A. R. C. **Aplicação de metodologias de projeto integrado de sistemas de ancoragem e risers na explotação de petróleo offshore.** 2009. 133 p. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

GROVE, Márcio de Abreu. **Sistema de posicionamento híbrido para FPSO's**. 2005. 96 p. Tese (mestrado em engenharia oceânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

IMCA - International Marine Contractors Association. **Guidance on procedures for transfer of personnel by basket on the UK continental shelf**: IMCA SEL 08/01. United Kingdom, 2001.

_____. **Guidance on the transfer of personnel to and from offshore vessels**: IMCA SEL 025, IMCA M 202. United Kingdom, 2010.

IMO - INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **International life-saving appliance code (LSA Code).** London, 1997.

_____. **Adoption of amendments to the international life-saving appliance code (LSA) code:** Resolution MSC.293(87)**.** London, 2010.

IMPA - International Maritime Pilot's Association. **Shipping industry guidance on pilot transfer arrangements**. London: IMPA, 2012.

ISO - International Organization for Standardization. **ISO 19902:** petroleum and natural gas industries - fixed steel offshore structures. Geneva, 2007.

_____. **ISO 19901:** petroleum and natural gas industries - specific requirements for offshore structures, part 6: marine operations. Geneva, 2009.

JACOB, Breno Pinheiro. **Programa PROSIM: simulação numérica do comportamento de sistemas para explotação de petróleo offshore, manual teórico.** COPPE/UFRJ, 2006.

JACOB, Breno Pinheiro. **Notas de aula de introdução à análise de estruturas offshore.** COPPE-UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2011.

JOURNÉE J. M. J ; MASSIE W.W. **Offshore hydromechanics**. 1*st* ed. Delft: Delft University of Technology,2001.

KARNOVSKY, I. A.; LEBED, O. I. . **Formulas for structural dynamics: tables, graphs and solutions**. New York: McGraw-Hill, 2001.

LANGEN, I., THAN, T. K., BIRKELAND, O., RØLVÅG, T. **Simulation of dynamic behavior of a FPSO crane**. Artigo, [S.l.], 2003.

LIMA, A. L. **Avaliação de metodologias de análise de unidades estacionárias de produção de petróleo offshore.** Dissertação de M. Sc., Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, RJ, Brasil, 2006.

MARCIOM886. 2009. Disponível em: < http://youtu.be/0Pca4a627XU>. Acesso em: 21 abr. 2014.

MIDASOFT Inc., Midas Gen 2014, Version 1.2. New York, NY: 2014.

MORAIS, J. M. **Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore**. Brasília: Ipea: Petrobras, 2013.

MURDOCH, K. Lifting of personnel offshore: transfer between installation and vessel**.** In: THE 17th NORTH SEA OFFSHORE CRANE LIFTING CONFERENCE**,** 2012, Aberdeen. **Proceedings**… Lysaker, Norway: KTF, 2012.

NASCENTE**. Sinal amarelo no caso FPSO Marlim Sul**. Sindicato dos Petroleiros do Norte Fluminense, Macaé, 05 jun. 2012.

NASA. **Issues on human acceleration tolerance after long-duration space flights. Technical memorandum**. Houston: NASA, 1992.

NEWLAND, D.E. **An introduction to random vibrations, spectral & wavelet analysis**. 3*rd* ed. Mineola, NY: Dover publications, Inc, 2005.

NOV – NATIONAL OILWELL VARCO. **Cranes – Lifting and handling solutions**. Houston, 2011.

OGP - INTERNATIONAL ASSOCIATION OF OIL E GAS PRODUCERS. **Lifting & hoisting safety recommended practice: Report N° 376**. United Kingdom, 2006.

OLIVEIRA, M. M. F. **Análise estatística de dados ambientais com aplicação da teoria de valores extremos e predição do nível do mar utilizando redes neurais artificiais.** 2009. 263 p. Tese (doutorado em engenharia civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

PACHECO, A. A. **Estudo numerico-experimental da instalação do tanque de flutuação de um riser auto-sustentavel utilizando a plataforma**. 2011. Tese (doutorado em engenharia civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

PAIK, J. K. ; THAYAMBALLI, A. K. . **Ship-shaped offshore installations: design, building, and operation**. New York: Cambridge, 2007.

PAPALEO, A. **Metodologia para definição de casos de carregamentos ambientais equivalentes para o projeto de risers em catenária**. 2009. 131 p. Tese (doutorado em engenharia civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

PEREIRA, S. L. A. **As contas e as Plataformas**.Texto disponibilizado em 13 de janeiro de 2014. In: SINAVAL. Disponível em:< http://www.sinaval.org.br/noticia-538.php>. Acesso em: 28 de abril de 2014.

PINHO, U. F. **Caracterização dos estados de mar na bacia de campos.** 2003. 123 p. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – COOPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

RAO, S. **Vibrações mecânicas.** 4 ed. São Paulo: Pearson, 2009.

REITZE, G.; MANDEVILLE, R.; STREIT, P. Installing the world's deepest FSHR's, for the GOM Cascade & Chinook development. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 2011, Houston. **Proceedings…** Houston: OTC, 2011.

RIBEIRO, E. O; LIMA, J. A. M.; NUNES, L. M. P.; GUERRA, L. A. A. Distribuição conjunta de Alturas significativas e períodos de pico de ondas na bacia de campos**.** In: 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE PETROLEO E GÁS, 2005, Salvador. **Anais**… Salvador: IBP, 2005.

2013 WORLDWIDE SURVEY OF FLOATING PRODUCTION, STORAGE AND OFFLOADING (FPSO) UNITS. **Offshore Magazine**, Houston, ago. 2013. Poster integrante da edição vol.73, n.8, ago. 2013.

RONCETTI, L. A software do design and management of lifting operations for shipbuilding and offshore construction**.** In: Congresso Pan-Americano de engenharia naval, transporte marítimo e engenharia portuária, 2011, Buenos Aires. **Anais eletrônicos**...

RONCETTI, L. **Plano de rigging - formação e desenvolvimento de riggers.** Vitória: TechCon, 2010.

RONCETTI, L. **Planejamento e execução de operações de içamento em plataformas offshore.** Vitória: TechCon, 2012.

ROQUE, J. L. Panorama da Segurança Operacional na Operação Offshore**.** In: JORNADA DE SEGURANÇA OPERACIONAL PARA A AVIAÇÃO DE INSTRUÇÃO, 2013, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <http://www2.anac.gov.br/SGSO2/Seminários/2013/PanoramadeSeguranca.pdf >. Acesso em: 06 maio 2014.

SANTIAGO, A. A. **Identificação modal aplicada ao posicionamento dinâmico de sistemas oceânicos.** 2008. 140 p. Dissertação (mestrado em engenharia oceânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SENA, N. S. **Planejamento de rede logística de transporte aéreo de pessoas para atividades de exploração e produção de petróleo em bacia marítima utilizando programação inteira mista**. 2011. 125 p. Dissertação (mestrado em engenharia de produção) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SENRA, S. F. **Metodologia de análise e projeto integrado de sistemas flutuantes para explotação de petróleo offshore**. 2004. 316 p. Tese (doutorado em engenharia civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

SGUERRI, E. . 2011. Disponível em: < http://commons.wikimedia.org/wiki/File:FPSO_OSX-1.jpg>. Acesso em: 26 abr. 2014.

SOUZA, G. L. . **Metodologia para estimativa da vida à fadiga da estrutura de interface do casco de um FPSO com módulo da planta com suportação tipo multicoluna sob esforços de viga-navio.** 2014. 110 p. Dissertação (mestrado em projeto de estruturas) – PPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

STANDARDS NORWAY. **NORSOK Standard R-002**: Lifting equipment. Lysaker, Norway, 2012.

STANDARDS NORWAY. **NORSOK Standard R-003**: Safe use of lifting equipment. Lysaker, Norway, 2004.

WESTWOOD, Douglas. **Mercado de plataformas offshore cresce no período 2014 a 2018**. Texto disponibilizado em 17 de fevereiro de 2014. In: SINAVAL. Disponível em:< http://www.sinaval.org.br/noticia-622.php>. Acesso em: 28 abr. 2014.

FUNCIONÁRIOS caem de plataforma da Petrobras e um morre em Natal. **G1**. São Paulo, 28 dez. 2011. Brasil. Disponível em:<http://g1.globo.com/brasil/noticia/2011/12/funcionarios-caem-de-plataforma-da-petrobras-e-um-morre-em-natal.html>. Acesso em: 28 dez. 2011.

WOLFRAM RESEARCH, Inc., Mathematica, Version 9.0.1. Champaign, IL: 2012.

GLOSSÁRIO

Afundamento
Também queda livre ou *heave*. Rápido movimento para baixo quando caindo no "cavado de onda". (BARROS, 2005)

Arfagem
Também caturro ou *pitch*. Jogo do navio, quando considerado no sentido proa a popa. (FONSECA, 1989)

Avanço
Também *surge*. Movimento da embarcação na direção proa-popa ou popa-proa.

Balanço
Também jogo ou *roll*. Movimento de oscilação de um bordo para outro.

Banda
Inclinação da embarcação para um dos bordos, medida em graus.

Barlavento
O lado de onde vem o vento, em relação à embarcação.

Blowout
Erupção descontrolada de fluidos do reservatório, geralmente petróleo ou gás, podendo ter consequências catastróficas se atingir a unidade.

Boca moldada
Boca medida entre as faces exteriores das Cavernas, excluindo a espessura do chapeamento exterior. Quando não for feita referência à seção específica, significa Boca Moldada na Seção-Mestra.

Borda Livre
Distância vertical entre a superfície da água e o convés da borda livre, medida em qualquer ponto da extensão do navio.

Calado
Profundidade em que se encontra o ponto mais baixo da quilha de uma embarcação. O calado mede-se verticalmente a partir de um ponto na superfície externa da quilha.

CBE
Carga bruta estática. Somatório de todos os pesos que o guindaste deverá içar, incluindo a carga, moitão, acessórios, pernas de cabo e fator de contingência de peso.

CBR
Capacidade bruta requerida. Carga total que o guindaste deverá içar, incluindo a carga, todos os acessórios de içamento, fator de contingência de peso e fator de amplificação dinâmica, quando não embutido na tabela de carga do guindaste (RONCETTI, 2010).

CBT
Capacidade bruta tabelada. Carga máxima que o guindaste pode içar em segurança nas condições previstas pelo fabricante e declaradas na tabela de cargas ou curva de cargas do guindaste. (RONCETTI, 2010).

CMT
Carga máxima de trabalho. Carga máxima que um equipamento ou acessório está autorizado a sustentar.

CTP
Cesta de transporte de pessoal.

Deriva
Também deslizaento lateral ou *sway*. Movimento de translação lateral da embaracação.

FAD
Fator de amplificação dinâmica. Proporção de um efeito de ação dinâmica a um efeito de ação estática correspondente. Um valor apropriado de FAD pode ser aplicado às ações estáticas para simulação das ações dinâmicas. (ISO, 2007).

Flotel
Plataforma ou outra embarcação que serve de suporte a outra unidade, ancorada próximo à esta, fornecendo alojamento, áreas de lazer, oficinas entre outras facilidades.

FPS
Floating and production systems.

FPSO
Floating *production, storage and offloading* ou unidade flutuante de produção, armazenagem e transferência, para está ultima palavra também há outras traduções: *offload* (transbordo, descarga ou descarregamento).

Guinada
Também cabeceio ou *yaw*. Movimento de oscilação horizontal em torno no eixo vertical da embarcação.

Heave
Ver afundamento.

Heel
Ver banda.

Hs
Signifcant wave height. Altura siginifcativa de onda. Média da alturas de 1/3 das maiores ondas em um intervalo de medição.

Içamento não rotineiro
Içamento não repetitivo, conduzido por plano de *rigging* específico.

Içamento *offboard*
Içamento da carga de ou para outro lugar que não a plataforma onde o guindaste está fixado.

Içamento *onboard*
Içamento da carga da plataforma para a própria plataforma onde o guindaste está fixado.

Içamento rotineiro
Içamento repetitico, não complexo, feito por guindaste sobre pedetal, conduzido por plano de rigging padrão, podendo este ser genérico, isto é, abrangendo cargas de geometria e pesos diversos.

Meia-nau
Parte do casco compreendia entre a proa e a popa.

MODU
Mobile offshore drilling unit. Unidade móvel de perfuração oceânica (BRASIL, 2010).

Moitão
*hook block***.** Polame, catarina. Conjunto de polias e gancho que fazem a ligação da carga com o cabo do guindaste. O moitão sem polias, para uma única perna de cabo é também denominado "headache ball".

MOU
Mobile offshore unit

Plano de rigging
Projeto técnico, seguro, econômico e eficaz das operações necessárias ao içamento, composto de informações técnicas, memórias de cálculo, desenhos técnicos e outros documentos.

Pontal Moldado
Pontal medido entre a linha de base moldada e a face superior do vau do convés a que se referir.

Pitch
Ver arfagem.

Raio de operação do guindaste
A distância medida na horizontal entre o eixo de giro do guindaste e o CG da carga.

Roll
Ver balanço.

Sotavento
O lado para onde vai o vento; bordo contrário àquele de onde sopra o vento, em relação à embarcação.

Surge
Ver avanço.

Sway
Ver deriva.

TLP
Tension leg plataform, plataforma de pernas tensionadas.

Trim
É a inclinação para uma das extremidades. Pode ser obtido pela diferença entre os calados da popa e da proa, e é medido em metros.

Trim, ângulo de Trim
Ângulo da inclinação para uma das extremidades (popa ou proa), medido em graus.

TPB
Toneladas de porte bruto ou tonelagem de porte bruto. Peso em toneladas que o navio pode transportar, incluídos carga, combustível, aguada, lubrificantes, víveres, sobressalentes, enfim, tudo que necessita para sua completa operação, incluindo tripulação e seus pertences.

Yaw
Ver guinada.

VLA
Vertical load anchor.

APÊNDICE A – RAO DO FPSO EM ESTUDO

A seguir são exibidos os gráficos com as funções de transferência de movimento ou *response amplitude operator* (*RAO*) em função da frequência e período para o FPSO utilizado no estudo de caso, para calado de 21 metros. As demais características da unidade estão no Capítulo 7.

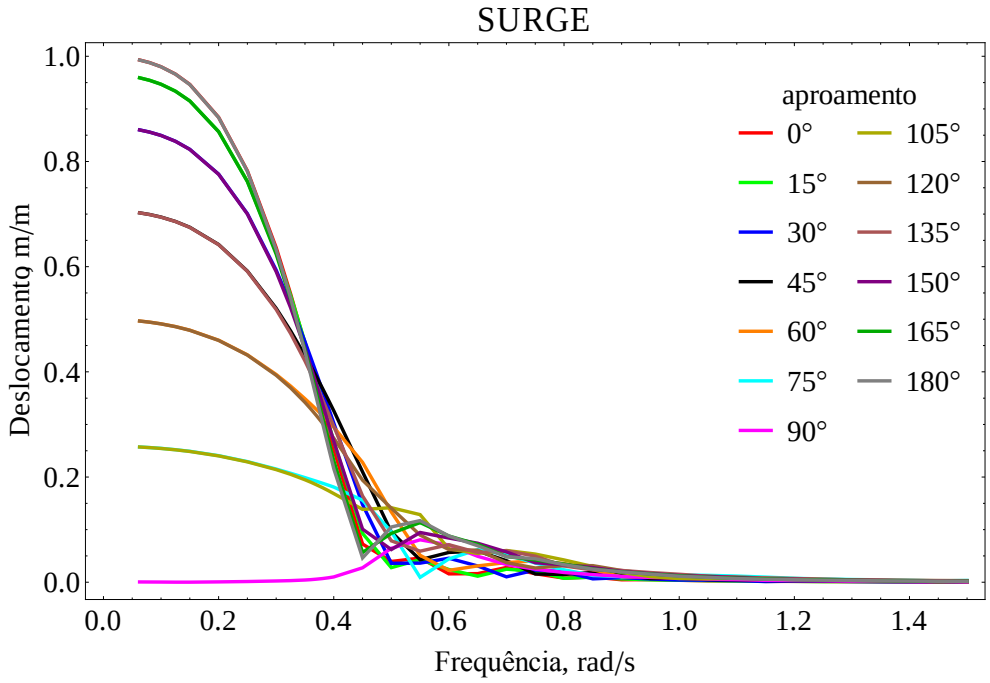

Figura 79. RAO de *surge* em função da frequência.

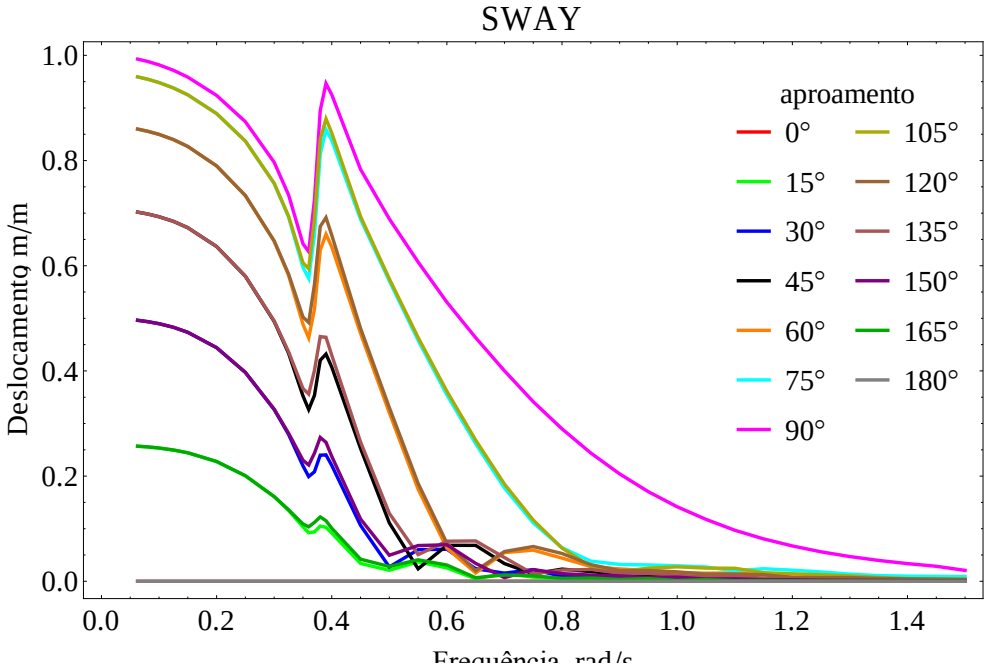

Figura 80. RAO de *sway* em função da frequência.

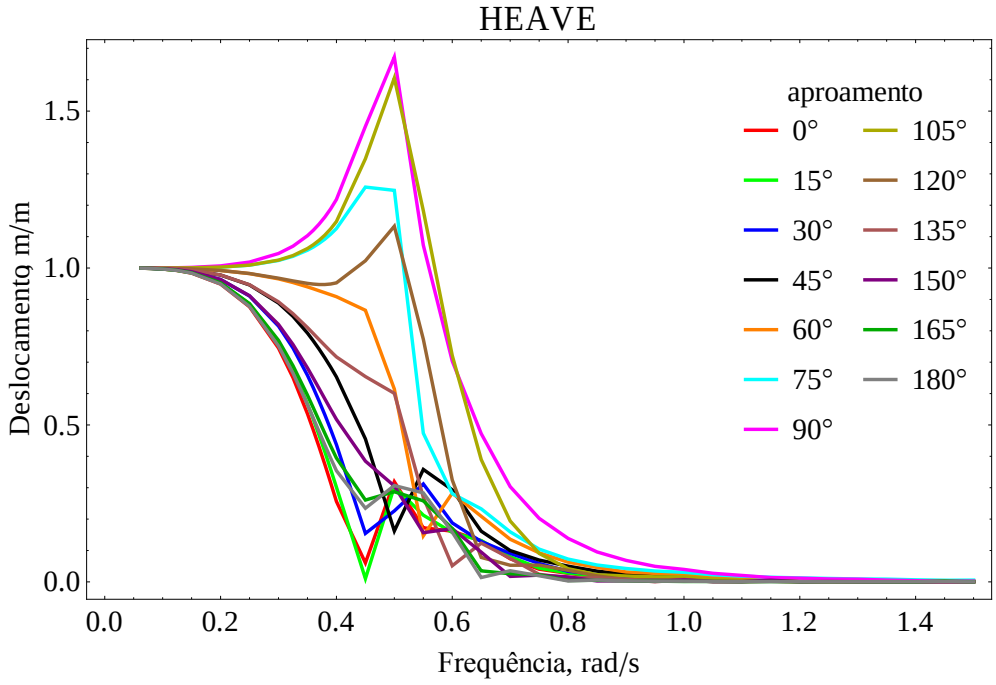

Figura 81. RAO de *heave* em função da frequência.

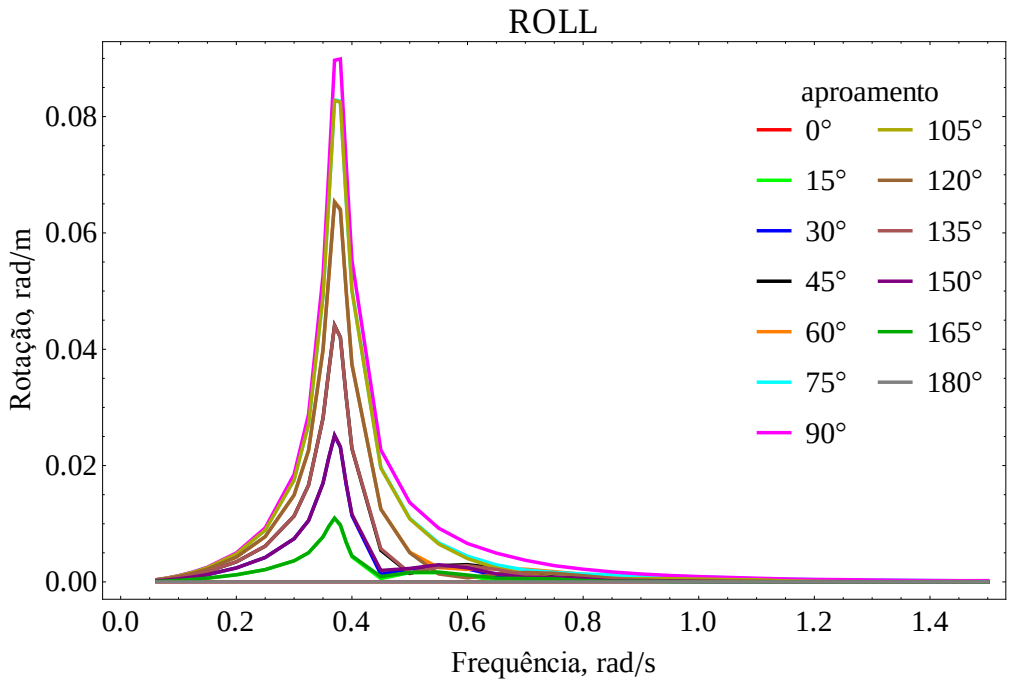

Figura 82. RAO de *roll* em função da frequência.

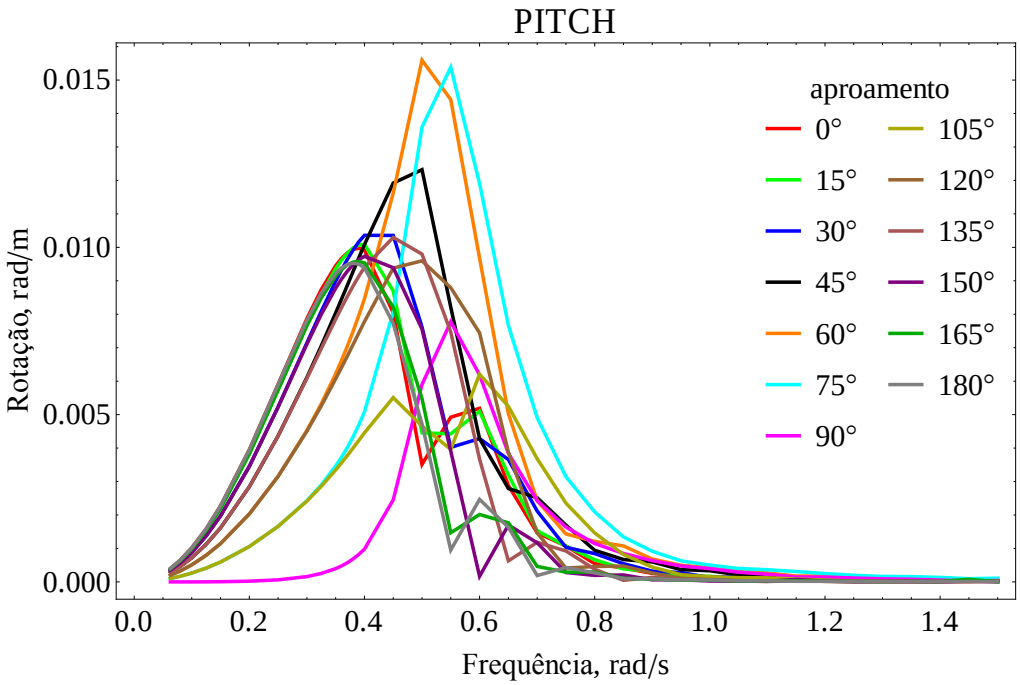

Figura 83. RAO de *pitch* em função da frequência.

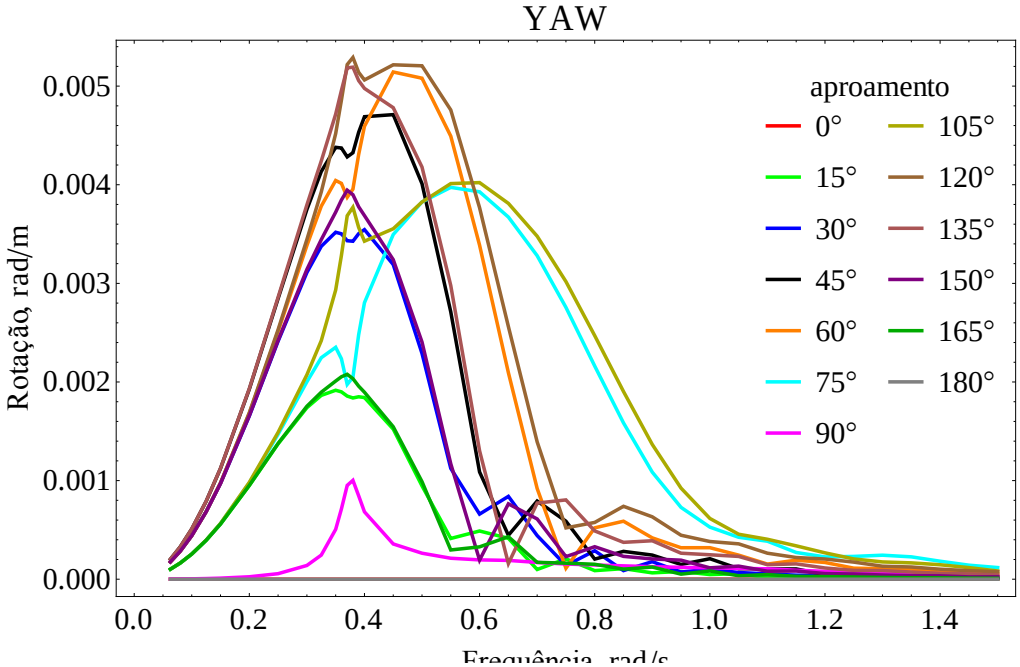

Figura 84. RAO de *yaw* em função da frequência.

A seguir são exibidos os gráficos com as funções de transferência de movimento ou *response amplitude operator* (*RAO*) em função do período.

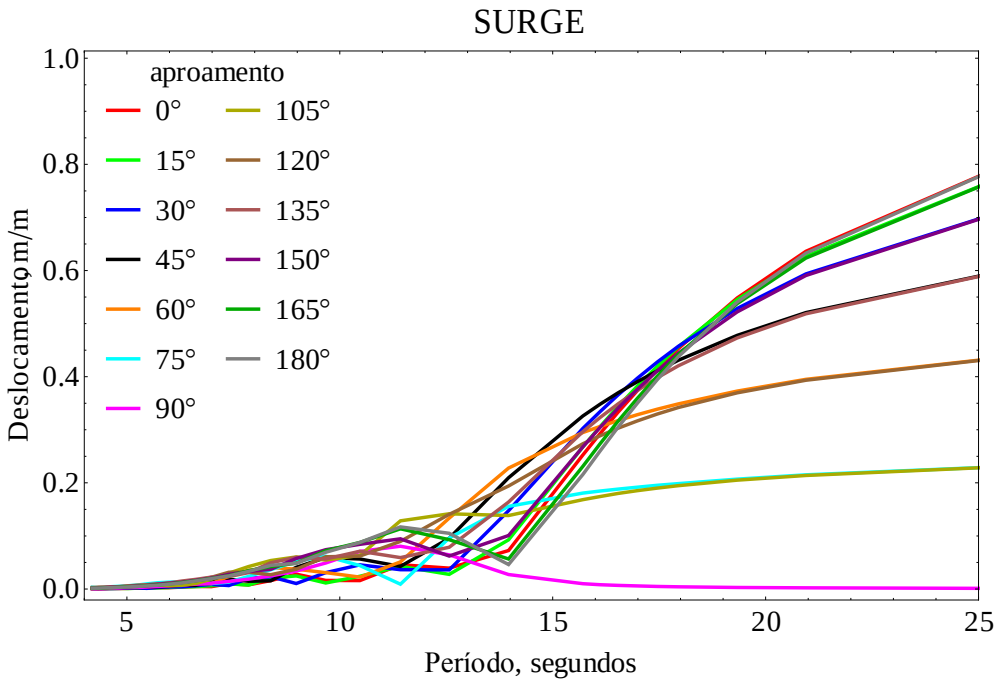

Figura 85. RAO de *surge* em função do período.

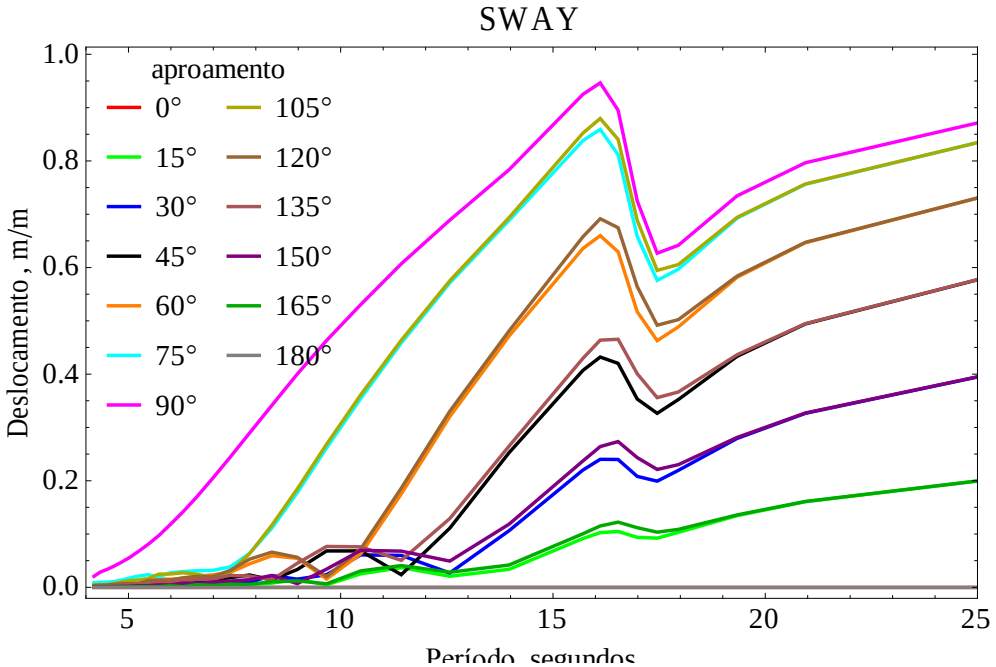

Figura 86. RAO de *sway* em função do período.

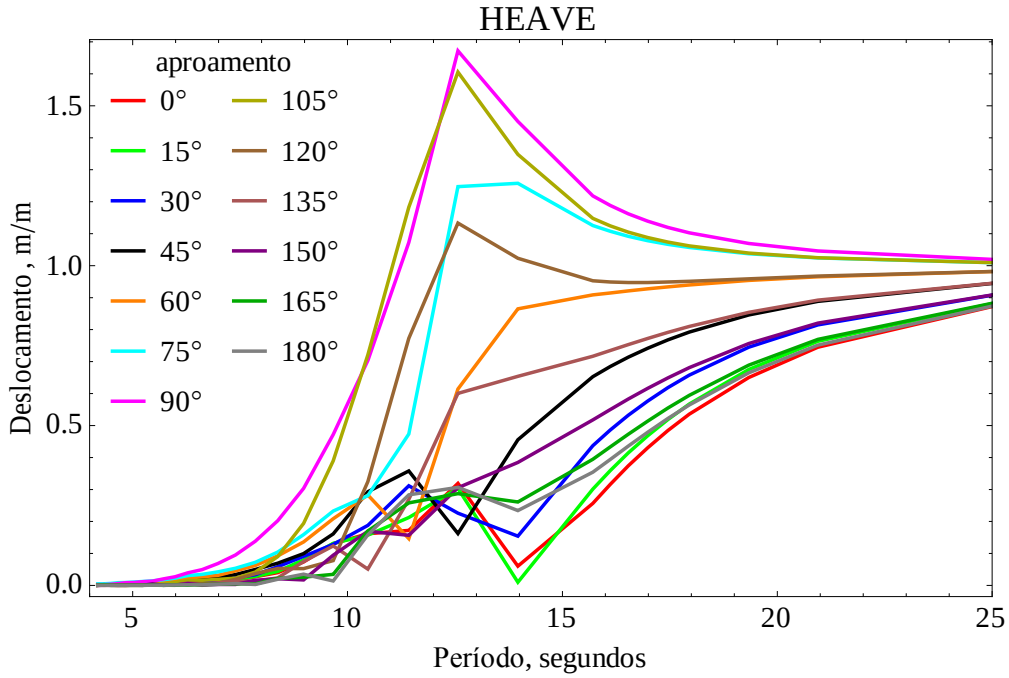

Figura 87. RAO de *heave* em função do período.

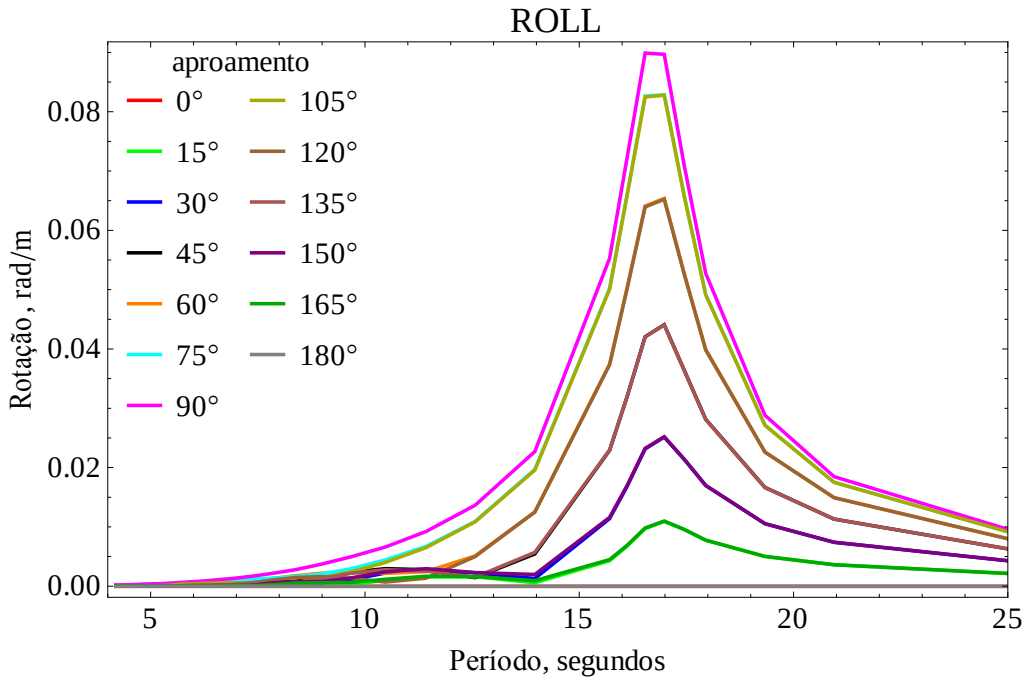

Figura 88. RAO de *roll* em função do período.

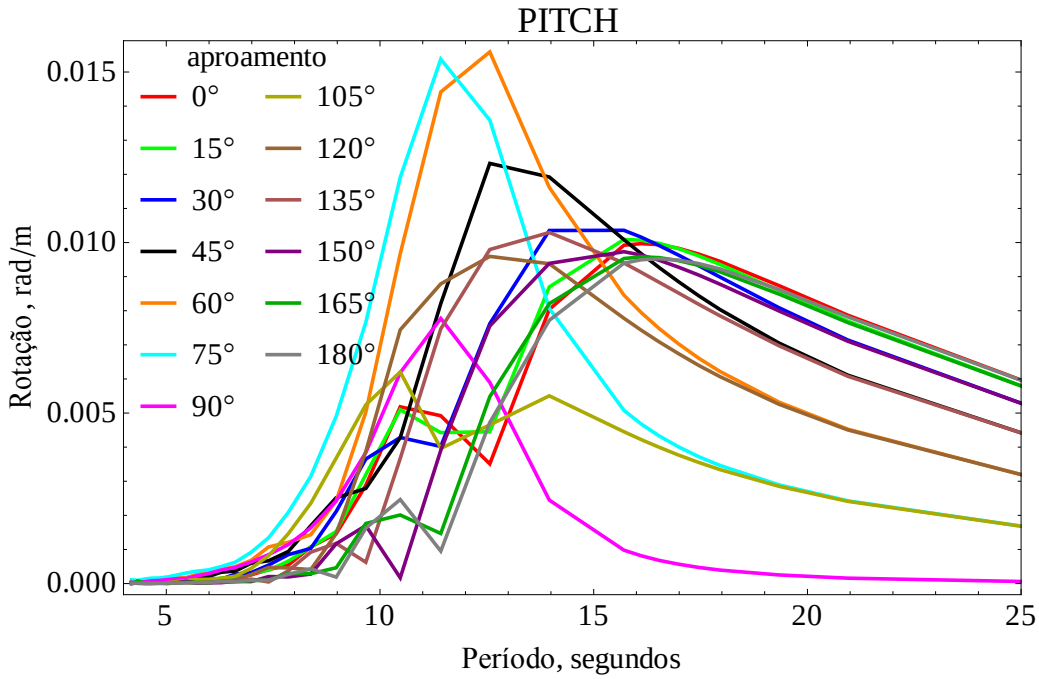

Figura 89. RAO de *surge* em função do período.

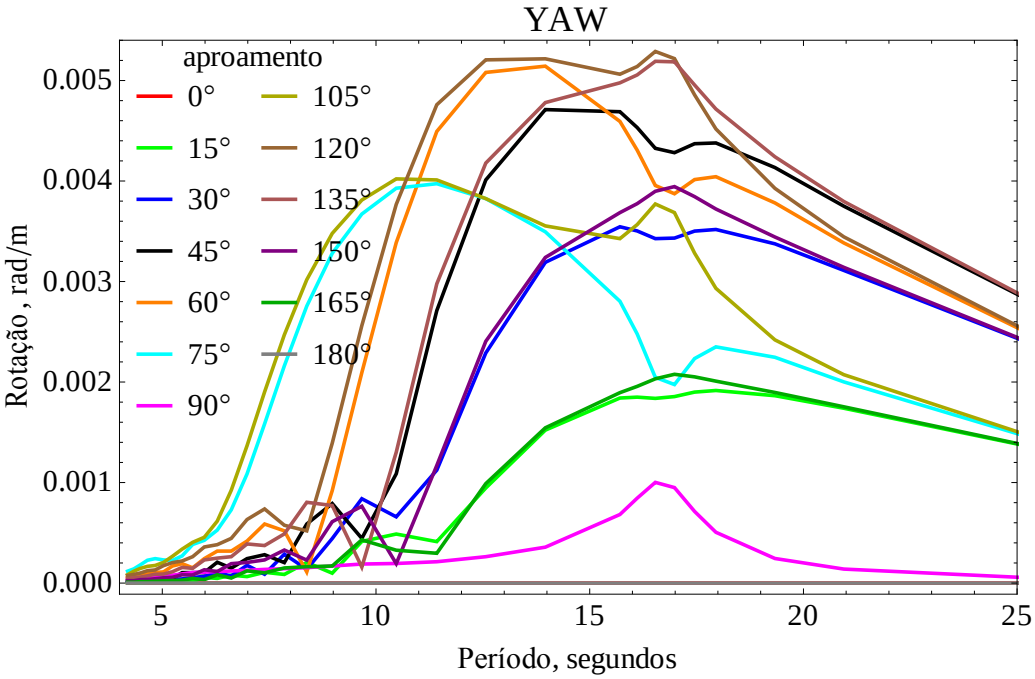

Figura 90. RAO de *yaw* em função do período.

Para facilitar a visualização do RAO para o aproamento adotado de 30°, este foi destacado dos demais juntamente com o aproamento de 0° e 15°, apresentado nas Figura 91,Figura 92 e Figura 93 para os movimentos de *heave, roll e pitch.*

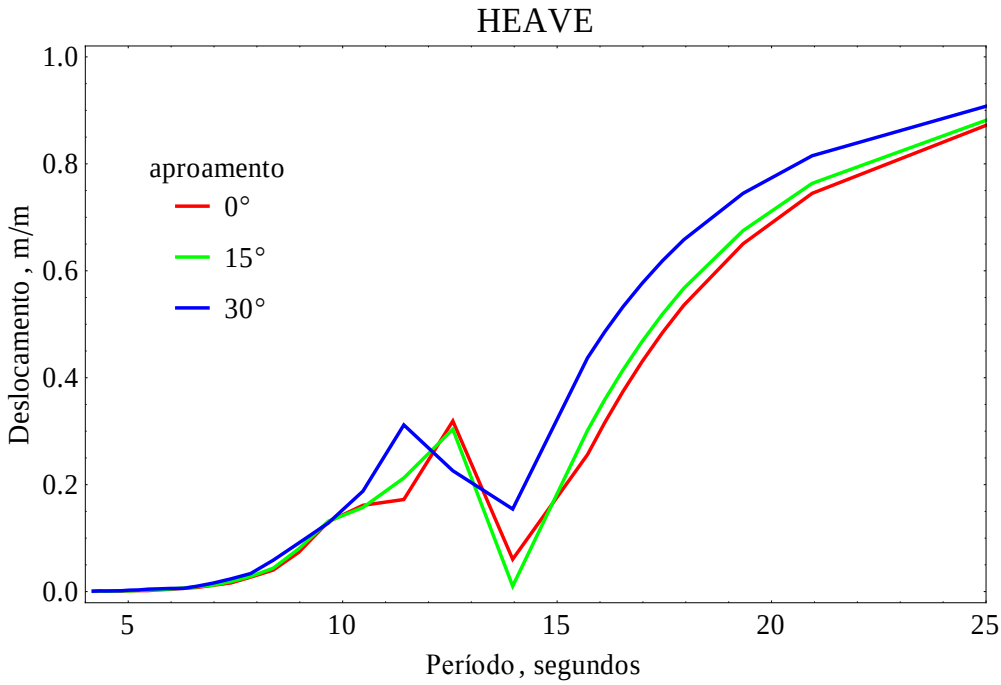

Figura 91. RAO de *heave* em função do período para aproamento de 0°, 15° e 30°.

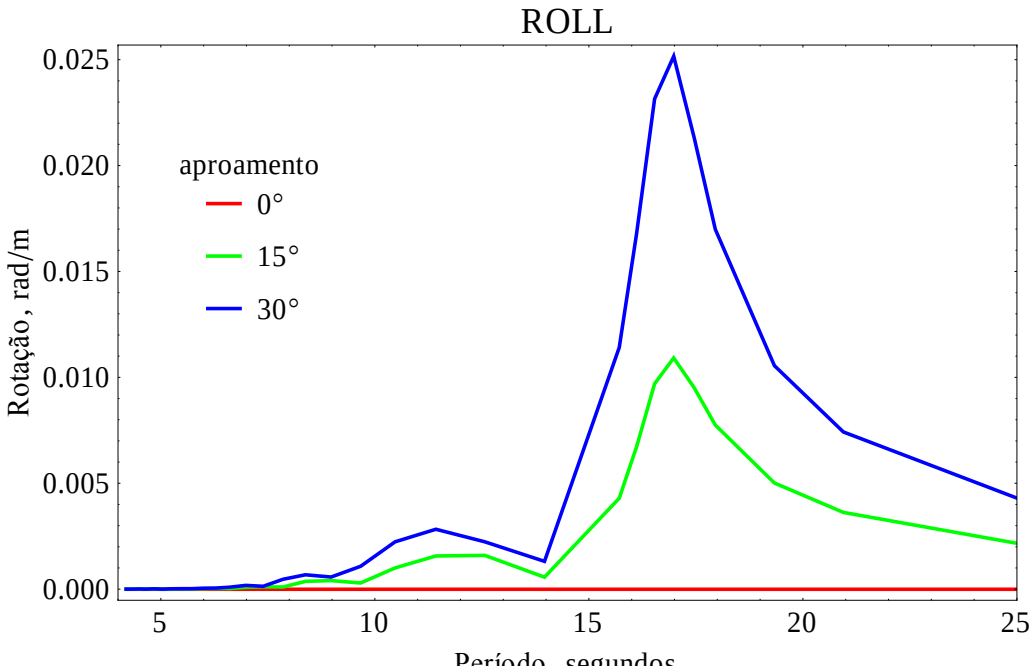

Figura 92. RAO de *roll* em função do período para aproamento de 0°, 15° e 30°.

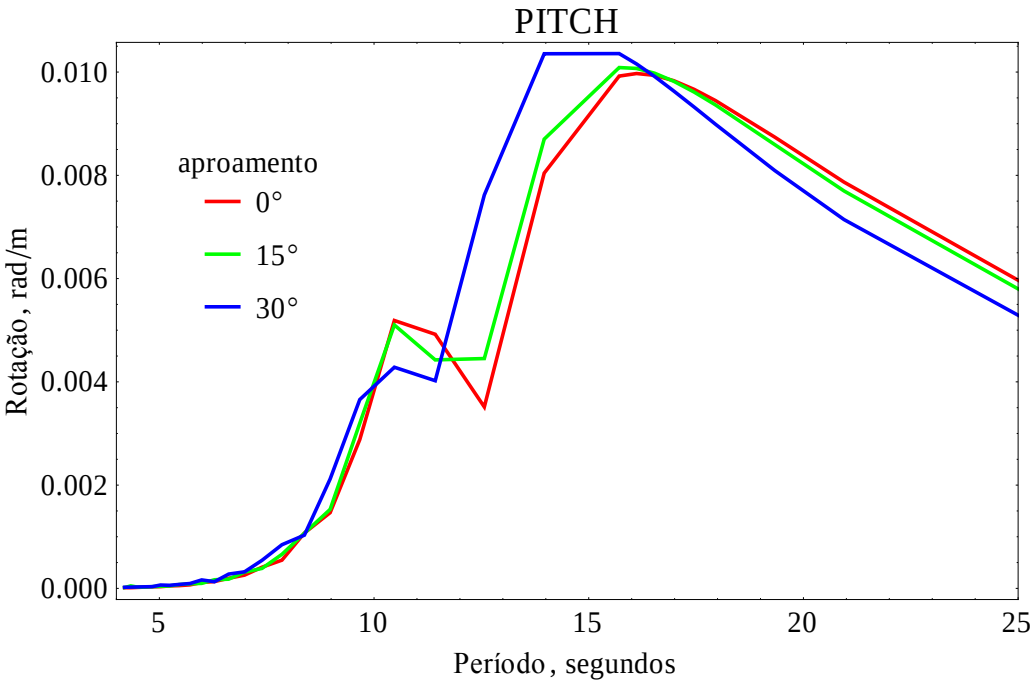

Figura 93. RAO de *pitch* em função do período para aproamento de 0°, 15° e 30°.

A seguir é apresentada a relação entre o período de pico (Tz) e o período de cruzamento zero (Tz), cujo gráfico encontra-se na Figura 94, representando a Equação (24).

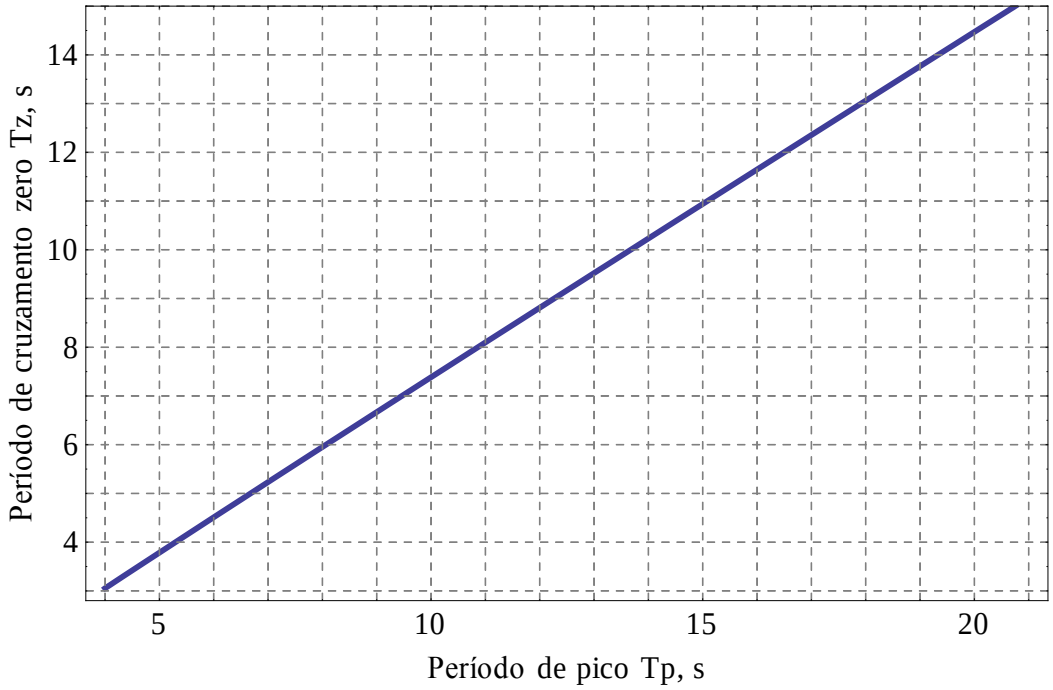

Figura 94. Gráfico com a relação entre período de pico (Tp) e período de cruzamento zero (Tz).

$$\mathrm{Tz(Tp)} = \mathrm{Tp}\sqrt{\frac{5 + 6.4\,\mathrm{Tp}^{-0.491}}{10.89 + 6.4\,\mathrm{Tp}^{-0.491}}} \tag{24}$$

APÊNDICE B - CASOS DE CARGA CONSIDERADOS

É apresentada a seguir a Tabela 10, que mostra os parâmetros de cada caso de carga utilizado nas análises dinâmicas. Foram adotados pares de altura significativa de onda (Hs) e período de pico com limites de 1 a 6 metros e 6 a 20 segundos, que são valores enquadrados em períodos de recorrência de 1 ano, indicado para as situações operacionais conforme a ISO 19901-6 (ISO, 2009).

Tabela 10. Casos de carga considerados na análise.

Caso de carga	Hs (m)	Tp (s)	Caso de carga	Hs (m)	Tp (m)	Caso de carga	Hs (m)	Tp (s)
Onda 1	1	6	Onda 31	1	11	Onda 61	1	16
Onda 2	2	6	Onda 32	2	11	Onda 62	2	16
Onda 3	3	6	Onda 33	3	11	Onda 63	3	16
Onda 4	4	6	Onda 34	4	11	Onda 64	4	16
Onda 5	5	6	Onda 35	5	11	Onda 65	5	16
Onda 6	6	6	Onda 36	6	11	Onda 66	6	16
Onda 7	1	7	Onda 37	1	12	Onda 67	1	17
Onda 8	2	7	Onda 38	2	12	Onda 68	2	17
Onda 9	3	7	Onda 39	3	12	Onda 69	3	17
Onda 10	4	7	Onda 40	4	12	Onda 70	4	17
Onda 11	5	7	Onda 41	5	12	Onda 71	5	17
Onda 12	6	7	Onda 42	6	12	Onda 72	6	17
Onda 13	1	8	Onda 43	1	13	Onda 73	1	18
Onda 14	2	8	Onda 44	2	13	Onda 74	2	18
Onda 15	3	8	Onda 45	3	13	Onda 75	3	18
Onda 16	4	8	Onda 46	4	13	Onda 76	4	18
Onda 17	5	8	Onda 47	5	13	Onda 77	5	18
Onda 18	6	8	Onda 48	6	13	Onda 78	6	18
Onda 19	1	9	Onda 49	1	14	Onda 79	1	19
Onda 20	2	9	Onda 50	2	14	Onda 80	2	19
Onda 21	3	9	Onda 51	3	14	Onda 81	3	19
Onda 22	4	9	Onda 52	4	14	Onda 82	4	19
Onda 23	5	9	Onda 53	5	14	Onda 83	5	19
Onda 24	6	9	Onda 54	6	14	Onda 84	6	19
Onda 25	1	10	Onda 55	1	15	Onda 85	1	20
Onda 26	2	10	Onda 56	2	15	Onda 86	2	20
Onda 27	3	10	Onda 57	3	15	Onda 87	3	20
Onda 28	4	10	Onda 58	4	15	Onda 88	4	20
Onda 29	5	10	Onda 59	5	15	Onda 89	5	20
Onda 30	6	10	Onda 60	6	15	Onda 90	6	20

APÊNDICE C - RESULTADO DOS DELOCAMENTOS DO FPSO

Tabela 11. Deslocamentos máximos do FPSO para içamento de 1 pessoa.

Deslocamentos máximos do FPSO								
Caso de carga	**Hs (m)**	**Tp (s)**	**Heave (m)**		**Roll (°)**		**Pitch (°)**	
			Pico	**Extremo**	**Pico**	**Extremo**	**Pico**	**Extremo**
Onda 1	1	6	0.004	0.003	0.005	0.005	0.004	0.003
Onda 2	2	6	0.008	0.006	0.011	0.010	0.008	0.007
Onda 3	3	6	0.012	0.009	0.016	0.015	0.012	0.010
Onda 4	4	6	0.017	0.011	0.021	0.019	0.016	0.014
Onda 5	5	6	0.021	0.014	0.026	0.024	0.020	0.017
Onda 6	6	6	0.025	0.017	0.032	0.029	0.025	0.021
Onda 7	1	7	0.012	0.011	0.015	0.013	0.014	0.010
Onda 8	2	7	0.025	0.023	0.030	0.026	0.027	0.021
Onda 9	3	7	0.037	0.034	0.044	0.040	0.041	0.031
Onda 10	4	7	0.050	0.046	0.059	0.053	0.054	0.042
Onda 11	5	7	0.062	0.057	0.074	0.066	0.068	0.052
Onda 12	6	7	0.075	0.069	0.089	0.079	0.082	0.062
Onda 13	1	8	0.037	0.027	0.037	0.026	0.030	0.026
Onda 14	2	8	0.074	0.053	0.074	0.052	0.061	0.053
Onda 15	3	8	0.111	0.081	0.111	0.079	0.091	0.079
Onda 16	4	8	0.148	0.107	0.148	0.105	0.122	0.105
Onda 17	5	8	0.185	0.134	0.185	0.131	0.152	0.132
Onda 18	6	8	0.222	0.160	0.222	0.157	0.182	0.158
Onda 19	1	9	0.060	0.050	0.047	0.044	0.051	0.050
Onda 20	2	9	0.119	0.100	0.094	0.087	0.101	0.101
Onda 21	3	9	0.179	0.150	0.141	0.131	0.152	0.151
Onda 22	4	9	0.238	0.200	0.189	0.174	0.202	0.201
Onda 23	5	9	0.298	0.250	0.236	0.218	0.253	0.252
Onda 24	6	9	0.357	0.300	0.283	0.262	0.303	0.302
Onda 25	1	10	0.096	0.074	0.063	0.055	0.120	0.101
Onda 26	2	10	0.192	0.147	0.126	0.110	0.241	0.202
Onda 27	3	10	0.288	0.221	0.189	0.164	0.361	0.302
Onda 28	4	10	0.384	0.295	0.252	0.219	0.482	0.403
Onda 29	5	10	0.480	0.368	0.315	0.274	0.602	0.504
Onda 30	6	10	0.576	0.442	0.378	0.329	0.723	0.605
Onda 31	1	11	0.142	0.115	0.103	0.085	0.162	0.140
Onda 32	2	11	0.285	0.230	0.205	0.170	0.324	0.281
Onda 33	3	11	0.427	0.346	0.308	0.256	0.486	0.421
Onda 34	4	11	0.570	0.461	0.411	0.342	0.648	0.561
Onda 35	5	11	0.712	0.576	0.514	0.427	0.810	0.701
Onda 36	6	11	0.855	0.691	0.616	0.513	0.972	0.842
Onda 37	1	12	0.188	0.143	0.180	0.155	0.213	0.181
Onda 38	2	12	0.376	0.285	0.360	0.310	0.426	0.361
Onda 39	3	12	0.564	0.428	0.540	0.466	0.639	0.542
Onda 40	4	12	0.753	0.571	0.720	0.622	0.852	0.723

Deslocamentos máximos do FPSO								
Caso de carga	**Hs (m)**	**Tp (s)**	**Heave (m)**		**Roll (°)**		**Pitch (°)**	
			Pico	**Extremo**	**Pico**	**Extremo**	**Pico**	**Extremo**
Onda 41	5	12	0.941	0.713	0.900	0.777	1.065	0.904
Onda 42	6	12	1.129	0.856	1.080	0.929	1.278	1.084
Onda 43	1	13	0.240	0.181	0.274	0.238	0.270	0.212
Onda 44	2	13	0.480	0.362	0.547	0.476	0.540	0.423
Onda 45	3	13	0.720	0.542	0.821	0.717	0.810	0.635
Onda 46	4	13	0.960	0.723	1.095	0.956	1.079	0.846
Onda 47	5	13	1.200	0.904	1.369	1.191	1.349	1.058
Onda 48	6	13	1.440	1.085	1.642	1.429	1.619	1.269
Onda 49	1	14	0.290	0.216	0.295	0.344	0.305	0.232
Onda 50	2	14	0.580	0.434	0.590	0.685	0.610	0.465
Onda 51	3	14	0.871	0.649	0.885	1.028	0.915	0.697
Onda 52	4	14	1.161	0.868	1.181	1.370	1.220	0.930
Onda 53	5	14	1.451	1.085	1.476	1.713	1.525	1.162
Onda 54	6	14	1.741	1.298	1.771	2.055	1.830	1.395
Onda 55	1	15	0.330	0.253	0.412	0.408	0.305	0.249
Onda 56	2	15	0.659	0.507	0.824	0.819	0.610	0.496
Onda 57	3	15	0.989	0.760	1.237	1.223	0.915	0.744
Onda 58	4	15	1.319	1.014	1.649	1.631	1.220	0.993
Onda 59	5	15	1.648	1.267	2.061	2.039	1.525	1.241
Onda 60	6	15	1.978	1.521	2.473	2.446	1.830	1.489
Onda 61	1	16	0.366	0.293	0.374	0.380	0.322	0.275
Onda 62	2	16	0.732	0.586	0.749	0.759	0.644	0.549
Onda 63	3	16	1.098	0.878	1.123	1.139	0.967	0.824
Onda 64	4	16	1.464	1.171	1.497	1.518	1.289	1.098
Onda 65	5	16	1.830	1.464	1.872	1.898	1.611	1.373
Onda 66	6	16	2.197	1.757	2.246	2.278	1.933	1.647
Onda 67	1	17	0.412	0.335	0.534	0.465	0.318	0.292
Onda 68	2	17	0.823	0.667	1.067	0.930	0.636	0.581
Onda 69	3	17	1.235	1.001	1.601	1.385	0.954	0.875
Onda 70	4	17	1.646	1.334	2.135	1.859	1.272	1.166
Onda 71	5	17	2.058	1.668	2.668	2.324	1.590	1.453
Onda 72	6	17	2.469	2.002	3.202	2.789	1.908	1.744
Onda 73	1	18	0.442	0.383	0.448	0.438	0.311	0.288
Onda 74	2	18	0.884	0.770	0.897	0.873	0.623	0.576
Onda 75	3	18	1.326	1.149	1.345	1.309	0.934	0.864
Onda 76	4	18	1.768	1.539	1.794	1.745	1.245	1.152
Onda 77	5	18	2.210	1.915	2.242	2.178	1.557	1.440
Onda 78	6	18	2.652	2.297	2.690	2.618	1.868	1.729
Onda 79	1	19	0.470	0.398	0.406	0.374	0.304	0.279
Onda 80	2	19	0.940	0.797	0.812	0.749	0.607	0.556
Onda 81	3	19	1.410	1.195	1.218	1.123	0.911	0.834
Onda 82	4	19	1.879	1.590	1.625	1.497	1.214	1.111
Onda 83	5	19	2.349	1.992	2.031	1.871	1.518	1.390
Onda 84	6	19	2.819	2.390	2.437	2.246	1.822	1.668
Onda 85	1	20	0.499	0.414	0.450	0.384	0.278	0.263

Deslocamentos máximos do FPSO								
Caso de carga	**Hs (m)**	**Tp (s)**	**Heave (m)**		**Roll (°)**		**Pitch (°)**	
			Pico	**Extremo**	**Pico**	**Extremo**	**Pico**	**Extremo**
Onda 86	2	20	0.997	0.828	0.901	0.766	0.556	0.527
Onda 87	3	20	1.496	1.242	1.351	1.148	0.834	0.790
Onda 88	4	20	1.994	1.657	1.802	1.531	1.112	1.053
Onda 89	5	20	2.493	2.071	2.252	1.918	1.390	1.311
Onda 90	6	20	2.992	2.485	2.702	2.302	1.668	1.580

APÊNDICE D - RESULTADO DA VELOCIDADE MÁXIMA DA CESTA

Tabela 12. Velocidade resultante máxima extrema do fundo da cesta.

Caso de carga	Hs (m)	Tp (s)	Velocidade resultante extrema (m/s)
			1 pessoa
Onda 1	1.00	6.00	0.53
Onda 2	2.00	6.00	1.05
Onda 3	3.00	6.00	1.54
Onda 4	4.00	6.00	2.00
Onda 5	5.00	6.00	2.41
Onda 6	6.00	6.00	2.79
Onda 7	1.00	7.00	2.20
Onda 8	2.00	7.00	4.40
Onda 9	3.00	7.00	6.39
Onda 10	4.00	7.00	7.44
Onda 11	5.00	7.00	7.26
Onda 12	6.00	7.00	9.73
Onda 13	1.00	8.00	2.26
Onda 14	2.00	8.00	5.00
Onda 15	3.00	8.00	8.63
Onda 16	4.00	8.00	12.14
Onda 17	5.00	8.00	14.42
Onda 18	6.00	8.00	14.31
Onda 19	1.00	9.00	3.48
Onda 20	2.00	9.00	7.08
Onda 21	3.00	9.00	9.80
Onda 22	4.00	9.00	16.70
Onda 23	5.00	9.00	21.48
Onda 24	6.00	9.00	17.50
Onda 25	1.00	10.00	5.68
Onda 26	2.00	10.00	11.64
Onda 27	3.00	10.00	18.16
Onda 28	4.00	10.00	21.28
Onda 29	5.00	10.00	27.49
Onda 30	6.00	10.00	25.18
Onda 31	1.00	11.00	3.15
Onda 32	2.00	11.00	6.30
Onda 33	3.00	11.00	9.68
Onda 34	4.00	11.00	14.28
Onda 35	5.00	11.00	20.19
Onda 36	6.00	11.00	24.56
Onda 37	1.00	12.00	8.08
Onda 38	2.00	12.00	14.07

Caso de carga	Hs (m)	Tp (s)	Velocidade resultante extrema (m/s)
Onda 39	3.00	12.00	22.52
Onda 40	4.00	12.00	29.85
Onda 41	5.00	12.00	31.78
Onda 42	6.00	12.00	36.78
Onda 43	1.00	13.00	3.91
Onda 44	2.00	13.00	7.73
Onda 45	3.00	13.00	13.53
Onda 46	4.00	13.00	16.79
Onda 47	5.00	13.00	35.96
Onda 48	6.00	13.00	30.11
Onda 49	1.00	14.00	6.19
Onda 50	2.00	14.00	11.79
Onda 51	3.00	14.00	15.74
Onda 52	4.00	14.00	22.13
Onda 53	5.00	14.00	30.58
Onda 54	6.00	14.00	37.46
Onda 55	1.00	15.00	3.47
Onda 56	2.00	15.00	6.85
Onda 57	3.00	15.00	10.18
Onda 58	4.00	15.00	13.26
Onda 59	5.00	15.00	16.21
Onda 60	6.00	15.00	18.90
Onda 61	1.00	16.00	3.29
Onda 62	2.00	16.00	6.57
Onda 63	3.00	16.00	10.23
Onda 64	4.00	16.00	13.04
Onda 65	5.00	16.00	15.23
Onda 66	6.00	16.00	16.69
Onda 67	1.00	17.00	4.16
Onda 68	2.00	17.00	8.07
Onda 69	3.00	17.00	10.59
Onda 70	4.00	17.00	12.97
Onda 71	5.00	17.00	18.26
Onda 72	6.00	17.00	20.14
Onda 73	1.00	18.00	4.08
Onda 74	2.00	18.00	7.74
Onda 75	3.00	18.00	9.45
Onda 76	4.00	18.00	12.27
Onda 77	5.00	18.00	21.06
Onda 78	6.00	18.00	17.53
Onda 79	1.00	19.00	2.51
Onda 80	2.00	19.00	5.12
Onda 81	3.00	19.00	7.34
Onda 82	4.00	19.00	10.86

Caso de carga	Hs (m)	Tp (s)	Velocidade resultante extrema (m/s)
Onda 83	5.00	19.00	15.35
Onda 84	6.00	19.00	16.54
Onda 85	1.00	20.00	3.56
Onda 86	2.00	20.00	7.08
Onda 87	3.00	20.00	10.76
Onda 88	4.00	20.00	14.55
Onda 89	5.00	20.00	16.16
Onda 90	6.00	20.00	17.29

APÊNDICE E - ESTATÍSTICA DE VALORES EXTREMOS

Neste apêndice é demonstrado o cálculo de valores máximos extremos de um caso de carga para efeito ilustrativo.

A utilização da estatística de valores extremos em detrimento do uso dos valores máximos visa aumentar a confiabilidade da resposta, utilizando um número mais provável de acontecer que o valor máximo, pois a utilização deste último nem sempre conduz a resultados conservadores.

Este fato pode ser ilustrado comparando a velocidade máxima do fundo da cesta atingida durante o içamento considerando o valor máximo e o valor máximo extremo. O gráfico de contorno da velocidade máxima em função de Hs e Tp ao longo do içamento, para estas duas situações encontra-se na Figura 95 e Figura 96. No primeiro gráfico, escolheu-se como máximo em cada caso de carga, o valor de pico alcançado ao longo do içamento. No segundo gráfico, são apresentadas as velocidades máximas extremas após processamento estatístico dos mesmos valores utilizados para gerar o primeiro gráfico.

Nota-se o deslocamento do contorno limite para baixo, isto é, para alturas significativas de onda menores na maioria dos valores, embora em outros casos tenha ocorrido o aumento. Este fato indica que nem sempre é conservador adotar o valor de pico, ao contrário, dependendo do fenômeno pode-se conduzir resultados contra a segurança, como o exemplo mostrado.

No caso do movimento de afundamento do FPSO, a análise de extremos conduziu a valores menores que os valores de pico, resultando que reforça a conclusão que a análise de extremos deve sempre ser realizada para obtenção de maior confiabilidade.

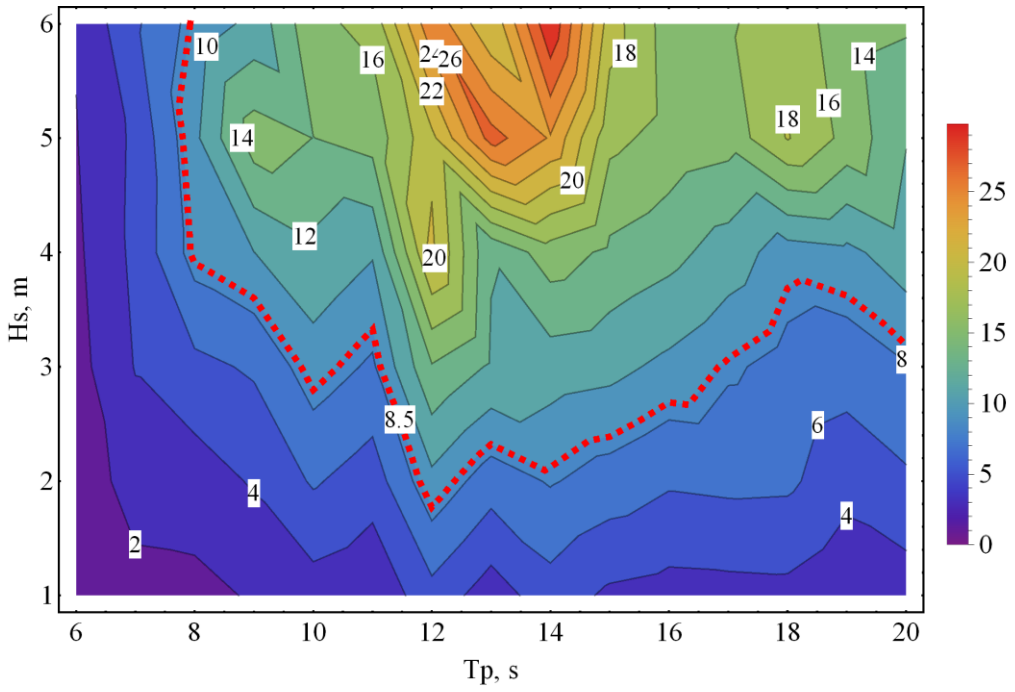

Figura 95. Exemplo de diagrama de contorno de velocidade máxima do fundo da cesta.

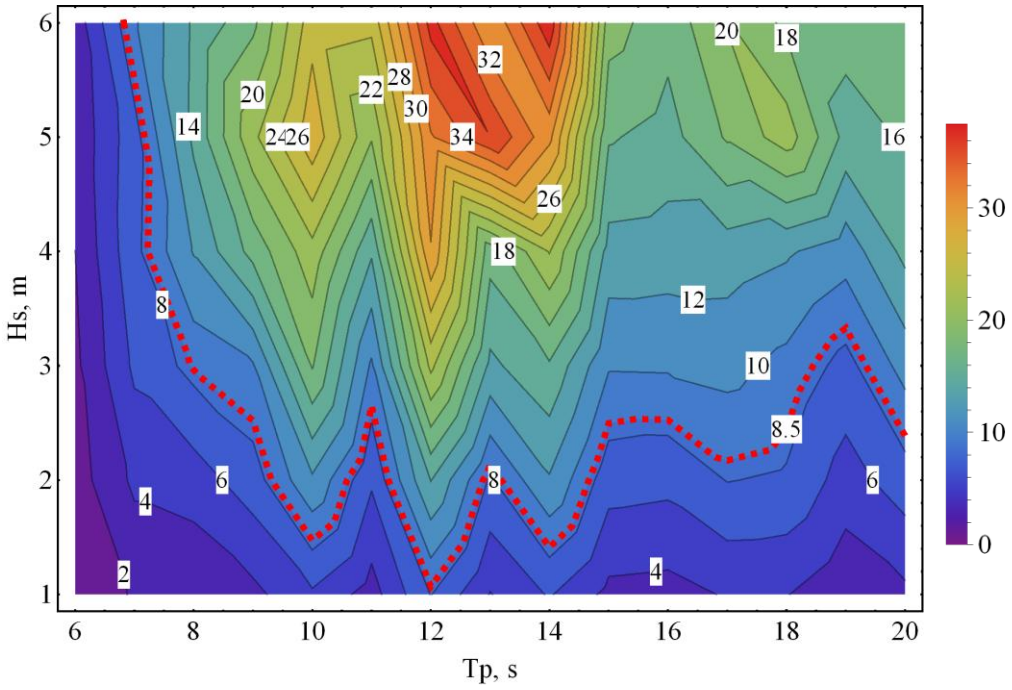

Figura 96. Exemplo de diagrama de contorno de velocidade máxima extrema do fundo da cesta.

APÊNDICE F - CÓDIGO FONTE DO PÓS-PROCESSADOR

```
<<JLink`;
InstallJava[];
ReinstallJava[JVMArguments→"-Xmx1024m"];

(* Arquivos *)
 prefixoArqAnalise="IcamentoFPSO";
(*prefixoArqAnalise="Container 6 tf";*)
autoMathPath="\\\\sv\\dados\\AutoTechCon\\AutoMath\\";
(*caminho="C:\\SITUA\\Tese\\Simulação SItua\\";*)
caminho="C:\\SITUA\\Tese\\1 pax Malha refinada\\";
(*caminho="C:\\SITUA\\Tese\\Container 6 tf\\"; *)
pathOut="\\\\SV\\Dados\\Documentos\\Leonardo\\Cursos\\Mestrado\\Tese\\Apres\\";
narqDesloc=prefixoArqAnalise<>"_d.GRD";
narqMovFPSO=prefixoArqAnalise<>"_d_UF1_0.PLD";
nomeArqForcaCabo=prefixoArqAnalise<>"_d.GR4";
nomeArqForcaCaboEstatica=prefixoArqAnalise<>"_s.GR4";
narqVelocidade=prefixoArqAnalise<>"_d.GRV";
(* Incluides*)
Get[autoMathPath<>"ExtremosLocais.m"];
Get[autoMathPath<>"EspectroFreqencia.m"];
Get[autoMathPath<>"Espectros de Mar.m"];
Get[autoMathPath<>"Gráficos.m"];
Get[autoMathPath<>"Desenhos_Offshore.m"];
Get[autoMathPath<>"Listas.m"];
(* Dados Gerais *)
 nL=11; (* número de cabos (linhas) a serem processadas no arquivo *)
ntL=22; (* número total de cabos (linhas) no arquivo *)
lini=1; (* linha inicial a ser processada *)
linf=11; (* linha finial a ser processada *)
ncc=90; (* número de casos de carga *)
casosCarga=Range[ncc];
vetLinhasVarCompCabo=Range[1,nL];
vetAproamento=ConstantArray["0°",10]~Join~ConstantArray["15°",10]~Join~ConstantArray["30°",10]
;
listaDirSaida={"Saida"}~Join~Table["saida_"<>ToString[
lc]<>"_C0_O"<>ToString[lc]<>"_V0",{lc,casosCarga[[2;;All]]}];
vetMovFPSO=movFPSOstr;
movFPSO={4, 5, 6, 7,8,9}; (* surge, sway, heave, roll, pitch, yaw *)
vetDirecao={2,3,4}; (* Aproamento *)

(* pares de Hs e Tp selecionados para a análise *)
gridHsTP=Flatten[Table[{tp,hs},{tp, 6.,20.},{hs,1.,6.}],1];
iTp=1;
iHs=2;

(* Gráfico dos pontos Hs, TP selecionados *)
graficoHsTpSelecionados=
  ListPlot[
   gridHsTP,
   PlotStyle→Red,
   PlotMarkers→{Automatic,Medium},
   Mesh→None
   ];

(* Comprimento das linhas *)
lmin=15.0;
lmax=40.0;
ppCabo=0.03844; (* Peso do cabo de aço por metro *)
alturaCarga=2.; (* Altura da carga *)
pesoCarga=3.45; (* ver tabela com dados da carga no texto *)
ΔL=2.5 ;(* incremento no comprimento das linhas, m *)
comLinhas=Table[lmax-ΔL (linha-1)-2,{linha,1,ntL/2}]~Join~Table[lmax-ΔL (linha-1-ntL/2)-
2,{linha,ntL/2+1,ntL}];
comLinhasTotal=Table[comLinhas[[n]]+alturaCarga,{n,1,Length[comLinhas]}];

(* Valor máximo de Tp (índice 1) e Hs (índice 2) adotado nos casos de carga *)
(* {{6.,2.},{20.,6.}} *)
TpHsMinMaxGraficos=
  {
   {Min[gridHsTP[[All,1]]],Min[gridHsTP[[All,2]]]},
   {Max[gridHsTP[[All,1]]],Max[gridHsTP[[All,2]]]}
```

```
   };

(*****************************************************************************)
(* Limites operacionais para elaboração dos diagramas operacionais limite      *)
(*****************************************************************************)
(* vetor indice 1: parâmetro limite  *)
(* vetor indice 2: situacaoIcamento: 1 = situação normal, 2 = situação com coef. segurança, 3=
situação de emergência,  4: nome do limite *)
limitesOperacioanis=
  {
   {2.,2,2, "Roll"},         (* roll máximo admissível para o FPSO, graus *)
   {5.,5.,5., "Pitch"},         (* pitch máximo admissível para o FPSO, graus *)
   {1.4,1.4,1.4, "FAD"},         (* fator de amplificação máximo admissível para a força no
cabo do guindaste *)
   {3.0,3.0,3.0, "Hs"},            (* altura significativa de onda máxima admissível, m *)
   {67 1.4,67 1.4,67 1.4,"CMT"},           (* carga bruta tabelada do guindaste para
realização do içamento, kN *)
   {15.,15.,15.,"Velocidade"}  (* velocidade máxima admissível para a cesta, resultante de
vx,vy e vz, m/s *)
   };
(*limitesOperacioanis=
{
{2.,1.5,2.5, "Roll"},         (* roll máximo admissível para o FPSO, graus *)
{5.,4.,5., "Pitch"},         (* pitch máximo admissível para o FPSO, graus *)
{1.3,1.25,1.4, "FAD"},         (* fator de amplificação máximo admissível para a força no cabo
do guindaste *)
{3.0,2.5,3.5, "Hs"},            (* altura significativa de onda máxima admissível, m *)
{8.5,8.,9.,"CMT"},           (* carga bruta tabelada do guindaste para realização do içamento,
kN *)
{13.,11.,14.,"Velocidade"}  (* velocidade máxima admissível para a cesta, resultante de vx,vy
e vz, m/s *)
};*)
situacaoIcamento=1;
ParcelaSegSitNorm=-.5; (* valor (altura de onda) somado à envoltória do dolgo para
aumentar/dim. segurança *)

(*****************************************************************************)
(* Configurações para padronização dos gráficos                                *)
(*****************************************************************************)
grafContourLabels=Function[{x,y,z},Text[Style[z,16,Plain,Black],{x,y},Background→White]];
grafEstiloContornoLimiteOper={Thickness[.0075],Dashing[{Large,Medium}],Yellow};
grafEstiloContornoLimiteSeg={Thickness[.0075],Green};
grafEstiloContornoLimiteEmerg={Thickness[.0075],Dashed,Red};
grafEstilosContornos={grafEstiloContornoLimiteOper,grafEstiloContornoLimiteSeg,grafEstiloConto
rnoLimiteEmerg};
grafLabelStyle={FontFamily→"TimesNewRoman",FontSize→18};
estiloLegenda[tit_:"",tiques_:Automatic]:=
  Placed[
   BarLegend[
    All,
    All,
    LegendMarkerSize→300,
    LabelStyle→Directive[FontFamily->"TimesNewRoman",FontSize→18],
    LegendLabel→tit,
    Ticks→tiques,
    TicksStyle→Black
    ],
   After
   ];
graficoTicks=
  {{

Table[{x,If[FractionalPart[x]==0,IntegerPart[x],""],{If[FractionalPart[x]==0,.0125,.00625],0}},
{x,1,6,.5}],
    Table[{x,"",{If[FractionalPart[x]==0,.0125,.00625],0}},{x,1,6,.5}]
    },
   {
    Table[{x,If[EvenQ[x],x,""],{If[EvenQ[x],.0125,.00625],0}},{x,6,20,1}],
    Table[{x,"",{If[EvenQ[x],.0125,.00625],0}},{x,6,20,1}]
    }};
(* Legenda do tipo de operação *)
legendList=Style[#,18,FontFamily→"TimesNewRoman"]&/@{"Segurança","Nominal","Emergência"};
legendaOperacao=LineLegend[{Directive[Green,AbsoluteThickness[3]],Directive[Yellow,AbsoluteThi
ckness[3],Dashing[{Large,Medium}]],Directive[Red,AbsoluteThickness[3],Dashed]},legendList,Lege
ndLayout→"Row",LegendMarkerSize→{{60,15}}];
```

```
(* Configuração dos parâmetros para análise de valores extremos *)
(*distProb=MaxStableDistribution[μ,σ,ϵ];*)
distProb=WeibullDistribution[α,β]; (* função de probablidade para ajutes dos valores extremos
*)
valProb=.95;  (* valor da probabilidade a considerar na análise de extremos *)


c0=2; (* número da coluna do valor de x para a primeira linha *)
colImportDesloc={1}~Join~Flatten[Table[{c0+6(k-1),c0+6(k-1)+1,c0+6(k-1)+2},{k,lini,linf}]];
 (*************************************************************************)
(*                      Velocidade máxima da cesta                        *)
(*************************************************************************)
resultVelocidade=
  ParallelTable[
   Import[caminho<>nomeDir<>"\\"<>narqVelocidade,"table"][[4;;All,colImportDesloc]],
   {nomeDir,listaDirSaida}
   ];
 linhaVel=1;
stempVel=
  {
   resultVelocidade[[47,All,linhaVel+1]],
   resultVelocidade[[47,All,linhaVel+2]],
   resultVelocidade[[47,All,linhaVel+3]]
   };
ListPlot[stempVel[[1]],Joined→True,AspectRatio→.15,ImageSize→1000]
 Row[
 {
  ListPlot[spectroPeriodo[1000,1,stempVel[[1]]],PlotRange→{{10,18},{0,60000}},Joined→True,
AspectRatio→.5,Filling→0, ImageSize→500],
  ListPlot[spectroPeriodo[1000,1,stempVel[[2]]],PlotRange→{{10,18},{0,31000}},Joined→True,
AspectRatio→.5,Filling→0, ImageSize→500],
  ListPlot[spectroPeriodo[1000,1,stempVel[[3]]],PlotRange→{{10,18},{0,140}},Joined→True,
AspectRatio→.5,Filling→0, ImageSize→500]
  }
 ]
 (* Resulante da velocidade sem considerar valor extremo *)
ResultadoMaximosVelocidadeFundoCesta=
  ParallelTable[
   Table[
    Max[

Sqrt[resultVelocidade[[casodecarga,All,colunaLinha]]^2+resultVelocidade[[casodecarga,All,colun
aLinha+1]]^2+resultVelocidade[[casodecarga,All,colunaLinha+2]]^2
      ]],
    {colunaLinha,2,3nL+1,3}
    ],
   {casodecarga,casosCarga}
   ];
 (* Resulante da velocidade considerarando valor extremo *)
res=ParallelTable[
   Table[
    Sqrt[

resultVelocidade[[casodecarga,All,colunaLinha]]^2+resultVelocidade[[casodecarga,All,colunaLinh
a+1]]^2+resultVelocidade[[casodecarga,All,colunaLinha+2]]^2
     ],
    {colunaLinha,2,3nL+1,3}
    ],
   {casodecarga,casosCarga}
   ];
ResultadoMaximosVelocidadeFundoCestaExtremos=

ParallelTable[valorMaximoExtremo1D[res[[CasoCarga,linha]],False,distProb,valProb],{CasoCarga,
casosCarga},{linha,1,nL}];
 (*************************************************************)
(* Gráfico da série temporal da velocidade do fundo da cesta *)
(*************************************************************)
legendFCabo={{Style["Onda 48, Hs=6 m, Tp=13 s",16,FontFamily→"TimesNewRoman"]},{Style["Onda
47, Hs=5 m, Tp=13 s",16,FontFamily→"TimesNewRoman"]}};
legendaSerieTemporalFCabo={LineLegend[{Directive[Red,AbsoluteThickness[3]]},legendFCabo[[1]],L
egendLayout→"Row",LegendMarkerSize→{{30,5}}],LineLegend[{Directive[Darker[Blue],AbsoluteThickn
ess[3]]},legendFCabo[[2]],LegendLayout→"Row",LegendMarkerSize→{{30,5}}]};
Column[
 {
  ListPlot[
```

```
    {
     Table[{t/10.,res[[47,1,t]]},{t,2000,10000}],
     Table[{t/10.,res[[48,1,t]]},{t,2000,10000}]
     },
    Frame→True,
    GridLines→{None,Automatic},
    GridLinesStyle→Dashed,
    PlotRange→{0,28},
    Joined→True,
    AxesOrigin→{200,0},
    AspectRatio→.15,
    ImageSize→700,
    FrameLabel→{"Tempo, s","Vel. res., m/s"},
    PlotStyle→{Directive[Darker[Blue],Thin],Directive[Red,Thin]},
    PlotLabel→None,
    BaseStyle->{FontFamily->"Times",FontSize→16}
    ],
   Row[legendaSerieTemporalFCabo]
   },
  Center
  ]
  (* Gráfico polar da velocidade do fundo da cesta *)
ccPolar=Table[Range[n,90,6],{n,1,6}];
vaux=Range[1,90 11];
Δθ=2.π/(ncc-1);
i=1;
tp=1;
hs=1;
ang=0;
Do[
 Do[
  Do[
   vaux[[i]]=
    {
     (comLinhasTotal[[raio]]-15.)Sin[ang],
     (comLinhasTotal[[raio]]-15.)Cos[ang],
     ResultadoMaximosVelocidadeFundoCestaExtremos[[ccPolar[[hs,tp]],raio]]
     };
   i=i+1,
   {raio,linf,lini,-1}
   ];
  ang=ang+Δθ,
  {tp,1,15}
  ],
 {hs,1,6}
 ]
 Show[
 ListContourPlot[
  vaux,
  PlotRange→All,
  ColorFunction→"Rainbow",
  Contours → Automatic,
  InterpolationOrder→1,
  Frame→False,
  ImageSize→750,
  BaseStyle->{FontFamily->"TimesNewRoman",FontSize→18},
  PlotLegends→estiloLegenda["m/s"],
  PlotRangePadding→7
  ],
 epGraf
 ]

 (* Tabela com Tp, Hs e velocidade, para geração do gráfico *)
resultVelocidadeCestaGraf=
  Table[
   {
    gridHsTP[[i,1]],
    gridHsTP[[i,2]],
    Max[ResultadoMaximosVelocidadeFundoCestaExtremos[[i,All]]]
    },
   {i,1,ncc}
   ];
(* Gráfico*)
Column[
 {
  graficoVelocidadeCesta=ListContourPlot[
```

```
    resultVelocidadeCestaGraf,
    ColorFunction→"Rainbow",
    PlotRange→All,
    AspectRatio→.7,
    Contours→15,
    ContourLabels→grafContourLabels,
    InterpolationOrder→1,
    PlotLabel→None,
    BaseStyle->{FontFamily->"TimesNewRoman",FontSize→18},
    FrameLabel→{"Tp, s","Hs, m"},
    FrameStyle→Thickness[.0025],
    FrameTicks→graficoTicks,
    ImageSize→600,
    PlotLegends→estiloLegenda["m/s"]
    ],
  legendaOperacao},
 Center
 ]
 linhaContornoVelocidade=
  {
   linhaContorno[graficoVelocidadeCesta,9,True,TpHsMinMaxGraficos],
   linhaContorno[graficoVelocidadeCesta,9,True,TpHsMinMaxGraficos],
   linhaContorno[graficoVelocidadeCesta,9,True,TpHsMinMaxGraficos]
   };
ListPlot[linhaContornoVelocidade,PlotRange→{{6,20},{1,6}},Joined→True,AspectRatio→.7,ImageSiz
e→600,Filling→Axis,PlotLegends→Automatic]
 (* Tabela de resultado da velocidade máxima extrema do fundo da cesta *)
Grid[
  Join[
   {{"Caso de carga","Hs (m)","Tp (s)", "Velocidade \nresultante \nextrema (m/s)"}},
   Table[
    {
     "Onda " <> ToString[i],
     NumberForm[gridHsTP[[i,2]],{5,2}],
     NumberForm[gridHsTP[[i,1]],{5,2}],
     NumberForm[Max[ResultadoMaximosVelocidadeFundoCestaExtremos[[i,All]]],{5,2}]
     },
    {i,1,ncc}
    ]
   ],
  Frame→All,
  ItemSize→None,
  ItemStyle→{FontFamily→"TimesNewRoman",FontSize→18}
  ];
```

Deslocamento do CG do FPSO (centro de movimento!!)

Nome do arquivo: “lcamentoFPSO_d _UF1 _ 0.PLD”

Estrutra da lista de resultados do FPSO:

Vetor de 3 dimensões

row inicial de dados (t=0): 4

[[1]] Caso de carga

[[2]] Tempo (rows)

[[3]] Direção (Colunas): 1 - TIME 2 - WAVE-EL 3- WIND 4- SURGE 5- SWAY 6- HEAVE 7- ROLL 8- PITCH 9- YAW

```
  resultDeslocFPSO=
  ParallelTable[
   Import[caminho<>nomeDir<>"\\"<>narqMovFPSO,"table"][[4;;All]],
   {nomeDir,listaDirSaida}
   ];
 (*******************************************************)
(*     Gráfico dos movimentos do FPSO                  *)
(*******************************************************)
lcOnda={72,36};
legendListSTMovFPSO={{Style["Onda "<>ToString[lcOnda[[2]]]<>": Hs=
"<>ToString[gridHsTP[[lcOnda[[2]],2]]]<>" m"<>", Tp= "<>ToString[gridHsTP[[lcOnda[[2]],1]]]<>"
s",16,FontFamily→"TimesNewRoman"]},{Style["Onda "<>ToString[lcOnda[[1]]]<>": Hs=
"<>ToString[gridHsTP[[lcOnda[[1]],2]]]<>" m"<>", Tp= "<>ToString[gridHsTP[[lcOnda[[1]],1]]]<>"
s",16,FontFamily→"TimesNewRoman"]}};
legendaSerieTemporalMovFPSO={LineLegend[{Directive[Red,AbsoluteThickness[3]]},legendListSTMovF
PSO[[1]],LegendLayout→"Row",LegendMarkerSize→{{30,5}}],LineLegend[{Directive[Darker[Blue],Abso
luteThickness[3]]},legendListSTMovFPSO[[2]],LegendLayout→"Row",LegendMarkerSize→{{30,5}}]};
Column[
 {
  Column[
   Table[
    ListPlot[
```

```
     {

Table[{resultDeslocFPSO[[lcOnda[[1]],row,1]],resultDeslocFPSO[[lcOnda[[1]],row,movimento]]},{r
ow,1,Length[resultDeslocFPSO[[2]]]}],

Table[{resultDeslocFPSO[[lcOnda[[2]],row,1]],resultDeslocFPSO[[lcOnda[[2]],row,movimento]]},{r
ow,1,Length[resultDeslocFPSO[[2]]]}]
      },
     Frame→True,
     GridLines→{None,Automatic},
     GridLinesStyle→Dashed,
     PlotRange→{-3.3,3.3},
     Joined→True,
     AxesOrigin→{0,0},
     AspectRatio→.15,
     ImageSize→700,
     FrameLabel→{If[movimento==8,"Tempo, s",""],If[movimento>6,"Rotação, °","Deslocamento,
m"]},
     PlotStyle→{Directive[Darker[Blue],Thin],Directive[Red,Thin]},
     PlotLabel→movFPSOstr[[movimento-3]],
     BaseStyle->{FontFamily->"Times",FontSize→16}
     ],
    {movimento,{6,7,8}}
    ],
   Frame→None,Spacings→.00125
   ],
  Row[legendaSerieTemporalMovFPSO]
  },
 Center
 ]
 (* Tabela com deslocamentos máximos em cada grau de liberdade, sem considerar extremos *)
resultMaxDeslocFPSO=
  Table[
   Max[Abs[resultDeslocFPSO[[CasoCarga,All,direcao]]]],
   {CasoCarga, casosCarga},
   {direcao,movFPSO}
   ];
(* Tabela com deslocamentos máximos em cada grau de liberdade, considerarando extremos *)
resultMaxDeslocFPSOExtremos=
  ParallelTable[
   valorMaximoExtremo1D[resultDeslocFPSO[[CasoCarga,All,direcao]],True,distProb,valProb],
   {CasoCarga, casosCarga},
   {direcao,movFPSO}
   ];

(*********************************************************)
(* Tabela de resultados dos deslocamentos máximos do FPSO *)
(*********************************************************)
Grid[Join[
   {{"Deslocamentos máximos do FPSO",SpanFromLeft}},
   {{"Caso de carga","Hs (m)", "Tp (s)", "Heave (m)",SpanFromLeft, "Roll (°)",SpanFromLeft,
"Pitch (°)",SpanFromLeft}},

{{SpanFromAbove,SpanFromAbove,SpanFromAbove,"Pico","Extremo","Pico","Extremo","Pico","Extremo"
}},
   Table[
    {
     "Onda " <> ToString[casocarga],
     gridHsTP[[casocarga,2]],
     gridHsTP[[casocarga,1]],
     NumberForm[resultMaxDeslocFPSO[[casocarga,3]],{5,3}],
     NumberForm[resultMaxDeslocFPSOExtremos[[casocarga,3]],{5,3}],
     NumberForm[resultMaxDeslocFPSO[[casocarga,4]],{5,3}],
     NumberForm[resultMaxDeslocFPSOExtremos[[casocarga,4]],{5,3}],
     NumberForm[resultMaxDeslocFPSO[[casocarga,5]],{5,3}],
     NumberForm[resultMaxDeslocFPSOExtremos[[casocarga,5]],{5,3}]
     },
    {casocarga,casosCarga}
    ]
   ],
  Frame→All,
  ItemStyle→{FontFamily→"TimesNewRoman",FontSize→18, Automatic,{1→{Bold,16}}},
  Spacings→{2,1}
  ];
 (* Tabela com Tp, Hs e deslocamento, para geração do gráfico *)
resultDeslocFPSOGraf=
```

```
  Table[
   {
    gridHsTP[[i,1]],
    gridHsTP[[i,2]],
    resultMaxDeslocFPSOExtremos[[i,movimento]]
    },
   {movimento,1,6},{i,1,ncc}
   ];
(*******************************************************)
(*     Gráficos dos deslocamentos máximos do FPSO      *)
(*******************************************************)
defContornoHeave=Range[0,6,.25];
(* Contorno do gráfico de roll *)
defContornoRoll=
  contornoDiscretoCustomizado[
   0.,
   5.,
   .25,
   {limitesOperacioanis[[1,1]],limitesOperacioanis[[1,2]],limitesOperacioanis[[1,3]]},
   grafEstilosContornos
   ];

(* Contorno do gráfico de Pitch *)
defcContornoPitch=
  contornoDiscretoCustomizado[
   0.,
   5.,
   .25,
   {limitesOperacioanis[[2,1]],limitesOperacioanis[[2,2]],limitesOperacioanis[[2,3]]},
   grafEstilosContornos
   ];

(* Gráfico*)
graficosDeslocamentoFPSO=
 Table[
  Column[
   {
    ListContourPlot[
     resultDeslocFPSOGraf[[movimento]],
     ColorFunction→"Rainbow",
     PlotRange→Which[movimento==roll,{0,5}, movimento== pitch, {0,5},True, All],
     AspectRatio→.7,
     ContourLabels→grafContourLabels,
     Contours→Which[movimento==roll,defContornoRoll, movimento== pitch, defcContornoPitch,True,
defContornoHeave],
     InterpolationOrder→1,
     PlotLabel→None,
     BaseStyle->{FontFamily->"TimesNewRoman",FontSize→18},
     FrameLabel→{"Tp, s","Hs, m"},
     FrameStyle→Thickness[.0025],
     FrameTicks→graficoTicks,
     ImageSize→600,
     PlotLegends→estiloLegenda[Which[movimento==roll,"graus", movimento== pitch,
"graus",movimento==heave,"metros"]]
     ],
    legendaOperacao
    },
   Center
   ],
  {movimento,{3,4,5}}
  ]

 (* Cálculo do contorno de Roll para o DOLGO *)
linhaContornoRoll=
  {
   linhaContorno[graficosDeslocamentoFPSO[[2]],5,True,TpHsMinMaxGraficos],
   linhaContorno[graficosDeslocamentoFPSO[[2]],5,True,TpHsMinMaxGraficos],
   linhaContorno[graficosDeslocamentoFPSO[[2]],5,True,TpHsMinMaxGraficos]
   };
ListPlot[linhaContornoRoll,PlotRange→{1,6},Joined→True,Filling→Axis,ImageSize→600,PlotLegends
→Automatic]
 (* Cálculo do contorno de Pitch para o DOLGO *)
linhaContornoPitch={{0,6},{20,6}}(*linhaContorno[graficosDeslocamentoFPSO[[pitch]],1,True,TpHs
MinMaxGraficos]*);
ListPlot[linhaContornoPitch,PlotRange→All,Joined→True,Filling→Axis]
```

Nome do arquivo: “IcamentoFPSO_d.GR4”
O arquivo contém o esforço axial do nó superior (FAX2) do elemento mais próximo da ponta do guindaste
Estrutra da lista de resultados da força no cabo do guindaste:
Vetor de 3 dimensões [[X, Y, Z]]
Linha inicial de dados (t=0,1): 4
Tabela gerada:
X = Caso de carga
Y = Tempo (linhas do arquivo, linha 1 => t=0.1)
Z = Colunas: 1- Tempo (s); 2 - Força no cabo Linha 1 (kN) 3- Força no cabo Linha 2 ....

```
 (* Leitura do arquivo de resultados *)
resultForcaCabo=ParallelTable[Import[caminho<>nomeDir<>"\\"<>nomeArqForcaCabo,"table"][[4;;All
,1;;All]],{nomeDir,listaDirSaida}];
 (* Valor máximo extremo de cada linha para cada caso de carga, [[caso de carga, linha]] *)
(*resultMaxForcaCabo=Table[Max[Abs[resultForcaCabo[[CasoCarga,All,linha+1]]]],{CasoCarga,
casosCarga},{linha,1,nL}]*)
resultMaxForcaCabo=ParallelTable[valorMaximoExtremo1D[resultForcaCabo[[CasoCarga,All,linha+1]]
,False,distProb,valProb],{CasoCarga, casosCarga},{linha,1,nL}];
(* Valor máximo de cada caso de carga, [[caso de carga]] *)
resultMaxForcaCaboFinal=Table[Max[Abs[resultMaxForcaCabo[[CasoCarga,All]]]],{CasoCarga,casosCa
rga}];
resultMaxForcaCaboFinalGrafico=Table[{gridHsTP[[CasoCarga,1]],
gridHsTP[[CasoCarga,2]],resultMaxForcaCaboFinal[[CasoCarga]]},{CasoCarga,casosCarga}];


 linhaEspectroFcabo=1;
ListPlot[resultForcaCabo[[47,All,linhaEspectroFcabo+1]],Joined→True,
AspectRatio→.3,ImageSize→800]
ListPlot[spectroPeriodo[1000,1,resultForcaCabo[[47,All,linhaEspectroFcabo+1]]],PlotRange→{{0,1
7},{0,5000}},Joined→True, AspectRatio→.5,Filling→0, ImageSize→500]

(*******************************************************)
(*     Gráfico da série temporal da força no cabo      *)
(*******************************************************)
legendFCabo={{Style["Onda 48, Hs=6 m, Tp=13 s",16,FontFamily→"TimesNewRoman"]},{Style["Onda
47, Hs=5 m, Tp=13 s",16,FontFamily→"TimesNewRoman"]}};
legendaSerieTemporalFCabo={LineLegend[{Directive[Red,AbsoluteThickness[3]]},legendFCabo[[1]],L
egendLayout→"Row",LegendMarkerSize→{{30,5}}],LineLegend[{Directive[Darker[Blue],AbsoluteThickn
ess[3]]},legendFCabo[[2]],LegendLayout→"Row",LegendMarkerSize→{{30,5}}]};
Column[
 {
  ListPlot[
   {
    Table[{t/10.,resultForcaCabo[[47,t,2]]},{t,2000,10000}],
    Table[{t/10.,resultForcaCabo[[48,t,2]]},{t,2000,10000}]
    },
   Frame→True,
   GridLines→{None,Automatic},
   GridLinesStyle→Dashed,
   PlotRange→{1,12},
   Joined→True,
   AxesOrigin→{200,0},
   AspectRatio→.15,
   ImageSize→700,
   FrameLabel→{"Tempo, s","Força, kN"},
   PlotStyle→{Directive[Darker[Blue],Thin],Directive[Red,Thin]},
   PlotLabel→None,
   BaseStyle->{FontFamily->"Times",FontSize→16}
   ],
  Row[legendaSerieTemporalFCabo]
  },
 Center
 ]

(*********************************************************)
(* Tabela de resultados da força máxim no cabo           *)
(*********************************************************)
Grid[Join[
   {{"Força máxima extrema no cabo do guindaste",SpanFromLeft}},
   {{"Caso de carga","Hs (m)", "Tp (s)", "Comprimento do cabo (m)",SpanFromLeft,SpanFromLeft,
SpanFromLeft,SpanFromLeft,SpanFromLeft,SpanFromLeft,SpanFromLeft,SpanFromLeft,SpanFromLeft,Spa
nFromLeft,"FAD máximo"}},

{{SpanFromAbove,SpanFromAbove,SpanFromAbove,"15.0","17.5","20.0","22.5","25.0","27.5","30.0","
32.5","35.0","37.5","40.0",SpanFromAbove}},
   Table[
    {
```

```
     "Onda " <> ToString[casocarga],
     gridHsTP[[casocarga,2]],
     gridHsTP[[casocarga,1]],
     NumberForm[resultMaxForcaCabo[[casocarga,2]],{5,3}]
     },
    {casocarga,casosCarga}
    ]
   ],
  Frame→All,
  ItemStyle→{FontFamily→"TimesNewRoman",FontSize→18, Automatic,{1→{Bold,16}}},
  Spacings→{2,1}
  ];
 ccPolar=Table[Range[n,90,6],{n,1,6}];
vaux=Range[1,90 11];
Δθ=2.π/(ncc-1);
i=1;
tp=1;
hs=1;
ang=0;
Do[
 Do[
  Do[
   vaux[[i]]={(comLinhasTotal[[raio]]-15.)Sin[ang],(comLinhasTotal[[raio]]-
15.)Cos[ang],resultMaxForcaCabo[[ccPolar[[hs,tp]],raio]]};
   i=i+1,
   {raio,11,1,-1}
   ];
  ang=ang+Δθ,
  {tp,1,15}
  ],
 {hs,1,6}
 ]
 lang=Range[Pi/6.,Pi/6+2Pi,2Pi/(90/3)];
ltp={"","Tp=17", "Tp=14", "Tp=11", "Tp=8"};
ltickTp=Riffle[Riffle[lang,ltp],.01,3];
ltickTp=Partition[Riffle[Riffle[lang,ltp],.01,3],3];
ptickGraf={{0.5235987755982988`,"Hs=2",0.01},{1.5707963267948966`,"Hs=1",0.01},{2.617993877991
494`,"Hs=6",0.01},{3.665191429188092`,"Hs=5",0.01},{4.71238898038469`,"Hs=4",0.01},{5.75958653
1581287`,"Hs=3",0.01}};
epGraf=
 ListPolarPlot[
  {{Pi/2,40-15}},
  PlotStyle→Red,
  PolarAxes→True,
  PolarTicks→{ltickTp~Join~ptickGraf,Table[{i,Style[i+15,Green]},{i,0,25,2.5}]},
  PolarGridLines→{lgp,Range[0,40-15,2.5]},
  GridLinesStyle→Directive[Dashed,LightGray],
  Method→{"GridLinesInFront"→True}
  ]
 st=Directive[Dashed,LightGray];
st2=Directive[AbsoluteDashing[{}],Thick,LightGray];
lgp=Delete[Table[{ang,st},{ang,Pi/6,Pi/6+2Pi,2Pi/(90/3)}],Table[{i},{i,1,31,5}]]~Join~Table[{a
ng,st2},{ang,Pi/6,Pi/6+2Pi,2Pi/6}];
 Table[{ang,st},{ang,Pi/6,Pi/6+2Pi,2Pi/(90/3)}]//Length
 Show[
 ListContourPlot[
  vaux,
  PlotRange→All,
  ColorFunction→"Rainbow",
  Contours → Automatic,
  InterpolationOrder→1,
  Frame→False,
  ImageSize→750,
  BaseStyle->{FontFamily->"TimesNewRoman",FontSize→18},
  PlotLegends→estiloLegenda["kN"],
  PlotRangePadding→7
  ],
 epGraf
 ]


{Range[6,20]}~Join~Reverse[Transpose[Partition[resultMaxForcaCaboFinalGrafico[[All,3]],6]]];//
TableForm
 Column[
 {graficoFocaMaxCabo=
   ListContourPlot[
```

```
    resultMaxForcaCaboFinalGrafico,
    ColorFunction→"Rainbow",
    PlotRange→All,
    AspectRatio→.7,
    Contours→
     contornoDiscretoCustomizado[
      Min[resultMaxForcaCaboFinal],
      Max[resultMaxForcaCaboFinal],
      5,
      {limitesOperacioanis[[5,1]],limitesOperacioanis[[5,2]],limitesOperacioanis[[5,3]]},
      grafEstilosContornos,
      True
      ],
    ContourLabels→grafContourLabels,
    InterpolationOrder→1,
    PlotLabel→None(*"Força máxima no cabo ao longo da operação, kN"*),
    BaseStyle->{FontFamily->"TimesNewRoman",FontSize→18},
    FrameLabel→{"Tp, s","Hs, m"},
    FrameStyle→Thickness[.0025],
    FrameTicks→graficoTicks,
    ImageSize→600,
    PlotLegends→estiloLegenda["kN"]
    ],
  legendaOperacao
  },
 Center
 ]
 (*Estudo das "Ilhas" de força no diagrama*)
vetf=Table[0,{tp,1,21},{hs,1,12}];
Do[

vetf[[resultMaxForcaCaboFinalGrafico[[i,1]],resultMaxForcaCaboFinalGrafico[[i,2]]]]=resultMaxF
orcaCaboFinalGrafico[[i,3]],
 {i,1, Length[resultMaxForcaCaboFinalGrafico]}
 ]
Reverse[Transpose[vetf]]//TableForm
 (* Cálculo do contorno de força no cabo para o DOLGO *)
linhaContornoForcaCabo=
  {
   linhaContorno[graficoFocaMaxCabo,19,True,TpHsMinMaxGraficos],
   linhaContorno[graficoFocaMaxCabo,20,True,TpHsMinMaxGraficos],
   linhaContorno[graficoFocaMaxCabo,19,True,TpHsMinMaxGraficos]
   };
ListPlot[linhaContornoForcaCabo,PlotRange→{1,6},Joined→True,Filling→Axis,ImageSize→600,PlotLe
gends→Automatic]
```

Fator de amplificação dinâmica da força no cabo do guindaste

Nome do arquivo da força estática na linha: “IcamentoFPSO_s.GR4”

O arquivo contém o esforço axial do nó superior (FAX2) do elemento mais próximo da ponta do guindaste

Estrutra da lista de resultados da força no cabo do guindaste:

Vetor de 3 dimensões [[X, Y, Z]]

Linha inicial de dados (t=0,1): 4

X = Caso de carga

Y = 2 row com os valores da força estática

Z = Colunas: 1- Tempo (s); 2 - Força no cabo Linha 1 (kN) 3- Força no cabo Linha 2 ....

```
 (* Força estática em cada linha, [[1,número da linha]] *)
resultForcaCaboEstatica=Import[caminho<>listaDirSaida[[1]]<>"\\"<>nomeArqForcaCaboEstatica,"ta
ble"][[5;;All,2;;All]];
 (* Valor máximo extremo de cada linha para cada caso de carga, [[caso de carga, linha]] *)
resultFADcabo=ParallelTable[valorMaximoExtremo1D[resultForcaCabo[[CasoCarga,All,linha+1]],Fals
e,distProb,valProb]/resultForcaCaboEstatica[[1,linha+1]],{CasoCarga,
casosCarga},{linha,1,nL}];
resultFADcaboMax=Table[Max[Abs[resultFADcabo[[CasoCarga,All]]]],{CasoCarga,casosCarga}];
resultMaxFADgrafico=Table[{gridHsTP[[CasoCarga,1]],
gridHsTP[[CasoCarga,2]],resultFADcaboMax[[CasoCarga]]},{CasoCarga,casosCarga}];
 Column[
 {
  graficoFAD=
   ListContourPlot[
    resultMaxFADgrafico,
    ColorFunction→"Rainbow",
    PlotRange→All,
    AspectRatio→.7,
    Contours→
     contornoDiscretoCustomizado[
      1.,
```

```
      4.,
      .25,
      {limitesOperacioanis[[3,1]],limitesOperacioanis[[3,2]],limitesOperacioanis[[3,3]]},
      grafEstilosContornos,
      True
      ],
    ContourLabels→grafContourLabels,
    InterpolationOrder→1,
    PlotLabel→None,
    BaseStyle->{FontFamily->"TimesNewRoman",FontSize→18},
    FrameLabel→{"Tp, s","Hs, m"},
    FrameStyle→Thickness[.0025],
    FrameTicks→Automatic,
    ImageSize→600,
    PlotLegends→estiloLegenda["FAD"]
    ],
  legendaOperacao
  },Center
 ]
 (* Cálculo do contorno de força no cabo para o DOLGO *)
linhaContornoFAD=
  {
   linhaContorno[graficoFAD,3,True,TpHsMinMaxGraficos],
   linhaContorno[graficoFAD,4,True,TpHsMinMaxGraficos],
   linhaContorno[graficoFAD,3,True,TpHsMinMaxGraficos]
   };
ListPlot[linhaContornoFAD,PlotRange→{{6,20},{1,6}},Joined→True,Filling→Axis,ImageSize→600,Plo
tLegends→Automatic]

linhaContornoHS={{6,3},{20,3}};
listaContornos=
  {
   linhaContornoVelocidade[[1]],
   linhaContornoRoll[[1]],
   linhaContornoPitch,
   linhaContornoForcaCabo[[1]],
   linhaContornoForcaCabo[[2]],
   linhaContornoFAD[[1]],
   linhaContornoFAD[[2]],
   linhaContornoHS
   };
listaContornosSeg=listaContornos;
{
  linhaContornoVelocidade[[2]],
  linhaContornoRoll[[2]],
  linhaContornoPitch,
  linhaContornoForcaCabo[[2]],
  linhaContornoFAD[[1]],
  linhaContornoFAD[[2]],
  {{6,6},{20,6}}
  };
listaContornosEmerg=listaContornos;
{
  linhaContornoVelocidade[[3]],
  linhaContornoRoll[[3]],
  linhaContornoPitch,
  linhaContornoForcaCabo[[3]],
  linhaContornoFAD[[3]],
  {{6,6},{20,6}}
  };
contornosInterpolados=Table[Interpolation[Union[contorno,SameTest→(#1[[1]]==#2[[1]]&)],Interpo
lationOrder→1],{contorno,listaContornos}];
contornosInterpoladosEmerg=Table[Interpolation[Union[contorno,SameTest→(#1[[1]]==#2[[1]]&)],In
terpolationOrder→1],{contorno,listaContornosEmerg}];
contornoResultante=Table[{tp,Min[Table[contornosInterpolados[[contorno]][tp],{contorno,1,Lengt
h[contornosInterpolados]}]]},{tp,TpHsMinMaxGraficos[[1,1]],TpHsMinMaxGraficos[[2,1]],.001}];
contornoResultanteEmgerg=Table[{tp,Min[Table[contornosInterpoladosEmerg[[contorno]][tp],{conto
rno,1,Length[contornosInterpoladosEmerg]}]]},{tp,TpHsMinMaxGraficos[[1,1]],TpHsMinMaxGraficos[
[2,1]],.001}];
contornoResultanteSeg=Table[{tp,Min[Table[contornosInterpolados[[contorno]][tp],{contorno,1,Le
ngth[contornosInterpolados]}]]+
ParcelaSegSitNorm},{tp,TpHsMinMaxGraficos[[1,1]],TpHsMinMaxGraficos[[2,1]],.001}];
(*contornoResultanteEmerg=Table[{tp,Min[Table[contornosInterpolados[[contorno]][tp],{contorno,
1,Length[contornosInterpolados]}]]-
ParcelaSegSitNorm},{tp,TpHsMinMaxGraficos[[1,1]],TpHsMinMaxGraficos[[2,1]],.001}];*)
corRegiaoOk=RGBColor[152/255.,203/255.,74/255.];
```

```
corRegiaoBad=RGBColor[205/255.,205/255.,205/255.];
corRegiaoAtencao=RGBColor[247/255.,216/255.,66/255.];
corRegiaoEmerg=RGBColor[247/255.,109/255.,60/255.];
espContorno=Thickness[.0075];
listaContornosFinal=listaContornos~Join~{contornoResultante};
length = Length[listaContornos];
lengthSeg = Length[listaContornosSeg];
lengthEmerg = Length[listaContornosEmerg];
fillingList = Join[
Map[Rule[#,{Axis,corRegiaoAtencao}]&,Range[length]],Map[Rule[#[[1]],{{#[[2]]},corRegiaoBad}]&,
Subsets[Range[length],{2}]]];
fillingListSeg = Join[
Map[Rule[#,{Axis,corRegiaoOk}]&,Range[lengthSeg]],Map[Rule[#[[1]],{{#[[2]]},corRegiaoBad}]&,Su
bsets[Range[lengthSeg],{2}]]];
fillingListEmerg = Join[
Map[Rule[#,{0.,corRegiaoEmerg}]&,Range[lengthEmerg]],Map[Rule[#[[1]],{{#[[2]]},corRegiaoBad}]&
,Subsets[Range[lengthEmerg],{2}]]];
 (*Table[{Thickness[esplinha],ColorData[3,cor]},{cor,1,6}];*)
esplinha=.1;
estiloLegendaContNominal1=
  {
   {Thickness[esplinha], ColorData[68,"ColorList"][[1]]},
   {Thickness[esplinha], ColorData[68,"ColorList"][[2]]},
   {Thickness[esplinha],ColorData[68,"ColorList"][[7]]},
   {Thickness[esplinha],ColorData[68,"ColorList"][[4]]},
   {Thickness[esplinha],ColorData[68,"ColorList"][[3]]},
   {Thickness[esplinha],Darker[Magenta]}
   };
estiloLegendaContNominal=
  {
   {Thickness[esplinha], ColorData[68,"ColorList"][[1]]},
   {Thickness[esplinha], ColorData[68,"ColorList"][[2]]},
   {Thickness[esplinha],ColorData[68,"ColorList"][[7]]},
   {Thickness[esplinha],ColorData[68,"ColorList"][[4]]},
   {Thickness[esplinha],ColorData[68,"ColorList"][[4]]},
   {Thickness[esplinha],ColorData[68,"ColorList"][[3]]},
   {Thickness[esplinha],ColorData[68,"ColorList"][[3]]},
   {Thickness[esplinha],Darker[Magenta]}
   };
listaLegContNominal=Style[#,16,FontFamily→"TimesNewRoman"]&/@{"Velocidade","Roll","Pitch","For
ça no cabo","FAD","Hs"};
 Row[
 {
  Show[
   ListLinePlot[
    listaContornos,
    PlotRange→{{6,20},{1,6}},
    Joined→True,
    Frame→True,
    FrameLabel→{"Tp, s","Hs, m"},

GridLines→{Range[TpHsMinMaxGraficos[[1,1]],TpHsMinMaxGraficos[[2,1]],1],Range[1,TpHsMinMaxGraf
icos[[2,2]],.5]},
    GridLinesStyle→Dashed,
    Method→{"GridLinesInFront"→True},
    PlotStyle→Table[{Thickness[.0075],estiloLegendaContNominal[[i,2]]},{i,1,6}],
    PlotLegends→None,
    Filling→ fillingList,
    BaseStyle->{FontFamily->"TimesNewRoman",FontSize→17},
    ImageSize→Large
    ],
   Graphics[Text[Style["Operação nominal",Background→corRegiaoAtencao],{18.,1.25}]],
   Graphics[Text[Style["Região insegura",Background→corRegiaoBad],{18.2,5.75}]]
   ],
  Graphics[legendaAvulsa[19,listaLegContNominal,estiloLegendaContNominal1,White,{50,0.05}]]
  }
 ]
 (* Contornos de emergência e envoltória de emergência *)
Row[
 {
  Show[
   ListLinePlot[
    listaContornosEmerg,
    PlotRange→{{6,20},{1,6}},
    Joined→True,
    Frame→True,
```

```
    FrameLabel→{"Tp, s","Hs, m"},

GridLines→{Range[TpHsMinMaxGraficos[[1,1]],TpHsMinMaxGraficos[[2,1]],1],Range[1,TpHsMinMaxGraf
icos[[2,2]],.5]},
    GridLinesStyle→Dashed,
    Method→{"GridLinesInFront"→True},
    PlotStyle→Table[{Thickness[.0075],estiloLegendaContNominal1[[i,2]]},{i,1,6}],
    PlotLegends→None,
    Filling→ fillingListEmerg,
    BaseStyle->{FontFamily->"TimesNewRoman",FontSize→17},
    ImageSize→Large
    ],

(*ListPlot[contornoResultanteEmgerg,PlotStyle→Darker[Green],Filling→0,FillingStyle→corRegiaoO
k],*)
   Graphics[Text[Style["Operação em emergência",Background→corRegiaoEmerg],{17.5,1.25}]],
   Graphics[Text[Style["Região insegura",Background→corRegiaoBad],{18.3,3.25}]]
   ],
  Graphics[legendaAvulsa[19,listaLegContNominal,estiloLegendaContNominal,White,{50,0.05}]]
  }
 ]
 (* Contornos de segurança e envoltória de segurança *)
Row[
 {
  Show[
   ListLinePlot[
    listaContornosSeg,
    PlotRange→{{6,20},{1,6}},
    Joined→True,
    Frame→True,
    FrameLabel→{"Tp, s","Hs, m"},

GridLines→{Range[TpHsMinMaxGraficos[[1,1]],TpHsMinMaxGraficos[[2,1]],1],Range[1,TpHsMinMaxGraf
icos[[2,2]],.5]},
    GridLinesStyle→Dashed,
    Method→{"GridLinesInFront"→True},
    PlotStyle→Table[{Thickness[.0075],estiloLegendaContNominal[[i,2]]},{i,1,8}],
    PlotLegends→None,
    Filling→ fillingListSeg,
    BaseStyle->{FontFamily->"TimesNewRoman",FontSize→17},
    ImageSize→Large
    ],

(*ListPlot[contornoResultanteEmgerg,PlotStyle→Darker[Green],Filling→0,FillingStyle→corRegiaoO
k],*)
   Graphics[Text[Style["Operação segura",Background→corRegiaoOk],{18.2,1.25}]],
   Graphics[Text[Style["Região insegura",Background→corRegiaoBad],{18.2,5.75}]]
   ],
  Graphics[legendaAvulsa[19,listaLegContNominal,estiloLegendaContNominal1,White,{50,0.05}]]
  }
 ]
 g0={corRegiaoOk,Polygon[{{6,1},{6,6},{20,6},{20,1}}]};
g1={corRegiaoEmerg,Polygon[Join[listaContornos[[#]],Reverse[listaContornos[[#+1]]]]]&/@Range[L
ength[listaContornos]-1]};
g2={corRegiaoAtencao,Polygon[Join[listaContornosSeg[[#]],Reverse[listaContornosSeg[[#+1]]]]]&/
@Range[Length[listaContornosSeg]-1]};
g3={corRegiaoBad,Polygon[Join[listaContornosEmerg[[#]],Reverse[listaContornosEmerg[[#+1]]]]]&/
@Range[Length[listaContornosEmerg]-1]};
lp=Join[g0,g2,g1,g3];
Column[
 {
  Graphics[
   {lp,
    Text[Style["Região segura",Background→corRegiaoOk],{18.,1.25}],
    Text[Style["Região insegura",Background→corRegiaoBad],{18.,5.75}]
    },
   Axes→True,
   Frame→True,
   PlotRange→{{6,20},{1,6}},
   FrameLabel→{"Período de pico Tp, segundos","Altura significativa de onda Hs, metros"},

GridLines→{Range[TpHsMinMaxGraficos[[1,1]],TpHsMinMaxGraficos[[2,1]],1],Range[1,TpHsMinMaxGraf
icos[[2,2]],.5]},
   GridLinesStyle→Dashed,
   Method→{"GridLinesInFront"→True},
   AspectRatio→.63,
```

```
   ImageSize→Large,
   BaseStyle->{FontFamily->"TimesNewRoman",FontSize→17}
   ],
  SwatchLegend[
   {corRegiaoOk},
   {"Içamento de carga seguro"},
   LegendLayout→"Row",
   LegendMarkerSize→{20,10},
   LabelStyle→{FontSize→16}
   ]
  },
 Center
 ]

 g0={corRegiaoOk,Polygon[{{6,1},{6,6},{20,6},{20,1}}]};
g1={corRegiaoOk,Polygon[Join[listaContornos[[#]],Reverse[listaContornos[[#+1]]]]]&/@Range[Leng
th[listaContornos]-1]};
g2={corRegiaoOk,Polygon[Join[listaContornosSeg[[#]],Reverse[listaContornosSeg[[#+1]]]]]&/@Rang
e[Length[listaContornosSeg]-1]};
g3={corRegiaoBad,Polygon[Join[listaContornosEmerg[[#]],Reverse[listaContornosEmerg[[#+1]]]]]&/
@Range[Length[listaContornosEmerg]-1]};
lp=Join[g0,g2,g1,g3];
Column[
 {
  Graphics[
   {lp,
    Text[Style["Região segura",Background→corRegiaoOk],{18.,1.25}],
    Text[Style["Região insegura",Background→corRegiaoBad],{18.,5.75}]
    },
   Axes→True,
   Frame→True,
   PlotRange→{{6,20},{1,6}},
   FrameLabel→{"Período de pico Tp, segundos","Altura significativa de onda Hs, metros"},

GridLines→{Range[TpHsMinMaxGraficos[[1,1]],TpHsMinMaxGraficos[[2,1]],1],Range[1,TpHsMinMaxGraf
icos[[2,2]],.5]},
   GridLinesStyle→Dashed,
   Method→{"GridLinesInFront"→True},
   AspectRatio→.63,
   ImageSize→Large,
   BaseStyle->{FontFamily->"TimesNewRoman",FontSize→17}
   ],
  SwatchLegend[
   {corRegiaoOk},
   {"Içamento de carga seguro"},
   LegendLayout→"Row",
   LegendMarkerSize→{20,10},
   LabelStyle→{FontSize→16}
   ]
  },
 Center
 ]

(*******************************************************)
(*   Força no cabo em função do comprimento da linha   *)
(*******************************************************)
forcaEstaticaLinha=Table[{comLinhas[[linha]]+alturaCarga,ppCabo * comLinhas[[linha]] +
pesoCarga},{linha,linf,lini,-1}];
lstForcaLimiteCabo={{Min[comLinhas]+alturaCarga,limitesOperacioanis[[5,1]]},{Max[comLinhas]+al
turaCarga,limitesOperacioanis[[5,1]]}};
casoCargaGraficoFCComp=Range[41,45];
Table[
  ListLinePlot[

Table[Transpose[{comLinhas[[lini;;linf]]+alturaCarga,resultMaxForcaCabo[[loadcase]]}],{loadcas
e,comb}]~Join~{forcaEstaticaLinha}~Join~{lstForcaLimiteCabo},
   ImageSize→Large,
   Filling→None (*Axis*),
   FillingStyle→None (*Opacity[0.1]*),
   PlotRange→{Automatic,limitesOperacioanis[[5,1]]+1.},
   Frame→True,
   GridLines→None,
   GridLinesStyle→Dashed,
   Method→{"GridLinesInFront"→True},
   FrameLabel→{"Comprimento do cabo, m","Força máxima no cabo, kN"},
   BaseStyle->{FontFamily->"TimesNewRoman",FontSize→17},
```

```
   PlotStyle→(Directive[AbsoluteThickness[3],#]&/@ColorData[68,"ColorList"]),
   PlotMarkers→{Automatic,20},
   ImageSize→800,
   PlotLegends→
    Placed[
     LineLegend[
      Table["Hs= "<>ToString[gridHsTP[[lc,2]]]<>", Tp= " <>
ToString[gridHsTP[[lc,1]]],{lc,comb}]~Join~{"Estática","Limite"},
      LegendMarkerSize→{40,10},
      LegendLabel→None,
      LegendFunction→(Item[Style[#,Background→White]]&),
      LabelStyle→{14,Black,FontFamily→"TimesNewRoman"}
      ],
     {.2,.675}
     ]
   ],
  {comb,Partition[Range[1,ncc],6]}
  ];
```