



CONDIÇÕES EQUIVALENTES DE PROJETO BASEADAS NO FATOR DE  
UTILIZAÇÃO DE LONGO PRAZO NA TDZ PARA *RISERS* DE AÇO EM  
CATENÁRIA

Oscar Alfredo Godoy Marroquin

Tese de Doutorado 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 Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Luís Volnei Sudati Sagrilo

Rio de Janeiro  
Janeiro de 2017

CONDIÇÕES EQUIVALENTES DE PROJETO BASEADAS NO FATOR DE  
UTILIZAÇÃO DE LONGO PRAZO NA TDZ PARA RISERS DE AÇO EM  
CATENÁRIA

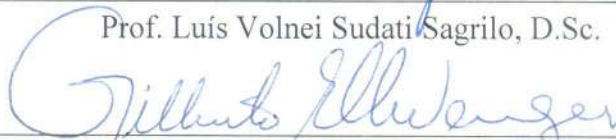
Oscar Alfredo Godoy Marroquin

TESE 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 DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

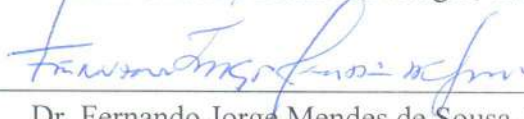
Examinada por:



Prof. Luís Volnei Sudati Sagrilo, D.Sc.



Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, D.Sc.



Dr. Fernando Jorge Mendes de Sousa, D.Sc.



Dr. Marcio Martins Mourelle, D.Sc.



Dr. Paulo Mauricio Videiro, Ph.D.



Prof. Anderson Pereira, D.Sc.



Dr. Allan Carre de Oliveira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JANEIRO DE 2017

Marroquin, Oscar Alfredo Godoy

Condições Equivalentes de Projeto Baseadas no Fator de Utilização de Longo Prazo na TDZ para *Risers* de Aço em Catenária / Oscar Alfredo Godoy Marroquin. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XIX, 172 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Luís Volnei Sudati Sagrilo

Tese (Doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 144-148.

1. Estatística de Longo Prazo da Resposta. 2. *Risers*. 3. Condições Ambientais. I. Sagrilo, Luís Volnei Sudati. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*Aos meus pais Ernestina e Facundo.*



## AGRADECIMENTOS

Ao Fernando Jorge Mendes de Sousa por ter sempre me ajudado e apoiado no desenvolvimento da tese. Obrigado pela amizade, pelos ensinamentos, pelo interesse mostrado e por buscar enriquecer ao máximo este trabalho.

Ao meu orientador Luís Volnei Sudati Sagrilo, pelo apoio prestado desde a minha chegada no Brasil, pela orientação, pela amizade, pelo incentivo e, acima de tudo pela confiança em mim e no meu trabalho depositada.

Ao professor Gilberto Bruno Ellwanger pelos ensinamentos, pela amizade e apoio desde a minha chegada no Brasil.

Ao Thiago Ângelo Gonçalves de Lacerda pela amizade, pela grande ajuda em todos os momentos e pelos ensinamentos oferecidos ao longo deste trabalho.

Ao meu grande amigo Gabriel Mattos Gonzalez, companheiro de tantos momentos. Obrigado pelo constante incentivo e pelos comentários na realização deste trabalho.

A todo o pessoal do Laboratório de Análise e Confiabilidade de Estruturas *Offshore* (LACEO/COPPE/UFRJ), aos quais sou muito grato pelas oportunidades de crescimento profissional e companheirismo.

A Omar Vázquez, Sergio Ayala, Clara Javier, Rosália Zepahua e Fernando Leyva, pelo apoio e incentivo. Aos amigos que sempre estão presentes: Aldo Cruces, Enrique Keb, Tatiana Vargas, Leonardo Bermeo, Santiago Toro, Miguel Calderón, Alfonso Rosales e Héctor Merino.

A meus pais Ernestina e Facundo, aos meus irmãos Everly, Norma Angelica, Julissa e, ao Josman, o irmão que encontrei na caminhada que é vida, obrigado pelo amor e apoio incondicional durante todas as etapas deste processo. Esse trabalho certamente não existiria sem eles.

À Sandra Liliana Carvajal Garcia, pelo amor, paciência, apoio e compreensão nos momentos de dificuldade. Obrigado por acreditar em mim e não me deixar desistir nunca.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

A todos aqueles com os quais convivi nesta etapa e que contribuíram para que minha estada no Brasil fosse boa e inesquecível.

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

CONDIÇÕES EQUIVALENTES DE PROJETO BASEADAS NO FATOR DE UTILIZAÇÃO DE LONGO PRAZO NA TDZ PARA *RISERS* DE AÇO EM CATENÁRIA

Oscar Alfredo Godoy Marroquin

Janeiro/2017

Orientador: Luís Volnei Sudati Sagrilo

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho apresenta uma metodologia semi-analítica para a seleção de condições ambientais de projeto baseadas no fator de utilização de longo prazo na TDZ (*Touchdown Zone*) para *risers* de aço em catenária. A metodologia proposta utiliza modelos analíticos simplificados para obter séries temporais de fatores de utilização de curto prazo, definidos de acordo com a norma DNV-OS-F201 (2010). O reduzido custo computacional destas análises permite a determinação de fatores de utilização de longo prazo de forma computacionalmente eficiente. A partir da avaliação dos fatores de utilização de longo prazo, torna-se possível calibrar condições ambientais equivalentes de projeto, definidas como sendo condições de curto prazo que geram respostas extremas iguais às de longo prazo calculadas. Esta nova metodologia representa uma mudança no enfoque tradicional dado ao projeto de *risers*, que passa a ser definido pela resposta, em vez de basear-se na resposta da estrutura sob a ação de condições ambientais extremas.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

EQUIVALENT PROJECT CONDITIONS BASED ON THE LONG TERM  
UTILIZATION RATIOS AT THE TDZ OF STEEL CATENARY RISERS

Oscar Alfredo Godoy Marroquin

January/2017

Advisor: Luís Volnei Sudati Sagrilo

Department: Civil Engineering

This work presents a semi-analytical methodology to select design environmental conditions based on long-term cross-section utilization ratios at the TDZ (Touchdown Zone) for steel catenary risers. This approach uses simplified analytical models to calculate time series of short-term utilization ratios, defined according to the DNV-OS-F201 (2010) standard. The low computational cost allows the effective determination of long-term utilization ratios. By evaluating long-term utilization ratios, it is possible to define short-term design environmental conditions, defined as short-term conditions whose most probable extreme responses are equal to the long-term ones. This kind of methodology may represent a substantial change to the traditional focus given to riser design, which is based on responses obtained from extreme environmental conditions, instead of on the extreme responses.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
I.1 Contexto e motivação.....	1
I.2 Objetivos .....	4
I.3 Histórico .....	5
I.4 Organização do texto.....	7
<b>CAPÍTULO II METODOLOGIA ANALÍTICA PARA CÁLCULO DO FATOR DE UTILIZAÇÃO DE CURTO PRAZO .....</b>	<b>9</b>
II.1 Introdução .....	9
II.2 Modelagem probabilística das ações ambientais .....	11
II.3 Visão geral da metodologia analítica para avaliar os fatores de utilização de curto e longo prazo e condições equivalentes de projeto .....	15
II.4 Geração da geometria da linha, equilíbrio estático e posição do momento estático nulo .....	17
II.5 Movimentos na direção definida pelo ângulo de topo do <i>riser</i> .....	20
II.6 Séries temporais de tração dinâmica na TDZ .....	27
II.7 Momentos fletores no plano do <i>riser</i> – parcela estática .....	33
II.8 Séries temporais de momentos fletores no plano do <i>riser</i> – parcela dinâmica.....	34
II.9 Passeio dinâmico do TDP .....	38
II.10 Fator de utilização segundo a norma DNV-OS-F201 (2010), critério LRFD. ....	39
II.11 Estatística de curto prazo da resposta .....	44
<b>CAPÍTULO III ESTATÍSTICA DE LONGO PRAZO DO FATOR DE UTILIZAÇÃO E CONDIÇÕES EQUIVALENTES DE PROJETO .....</b>	<b>47</b>
III.1 Introdução.....	47
III.2 Estatística de longo prazo da resposta .....	48
III.3 Avaliação numérica da estatística de longo prazo da resposta.....	51
III.4 Condições equivalentes de projeto .....	53
<b>CAPÍTULO IV ESTUDOS DE CASOS .....</b>	<b>56</b>

IV.1 Introdução.....	56
IV.2 Dados gerais para as análises de longo prazo.....	57
IV.3 Estudo de caso 1 .....	59
IV.3.1 Descrição do Modelo .....	59
IV.3.2 Análises de calibração.....	62
IV.3.3 Posição do TDP estático .....	64
IV.3.4 Resultados das análises de Curto Prazo .....	65
IV.3.5 Resumo das análises dos fatores de utilização de curto prazo.....	82
IV.3.6 Resultados da análise de Longo Prazo.....	84
IV.4 Estudo de Caso 2 .....	89
IV.4.1 Descrição do Modelo .....	89
IV.4.2 Posição do TDP estático .....	91
IV.4.3 Resultados de Curto Prazo .....	92
IV.4.4 Resumo das análises dos fatores de utilização de curto prazo.....	112
IV.4.5 Resultados da análise de Longo Prazo.....	114
IV.5 Estudo de Caso 3 .....	118
IV.5.1 Descrição do Modelo .....	118
IV.5.2 Análises de calibração.....	120
IV.5.3 Posição do TDP estático .....	120
IV.5.4 Resultados de Curto Prazo .....	121
IV.5.5 Resumo das análises dos fatores de utilização de curto prazo.....	130
IV.5.6 Resultados da análise de Longo Prazo.....	131
<b>CAPÍTULO V CONDIÇÕES EQUIVALENTES DE PROJETO BASEADAS NO FATOR DE UTILIZAÇÃO DE LONGO PRAZO NA REGIÃO DO TDP .....</b>	<b>134</b>
V.1 Introdução .....	134
V.2 Condições ambientais equivalentes de projeto .....	135
<b>CAPÍTULO VI COMENTÁRIOS FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>139</b>
VI.1 Comentários finais.....	139
VI.2 Sugestões para trabalhos futuros .....	142

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>144</b>
<b>ANEXO A RESULTADOS DE CURTO PRAZO (ESTUDO DE CASO 1) .....</b>	<b>149</b>
<b>ANEXO B RESULTADOS DE CURTO PRAZO (ESTUDO DE CASO 2) .....</b>	<b>155</b>
<b>ANEXO C RESULTADOS DE CURTO PRAZO (ESTUDO DE CASO 3) .....</b>	<b>169</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura I.1 –Estrutura típica de riser flexível composto por várias camadas metálicas helicoidais e camadas poliméricas.....	1
Figura I.2 – Tubos de aço utilizados na montagem de um <i>riser</i> rígido.....	2
Figura I.3 – Sistema (RSAA) em algumas de suas variações . .....	2
Figura I.4 – <i>Riser</i> na configuração de catenária livre.....	3
Figura II.1 – Principais cargas atuantes sobre estruturas <i>offshore</i> . .....	11
Figura II.2 – Caracterização de curto e longo prazo dos parâmetros ambientais.....	14
Figura II.3 – Visão resumida da metodologia proposta neste trabalho para avaliar o fator de utilização de longo prazo e condições equivalente de projeto.....	16
Figura II.4 – Esquema geral para avaliar a posição do TDP considerando o arrasto gerado pela corrente marinha. ....	19
Figura II.5 – Comparação da posição do TDP estático considerando ou não o arrasto da corrente marinha. ....	20
Figura II.6 – Graus de liberdade da unidade flutuante. ....	23
Figura II.7 – Sistemas de referência global, do flutuante e do plano da linha ( $X_L$ coincide com a projeção horizontal da linha) .....	24
Figura II.8 – Sistemas de referência local do elemento, considerando $Z'_L$ o eixo tangente .....	24
Figura II.9 – Pontos notáveis da definição do <i>riser</i> em catenária. ....	28
Figura II.10 – Curva do momento fletor estático na região do TDP.....	36
Figura II.11 – Envoltórias de máximos do momento fletor na região do TDP.....	37
Figura II.12 – Aproximação da envoltória de máximos do momento fletor no trecho entre o ponto de máximo momento fletor dinâmico e o ponto de momento dinâmico nulo...	38
Figura II.13 – Esquema da resposta de curto prazo de uma estrutura marítima.....	45
Figura II.14 – Definição dos picos de uma série temporal.....	46

Figura III.1 – Histograma dos picos da resposta no curto e no longo prazo .....	48
Figura III.2 – Exemplo de uma malha triangular de interpolação para uma função bidimensional de parâmetros ambientais.....	53
Figura IV.1 – Estudo de caso 1: Visão geral do modelo de elementos finitos do riser rígido, (a) Vista em planta, (b) Azimute da linha.....	60
Figura IV.2 – Estudo de Caso 1: Função de transferência do movimento vertical no topo do riser na direção de incidência da onda analisada. ....	61
Figura IV.3 – Estudo de Caso 1, Malha de interpolação de 132 pontos. ....	62
Figura IV.4 – Definição das direções dos carregamentos ambientais e <i>offset</i> do SCR..	63
Figura IV.5 – Estudo de Caso 1: Envoltórias de momentos fletores das análises (FEM) para calibração do modelo semi-analítico. ....	64
Figura IV.6 – Estudo de Caso 1: Posição do TDP estático .....	65
Figura IV.7 – Estudo de Caso 1: Caso de Carregamento 82, Séries temporais de passeio do TDP .....	66
Figura IV.8 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 82: Séries temporais da parcela dinâmica da tração no TDP .....	67
Figura IV.9 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 82: Séries temporais de momentos fletores no TDZ. Posição $6\lambda$ .....	69
Figura IV.10 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 82: Séries temporais de momentos fletores no TDZ. Posição 0 .....	70
Figura IV.11 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 82: Séries temporais de fatores de utilização de curto prazo na região do TDP. Posição $6\lambda$ .....	71
Figura IV.12 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 82: Ajuste dos picos dos fatores de utilização de curto prazo na região do TDP. Posição $6\lambda$ .....	73
Figura IV.13 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 82: Valores extremos máximos mais prováveis do fator de utilização de curto prazo. ....	73
Figura IV.14 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 125: Séries temporais de passeio do TDP.....	74
Figura IV.15 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 125, Séries temporais da parcela dinâmica da tração no TDP .....	76



Figura IV.16 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 125: Envoltórias de máximos e mínimos da tração dinâmica ao longo do comprimento do <i>riser</i> (FEM).....	76
Figura IV.17 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 125: Comparação entre espectros de tração no TDP. ....	77
Figura IV.18 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 125: Séries temporais de momentos fletores no TDZ. Posição $5\lambda$ .....	79
Figura IV.19 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 125: Séries temporais de fatores de utilização de curto prazo na região do TDP. Posição $5\lambda$ .....	81
Figura IV.20 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 125: Valores extremos máximos mais prováveis do fator de utilização de curto prazo .....	82
Figura IV.21 – Estudo de Caso 1: Máximos dos valores extremos mais prováveis de curto prazo. ....	83
Figura IV.22 – Estudo de Caso 1: Fatores de utilização de longo prazo (100 anos) na região do TDP.....	85
Figura IV.23 – Estudo de Caso 1: Estados de mar com maior contribuição para a resposta de longo prazo do máximo valor mais provável (100 anos) do fator de utilização na região do TDP.....	86
Figura IV.24 – Estudo de Caso 1: Fatores de utilização de longo prazo (100 anos) na região do TDP.....	87
Figura IV.25 – Estudo de Caso 1: Estados de mar com maior contribuição para a resposta de longo prazo do máximo valor mais provável (100 anos) do fator de utilização na região do TDP.....	88
Figura IV.26 – Estudo de caso 2: Visão geral do modelo de elementos finitos do <i>riser</i> rígido, (a) Vista em planta, (b) Azimute da linha. ....	89
Figura IV.27 – Estudo de Caso 2: Função de transferência do movimento vertical no topo do <i>riser</i> na direção de incidência da onda analisada. ....	90
Figura IV.28 – Estudo de Caso 2: Malha de interpolação de 300 pontos. ....	90
Figura IV.29 – Estudo de Caso 2: Posição do TDP estático. ....	91
Figura IV.30 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 200: Séries temporais de passeio do TDP.....	93

Figura IV.31 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 200, Séries temporais da parcela dinâmica da tração no TDP .....	94
Figura IV.32 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 200: Séries temporais de momentos fletores no TDZ. Posição $5\lambda$ .....	95
Figura IV.33 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 200: Séries temporais de momentos fletores na TDZ. Posição $9\lambda$ . .....	96
Figura IV.34 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 200: Séries temporais de fatores de utilização de curto prazo na região do TDP. Posição $5\lambda$ .....	97
Figura IV.35 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 200: Séries temporais de fatores de utilização de curto prazo na região do TDP. Posição $9\lambda$ .....	98
Figura IV.36 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 200: Valores extremos máximos mais prováveis do fator de utilização de curto prazo. ....	99
Figura IV.37 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 270: Séries temporais de passeio do TDP.....	100
Figura IV.38 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 270: Séries temporais da parcela dinâmica da tração no TDP .....	101
Figura IV.39 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 270: Comparação entre espectros de tração no TDP .....	101
Figura IV.40 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 270: Séries temporais de momentos fletores no TDZ. Posição $5\lambda$ .....	103
Figura IV.41 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 270: (a) Séries temporais da parcela dinâmica da tração no TDP; (b) Séries temporais da taxa de variação da tração dinâmica e momentos fletores no TDZ. Posição $5\lambda$ .....	104
Figura IV.42 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 270: Séries temporais de fatores de utilização de curto prazo na região do TDP. Posição $5\lambda$ .....	105
Figura IV.43 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 270: Valores extremos máximos mais prováveis de curto prazo do fator de utilização .....	106
Figura IV.44 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 290: Séries temporais de passeio do TDP.....	107
Figura IV.45 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 290: Envoltórias de máximos e mínimos da tração dinâmica ao longo do comprimento do <i>riser</i> (FEM). ....	108

Figura IV.46 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 290: Séries temporais de momentos fletores no TDZ. Posição $10\lambda$ .....	110
Figura IV.47 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 290: Séries temporais de fatores de utilização de curto prazo na região do TDP. Posição $10\lambda$ .....	111
Figura IV.48 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 290: Valores extremos máximos mais prováveis do fator de utilização de curto prazo .....	112
Figura IV.49 – Estudo de Caso 2: Máximos dos valores extremos mais prováveis de curto prazo para os 300 casos de carregamento.....	113
Figura IV.50 – Estudo de Caso 2: Fatores de utilização de longo prazo (100 anos) na região do TDP.....	114
Figura IV.51 – Estudo de Caso 2: Estados de mar com maior contribuição para a resposta de longo prazo do máximo valor mais provável (100 anos) do fator de utilização na região do TDP.....	115
Figura IV.52 – Estudo de Caso 2: Fatores de utilização de longo prazo (100 anos) na região do TDP.....	116
Figura IV.53 – Estudo de Caso 2: Estados de mar com maior contribuição para a resposta de longo prazo do máximo valor mais provável (100 anos) do fator de utilização na região do TDP.....	117
Figura IV.54 – Estudo de Caso 3: Visão geral do modelo de elementos finitos do <i>riser</i> rígido, (a) vista em planta, (b) Azimute da linha.....	118
Figura IV.55 – Estudo de Caso 3: Função de transferência do movimento vertical no topo do <i>riser</i> na direção de incidência da onda analisada. ....	119
Figura IV.56 – Estudo de Caso 3: Posição do TDP estático. ....	121
Figura IV.57 – Estudo de Caso 3: Malha de interpolação de 132 pontos. ....	122
Figura IV.58 – Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 95: Séries temporais de momentos fletores no TDZ. Posição $7\lambda$ .....	124
Figura IV.59 – Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 95: Séries temporais de fatores de utilização de curto prazo na região do TDP. Posição $7\lambda$ .....	125
Figura IV.60 – Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 95: Valores extremos mais prováveis de curto prazo do fator de utilização na região do TDP.....	126

Figura IV.61 – Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 132: Séries temporais de momentos fletores no TDZ. Posição $4\lambda$ .....	128
Figura IV.62 – Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 132: Séries temporais de fatores de utilização de curto prazo na região do TDP. Posição $2\lambda$ .....	129
Figura IV.63 – Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 132: Valores extremos máximos mais prováveis de curto prazo do fator de utilização na TDZ.....	130
Figura IV.64 – Estudo de Caso 3: Máximos dos valores extremos mais prováveis de curto prazo do fator de utilização na região do TDP .....	131
Figura IV.65 – Estudo de Caso 3: Fatores de utilização de longo prazo (100 anos) na região do TDP.....	132
Figura IV.66 – Estudo de Caso 3: Estados de mar com maior contribuição para a resposta de longo prazo do máximo valor mais provável (100 anos) do fator de utilização na região do TDP.....	133
Figura V.1 – Estudo de Caso 1: Condições ambientais equivalentes de projeto baseadas no fator de utilização de longo prazo (100 anos) na região do TDP .....	136
Figura V.2 – Estudo de Caso 2: Condições ambientais equivalentes de projeto baseadas no fator de utilização de longo prazo (100 anos) na região do TDP .....	136
Figura V.3 – Estudo de Caso 3: Condições ambientais equivalentes de projeto baseadas no fator de utilização de longo prazo (100 anos) na região do TDP .....	137

## LISTA DE TABELAS

Tabela II.1– Classificação do tipo de classe de segurança segundo a norma <i>offshore</i> ...	41
Tabela IV.1– Parâmetros da função $f_{Hs}(h)$ ajustada nos três estudos de casos. ....	58
Tabela IV.2– Parâmetros da função $f_{Tz h}(t h)$ ajustada nos estudos de casos 1 e 3. ....	58
Tabela IV.3– Principais características do Estudo de Caso 1.....	60
Tabela IV.4– Estudo de Caso 1, Casos analisados para calibração do polinômio que aproxima o passeio do TDP.....	62
Tabela IV.5– Estudo de Caso 1: Posição média do momento fletor máximo.....	63
Tabela IV.6– Estudo de Caso 1: Caso de Carregamento 82: Parâmetros estatísticos do passeio do TDP (m).....	66
Tabela IV.7– Estudo de Caso 1: Caso de Carregamento 82: Parâmetros estatísticos da série de tração (kN) na TDZ.....	67
Tabela IV.8– Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 82: Parâmetros estatísticos dos momentos fletores na TDZ (kN*m).....	69
Tabela IV.9– Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 82: Parâmetros estatísticos dos fatores de utilização de curto prazo na TDZ.....	71
Tabela IV.10– Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 125: Parâmetros estatísticos do passeio do TDP (m).....	75
Tabela IV.11– Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 125: Parâmetros estatísticos da série de tração (kN) na TDZ.....	75
Tabela IV.12– Estudo de Caso 1- Caso de Carregamento 125: Parâmetros estatísticos dos momentos fletores na TDZ (kN*m).....	78
Tabela IV.13– Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 125: Parâmetros estatísticos dos fatores de utilização de curto prazo na TDZ.....	80
Tabela IV.14– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 200: Parâmetros estatísticos do passeio do TDP (m).....	92
Tabela IV.15– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 200: Parâmetros estatísticos da série de tração (kN) na TDZ.....	93

Tabela IV.16– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 200: Parâmetros estatísticos dos momentos fletores na TDZ (kN*m) .....	95
Tabela IV.17– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 200: Parâmetros estatísticos dos fatores de utilização de curto prazo na TDZ.....	97
Tabela IV.18– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 270: Parâmetros estatísticos do passeio do TDP (m) .....	99
Tabela IV.19– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 270: Parâmetros estatísticos da série de tração (kN) na TDZ .....	100
Tabela IV.20– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 270: Parâmetros estatísticos dos momentos fletores na TDZ (kN*m) .....	103
Tabela IV.21– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 270: Parâmetros estatísticos dos fatores de utilização de curto prazo na TDZ.....	105
Tabela IV.22– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 290: Parâmetros estatísticos do passeio do TDP (m) .....	107
Tabela IV.23– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 290: Parâmetros estatísticos da série de tração (kN) na TDZ .....	108
Tabela IV.24– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 290: Parâmetros estatísticos dos momentos fletores na TDZ (kN*m) .....	109
Tabela IV.25– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 290: Parâmetros estatísticos dos fatores de utilização de curto prazo na TDZ.....	111
Tabela IV.26– Principais características do Estudo de Caso 3.....	119
Tabela IV.27– Estudo de Caso 3: Posição média do momento fletor máximo .....	120
Tabela IV.28– Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 95: Parâmetros estatísticos do passeio do TDP (m) .....	123
Tabela IV.29– Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 95: Parâmetros estatísticos da série de tração (kN) na TDZ .....	123
Tabela IV.30– Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 95: Parâmetros estatísticos dos momentos fletores na TDZ (kN*m) .....	123
Tabela IV.31– Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 95: Parâmetros estatísticos dos fatores de utilização de curto prazo na TDZ.....	125

Tabela IV.32– Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 132: Parâmetros estatísticos do passeio do TDP (m).....	127
Tabela IV.33– Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 132: Parâmetros estatísticos da série de tração (kN) na TDZ.....	127
Tabela IV.34– Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 132: Parâmetros estatísticos dos momentos fletores na TDZ (kN*m) .....	127
Tabela IV.35– Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 132: Parâmetros estatísticos dos fatores de utilização de curto prazo na TDZ.....	129
Tabela V.1– Condições ambientais equivalentes baseadas no fator de utilização de longo prazo na região do TDP .....	137
Tabela V.2– Fatores de utilização de curto prazo associados à condição centenária ( $H_{s100}$ , $T_{z100}/T_{p100}$ ).....	138
Tabela A.1 – Estudo de caso1: Ondas para a análise de curto prazo. ....	149
Tabela A.2 – Estudo de caso 1: Comparação de trações e momentos fletores estáticas no TDP, posição do TDP e comprimento de flexão “ $\lambda$ ” .....	151
Tabela A.3 – Estudo de caso 1: Comparação de máximos valores extremos do fator de utilização(DNV-2001) dos estados de mar de curto prazo na TDZ .....	154
Tabela B.1 – Estudo de caso 2: Ondas para a análise de curto prazo.....	155
Tabela B.2 – Estudo de caso 2: Comparação de trações e momentos fletores estáticas no TDP, posição do TDP e comprimento de flexão “ $\lambda$ ”. .....	159
Tabela B.3 – Estudo de caso 2: Comparação de máximos valores extremos do fator de utilização (DNV-2001) dos estados de mar de curto prazo na TDZ .....	166
Tabela C.1 – Estudo de caso 3: Comparação de trações e momentos fletores estáticas no TDP, posição do TDP e comprimento de flexão “ $\lambda$ ” .....	169
Tabela C.2 – Estudo de caso 3: Comparação de máximos valores extremos do fator de utilização(DNV-2001) dos estados de mar de curto prazo na TDZ .....	172

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### I.1 Contexto e motivação

Um dos componentes críticos dos sistemas marítimos de produção são os *risers*. *Risers* são estruturas tubulares que têm como função transportar algum tipo de fluido entre duas estruturas, uma estática no fundo do mar e outra dinâmica na superfície (e.g. plataforma flutuante ou boia marítima).

Na indústria *offshore* são principalmente usados *risers* flexíveis (Figura I.1) ou *risers* compostos por tubos rígidos, comumente chamados *Steel Catenary Risers* (SCRs - quando instalados em catenária livre - Figura I.2), ou *Steel Lazy Wave Risers* (SLWRs - quando instalados na configuração chamada de *Lazy Wave*). Mais recentemente, têm sido estudadas e utilizadas outros tipos de configurações, tais como os *risers* híbridos auto-sustentáveis (RHAS) ou os *risers* suspensos e ancorados por amarras (RSAAs), mostrados em três configurações na Figura I.3.



Figura I.1 –Estrutura típica de riser flexível composto por várias camadas metálicas helicoidais e camadas poliméricas.

Disponível em: < <http://www.bws.dk/news/news-archieve/2015/may/a-good-cooperation-with-flexible-solutions.aspx> > “Acesso em: agosto de 2016”.



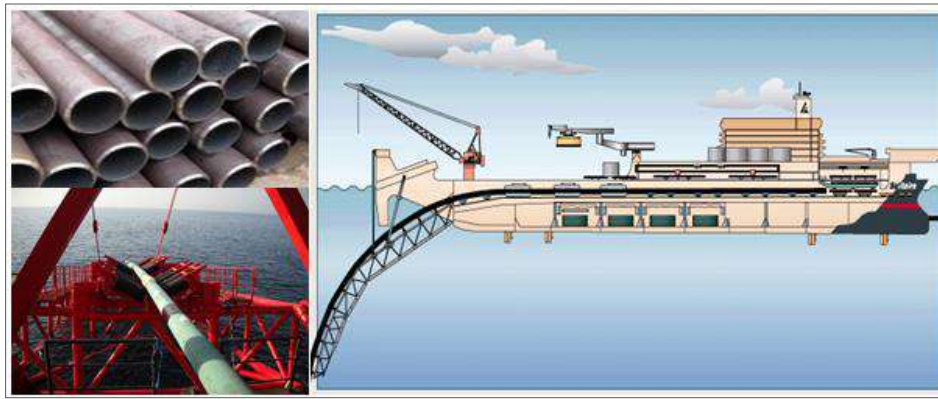


Figura I.2 – Tubos de aço utilizados na montagem de um riser rígido

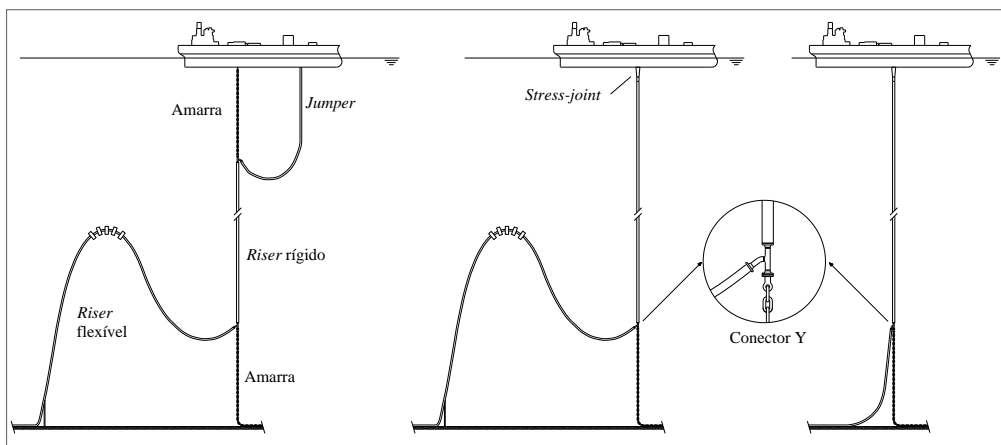


Figura I.3 – Sistema (RSAA) em algumas de suas variações (PEREIRA, 2011).

A configuração mais comum para os risers é em catenária livre, como mostrado na Figura I.4. Nesta configuração, o riser fica preso à plataforma e se estende livremente até o solo. Por isso, as regiões do topo e do contato com o solo (TDZ – *Touchdown Zone*) são usualmente as mais críticas. Com a tendência de se explorar petróleo em lâminas d'água cada vez mais profundas, alguns problemas são agravados, tais como: o excesso de tração no topo, pois todo o comprimento suspenso é sustentado pelo ponto de conexão; a compressão dinâmica (decorrem grandes curvaturas locais), que deve ser evitada por estar relacionada à ocorrência de flambagem na estrutura e, finalmente, a baixa vida útil devido à fadiga.

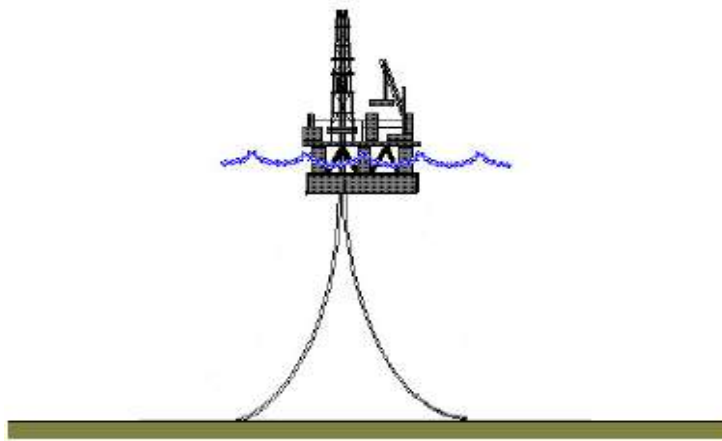


Figura I.4 – Riser na configuração de catenária livre.

A integridade estrutural de um *riser* é verificada por meio de análises estruturais (estáticas e dinâmicas), em que são simulados os esforços impostos pelas ações ambientais que agem sobre a unidade flutuante e sobre o *riser* durante as diversas fases da sua vida útil (e.g. instalação, eventos extremos, cargas acidentais, fadiga – SOUSA, 2011). Estas análises geralmente são realizadas através de modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos (FEM), tais como ANFLEX (2010), SESAM-DeepC (DNV, 2016) ou OrcaFlex (ORCINA, 2016). Estes modelos são bastante complexos e levam em consideração os diversos esforços atuantes no *riser*, e.g. peso próprio, empuxo, pressão interna e externa, interação solo-estrutura, e demais efeitos devidos às cargas ambientais de onda, vento e corrente marinha.

No caso das análises de extremos, normas como a API RP 2RD (2013) e API RP 17B (2014) sugerem o cálculo da resposta do *riser* a partir de combinações de cargas ambientais extremas. Estas metodologias associam a ocorrência da resposta extrema com a ocorrência de uma condição ambiental extrema para um período de recorrência pré-definido. No entanto, essa resposta calculada pode não coincidir com a resposta extrema real associada a esse período de recorrência, pois a resposta de longo prazo depende fortemente da direção das cargas ambientais e do comportamento dinâmico da estrutura.

Em 2001, a norma DNV OS-F201 (DNV, 2001) introduziu novos procedimentos para o projeto e verificação de *risers* de aço. Esta norma definiu uma alternativa fundamentada na estatística de longo prazo da resposta do *riser*, além de um novo critério de avaliação estrutural, representado pelo fator de utilização da sua seção transversal

(usualmente a verificação era feita com base num critério definido em função da tensão de von Mises, API RP 2RD (2013)).

A metodologia de projeto baseada na estatística de longo prazo da resposta permite de forma mais adequada considerar a ação de todas as condições ambientais de curto prazo e, conseqüentemente, obter a resposta extrema do *riser* associada a um período de recorrência pré-especificado de forma mais realista (VIDEIRO, 1998).

A metodologia de estatística de longo prazo da resposta, porém, apresenta vários desafios para se transformar numa ferramenta de uso mais frequente no projeto de estruturas oceânicas em geral e, mais especificamente, no projeto de *risers* em catenária. Uma das partes críticas no projeto de um *riser* em catenária, seja ele flexível ou rígido, é a região de contato deste com o solo. Como a integração de longo prazo requer a realização de muitas análises estruturais, o uso de modelos analíticos para a análise dinâmica torna-se fundamental. Na literatura, existem poucos trabalhos que apresentam formulações analíticas para análise da resposta dinâmica ao longo de um *riser*, incluindo a região do TDP. Um destes trabalhos foi proposto por ARANHA *et al* (1997), que será discutido no CAPÍTULO II, e será utilizado neste trabalho.

## **I.2 Objetivos**

O presente trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma metodologia que permita obter condições ambientais de curto prazo equivalentes de projeto baseadas na estatística de longo prazo da resposta na região do TDP (*Touchdown Point*), que possam ser utilizadas no projeto de *risers* rígidos em catenária. O parâmetro escolhido para representar a resposta foi o fator de utilização da seção transversal do *riser* na região do TDP, definido segundo a norma *offshore* DNV-OS-F201 (2010).

Os estudos foram conduzidos através de modelos semi-analíticos, que necessitam de alguns parâmetros a serem calibrados mediante um reduzido número de análises numéricas. Através destes modelos foi possível avaliar os esforços dinâmicos na região do TDP e viabilizar o cálculo dos fatores de utilização de curto prazo. Nos exemplos analisados, os parâmetros ambientais de curto prazo dos estados de mar são representados por uma distribuição conjunta de dois parâmetros ( $H_s$  – altura significativa de onda,  $T_z$  – período de cruzamento zero) ou ( $H_s$ ,  $T_p$  – período de pico). Já a estatística

de longo prazo é obtida pela integração ponderada da distribuição probabilística dos picos da resposta de curto prazo nos diversos estados de mar.

Os resultados obtidos com o modelo semi-analítico foram comparados com os calculados com o modelo baseado no Método dos Elementos Finitos, com a finalidade de validar o método proposto.

É importante ressaltar que a principal contribuição deste trabalho está na definição de condições ambientais equivalentes, determinadas tomando como base a resposta extrema (centenária) da estrutura. Esta consideração difere da abordagem tradicional dada ao projeto de *risers*, em que a resposta extrema é calculada a partir de condições ambientais extremas.

### **I.3 Histórico**

Segundo VIDEIRO (1998) e NAESS e MOAN (2005), o projeto de estruturas oceânicas deve levar em consideração a natureza aleatória das forças ambientais de vento, ondas do mar e corrente. Neste aspecto, é recomendável utilizar uma metodologia baseada na estatística de longo prazo da resposta, onde todas as possíveis combinações de ações ambientais de curto prazo são consideradas no projeto. Esse tipo de metodologia apresenta desafios importantes para sua utilização direta nos projetos de engenharia, sendo um deles o alto custo computacional devido ao elevado número de análises de curto prazo necessárias para obter a resposta de longo prazo. Outro ponto importante é a necessidade de dispor de dados simultâneos de parâmetros ambientais de onda, vento e corrente.

Uma forma de diminuir o custo computacional das análises é a utilização de métodos analíticos simplificados e de funções de distribuição conjunta de dados ambientais. No caso da modelagem probabilística dos parâmetros ambientais, os trabalhos de SAGRILO et al. (2008, 2011) apresentam um modelo de distribuição conjunta baseado na Transformada de Nataf (DER KIUREGHIAN e LIU, 1986), ajustado a um conjunto de dados ambientais medidos na Bacia de Campos, na costa brasileira.

A partir da modelagem de dados ambientais de SAGRILO et al. (2008), PAPALEO (2009) desenvolveu uma metodologia probabilística para definir um conjunto

de casos de carregamentos extremos para verificação estrutural de *risers* flexíveis em catenária conectados a uma plataforma tipo FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading*) com ancoragem do tipo *turret*, baseada na estatística de longo prazo dos movimentos de *heave* e de *roll* da unidade flutuante. A integração de longo prazo é feita pelo método de Monte Carlo (MELCHERS, 1999). Para isso foram utilizadas rotinas para o cálculo das forças hidrodinâmicas e aerodinâmicas atuantes no FPSO para cada estado de mar de curto prazo e, posteriormente, determinar seu aproamento de equilíbrio, através da consideração apenas das forças médias devidas à onda, corrente e vento, e desprezando efeitos dinâmicos de primeira e de segunda ordem, além da interação entre as cargas ambientais. O aproamento é dado pela posição angular que torna nulo o momento gerado pelas cargas ambientais em relação ao centro do *turret*.

SOUSA (2011), dando continuidade à pesquisa de PAPALEO (2009), apresenta uma metodologia para a seleção de condições ambientais de projeto para *risers* em catenária baseada na tração extrema de longo prazo. Nesta metodologia, a tração é avaliada no topo do *riser* através de modelos analíticos simplificados (ARANHA *et al.* 2001) para representar o comportamento dinâmico da estrutura. Além disso, rotinas de equilíbrio estático e de catenárias extensíveis, aplicadas por LACERDA (2005, 2011), são utilizadas para o cálculo das parcelas estáticas de tração. Esta metodologia permite caracterizar estatisticamente a tração para um número muito grande de estados de mar de curto prazo, com custos computacionais reduzidos, viabilizando-se a avaliação da tração de longo prazo.

A metodologia desenvolvida por SOUSA (2011) focou-se na definição de condições equivalentes de projeto para verificação estrutural na região do topo de *risers* rígidos ou flexíveis. Porém, outro ponto crítico para verificação é a região do TDP. Este é o foco deste trabalho e, para isto, é necessário o uso de um procedimento semi-analítico para predição dos esforços dinâmicos na região do TDP.

Em relação ao comportamento dinâmico de *risers* na região do TDP, existem poucos trabalhos disponíveis na literatura dedicados a este tema. Dentre os modelos que descrevem o comportamento na região do TDP, destacam-se os desenvolvidos por ARANHA *et al* (1997, 2001), PESCE *et al* (1997) e GOBAT & GROSENBAUGH (2001).

Os modelos desenvolvidos por ARANHA et al. (1997, 2001) e PESCE et al. (1997), permitem a avaliação tanto de trações quanto de momentos fletores no plano do *riser* para a região do TDP. Nestes modelos, os momentos fletores fora do plano e a torção são desprezados, visto que os momentos fora do plano tendem a apresentar pouca influência no comportamento dinâmico (exceto nos estados de mar muito severos), e a torção representa um critério de falha importante apenas para umbilicais e *risers* de pequenos diâmetros.

GOBAT & GROSENBAUGH (2001) propõem procedimentos polinomiais aplicados à análise de trações em linhas de ancoragem. Neste modelo, a única variável considerada é a tração no topo de linhas de ancoragem submetidas unicamente a movimentos de *heave*. Sendo assim, a tração é função apenas de dois parâmetros (velocidade e aceleração de *heave*) que devem ser calibrados através de algumas análises dinâmicas prévias. Estes métodos polinomiais podem ser extrapolados para avaliar a tração no topo de *risers*, sempre que os movimentos no topo do *riser* sejam dominados pelo *heave* e a linha não perca a configuração de catenária (SOUSA, 2011). Entretanto, o modelo não permite a estimativa de momentos fletores.

#### **I.4 Organização do texto**

O trabalho encontra-se organizado em mais cinco capítulos. No CAPÍTULO II, descreve-se a metodologia analítica para o cálculo dos fatores de utilização das seções transversais de um *riser* de aço nos estados de mar de curto prazo segundo a norma DNV-OS-F201 (2010), versão LRFD (*Load and Resistance Factored Design*). Nesta metodologia, as trações e momentos fletores foram avaliadas através dos modelos analíticos propostos por ARANHA et al. (1997, 2001) e PESCE et al. (1997).

O CAPÍTULO III apresenta os principais pontos relacionados à estatística de longo prazo dos fatores de utilização e sobre critérios para obtenção de condições equivalentes de projeto.

No CAPÍTULO IV, são apresentados três estudos de casos para a obtenção dos fatores de utilização de longo prazo na região do TDP, através dos conceitos apresentados nos Capítulos II e III.

O CAPÍTULO V apresenta os resultados da determinação das condições equivalentes de projeto baseadas nos fatores de utilização de longo prazo.

No CAPÍTULO VI, são apresentadas as principais conclusões deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

Finalmente, foram incluídos na tese três anexos, os quais contem tabelas com os principais resultados dos estudos de casos.

## CAPÍTULO II

### METODOLOGIA ANALÍTICA PARA CÁLCULO DO FATOR DE UTILIZAÇÃO DE CURTO PRAZO

#### II.1 Introdução

A modelagem do comportamento dinâmico de *risers* é uma tarefa bastante complexa, devido ao seu caráter fortemente não-linear, influenciado pelos movimentos da conexão de topo, pelo arrasto devido tanto às ondas quanto às correntes marinhas e pela interação do *riser* com o solo. Usualmente, as análises de *risers* são executadas através de programas de elementos finitos específicos, tais como o ANFLEX (2010), SESAM-DeepC (DNV, 2016) ou OrcaFlex (ORCINA, 2016). Estas análises apresentam custos computacionais bastante elevados, porque são executadas no domínio do tempo, e exigem tempos de simulação elevados para que os parâmetros estatísticos de cada caso possam atingir a estabilidade.

Para a avaliação da resposta de longo prazo de uma estrutura, este elevado custo computacional representa uma grave limitação. Na metodologia da estatística de longo prazo da resposta, a resposta de longo prazo é calculada por integração, o que exige dados de um número muito grande de análises de curto prazo. A ordem de grandeza deste número pode atingir dezenas de milhares, ou até mesmo algumas centenas (SOUSA, 2011).

O cálculo da resposta de longo prazo através de integração direta, utilizando parâmetros da resposta obtidos por simulações numéricas de inúmeras condições de curto prazo utilizando o método dos elementos finitos, é inviável na prática de projetos de *risers* metálicos. Uma alternativa é utilizar procedimentos analíticos simplificados para obter uma estimativa da resposta de longo prazo, e identificar dentre as várias condições de curto prazo analisadas aquelas cuja resposta extrema individual tem um valor equivalente ao da resposta extrema de longo prazo. Estas condições seriam utilizadas para uma análise mais detalhada em elementos finitos no projeto do *riser* investigado. Especificamente para a análise de esforços dinâmicos na região do TDP de *risers*, são poucos trabalhos disponíveis na literatura, resumindo-se praticamente aos desenvolvidos por ARANHA *et*



*al* (1997, 2001) e PESCE *et al* (1997). Estes trabalhos servirão de base para a metodologia desenvolvida nesta tese.

Os modelos desenvolvidos por ARANHA *et al.* (1997, 2001), PESCE *et al.* (1997) são bastante complexos, mas permitem a avaliação tanto de trações quanto de momentos fletores no plano do *riser* para a região do TDZ. Os momentos fora do plano e a torção são desprezados, visto que os momentos fora do plano tendem a apresentar pouca influência no comportamento dinâmico (exceto em estados de mar muito severos, com ocorrência de flambagem), e a torção representa um critério de falha significativo apenas para umbilicais e *risers* de pequenos diâmetros. Em resumo, o modelo proposto por estes autores considera a tração como dependente das propriedades estruturais do *riser* e dos movimentos impostos pelo flutuante no topo, na direção definida pelo azimute e pelo ângulo de topo do *riser* (direção tangente). Já os momentos fletores na região do TDP dependem da tração e do passeio dinâmico do ponto de contato do *riser* com o solo.

A DNV-OS-F201 (2010) define um critério de verificação para *risers* rígidos baseado num fator de utilização da seção transversal ao longo de todo seu comprimento. Este fator constitui-se numa equação de estado limite que depende dos esforços atuantes (tração e momentos fletores), pressão interna e pressão externa na seção analisada. O critério de aceitação de um projeto é que todas as seções tenham um fator de utilização inferior à unidade.

Os próximos itens deste capítulo apresentam de maneira mais detalhada a implementação do modelo semi-analítico para calcular os fatores de utilização na região do TDP para *risers* em catenária livre para uma condição ambiental de curto prazo. Inicialmente, apresenta-se uma breve descrição sobre dados ambientais, bem como a sua representação através de funções conjuntas de probabilidade. Em seguida, são apresentados alguns aspectos referentes à avaliação de parâmetros estáticos do *riser*, necessários para a avaliação da tração no TDP (modelo de ARANHA *et al.*, 2001), conforme implementado por SOUSA (2011). Finalmente, a partir do item II.6 discute-se o modelo de ARANHA *et al* (1997), utilizado para cálculo de momentos fletores na região do TDP, e a formulação para cálculo dos fatores de utilização e a distribuição de probabilidades dos picos deste parâmetro para uma condição ambiental de curto prazo. A integração de longo prazo é descrita no capítulo seguinte.

## II.2 Modelagem probabilística das ações ambientais

Diversos são os fenômenos ambientais que influenciam na análise e concepção de projetos de estruturas *offshore*, tais como *risers*, linhas de ancoragem e umbilicais conectados a plataformas flutuantes. Porém, sem dúvida, os que mais influenciam nas análises dessas estruturas são os carregamentos devidos às ondas, ao vento e à corrente marinha, conforme ilustrado na Figura II.1.

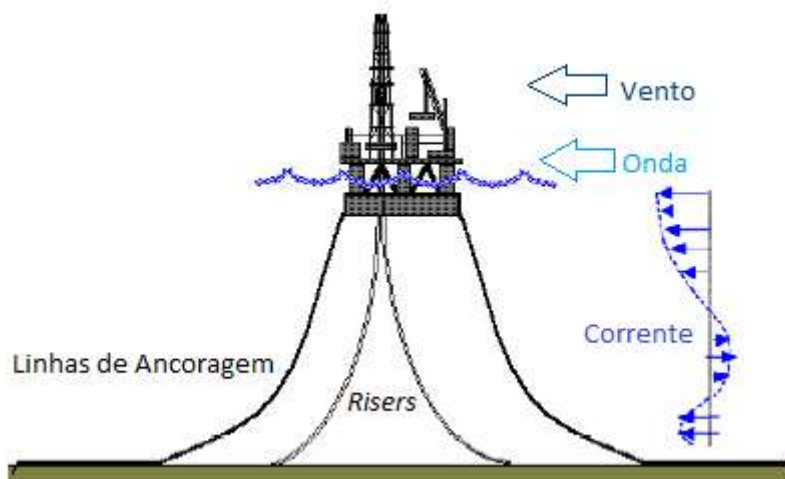


Figura II.1 – Principais cargas atuantes sobre estruturas offshore.

Do ponto de vista estatístico, as ondas, vento e corrente são processos aleatórios (também chamados processos randômicos), já que são fenômenos naturais com variações randômicas no tempo e no espaço. Observa-se que no longo prazo, período de um ou mais anos, estes processos não podem ser considerados estritamente como estacionários, pois a rigor um processo estacionário não tem começo e nem fim (NEWLAND, 1993). No entanto, estes fenômenos podem ser modelados como pseudo-estacionários, ou seja, eles apresentam características de estacionariedade para períodos curtos de tempo (períodos de curto prazo), que na prática se caracterizam por períodos de cerca de 3h de duração. Estes períodos de curto prazo são comumente denominados estados de mar.

Conforme exposto, dentre outros, por SOUSA (2005), no curto prazo as variações temporais aleatórias das ondas e do vento podem ser caracterizadas por funções de densidades espectrais dependentes de parâmetros estatísticos ambientais característicos, que definem as propriedades dos seus respectivos processos aleatórios.

As ondas podem ser classificadas em duas categorias: ondas devidas ao mar local (*sea*) (geradas por ventos na região) e ondas devidas ao marulho (*swell*) (ondas geradas em localidades distantes que viajaram até a localização de interesse). A caracterização das ondas em cada estado de mar, tanto para o mar local quanto para o marulho, pode ser feita através de espectros de mar que usualmente dependem de três parâmetros:

- Altura significativa de onda ( $H_s$ );
- Período de pico ou de cruzamento zero associado à  $H_s$  ( $T_p/T_z$ );
- Direção principal de incidência ( $\theta$ ).

Já o vento tem espectro definido pelos parâmetros:

- Velocidade média:  $V_w$ ;
- Direção principal de incidência:  $\theta_w$ .

A corrente marinha é representada através de um perfil com velocidades e direções variáveis ao longo da profundidade. Para um período de curto prazo, um dado perfil é considerado “fixo” durante aquele período de tempo. De uma forma simplificada, pode-se associar o perfil de corrente à velocidade da corrente superficial e sua direção de propagação e, assim, a corrente no curto prazo pode ser representada pelos parâmetros:

- Velocidade superficial:  $V_c$ ;
- Direção principal de propagação:  $\theta_c$ .

Desta forma, do ponto de vista estatístico, os parâmetros anteriores podem ser agrupados em um vetor  $\mathbf{S}$  (que pode ser tão grande quanto maior seja a quantidade de parâmetros ambientais), utilizado para descrever o conjunto de parâmetros ambientais de curto prazo, dado por (SOUSA, 2011):

$$\mathbf{S} = \{H_{S_{SW}}, T_{P_{SW}}, \theta_{SW}, H_{S_{SS}}, T_{P_{SS}}, \theta_{SS}, V_w, \theta_w, V_c, \theta_c\}^T \quad (\text{II-1})$$

onde:

- $H_{S_{SW}}$  altura significativa de onda do mar local (*sea*);
- $T_{P_{SW}}$  período de pico do mar local (*sea*);

$\theta_{SW}$	direção de incidência do mar local ( <i>sea</i> );
$H_{S_{SS}}$	altura significativa de onda do mar de marulho ( <i>swell</i> );
$T_{P_{SS}}$	período de pico do mar de marulho ( <i>swell</i> );
$\theta_{SS}$	direção de incidência do mar de marulho ( <i>swell</i> ).

e os parâmetros  $V_w, \theta_w, V_c$  e  $\theta_c$  representam, conforme já mencionado, a velocidade e a direção de incidência do vento e a velocidade e a direção de propagação da corrente, respectivamente.

A descrição estatística do comportamento dos parâmetros ambientais de curto prazo numa dada locação pode ser realizada a partir de campanhas de medição (*in-situ* ou via satélite) ou da utilização de modelos numéricos baseados num grande conjunto de dados históricos (BARLTROP, 1998), onde para cada período de curto prazo são obtidos valores para os parâmetros ambientais descritos no vetor  $\mathbf{S}$ . Esta caracterização de dados ambientais é ilustrada graficamente na Figura II.2.

Para análise e projeto de estruturas marinhas, o conjunto de dados apresentados na Figura II.2 é utilizado para o ajuste e definição de uma distribuição de probabilidade conjunta que represente o comportamento estatístico destes dados. Esta distribuição é definida por  $f_s(\mathbf{s})$ , onde  $\mathbf{S} = \mathbf{s}$  significa uma realização do vetor de parâmetros ambientais.

SAGRILO et al. (2008, 2011a) apresentam uma distribuição conjunta de todos os parâmetros ambientais de onda, vento e corrente, tomando como referência um conjunto de dados simultâneos coletados em uma campanha de medição numa região da Bacia de Campos. Os autores utilizam um procedimento de transformação de variáveis (Transformada de Nataf), que permite levar em conta todas as dependências estatísticas entre os parâmetros ambientais de onda, vento e corrente, incluindo intensidades (variáveis lineares) e direções (variáveis angulares). O modelo usa apenas as distribuições marginais de cada variável considerada e os coeficientes de correlação entre elas.

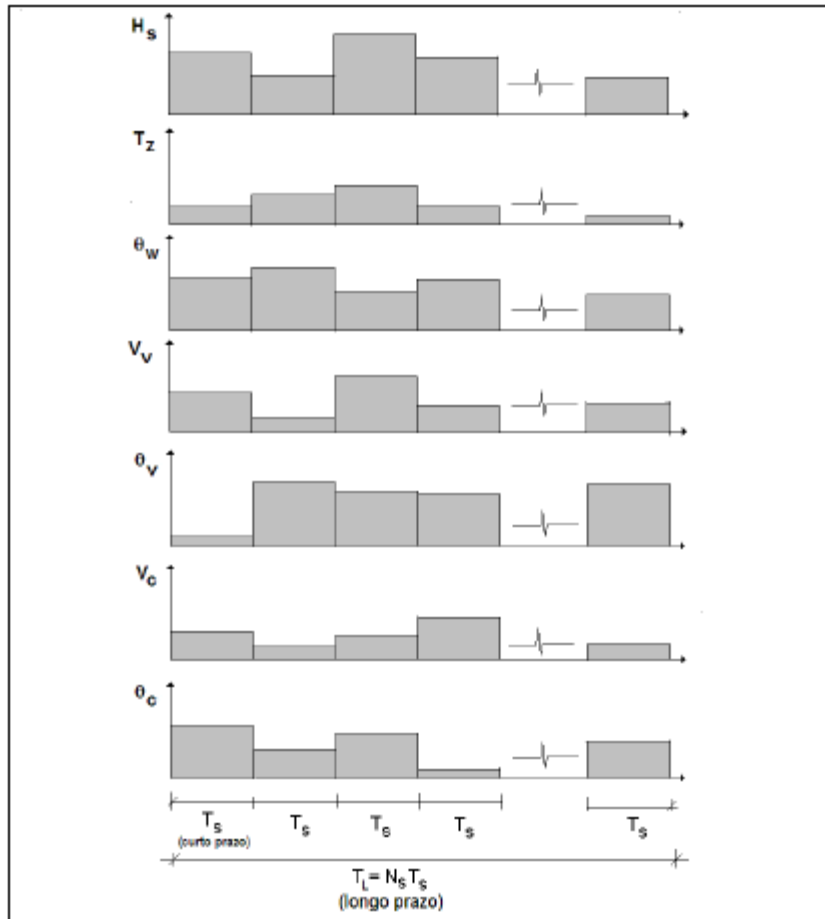


Figura II.2 – Caracterização de curto e longo prazo dos parâmetros ambientais SAGRILO, (2011b).

No entanto, na prática é muito difícil estabelecer uma função que descreva conjuntamente todos os parâmetros do vetor  $\mathbf{S}$ . Por esta razão, é usual assumir algumas hipóteses simplificadoras tais como as apresentadas no trabalho de BITNER-GREGERSEN e HAVER (1991) que sugerem, para uma localização no Mar do Norte, uma distribuição conjunta em que as direções das cargas ambientais são representadas por oito quadrantes de quarenta e cinco graus cada, aceitando que existe sempre colinearidade entre onda local, vento e corrente marinha.

Já que os exemplos analisados nesta tese são de caráter acadêmico, para a geração dos estados de mar de curto prazo foram assumidas as hipóteses simplificadoras propostas por BITNER- GREGERSEN e HAVER (1991). Assim, esta geração foi baseada numa distribuição conjunta de dois parâmetros ambientais ( $H_s$ ,  $T_z$ ) ou ( $H_s$ ,  $T_p$ ) descrita no item IV.2.

### **II.3 Visão geral da metodologia analítica para avaliar os fatores de utilização de curto e longo prazo e condições equivalentes de projeto**

No trabalho de doutorado, SOUSA (2011) utiliza um método analítico com o objetivo de definir condições equivalentes de projeto, baseadas na estatística de longo prazo da tração no topo para *risers* em catenária. Este trabalho serviu como ponto de partida para o modelo semi-analítico proposto nesta tese. O modelo proposto nesta tese, conforme mostrado esquematicamente na Figura II.3, permite avaliar os fatores de utilização de longo prazo na região do TDP para *risers* em catenária, e após a avaliação desses fatores, são calculadas as condições ambientais equivalentes de projeto baseadas nessa resposta. Detalhes sobre a estatística de longo prazo e condições ambientais equivalentes serão apresentados no CAPÍTULO III.

Na mesma Figura II.3, é possível observar que para avaliar a resposta de curto prazo de cada *riser* a cada condição ambiental é necessário gerar séries temporais de movimentos no topo do *riser* e, a partir daí, gerar as séries de trações e momentos fletores para análises aleatórias. O pós-processamento dessas séries temporais vai gerar fatores de utilização de curto prazo segundo a norma DNV-OS-F201 (2010).

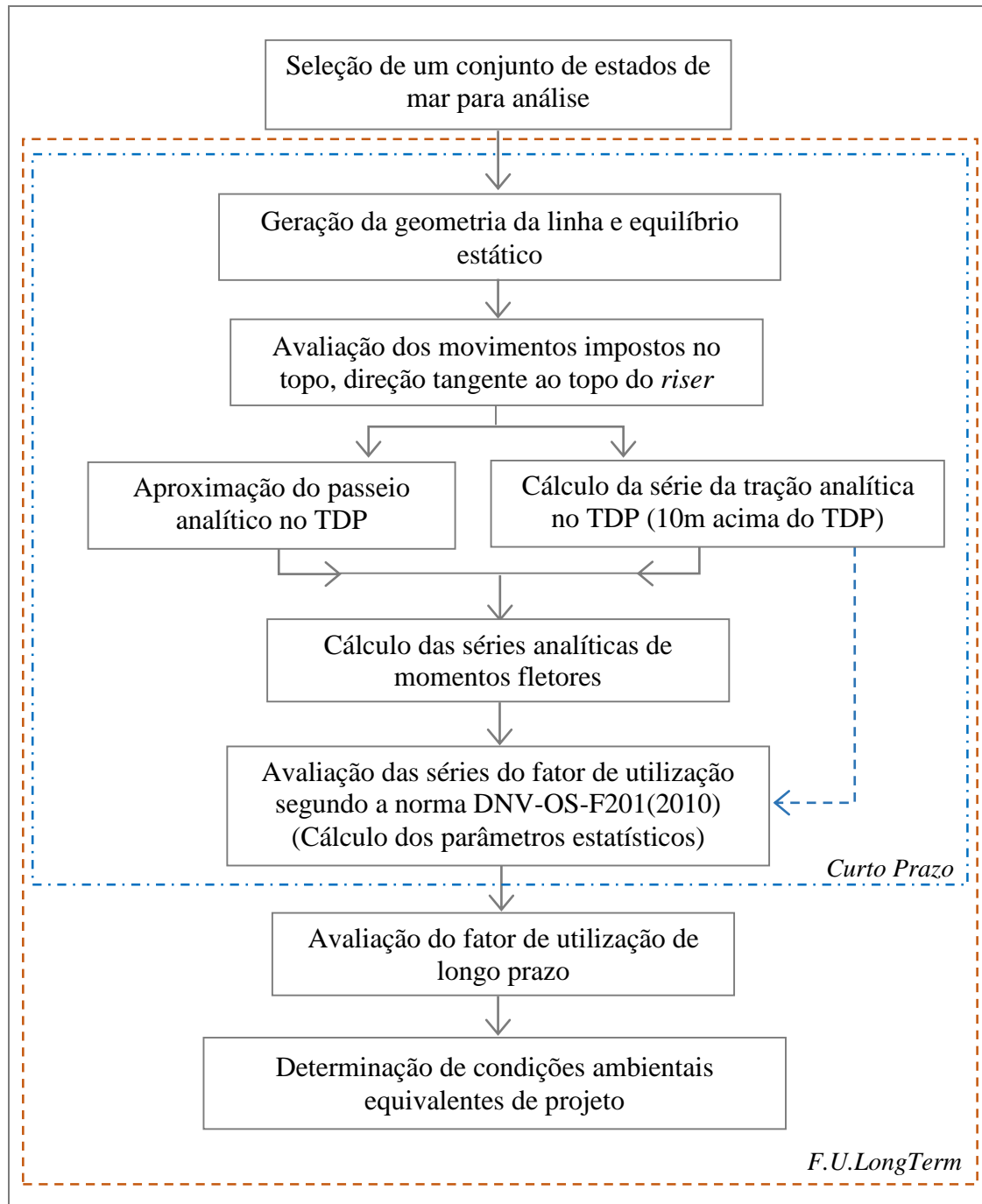


Figura II.3 – Visão resumida da metodologia proposta neste trabalho para avaliar o fator de utilização de longo prazo e condições equivalente de projeto.

Na sequência, deste capítulo serão descritos os principais passos necessários para uma análise de curto prazo, i.e., para um conjunto fixo de parâmetros ambientais  $\mathbf{S} = \mathbf{s}$ , dos fatores de utilização de uma seção de um *riser* na região do TDP. Adicionalmente, observa-se que todos os procedimentos de análise utilizados no desenvolvimento deste trabalho se baseiam em análises desacopladas da análise de movimentos da unidade flutuante.

## II.4 Geração da geometria da linha, equilíbrio estático e posição do momento estático nulo

Na geração da geometria da linha e no cálculo da parcela estática de tração ao longo da mesma, foram utilizadas rotinas de equilíbrio estático baseada numa formulação analítica de catenária extensível descrita por LACERDA (2005, 2011). Porém, o cálculo da geometria através desta formulação não considera a força de arrasto na linha devida ao efeito da corrente marinha, o que leva a um erro na posição do momento estático nulo (TDP estático).

Como um dos objetivos do trabalho é avaliar o fator de utilização de longo prazo, o qual deverá ser calculado ao longo da região no TDP, é importante ter uma boa aproximação da posição do TDP para considerar de forma correta a contribuição dos fatores de utilização de curto prazo de cada estado de mar na integração de longo prazo.

Tendo em vista isto, foi proposta uma forma de considerar o efeito do arrasto gerado pela corrente para acertar a posição do TDP estático, num processo denominado, nesta tese, “catenária corrigida”. Este processo, conforme mostrado esquematicamente na Figura II.4, começa com a geração da geometria da catenária considerando-se apenas o *offset* estático associado ao caso de carregamento e o peso submerso da linha. Após a geração da geometria, obtém-se a força de arrasto devido à corrente ao longo da linha a partir da seguinte expressão derivada da equação de Morison (CHAKRABARTI, 1987);

$$F_{X_i}(z_i) = \frac{1}{2} CD \cdot \rho_a \cdot D_{ext} \cdot dx_s \cdot vc_x(z_i) \cdot |vc_x(z_i)| \cdot \cos \alpha - \frac{1}{2} CD \cdot \rho_a \cdot D_{ext} \cdot dx_s \cdot vc_z(z_i) \cdot |vc_z(z_i)| \cdot \sin \alpha \quad (\text{II-2})$$

onde

$CD$	coeficiente de arrasto longitudinal;
$\rho_a$	massa específica da água;
$D_{ext}$	diâmetro externo do <i>riser</i> ;
$dx_s$	comprimento do elemento infinitesimal;
$vc_x(z_i)$	velocidade da corrente no plano longitudinal da linha;



$vc_z(z_i)$	velocidade da corrente na direção transversal da linha;
$z_i$	elevação em relação ao fundo do mar do elemento $i$ ;
$\alpha$	ângulo que define a inclinação do elemento do comprimento $dx_s$ .

Observando que o momento fletor do TDP deve ser nulo, pode-se obter o valor estimado da força de corrente no topo do *riser* na direção do plano da linha ( $X_L$ , vide Figura II.7) através de:

$$F_{CX_L} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{elem}} F_{X_i}(z_i) \cdot z_i}{Z_T} \quad (II-3)$$

onde  $Z_T$  é a projeção vertical da linha (distância vertical do TDP ao topo).

Finalmente, para gerar uma nova configuração da linha que leva em consideração o efeito do arrasto e gerar a posição corrigida do TDP estático, a força  $F_{CX_L}$  é somada à componente horizontal da força de tração previamente calculada. Esta nova força horizontal é usada para calcular o novo equilíbrio da catenária. Deve-se ressaltar que este processo é usado unicamente para aproximar a posição do TDP estático, visto que os demais parâmetros da catenária serão extraídos da configuração inicial.

Para avaliar a eficácia do processo “catenária corrigida” foram realizadas trinta análises. Os resultados destas análises foram comparados com os obtidos através de análises estáticas usando elementos finitos (FEM). A estrutura analisada foi um *riser* de aço em catenária livre de 8” de diâmetro externo e 1” de espessura de parede, conectado a um FPSO com ângulo de topo de 10° e azimute 95°, numa lâmina d’água de 2120m. Para o modelo FEM, foram usados 3518 elementos de pórtico espacial com 6 graus de liberdades por nó (3 translacionais e 3 rotacionais), no total de 12 graus de liberdade por elemento. O comprimento total modelado do *riser* foi igual a duas vezes a lâmina d’água. A plataforma tem azimute de 162° e as coordenadas locais do topo da linha são (44.75, 31.5, 22.57).

Estas trinta análises foram referentes a oito direções de incidência das cargas ambientais (onda, corrente e vento) (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW), tendo sido utilizadas

várias condições ambientais (ondas, correntes e *offsets* alinhados), procurando-se cobrir a faixa média dos *offsets* para uma plataforma tipo FPSO.

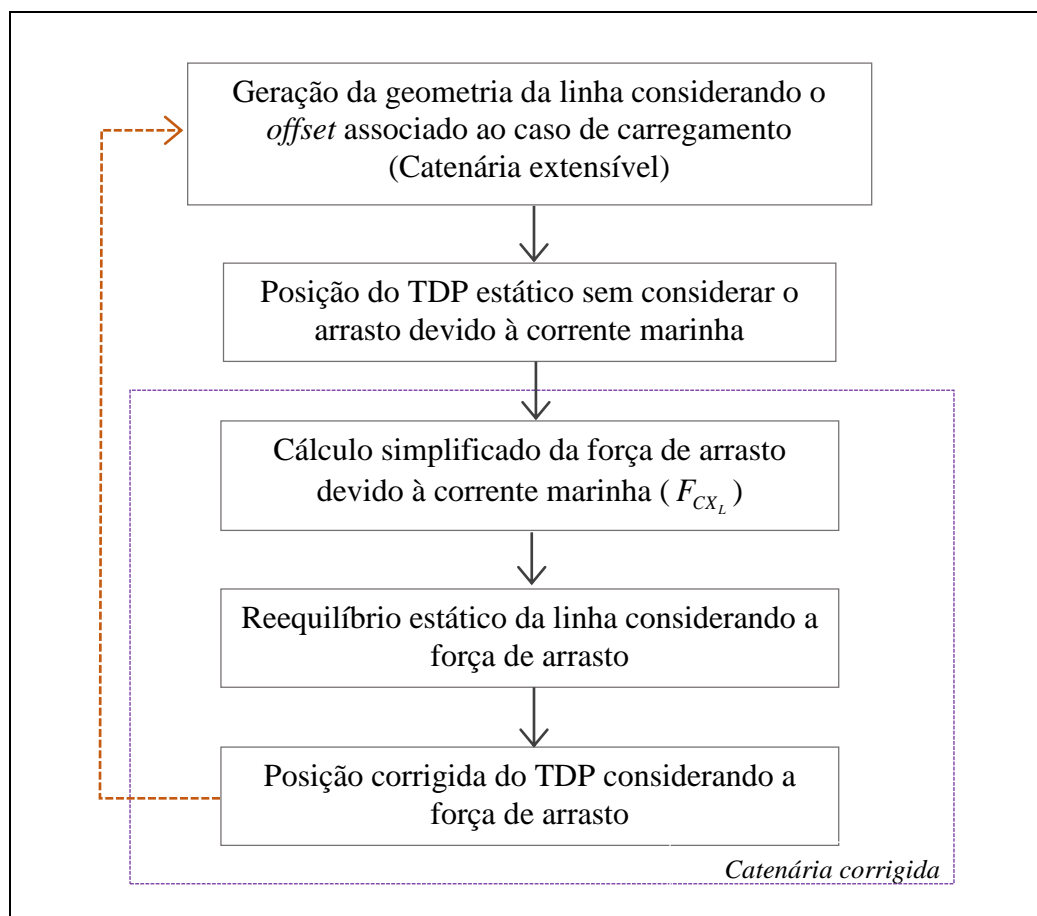


Figura II.4 – Esquema geral para avaliar a posição do TDP considerando o arrasto gerado pela corrente marinha.

A Figura II.5 mostra uma comparação da posição do TDP estático considerando ou não a força devida ao arrasto obtidas das trinta análises com ambos os modelos. Pode-se observar que a posição do TDP obtida com a “catenária corrigida” apresenta boa aproximação em relação à posição do TDP calculada através de um modelo elaborado em elementos finitos. Ainda na mesma figura, é possível observar diferenças significativas (acima de 30m), entre a posição do TDP calculada sem considerar a força de arrasto e o modelo FEM.

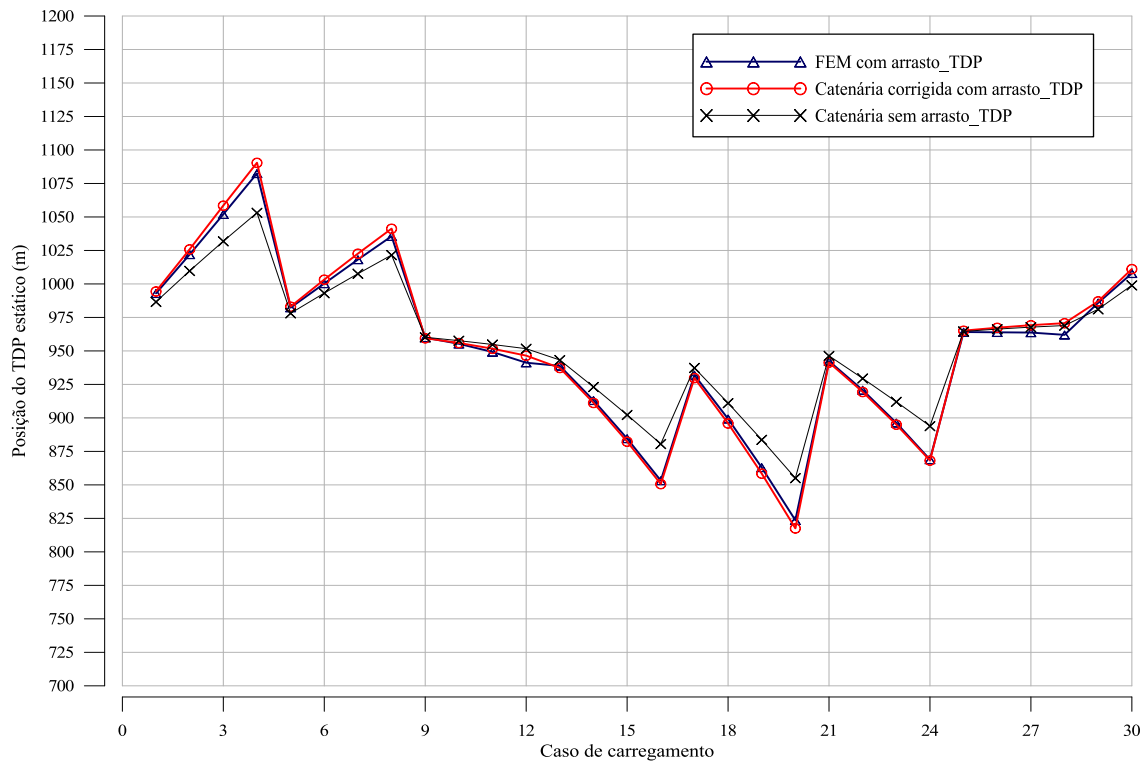


Figura II.5 – Comparação da posição do TDP estático considerando ou não o arrasto da corrente marinha.

## II.5 Movimentos na direção definida pelo ângulo de topo do riser

Segundo a teoria de onda de Airy (CHAKRABARTI, 1987), uma onda irregular pode ser representada pela superposição de uma grande quantidade de ondas regulares, dada pela expressão.

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cos(k_i x - \omega_i t - \phi_i) \quad (\text{II-4})$$

onde

- $t$  tempo;
- $\eta$  elevação da superfície do mar;
- $A_i$  amplitudes das ondas regulares individuais;
- $\omega_i$  frequências das ondas individuais;
- $k_i x$  número da onda;
- $\phi_i$  fase da onda;
- $n$  número de ondas utilizadas na representação do espectro de mar.

As amplitudes das ondas individuais são calculadas diretamente a partir do espectro utilizado para representar as elevações do mar. A escolha do espectro de mar é função das observações do comportamento das ondas através de medições realizadas *in situ*. Duas das formulações de espectros mais conhecidas são o espectro de Pierson-Moskowitz de dois parâmetros ou ISSC (*International Ship and Offshore Structures Congress*) (FALTINSEN, 1990) descrito pela Equação (II-5), e o espectro de JONSWAP dado pela Equação (II-6) (*Joint North Sea Wave Project* – HASSELMAN, 1973 *apud* CHAKRABARTI, 1987). No presente trabalho, foram implementados ambos os espectros; o espectro de Pierson-Moskowitz foi empregado para os estudos de casos 1 e 3 (vide CAPÍTULO IV), e o espectro de JONSWAP para o estudo de caso 2 (vide CAPÍTULO IV).

$$S_{\eta}(\omega) = \frac{4\pi^3 H_s^2}{\omega^5 T_z^4} \exp\left(\frac{16\pi^3}{\omega^4 T_z^4}\right) \quad (\text{II-5})$$

$$S_{\eta}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left[-1.25\left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right] \cdot \gamma^{\exp\left[\frac{-(\omega-\omega_p)^2}{2\tau^2\omega_p^2}\right]} \quad (\text{II-6})$$

onde

$$\alpha = 5.058 \cdot \frac{H_s^2}{T_p^4} \cdot (1 - 0.287 \cdot \ln(\gamma))$$

$$\gamma = \exp\left(5.75 - 1.15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}\right)$$

onde

- $H_s$  altura significativa de onda;
- $T_z$  período de cruzamento zero;
- $T_p$  período de pico;
- $g$  aceleração da gravidade;
- $\omega$  frequência angular;
- $\omega_p$  frequência angular de picos;
- $\gamma$  parâmetro de forma ou de pico;
- $\tau$  parâmetro de largura de banda ( $\tau = 0.07$  para  $\omega \leq \omega_p$ ,  $\tau = 0.09$  para  $\omega > \omega_p$ ).

Assim, as amplitudes das ondas individuais são definidas por

$$A_i = \sqrt{2S_i \Delta\omega} \quad (\text{II-7})$$

onde

$S_i$  espectro de mar avaliado na frequência  $\omega_i$ ;

$\Delta\omega$  intervalo de frequências utilizado na discretização do espectro.

O movimento da unidade flutuante no ponto de conexão do *riser* é determinado considerando a excitação de onda e o comportamento dinâmico da unidade flutuante, caracterizado através de funções de transferência de primeira ordem denominadas RAOs (*Response Amplitude Operator*) de movimentos os quais são associados a cada grau de liberdade da plataforma flutuante.

Os RAOs fornecem, para cada direção de incidência de onda, as amplitudes e fases dos movimentos da unidade flutuante para ondas incidentes considerando amplitude da onda unitária, sendo estes movimentos expressos em relação ao sistema de referência local da unidade (definido pelos eixos  $X_{\text{FLUT}}$  e  $Y_{\text{FLUT}}$  na Figura II.7 – SOUSA, 2011). Desta forma, o espectro de movimentos no ponto de conexão do *riser* na unidade flutuante para a frequência  $\omega_i$  e o grau de liberdade  $j$  é dado pela expressão:

$$S_{i,j}^{mov} = S_i (A_{i,j}^{RAO})^2 = \frac{A_i^2}{2\Delta\omega} (A_{i,j}^{RAO})^2 \quad (\text{II-8})$$

onde

$S_{i,j}^{mov}$  espectro de movimento no ponto de conexão do *riser*, para a frequência  $\omega_i$  e grau de liberdade  $j$ ;

$A_{i,j}^{RAO}$  amplitude do RAO transferido para o ponto de conexão do *riser*, para a frequência  $\omega_i$  e grau de liberdade  $j$ , respeitando a direção de propagação da onda em relação à plataforma;

$j$  1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*), 6 (*yaw*) (vide Figura II.6).

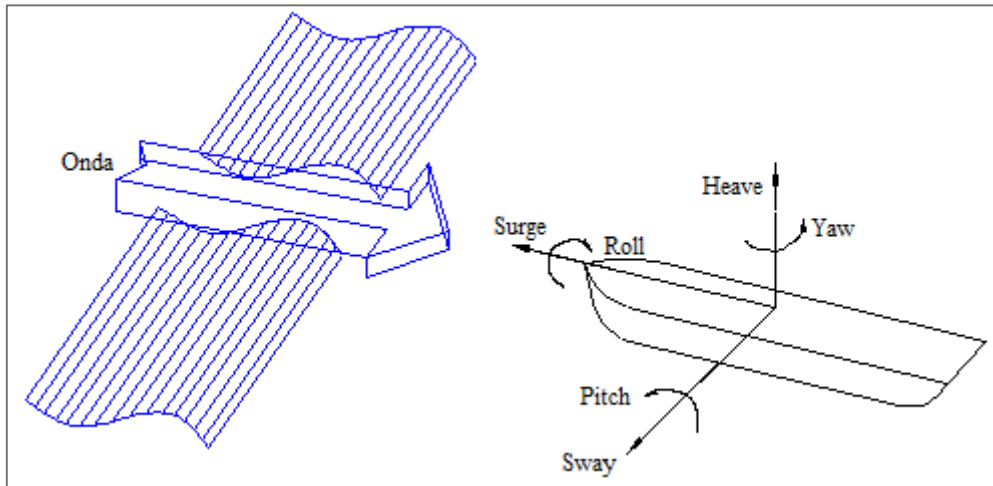


Figura II.6 – Graus de liberdade da unidade flutuante.

Já a série temporal de movimentos é dada pela expressão:

$$Mov_j(t) = \sum_{i=1}^n \sqrt{2S_{i,j}^{mov} \Delta\omega} \cos(k_i x - \omega_i t + \phi_i - \phi_{i,j}^{RAO}) \quad (II-9)$$

onde  $\phi_{i,j}^{RAO}$  representa a fase do RAO da unidade flutuante, transferido para o ponto de conexão do riser, para o grau de liberdade  $j$  e para a frequência  $\omega_i$ .

Conforme mencionado, estes movimentos estão definidos para um sistema de referência solidário à unidade flutuante, doravante denominado sistema de referência (1). Entretanto, como será mostrado no próximo item, para se calcular trações dinâmicas ao longo do riser é necessário utilizar movimentos na direção definida pelo ângulo de topo no plano do riser. Para tanto, é necessário definir dois sistemas de referência auxiliares (SOUSA, 2011):

- Sistema (2): definido pelo plano da linha ( $X_L, Y_L, Z_L$ ), que forma um ângulo  $\theta$  com o sistema (1) – já definido na Figura II.7
- Sistema (3): definido pelo ângulo de topo  $\phi_T$  da linha ( $X'_L, Y'_L, Z'_L$ ) Figura II.8.

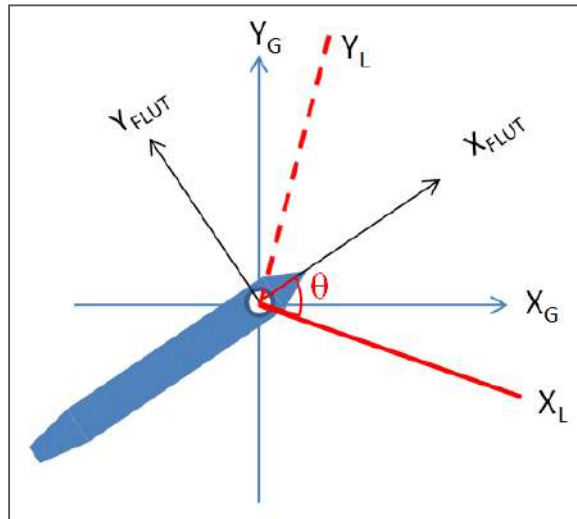


Figura II.7 – Sistemas de referência global, do flutuante e do plano da linha ( $X_L$  coincide com a projeção horizontal da linha) (SOUSA, 2011).

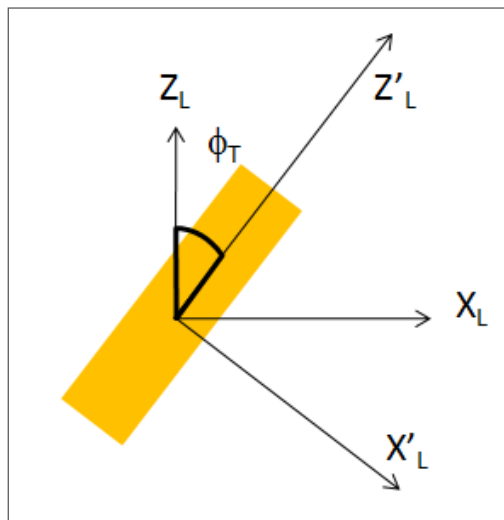


Figura II.8 – Sistemas de referência local do elemento, considerando  $Z'_L$  o eixo tangente (SOUSA, 2011).

A transferência de movimentos no domínio do tempo do sistema de referência (1) para o sistema (2) pode ser feita através das equações:

$$\begin{aligned}
 x_L(t) &= x_{FLUT}(t) \cdot \cos \theta - y_{FLUT}(t) \cdot \text{sen } \theta \\
 y_L(t) &= x_{FLUT}(t) \cdot \text{sen } \theta + y_{FLUT}(t) \cdot \cos \theta \\
 z_L(t) &= z_{FLUT}(t)
 \end{aligned}
 \tag{II-10}$$

A transferência de movimentos do sistema (2) para o sistema (3) pode ser feita pelas equações:

$$\begin{aligned}
x'_L(t) &= x_L(t) \cdot \cos \phi_T - z_L(t) \cdot \sin \phi_T \\
y'_L(t) &= y_L(t) \\
U(t) &= x_L(t) \sin \phi_T + z_L(t) \cos \phi_T
\end{aligned} \tag{II-11}$$

onde  $U(t)$  representa o movimento na direção  $z'_L$ . Desta forma, o movimento  $U(t)$  (na direção tangente à linha no topo), expresso em função de movimentos fornecidos no sistema de referência (1), é dado por:

$$U(t) = x_{FLUT}(t) \cdot \cos \theta \cdot \sin \phi_T - y_{FLUT}(t) \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi_T + z_{FLUT}(t) \cdot \cos \phi_T \tag{II-12}$$

Outra maneira de definir o movimento  $U(t)$  é através da sua representação no domínio da frequência. Utilizando a representação real / imaginária para os RAOs dos movimentos de *surge* ( $j=1$ ), *sway* ( $j=2$ ) e *heave* ( $j=3$ ) transferidos do centro de movimentos da plataforma para o ponto de conexão do *riser*, i.e,

$$H_{i,j} = A_{i,j}^{RAO} e^{i\phi_{i,j}^{RAO}} = A_{i,j}^{RAO} \{ \cos[\phi_{i,j}^{RAO}] + i \sin[\phi_{i,j}^{RAO}] \} \quad , \quad j = 1, 3 \tag{II-13}$$

pode-se definir, segundo NAESS (1988), o RAO do movimento na direção tangente ao topo do *riser* como:

$$\overline{H}_i^{z'} = A_{i,3}^{RAO} e^{i\phi_{i,3}^{RAO}} \cos \phi_T + A_{i,1}^{RAO} e^{i\phi_{i,1}^{RAO}} \cos \theta \cdot \sin \phi_T + A_{i,2}^{RAO} e^{i\phi_{i,2}^{RAO}} \sin \theta \cdot \sin \phi_T \tag{II-14}$$

e, adicionalmente,

$$A_i^U = \left| \overline{H}_i^{z'} \right| \tag{II-15}$$

$$\psi_i^U = a \tan \left[ \frac{\text{Im}(\overline{H}_i^{z'})}{\text{Re}(\overline{H}_i^{z'})} \right] \tag{II-16}$$

sendo  $A_i^U$  e  $\psi_i^U$  a amplitude e a fase do RAO de movimentos na direção tangente para a frequência  $\omega_i$ , respectivamente.

Assim as Equações (II-15) e (II-16) representam o RAO do movimento tangente no topo do *riser* em função dos RAOs dos movimentos de translação no topo da linha, no



sistema de referência local do flutuante. Com este resultado é possível definir o espectro de movimentos na direção tangente ( $S_{mov_i}^U$ ) para a frequência  $\omega_i$  como:

$$S_{mov_i}^U = S_i (A_i^U)^2 = \frac{(A_i)^2}{2\Delta\omega} (A_i^U)^2 \quad (\text{II-17})$$

e o movimento na direção tangente definida pelo ângulo de topo através de uma expressão análoga à Equação (II-12), só que referenciada à direção tangente:

$$U(t) = \sum_{i=1}^n \sqrt{2S_{mov_i}^U \Delta\omega} \cos(k_i x - \omega_i t + \phi_i - \psi_i^U) = \sum_{i=1}^n U_i \cos(k_i x - \omega_i t + \phi_i - \psi_i^U) \quad (\text{II-18})$$

Para permitir a utilização da formulação para cálculo da tração dinâmica, apresentada no item II.6 a seguir, é necessário reescrever a Equação (II-18), eliminando o somatório em relação às frequências (ARANHA *et al.*, 2001 (c)). Para tanto, utiliza-se a definição de momentos espectrais de ordem  $k$  (NEWLAND, 1993):

$$m_{k,U} = \int_0^{\infty} \omega^k S_{mov}^U d\omega \quad (\text{II-19})$$

e, assim, calculam-se o desvio padrão do movimento e sua frequência média como:

$$\sigma_U = \sqrt{m_{0,U}} \quad (\text{II-20})$$

$$\omega_U = \frac{m_{1,U}}{m_{0,U}} \quad (\text{II-21})$$

Definindo agora  $V(t)$  como:

$$V(t) = \sum_{i=1}^n U_i \text{sen}(k_i x - \omega_i t + \phi_i - \psi_i^U) \quad (\text{II-22})$$

e as frequências auxiliares  $\Omega_i = \omega_i - \omega_U$ , podemos definir as funções auxiliares  $U_S(t)$  e  $V_S(t)$ :

$$\begin{aligned}
U_S(t) &= \sum_{i=1}^n U_i \cos(k_i x - \Omega_i t + \phi_i - \psi_i^U) \\
V_S(t) &= \sum_{i=1}^n U_i \sin(k_i x - \Omega_i t + \phi_i - \psi_i^U)
\end{aligned}
\tag{II-23}$$

As expressões  $U(t)$ ,  $V(t)$ ,  $U_S(t)$  e  $V_S(t)$  relacionam-se pelas expressões:

$$U(t) = \cos(\omega_U t) U_S(t) - \sin(\omega_U t) V_S(t) \tag{II-24}$$

$$V(t) = \cos(\omega_U t) V_S(t) - \sin(\omega_U t) U_S(t)$$

e, de acordo com as equações (II-18), (II-21) e (II-22), tem-se a envoltória de movimentos:

$$U_0(t) = \sqrt{U^2(t) + V^2(t)} = \sqrt{U_S^2(t) + V_S^2(t)} \tag{II-25}$$

Assim, o movimento  $U(t)$  pode ser expresso pela Equação (II-27), a partir da envoltória  $U_0(t)$ , se definirmos uma fase  $\varphi(t)$  como mostrado na Equação (II-26), eliminando a dependência do somatório de frequências.

$$\varphi(t) = \text{asen}\left(\frac{V_S(t)}{U_0(t)}\right) = \text{acos}\left(\frac{U_S(t)}{U_0(t)}\right) \tag{II-26}$$

$$U(t) = U_0(t) \cos[\varphi(t) - \omega_U t] \tag{II-27}$$

## II.6 Séries temporais de tração dinâmica na TDZ

O modelo estudado neste trabalho para o cálculo analítico da tração no TDP do *riser* foi o de ARANHA *et al.* (1997, 2001(a)). Estes autores desenvolveram uma formulação analítica completa que permite calcular a tração ao longo de um *riser* em catenária livre. Neste modelo, utiliza-se um sistema de referência definido no plano e ao longo do comprimento da catenária, conforme a Figura II.9. Por exemplo, quando o objetivo é a avaliação da tração no topo, toma-se como referência a conexão do *riser* na

plataforma, definida pela coordenada  $x_s = l$ , onde a coordenada  $x_s$  é medida ao longo do comprimento do *riser*, portanto,  $l$  representa o comprimento suspenso do *riser*.

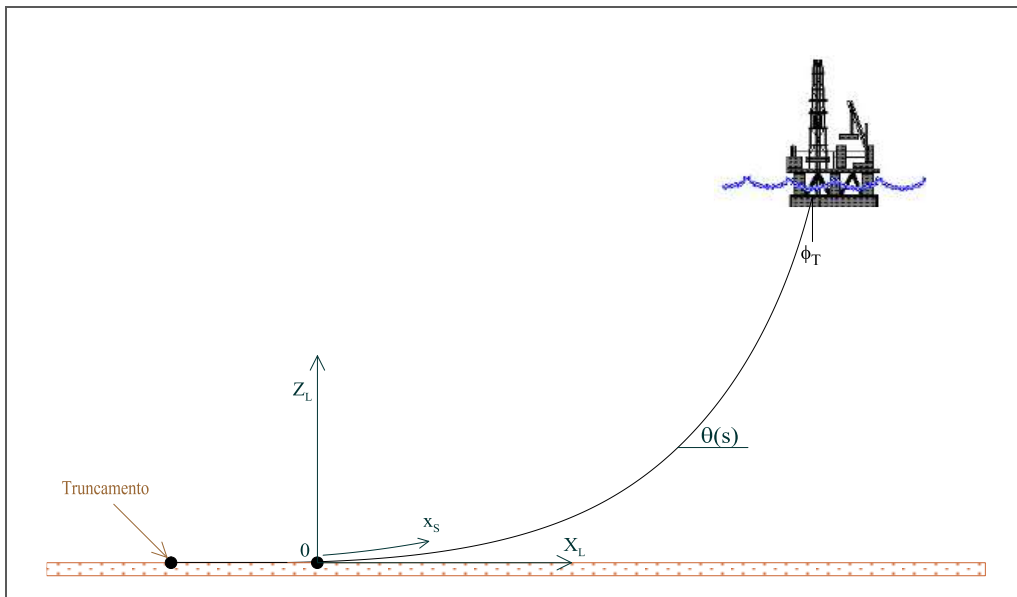


Figura II.9 – Pontos notáveis da definição do riser em catenária.

Assim, a implementação da formulação proposta por ARANHA *et al.* (2001 (a)) tem início pela determinação das propriedades médias ou equivalentes do *riser*. Sendo:

- $x_s$  sistema de referência que acompanha o comprimento do *riser*, sendo o origem no TDP estático (Figura II.9);
- $q(x_s)$  peso por metro de cada trecho ao longo do comprimento do *riser*;
- $EA(x_s)$  rigidez axial de cada trecho ao longo do comprimento do *riser*;
- $\rho$  massa específica do *riser*, incluindo o fluido interno;
- $T_F$  tração funcional, isto é, tração no topo devido à ação do peso próprio e do empuxo;
- $T_S$  tração estática na posição deformada após um dado deslocamento do topo, quando o deslocamento é nulo  $T_S = T_F$ .

O peso por unidade de comprimento do *riser* e a sua rigidez axial equivalentes podem ser calculados pelas equações seguintes:

$$q = \frac{1}{l} \int_0^l q(x_s) dx_s \quad (\text{II-28})$$

$$\frac{1}{EA} = \frac{1}{l} \int_0^l \frac{1}{EA(x_s)} dx_s \quad (\text{II-29})$$

Antes de continuar, é necessário a definição do parâmetro  $X_1$ , o qual é proporcional à curvatura, e dado por:

$$X_1(x_s) = \frac{d\theta}{dx_s}(x_s) \frac{T_S}{q} \quad (\text{II-30})$$

o que permite a definição de propriedades médias de massa e de massa adicional:

$$m, m_a = \frac{1}{I_2} \frac{1}{l} \int_0^l \{m(x_s), m_a(x_s)\} X_1^2(x_s) dx_s \quad (\text{II-31})$$

Sendo que o termo  $I_2$  é calculado pela seguinte expressão (para  $n = 2$ ):

$$I_n = \frac{1}{l} \int_0^l |X_1(x_s)|^n dx_s \quad (\text{II-32})$$

Pode-se ainda definir o diâmetro hidrodinâmico médio para o *riser*:

$$D = \sqrt{\frac{4m_a}{\rho\pi}} \quad (\text{II-33})$$

Quando o *riser* é excitado em frequências elevadas, a linha “congela”, e a tração dinâmica passa a depender também da parte do *riser* que repousa no fundo do mar. Por isso, é necessário definir o comprimento efetivo de *riser* em contato com o solo, o que pode ser feito pela expressão:

$$l' = \text{Mínimo}\left(\Delta l, \frac{T_0}{\mu q_{\text{solo}}}\right) \quad (\text{II-34})$$

onde

$\Delta l$  comprimento do modelo em contato com o solo;

- $T_0$  força horizontal (ou tração no TDP);  
 $\mu$  coeficiente de atrito considerado na modelagem;  
 $q_{solo}$  o peso por metro do trecho de *riser* em contato com o solo.

sendo que  $(T_0 / \mu q_{solo})$  representa o comprimento de *riser* necessário para anular a tração no trecho em contato com o solo.

Na definição dos parâmetros associados ao comportamento dinâmico do *riser*, deve-se inicialmente considerar que no caso das linhas “frouxas”, em que o deslocamento é basicamente compensado por mudanças na geometria da linha, a frequência de vibração da linha é da ordem de grandeza de  $\omega_c$  (dada pela Equação (II-35a)), enquanto no caso de linhas “esticadas”, em que o deslocamento é compensado através de deformações elásticas da linha, a frequência de vibração da linha é da ordem de grandeza de  $\omega_e$ , definida na Eq. (II-35b).

$$\omega_c = \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{T_s}{m + m_a}} \quad (\text{II-35a})$$

$$\omega_e = \frac{\pi}{l + l'} \sqrt{\frac{EA}{m}} \quad (\text{II-35b})$$

A relação entre estes dois comportamentos extremos é proporcional ao parâmetro  $\Lambda^2$ , sendo  $\Lambda$  dado por:

$$\Lambda = \frac{ql}{T_s} \sqrt{I_2 \frac{EA}{T_s} \frac{l}{l + l'}} \quad (\text{II-36})$$

O perfil de correntes projetado no plano do *riser* (definido pelas coordenadas  $(X_L, Z_L)$  – Figura II.9) é dado por:

$$\vec{V}_c(z) = V_c \cdot X_c [z(x_s)] \cdot \vec{i} \quad (\text{II-37})$$

sendo  $V_c$  a velocidade da corrente na superfície e  $X_c [z(x_s)]$  a velocidade de corrente projetada no plano da linha normalizada pelo seu valor tomado na superfície livre. No caso da ausência de corrente, o amortecimento da linha é proporcional a  $I_3$ , dado pela

Equação (II-32), com  $n=3$ ; já no caso de correntes de grande intensidade, a energia dissipada pelo amortecimento passa a ser proporcional à integral  $I_c$ , dada por:

$$I_c = \frac{1}{l} \int_0^l |X_c[z(x_s)] \text{sen}\theta(x_s)| X_1^2(x_s) dx_s \quad (\text{II-38})$$

Conforme ARANHA *et al.* (1997) os coeficientes médios de arrasto para as situações de corrente pouco intensa e muito intensa são dados por:

$$C_{D,0} = \frac{1}{I_3} \frac{1}{l} \int_0^l C_D(x_s) \frac{D(x_s)}{D} |X_1(x_s)|^3 dx_s$$

$$C_{D,c} = \frac{1}{I_c} \frac{1}{l} \int_0^l C_D(x_s) \frac{D(x_s)}{D} |X_c[z(x_s)] \text{sen}\theta(x_s)| X_1^2(x_s) dx_s \quad (\text{II-39})$$

e os coeficientes de amortecimento associados podem ser definidos como:

$$\xi_0 = \frac{8}{3\pi} \frac{2C_{D,0}}{\pi} \frac{\rho\pi D^2}{4(m+m_a)} \frac{T_s}{ql} \frac{I_3}{I_2^2} \frac{\sigma_U}{D}$$

$$\xi_c = \frac{2C_{D,c}}{\pi} \frac{\rho\pi D^2}{4(m+m_a)} \frac{2V_c}{\omega D} \frac{I_c}{I_2} \quad (\text{II-40})$$

onde  $\rho$  é a massa específica do riser, incluindo o fluido interno, e  $\sigma_U$  é o valor quadrático do deslocamento imposto para um movimento harmônico dado por:

$$\sigma_U = \sqrt{\langle U(t) \rangle^2} = \frac{u_0}{\sqrt{2}} \quad (\text{II-41})$$

Segundo ARANHA *et al.* (2001 (c)), a envoltória do movimento  $U_0(t)$  (Equação (II-25)) e a fase  $\varphi(t)$  (Equação (II-26)) variam lentamente ao longo do tempo para processos de banda estreita e, nesse caso, o movimento  $U(t)$  pode ser assumido como aproximadamente harmônico. Definido  $a(t)$  como a envoltória normalizada de  $U(t)$ :

$$a(t) = \frac{U_0(t)}{\sigma_U} \quad (\text{II-42})$$

A formulação desenvolvida por ARANHA *et al.* (2001 (a)) pode ser utilizada para calcular a envoltória da tração dinâmica em qualquer ponto da linha:

$$T^{ENV}(t, x_s) = T_e \tau(t, x_s) \quad (\text{II-43})$$

onde  $T_e$  (tração elástica) e  $\tau(t, x_s)$  (variação dinâmica numa posição  $x_s$ ) podem ser calculadas pelas seguintes expressões: .

$$T_e = EA \frac{\sigma_U}{l+l'} \quad (\text{II-44})$$

$$\tau(t, x_s) = \sqrt{\frac{c_1(x_s)[\sqrt{b^2(\Omega) + 4\xi_0^2 a(t)^2 / \Omega^4} - b(\Omega)]^2 + 2c_2(x_s)[\sqrt{b^2(\Omega) + 4\xi_0^2 a(t)^2 / \Omega^4} - b(\Omega)]}{4\xi_0^2 / \Omega^4}} \quad (\text{II-45})$$

onde  $EA$  é a media da rigidez axial,  $l+l'$  é o comprimento efetivo do riser (i.e. trecho suspenso + comprimento em contato com o solo). As Equações (II-46) a (II-49) são usadas para calcular os demais parâmetros da Equação (II-45):

$$\Omega = \frac{\pi}{\Lambda} \left( \frac{\omega}{\omega_c} \right) \quad (\text{II-46})$$

$$b(\Omega) = \left( \frac{1 - \Omega^2}{\Omega^2} \right)^2 + \xi_c^2 \quad (\text{II-47})$$

$$c_1(x_s) = \left[ 1 - \frac{l}{l+l'} \pi^2 \left( \frac{\omega}{\omega_e} \right)^2 \frac{x_s}{l} \right]^2 \quad (\text{II-48})$$

$$c_2(x_s) = \left[ 1 + \frac{1 - \Omega^2}{\Omega^2} \frac{l}{l+l'} \pi^2 \left( \frac{\omega}{\omega_e} \right)^2 \frac{x_s}{l} \right]^2 + \xi_c^2 c_1(x_s) \quad (\text{II-49})$$

Finamente, a tração dinâmica total é dada por:

$$T_d(t, x_s) = T_e \tau(t, x_s) \cos[\zeta(t) - \omega_U t] \quad (\text{II-50})$$

onde  $\zeta(t)$  representa a fase, dada pela fase do movimento e dependente da estrutura, e  $\omega_U$  representa a frequência central dada por:

$$\omega_U = \frac{m_{1,U}}{m_{0,U}} \quad (\text{II-51})$$

onde  $m_{1,U}$  e  $m_{0,U}$  representam os momentos espectrais definidos pela Equação (II-19).

Uma vez que a tração dinâmica na região do TDP varia muito pouco, optou-se neste trabalho por tomar como valor de referência para toda região do TDP o valor da tração dinâmica num ponto localizado 10m acima do TDP estático do caso em análise,  $x_s = 10m$  nas expressões acima, i.e.

$$T_{d_{TDP}}(t) = T_d(t, x_s = 10m) \quad (\text{II-52})$$

## II.7 Momentos fletores no plano do riser – parcela estática

Segundo ARANHA *et al.* (1997), os momentos fletores dinâmicos na região do TDP dependem dos valores das trações nesta região, da posição instantânea do TDP (passeio) e da curvatura média (estática). Nesta seção, apresenta-se uma formulação para calcular os momentos estáticos, ao passo que no próximo item o conceito será estendido para os momentos fletores dinâmicos.

Partindo da equação da catenária e, portanto, desprezando a influência da rigidez à flexão na definição da configuração do riser, o momento fletor no TDP (ponto 0 na Figura II.9) é dado por:

$$M_0 = M(0) = EI \frac{q}{T_0} \quad (\text{II-53})$$

sendo EI a rigidez flexional da linha,  $q$  a carga distribuída na direção vertical e  $T_0$  o valor da tração no ponto “0”.



Quando se considera a equação da catenária, a curvatura na região do TDZ é descontínua. Ela é dada pela Equação (II-53) à direita do ponto 0, e nula à esquerda. O efeito da rigidez à flexão é o de suavizar esta diferença, o que implica em um deslocamento do TDP para a esquerda na Figura II.9 quando se considera a rigidez à flexão.

Ainda segundo ARANHA *et al.* (1997), um parâmetro chave na definição do comportamento dos momentos fletores estáticos na região do TDP é o “comprimento de flexão”  $\lambda$ :

$$\lambda = \sqrt{\frac{EI}{T_0}} \quad (\text{II-54})$$

que representa exatamente o deslocamento do TDP para a esquerda. Assim, uma boa aproximação para o momento fletor estático na região do TDZ é dada por:

$$M_{est}(x_s) = \frac{1}{2} [1 + \text{sign}(x_s + \lambda)] [1 - e^{-\frac{x_s + \lambda}{\lambda}}] M_0 \quad (\text{II-55})$$

sendo  $M_0$  definido na Equação (II-53).

Deve-se observar que a consideração de corrente nas análises é implicitamente levada em conta em função da alteração do valor da tração no TDP, conforme descrito no item II.4.

## II.8 Séries temporais de momentos fletores no plano do riser – parcela dinâmica

A determinação da parcela dinâmica do momento é mais complexa do que a da parcela estática. Um dos principais motivos é que movimentos dinâmicos muito intensos, em termos de velocidade e aceleração, tendem a deformar a catenária de forma acentuada e a gerar ondas de compressão que se propagam ao longo do comprimento do riser. Neste contexto, ARANHA *et al.* (1997) sugerem o seguinte limite para a velocidade de deslocamento do TDP instantâneo:

$$c_0 = \sqrt{\frac{T_0}{m + m_a}} \quad (\text{II-56})$$

onde  $m$  e  $m_a$ , conforme definido anteriormente, são a massa estrutural e a massa adicionada por comprimento do *riser* e  $T_0$  o valor da tração estática no ponto “0”.

Definindo o comprimento de flexão dinâmico  $\hat{\lambda}$  como:

$$\hat{\lambda}(t, x_s) = \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \frac{\tau(t, x_s)}{T_0}}} \quad (\text{II-57})$$

pode-se utilizar uma expressão análoga a do momento fletor estático (Equação (II-55)) para obter o momento fletor total. Considerando que  $x_0(t)$  é posição instantânea do TDP (descrito a seguir no item II.9), e introduzindo a variável  $\beta$ :

$$\beta(t, x_s) = \frac{\sqrt{1 + \frac{\tau(t, x_s)}{T_0}}}{\lambda} \left[ x_s - x_0(t) + \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \frac{\tau(t, x_s)}{T_0}}} \right] \quad (\text{II-58})$$

o momento fletor instantâneo é então dado pela seguinte expressão:

$$M_{fletor}(t, x_s) = \frac{1}{2} [1 + \text{sign}(\beta(x_s, t))] [1 - e^{-\beta(x_s, t)}] \frac{M_0}{1 + \frac{\tau(t, x_s)}{T_0}} \quad (\text{II-59})$$

É importante ressaltar que tanto a expressão do momento fletor estático quanto a do dinâmico são assintóticas, ou seja, tendem a valores máximos, conforme mostrado na Figura II.10. Na realidade, os momentos fletores atingem um valor máximo e a posição onde ocorre esse valor máximo depende da estrutura. A partir do ponto de máximo, o momento fletor cai, aproximando-se do valor estático definido pela geometria da catenária. A expressão para a avaliação do momento fletor, a partir do ponto de máximo,

representa uma limitação deste trabalho, visto que, para avaliar o fator de utilização de longo prazo é necessário considerar de forma correta a contribuição de todos os fatores de utilização de curto prazo da região do TDP.

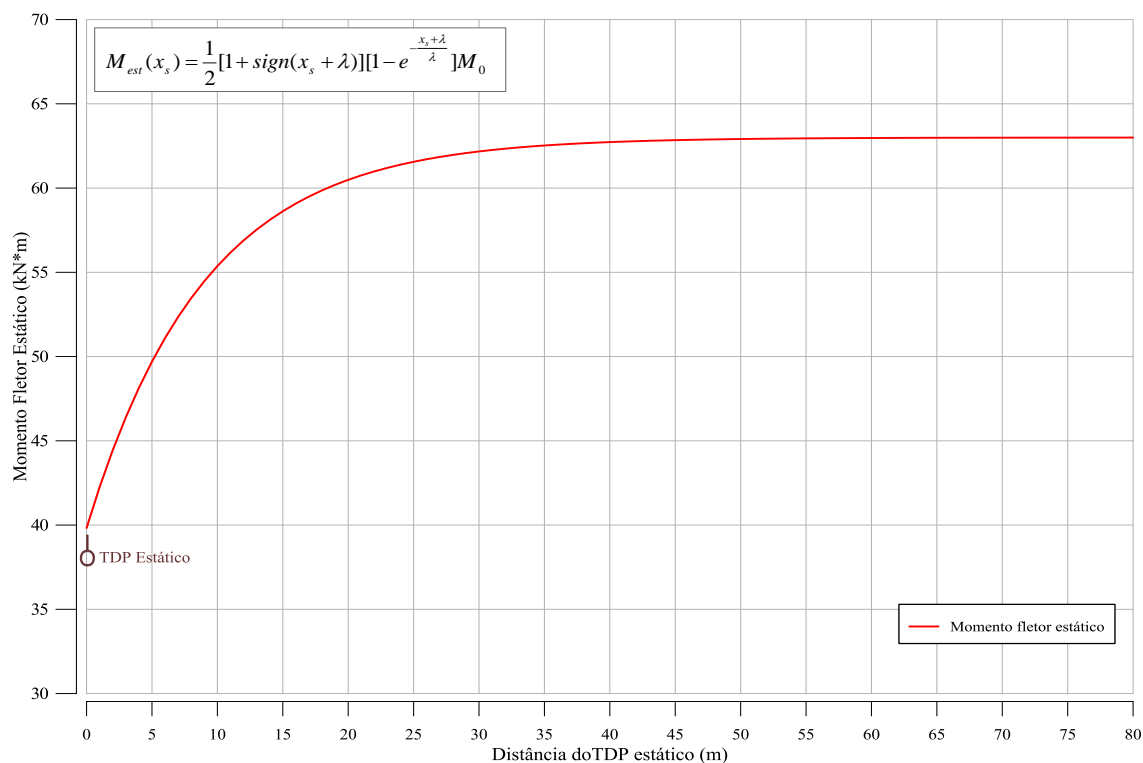


Figura II.10 – Curva do momento fletor estático na região do TDP.

Nesse contexto, é necessário definir: primeiramente, o ponto onde ocorre o momento fletor máximo; e, depois, o ponto onde a parcela dinâmica do momento fletor é nula. A Figura II.11 ilustra graficamente uma visão da localização de ambos os pontos em diversas curvas típicas de envoltórias de máximos do momento fletor dinâmico de um *riser* em catenária. Estas curvas foram obtidas através de um modelo elaborado em elementos finitos considerando diversos casos de carregamentos ambientais.

Ainda na mesma figura, é possível observar que o formato destas curvas segue um padrão semelhante na maioria das vezes. Isto permite estimar um valor médio, tanto para a localização do momento fletor máximo quanto para o ponto onde a parcela dinâmica é nula. Nesta tese, esses valores médios serão aproximados para cada *riser* após o processamento de cinco análises dinâmicas aleatórias, executadas num *software* especializado de elementos finitos. Estas análises, que servem para calibrar alguns parâmetros ao longo do processo de avaliação das respostas de curto prazo, são a principal razão para caracterizar o método como semi-analítico.

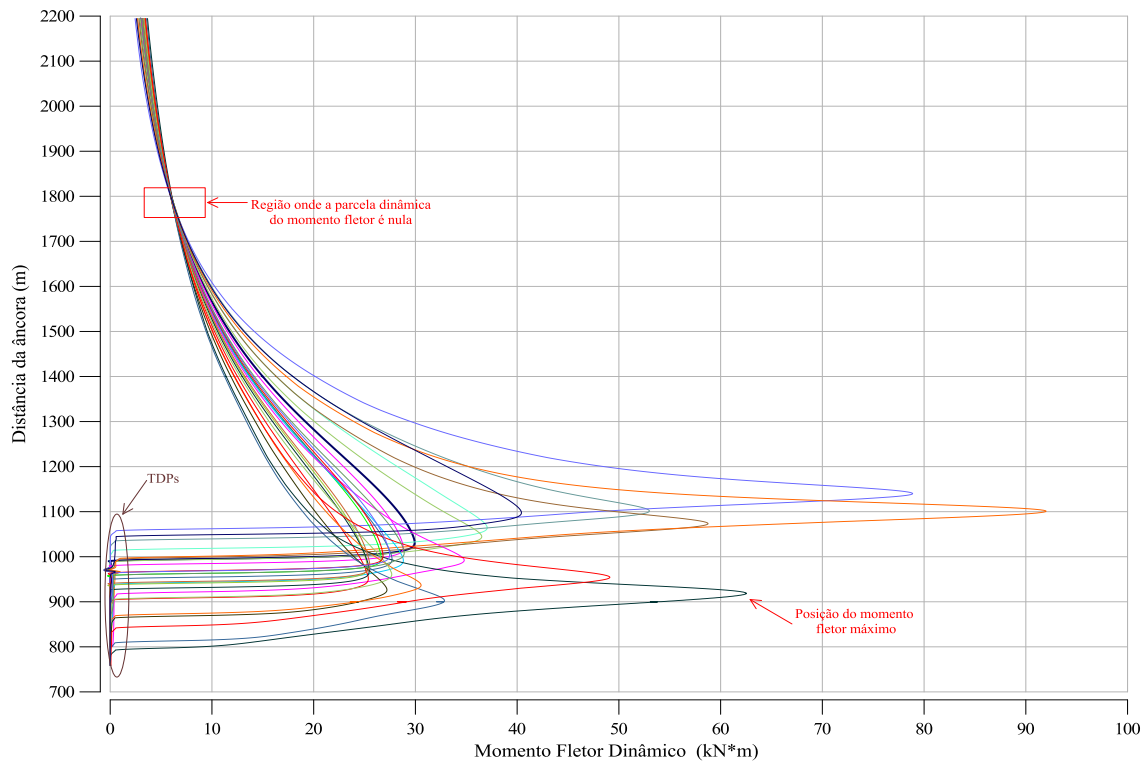


Figura II.11 – Envoltórias de máximos do momento fletor na região do TDP.

Assim, uma vez definidas ambas as posições será realizada uma aproximação da curva de envoltória de máximos do momento fletor entre as duas posições (ambas as localizações são expressas em função do comprimento de flexão, parâmetro  $\lambda$  da Equação (II-54)). Esta aproximação foi realizada através de uma equação de potência da forma  $y = a \cdot x^b$ , calibrada para cada carregamento. Deste modo, quando se normaliza essa equação de potência, viabiliza-se o cálculo de um fator de redução (assumindo 1 (um) na posição do momento fletor máximo e 0 (zero) na posição onde a parcela dinâmica do momento fletor é nula). Esse fator serve para aproximar a parcela dinâmica das séries temporais de momentos fletores entre ambas as posições (posição do momento fletor máximo e posição onde a parcela dinâmica do momento fletor é nula).

A Figura II.12 apresenta uma comparação de envoltórias de máximos do momento fletor obtidos com o modelo FEM e de forma aproximada através da equação de potência. Como pode ser observado, ambas as curvas são muito próximas, com diferenças inferiores a 5% entre elas.

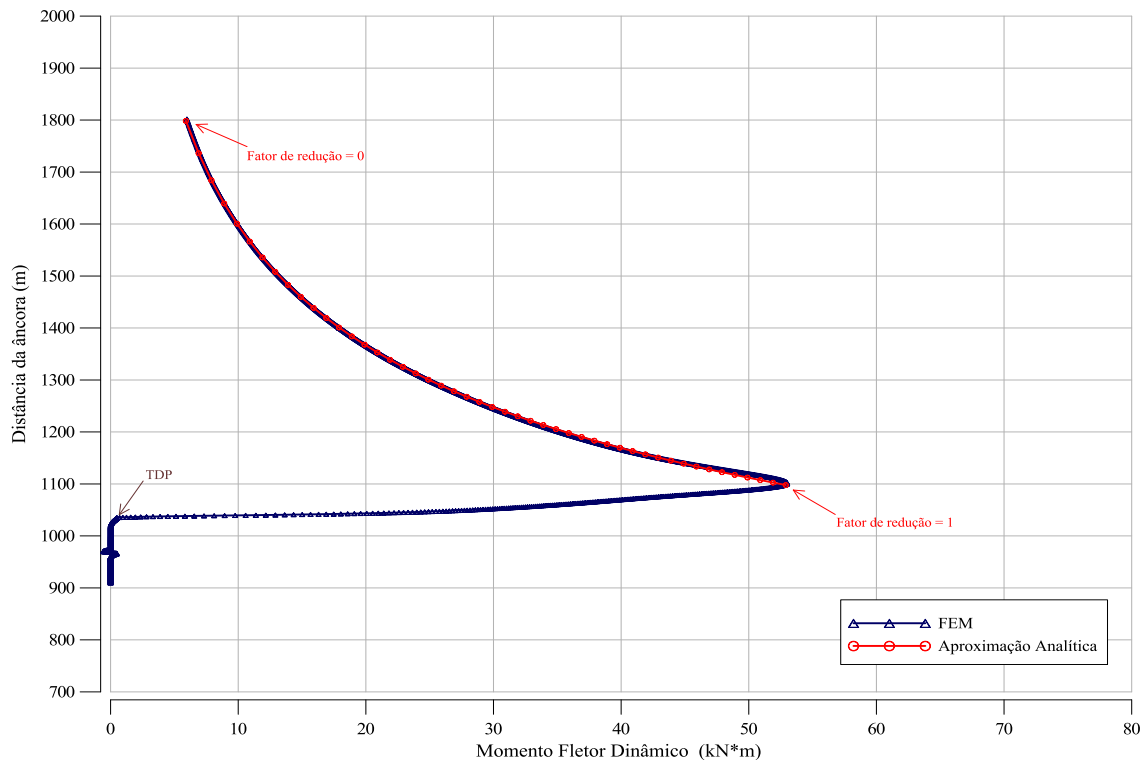


Figura II.12 – Aproximação da envoltória de máximos do momento fletor no trecho entre o ponto de máximo momento fletor dinâmico e o ponto de momento dinâmico nulo.

## II.9 Passeio dinâmico do TDP

A determinação do passeio dinâmico do TDP, termo  $x_0(t)$  da Equação (II-58), representa uma forte limitação para a utilização do modelo proposto por ARANHA *et al.* (1997). Os autores indicam um modelo simplificado, com análises no domínio da frequência, que forneceria bons resultados para o passeio. Até o momento não se conseguiu implementar este modelo e, por isso, decidiu-se utilizar um modelo polinomial para a avaliação do passeio.

O modelo polinomial utilizado baseia-se na utilização dos resultados das mesmas cinco análises dinâmicas prévias necessárias para aproximar o decaimento do momento fletor (seção II.8) para calibração dos coeficientes que serão utilizados no cálculo do passeio do TDP ( $x_0(t)$ ). Neste tipo de modelo, o conceito principal é representar um parâmetro de resposta (neste caso o passeio do TDP) formado por um conjunto de coeficientes e um conjunto de preditores (AGUIRRE, 1998). Neste caso, a entrada de

dados (preditores) são os deslocamentos no topo do *riser* e o passeio do TDP; já os coeficientes são calculados a partir desses dados conhecidos das cinco análises.

A expressão adotada para aproximar o passeio do TDP é dada por um polinômio de terceiro grau composto por trinta e um termos:

$$\begin{aligned}
 x_0(t) = & C_0 + C_1 X(t) + C_2 Z(t) + C_3 V_X(t) + C_4 V_Z(t) + C_5 [X(t) \cdot Z(t)] + \\
 & C_6 [X(t) \cdot V_X(t)] + C_7 [X(t) \cdot V_Z(t)] + C_8 [Z(t) \cdot V_X(t)] + C_9 [Z(t) \cdot V_Z(t)] + \\
 & C_{10} [V_X(t) \cdot V_Z(t)] + C_{11} [V_X(t) \cdot |V_X(t)|] + C_{12} [V_Z(t) \cdot |V_Z(t)|] + C_{13} [X^2(t)] + \\
 & C_{14} [Z^2(t)] + C_{15} [X^2(t) \cdot Z(t)] + C_{16} [Z^2(t) \cdot X(t)] + C_{17} [X^2(t) \cdot V_X(t)] + \\
 & C_{18} [X^2(t) \cdot V_Z(t)] + C_{19} [Z^2(t) \cdot V_X(t)] + C_{20} [Z^2(t) \cdot V_Z(t)] + \\
 & C_{21} [V_X^2(t) \cdot X(t)] + C_{22} [V_X^2(t) \cdot Z(t)] + C_{23} [V_X^2(t) \cdot V_Z(t)] + \\
 & C_{24} [V_Z^2(t) \cdot X(t)] + C_{25} [V_Z^2(t) \cdot Z(t)] + C_{26} [V_Z^2(t) \cdot V_X(t)] + C_{27} X^3(t) + \\
 & C_{28} Z^3(t) + C_{29} V_X^3(t) + C_{30} V_Z^3(t)
 \end{aligned} \tag{II-60}$$

onde  $X(t)$  e  $Z(t)$  são, respectivamente, os movimentos horizontal e vertical no topo do *riser*,  $V_X(t)$  e  $V_Z(t)$  são as correspondentes velocidades associadas a estes movimentos e as  $C_i$ 's os coeficientes do polinômio para aproximar o passeio do TDP.

## II.10 Fator de utilização segundo a norma DNV-OS-F201 (2010), critério LRFD.

Conforme apresentado na Figura II.3, após a avaliação das séries temporais do passeio e das trações e momentos fletores na região do TDP, é possível efetuar o cálculo dos fatores de utilização de uma seção transversal de um *riser* de aço em catenária (parâmetro de resposta) segundo a norma *offshore* DNV-OS-F201 publicada no ano 2001, com a revisão mais recente no ano 2010.

A filosofia de projeto utilizada neste trabalho é a LRFD, onde se têm diferentes fatores de segurança parciais em função do tipo de carregamento. As cargas são

majoradas pelos fatores de carga e a resistência do material é reduzida pelos coeficientes de resistência.

Nesta norma, todos os modos de falha devem ser identificados e deve-se verificar que o correspondente estado limite não seja excedido.

De acordo com esta norma, os *risers* são classificados em função de: classes de segurança, tipo de fluido e localização, como descrito a seguir:

- Classes de segurança
  - Baixa, quando a falha implica pouco risco de prejuízo humano e consequências ambientais e econômicas menores.
  - Normal, para condições em que a falha implica risco de prejuízo humano, poluição ambiental significativa ou altas consequências econômicas ou políticas.
  - Alta, quando a falha implica alto risco de prejuízo humano, poluição ambiental significativa, e altas consequências econômicas ou políticas.
  
- Classificação por tipo de fluido
  - A: fluidos não inflamáveis a base de água.
  - B: substâncias inflamáveis ou tóxicas que são líquidas à temperatura ambiente e em condições de pressão atmosférica, e.g. o petróleo.
  - C: substâncias não inflamáveis que à temperatura ambiente e em condições de pressão atmosférica são gases (exemplo dióxido de carbono, nitrogênio).
  - D: gás monofásico não tóxico (principalmente metano).
  - E: substâncias inflamáveis e tóxicas que à temperatura ambiente e em condições de pressão atmosférica são gases, as quais são escoadas como gases ou líquidos (exemplo gás natural, propano, etileno, etc.).

- Classificação por localização

- 1: áreas onde não é esperada atividade humana frequente.
- 2: refere-se à parte do *riser* próxima à plataforma ou com atividade humana frequente.

Após a definição das categorias anteriores, é possível determinar a classe de segurança do *riser* de acordo com a fase em que o mesmo se encontra e o fluido que ele transporta, conforme mostrado na Tabela II.1.

*Tabela II.1– Classificação do tipo de classe de segurança segundo a norma offshore DNV-OS-F201 (2010).*

FASE	Fluidos A e C		Fluido B		Fluidos D e E	
	Localização		Localização		Localização	
	1	2	1	2	1	2
De teste	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	*NA	*NA
Temporária	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Normal
Em serviço	Baixa	Normal	Normal	Normal	Normal	Alta

\* Não aplicável.

Combinando todas as relações carga e resistência dos diferentes carregamentos, é definido um fator de utilização da seção transversal do *riser*, denominado neste trabalho *FU*. Segundo esta formulação, o *riser* é considerado íntegro se o fator de utilização for menor que um ( $FU \leq 1$ ); já para valores maiores que um considera-se que houve falha no duto. O fator de utilização pode ser expresso pela seguinte equação:

$$FU(S_p, \gamma_F \cdot S_F, \gamma_E \cdot S_E, \gamma_A \cdot S_A, \gamma_{SC}, \gamma_m, \gamma_c, t) \leq 1 \quad (\text{II-61})$$

onde

$S_p$  efeito das cargas de pressão;

$\gamma_F$  fator parcial de segurança associado a cargas funcionais;

$S_F$  efeito das cargas funcionais;

$\gamma_E$  fator parcial de segurança associado a cargas ambientais;

$S_E$  efeito das cargas ambientais;



$\gamma_A$	fator parcial de segurança associado a cargas acidentais;
$S_A$	efeito das cargas acidentais;
$\gamma_{SC}$	fator de resistência considerando a classe de segurança;
$\gamma_m$	fator de resistência associado às incertezas de resistência do material e fabricação;
$\gamma_c$	fator de resistência associado a condições específicas;
$t$	tempo.

A pressão é o carregamento devido ao efeito combinado da pressão hidrostática externa e da pressão do fluido interno na seção considerada.

As cargas funcionais são as que ocorrem como uma consequência da existência física do sistema e pela sua operação e manejo.

As cargas ambientais são aquelas impostas direta ou indiretamente pelo meio ambiente. As principais são devido à onda, corrente marinha e vento.

As cargas acidentais são tipicamente resultado de ocorrências não planejadas. Isto significa que são carregamentos aos quais o *riser* pode estar sujeito no caso de se apresentarem condições anormais como, por exemplo, a operação incorreta ou falha técnica.

Na filosofia de projeto *LRFD*, o objetivo é manter a probabilidade de falha dentro de níveis aceitáveis para todos os estados limites. Nesta filosofia, são definidos os seguintes quatro estados limites:

- Estado Limite de Serviço (SLS), associado à operação normal do *riser*.
- Estado Limite Último Operacional (ULS), associado à máxima resistência sob aplicação de cargas com probabilidades de excedência anual de  $10^{-2}$ .
- Estado Limite Acidental (ALS), associado a cargas acidentais e anormais.
- Estado Limite de Fadiga (FLS), associado ao dano acumulado devido a carregamentos cíclicos.

O presente trabalho limita-se ao estado limite último operacional de utilização (ULS). Para casos em que a pressão interna do duto seja maior que a externa, a norma DNV-OS-F201(2010) sugere a seguinte expressão para o cálculo do fator de utilização:

$$FU = \gamma_{SC} \cdot \gamma_m \left[ \frac{|M_d|}{M_k} \sqrt{1 - \left( \frac{P_{1d} - P_e}{P_b(t_2)} \right)^2} + \left( \frac{T_{ed}}{T_k} \right)^2 \right] + \left( \frac{P_{1d} - P_e}{P_b(t_2)} \right)^2 \leq 1 \quad (\text{II-62})$$

Já no caso de pressão externa maior do que a interna:

$$FU = (\gamma_{SC} \cdot \gamma_m)^2 \left[ \frac{|M_d|}{M_k} + \left( \frac{T_{ed}}{T_k} \right)^2 \right]^2 + (\gamma_{SC} \cdot \gamma_m)^2 \left( \frac{P_e - P_{\min}}{P_c(t_2)} \right)^2 \leq 1 \quad (\text{II-63})$$

onde

- $M_d$  momento fletor de projeto;
- $M_k$  momento plástico resistente da seção;
- $T_{ed}$  tração de projeto;
- $T_k$  capacidade axial plástica da seção;
- $P_{1d}$  pressão interna atuante na seção;
- $P_e$  pressão externa atuante na seção;
- $P_b(t_2)$  pressão de colapso;
- $P_{\min}$  pressão interna mínima de trabalho;
- $P_c(t_2)$  pressão externa local de flambagem do tubo;
- $t_2$  espessura do tubo descontando a sobre espessura de corrosão;
- $\gamma_{SC}$  fator de resistência considerando a classe de segurança;
- $\gamma_m$  fator de resistência associado as incertezas de resistência do material e fabricação.

O momento fletor e tração de projeto são dados, respectivamente, por:

$$M_d = \gamma_F \cdot M_F + \gamma_E \cdot M_E + \gamma_A \cdot M_A \quad (\text{II-64})$$

$$T_{ed} = \gamma_F \cdot T_{eF} + \gamma_E \cdot T_{eE} + \gamma_A \cdot T_{eA} \quad (\text{II-65})$$

onde

$M_F, M_E, M_A$	valores de momentos fletores correspondentes às cargas funcionais, ambientais e acidentais;
$T_{eF}, T_{eE}, T_{eA}$	valores de tração efetiva correspondente às cargas funcionais, ambientais e acidentais;
$\gamma_F, \gamma_E, \gamma_A$	fatores de carga referentes a carregamentos funcionais, ambientais e acidentais.

Finalmente, o momento fletor plástico resistente da seção e capacidade axial plástica são dados pelas seguintes expressões:

$$M_k = f_y \cdot \alpha_c (D_e - t_2)^2 t_2 \quad (\text{II-66})$$

$$T_k = f_y \cdot \alpha_c \cdot \pi (D_e - t_2)^2 t_2 \quad (\text{II-67})$$

onde

$D_e$	diâmetro externo;
$f_y$	tensão de escoamento do material;
$\alpha_c$	fator de correção que considera variações de espessura ao longo do tubo e o encruamento do material;

Como no caso de uma análise aleatória, os esforços de tração e momentos fletores variam no tempo, o fator de utilização corresponde também a uma série temporal aleatória. O tratamento estatístico desta série sera discutido a seguir.

## II.11 Estatística de curto prazo da resposta

Numa análise dinâmica aleatória de curto prazo, a estrutura é submetida às ações ambientais caracterizadas num estado de mar  $\mathbf{S} = \mathbf{s} = (h_s, t_z, \theta_w, v_v, \theta_v, v_c, \theta_c)$ . Numa análise desacoplada o efeito do vento, onda e corrente sobre o flutuante são considerados através dos movimentos prescritos no topo do *riser* para cada condição ambiental de curto prazo considerada. Este conjunto de ações ambientais (séries temporais de onda, vento e corrente), gera através dessa análise aleatória séries temporais de um parâmetro de resposta de interesse (no presente trabalho, este parâmetro é o fator de utilização da seção transversal), conforme mostrado esquematicamente na Figura II.13. Uma série do parâmetro de resposta  $R(t)$  representa uma realização do seu respectivo processo.

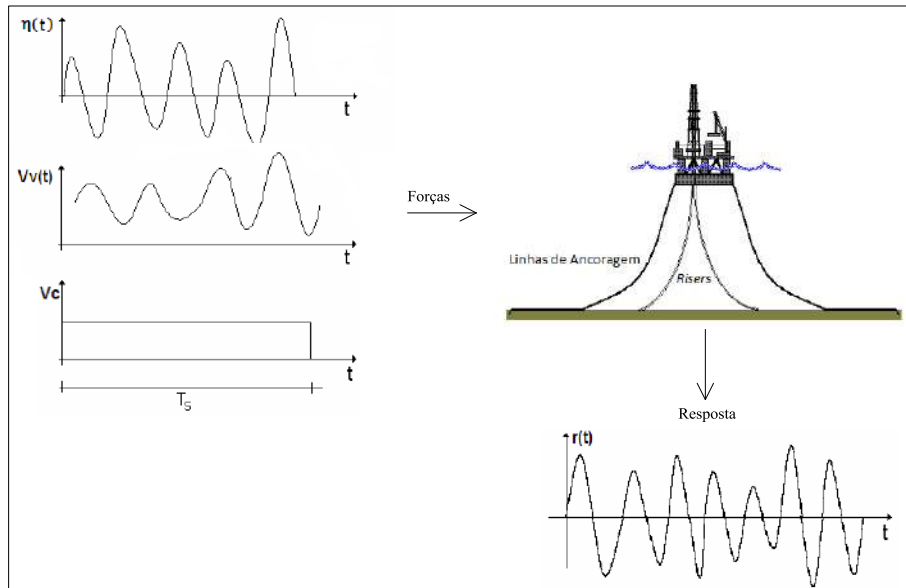


Figura II.13 – Esquema da resposta de curto prazo de uma estrutura marítima.

Em projetos de engenharia, usualmente, o interesse recai nos valores extremos máximos do parâmetro de resposta. A estimativa de valores máximos pode ser feita a partir dos picos de máximos da resposta  $R(t)$ , conforme ilustra a Figura II.14. Na análise de *risers*, usualmente os parâmetros de resposta são não Gaussianos e por esta razão, é muito difícil de estabelecer uma distribuição de probabilidades analítica para os seus picos. Em vista disso, uma solução possível é fazer o ajuste de uma curva de probabilidades conhecida aos picos positivos observados na série temporal da resposta  $R(t)$ . Uma das curvas mais utilizadas é a distribuição de *Weibull*, cujas funções densidade e cumulativa de probabilidades são respectivamente dadas por:

$$f_{R|S}(r|\mathbf{s}) = \frac{(r - u_w(\mathbf{s}))^{\lambda_w(\mathbf{s}) - 1}}{(\alpha_w(\mathbf{s}))^{\lambda_w(\mathbf{s})}} \lambda_w(\mathbf{s}) \exp\left(-\left(\frac{r - u_w(\mathbf{s})}{\alpha_w(\mathbf{s})}\right)^{\lambda_w(\mathbf{s})}\right) \quad (r > 0) \quad (\text{II-68})$$

$$F_{R|S}(r|\mathbf{s}) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{r - u_w(\mathbf{s})}{\alpha_w(\mathbf{s})}\right)^{\lambda_w(\mathbf{s})}\right) \quad (\text{II-69})$$

onde  $u_w(\mathbf{s})$ ,  $\alpha_w(\mathbf{s})$  e  $\lambda_w(\mathbf{s})$  são os parâmetros de localização, escala e de forma, respectivamente, da distribuição que devem ser calculados em função dos dados da resposta.

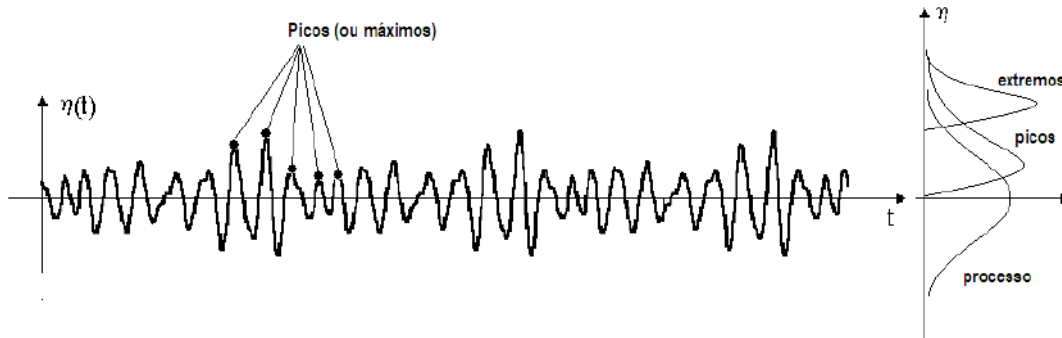


Figura II.14 – Definição dos picos de uma série temporal (SOUSA, 2005).

Existem muitos procedimentos para cálculo dos parâmetros da distribuição de Weibull em função das amostras dos picos da série temporal. Como nas análises de extremos, a parte mais importante da distribuição é a sua cauda superior e não a sua região central, tem-se usado bastante as técnicas chamadas de *Weibull-Tail Fitting* (ZURITA, 1999) para privilegiar esta região. Nestas técnicas os valores de  $\alpha_w$  e  $\lambda_w$  são obtidos ajustando-se a distribuição de *Weibull* somente na região dos picos com alta probabilidade de serem excedidos ( $P \geq 65\%$ ), desprezando-se os demais. Para  $u_w$  assume-se o valor da média do processo aleatório.

O valor mais provável  $r_{MPV}$  do pico extremo na condição ambiental de curto prazo  $\mathbf{S} = \mathbf{s}$  pode ser obtido resolvendo-se a seguinte equação (ANG e TANG, 1984):

$$F_{R|S}(r_{MPV}|\mathbf{s}) = 1 - \frac{1}{N_p(\mathbf{s})} \quad (\text{II-70})$$

onde  $N_p(\mathbf{s})$  é o número esperado de picos no período de curto prazo cuja duração é  $T_{st}$ .

Este valor pode ser estimado como sendo igual a

$$N_p(\mathbf{s}) = \nu_p(\mathbf{s})T_{st} \quad (\text{II-71})$$

sendo  $N_p(\mathbf{s}) = \nu_p(\mathbf{s})T_{st}$  a frequência média de picos da série temporal da resposta.

# CAPÍTULO III

## ESTATÍSTICA DE LONGO PRAZO DO FATOR DE UTILIZAÇÃO E CONDIÇÕES EQUIVALENTES DE PROJETO

### III.1 Introdução

No capítulo anterior, foram apresentados detalhes do modelo semi-analítico para avaliar os fatores de utilização para *risers* de aço em catenária na região no TDP para estados de mar individuais. O modelo semi-analítico utilizado é baseado principalmente nas formulações apresentadas por ARANHA *et al.* (1997, 2001) e PESCE *et al.* (1997) para avaliar as trações e momentos fletores na TDZ.

A resposta baseada na estatística de longo prazo trata-se basicamente em obter as respostas de curto prazo para todos os estados de mar “possíveis” para uma dada localização de interesse e, depois, através da soma das contribuições individuais de cada estado de mar analisado, obter a resposta de longo prazo, possibilitando estimar extremos e outros parâmetros estatísticos da resposta investigada.

A principal vantagem da metodologia da estatística de longo prazo da resposta é considerar de uma forma mais adequada a contribuição de cada uma das condições ambientais de curto prazo para obter a resposta extrema associada a um período de recorrência pré-especificado. Desta forma, difere das metodologias mais tradicionais de projeto, em que são calculadas respostas extremas para um grupo de casos de análise (condições ambientais de curto prazo) supostos extremos, com o período de recorrência desejado.

A avaliação da resposta extrema de longo prazo segundo esta metodologia é composta por três etapas principais. A primeira é a definição dos casos de curto prazo para análise; a segunda é a avaliação das respostas a cada uma das condições de curto prazo (ambas apresentadas no CAPÍTULO II) e, finalmente, a última etapa é representada por um processo de integração de todas as respostas de curto prazo, gerando as respostas de longo prazo. Este capítulo apresenta os principais aspectos relacionados à etapa 3.

### III.2 Estatística de longo prazo da resposta

O método adotado para a análise de longo prazo é um método baseado na distribuição de curto prazo dos picos da resposta. Para a obtenção da estatística de longo prazo dos picos, deve-se determinar a distribuição de probabilidades dos picos da resposta considerando a contribuição de todos os picos em todos os períodos de curto prazo, como ilustra a Figura III.1.

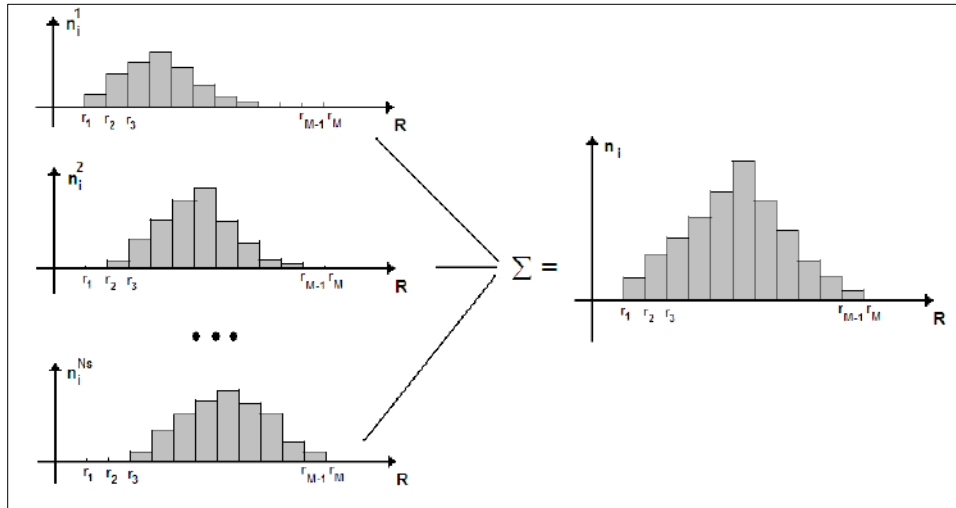


Figura III.1 – Histograma dos picos da resposta no curto e no longo prazo (SAGRILO, 2011).

Dividindo-se o histograma da resposta de interesse  $R$  em  $i=1, 2, 3, \dots, M-1$  intervalos, no intervalo entre  $r_i$  e  $r_{i+1}$  o número de picos da resposta observado em cada período “ $j$ ” de curto prazo é identificado como  $n_i^j$ . Dessa forma, é possível escrever que a probabilidade do pico da resposta  $R$  ser menor ou igual a  $r_k$  no longo prazo é dada por (CHAKRABARTI, 1997; FALTINSEN, 1990):

$$P(R \leq r_k) = \frac{\sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=1}^{Ns} n_i^j}{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{Ns} n_i^j} = \frac{\sum_{j=1}^{Ns} N_j P(R \leq r_k | S = s_j)}{N_L} \quad (\text{III-1})$$

onde:

$$N_j = v_m(\mathbf{s}_j) T_s \quad \text{número de picos no } j\text{-ésimo estado de mar;}$$

$N_L = \bar{v}_m T_L$	número total de picos no longo prazo;
$\bar{v}_m = \sum_{j=1}^{N_S} v_m(\mathbf{s}_j) / N_S$	frequência média de picos máximos no longo prazo;
$v_m(\mathbf{s}_j)$	frequência de máximos da resposta no estado de mar $\mathbf{S} = \mathbf{s}_j$ ;
$P(R \leq r_k   \mathbf{S} = \mathbf{s}_j)$	função cumulativa de probabilidades dos picos da resposta de curto prazo no j-ésimo estado de mar, avaliada para $r_k$ , i.e., $P(R \leq r_k   \mathbf{S} = \mathbf{s}_j) = F_R(r_k   \mathbf{S} = \mathbf{s}_j)$ ;
$T_L = N_S T_S$	período total de longo prazo, com $N_S$ estados de mar com um período de duração $T_S$ cada um deles.

Reescrevendo a Equação (III-1), tem-se que:

$$P(R \leq r_k) = F_R(r_k) = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} v_m(\mathbf{s}_i) T_S F_R(r_k | \mathbf{S} = \mathbf{s}_i)}{\bar{v}_m T_L} = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} v_m(\mathbf{s}_i) F_R(r_k | \mathbf{S} = \mathbf{s}_i)}{\bar{v}_m N_S} \quad (\text{III-2})$$

O último termo da equação acima corresponde à média ou valor esperado da função  $v_m(\mathbf{s}_i) F_R(r_k | \mathbf{S} = \mathbf{s}_i) / \bar{v}_m$  e, portanto, a função cumulativa dos picos no longo prazo pode ser expressa por:

$$F_R(r) = \int_0^{\infty} \frac{v_m(\mathbf{s})}{\bar{v}_m} F_R(r | \mathbf{S} = \mathbf{s}) f_S(\mathbf{s}) d\mathbf{s} \quad (\text{III-3})$$

e a correspondente função densidade de probabilidade por

$$f_R(r) = \frac{dF_R(r)}{dr} = \int_0^{\infty} \frac{v_m(\mathbf{s})}{\bar{v}_m} f_R(r | \mathbf{S} = \mathbf{s}) f_S(\mathbf{s}) d\mathbf{s} \quad (\text{III-4})$$

onde  $f_S(\mathbf{s})$  é a função de distribuição conjunta de probabilidades dos parâmetros ambientais avaliada para o estado de mar com parâmetros ambientais  $\mathbf{S} = \mathbf{s}$ .

As funções cumulativa e de densidade de probabilidades da distribuição do pico extremo da resposta de longo prazo podem ser obtidas através da estatística de ordem (ANG e TANG, 1984):



$$F_{R_e}(r) = [F_R(r)]^{N_p} = [F_R(r)]^{\bar{v}_m T_L} \quad (\text{III-5})$$

$$f_{R_e}(r) = N_p [F_R(r)]^{N_p-1} f_R(r) \quad (\text{III-6})$$

onde  $N_p$  é o número esperado de picos num dado período de retorno de  $N$  anos, isto é,  $N_p = v_m \times 10800 \times 2920 \times N$ , considerando o período de curto prazo de 3h (10800s), i.e., 2920 períodos de curto prazo por ano.

O valor mais provável  $r^{N_{anos}}$  do pico extremo de longo prazo (neste trabalho, o período de retorno considerado é de 100 anos) pode ser calculado pela função cumulativa inversa (ANG e TANG, 1984):

$$F_{R_e}(r^{N_{anos}}) = 1 - \frac{1}{N_p} = 1 - \frac{1}{v_m \cdot 10800 \cdot 2920 \cdot N_{anos}} \quad (\text{III-7})$$

Como proposto por VIDEIRO (1998), é possível calcular a contribuição de cada estado de mar de curto prazo no valor extremo da resposta (coeficientes de participação), e assim avaliar quais deles são mais importantes em termos de contribuição para a resposta da estrutura. Estes coeficientes de participação podem ser calculados a partir da contribuição que cada estado de mar tem no valor extremo mais provável  $r^{N_{anos}}$  de longo prazo. Assim, para uma resposta centenária o coeficiente de participação para um estado de mar  $\mathbf{s} = \mathbf{s}_j$  é dado por:

$$C_j = \frac{v_m(\mathbf{s}_j) (1 - F_R(r^{N_{anos}} | \mathbf{S} = \mathbf{s}_j)) f_S(\mathbf{s}_j) \Delta \mathbf{s}}{\bar{v}_m (1/N_p)} \quad (\text{III-8})$$

A Equação (III-3) é um modelo geral para a metodologia de longo prazo da resposta. Entretanto, como a integração requer a distribuição dos picos da resposta para inúmeras condições ambientais de curto prazo, o custo computacional desta metodologia pode se tornar muito alto caso a obtenção destas distribuições seja baseada, por exemplo, em análises dinâmicas no domínio do tempo. Por este motivo, buscam-se modelos simplificados de análise em conjunto com procedimentos de interpolação (SOUSA, 2005)

para efetuar a integração de longo prazo. A seguir, será apresentado o método numérico utilizado neste trabalho para a integração desta equação.

### III.3 Avaliação numérica da estatística de longo prazo da resposta

A solução apresentada previamente no item III.2 envolve uma integração numérica multidimensional  $\mathfrak{R}^N$ , onde N é o número de parâmetros contidos no vetor **S**. Levando em consideração as hipóteses simplificadoras apresentadas no trabalho de BITNER-GREGERSEN e HAVER (1991), a dimensão do espaço de integração é cinco, mesmo assim, esta dimensão não representa uma integração numérica trivial.

Torna-se necessário, assim, adotar outras hipóteses simplificadoras em relação à dimensão do espaço de integração para viabilizar a integração da Equação (III-3). Uma destas possibilidades é não distinguir os mares de *sea* e *swell* e separar as direções de incidência de ondas num determinado número de setores angulares e adicionalmente considerar que a velocidade da corrente e a do vento são completamente dependentes da altura significativa de onda (Hs). Desta forma, a distribuição conjunta dos parâmetros ambientais pode ser representada por:

$$f_{\mathbf{s}}(\mathbf{s}) = \sum_{i=1}^{N_{\theta}} f_{H_s, T_z | \theta} (h_s, t_z | \theta_i) p_{\theta_i} \quad (\text{III-9})$$

onde  $f_{H_s, T_z | \theta} (h_s, t_z | \theta_i)$  é função conjunta de Hs e Tz para a direção de incidência  $\theta = \theta_i$ ,  $p_{\theta_i}$  é a frequência relativa de ondas na direção  $\theta = \theta_i$  e  $N_{\theta}$  é o número de setores angulares adotados. Utilizando a representação descrita acima a integral de longo prazo da resposta se reduz a realização de  $N_{\theta}$  integrais bi-dimensionais no espaço Hs-Tz.

Para diminuir o número de análises de curto prazo para efetuar a integração das integrais bi-dimensionais, como apontado por SOUSA (2005), é a utilização de funções de interpolação para representar o comportamento dos parâmetros das distribuições dos picos da resposta. Conforme o apresentado no item II.11, a distribuição de *Weibull* será utilizada para representar os picos da resposta neste trabalho. Assim, os parâmetros estatísticos a serem interpolados são  $\alpha_w(\mathbf{s})$ ,  $\lambda_w(\mathbf{s})$ , e  $u_m(\mathbf{s})$  e também a frequência de

picos  $v_m(\mathbf{s})$ . Considerando que agora  $\mathbf{s} = (hs, tz)$ , em cada direção de incidência de onda  $\theta = \theta_i$  os estados de mar  $s_j$  para os quais serão efetuadas análises de curto prazo devem formar uma “malha de interpolação” que cubra todo o espaço de integração, no qual a função de densidade de probabilidades conjunta dos parâmetros ambientais  $f_{\mathbf{s}|\theta}(\mathbf{s}|\theta_i)$  apresente valores significativos. Em alguns casos, o modelo de distribuição conjunta pode ser baseado no Tp ao invés do Tz, porém, o procedimento de integração permanece o mesmo.

Neste trabalho, o processo de integração numérica foi realizado com ajuda do programa PosLT (LACEO, 2015), utilizando uma malha de interpolação de tipo triangular (vide Figura III.2). Neste tipo de integração, para cada ponto (Hs, Tz) ou (Hs, Tp) o programa procura o menor elemento triangular (menor área) em que o ponto esteja contido. Caso nenhum elemento seja encontrado, o programa seleciona o elemento mais próximo para permitir a extrapolação. A partir das coordenadas  $(Hs_i, Tz_i)$ ,  $i=1, \dots, 3$ , dos vértices do triângulo selecionado estabelece-se uma função de interpolação linear para o parâmetro  $p$  ( $\alpha_w, \lambda_w, u_m$  ou  $v_m$ ) da distribuição de curto prazo

$$p = a + bxHs + cxTz \quad (\text{III-10})$$

onde as constantes  $a$ ,  $b$  e  $c$  são definidas por

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Hs_1 & Tz_1 \\ 1 & Hs_2 & Tz_2 \\ 1 & Hs_3 & Tz_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III-11})$$

sendo  $p_1$ ,  $p_2$  e  $p_3$  os valores do parâmetro estatístico nos três vértices do triângulo.

Deve-se ressaltar que a seleção dos pontos que compõem a malha de interpolação é muito importante, e que se deve evitar a necessidade de extrapolação. Para tanto, recomenda-se tomar como referência as linhas de contorno ambiental (WINTERSTEIN et al., 1993) para um período de retorno de 10.000 anos (deca milenar) para delimitar a malha de integração.

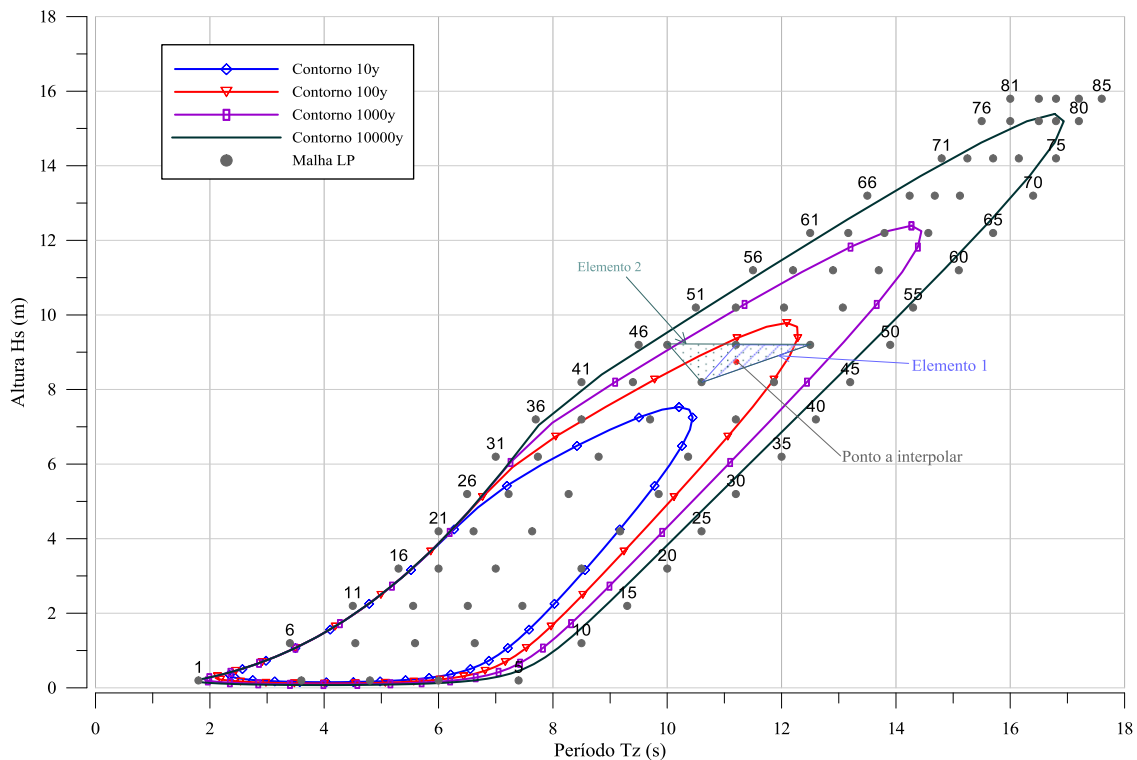


Figura III.2 – Exemplo de uma malha triangular de interpolação para uma função bidimensional de parâmetros ambientais.

### III.4 Condições equivalentes de projeto

A norma *offshore* DNV-OS-F201 (2010) estabelece que os efeitos generalizados dos carregamentos para condições extremas podem ser avaliados baseando-se em estatística ambiental ou em estatística da resposta.

A seleção de carregamentos baseado em estatística ambiental é tradicionalmente a mais usada. Nesta seleção, estima-se a resposta estrutural do *riser* a uma grande e variada quantidade de condições ambientais extremas estacionárias. Estas condições extremas são definidas a partir de combinações de onda, vento (indiretamente) e corrente, associadas a um período de retorno representativo de uma condição extrema, por exemplo, 100 anos. Em outras palavras, nesta metodologia, a seleção das condições ambientais para projeto são baseadas apenas na estatística dos parâmetros ambientais sem considerar a estrutura que será objeto do projeto.

Conforme PAPALEO (2009), na prática, o procedimento usual de seleção de condições ambientais para análises de *risers* obedece ao seguinte critério:

- Combinação onda e vento centenários + corrente decenária;
- Combinação corrente centenária + onda e vento decenários.

Para ambas as combinações, os *offsets* associados são normalmente obtidos a partir de programas como o DYNASIM (USP, 2000), ou então se podem assumir valores usualmente relacionados a um percentual da lâmina d'água, por exemplo 10%. Restaria ainda, para formar os casos de carregamentos atuantes sobre o *riser*-plataforma flutuante, a definição das direções de atuação destes carregamentos. Para isto, se deve considerar que as respostas da plataforma às ações das ondas são dependentes das direções relativas de incidência destas sobre a embarcação. Na realidade, poucas vezes o desalinhamento entre as cargas é conhecido, sendo a hipótese mais adotada aquela onde todas as cargas ambientais atuam alinhadas e, no caso de FPSOs *turret*, casos desalinhados em 22.5, 45 e 90 graus, variando-se os períodos de recorrência de onda, vento e corrente.

Conforme as considerações anteriores, observa-se que o alvo principal, no caso da seleção dos carregamentos para análises, está nas ações ambientais. Como apontado por SOUSA (2011), isto é consequência do fato de que usualmente se considera que a resposta de um *riser* associada a um determinado período de recorrência depende da ocorrência de condições ambientais com o mesmo período de recorrência. Portanto, desconsidera-se que a resposta de uma estrutura com comportamento dinâmico pode ser mais crítica para carregamentos com períodos ressonantes do que para carregamentos com intensidades maiores. Este aspecto, numa metodologia baseada na resposta de longo prazo, é levado em conta de forma intrínseca uma vez que as contribuições de todos os estados de mar são contabilizadas.

A seleção de carregamentos baseada em estatística da resposta consiste em determinar uma descrição probabilística da resposta (neste caso fator de utilização) devido à ação dos carregamentos ambientais de longo prazo. A norma DNV-OS-F201 (2010), aponta o projeto baseado na estatística da resposta de longo prazo como o mais apropriado. Porém, um dos principais problemas associados a esta metodologia é o custo computacional das análises, produto da grande quantidade de estados de mar de curto prazo a serem analisados, e também do elevado custo computacional de cada uma dessas análises.

Nesse contexto, a idéia central deste trabalho é a de usar uma metodologia semi-analítica simplificada (apresentada no capítulo anterior) de baixo custo computacional para avaliar o comportamento dinâmico do *riser*, e assim, tornar-se exequível o cálculo do fator de utilização de longo prazo na região do TDP. Assim, a partir desse fator pode-se estabelecer condições ambientais de projeto que gerem respostas extremas de curto prazo com valores equivalentes à resposta de longo prazo calculada. Estas condições podem ser consideradas condições equivalentes de projeto, as quais, então, poderiam ser analisadas através de modelos numéricos detalhados, com ajuda de programas de computador como o ANFLEX (2010), Sesam-DeepC (DNV, 2016), PROSIM (LAMCSO, 2006) ou OrcaFlex (ORCINA, 2016).

Uma condição ambiental equivalente de projeto constitui-se numa condição  $\mathbf{S} = \mathbf{s}_E$  em que o valor extremo mais provável de curto prazo  $r_{MPV} | \mathbf{s}_E$ , estimado através da Equação (II-70), seja igual ao valor extremo de longo prazo da resposta  $r^{N_{anos}}$ , estimado através da Equação (III-7). Em resumo, a seguinte condição deve ser atendida:

$$r_{MPV} | \mathbf{s}_E \equiv r^{N_{anos}} \quad (\text{III-12})$$

para que  $\mathbf{S} = \mathbf{s}_E = (H_{s_E}, T_{z_E}, \dots, V_{c_E}, \dots, \theta_{c_E})$  seja uma condição equivalente de projeto. Observa-se que podem existir várias condições ambientais de curto prazo que satisfaçam este critério. Dentre estas, seleciona(m)-se aquela(s) com maior fator de participação na resposta.

A seguir no CAPÍTULO IV, serão apresentados três estudos de casos que ilustram em detalhes a aplicação da metodologia analítica aqui proposta. Já o CAPÍTULO V mostra a seleção das condições ambientais consideradas equivalentes para todos os estudos de casos.

Toda a metodologia descrita anteriormente para obtenção das séries temporais do fator de utilização da seção transversal de um *riser* de aço em catenária utilizando uma formulação analítica, a integração de longo prazo da resposta e a obtenção das condições equivalentes de projeto foi consolidada no programa F.U.LongTerm desenvolvido na linguagem de programação FORTRAN®. Observa-se também que, de acordo com a norma DNV-RP-201 (2010), o período de longo prazo adotado para definição de valores extremos da resposta foi igual a 100 anos.

## CAPÍTULO IV

### ESTUDOS DE CASOS

#### IV.1 Introdução

Com o objetivo de mostrar todos os aspectos da metodologia descrita nos CAPÍTULOS II e III para avaliar o fator de utilização de longo prazo da seção transversal na região do TDP para *risers* rígidos em catenária (implementada no programa “F.U.LongTerm”), foram escolhidos três cenários diferentes e duas estruturas distintas, cujas características e principais resultados são apresentados nos itens a seguir.

Os resultados obtidos a partir dos modelos semi-analíticos foram comparados com resultados de simulações dinâmicas de mar irregular no domínio do tempo (3800s de duração) utilizando um modelo numérico baseado em elementos finitos. Os resultados obtidos com este modelo serão indicados como “FEM”. Embora as simulações numéricas tenham sido de 3800s, para o estudo do caso 2, a estimativa de extremos de curto prazo foram “extrapoladas” para um período igual a 3-h (10800s).

Para os três estudos de caso, são apresentados resultados relativos ao passeio do TDP, trações, momentos e séries de fatores de utilização das análises de curto prazo apenas para alguns estados de mar de interesse particular, escolhidos com vistas aos objetivos do presente trabalho, além dos resultados de longo prazo.

A modelagem da distribuição de curto prazo dos picos da série temporal dos fatores de utilização da seção transversal do *riser* na TDZ foi feita usando um ajuste do tipo *Weibull Tail Fitting* (ZURITA,1999). Os fatores de utilização foram calculados segundo a norma DNV-OS-F201 (2010) calculados com o critério LRFD, supondo uma classe de segurança normal e estado limite operacional. Finalmente, são exibidos os fatores de utilização de longo prazo na região do TDP calculados pelo programa PosLT (LACEO, 2015), assim como os coeficientes de participação dessa resposta.

As direções das variáveis ambientais assumidas neste trabalho seguem a convenção oceanográfica: no caso do vento e da onda, direções de incidência (*de onde vem*); enquanto para corrente, indica direção de propagação (*para onde vai*).

Para os três estudos de casos, foi usado um único perfil de corrente do tipo triangular na direção norte com velocidade superficial de 0.7 m/s e nula no fundo.

É importante ressaltar que as atividades realizadas nos seguintes exemplos não tem como objetivo o projeto completo de um *riser*, e sim a explicação dos procedimentos descritos neste trabalho.

A definição das condições equivalentes para projeto para os casos investigados no presente capítulo é feita no Capítulo V.

## IV.2 Dados gerais para as análises de longo prazo

Na análise de longo prazo, inicialmente, deve-se selecionar as distribuições conjuntas dos parâmetros ambientais de curto prazo (altura significativa de onda  $H_s$ , período de cruzamento zero  $T_z$  ou período de pico  $T_p$ , direções de onda, vento e corrente) para a locação específica do projeto.

Como um dos principais objetivos deste trabalho é mostrar a efetividade do método semi-analítico proposto para avaliar os fatores de utilização de longo prazo, considerou-se uma função conjunta de distribuição de probabilidades  $H_s$  e  $T_z / T_p$ , atuando apenas numa direção de incidência das ondas. A função de densidade de probabilidades conjunta de  $H_s$  e  $T_z$  é definida por:

$$f_{H_s, T_z}(h, t) = f_{H_s}(h) f_{T_z | H_s}(t | h) \quad (\text{IV-1})$$

onde  $f_{H_s}(h)$  é a função densidade de probabilidades da distribuição marginal de  $H_s$  e  $f_{T_z | H_s}(t | h)$  é a função densidade de probabilidades de  $T_z$  condicionada a um valor de  $H_s = h$ .



Para os três estudos de casos, a função de distribuição de Hs corresponde a uma lognormal, dada pela seguinte expressão:

$$f_{H_s}(h) = \frac{1}{h \cdot \xi_{H_s} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(h) - \lambda_{H_s}}{\xi_{H_s}}\right)^2\right] \quad (IV-2)$$

onde os valores dos parâmetros  $\lambda_{H_s}$  e  $\xi_{H_s}$  específicos de cada estudo de caso são apresentados na Tabela IV.1.

Tabela IV.1– Parâmetros da função  $f_{H_s}(h)$  ajustada nos três estudos de casos.

Estudo de Caso	Parâmetros	
	$\lambda_{H_s}$	$\xi_{H_s}$
1 e 3	0.0669	0.4993
2	0.62	0.333

Para os estudos de caso 1 e 3, a distribuição do período de cruzamento zero condicionada ao valor da altura significativa de onda foi modelada por uma distribuição normal, dada por:

$$f_{T_z|H_s}(t|h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h - \mu(t)}{\sigma}\right)^2\right] \quad (IV-3)$$

onde

$$\sigma = \sigma_{T_z} \cdot \sqrt{1 - (\rho_{H_s, T_z})^2}$$

$$\mu(t) = \mu_{T_z} + \rho_{H_s, T_z} \cdot \left(\frac{\sigma_{T_z}}{\sigma_{H_s}}\right) (t - \mu_{H_s}) \quad (IV-4)$$

sendo  $\mu_{T_z}$  a média dos valores de Tz,  $\mu_{H_s}$  a média da Hs,  $\sigma_{T_z}$  o desvio padrão do Tz,  $\sigma_{H_s}$  o desvio de padrão da Hs e  $\rho_{H_s, T_z}$  o coeficiente de correlação linear entre Hs e Tz. A Tabela IV.2 apresenta os valores dos parâmetros ajustados nos estudos de casos 1 e 3.

Tabela IV.2– Parâmetros da função  $f_{T_z|h}(t|h)$  ajustada nos estudos de casos 1 e 3.

Estudo de Caso	$\mu_{T_z}$	$\sigma_{T_z}$	$\mu_{H_s}$	$\sigma_{H_s}$	$\rho_{H_s, T_z}$
1, 3	4.9221	0.8179	1.2111	0.6444	0.6587

Já no estudo de caso 2, a distribuição do período de pico condicionada ao valor da altura significativa de onda foi modelada por uma lognormal dada por:

$$f_{T_p|h}(t|h) = \frac{1}{t \cdot \xi_{T_p}(h) \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(t) - \lambda_{T_p}(h)}{\xi_{T_p}(h)} \right)^2 \right] \quad (\text{IV-5})$$

com parâmetros dados por:

$$\begin{aligned} \lambda_{T_p}(h) &= 1.827 + 0.181(h)^{0.85} . \\ \xi_{T_p}(h) &= 0.00638 + 0.285e^{(-0.03h^2)} \end{aligned} \quad (\text{IV-6})$$

Apesar destas distribuições não serem específicas de nenhuma locação do Mar do Norte ou da Bacia de Campos, porém, elas reproduzem valores característicos dos parâmetros ambientais típicos destas duas regiões.

### IV.3 Estudo de caso 1

#### IV.3.1 Descrição do Modelo

Trata-se de um *riser* rígido de aço em catenária livre de 10.75” de diâmetro externo, conectado a uma plataforma tipo semi-submersível (SEMI). O *riser* foi modelado com um ângulo de topo de 21.67° e azimute 192.11°, numa lâmina d’água de 910m. O comprimento total modelado do *riser* foi duas vezes a lâmina d’água. Para o modelo FEM, mostrado na Figura IV.1, foram usados 2053 elementos de barra de pórtico espacial com 6 graus de liberdades por nó (3 translacionais e 3 rotacionais), no total de 12 graus de liberdade por elemento. A plataforma tem azimute de 20° e as coordenadas locais do topo da linha são (-39.6, -6.0, 37.1). As principais características do *riser* modelado estão descritas na Tabela IV.3.

A Figura IV.2 apresenta a função de transferência do movimento vertical no topo do *riser* na direção de incidência da onda analisada (vide Tabela A.1).

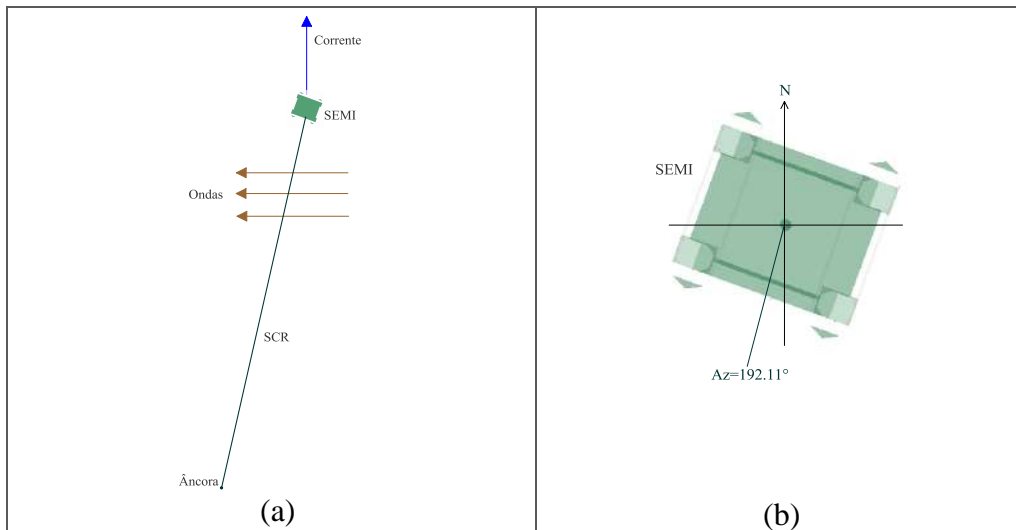
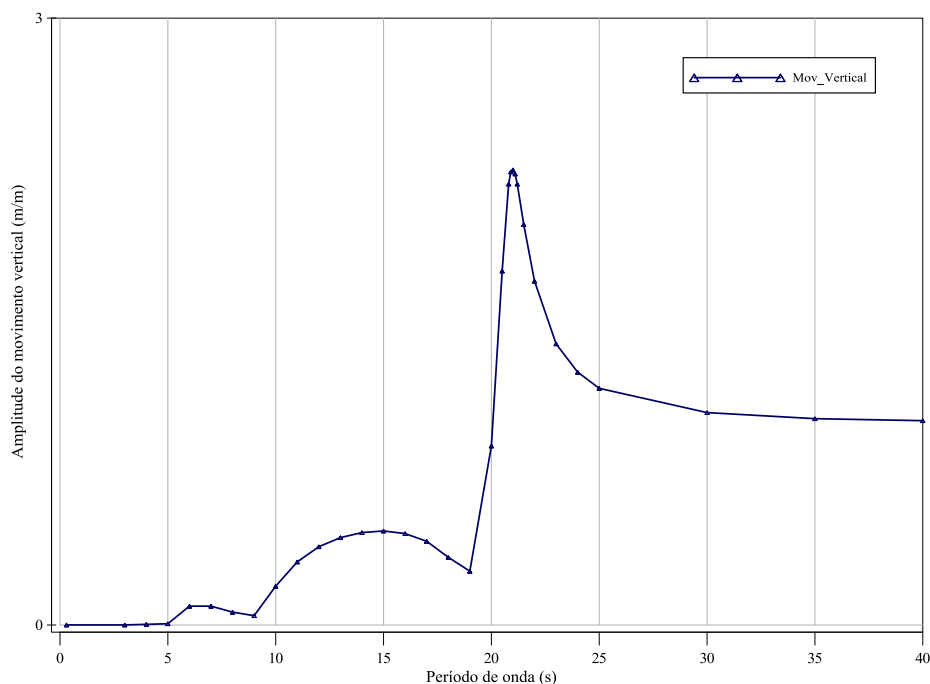


Figura IV.1 – Estudo de caso 1: Visão geral do modelo de elementos finitos do riser rígido, (a) Vista em planta, (b) Azimute da linha.

Tabela IV.3– Principais características do Estudo de Caso 1.

Riser	
Diâmetro externo (in)	10.75
Diâmetro interno (in)	9.12
Espessura de parede (in)	0.812
Ângulo de topo (deg)	21.67
Azimute (deg)	192.11
Pressão (MPa)	18.0
Peso submerso (kN/m)	1.34
Módulo de elasticidade E (kN/m <sup>2</sup> )	2.07E+8
Limite de escoamento Fy (MPa)	448
Limite de ruptura Fu (MPa)	531
Coefficiente de Morison CD	1.2
Pressão no topo (MPa)	18.0
Densidade do fluido (kN/m <sup>3</sup> )	2.0
Solo	
Rigidez (kN/m)	1000
Coefficiente de atrito axial	0.35
Coefficiente de atrito lateral	1.0
Deslocamento axial (m)	0.02
Deslocamento lateral (m)	0.003



*Figura IV.2 – Estudo de Caso 1: Função de transferência do movimento vertical no topo do riser na direção de incidência da onda analisada.*

Para avaliar a resposta de curto prazo foram utilizados 132 combinações ( $H_s$ ,  $T_z$ ) para formar uma malha de pontos de interpolação (e também, a princípio, extrapolação) que cubra de maneira adequada a distribuição conjunta descrita nas Equações (IV-2) e (IV-3) com os parâmetros referidos na Tabela IV.1 como mostrado na Figura IV.3 e contidos na Tabela A.1 do Anexo A.

Deve-se ressaltar que a seleção dos pontos que integram a malha de interpolação é muito importante, para evitar a extrapolação. Por isso, foram escolhidos estados de mar que abrangem a linha de contorno ambiental de dez mil anos. Os 132 pontos da malha foram enumerados, do menor para o maior par de altura significativa de onda ( $H_s$ ) e período de cruzamento zero ( $T_z$ ), conforme o mostrado no detalhe da Figura IV.3.

Os *offsets* foram assumidos proporcionais à altura significativa de cada onda na direção de propagação da mesma, sendo definida a taxa de proporcionalidade igual a 5% da lâmina d'água para a maior altura de onda significativa analisada neste exemplo ( $H_s=15.7\text{m}$ ).

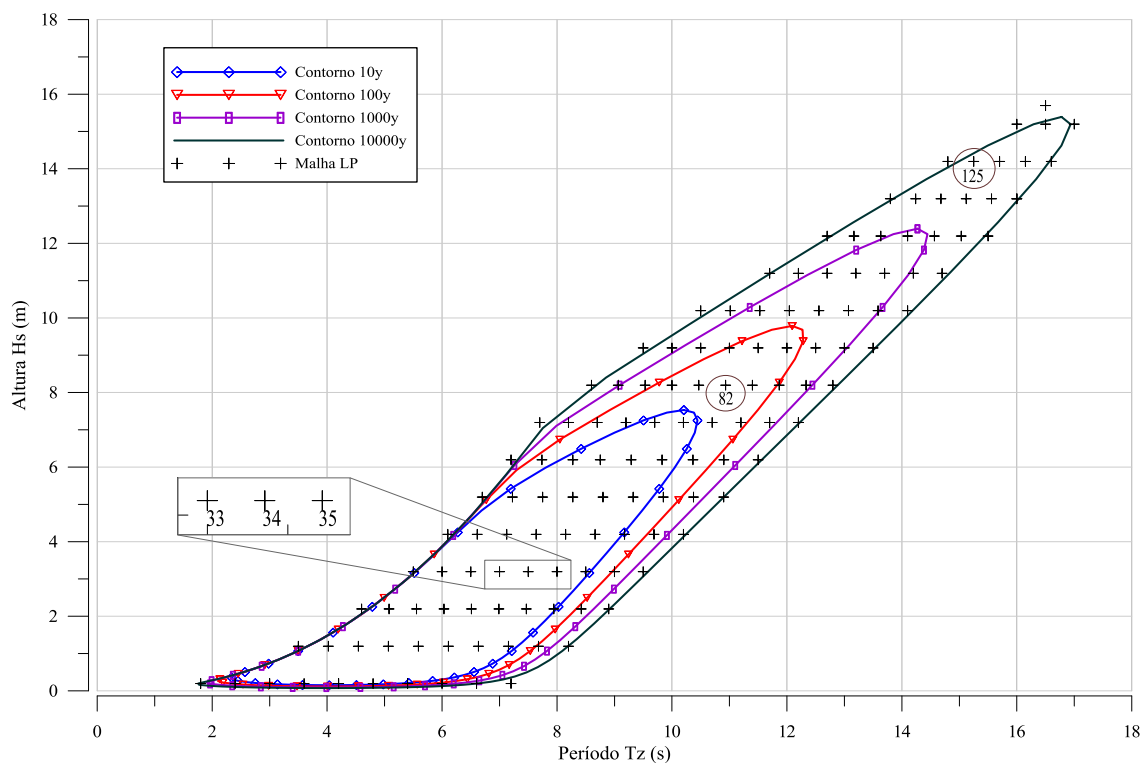


Figura IV.3 – Estudo de Caso 1, Malha de interpolação de 132 pontos.

### IV.3.2 Análises de calibração

Neste estudo de caso, as cinco análises dinâmicas aleatórias executadas no modelo de elementos finitos realizadas para a calibração do polinômio que representa o passeio do TDP, definido no item II.9, são mostradas na Tabela IV.4. Estas análises são referentes a dois casos *near*, dois casos *far* e um caso com *offset* nulo, tendo sido utilizados casos equivalentes a centenários e anuais (ondas, correntes e *offsets* alinhados de acordo com o sistema de referência mostrado na Figura IV.4) procurando-se cobrir a faixa média dos *offsets* para uma plataforma semi-submersível. Para os cinco casos foi usada uma única corrente de tipo triangular, com velocidade de 0.8m/s na superfície e nula no fundo.

Tabela IV.4– Estudo de Caso 1, Casos analisados para calibração do polinômio que aproxima o passeio do TDP.

Caso	Onda			Offset % LDA	Direção (Figura IV.4)
	Hs (m)	Tp (s)	Azimuth (deg)		
1	6.0	12.0	270	3	<i>Near</i>
2	10.0	15.0	270	6	<i>Near</i>
3	6.0	12.0	90	3	<i>Far</i>
4	10.0	15.0	90	6	<i>Far</i>
5	6.0	13.0	270	--	<i>Near</i>

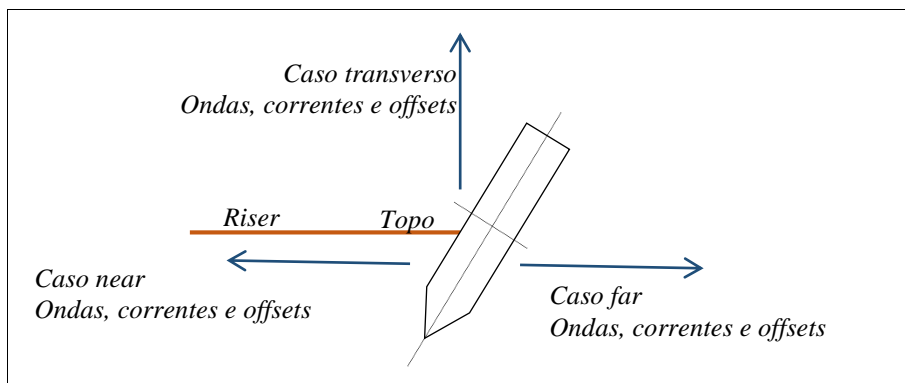


Figura IV.4 – Definição das direções dos carregamentos ambientais e offset do SCR.

Conforme a Tabela IV.5, a posição do momento fletor máximo na região do TDP calculada em função do parâmetro  $\lambda$  da Equação (II-54) foi de aproximadamente  $8\lambda$ . Esta posição foi definida após o processamento das cinco análises dinâmicas aleatórias, das quais os resultados têm vários propósitos: servem para a calibração dos coeficientes do polinômio que aproxima o passeio do TDP; permitem gerar envoltórias do momento fletor na TDZ; e possibilitam estimar a posição média onde ocorre o momento fletor máximo, como se pode observar na Figura IV.5 e na Tabela IV.5.

Tabela IV.5– Estudo de Caso 1: Posição média do momento fletor máximo (\*\*Distância da âncora).

Caso	**Posição do momento fletor estático máximo (m)	**TDP (m)	Posição em função de $\lambda$	Parâmetro $\lambda$ (m)
1	512.3	450.7	7.5	8.2
2	527.8	463.1	7.8	8.3
3	484.3	427.2	7.2	7.9
4	491.5	410.8	10.4	7.7
5	500.8	441.4	7.4	8.1

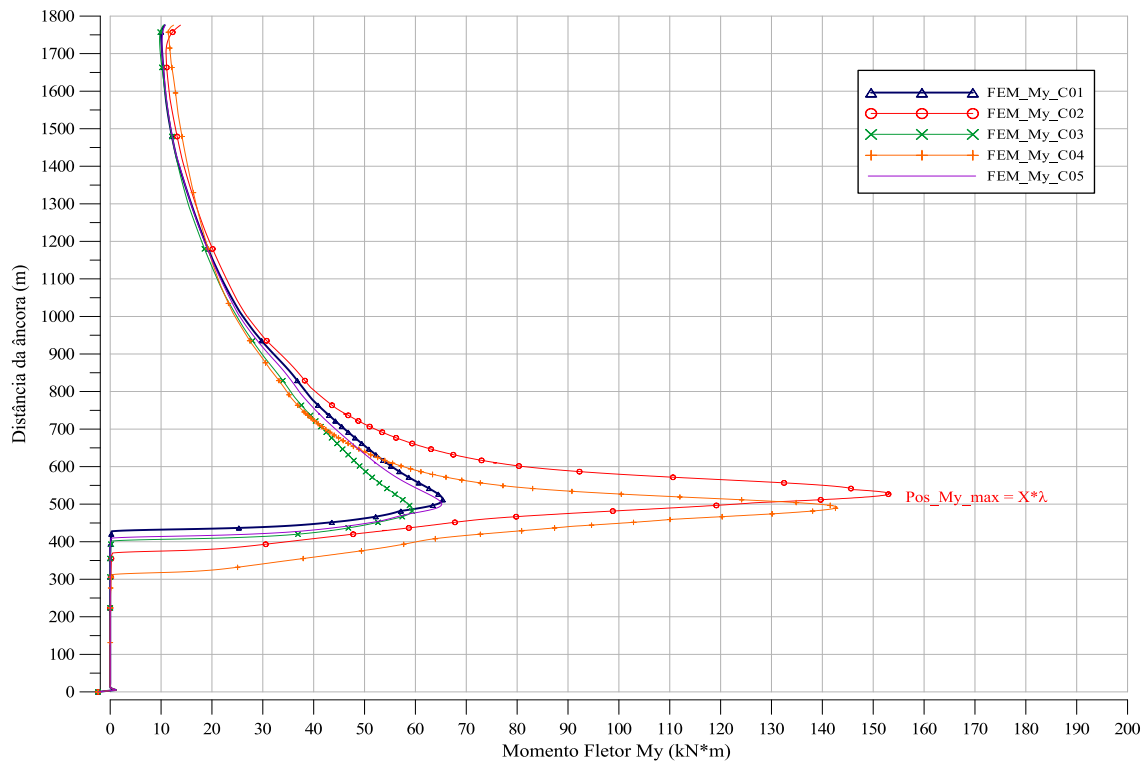


Figura IV.5 – Estudo de Caso 1: Envoltórias de momentos fletores das análises (FEM) para calibração do modelo semi-analítico.

### IV.3.3 Posição do TDP estático

Os valores referentes à posição do TDP estático são apresentados na Tabela A.2 do Anexo A e indicados graficamente na Figura IV.6. É possível observar que as diferenças entre os resultados de ambos os modelos são mínimas, já que as diferenças em relação aos resultados FEM observadas apresentam seus valores máximos em torno de 3.2m, equivalente a  $0.39\lambda$  ( $\lambda=8.1\text{m}$ ). Isto indica a validade das premissas consideradas na equação da catenária chamada de “catenária corrigida”, descritas no item II.4, para acertar a posição do TDP estático.

A comparação dos valores referentes ao parâmetro  $\lambda$ , à tração e ao momento fletor estáticos calculados com ambos os modelos são apresentados na mesma tabela, a Tabela A.2. Pode-se observar que as diferenças dos resultados entre ambos os modelos foi inferior a 2%.

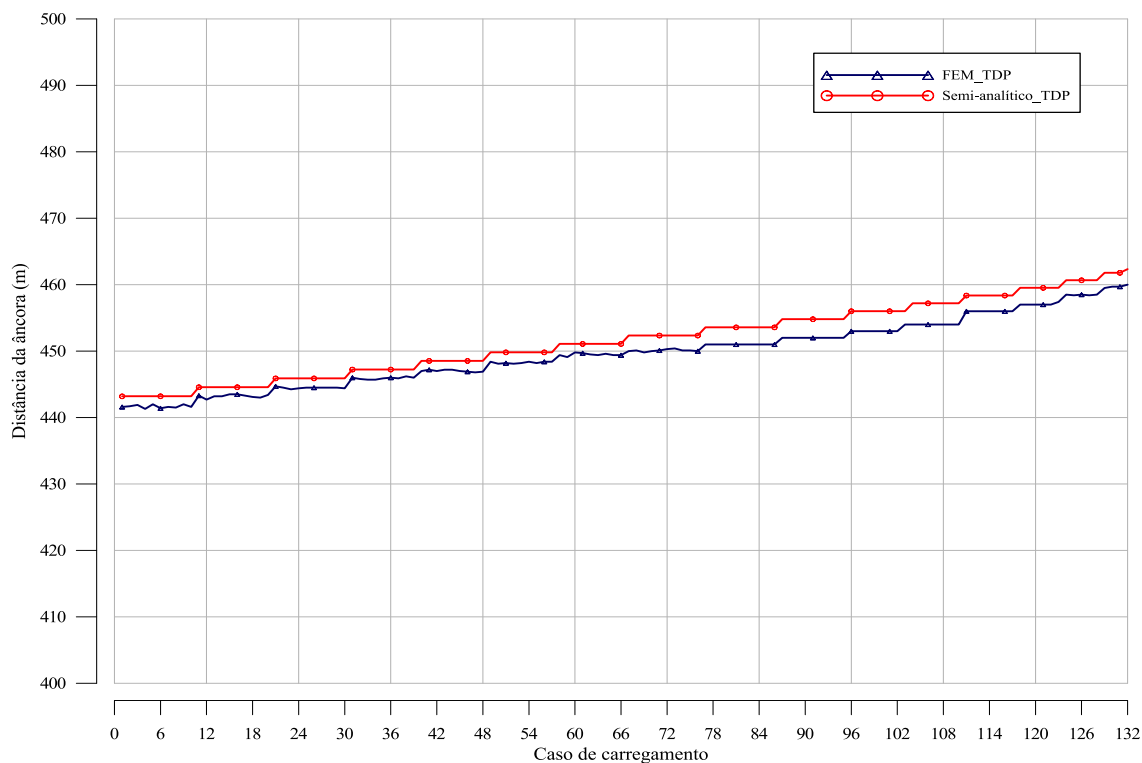


Figura IV.6 – Estudo de Caso 1: Posição do TDP estático (FEM vs. Semi-analítico).

#### IV.3.4 Resultados das análises de Curto Prazo

Como já foi ilustrado na Figura II.3, para avaliar a resposta de curto prazo em termos do fator de utilização é necessário gerar séries temporais de movimentos no topo do *riser* e, a partir daí, calcular o passeio do TDP e as séries de trações e momentos fletores para análises aleatórias. O pós-processamento dessas séries temporais vai gerar séries temporais de fatores de utilização dos estados de mar de curto prazo.

Devido à grande quantidade de resultados gerados para os estados de mar de curto prazo, que torna inviável a apresentação de toda a sua totalidade, foram escolhidos dois casos de carregamento que têm características dinâmicas distintas para apresentar detalhes dos resultados, em termos dos parâmetros estatísticos das séries temporais de trações, momentos fletores e fatores de utilização.

Os dois casos de carregamento selecionados neste exemplo são: o 82 ( $H_s=8.2m$ ,  $T_z=10.93s$ ) e o 125 ( $H_s=14.2m$ ,  $T_z=15.25s$ ) (vide Figura IV.3 e Tabela A.1). Para os dois casos selecionados, foram analisadas posições distintas da TDZ, variando desde  $-\lambda$  a  $10\lambda$ ,



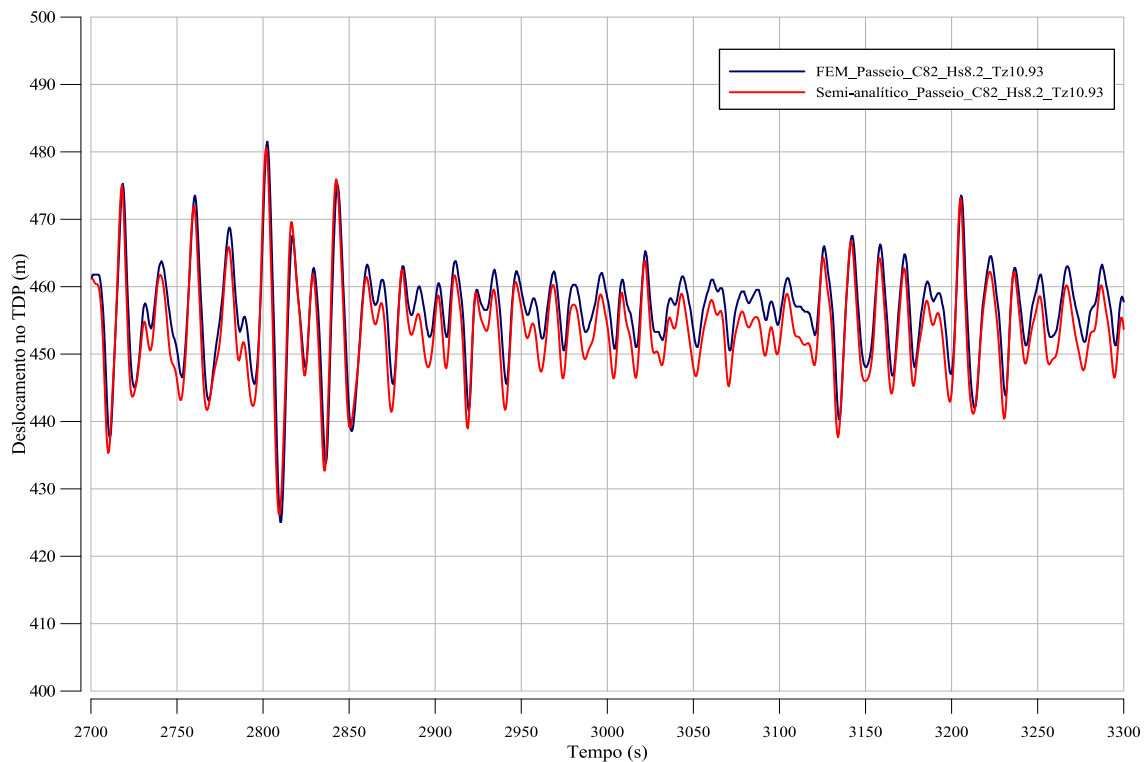
coabrindo toda a faixa de variação do passeio do TDP, onde a posição  $-\lambda$  corresponde ao TDP estático.

- **Caso de carregamento 82 ( $H_s=8.2\text{m}$ ,  $T_z=10.93\text{s}$ )**

A Figura IV.7 apresenta séries temporais de passeio do TDP para o carregamento 82, obtidos pela aproximação polinomial proposta na seção II.9 desta tese e pelo modelo FEM. Observa-se que a aproximação pode ser considerada satisfatória, devido à pequena diferença entres os valores de picos (máximos e mínimos), os quais apresentam desvios máximos de 1.1m, aproximadamente iguais a  $0.1\lambda$  ( $\lambda=8.2\text{m}$ ) conforme mostrado na Tabela IV.6.

*Tabela IV.6– Estudo de Caso 1: Caso de Carregamento 82: Parâmetros estatísticos do passeio do TDP (m), (FEM vs. Semi-analítico).*

Caso	Origem	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
82	FEM	456.1	7.1	481.8	425.1
	Semi-analítico	453.4	7.5	482.9	424.1



*Figura IV.7 – Estudo de Caso 1: Caso de Carregamento 82, Séries temporais de passeio do TDP (FEM vs. Semi-analítico).*

A Tabela IV.7 apresenta uma comparação entre os dois modelos para os resultados de tração (estática +dinâmica), avaliada 10m após do TDP estático. Como pode ser observado, as diferenças entre valores máximos e mínimos obtidos pelo FEM e pela formulação analítica foram inferiores a 3%.

Tabela IV.7– Estudo de Caso 1: Caso de Carregamento 82: Parâmetros estatísticos da série de tração (kN) na TDZ (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	Modelo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
82	FEM	409.2	33.3	578.7	278.7
	Semi-analítico	404.5	28.4	561.8	279.9

Séries temporais da parcela dinâmica da tração na TDZ para o caso de carregamento 82 são apresentadas na Figura IV.8, onde pode-se observar que os sinais são muito próximos na maior parte do tempo, ocorrendo diferenças semelhantes a um fator de escala somente nos instantes de máximos e mínimos.

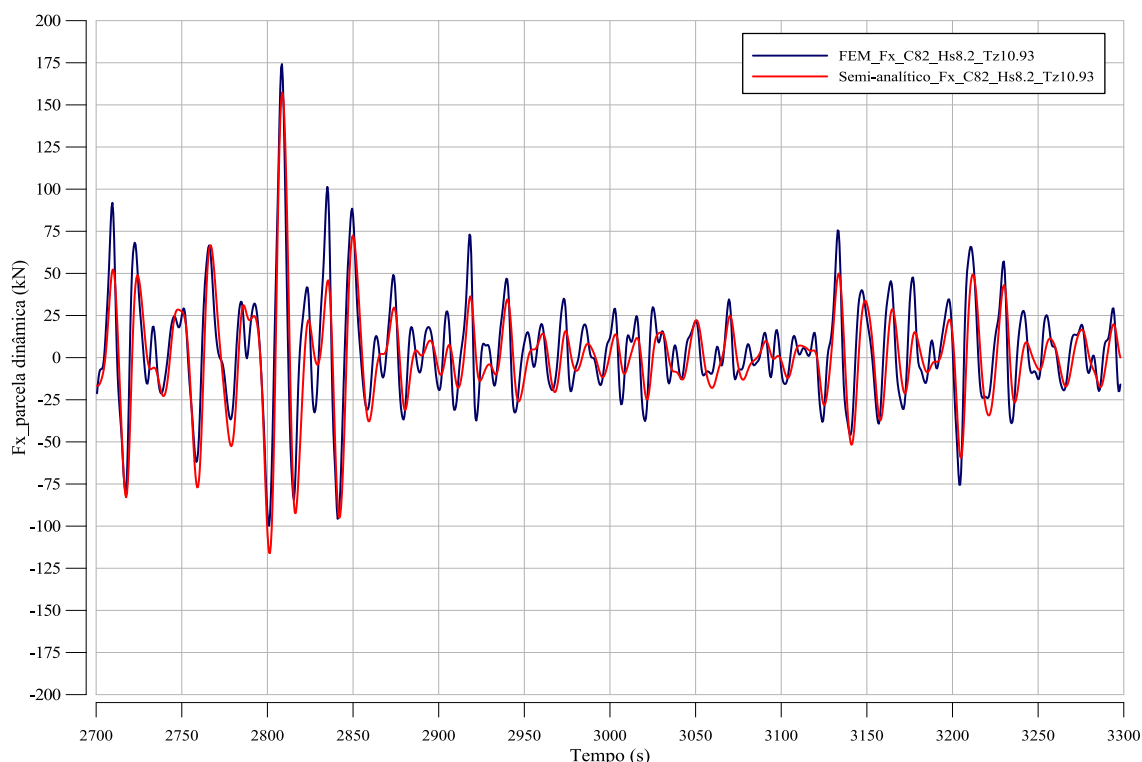


Figura IV.8 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 82: Séries temporais da parcela dinâmica da tração no TDP (FEM vs. Semi-analítico).

As diferenças dos picos da tração nos instantes de máximos e mínimos são devidas ao comportamento dinâmico intenso do *riser* na TDZ, o que faz com que a resposta da

tração não seja exatamente dependente do comprimento efetivo do *riser*, definido como indicado na Equação (II-44).

Continuando com a metodologia apresentada na Figura II.3, uma vez obtidas as séries de tração e de passeio no TDP é possível calcular os momentos fletores, apresentados a seguir na Tabela IV.8. Pode-se observar que o método semi-analítico foi capaz de prever os momentos fletores máximos de forma eficiente para o caso 82, visto que foram observadas diferenças inferiores a 10% nas posições acima de  $2\lambda$ . Isto pode ser visto graficamente na Figura IV.9, que mostra as séries temporais de momentos fletores obtidos com ambas metodologias na posição  $6\lambda$ , onde foi observada a mínima diferença para os valores máximos.

Já nas posições mais próximas ao TDP (posições entre  $-\lambda$  e  $2\lambda$ ), as diferenças dos máximos obtidos para ambos modelos são maiores, chegando a ser até 15.3% na posição  $-\lambda$ . Isso se deve principalmente à influência das diferenças dos picos na tração dinâmica obtida no modelo FEM (vide Figura IV.8), sendo esta influência mais notória nas proximidades do TDP, onde o momento fletor é majoritariamente estático e muda rapidamente ante qualquer perturbação dinâmica.

Em relação aos mínimos, foram observadas algumas diferenças nas posições menores que  $2\lambda$ . A razão para tais diferenças é o fato de que os momentos pelo modelo semi-analítico apresentam um limite mínimo (zero), que ocorre quando um dado elemento toca o solo atingindo uma configuração horizontal, o que depende fortemente de uma avaliação precisa do passeio do TDP e da tração dinâmica. Por isso, as maiores diferenças ocorrem nas posições  $-\lambda$  a  $+\lambda$ , nas quais o *riser* tem maiores possibilidades de assumir uma posição horizontal. A Figura IV.10 apresenta as séries temporais de momentos fletores para a posição “0”. Pode-se observar que o comportamento das séries é semelhante na maior parte do tempo com diferenças em alguns pontos de máximos. Da mesma forma, é possível observar o limite inferior, igual a zero, nos pontos de mínimos na série obtida no modelo semi-analítico.

Tabela IV.8– Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 82: Parâmetros estatísticos dos momentos fletores na TDZ (kN\*m),  $\lambda=8.2m$  (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	Posição	Modelo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
82	$-\lambda$	FEM	13.8	13.7	50.3	-0.8
		Semi-analítico	10.6	13.3	42.6	0.0
	0	FEM	26.0	14.2	53.6	-3.0
		Semi-analítico	27.8	14.1	45.4	0.0
	$1\lambda$	FEM	41.7	7.2	59.0	-1.5
		Semi-analítico	40.9	8.4	50.3	0.0
	$2\lambda$	FEM	46.9	3.6	62.5	4.2
		Semi-analítico	47.1	3.5	55.2	0.0
	$3\lambda$	FEM	48.9	3.3	66.7	36.5
		Semi-analítico	49.6	2.4	60.5	26.9
	$4\lambda$	FEM	49.7	3.6	69.7	37.3
		Semi-analítico	50.6	3.0	65.9	36.6
	$5\lambda$	FEM	49.8	3.8	70.8	37.7
		Semi-analítico	51.0	3.4	70.1	36.6
	$6\lambda$	FEM	49.8	3.7	71.9	38.0
		Semi-analítico	51.1	3.6	72.2	36.6
	$7\lambda$	FEM	49.7	3.6	70.8	38.4
		Semi-analítico	51.2	3.7	73.1	36.6
	$8\lambda$	FEM	49.5	3.5	69.8	38.7
		Semi-analítico	50.4	3.7	72.7	35.9
	$9\lambda$	FEM	49.3	3.3	67.8	39.0
		Semi-analítico	50.2	3.5	71.6	36.3
$10\lambda$	FEM	49.0	3.1	65.9	39.2	
	Semi-analítico	50.0	3.4	70.5	36.7	

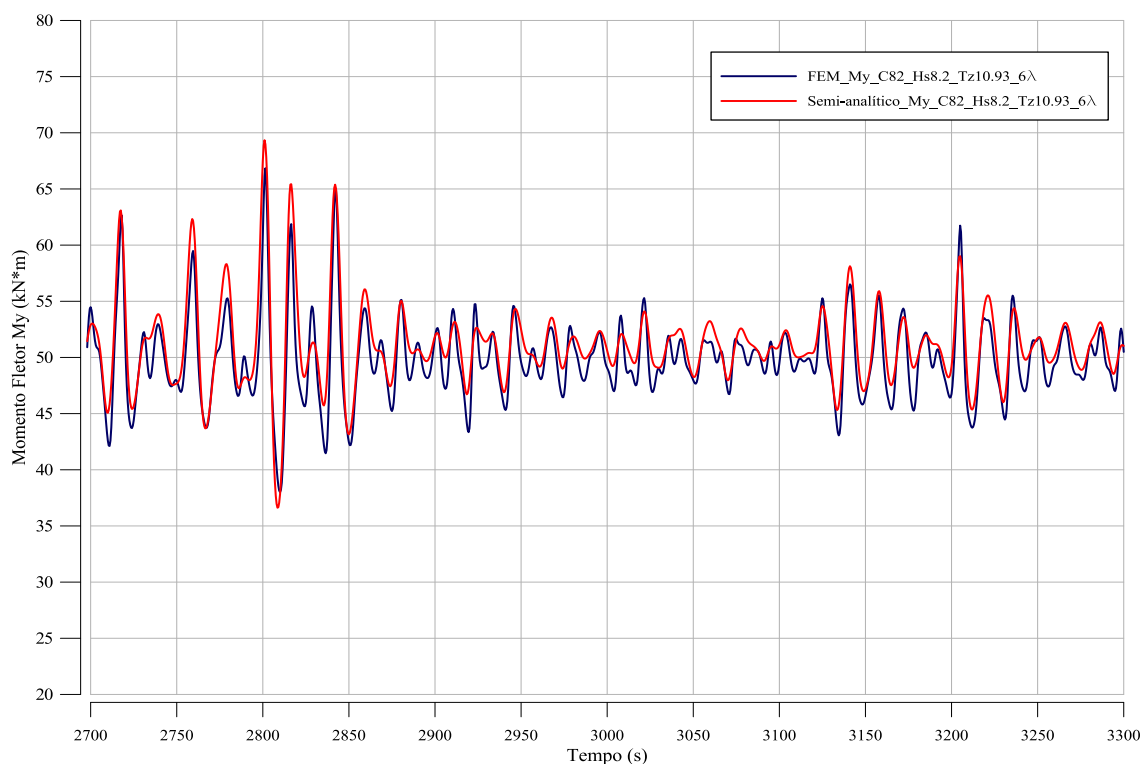


Figura IV.9 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 82: Séries temporais de momentos fletores no TDZ. Posição  $6\lambda$  (FEM vs. Semi-analítico).

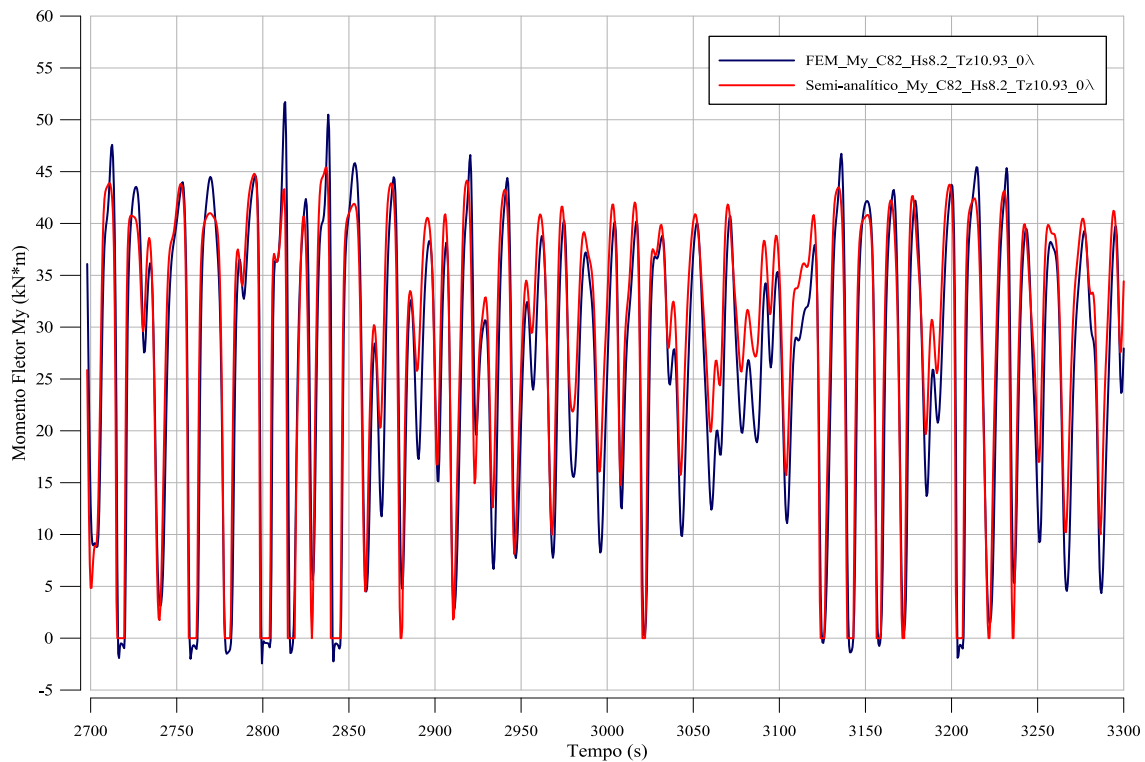


Figura IV.10 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 82: Séries temporais de momentos fletores no TDZ. Posição 0 (FEM vs. Semi-analítico).

Quando são calculados os fatores de utilização de curto prazo (DNV-OS-F201 versão LRFD), observa-se que os mesmos não são afetados significativamente pelas diferenças encontradas entre os modelos semi-analítico e FEM nas avaliações individuais do passeio, tração e momentos fletores na região do TDP. A Tabela IV.9 apresenta a comparação dos valores obtidos. Como pode ser observado, ainda pela análise da mesma tabela, as diferenças entre valores máximos sempre foi inferior a 6%. Já na Figura IV.11 são mostrados graficamente os fatores de utilização apenas na posição  $6\lambda$ , observando-se grande concordância entre ambos modelos.

Tabela IV.9– Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 82: Parâmetros estatísticos dos fatores de utilização de curto prazo na TDZ,  $\lambda=8.2m$  (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	Posição	Modelo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	VMP Extremo
82	$-\lambda$	FEM	0.06	0.03	0.14	0.04	0.14
		Semi-analítico	0.05	0.04	0.13	0.02	0.13
	0	FEM	0.09	0.02	0.14	0.05	0.14
		Semi-analítico	0.09	0.04	0.13	0.02	0.14
	$1\lambda$	FEM	0.12	0.01	0.15	0.05	0.15
		Semi-analítico	0.12	0.02	0.15	0.02	0.15
	$2\lambda$	FEM	0.13	0.01	0.16	0.06	0.16
		Semi-analítico	0.14	0.01	0.16	0.02	0.16
	$3\lambda$	FEM	0.13	0.01	0.17	0.11	0.17
		Semi-analítico	0.14	0.01	0.17	0.10	0.17
	$4\lambda$	FEM	0.13	0.01	0.18	0.11	0.18
		Semi-analítico	0.14	0.01	0.18	0.11	0.18
	$5\lambda$	FEM	0.13	0.01	0.18	0.11	0.19
		Semi-analítico	0.14	0.01	0.19	0.10	0.19
	$6\lambda$	FEM	0.13	0.01	0.19	0.11	0.19
		Semi-analítico	0.14	0.01	0.19	0.10	0.20
	$7\lambda$	FEM	0.13	0.01	0.18	0.11	0.19
		Semi-analítico	0.13	0.01	0.19	0.10	0.20
	$8\lambda$	FEM	0.13	0.01	0.18	0.11	0.18
		Semi-analítico	0.13	0.01	0.19	0.10	0.19
$9\lambda$	FEM	0.13	0.01	0.18	0.11	0.18	
	Semi-analítico	0.13	0.01	0.18	0.10	0.19	
$10\lambda$	FEM	0.13	0.01	0.17	0.11	0.17	
	Semi-analítico	0.13	0.01	0.18	0.10	0.19	

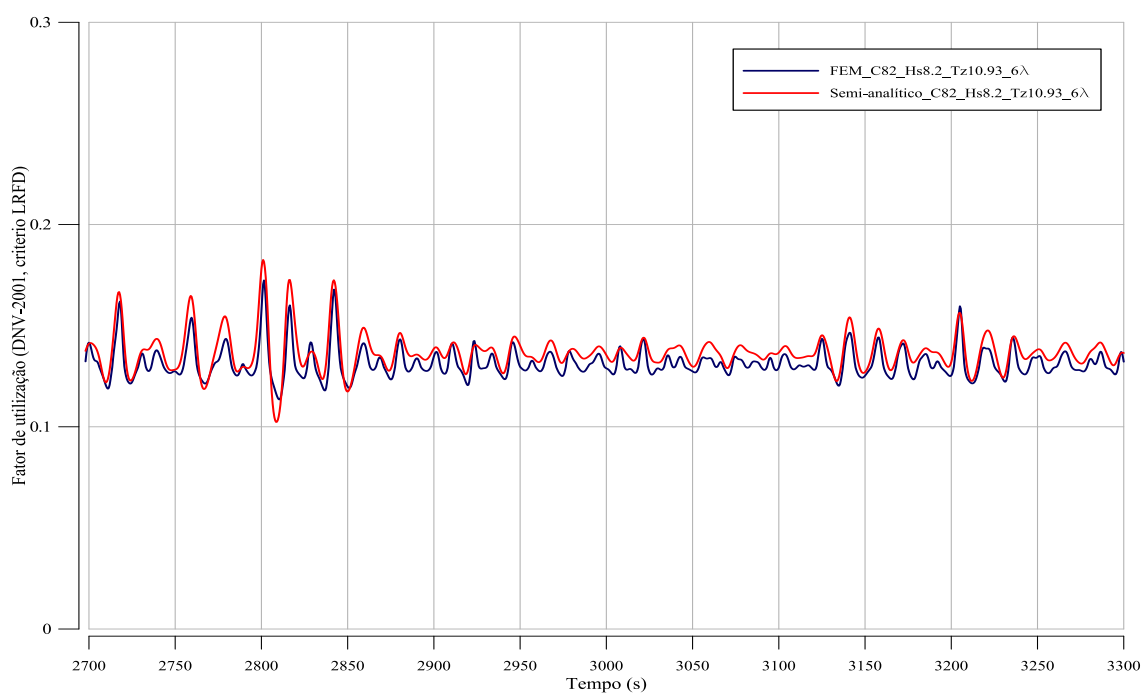


Figura IV.11 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 82: Séries temporais de fatores de utilização de curto prazo na região do TDP. Posição  $6\lambda$  (FEM vs. Semi-analítico).

O gráfico da Figura IV.12 ilustra um ajuste de uma distribuição de Weibull para os picos da série apresentada na Figura IV.11, usando a técnica *Weibull Tail Fitting* (ZURITA, 1999). Nesta figura, a distribuição de Rayleigh é representada por uma linha reta a 45 graus. Verifica-se o comportamento não-linear deste parâmetro de resposta, pois a distribuição ajustada é bastante distinta da distribuição de Rayleigh. Observa-se que na análise de extremos a região mais importante é a cauda superior, região que é privilegiada em técnicas como a *Weibull Tail Fitting*. Nesta técnica, os parâmetros de forma ( $\alpha_w$ ) e escala ( $\lambda_w$ ) da distribuição são calculados ajustando-se uma distribuição *Weibull* unicamente a picos com probabilidade de excedência acima de 65%, desprezando-se os demais.

No gráfico da Figura IV.13, é apresentada a comparação da estimativa dos valores extremos máximos mais prováveis do fator de utilização obtidos com ambos modelos ao longo de um trecho do *riser*. A estimativa de valores extremos foi avaliada a cada metro ao longo do *riser*. Como pode ser observado, o método semi-analítico foi capaz de prever os fatores de utilização de forma eficiente, visto que foram observadas diferenças inferiores a 5% no valor máximo do extremo mais provável na região do TDP, sendo um valor de 0.19 no modelo FEM e 0.20 para o modelo semi-analítico.

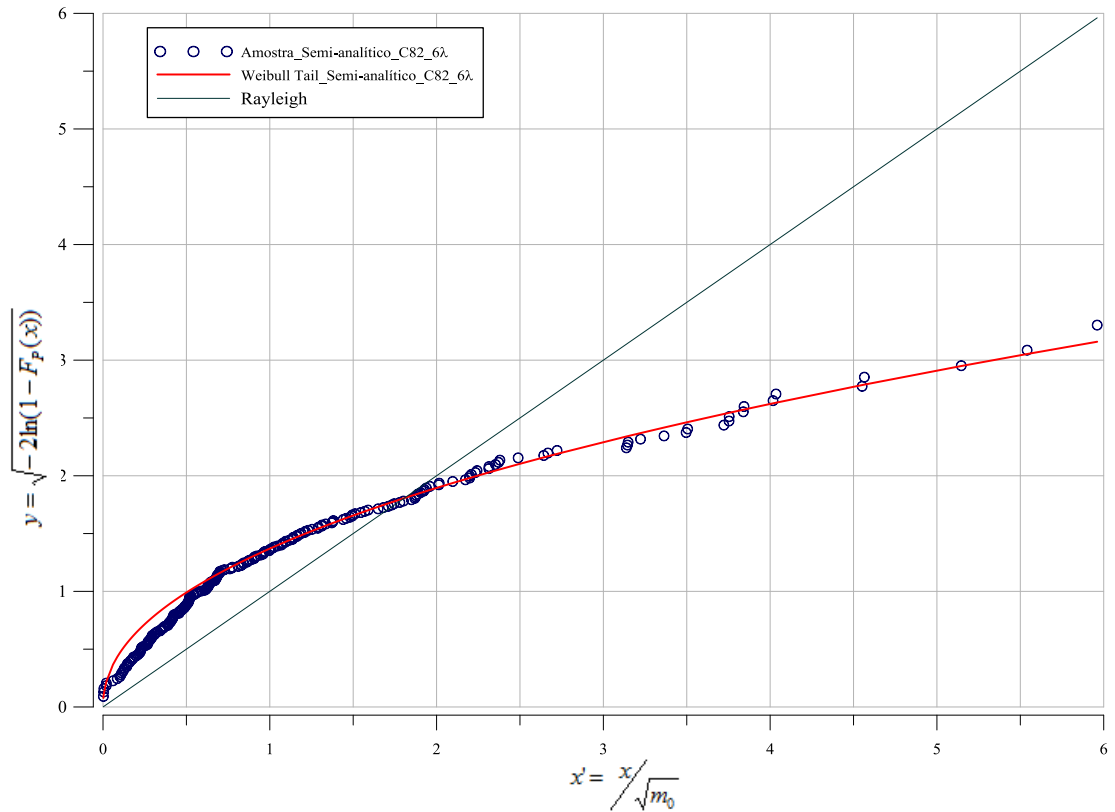


Figura IV.12 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 82: Ajuste dos picos dos fatores de utilização de curto prazo na região do TDP. Posição 6λ (FEM vs. Semi-analítico).

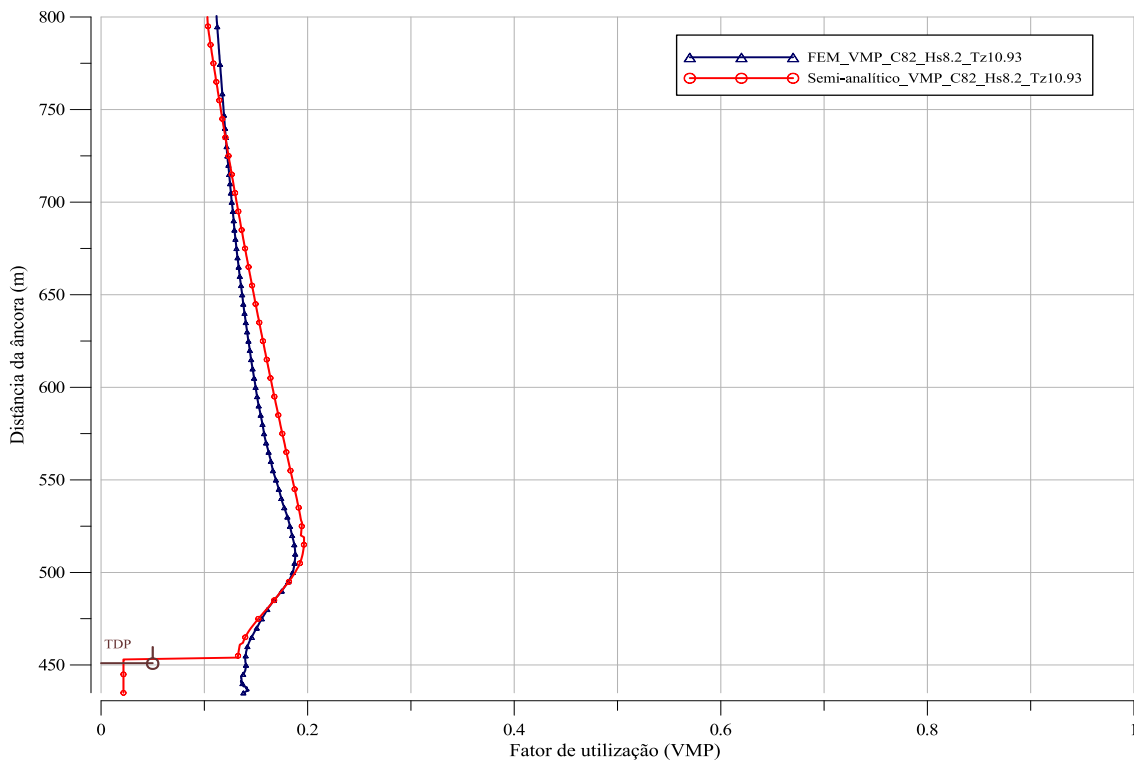


Figura IV.13 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 82: Valores extremos máximos mais prováveis do fator de utilização de curto prazo (FEM vs. Semi-analítico).

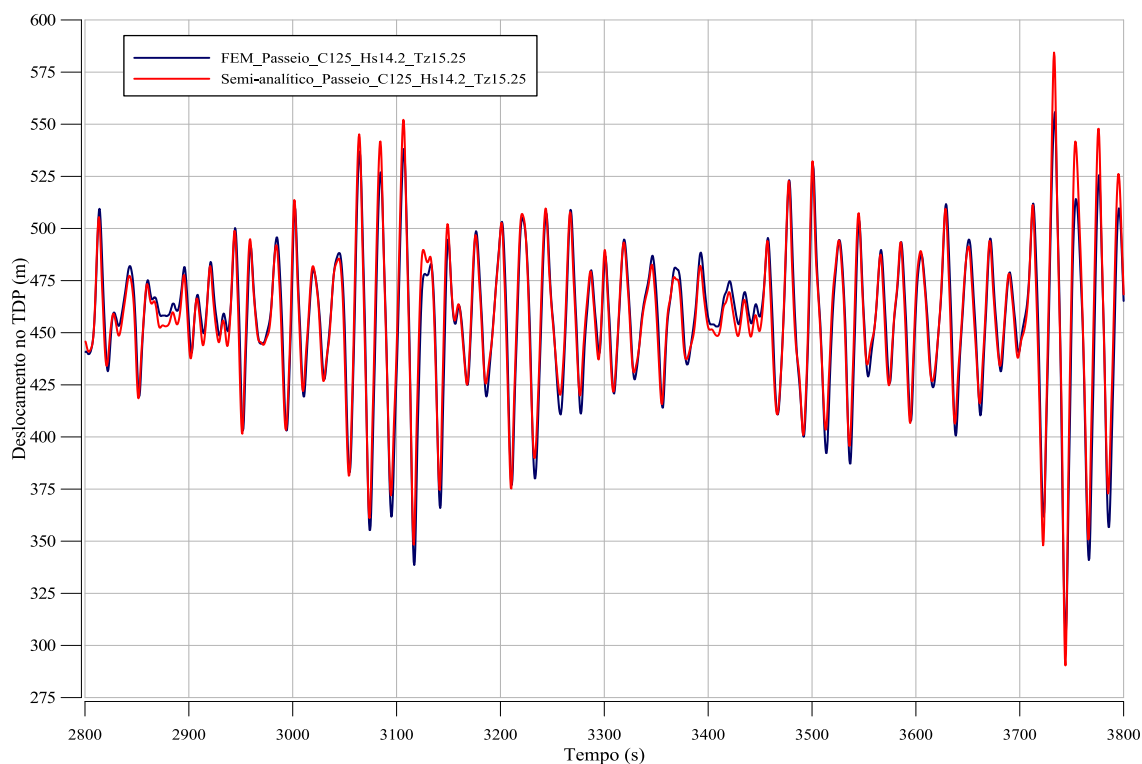


- **Caso de carregamento 125 (Hs=14.2m, Tz=15.2s)**

O segundo caso escolhido neste estudo de caso 1 foi o carregamento 125 (Hs=14.2m, Tz=15.2s), que representa um estado de mar muito severo (deca milenar), conforme o apresentado na Figura IV.3.

A Figura IV.14 e a Tabela IV.10 apresentam uma comparação das séries temporais do passeio do TDP e os resultados estatísticos, respectivamente, obtidas com ambos modelos. Novamente, pode-se observar, que os resultados obtidos pela aproximação polinomial descrita na Equação (II-60) apresentam, de forma geral, uma boa concordância.

É possível observar que, para esse caso, os deslocamentos no TDP apresentam uma amplitude máxima da ordem de 250m. No entanto, a aproximação polinomial tem um comportamento convergente com os valores obtidos no modelo FEM, mostrando diferenças apenas nos picos de máximos, que são superestimados no modelo semi-analítico com desvios máximos de  $3.8\lambda$  ( $\lambda=8.3\text{m}$ ) equivalentes a 31.2m que representa uma diferença entre ambos modelos de 6%.



*Figura IV.14 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 125: Séries temporais de passeio do TDP (FEM vs. Semi-analítico).*

Tabela IV.10– Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 125: Parâmetros estatísticos do passeio do TDP (m), (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	Origem	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
125	FEM	457.1	29.6	555.9	306.9
	Semi-analítico	459.4	28.7	587.1	293.1

A seguir, a Tabela IV.11 mostra uma comparação em termos de parâmetros estatísticos da tração (estática + dinâmica) na região do TDP obtida com ambos modelos. É possível observar que o único parâmetro que apresenta boa concordância é a média com diferença de 3%, porém, não é um parâmetro representativo por si só. Já na Figura IV.15, se pode observar diferenças significativas na comparação das séries temporais de tração no TDP. Notam-se desvios nos picos de máximos e de mínimos de 8% e 24%, respectivamente. Os maiores desvios relativos aos picos de mínimos são justificados pelo fator limite para a tração dinâmica. É necessário estabelecer este limite para a tração dinâmica mínima de modo a evitar que o momento fletor tenda ao infinito, o que ocorre se o denominador da Equação (II-59) se anular, ou seja, se a tração dinâmica for igual a  $-T_0$ . O fator adotado para todos os casos de estudo neste trabalho foi de 77% da tração estática no TDP, sendo de 303.42kN para esse caso de carregamento.

Com relação aos picos máximos de tração neste caso de carregamento, observam-se diferenças significativas entre ambos os modelos estudados, cujos resultados apresentam discrepâncias em seus valores máximos no entorno de 118kN (8%). Essa diferença está associada principalmente a uma dinâmica muito intensa, que apresenta uma amplitude de *heave* de até 15m no topo do *riser*. Desta forma, a dinâmica acentuada leva à ocorrência de compressão dinâmica ao longo do comprimento do *riser*. A Figura IV.16, que apresenta as envoltórias de valores máximos e mínimos da tração dinâmica obtidas no modelo FEM, ilustra a ocorrência de compressão dinâmica. Este comportamento extrapola a faixa de aplicação do modelo semi-analítico aqui usado, que foi idealizado supondo que a linha esteja sempre tracionada.

Tabela IV.11– Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 125: Parâmetros estatísticos da série de tração (kN) na TDZ (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	Modelo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
125	FEM	413.3	170.9	1590.6	-396.33
	Semi-analítico	400.4	151.0	1472.2	-303.42

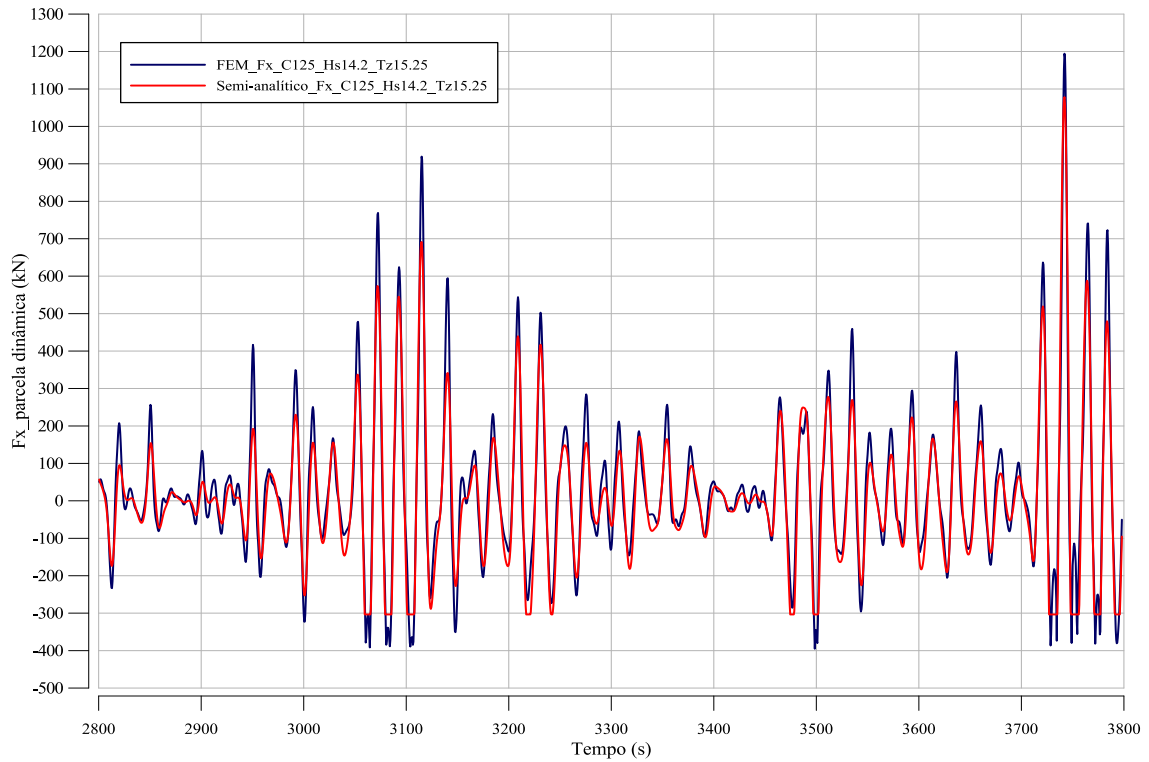


Figura IV.15 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 125, Séries temporais da parcela dinâmica da tração no TDP (FEM vs. Semi-analítico).

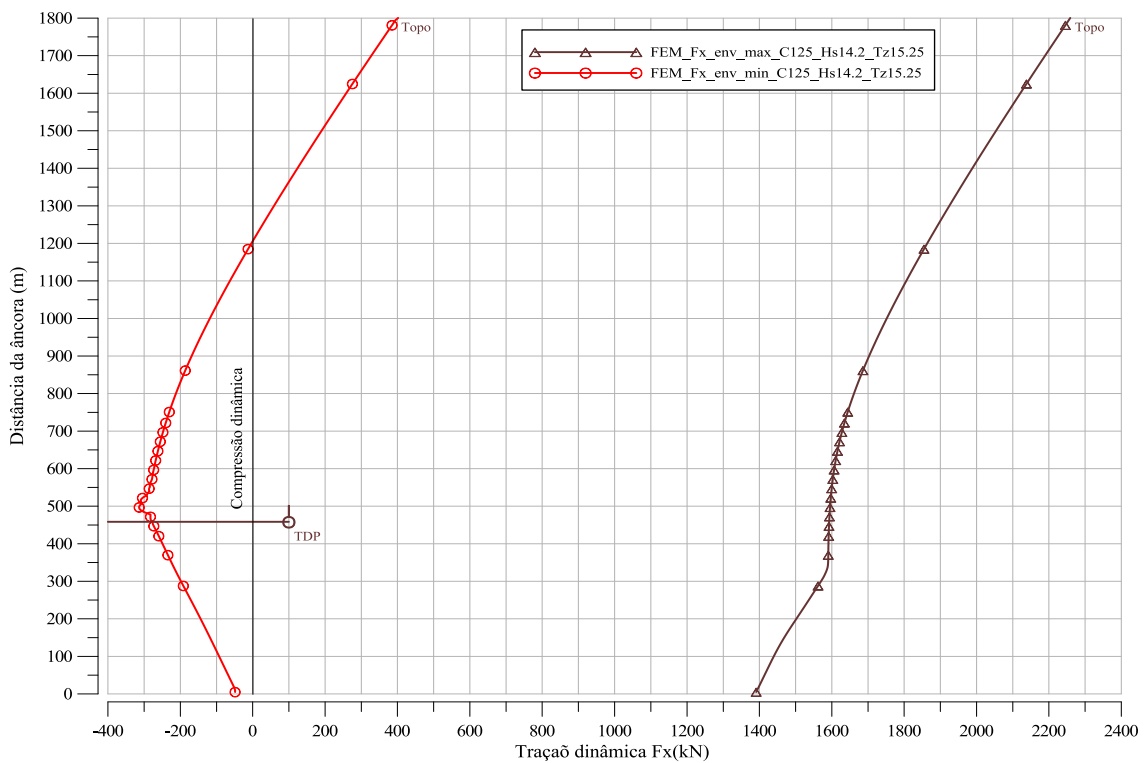


Figura IV.16 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 125: Envoltórias de máximos e mínimos da tração dinâmica ao longo do comprimento do riser (FEM).

O gráfico da Figura IV.17 apresenta uma comparação entre os espectros de tração obtidos com ambos os modelos. Como se pode observar, os espectros são semelhantes, no entanto, o espectro calculado para a tração obtida analiticamente apresenta um pico menor do que o espectro obtido pelo modelo FEM. Esta diferença deve-se à influência do comprimento efetivo do *riser* (termo  $l+l'$  da Equação (II-44)) usada para o cálculo da tração elástica, já que, nos casos *far*, *crossfar* e *transverso* (exemplo caso 125), o comprimento do *riser* suspenso (termo  $l$ ) tende a ser maior que nos casos *near*, o que reduz o termo de tração elástica reduzindo, conseqüentemente, a tração dinâmica.

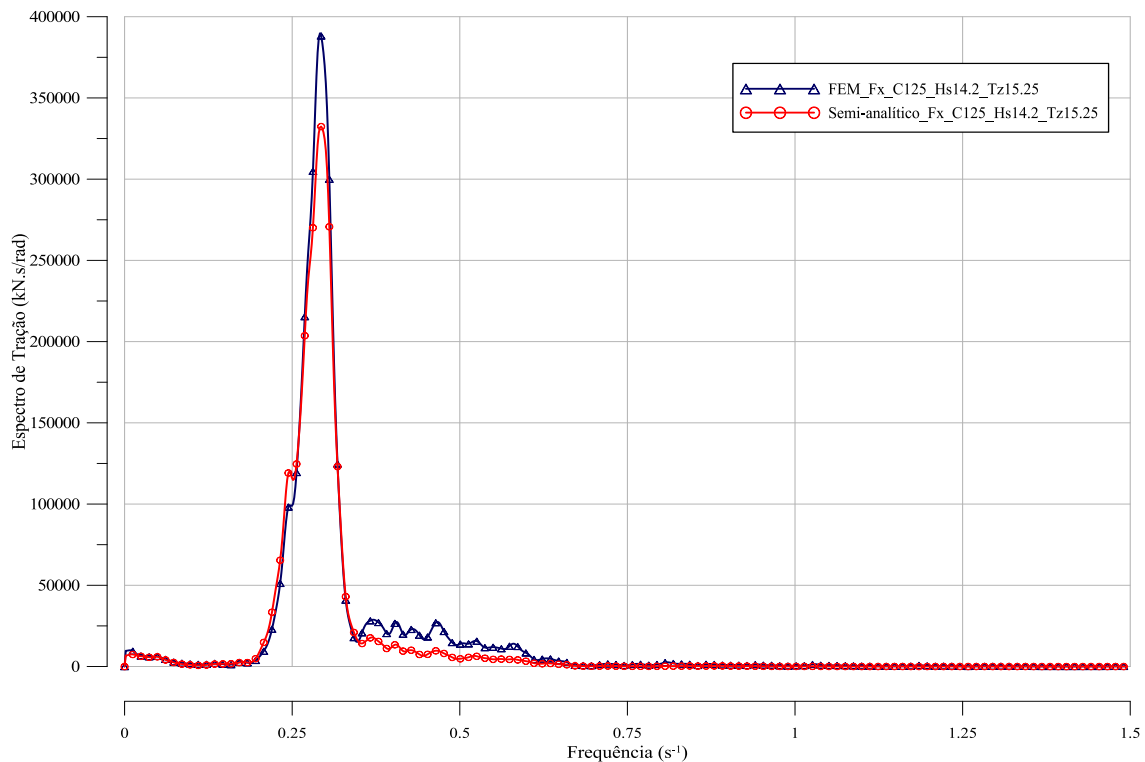


Figura IV.17 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 125: Comparação entre espectros de tração no TDP (FEM vs. Semi-analítico).

A Tabela IV.12 compara os resultados obtidos para os momentos fletores com ambos os modelos. Como pode ser observado, o método semi-analítico não foi capaz de prever os picos máximos de momentos fletores de forma eficiente, visto que foram encontradas diferenças muito grandes, chegando a ser acima do dobro nas posições entre  $8$  e  $10\lambda$ .

No entanto, foi observado que os resultados do modelo semi-analítico foram concordantes com os obtidos no modelo FEM na maior parte do tempo na série temporal de momentos fletores. Pode-se observar este comportamento mais claramente no gráfico

da Figura IV.18, onde é mostrada a comparação das séries de momentos fletores calculadas com ambos modelos para este caso de carregamento na posição  $5\lambda$ . Nota-se que os picos de máximos em ambas as séries coincidem apenas em algumas partes da série temporal. Diferenças muito grandes são observadas nos instantes em que acontece o pico máximo, o qual é associado por sua vez à ocorrência de compressão dinâmica no *riser*. Neste caso, as diferenças representam uma limitação do modelo semi-analítico proposto para os casos onde ocorre compressão dinâmica.

No caso dos picos mínimos, foram observadas diferenças significativas. Da mesma forma que no caso de carregamento anterior (caso 82), a razão para tais diferenças é o fato da existência de um limite mínimo (zero) do modelo semi-analítico.

*Tabela IV.12– Estudo de Caso 1- Caso de Carregamento 125: Parâmetros estatísticos dos momentos fletores na TDZ (kN\*m),  $\lambda=8.3m$  (FEM vs. Semi-analítico).*

Caso	Posição	Modelo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
125	$-\lambda$	FEM	18.3	20.0	179.4	-25.8
		Semi-analítico	16.7	19.0	196.2	0.0
	0	FEM	26.6	20.3	224.3	-22.9
		Semi-analítico	24.0	20.8	201.8	0.0
	$1\lambda$	FEM	33.2	19.8	286.4	-15.7
		Semi-analítico	31.5	21.4	210.7	0.0
	$2\lambda$	FEM	38.8	19.0	286.0	-12.3
		Semi-analítico	38.5	21.2	216.2	0.0
	$3\lambda$	FEM	43.6	18.3	340.2	-26.1
		Semi-analítico	44.2	21.3	219.6	0.0
	$4\lambda$	FEM	46.8	18.1	395.5	-27.6
		Semi-analítico	48.9	21.9	221.8	0.0
	$5\lambda$	FEM	49.1	18.9	410.8	-73.5
		Semi-analítico	52.5	23.4	223.1	0.0
	$6\lambda$	FEM	50.7	20.2	410.8	-132.1
		Semi-analítico	55.1	25.8	223.9	0.0
	$7\lambda$	FEM	51.4	21.1	426.9	-180.5
		Semi-analítico	57.1	28.3	224.4	0.0
	$8\lambda$	FEM	51.5	21.7	412.8	-213.7
		Semi-analítico	57.7	30.6	223.8	0.8
$9\lambda$	FEM	51.2	21.5	434.4	-225.3	
	Semi-analítico	58.2	30.6	213.3	2.1	
$10\lambda$	FEM	50.7	20.7	473.5	-193.3	
	Semi-analítico	58.3	30.4	203.5	4.8	

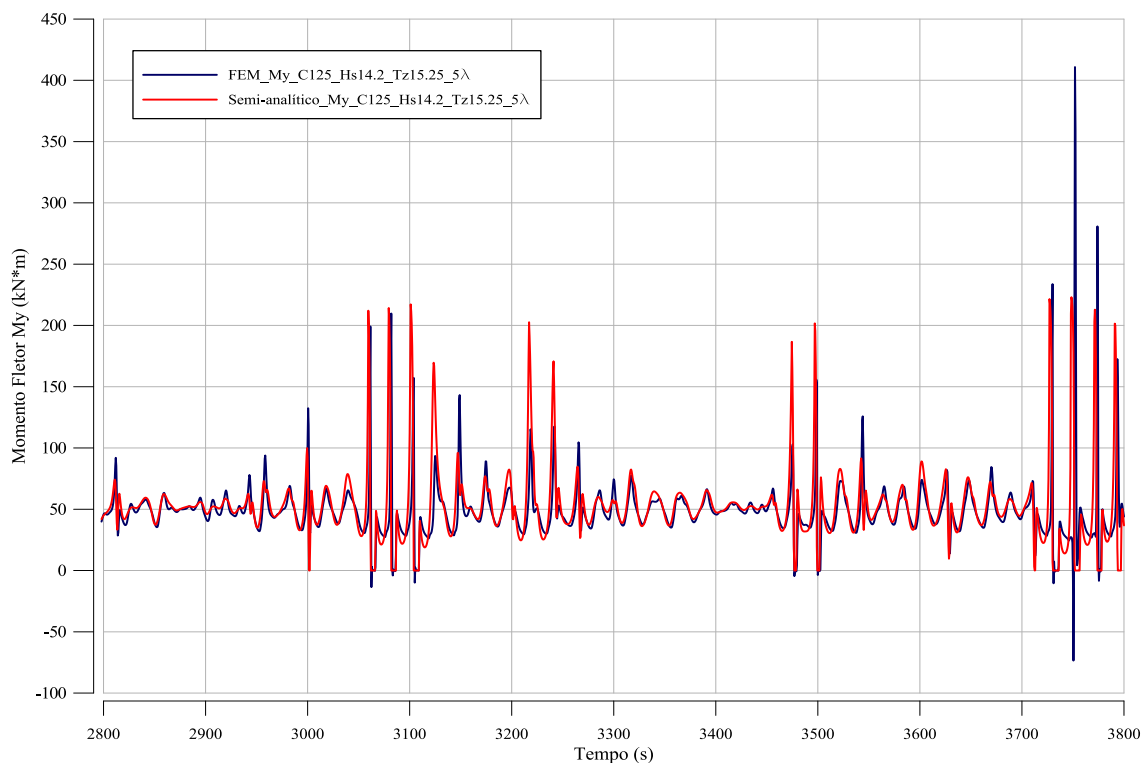


Figura IV.18 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 125: Séries temporais de momentos fletores no TDZ. Posição  $5\lambda$  (FEM vs. Semi-analítico).

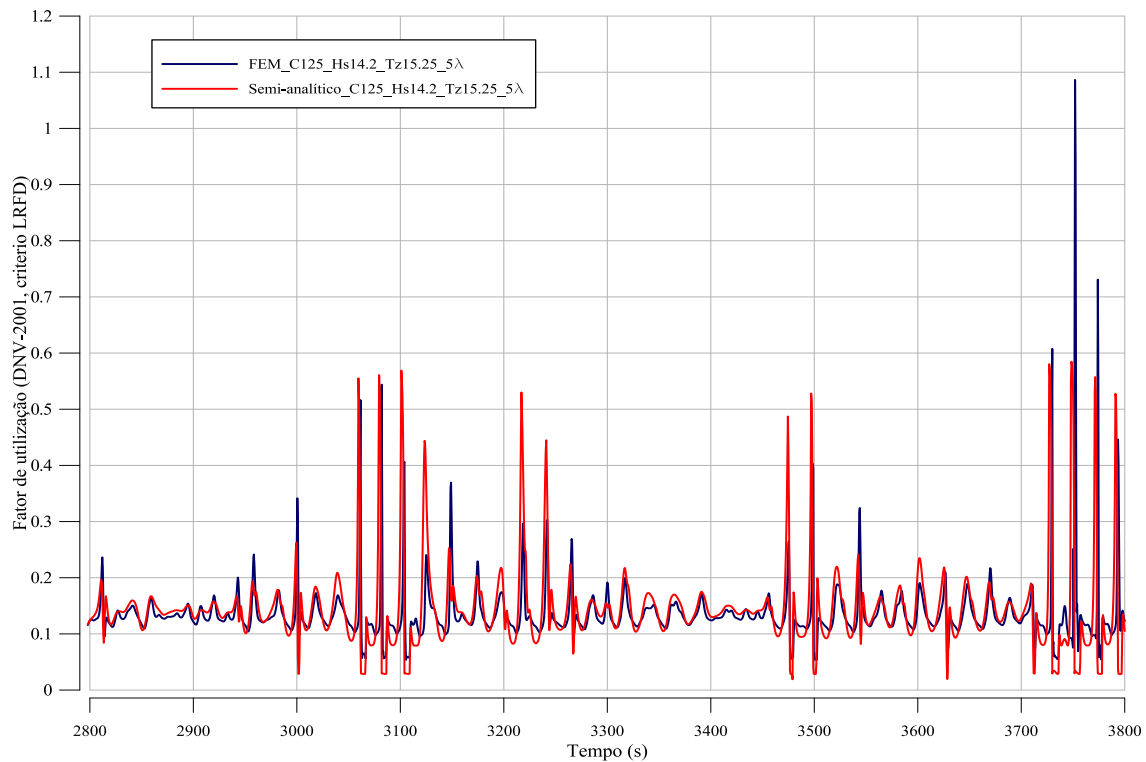
Na sequência, na Tabela IV.13, é realizada uma comparação dos fatores de utilização dos estados de mar de curto prazo (DNV-OS-F201 versão LRFD). Observa-se que desta vez, a influência das diferenças encontradas entre ambos os modelos no cálculo do passeio, tração e momentos fletores é muito grande, apresentando a maior diferença na posição  $10\lambda$  com valores maiores que o dobro do valor calculado no modelo semi-analítico. Embora as diferenças dos valores sejam muito grandes, os resultados têm um comportamento consistente com as diferenças encontradas previamente durante o cálculo das forças de tração e momento fletor.

Na mesma Tabela IV.13, é possível observar que para as posições analisadas do *riser* ( $-\lambda$  até  $10\lambda$ ) os valores de média apresentam uma boa aproximação, o que permite aceitar que as diferenças entre os valores máximos estão relacionadas às diferenças encontradas anteriormente entre os dois modelos nos picos das séries de passeio e tração no TDP. Sob o mesmo ponto de vista, pode-se ver que nas posições entre  $2\lambda$  e  $8\lambda$  o valor máximo calculado no modelo semi-analítico se repete (0.58). Na realidade, este valor está associado ao limite estabelecido para a tração dinâmica mínima na Equação (II-58), que impede que o momento fletor seja infinito e que limita, conseqüentemente, o valor máximo dos fatores de utilização calculados no modelo semi-analítico. Este fenômeno

pode ser observado com ajuda do gráfico da Figura IV.19, que apresenta as séries temporais de fatores de utilização de curto prazo na posição  $5\lambda$  e mostra como alguns picos máximos no modelo semi-analítico se repetem.

*Tabela IV.13– Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 125: Parâmetros estatísticos dos fatores de utilização de curto prazo na TDZ,  $\lambda=8.3m$  (FEM vs. Semi-analítico).*

Caso	Posição	Modelo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	VMP Extremo
125	$-\lambda$	FEM	0.08	0.03	0.47	0.04	0.37
		Semi-analítico	0.06	0.05	0.53	0.02	0.32
	0	FEM	0.10	0.03	0.59	0.05	0.44
		Semi-analítico	0.08	0.06	0.54	0.02	0.42
	$1\lambda$	FEM	0.11	0.03	0.75	0.05	0.54
		Semi-analítico	0.10	0.05	0.56	0.02	0.54
	$2\lambda$	FEM	0.12	0.03	0.75	0.05	0.66
		Semi-analítico	0.12	0.05	0.58	0.02	0.75
	$3\lambda$	FEM	0.12	0.04	0.89	0.05	0.78
		Semi-analítico	0.13	0.05	0.58	0.02	0.96
	$4\lambda$	FEM	0.13	0.04	1.04	0.05	0.95
		Semi-analítico	0.14	0.05	0.58	0.02	1.14
	$5\lambda$	FEM	0.13	0.04	1.09	0.05	1.07
		Semi-analítico	0.14	0.06	0.58	0.02	1.08
	$6\lambda$	FEM	0.14	0.05	1.08	0.05	1.17
		Semi-analítico	0.15	0.06	0.58	0.02	0.66
	$7\lambda$	FEM	0.14	0.05	1.13	0.05	1.28
		Semi-analítico	0.15	0.07	0.58	0.02	0.51
	$8\lambda$	FEM	0.14	0.05	1.10	0.06	1.36
		Semi-analítico	0.15	0.08	0.58	0.02	0.50
$9\lambda$	FEM	0.14	0.05	1.13	0.06	1.35	
	Semi-analítico	0.15	0.08	0.55	0.02	0.47	
$10\lambda$	FEM	0.14	0.05	1.24	0.05	1.27	
	Semi-analítico	0.15	0.08	0.53	0.02	0.45	



*Figura IV.19 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 125: Séries temporais de fatores de utilização de curto prazo na região do TDP. Posição  $5\lambda$  (FEM vs. Semi-analítico).*

Em termos de análises dos fatores de utilização de curto prazo, no gráfico da Figura IV.20, é apresentada a estimativa dos valores extremos máximos mais prováveis para o caso de carregamento 125. Como esperado, neste caso de carregamento que apresenta compressão no *riser*, as diferenças entre ambos os modelos são maiores do que naqueles casos em que a compressão dinâmica não ocorre. Mesmo assim, para o caso de carregamento 125, a diferença entre máximos é de 15%, sendo o fator de utilização de 1.36 no modelo FEM e 1.18 para o modelo semi-analítico. Embora esta diferença seja relativamente pequena, pode-se observar que o comportamento do fator de utilização ao longo da região do TDP difere significativamente, o que já era esperado uma vez que o comportamento de forte compressão representa uma limitação para o modelo analítico adotado. Ressalta-se ainda que, embora os valores máximos sejam próximos, eles não ocorrem no mesmo ponto do *riser*.



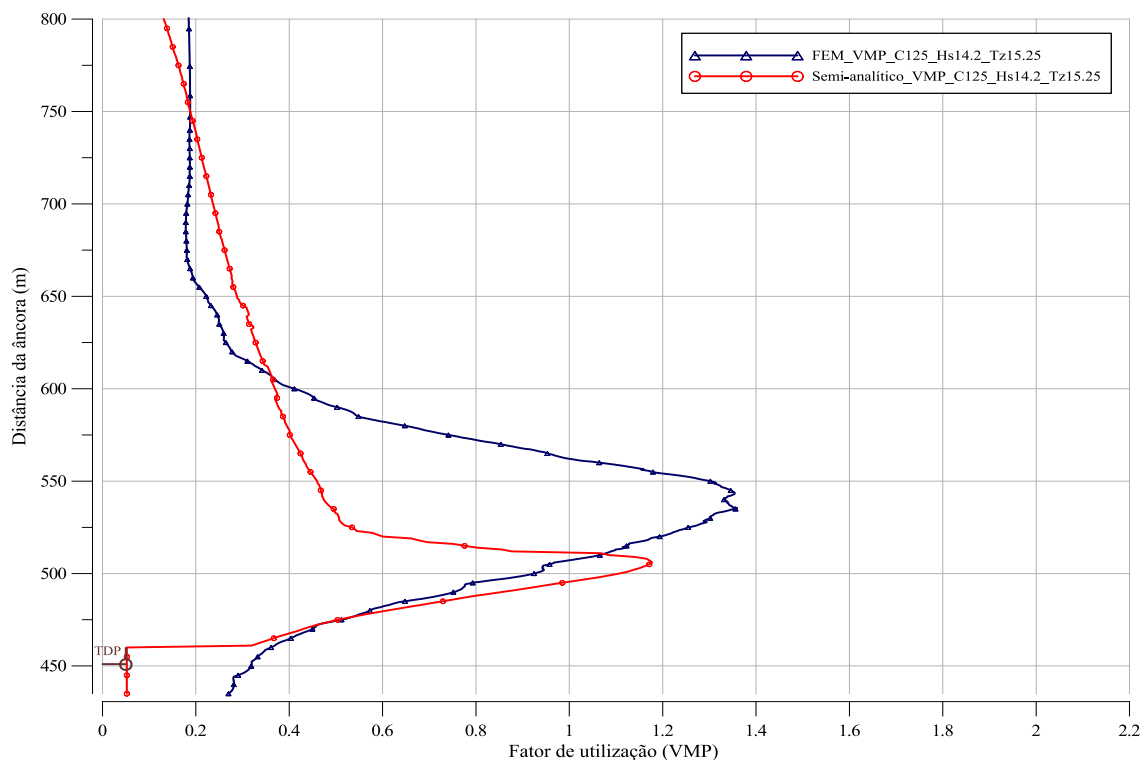


Figura IV.20 – Estudo de Caso 1 - Caso de Carregamento 125: Valores extremos máximos mais prováveis do fator de utilização de curto prazo (FEM vs. Semi-analítico).

### IV.3.5 Resumo das análises dos fatores de utilização de curto prazo

Finalmente, são mostrados no gráfico da Figura IV.21 e na Tabela A.3 do Anexo A os máximos valores extremos mais prováveis do fator de utilização para os 132 estados de mar de curto prazo analisados. Analisando-se os resultados obtidos, podemos constatar que o método semi-analítico foi capaz de representar satisfatoriamente o comportamento do *riser* quando a linha não é submetida a esforços de compressão, visto que, para a maioria dos carregamentos onde o fenômeno de compressão não está presente (casos 1 a 102), as diferenças máximas dos valores extremos do fator de utilização ficaram em torno de 15%. Já nos casos onde foi confirmada a ocorrência de compressão dinâmica no modelo FEM, as diferenças dos valores extremos mais prováveis do fator de utilização chegaram a ser até o dobro do valor calculado analiticamente.

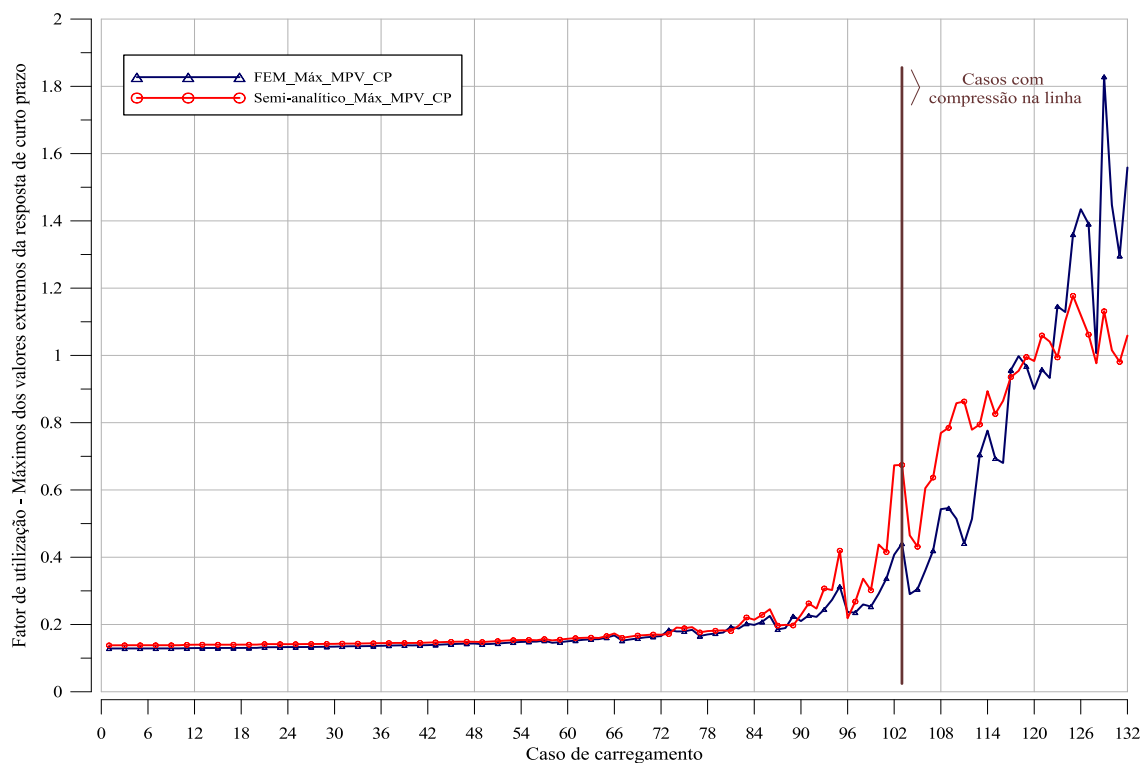


Figura IV.21 – Estudo de Caso 1: Máximos dos valores extremos mais prováveis de curto prazo (FEM vs. Semi-analítico).

Embora ocorram estas discrepâncias de resultados nos casos onde ocorre compressão dinâmica, deve ser observado que objetivo da modelagem analítica não é o de substituir as metodologias mais robustas e, sim, selecionar condições ambientais críticas para o projeto.

Deste modo, os resultados obtidos podem ajudar a atingir um dos objetivos propostos, em particular tendo em conta o reduzido custo computacional da metodologia analítica proposta. Em média, cada análise dinâmica realizada no modelo FEM consumiu aproximadamente 3h (3800s de simulação) em um computador com processador Core i7 com 32GB de memória RAM, enquanto os 132 casos rodados no programa analítico F.U.LongTerm consumiram em torno de 10 minutos (após das análises para calibrar os coeficientes do polinômio da Equação (II-60)).

### IV.3.6 Resultados da análise de Longo Prazo

A Figura IV.22 apresenta a comparação entre os resultados dos fatores de utilização de longo prazo na região do TDP para ambos os modelos. Esses fatores foram obtidos através do método de integração descrito no item III.3 deste trabalho com uso do programa de computador PosLT (LACEO, 2015). A malha de interpolação utilizada está apresentada na Figura IV.3 e descrita na Tabela A.1.

Na Figura IV.22, observa-se que, mesmo com a ocorrência de compressão dinâmica em mais de 20 estados de mar de curto prazo (vide Figura IV.21), o método analítico foi capaz de prever os fatores de utilização de longo prazo de forma eficiente, visto que as metodologias apresentaram diferenças entre seus valores máximos extremos centenários próximos a 1%, sendo obtido um fator de utilização de 0.75 no FEM e 0.76 no modelo semi-analítico, e com uma pequena diferença na posição destes máximos

Ainda na mesma figura, é possível observar diferenças significativas entre os modelos, principalmente, na região do trecho suspenso do *riser* após a ocorrência do valor máximo do fator de utilização de longo prazo. Essa diferença deve-se ao tipo de aproximação dos momentos fletores utilizada neste trabalho, apresentada no item II.8. Embora as diferenças notadas para essa região sejam grandes, isso não afeta o objetivo principal do trabalho, isto é, encontrar condições equivalentes de projeto baseadas no fator de utilização de longo prazo na TDZ.

Outra diferença observada entre os resultados apresentados na Figura IV.22 concerne à posição da ocorrência do valor máximo do fator de utilização de longo prazo. Essa diferença não está somente associada às discrepâncias inerentes ao cálculo da posição do momento estático nulo (seção II.4) e do passeio do TDP (seção II.9), mas, sobretudo, à consideração descrita na seção II.7 a qual restringe a ocorrência do momento fletor máximo a uma proporcionalidade ao parâmetro  $\lambda$ . Essa última consideração não permite uma boa aproximação quando o *riser* apresenta compressão dinâmica.

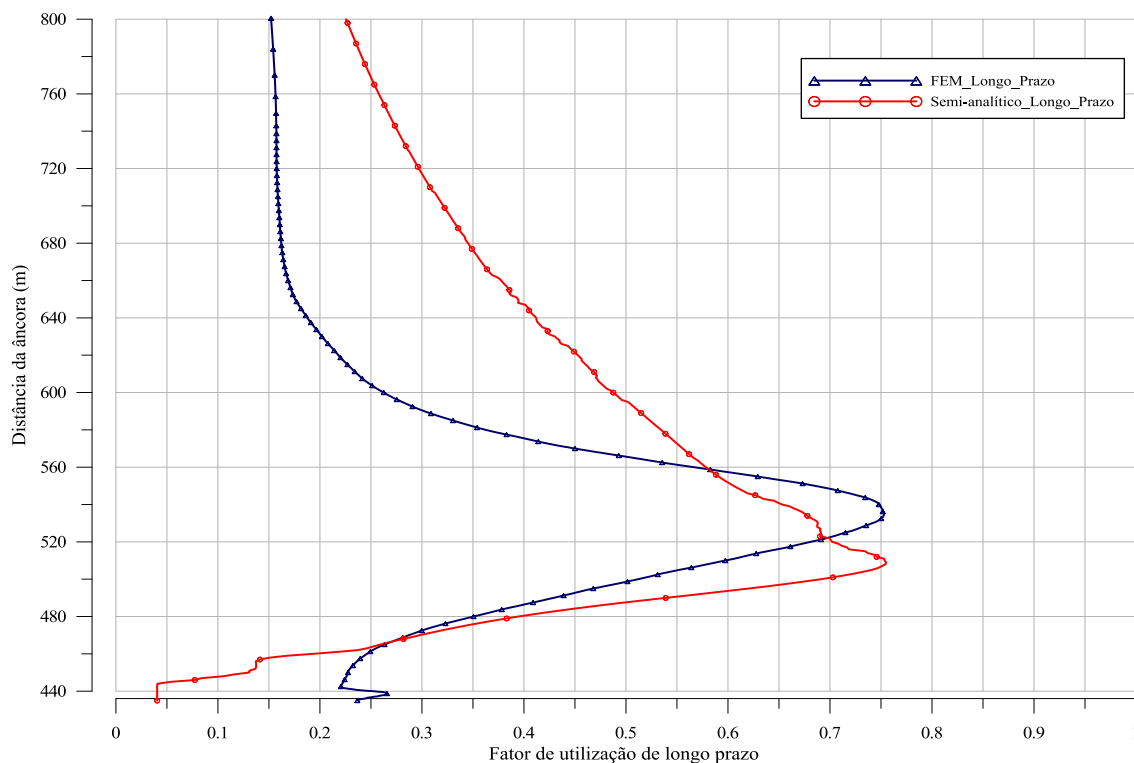


Figura IV.22 – Estudo de Caso 1: Fatores de utilização de longo prazo (100 anos) na região do TDP (FEM vs. Semi-analítico).

A Figura IV.23 apresenta graficamente, para ambos os modelos, a comparação dos estados de mar com maior contribuição no valor máximo centenário mais provável do fator de utilização. Os estados mar mostrados nessa figura correspondem aos 100 primeiros estados de mar com maiores coeficientes de participação. Esses coeficientes foram calculados conforme o descrito no item III.2 deste trabalho.

Pode-se observar que, em ambas metodologias, os estados de mar de curto prazo que mais contribuem na resposta de longo prazo estão contidos entre as curvas de contorno ambiental milenar e deca milenar. É possível observar que os coeficientes de participação da resposta calculada no modelo FEM são levemente superiores aos obtidos no modelo semi-analítico. Essa diferença é devida à influência dos estados de mar que geram compressão dinâmica, onde os resultados obtidos com o modelo semi-analítico foram em média inferiores aos calculados no modelo FEM. Mesmo assim, os resultados obtidos para ambas as metodologias mostram que os estados de mar de curto prazo de maior contribuição na resposta de longo prazo, nesse estudo de caso, estão associados ao período ressonante de *heave* da plataforma (vide Figura IV.2).

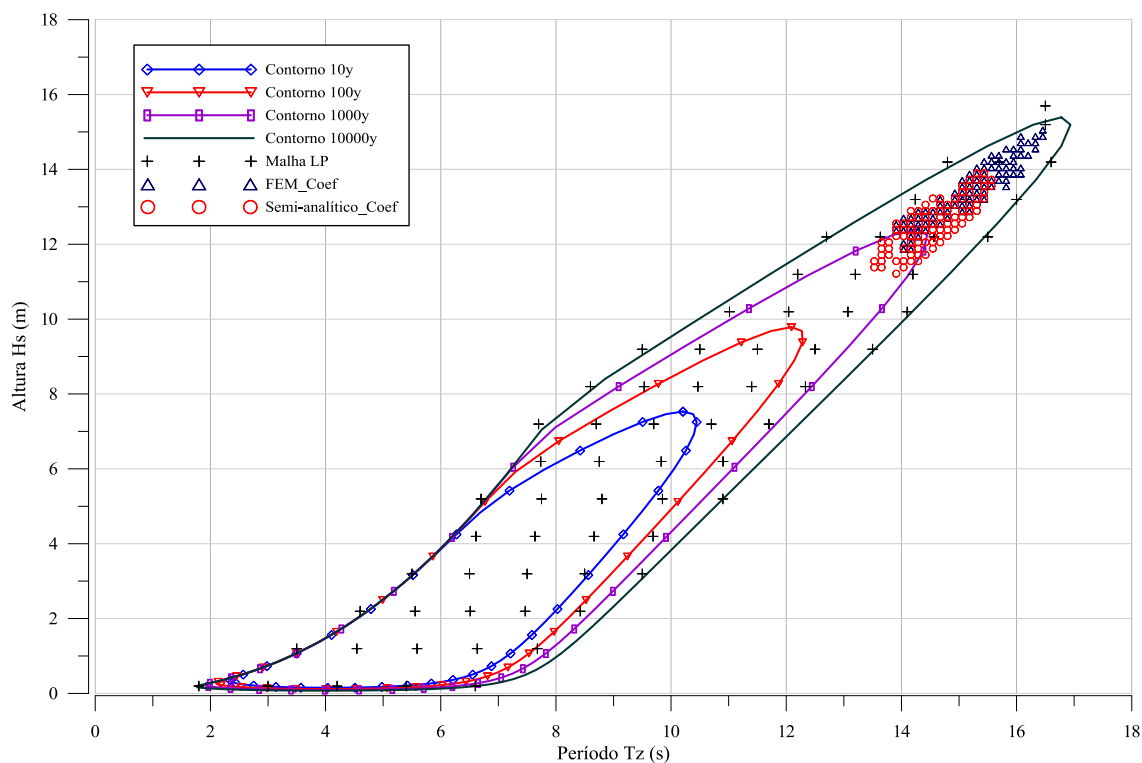


Figura IV.23 – Estudo de Caso 1: Estados de mar com maior contribuição para a resposta de longo prazo do máximo valor mais provável (100 anos) do fator de utilização na região do TDP (FEM vs. Semi-analítico).

Com o objetivo de avaliar a influência dos estados de mar que geraram compressão dinâmica na região do TDP no *riser* na avaliação dos fatores de utilização de longo prazo, foi analisada uma metodologia híbrida. Essa metodologia, chamada neste trabalho de método “Híbrido”, consiste na substituição das séries temporais analíticas dos momentos fletores pelas séries obtidas pelo modelo FEM, quando da ocorrência de compressão dinâmica no *riser*. Após a substituição, foram calculados novamente os fatores de utilização de longo prazo.

Os resultados obtidos por meio desta nova metodologia são apresentados e comparados com os calculados no modelo FEM no gráfico da Figura IV.24. Como pode ser observado, os fatores de utilização de longo prazo obtidos no modelo “Híbrido” são apenas pouco superiores aos obtidos no modelo FEM (7%), o que se mostra coerente, pois os resultados de curto prazo calculados do modelo FEM são em média superiores aos obtidos analiticamente. Assim mesmo, pode-se observar que a diferença da localização do fator de utilização máximo apresentada no gráfico da Figura IV.22, para este caso, foi consideravelmente reduzida. Com os resultados da metodologia híbrida, a atribuição à compressão dinâmica no *riser* pelas discrepâncias entre os modelos FEM e

Semi-analítico, no que tange à localização do máximo fator de utilização de longo prazo, podem ser confirmadas.

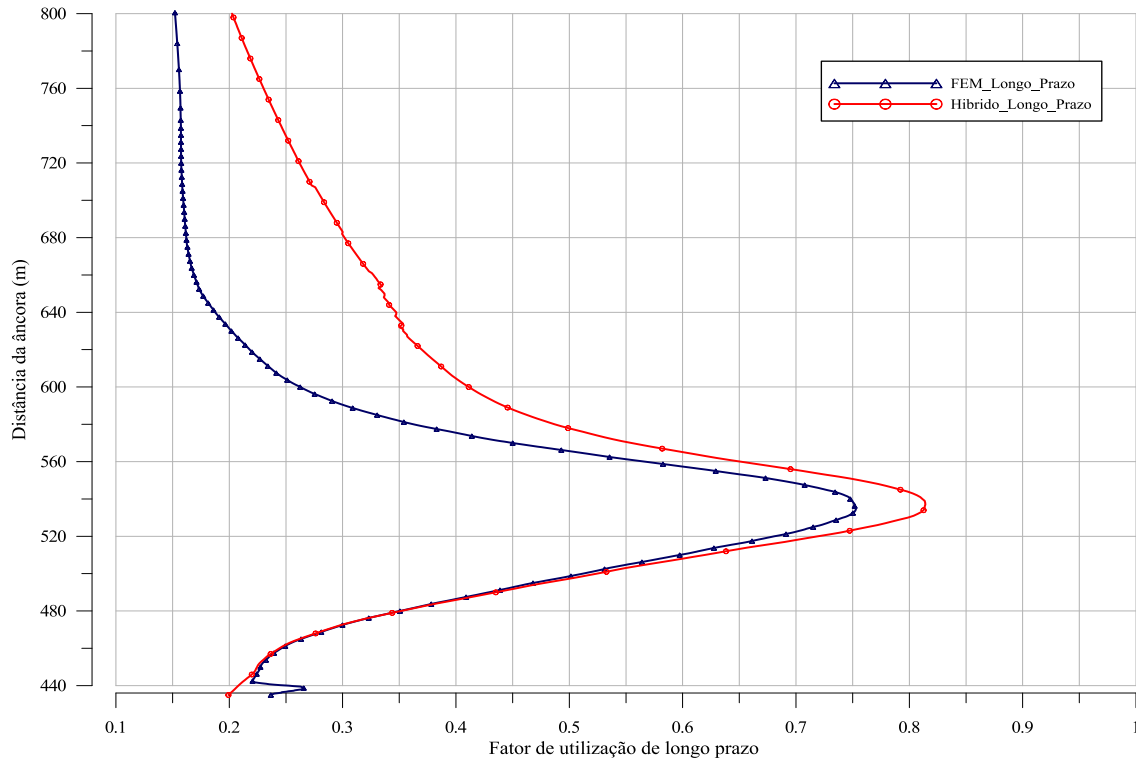
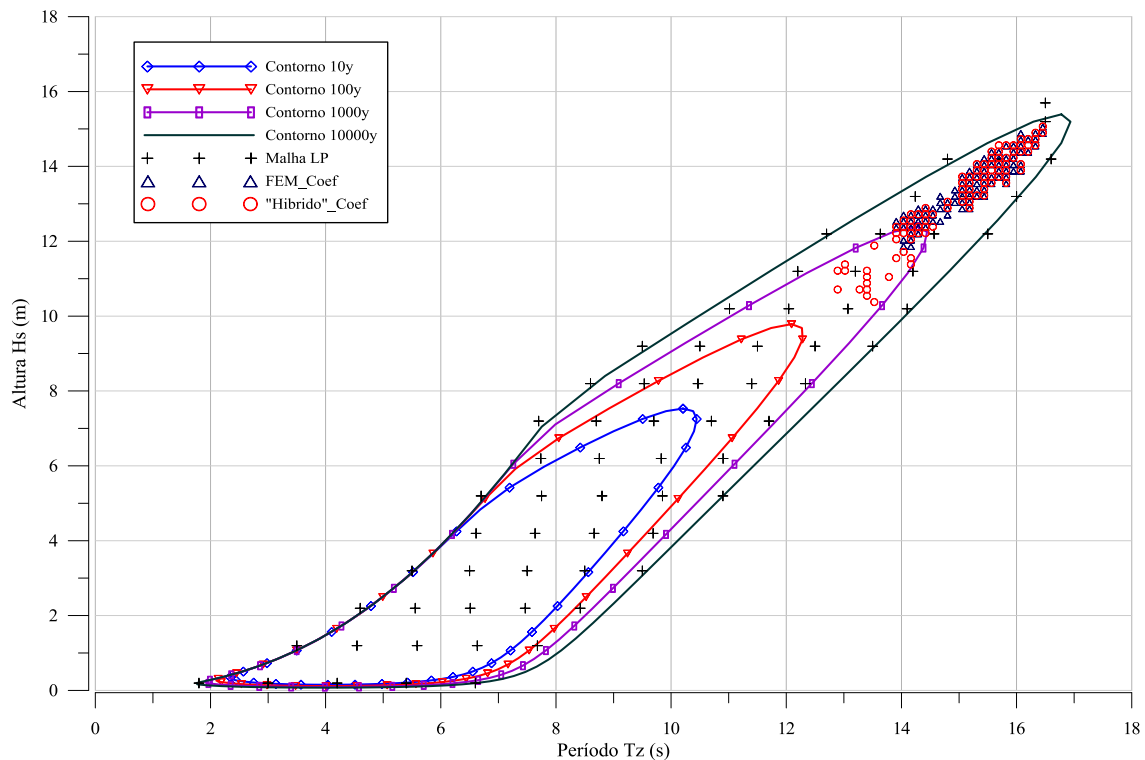


Figura IV.24 – Estudo de Caso 1: Fatores de utilização de longo prazo (100 anos) na região do TDP (FEM vs. Híbrido).

Para terminar o estudo de caso 1, na Figura IV.25, são apresentados graficamente a comparação dos estados de mar com maior contribuição no valor máximo do fator de utilização de longo prazo calculados nos modelos FEM e Híbrido, ilustrados na Figura IV.24. Percebe-se que a grande maioria dos estados de mar com maior participação na resposta de longo prazo obtidos com ambas as metodologias praticamente coincidem e atingem estados de mar contidos entre as curvas milenar e deca milenar.



*Figura IV.25 – Estudo de Caso 1: Estados de mar com maior contribuição para a resposta de longo prazo do máximo valor mais provável (100 anos) do fator de utilização na região do TDP (FEM vs Híbrido).*

Como pôde se observar neste estudo de caso, os resultados obtidos pelo modelo semi-analítico foram influenciados pelos 26 estados de mar de curto prazo onde ocorreu compressão dinâmica. Estes estados de mar possuem Hs por volta de 12m e Tz médio de 15m, que representam condições ambientais bastante severas por estarem associadas a condições ambientais similares àquelas do Mar do Norte. No que segue um segundo estudo de caso será apresentado para condições ambientais menos severas.

## IV.4 Estudo de Caso 2

### IV.4.1 Descrição do Modelo

O estudo de caso 2, constitui-se da mesma estrutura e características do estudo de caso 1 descritas no item IV.3.1 deste trabalho. A Figura IV.26 apresenta uma visão geral do modelo FEM deste estudo de caso. A principal diferença entre o primeiro estudo de caso e este está nos estados de mar de curto prazo analisados. Neste caso, utiliza-se uma distribuição de parâmetros ambientais representativa das condições ambientais encontradas na Bacia de Campos.

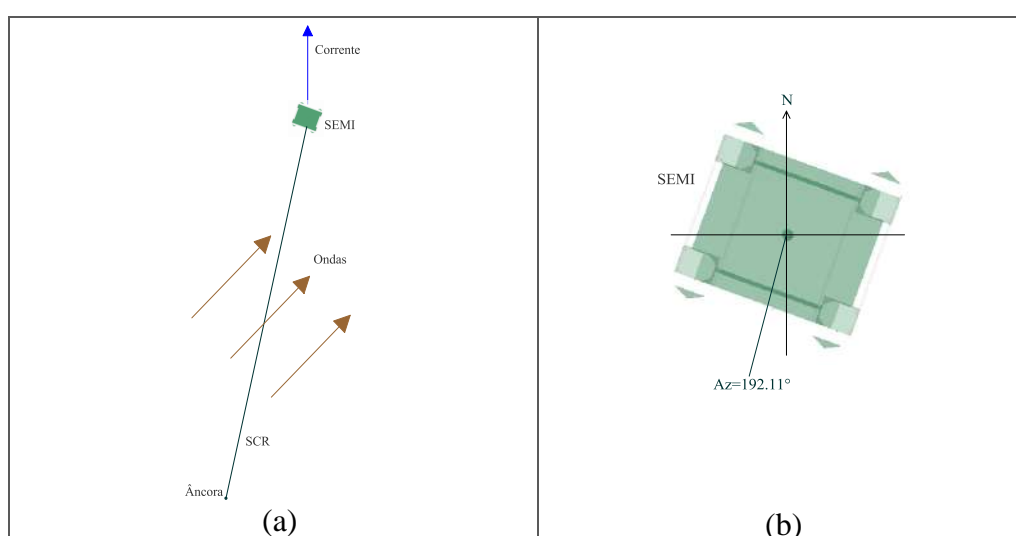


Figura IV.26 – Estudo de caso 2: Visão geral do modelo de elementos finitos do riser rígido, (a) Vista em planta, (b) Azimute da linha.

Para avaliar a resposta de curto prazo neste caso de estudo foram utilizados 300 estados de mar de curto prazo (3h) exibidos graficamente na Figura IV.28 e contidos na Tabela B.1 do Anexo B. Estes estados de mar de curto prazo, por sua vez, integram a malha de interpolação para integração de longo prazo. A Figura IV.27 apresenta a função de transferência do movimento vertical no topo do riser na direção de incidência da onda analisada neste estudo de caso (vide Tabela B.1).

Os 300 pontos da malha foram enumerados, do menor para o maior par de altura significativa de onda e período de pico. Do mesmo modo que no estudo de caso 1, para evitar a extrapolação na hora de fazer a integração de longo prazo, foram escolhidos estados de mar que abrangem a linha de contorno ambiental de dez mil anos, cobrindo de maneira adequada a distribuição conjunta empregada neste estudo de caso.



Novamente, os *offsets* foram assumidos proporcionais à altura significativa de cada onda na direção de propagação da mesma, sendo definida a taxa de proporcionalidade igual a 5% da lâmina d'água para a maior altura de onda analisada neste estudo de caso ( $H_s=11.2\text{m}$ ).

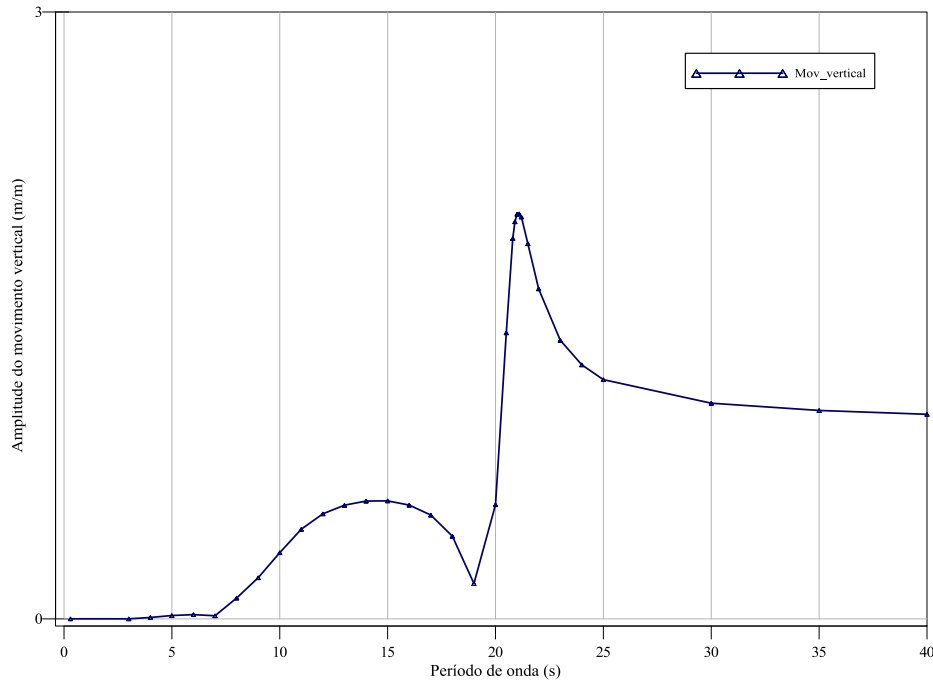


Figura IV.27 – Estudo de Caso 2: Função de transferência do movimento vertical no topo do riser na direção de incidência da onda analisada.

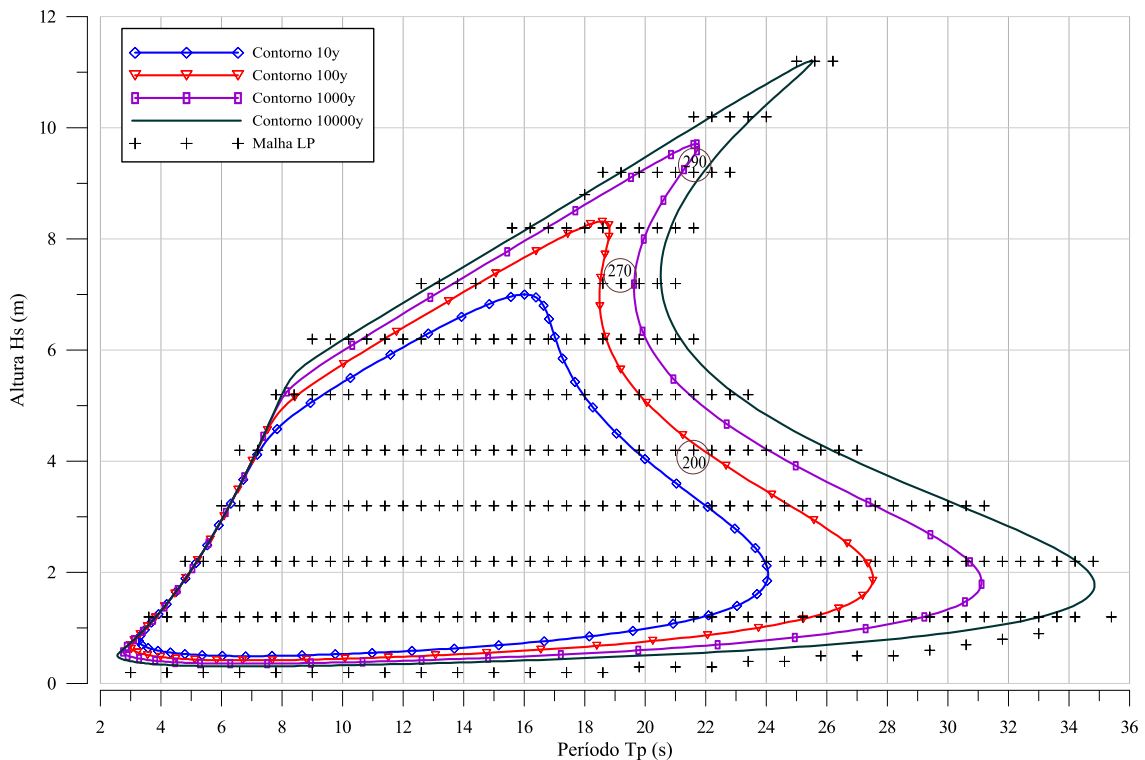


Figura IV.28 – Estudo de Caso 2: Malha de interpolação de 300 pontos.

Já que a estrutura do estudo de caso 2 é a mesma usada no estudo de caso 1, não foi necessário realizar análises de calibração prévias no modelo FEM para a calibração do polinômio que aproxima o passeio do TDP e nem para definir a posição da ocorrência do momento fletor máximo. Para ambas as situações, foram adotados os mesmos valores obtidos no primeiro estudo de caso.

#### IV.4.2 Posição do TDP estático

Os valores referentes à posição do TDP estático são apresentados na Tabela B.2 do Anexo B, e indicados graficamente na Figura IV.29. Pode-se observar que as diferenças entre os resultados de ambos os modelos são mínimas, já que os desvios observados apresentam seus valores máximos em torno de 2.2m, equivalentes a  $0.31\lambda$  ( $\lambda=7.2\text{m}$ ). Novamente os resultados validam as premissas consideradas na seção II.4 deste trabalho para estimar a posição do TDP estático.

A comparação dos valores referentes ao parâmetro  $\lambda$ , à tração e ao momento fletor estáticos calculados com ambos os modelos são apresentados também na Tabela B.2. Pode-se observar que as diferenças dos resultados foram inferiores a 1%.

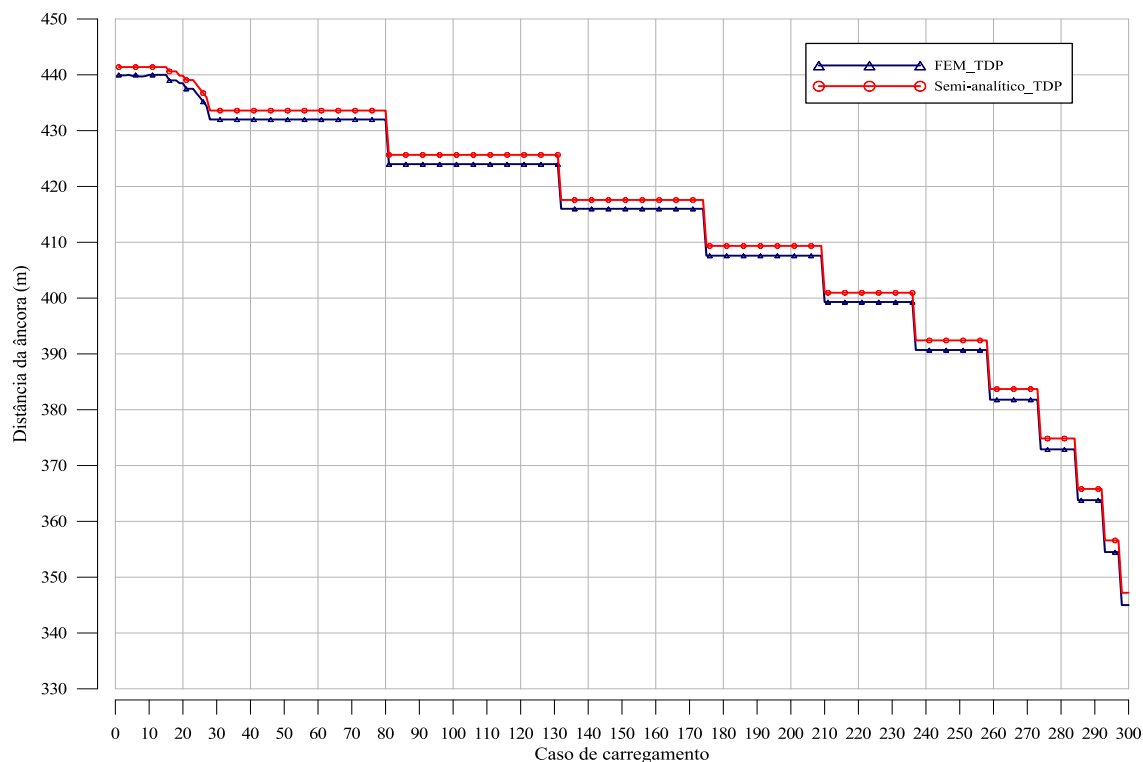


Figura IV.29 – Estudo de Caso 2: Posição do TDP estático (FEM vs. Semi-analítico).

### IV.4.3 Resultados de Curto Prazo

Neste estudo de caso, foram escolhidos três casos de carregamento que têm características dinâmicas distintas para apresentar detalhes dos resultados, em termos dos parâmetros estatísticos das séries temporais de trações, momentos fletores e fatores de utilização.

Os três casos de carregamentos selecionados neste estudo de caso são: caso 200 ( $H_s=4.2\text{m}$ ,  $T_p=21.6\text{s}$ ) que pode ser caracterizado como um estado de mar contido entre os contornos decenário e centenário, o caso 270 ( $H_s=7.2\text{m}$ ,  $T_p=19.2\text{s}$ ) indicado como estado de mar centenário e, finalmente, o caso 290 ( $H_s=9.2\text{m}$ ,  $T_p=21.6\text{s}$ ) caracterizado como um estado de mar milenar (vide detalhes da Figura IV.28).

Para os três casos selecionados, foram analisadas posições distintas da região do TDP, variando desde  $-\lambda$  a  $10\lambda$ , cobrindo toda a faixa de variação do passeio do TDP, onde a posição  $-\lambda$  corresponde ao TDP estático.

- **Caso de carregamento 200 ( $H_s=4.2\text{m}$ ,  $T_p=21.6\text{s}$ )**

A Figura IV.30 apresenta séries temporais de passeio do TDP para o carregamento 200, obtidos pela aproximação polinomial proposta na seção II.9 desta tese e pelo modelo FEM. Por um lado, pode-se observar que o modelo polinomial apresentou boa concordância com os resultados do modelo FEM, com diferenças entre os valores de picos (máximos e mínimos) menores que  $0.2\lambda$  ( $\lambda=7.7\text{m}$ ), equivalente a 1.6m conforme mostrado na Tabela IV.14. Por outro lado, é possível observar uma pequena diferença no valor da média em alguns instantes da série do passeio do TDP, principalmente nos trechos com pouco deslocamento. Esta diferença é devida à aproximação inicial do TDP estático (vide Figura IV.29), onde o valor obtido analiticamente é 2m menor em relação ao resultado do modelo FEM.

*Tabela IV.14– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 200: Parâmetros estatísticos do passeio do TDP (m), (FEM vs. Semi-analítico).*

Caso	Origem	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
200	FEM	412.4	7.9	436.1	379.5
	Semi-analítico	409.9	7.6	434.5	385.2

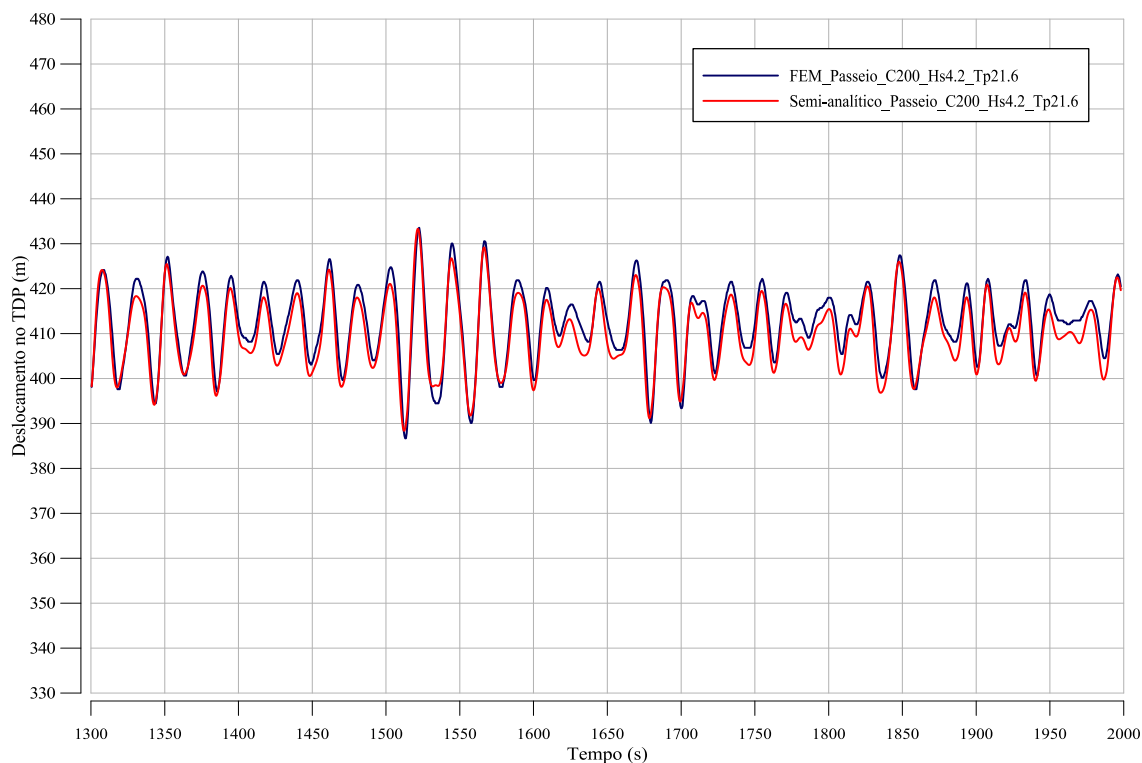


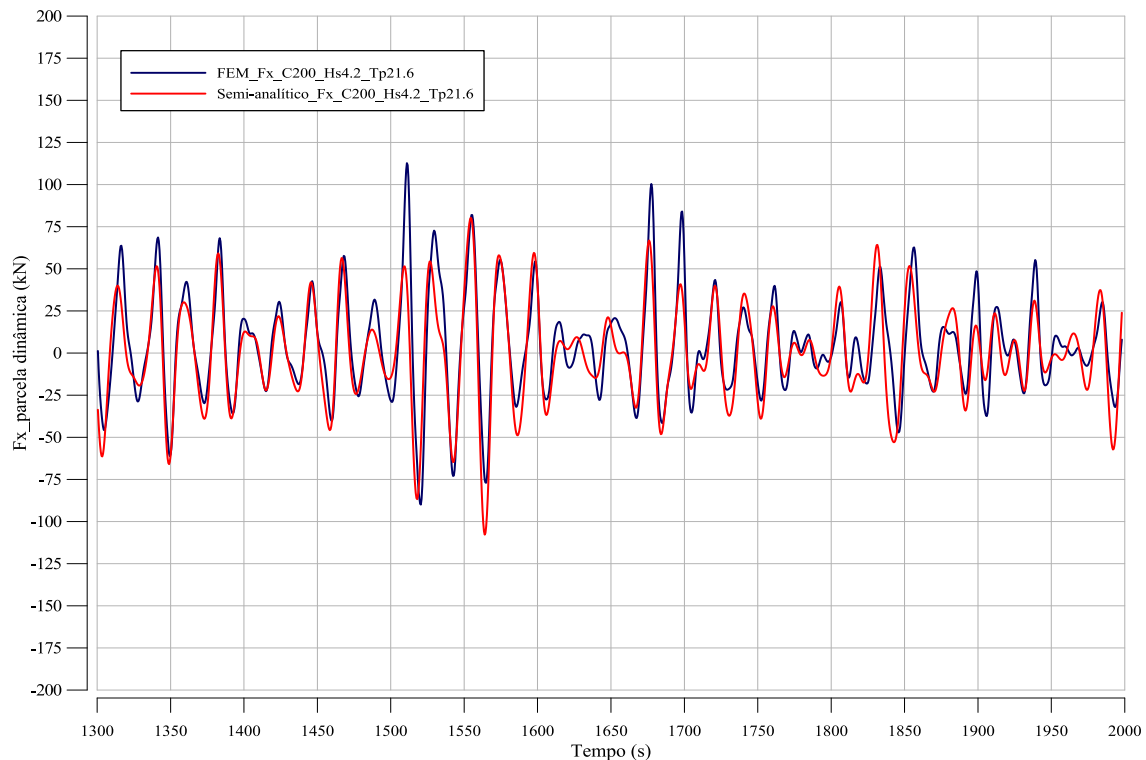
Figura IV.30 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 200: Séries temporais de passeio do TDP (FEM vs. Semi-analítico).

Os parâmetros estatísticos das trações obtidas com ambos os modelos estão apresentados na Tabela IV.15. Como pode ser observado, as diferenças entre valores máximos e mínimos obtidos no modelo semi-analítico foi menor até 8% em relação aos obtidos com o modelo FEM.

Tabela IV.15– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 200: Parâmetros estatísticos da série de tração (kN) na TDZ (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	Origem	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
200	FEM	459.4	29.0	597.7	348.6
	Semi-analítico	452.7	28.8	555.2	344.9

A Figura IV.31 apresenta a comparação das séries temporais de tração (parcela dinâmica apenas), onde pode-se observar que os sinais são muito próximos na maior parte do tempo, ocorrendo diferenças significativas nos instantes de máximos e mínimos semelhantes a um fator de escala. Esta diferença está associada novamente à influência do comprimento efetivo do riser termo ( $l+l'$ ) da Equação (II-44), já que o termo ( $l$ ) tende a ser maior, reduzindo consequentemente a tração dinâmica calculada analiticamente.



*Figura IV.31 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 200, Séries temporais da parcela dinâmica da tração no TDP (FEM vs. Semi-analítico).*

Os resultados dos momentos fletores da TDZ obtidos através dos modelos FEM e semi-analítico, são apresentados na Tabela IV.16. A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que o método semi-analítico foi capaz de prever os momentos fletores máximos corretamente, visto que ambos os modelos apresentaram diferenças máximas em torno de 6%. Isto pode ser visto graficamente nas Figuras V.32 e V.33, que mostram as séries temporais de momentos fletores obtidos com ambas as metodologias nas posições  $5\lambda$  e  $9\lambda$ . Como pode ser observado, os momentos calculados no modelo FEM na posição  $5\lambda$  apresentam uma diferença em alguns instantes da série temporal nos valores de picos máximos. Essa desigualdade pode ser justificada pelas diferenças apresentadas entre as trações dinâmicas no TDP (Figura IV.31), visto que os valores obtidos no modelo FEM são maiores que os calculados com o modelo semi-analítico. Em relação aos mínimos, as maiores diferenças foram observadas nas posições menores que  $2\lambda$ . A razão para tais diferenças é o fato de que os momentos pelo modelo semi-analítico apresentam um limite mínimo de zero, que ocorre quando o *riser* assume uma configuração horizontal.

Tabela IV.16– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 200: Parâmetros estatísticos dos momentos fletores na TDZ ( $kN*m$ ),  $\lambda=7.7m$  (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	Posição	Modelo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
200	$-\lambda$	FEM	11.6	13.5	43.3	-1.7
		Semi-analítico	10.6	13.0	44.2	0.0
	0	FEM	26.0	12.7	46.3	-1.8
		Semi-analítico	24.3	14.2	48.4	0.0
	$1\lambda$	FEM	36.7	7.2	48.8	-1.3
		Semi-analítico	35.8	9.1	51.4	0.0
	$2\lambda$	FEM	41.6	3.2	51.2	6.5
		Semi-analítico	41.7	4.3	54.5	0.0
	$3\lambda$	FEM	43.5	2.2	53.7	33.4
		Semi-analítico	44.1	2.7	56.7	30.0
	$4\lambda$	FEM	44.3	2.5	56.1	35.1
		Semi-analítico	44.9	2.7	58.0	36.8
	$5\lambda$	FEM	44.7	2.6	57.9	35.5
		Semi-analítico	45.3	2.8	58.7	36.9
	$6\lambda$	FEM	44.5	2.7	58.3	35.4
		Semi-analítico	45.4	2.9	59.0	36.9
	$7\lambda$	FEM	44.4	2.7	58.1	35.4
		Semi-analítico	45.4	2.9	59.2	36.9
	$8\lambda$	FEM	44.3	2.6	57.6	35.6
		Semi-analítico	45.0	3.0	58.9	36.4
$9\lambda$	FEM	44.1	2.6	57.0	35.7	
	Semi-analítico	44.9	2.8	58.2	36.6	
$10\lambda$	FEM	44.0	2.5	56.1	35.8	
	Semi-analítico	44.7	2.7	57.6	36.8	

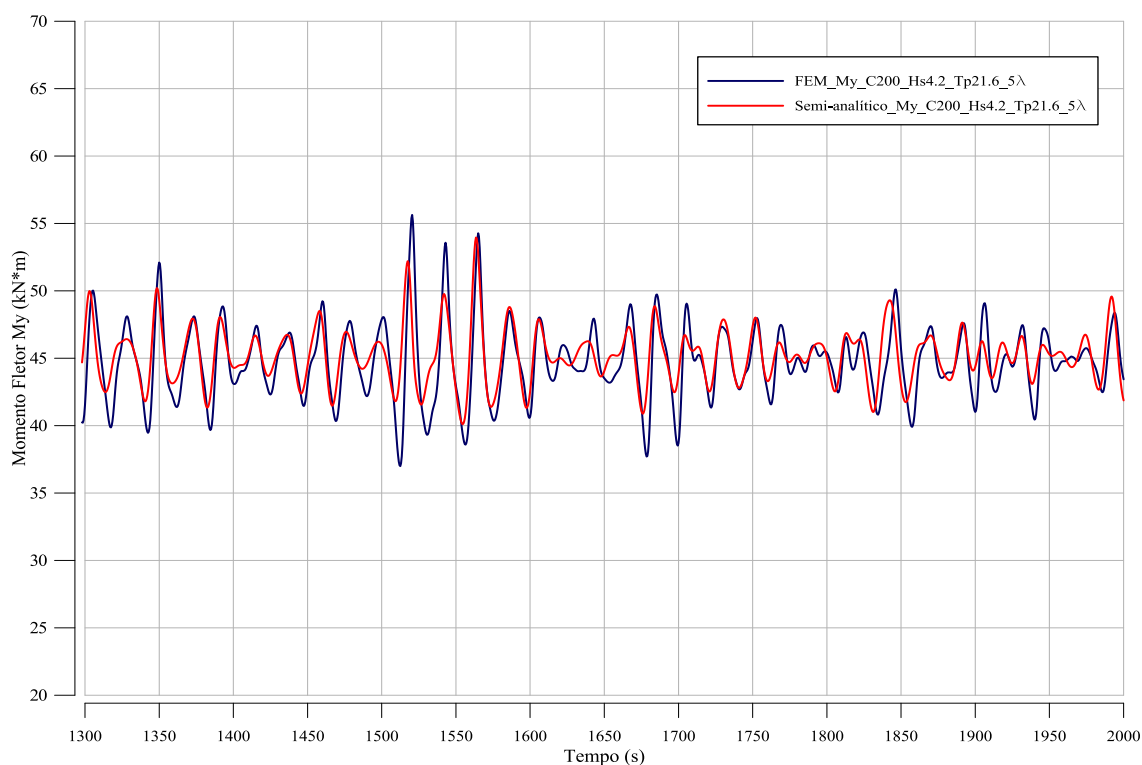
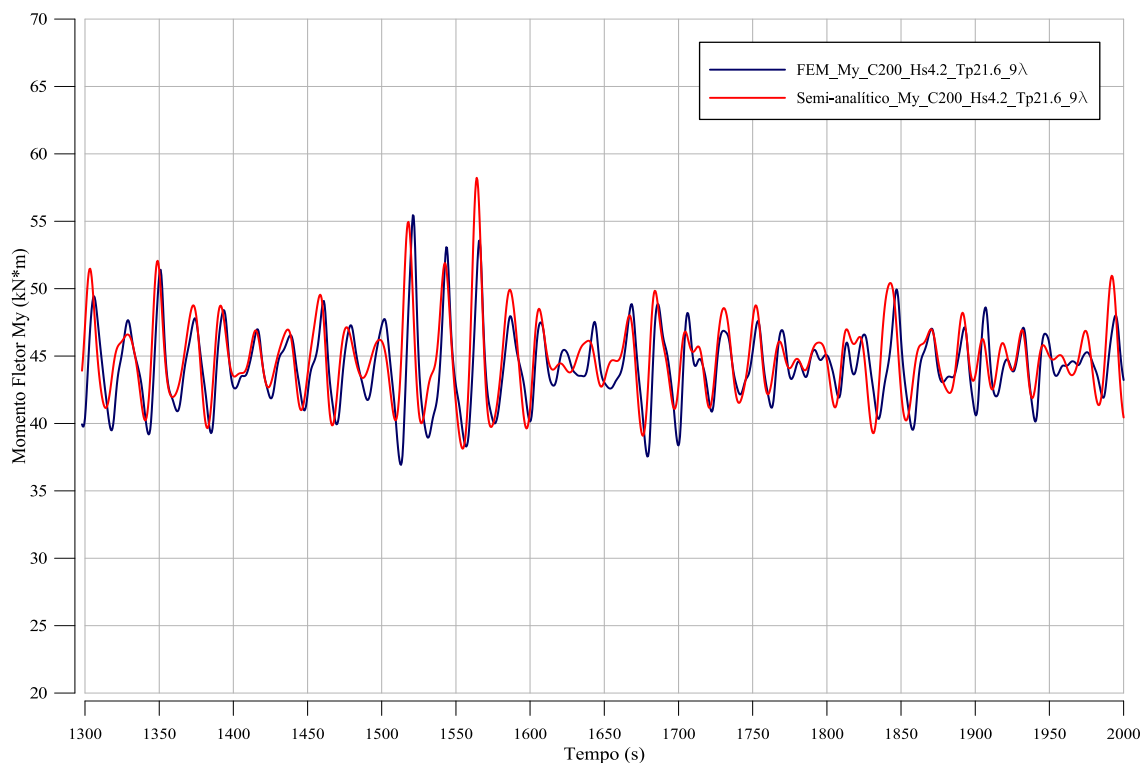


Figura IV.32 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 200: Séries temporais de momentos fletores no TDZ. Posição  $5\lambda$  (FEM vs. Semi-analítico).



*Figura IV.33 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 200: Séries temporais de momentos fletores na TDZ. Posição  $9\lambda$  (FEM vs. Semi-analítico).*

A Tabela IV.17 apresenta a comparação dos fatores de utilização da seção transversal de curto prazo para o caso de carregamento 200 obtidos com os dois modelos. Os fatores de utilização foram calculados segundo a norma DNV-OS-F201 (2001) versão LRFD, supondo uma classe de segurança normal e estado limite operacional.

Analisando-se os resultados é possível constatar que o modelo semi-analítico apresentou um comportamento convergente comparado com os resultados no modelo FEM, com diferenças máximas entre os modelos menor que 7%. Esta convergência pode-se observar graficamente nas Figuras V.34 e V.35, que mostram a comparação das séries dos fatores de utilização obtidas com ambos os modelos nas posições  $5\lambda$  e  $9\lambda$ .

Tabela IV.17– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 200: Parâmetros estatísticos dos fatores de utilização de curto prazo na TDZ,  $\lambda = 7.7m$  (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	Posição	Modelo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	VMP Extremo
200	$-\lambda$	FEM	0.06	0.03	0.13	0.02	0.14
		Semi-analítico	0.05	0.04	0.13	0.02	0.14
	0	FEM	0.09	0.03	0.14	0.02	0.14
		Semi-analítico	0.08	0.04	0.14	0.02	0.14
	$1\lambda$	FEM	0.12	0.02	0.15	0.02	0.15
		Semi-analítico	0.11	0.02	0.14	0.02	0.15
	$2\lambda$	FEM	0.13	0.01	0.15	0.04	0.16
		Semi-analítico	0.12	0.01	0.15	0.02	0.15
	$3\lambda$	FEM	0.14	0.01	0.16	0.11	0.16
		Semi-analítico	0.13	0.01	0.15	0.08	0.15
	$4\lambda$	FEM	0.14	0.01	0.16	0.12	0.17
		Semi-analítico	0.13	0.00	0.15	0.11	0.16
	$5\lambda$	FEM	0.13	0.01	0.16	0.10	0.16
		Semi-analítico	0.13	0.00	0.15	0.11	0.16
	$6\lambda$	FEM	0.12	0.01	0.15	0.11	0.16
		Semi-analítico	0.12	0.00	0.15	0.11	0.16
	$7\lambda$	FEM	0.12	0.00	0.15	0.11	0.16
		Semi-analítico	0.12	0.01	0.14	0.11	0.16
	$8\lambda$	FEM	0.12	0.00	0.15	0.11	0.16
		Semi-analítico	0.12	0.01	0.14	0.10	0.15
$9\lambda$	FEM	0.12	0.00	0.15	0.11	0.15	
	Semi-analítico	0.12	0.00	0.14	0.10	0.15	
$10\lambda$	FEM	0.12	0.00	0.15	0.11	0.15	
	Semi-analítico	0.12	0.00	0.14	0.10	0.15	

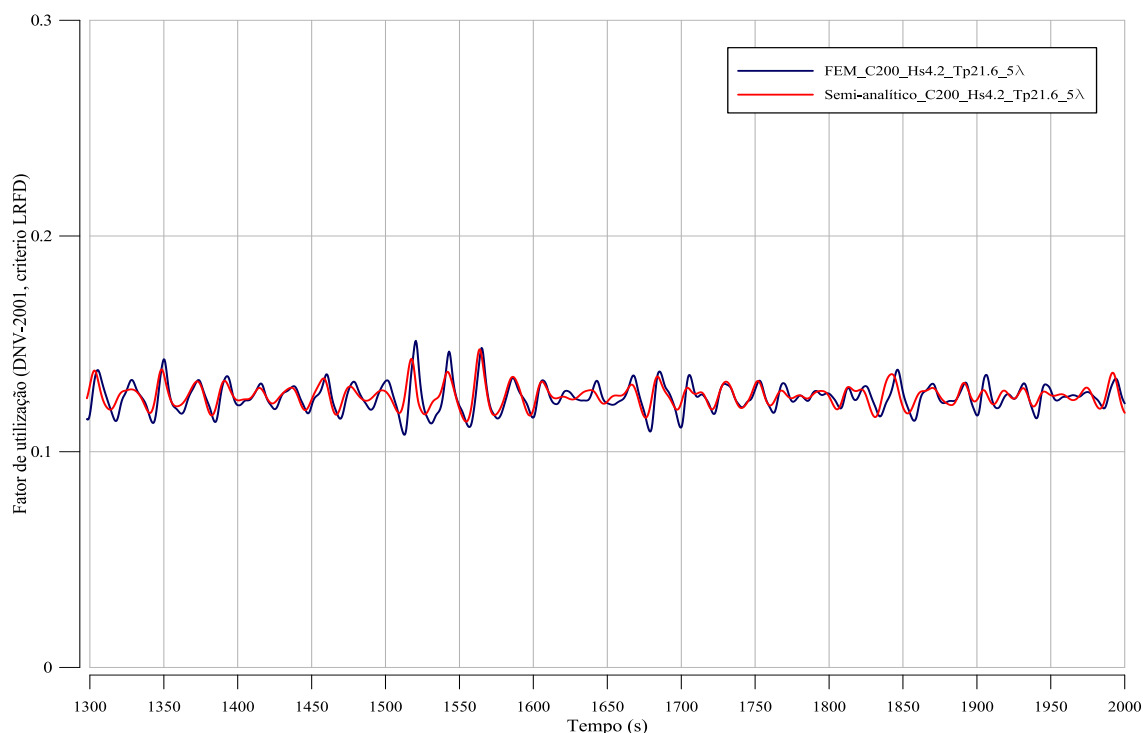
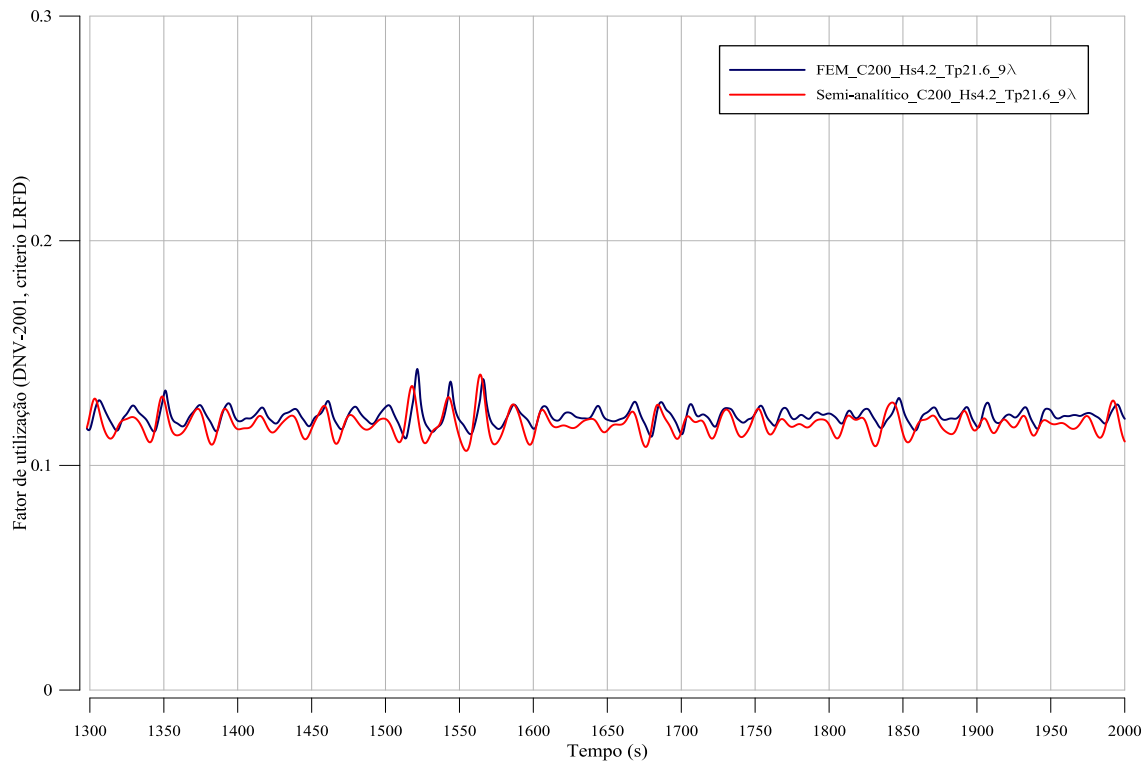


Figura IV.34 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 200: Séries temporais de fatores de utilização de curto prazo na região do TDP. Posição  $5\lambda$  (FEM vs. Semi-analítico).





*Figura IV.35 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 200: Séries temporais de fatores de utilização de curto prazo na região do TDP. Posição  $9\lambda$  (FEM vs. Semi-analítico).*

Em relação aos valores extremos de curto prazo mais prováveis, a Figura IV.36 apresenta uma comparação entre os valores obtidos processando as séries obtidas pelo modelo semi-analítico e pelo modelo FEM para o caso de carregamento 200, avaliados a cada metro na TDZ. Como pode ser observado, o método semi-analítico foi capaz de prever os fatores de utilização de forma eficiente, visto que foram observadas diferenças inferiores a 7% no valor do máximo extremo mais provável na região do TDP, sendo um valor de 0.17 no modelo FEM e 0.16 para o modelo semi-analítico.

Na mesma Figura IV.36, é possível observar que a abordagem mostrada na seção II.8 deste trabalho, para aproximar os momentos fletores após a ocorrência do momento fletor máximo, gera valores de fatores de utilização convergentes comparados com os obtidos do modelo FEM.

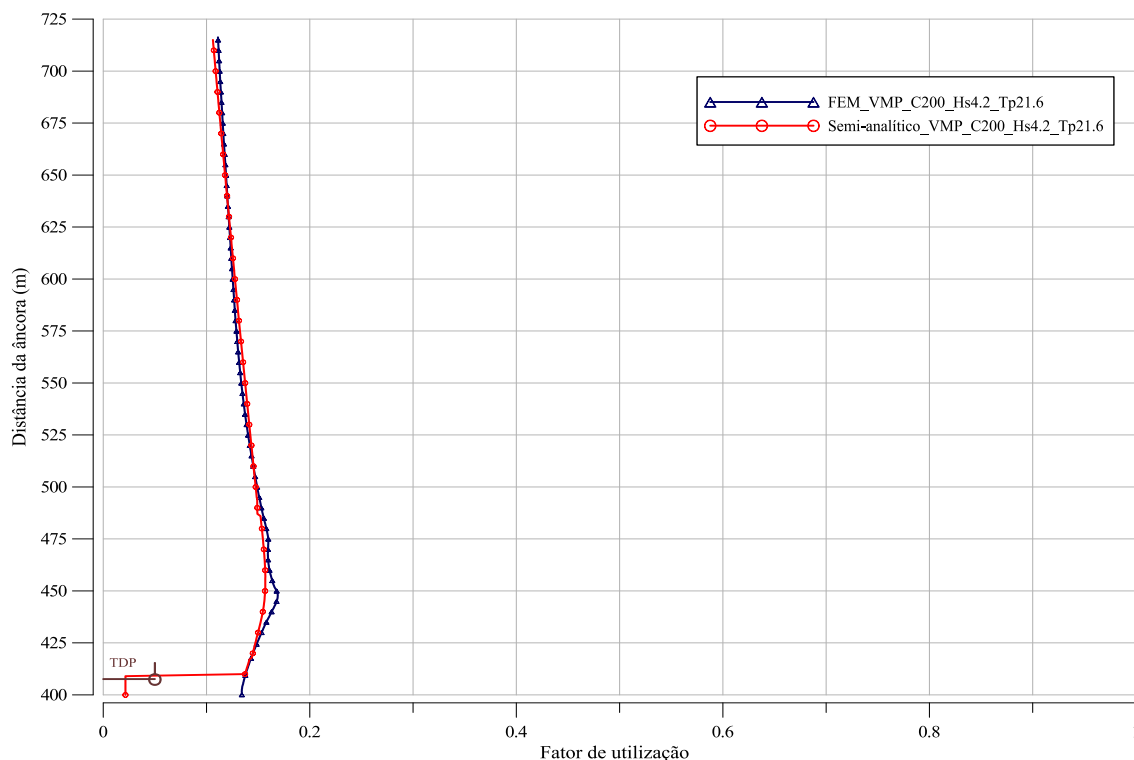


Figura IV.36 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 200: Valores extremos máximos mais prováveis do fator de utilização de curto prazo (FEM vs. Semi-analítico).

- **Caso de carregamento 270 (Hs=7.2m, Tp=19.2s)**

O segundo caso de carregamento escolhido para este estudo de caso foi o 270. Primeiramente, na Tabela IV.18 e no gráfico da Figura IV.37, são indicadas a comparação das séries do passeio do TDP obtidas nos modelos FEM e semi-analítico para o caso de carregamento 270. Pode-se observar que a aproximação polinomial proposta neste trabalho aponta boa correlação entre os valores analíticos e numéricos, com divergências entre os picos de máximos e mínimos sempre inferiores a  $0.05\lambda$  ( $\lambda=7.5\text{m}$ ) equivalente a 0.3m.

Tabela IV.18– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 270: Parâmetros estatísticos do passeio do TDP (m) (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	Origem	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
270	FEM	385.0	12.9	427.7	332.1
	Semi-analítico	383.4	12.2	428.0	340.1

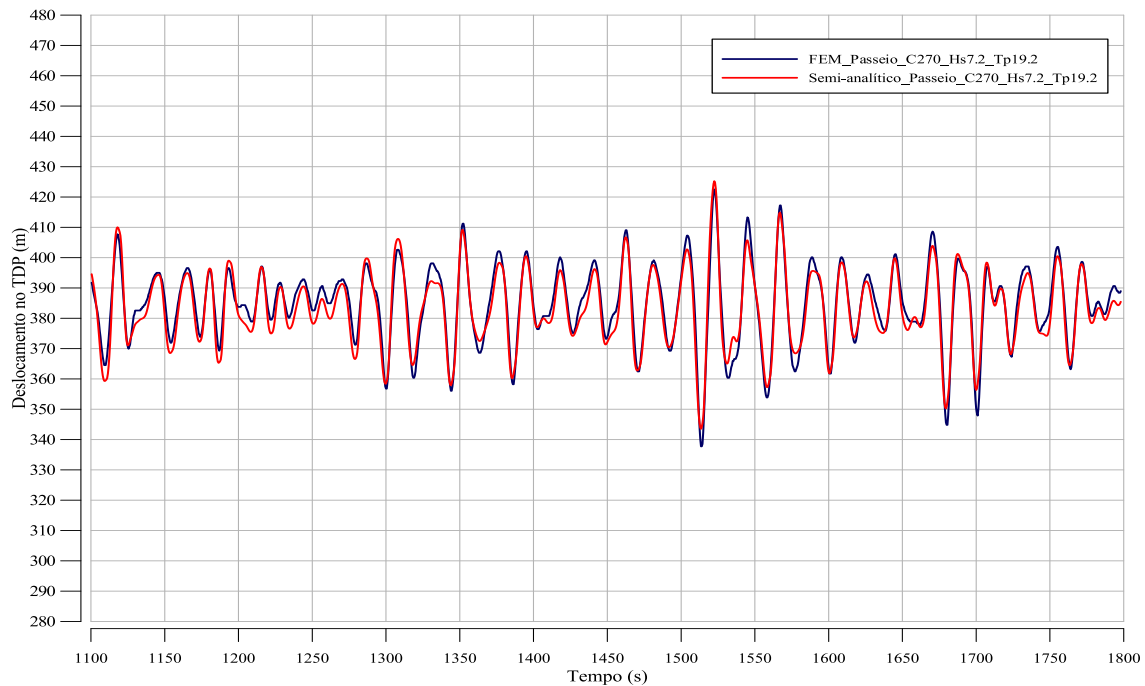


Figura IV.37 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 270: Séries temporais de passeio do TDP (FEM vs. Semi-analítico).

Na Tabela IV.19, são apresentadas, em termos de parâmetros estatísticos, as trações dinâmicas no TDP obtidas no modelo FEM e semi-analítico. Note-se que os valores obtidos analiticamente estão bastante abaixo dos resultados do modelo FEM, principalmente nos valores de picos máximos que apresentam diferenças até 16% considerando a tração total (estática + dinâmica).

Tabela IV.19– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 270: Parâmetros estatísticos da série de tração (kN) na TDZ (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	Origem	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
270	FEM	493.5	59.0	820.5	258.1
	Semi-analítico	482.5	50.5	689.7	247.8

O gráfico da Figura IV.38 mostra uma comparação das séries temporais de tração (somente a parcela dinâmica) no TDP obtidas para os dois modelos analisados. Como se pode observar, existem diferenças significativas entre os modelos estudados. Essa diferença deve-se à influência do comprimento do *riser* no solo (termo  $l'$  da Equação (II-44)) que em casos de comportamento dinâmico severo, tal comprimento não é avaliado adequadamente pelo modelo semi-analítico. A má avaliação deste termo geralmente ocorre devido à superestimação do mesmo, o que, por sua vez, leva à redução da tração elástica e reduz consequentemente a tração dinâmica. Esta redução também

pode ser observada graficamente na Figura IV.39, a qual apresenta a comparação de espectros da tração dinâmica no TDP calculadas com ambos métodos.

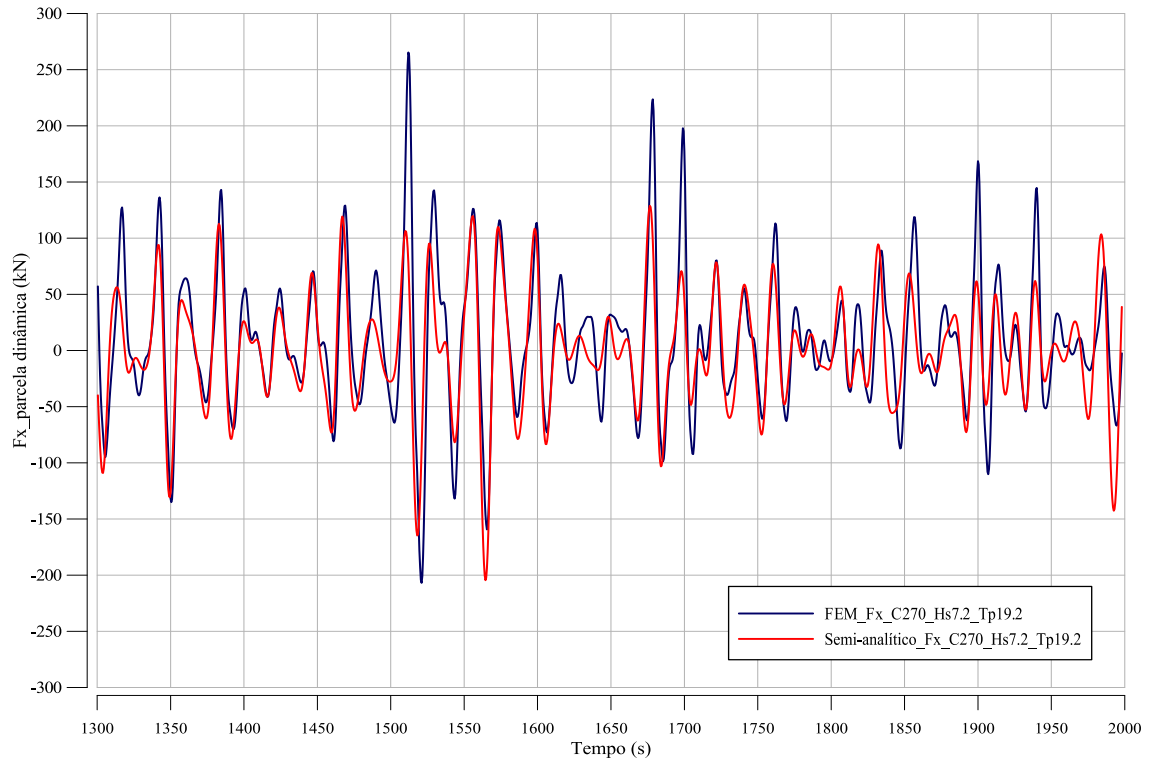


Figura IV.38 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 270: Séries temporais da parcela dinâmica da tração no TDP (FEM vs. Semi-analítico).

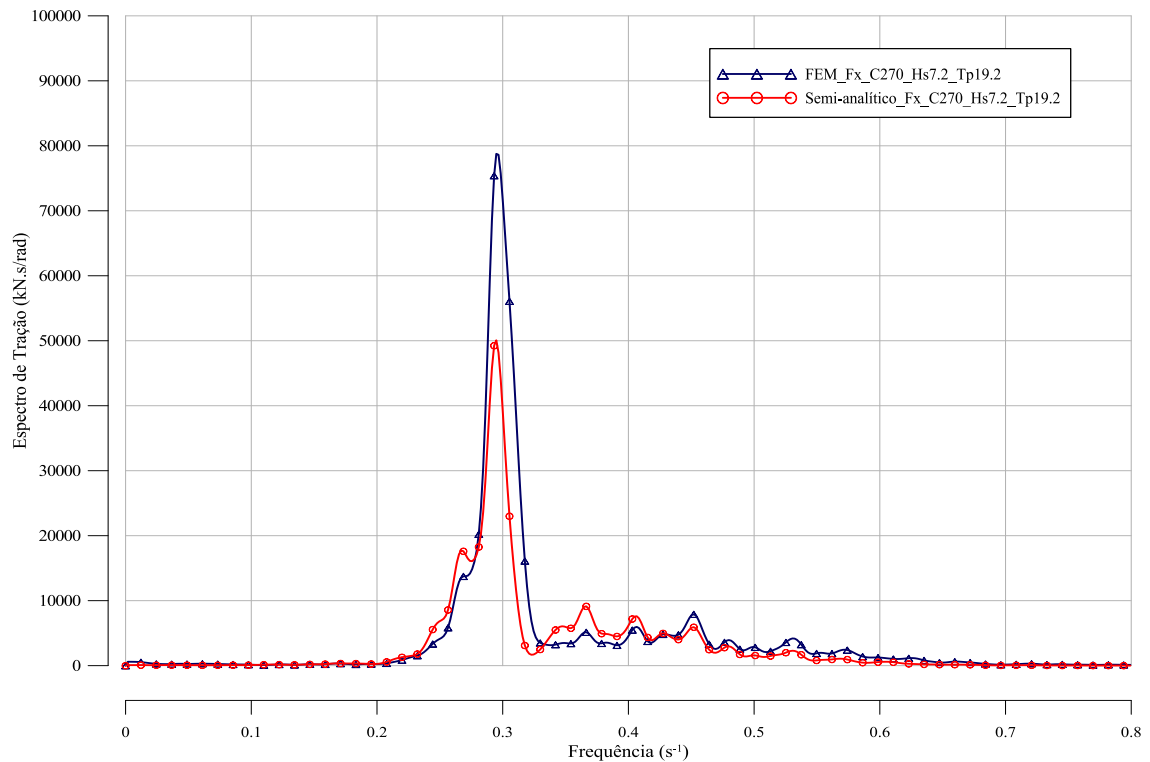


Figura IV.39 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 270: Comparação entre espectros de tração no TDP (FEM vs. Semi-analítico).

Os resultados em termos estatísticos referentes aos momentos fletores dinâmicos na região do TDP, obtidos no modelo FEM e semi-analítico estão apresentados na Tabela IV.20. A partir dos resultados desta tabela, pode-se observar uma tendência do modelo semi-analítico em sobre-estimar os picos de valores máximos dos momentos fletores dinâmicos quando estes são comparados com os obtidos no modelo FEM. Os maiores desvios relativos aos picos de mínimos são justificados pelo fator limite para a tração dinâmica, o qual é necessário para evitar que o momento fletor tenda ao infinito (Equação (II-59)).

Com relação aos picos máximos do momento fletor dinâmico neste caso de carregamento, observam-se diferenças significativas entre ambos os modelos estudados, cujos resultados mostram seus desvios máximos no entorno de até 35% na posição 1λ. Numa primeira análises de resultados, essas diferenças não podem ser justificadas pelas diferenças entre os passeios dinâmicos (Figura IV.37) e nem por diferenças entre as trações dinâmicas no TDP, visto que as trações obtidas no modelo FEM são maiores do que as obtidas pelo modelo semi-analítico (Figura IV.38).

Cumprе ressaltar que a formulação analítica proposta por Aranha *et al.* (2001(a)) para o cálculo da tração dinâmica, destaca a importância da taxa de variação da tração dinâmica na região próxima ao TDP para o cálculo da amplitude deste parâmetro (Equação (II-45)). Esta taxa de variação da tração analítica permitiu observar que quanto maior é o seu valor, maior é a diferença observada entre os momentos fletores obtidos pelos dois modelos. Este comportamento pode ser observado no gráfico da Figura IV.41. A parte superior deste gráfico mostra a comparação das trações dinâmicas no TDP para o caso de carregamento 270 calculadas com ambos os modelos. Pode-se observar que os valores de picos máximos são muito próximos, mas apresentam taxas de variação diferente. A comparação dessas taxas de variação é apresentada na parte inferior do mesmo gráfico, assim como também seus correspondentes momentos fletores. Constatase que quanto maior é a taxa de variação, maior é a diferença entre os momentos fletores dos dois métodos, o que justifica em parte as diferenças encontradas nos momentos fletores neste caso.

Tabela IV.20– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 270: Parâmetros estatísticos dos momentos fletores na TDZ (kN\*m),  $\lambda=7.5m$  (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	Posição	Modelo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
270	$-\lambda$	FEM	14.1	14.7	48.7	-2.6
		Semi-analítico	12.9	15.0	63.0	0.0
	0	FEM	24.8	14.0	51.0	-3.1
		Semi-analítico	22.3	15.9	67.5	0.0
	$1\lambda$	FEM	31.7	11.3	52.4	-3.3
		Semi-analítico	30.8	13.6	70.9	0.0
	$2\lambda$	FEM	37.1	7.5	56.5	-3.2
		Semi-analítico	36.9	9.7	74.8	0.0
	$3\lambda$	FEM	39.9	5.1	61.1	-2.1
		Semi-analítico	40.3	6.4	77.2	0.0
	$4\lambda$	FEM	41.0	4.4	65.6	-0.2
		Semi-analítico	41.8	5.2	79.5	0.0
	$5\lambda$	FEM	41.5	4.4	69.4	27.5
		Semi-analítico	42.5	4.8	80.6	7.2
	$6\lambda$	FEM	41.7	4.6	73.1	28.6
		Semi-analítico	42.8	4.7	81.6	29.7
	$7\lambda$	FEM	41.7	4.6	75.5	29.0
		Semi-analítico	42.9	4.8	82.2	29.7
	$8\lambda$	FEM	41.8	4.5	76.2	29.5
		Semi-analítico	42.6	4.9	82.1	29.3
$9\lambda$	FEM	41.7	4.3	74.5	29.9	
	Semi-analítico	42.5	4.7	80.4	29.8	
$10\lambda$	FEM	41.4	4.1	72.7	30.0	
	Semi-analítico	42.4	4.5	78.7	30.2	

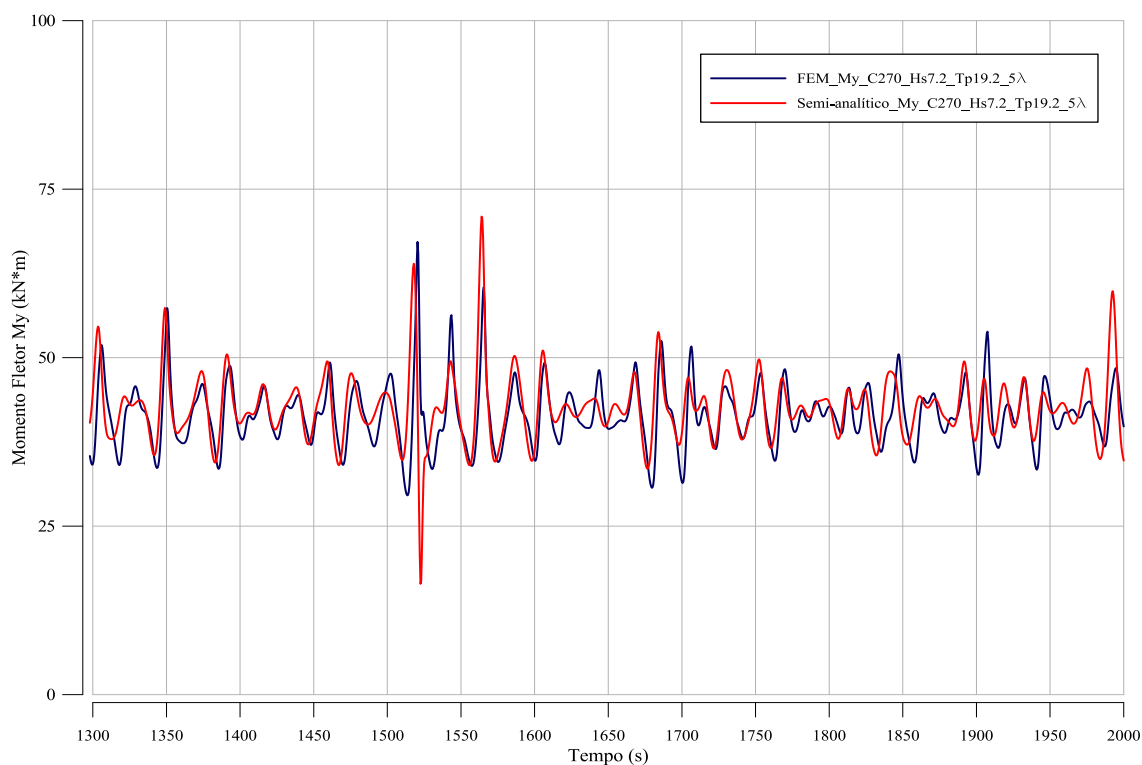


Figura IV.40 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 270: Séries temporais de momentos fletores no TDZ. Posição  $5\lambda$  (FEM vs. Semi-analítico).

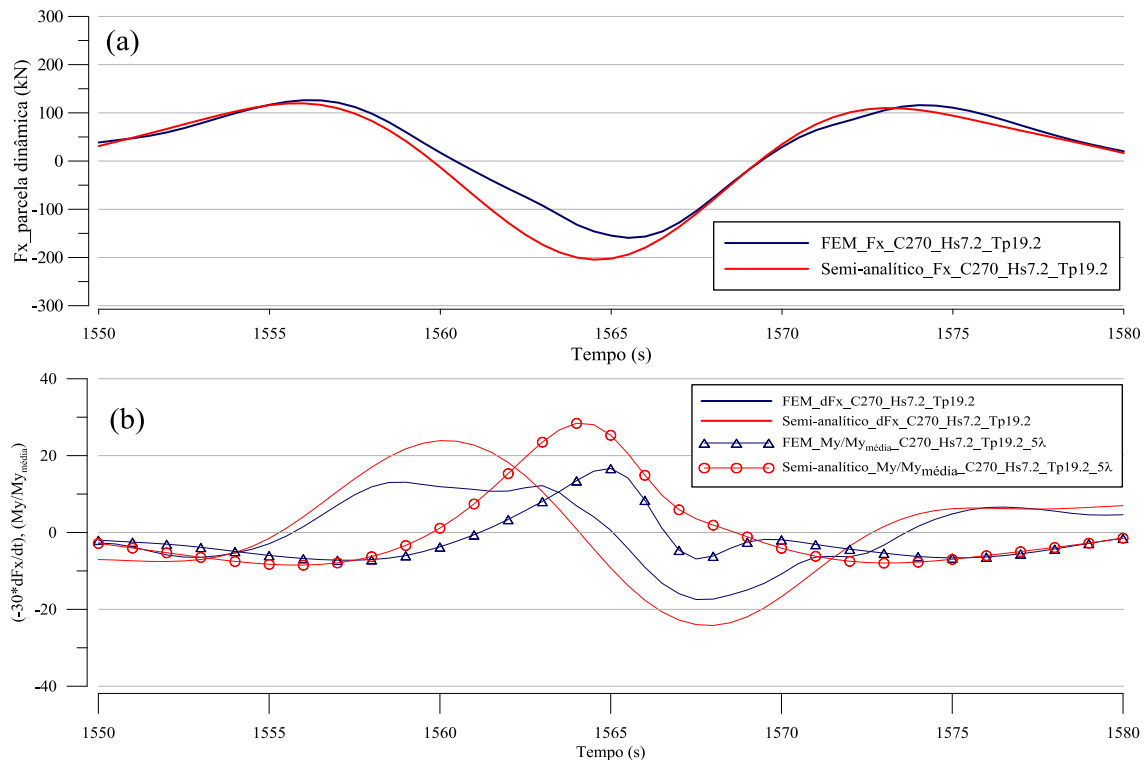


Figura IV.41 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 270: (a) Séries temporais da parcela dinâmica da tração no TDP; (b) Séries temporais da taxa de variação da tração dinâmica e momentos fletores no TDZ. Posição  $5\lambda$  (FEM vs. Semi-analítico).

Na sequência, na Tabela IV.21, é realizada uma comparação dos fatores de utilização dos estados de mar de curto prazo (DNV-OS-F201 versão LRFD) supondo uma classe de segurança normal e estado limite operacional obtidos nos dois modelos. Observa-se que desta vez a influência das diferenças encontradas entre ambos os modelos no cálculo da tração é significativa no cálculo dos valores de máximos, principalmente nas posições analisadas do *riser* de  $-\lambda$  a  $4\lambda$ . A maior diferença dos valores de máximos foi apresentada na posição  $4\lambda$  com valor 28% acima no resultado semi-analítico comparado com o obtido pelo modelo FEM.

Na mesma Tabela IV.21, é possível observar que para as posições analisadas do *riser* ( $5\lambda$  até  $10\lambda$ ), os valores de máximos apresentam boa aproximação, visto que as diferenças entre os modelos foram menores a 9%. Na Figura IV.42, são mostrados graficamente os fatores de utilização apenas na posição  $5\lambda$ , observando-se grande concordância entre ambos modelos.

Tabela IV.21– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 270: Parâmetros estatísticos dos fatores de utilização de curto prazo na TDZ,  $\lambda=7.5m$  (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	Posição	Modelo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	VMP Extremo
270	$-\lambda$	FEM	0.06	0.04	0.15	0.02	0.15
		Semi-analítico	0.05	0.04	0.18	0.02	0.18
	0	FEM	0.09	0.04	0.15	0.02	0.16
		Semi-analítico	0.08	0.04	0.19	0.02	0.19
	$1\lambda$	FEM	0.11	0.03	0.16	0.02	0.16
		Semi-analítico	0.10	0.03	0.20	0.02	0.20
	$2\lambda$	FEM	0.12	0.02	0.17	0.02	0.17
		Semi-analítico	0.11	0.02	0.21	0.02	0.21
	$3\lambda$	FEM	0.13	0.01	0.18	0.02	0.19
		Semi-analítico	0.12	0.02	0.21	0.02	0.22
	$4\lambda$	FEM	0.13	0.01	0.19	0.03	0.21
		Semi-analítico	0.12	0.01	0.22	0.02	0.23
	$5\lambda$	FEM	0.13	0.01	0.20	0.09	0.22
		Semi-analítico	0.12	0.01	0.22	0.02	0.23
	$6\lambda$	FEM	0.13	0.01	0.21	0.10	0.23
		Semi-analítico	0.12	0.01	0.22	0.09	0.23
	$7\lambda$	FEM	0.13	0.01	0.21	0.10	0.24
		Semi-analítico	0.12	0.01	0.22	0.09	0.23
	$8\lambda$	FEM	0.13	0.01	0.21	0.10	0.23
		Semi-analítico	0.11	0.01	0.21	0.08	0.23
$9\lambda$	FEM	0.12	0.01	0.20	0.09	0.22	
	Semi-analítico	0.11	0.01	0.21	0.09	0.23	
$10\lambda$	FEM	0.12	0.01	0.19	0.10	0.21	
	Semi-analítico	0.11	0.01	0.21	0.09	0.23	

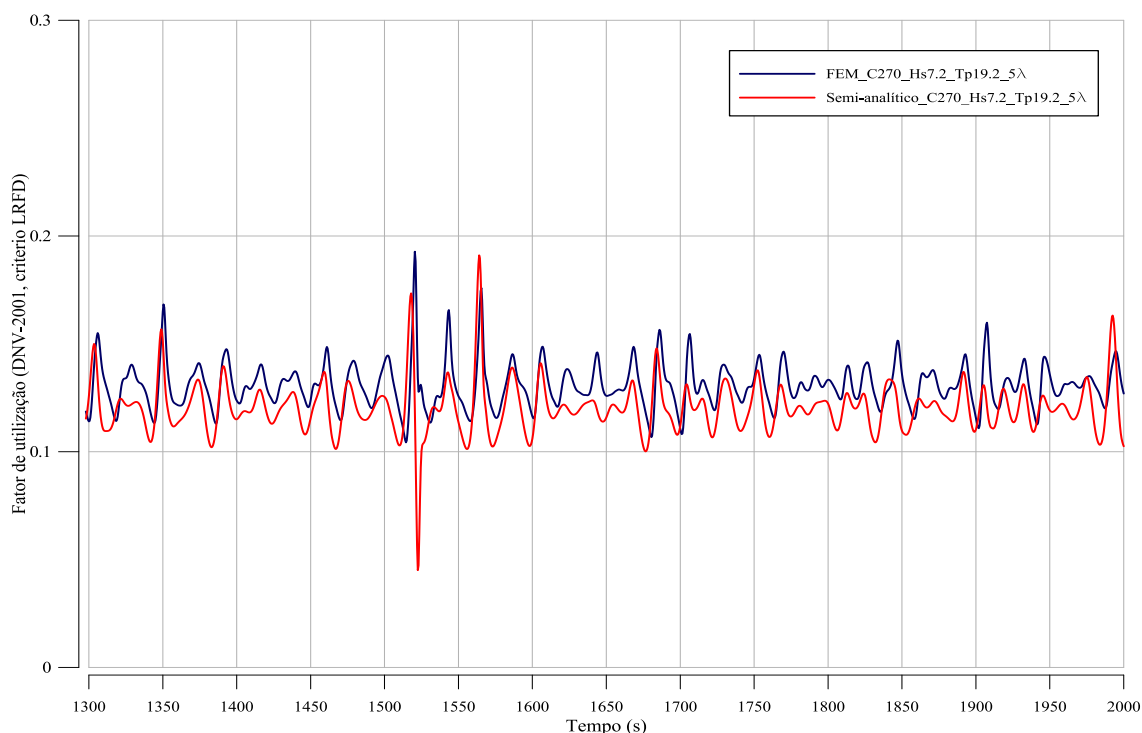


Figura IV.42 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 270: Séries temporais de fatores de utilização de curto prazo na região do TDP. Posição  $5\lambda$  (FEM vs. Semi-analítico).



No gráfico da Figura IV.43, é apresentada uma comparação entre as estimativas dos valores extremos máximos mais prováveis do fator de utilização obtidos com ambos modelos para a TDZ. Como pode ser observado, o método semi-analítico foi capaz de prever os fatores de utilização máximos de forma eficiente, visto que foram observadas diferenças inferiores a 5% no valor máximo do extremo mais provável na região do TDP, sendo um valor de 0.24 no modelo FEM e 0.23 para o modelo semi-analítico.

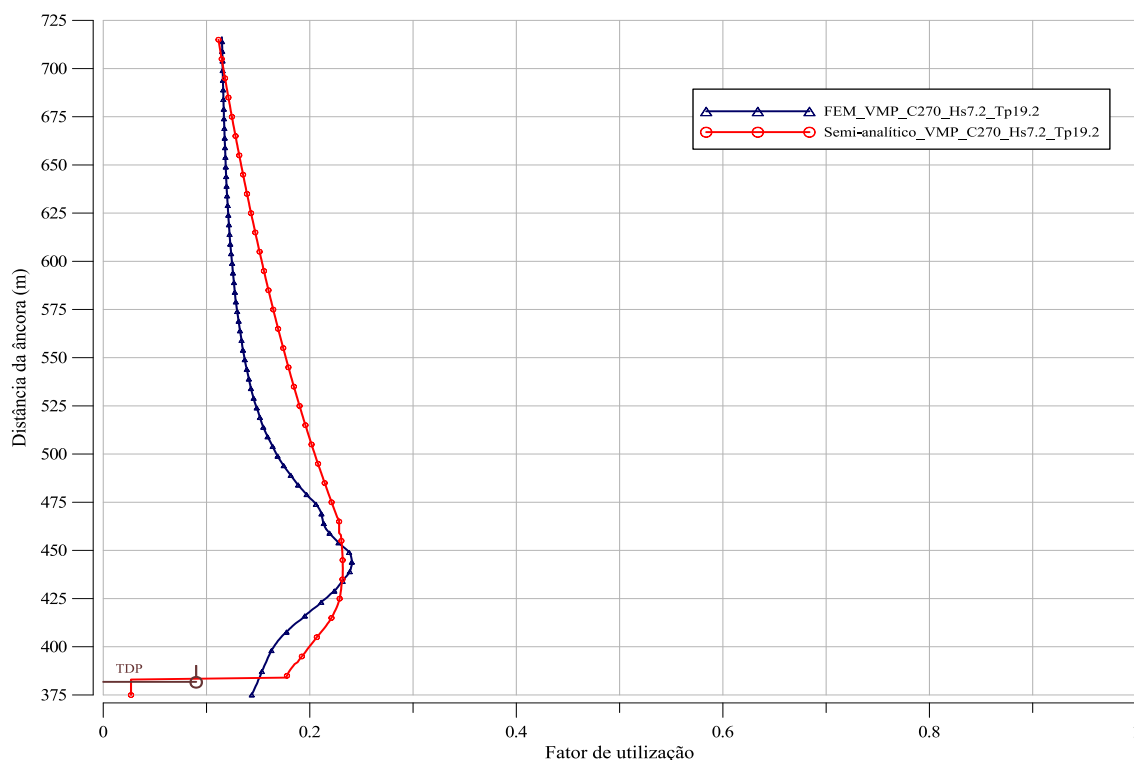


Figura IV.43 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 270: Valores extremos máximos mais prováveis de curto prazo do fator de utilização (FEM vs. Semi-analítico).

- **Caso de carregamento 290 (Hs=9.2m, Tp=21.6s)**

O terceiro e último caso escolhido neste estudo de caso, foi o carregamento 290 (Hs=9.2m, Tp=21.6s). Este estado mar pode ser caracterizado como estado de mar deca milenar conforme o apresentado na Figura IV.28.

A Figura IV.44 e a Tabela IV.22 apresentam uma comparação das séries temporais do passeio do TDP e os seus parâmetros estatísticos, respectivamente, obtidas com ambos modelos. Novamente, pode-se observar, que os resultados obtidos pela aproximação polinomial proposta neste trabalho (seção II.9) apresentam boa concordância de forma geral.

Pode-se observar que, para esse caso, os deslocamentos no TDP apresentam uma amplitude máxima da ordem de 170m, no entanto, a aproximação polinomial tem um comportamento convergente com os valores obtidos no modelo FEM, mostrando diferenças principalmente nos picos de mínimos, que são subestimados no modelo semi-analítico com desvios máximos em torno de  $2.1\lambda$  ( $\lambda=7.3\text{m}$ ) equivalente a 15.4m.

Tabela IV.22– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 290: Parâmetros estatísticos do passeio do TDP (m) (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	Origem	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
290	FEM	364.2	22.9	441.8	268.0
	Semi-analítico	364.7	21.5	447.7	283.4

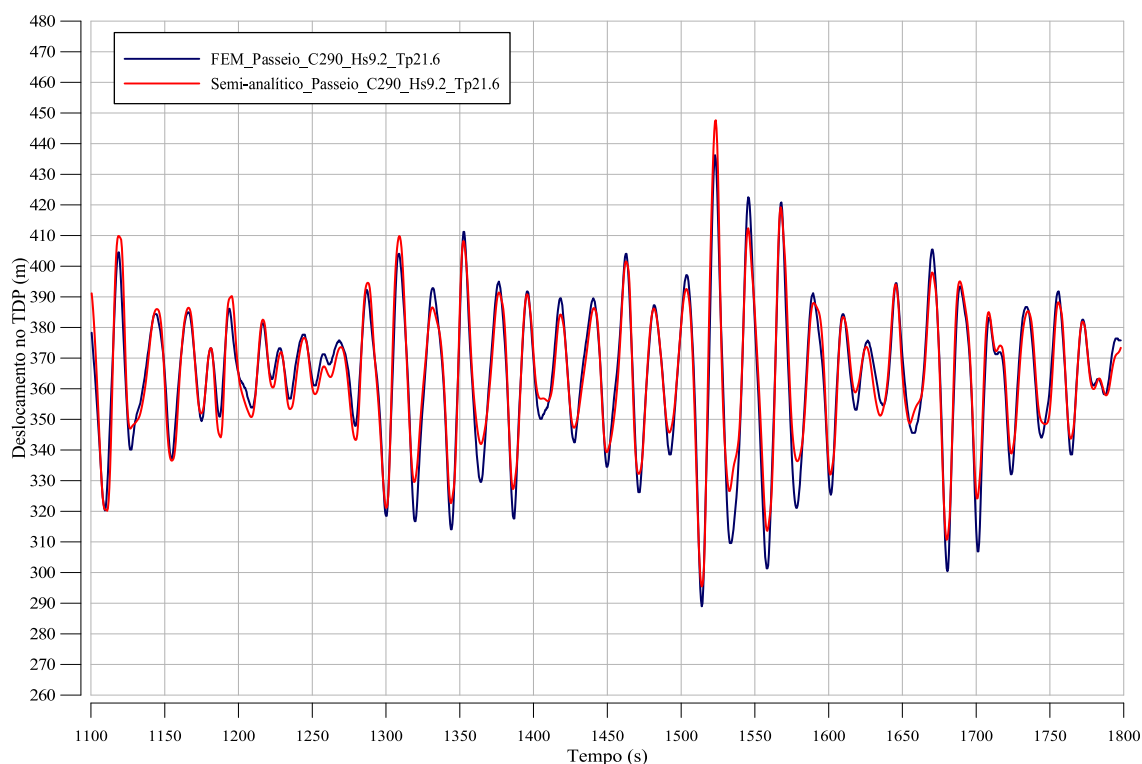


Figura IV.44 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 290: Séries temporais de passeio do TDP (FEM vs. Semi-analítico).

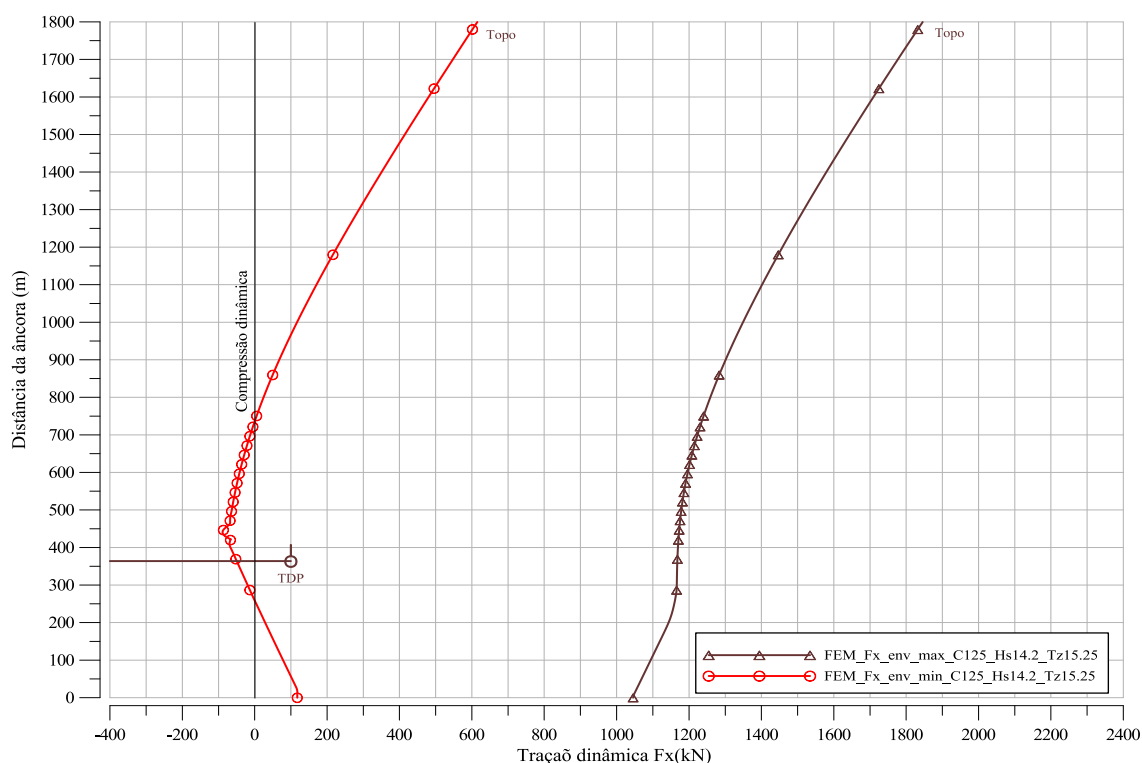
A Tabela IV.23 mostra uma comparação em termos de parâmetros estatísticos da tração na TDZ obtida com ambos modelos. É possível observar que o único parâmetro que apresenta boa concordância é a média com diferença de 4%, porém, não é um parâmetro representativo por si só. Com relação aos picos máximos de tração, observam-se diferenças significativas entre ambos os modelos estudados, cujos resultados apresentam discrepâncias em seus valores máximos em torno de 24%. Já nos picos de mínimos, as diferenças encontradas entre os modelos chegam a ser do dobro do valor calculado

analiticamente quando comparados com o modelo FEM. Essas diferenças encontradas nos picos de mínimos são justificadas pelo fator limite para a tração dinâmica. O fator adotado foi de 77% da tração estática no TDP, sendo de 503.7kN para o caso esse caso de carregamento.

*Tabela IV.23– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 290: Parâmetros estatísticos da série de tração (kN) na TDZ (FEM vs. Semi-analítico).*

Caso	Origem	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
290	FEM	520.9	121.7	1158.7	-45.0
	Semi-analítico	503.7	97.0	881.8	116.2

A Figura IV.45, que apresenta as envoltórias de valores máximos e mínimos da tração dinâmica obtidas no modelo FEM, ilustra a ocorrência de compressão dinâmica neste caso de carregamento. Esta ocorrência de compressão dinâmica permite entender as diferenças significativas encontradas na tração dinâmica entre os modelos estudados, visto que este comportamento extrapola a faixa de aplicação do modelo semi-analítico aqui empregado.



*Figura IV.45 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 290: Envoltórias de máximos e mínimos da tração dinâmica ao longo do comprimento do riser (FEM).*

A Tabela IV.24 compara os resultados obtidos para os momentos fletores com ambos os modelos. Observa-se que o método Analítico não foi capaz de prever os picos de máximos e mínimos de momentos fletores de forma eficiente, visto que foram encontradas diferenças muito grandes, chegando a ser acima do dobro entre ambos métodos. Pode-se observar este comportamento mais claramente na Figura IV.46, onde é mostrada a comparação da séries de momentos fletores calculadas com ambos modelos na posição  $10\lambda$ . Nota-se, que os picos de máximos em ambas as séries coincidem apenas em algumas partes da série temporal. Neste caso, as diferenças representam uma limitação do modelo semi-analítico proposto para os casos onde ocorre compressão dinâmica.

*Tabela IV.24– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 290: Parâmetros estatísticos dos momentos fletores na TDZ (kN\*m),  $\lambda=7.3m$  (FEM vs. Semi-analítico).*

Caso	Posição	Modelo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
290	$-\lambda$	FEM	15.8	15.5	64.3	-6.5
		Semi-analítico	15.6	17.7	123.2	0.0
	0	FEM	22.7	15.3	73.9	-5.8
		Semi-analítico	21.5	18.3	136.5	0.0
	$1\lambda$	FEM	27.3	14.3	76.4	-5.6
		Semi-analítico	27.1	17.8	148.0	0.0
	$2\lambda$	FEM	31.6	12.6	92.1	-6.7
		Semi-analítico	32.0	16.3	158.8	0.0
	$3\lambda$	FEM	35.1	10.6	104.7	-7.1
		Semi-analítico	35.8	14.4	165.5	0.0
	$4\lambda$	FEM	37.2	9.4	114.3	-11.4
		Semi-analítico	38.6	12.8	169.6	0.0
	$5\lambda$	FEM	38.5	8.8	133.5	-5.3
		Semi-analítico	40.2	12.0	172.2	0.0
	$6\lambda$	FEM	39.5	8.7	144.9	-5.2
		Semi-analítico	41.3	11.5	173.8	0.0
	$7\lambda$	FEM	39.9	8.9	166.5	-4.5
		Semi-analítico	41.9	11.4	174.7	0.0
	$8\lambda$	FEM	40.1	9.0	185.5	-4.6
		Semi-analítico	41.9	11.5	175.0	-0.3
$9\lambda$	FEM	40.2	9.2	190.9	12.3	
	Semi-analítico	41.9	11.1	169.1	1.5	
$10\lambda$	FEM	40.2	9.2	201.5	24.8	
	Semi-analítico	41.9	10.6	163.4	3.1	

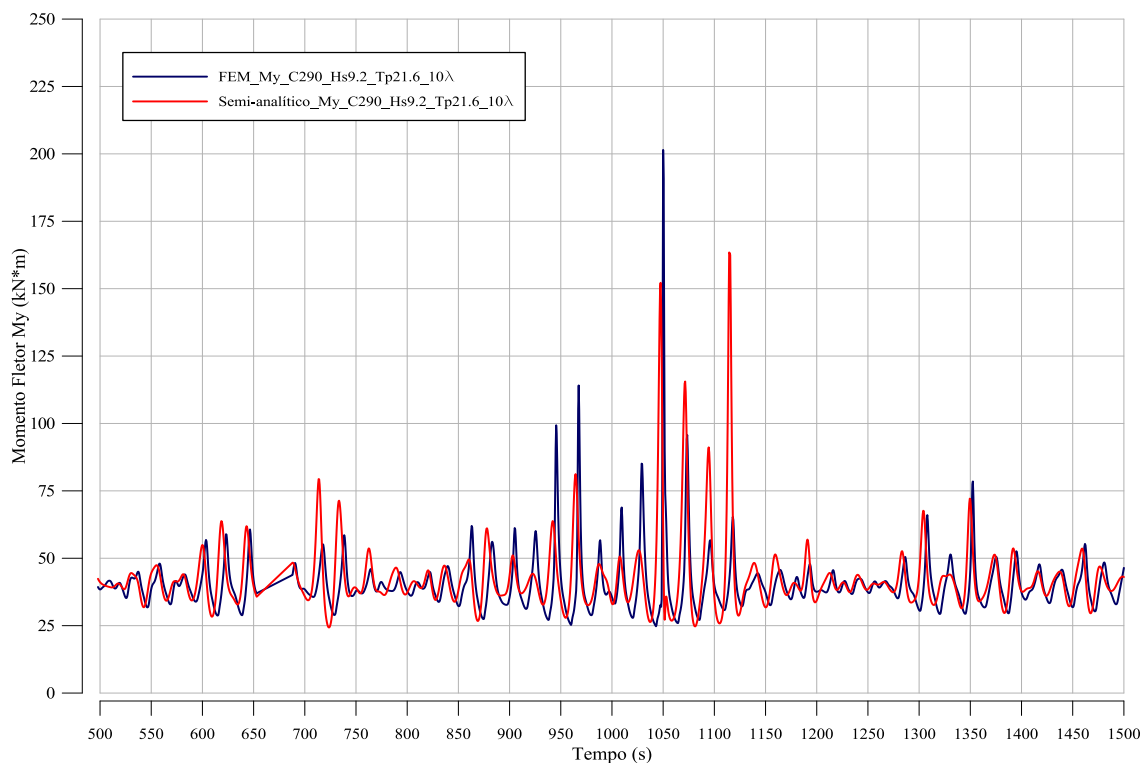


Figura IV.46 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 290: Séries temporais de momentos fletores no TDZ. Posição  $10\lambda$  (FEM vs. Semi-analítico).

Na Tabela IV.25, é realizada uma comparação dos fatores de utilização dos estados de mar de curto prazo. Pode-se observar, como seria de se esperar, que desta vez a influência das diferenças encontradas entre os modelos estudados no cálculo do passeio, tração e momentos é muito grande, apresentando a maior diferença na posição  $1\lambda$  com valores maiores que dois terços do valor calculado no modelo FEM. Já nas posições do *riser* mais afastadas do TDP, as diferenças entre os fatores calculados com os dois modelos diminuem, chegando a ser de 22% na posição  $10\lambda$ . Isto pode ser visto graficamente na Figura IV.47, que mostra as séries temporais dos fatores de utilização obtidos com ambas as metodologias para essa posição analisada no *riser*.

Tabela IV.25– Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 290: Parâmetros estatísticos dos fatores de utilização de curto prazo na TDZ,  $\lambda=7.3m$  (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	Posição	Modelo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	VMP Extremo
290	$-\lambda$	FEM	0.07	0.04	0.18	0.02	0.18
		Semi-analítico	0.06	0.05	0.34	0.02	0.34
	0	FEM	0.08	0.04	0.21	0.02	0.20
		Semi-analítico	0.08	0.05	0.37	0.02	0.37
	$1\lambda$	FEM	0.10	0.04	0.22	0.02	0.22
		Semi-analítico	0.09	0.05	0.40	0.02	0.41
	$2\lambda$	FEM	0.11	0.03	0.26	0.02	0.26
		Semi-analítico	0.10	0.04	0.43	0.02	0.46
	$3\lambda$	FEM	0.12	0.03	0.29	0.02	0.31
		Semi-analítico	0.11	0.04	0.44	0.02	0.50
	$4\lambda$	FEM	0.12	0.02	0.31	0.02	0.35
		Semi-analítico	0.11	0.03	0.45	0.02	0.54
	$5\lambda$	FEM	0.12	0.02	0.36	0.02	0.41
		Semi-analítico	0.12	0.03	0.45	0.02	0.58
	$6\lambda$	FEM	0.13	0.02	0.39	0.02	0.46
		Semi-analítico	0.12	0.03	0.46	0.02	0.61
	$7\lambda$	FEM	0.13	0.02	0.45	0.02	0.54
		Semi-analítico	0.12	0.03	0.46	0.02	0.62
	$8\lambda$	FEM	0.13	0.02	0.50	0.02	0.60
		Semi-analítico	0.11	0.03	0.46	0.03	0.63
$9\lambda$	FEM	0.13	0.02	0.52	0.05	0.65	
	Semi-analítico	0.11	0.03	0.44	0.02	0.64	
$10\lambda$	FEM	0.13	0.02	0.54	0.09	0.66	
	Semi-analítico	0.11	0.03	0.43	0.03	0.64	

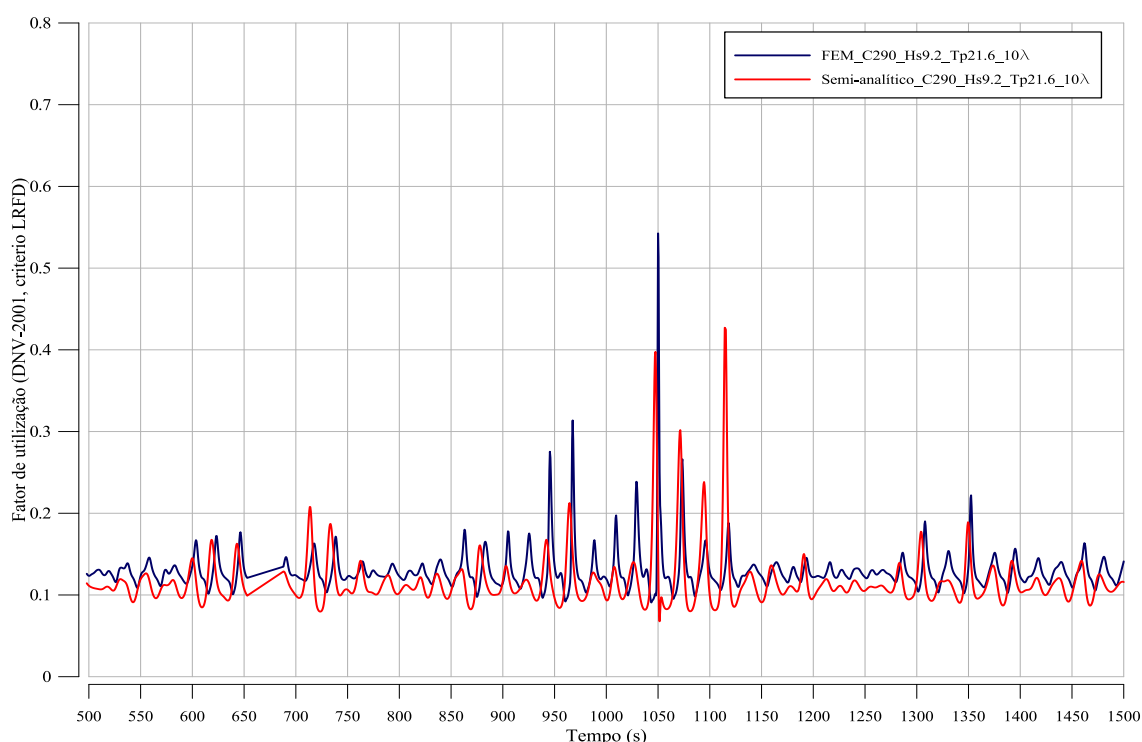


Figura IV.47 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 290: Séries temporais de fatores de utilização de curto prazo na região do TDP. Posição  $10\lambda$  (FEM vs. Semi-analítico).

No gráfico da Figura IV.48, são apresentadas a comparação da estimativa dos valores extremos máximos mais prováveis do fator de utilização (valor máximo ao longo de todo o trecho do TDP) obtidos com ambos os modelos. Verifica-se, a partir desta figura, que assim como previsto, para casos de carregamento que apresentam ocorrência de compressão dinâmica no *riser*, as diferenças entre os modelos são maiores do que naqueles casos em que a compressão dinâmica não ocorre. Mesmo assim, a diferença entre máximos é de 5%, sendo o fator de utilização de 0.67 no modelo FEM e 0.64 para o modelo semi-analítico.

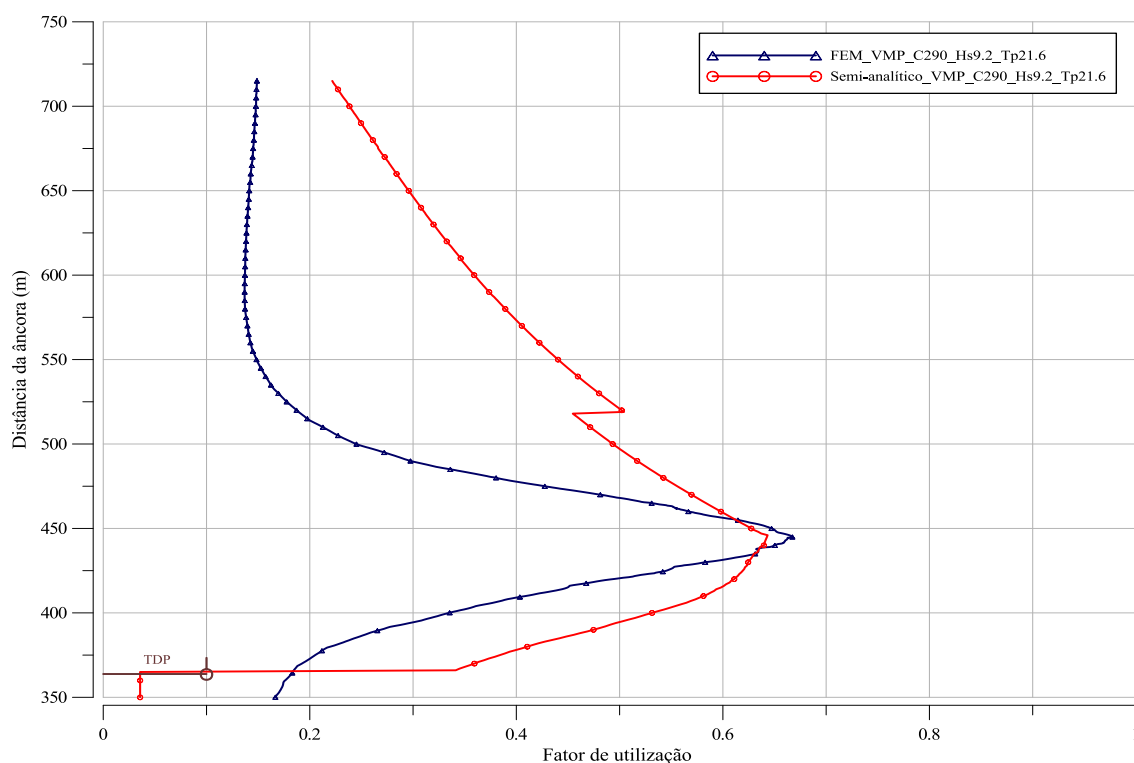


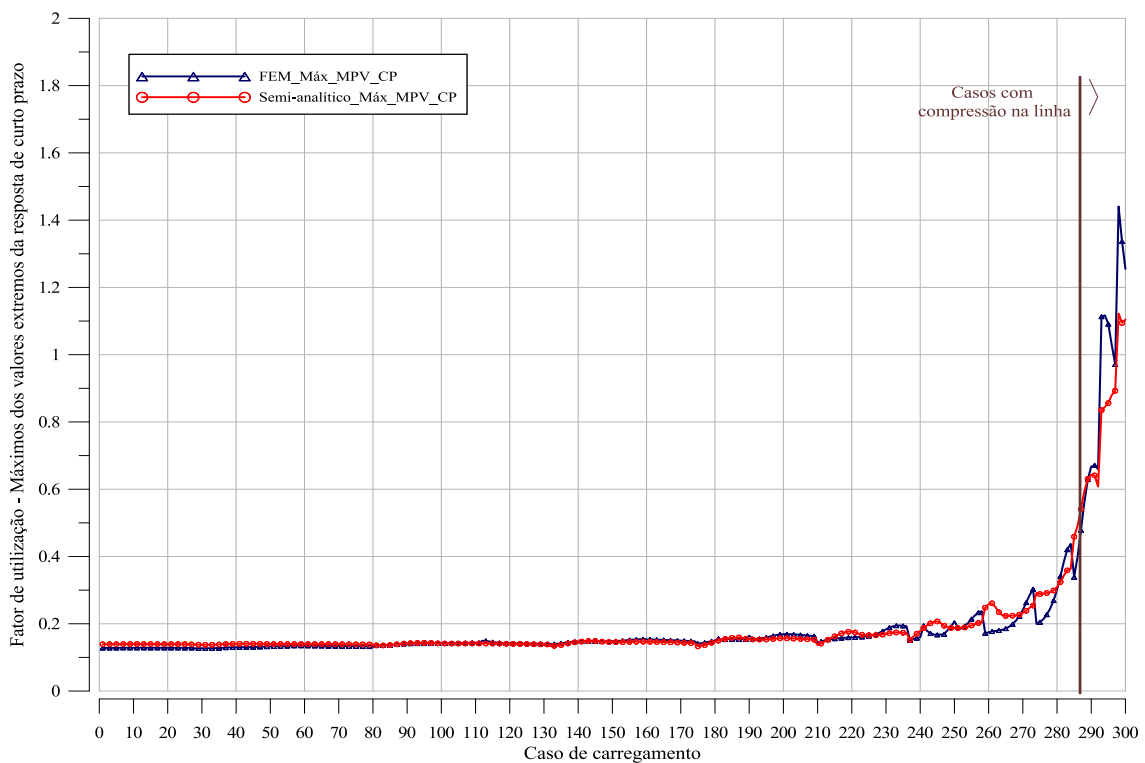
Figura IV.48 – Estudo de Caso 2- Caso de Carregamento 290: Valores extremos máximos mais prováveis do fator de utilização de curto prazo (FEM vs. Semi-analítico).

#### IV.4.4 Resumo das análises dos fatores de utilização de curto prazo

Como resultado das análises dos 300 estados de mar de curto prazo, são mostrados na Figura IV.49 e na Tabela B.3 do Anexo B os valores extremos máximos mais prováveis do fator de utilização para estes 300 estados de mar. Analisando-se os resultados obtidos, podemos constatar que o método semi-analítico foi capaz de representar satisfatoriamente o comportamento “global” do *riser*, apresentando diferenças mais significativas nos casos de carregamento onde foi verificada ocorrência de compressão dinâmica (casos 288

a 300). Mesmo assim, é importante ressaltar que as diferenças encontradas entre os valores extremos podem ser consideradas aceitáveis, uma vez que o principal objetivo do emprego de metodologias analíticas, embora simplificadas, não é o de substituir metodologias mais robustas e, sim, selecionar condições mais críticas para análises de projeto.

Da mesma forma que no estudo do caso 1, a redução do custo computacional da metodologia semi-analítica no estudo de caso 2 foi significativa quando comparado com o método FEM. Em média, cada análise dinâmica realizada no modelo FEM consumiu aproximadamente 3h (3800s de simulação) em um computador com processador Core i7 com 32GB de memória RAM, enquanto os 300 casos rodados no programa analítico F.U.LongTerm levaram em torno de 15 minutos (após das análises para calibrar os coeficientes do polinômio da Equação (II-60)).



*Figura IV.49 – Estudo de Caso 2: Máximos dos valores extremos mais prováveis de curto prazo para os 300 casos de carregamento (FEM vs. Semi-analítico).*



#### IV.4.5 Resultados da análise de Longo Prazo

A Figura IV.50 apresenta a comparação entre os resultados dos fatores de utilização de longo prazo (período de retorno de 100 anos) na TDZ para ambos os modelos. Esses fatores foram obtidos através do método de integração descrito na seção III.3 deste trabalho com uso do programa de computador PosLT (LACEO, 2015). A malha de interpolação utilizada é mostrada na Figura IV.28 e descrita na Tabela B.1.

Na mesma Figura IV.50, observa-se que o método Analítico foi capaz de prever os fatores de utilização de longo prazo de forma eficiente, uma vez que as metodologias apresentaram diferenças entre seus valores máximos próximos a 8%, sendo obtido um fator de utilização de 0.52 no FEM e 0.48 no modelo semi-analítico.

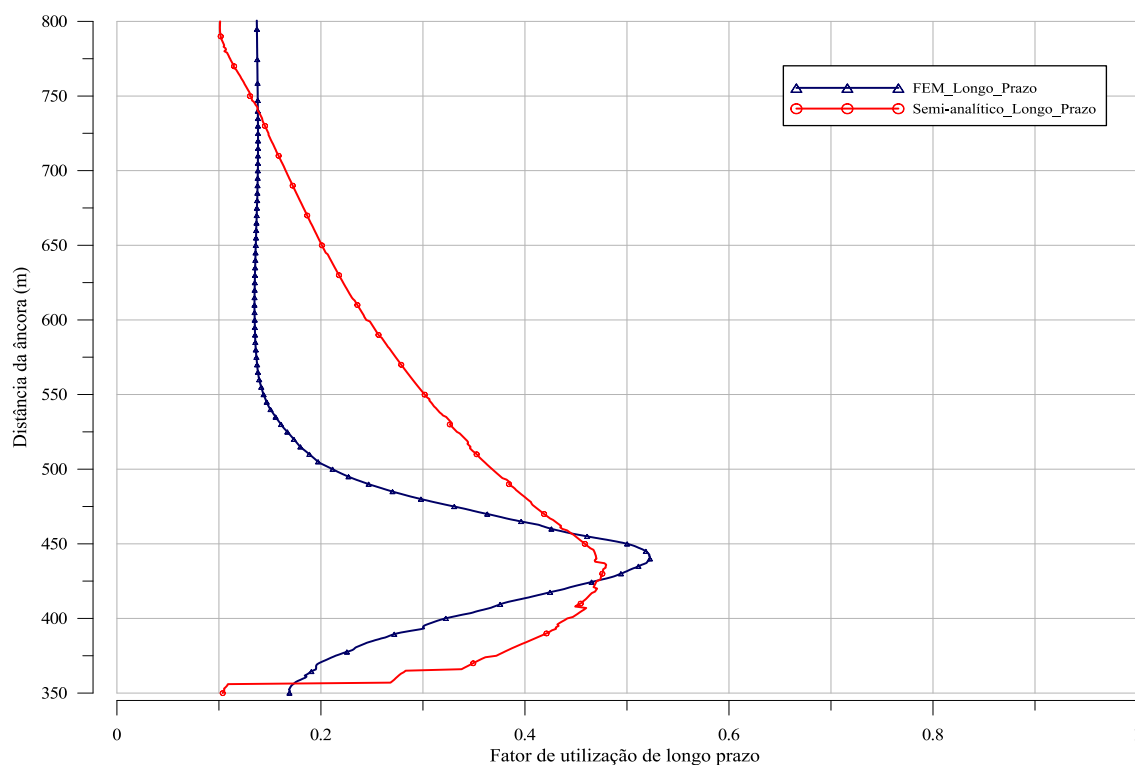


Figura IV.50 – Estudo de Caso 2: Fatores de utilização de longo prazo (100 anos) na região do TDP (FEM vs. Semi-analítico).

A Figura IV.51 apresenta graficamente, para ambos modelos, a comparação dos estados de mar com maior contribuição no valor máximo do valor extremo mais provável do fator de utilização de longo prazo (período de retorno de 100 anos), mostrado no gráfico anterior. Os estados mar mostrados nessa figura correspondem aos 100 primeiros estados de mar com maiores coeficientes de participação. Esses coeficientes foram calculados conforme o descrito na seção III.2 deste trabalho.

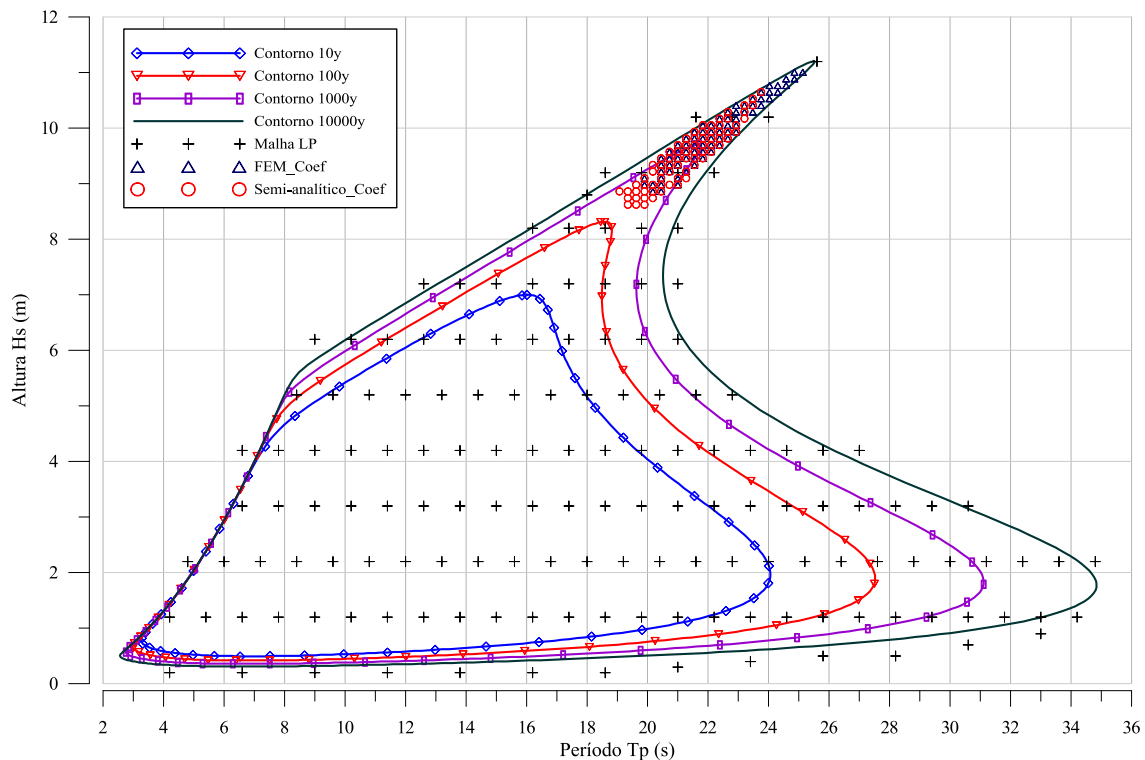
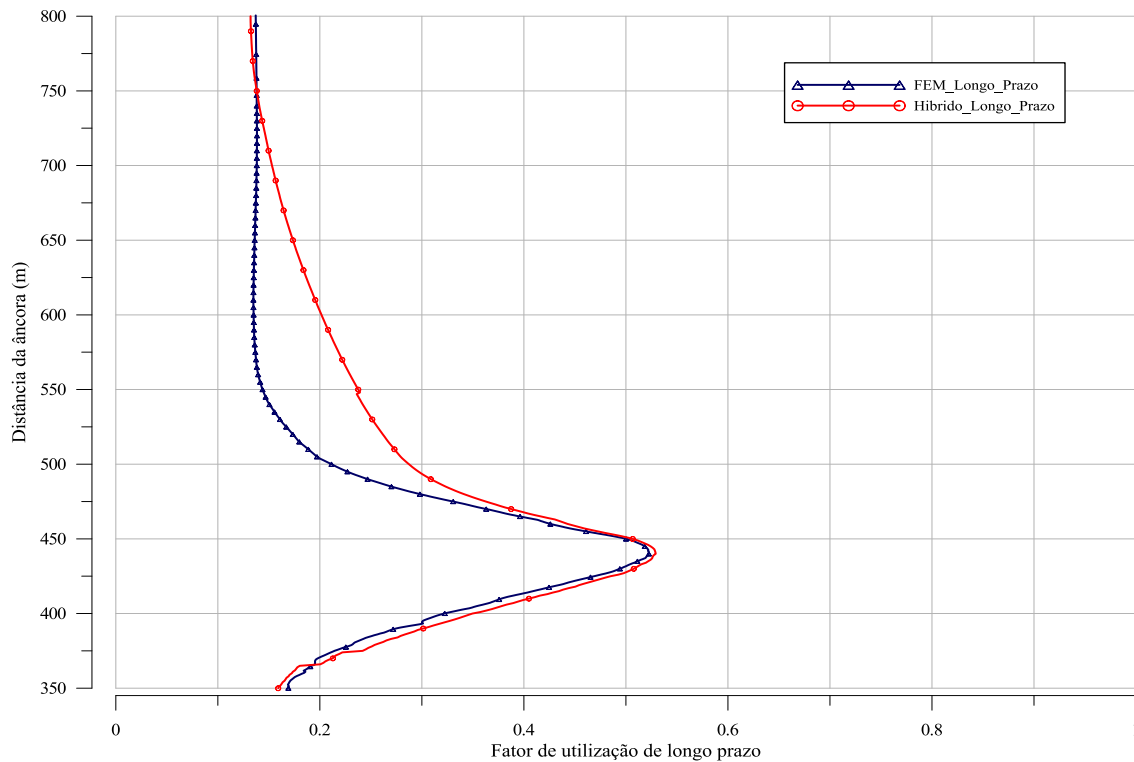


Figura IV.51 – Estudo de Caso 2: Estados de mar com maior contribuição para a resposta de longo prazo do máximo valor mais provável (100 anos) do fator de utilização na região do TDP (FEM vs. Semi-analítico).

Como pode ser observado, em ambas as metodologias os estados de mar curto prazo que mais contribuem na resposta de longo prazo estão contidos entre as curvas de contorno ambiental milenar e deca milenar. É possível observar que os coeficientes de participação da resposta calculada no modelo semi-analítico são levemente inferiores aos obtidos no modelo FEM. Essa diferença é devida à influência dos 13 estados de mar que geram compressão dinâmica, onde os resultados obtidos com o modelo semi-analítico foram em média inferiores aos calculados no modelo FEM. Da mesma maneira que no estudo de caso 1, os resultados obtidos para ambas as metodologias mostram que os estados de mar de curto prazo de maior contribuição na resposta de longo prazo, estão associados ao período ressonante de *heave* da plataforma mostrado na Figura IV.2.

A Figura IV.52 apresenta graficamente, a comparação entre os resultados dos fatores de utilização de longo prazo obtidos no modelo FEM e no modelo “Híbrido” (descrito no estudo de caso 1). Como pode ser observado, os fatores de utilização de longo prazo máximos obtidos no modelo “Híbrido” são muito próximos aos obtidos no modelo FEM, sendo obtido um fator de utilização de 0.53 no modelo Híbrido, i.e., uma diferença equivalente a 2% entre ambos os modelos.



*Figura IV.52 – Estudo de Caso 2: Fatores de utilização de longo prazo (100 anos) na região do TDP (FEM vs. Híbrido).*

A Figura IV.53, apresenta graficamente a comparação dos estados de mar com maior contribuição no valor máximo do fator de utilização de longo prazo calculados nos modelos FEM e Híbrido. Pode-se observar que os estados de mar com maior contribuição na resposta de longo prazo praticamente coincidem em ambas as metodologias, e atingem estados de mar contidos entre as faixas de 9-11m para altura significativa de onda e de 19-26s para os períodos de pico.

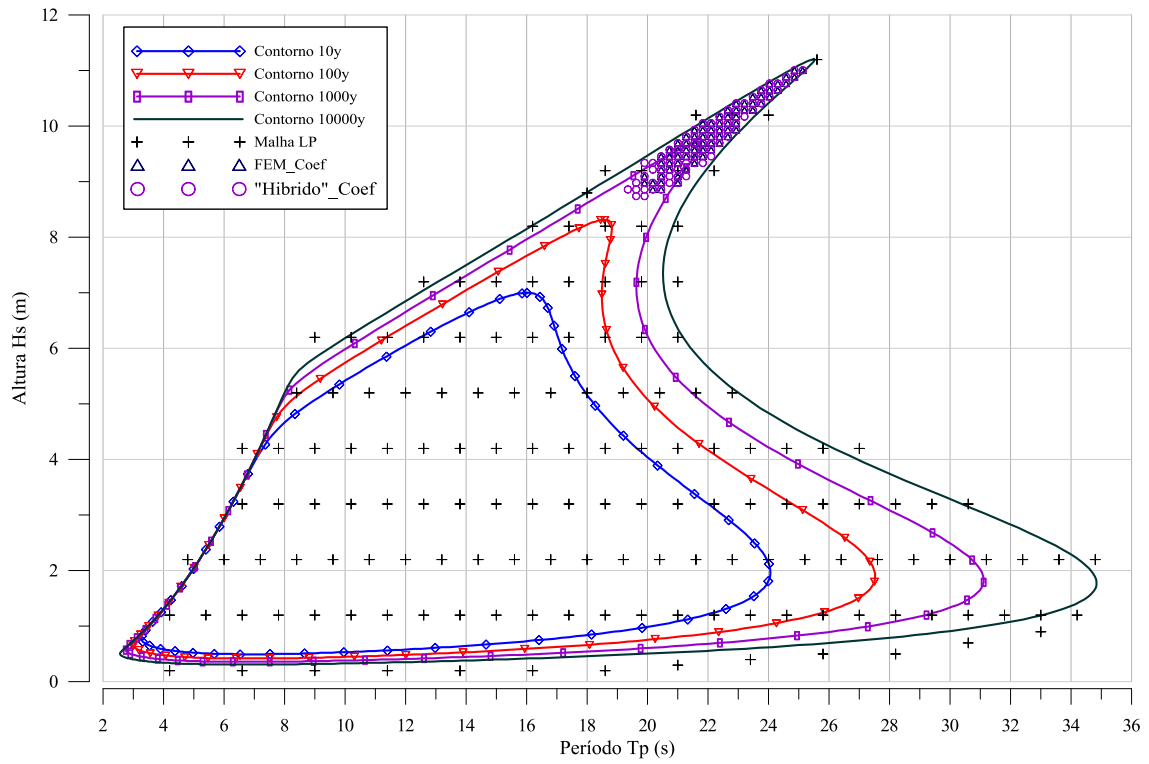


Figura IV.53 – Estudo de Caso 2: Estados de mar com maior contribuição para a resposta de longo prazo do máximo valor mais provável (100 anos) do fator de utilização na região do TDP (FEM vs. Hibrido).

## IV.5 Estudo de Caso 3

### IV.5.1 Descrição do Modelo

O terceiro e último caso de estudo, trata-se de um *riser* rígido em catenária livre de aço apresentado no trabalho de SIQUEIRA et al. (2007) de 8.625” de diâmetro externo, conectado a uma plataforma tipo monocoluna (MPSO - *Mono-column floater, Production, Storage and Offloading*) conforme mostrado na Figura IV.54. O *riser* foi modelado com um ângulo de topo de  $10^\circ$  e azimute  $258^\circ$ , numa lâmina d’água de 2500m. O comprimento total do *riser* foi duas vezes a lâmina d’água. Para o modelo FEM, foram usados 2466 elementos de pórtico espacial com 6 graus de liberdades por nó (3 translacionais e 3 rotacionais), no total de 12 graus de liberdade por elemento. As coordenadas locais do topo da linha são (-6.38, 30.0, 30.0). As principais características do *riser* analisado estão descritas na Tabela IV.26.

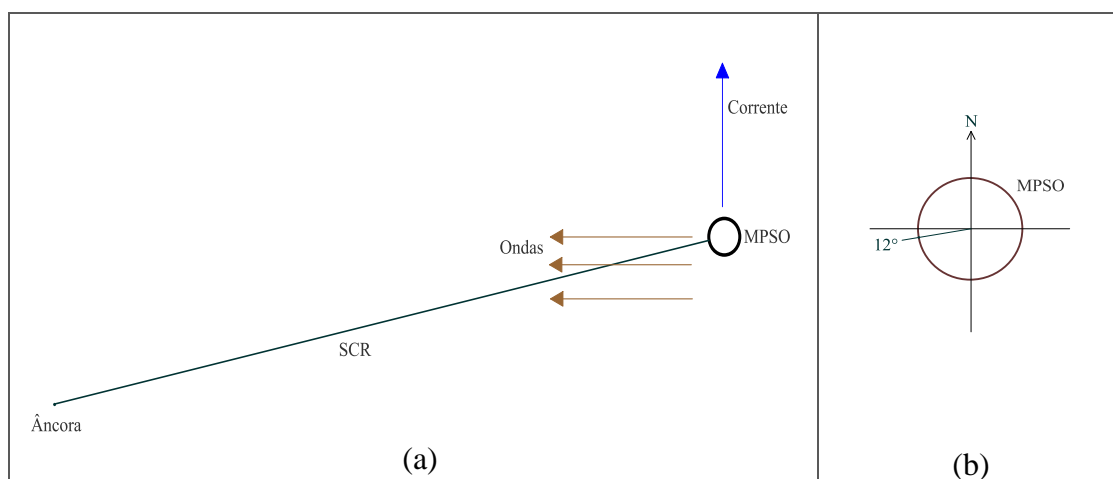


Figura IV.54 – Estudo de Caso 3: Visão geral do modelo de elementos finitos do riser rígido, (a) vista em planta, (b) Azimute da linha

A Figura IV.55 apresenta a função de transferência do movimento vertical da plataforma tipo monocoluna no topo do riser na direção de incidência da onda analisada (vide Tabela A.1).

Tabela IV.26– Principais características do Estudo de Caso 3

Riser	
Diâmetro externo (in)	8.625
Diâmetro interno (in)	6.125
Espessura de parede (in)	1.25
Espessura de corrosão (mm)	3.2
Ângulo de topo (deg)	10
Azimute (deg)	258
Pressão (MPa)	62.7
Peso submerso (kN/m)	1.6
Módulo de elasticidade E (kN/m <sup>2</sup> )	2.07E+8
Limite de escoamento Fy (MPa)	485
Limite de ruptura Fu (MPa)	570
Coefficiente de Morison CD	1.2
Pressão no topo (MPa)	62.7
Densidade do fluido (kN/m <sup>3</sup> )	8.5
Solo	
Rigidez (kN/m)	1000
Coefficiente de atrito axial	0.35
Coefficiente de atrito lateral	1.0
Deslocamento axial (m)	0.02
Deslocamento lateral (m)	0.003

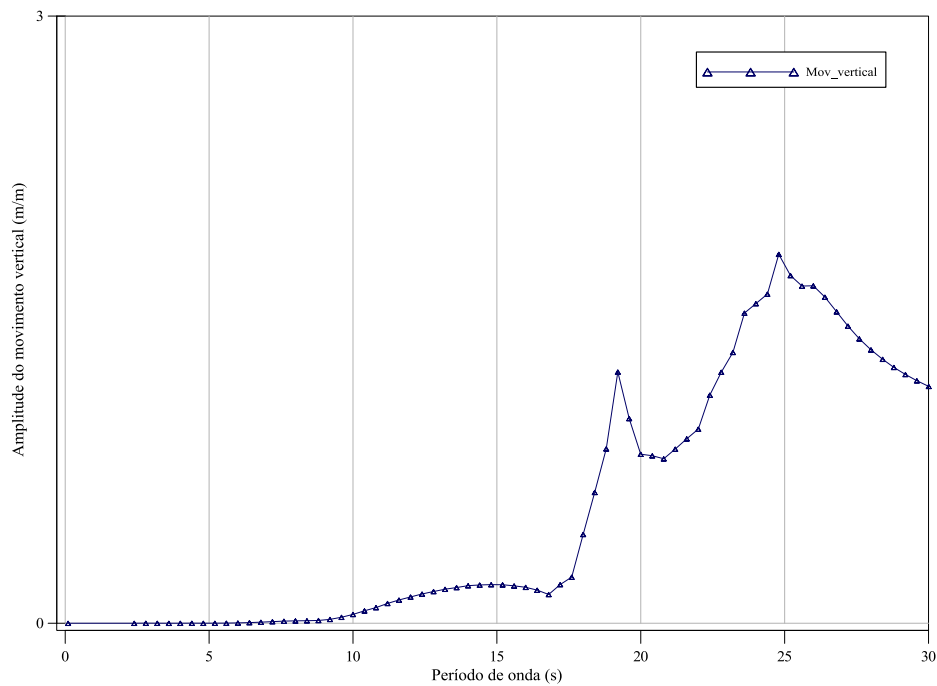


Figura IV.55 – Estudo de Caso 3: Função de transferência do movimento vertical no topo do riser na direção de incidência da onda analisada.

Para avaliar a resposta de curto prazo foram analisados os mesmos 132 estados de mar de curto prazo descritos no estudo de caso 1, que foram mostrados na Tabela A.1 do Anexo A e indicados graficamente na Figura IV.3. Mais uma vez, os *offsets* foram assumidos proporcionais à altura significativa de cada onda na direção de propagação da mesma, sendo definida a taxa de proporcionalidade igual a 8% da lâmina d'água para a maior altura de onda analisada neste estudo de caso ( $H_s=15.7\text{m}$ ).

#### IV.5.2 Análises de calibração

Para o estudo de caso 3, as cinco análises numéricas prévias realizadas para a calibração do polinômio que representa o passeio do TDP (Equação (II-60)) referentes a casos *near* e *far* são os mesmos mostrados na Tabela IV.4. Para os cinco casos foi usada uma única corrente de tipo triangular, com velocidade de 0.72m/s na superfície e nula no fundo.

A Tabela IV.27 apresenta a posição média onde ocorre o momento fletor máximo na TDZ, calculada em função do parâmetro  $\lambda$  da Equação (II-54). Neste estudo de caso, a posição média do ponto de máximo momento fletor foi de  $10\lambda$ .

*Tabela IV.27– Estudo de Caso 3: Posição média do momento fletor máximo (\*\*Distância da âncora).*

Caso	**Posição do momento fletor estático máximo (m)	**TDP (m)	Posição em função de $\lambda$	Parâmetro $\lambda$ (m)
1	2143.5	2102.0	7.2	5.7
2	2225.5	2169.0	8.9	6.3
3	1980.2	1942.0	8.0	4.8
4	1910.7	1845.0	15.0	4.4
5	2095.5	2027.0	13.1	5.2

#### IV.5.3 Posição do TDP estático

A comparação dos valores referentes ao parâmetro  $\lambda$ , à tração, posição do TDP e ao momento fletor estáticos calculados com ambos modelos são apresentados na Tabela C.1 do Anexo C deste trabalho. Pode-se observar que as diferenças dos resultados entre ambos modelos foi inferior a 1% para todos os casos.

Os valores referentes à posição do TDP estático são indicados graficamente na Figura IV.56. É possível observar que as diferenças entre os resultados de ambos modelos são mínimas, com desvios máximos observados de 1.1m, diferença que representa menos de 1% entre as duas metodologias.

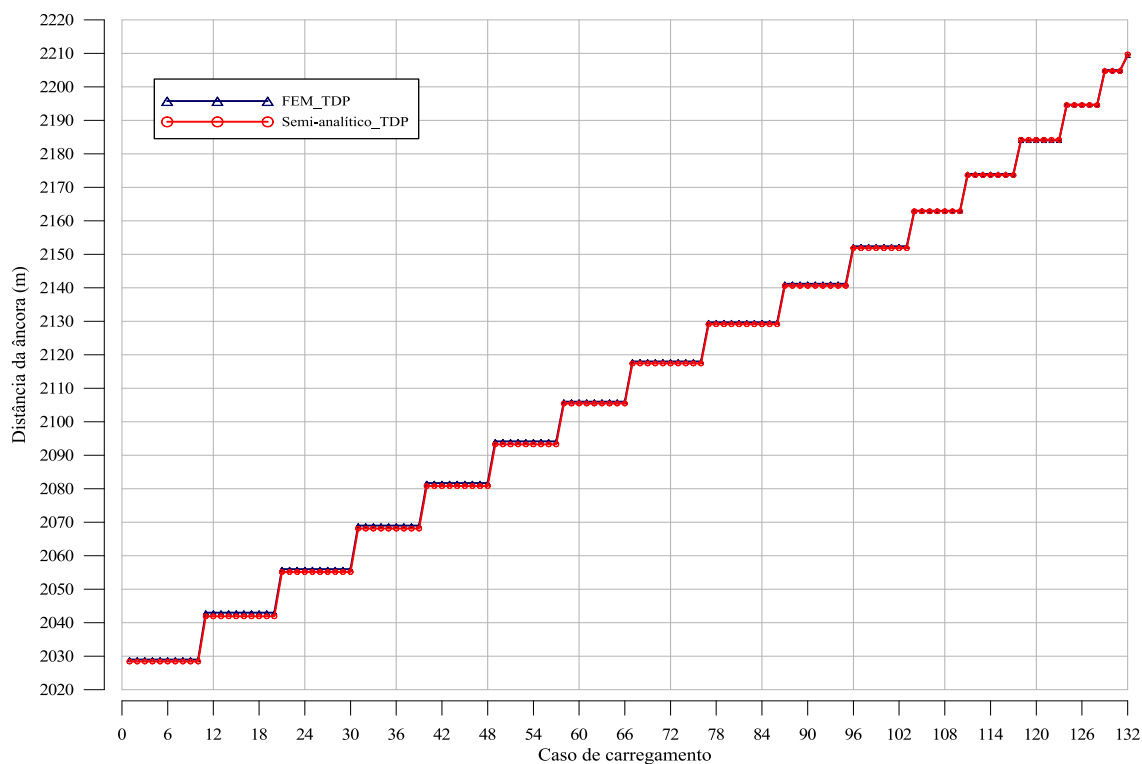


Figura IV.56 – Estudo de Caso 3: Posição do TDP estático (FEM vs. Semi-analítico).

#### IV.5.4 Resultados de Curto Prazo

Analogamente ao estudo do caso 1, foram escolhidos dois casos de carregamento que têm dinâmica acentuada para apresentar parcialmente os resultados, em termos dos parâmetros estatísticos das séries temporais de trações, momentos fletores e fatores de utilização.

Como o objetivo principal deste estudo de caso é mostrar a validade do método semi-analítico e não mais a descrição da sequência da metodologia, os resultados desse estudo de caso são apresentados de maneira sucinta, diferentemente dos estudos de casos anteriores.

Os dois casos de carregamentos selecionados neste estudo de caso e indicados graficamente na Figura IV.57 são: caso 95 ( $H_s=9.2m$ ,  $T_z=13.5s$ ) que pode ser



caracterizado como um estado de mar contido entre os contornos centenário e milenar, e o caso 132 ( $H_s=15.7\text{m}$ ,  $T_z=16.5\text{s}$ ) caracterizado como um estado de mar deca milenar. Para os dois casos selecionados, foram analisadas posições distintas da região da TDZ, variando desde  $-\lambda$  a  $10\lambda$ , cobrindo toda a faixa de variação do passeio do TDP, onde a posição  $-\lambda$  corresponde ao TDP estático.

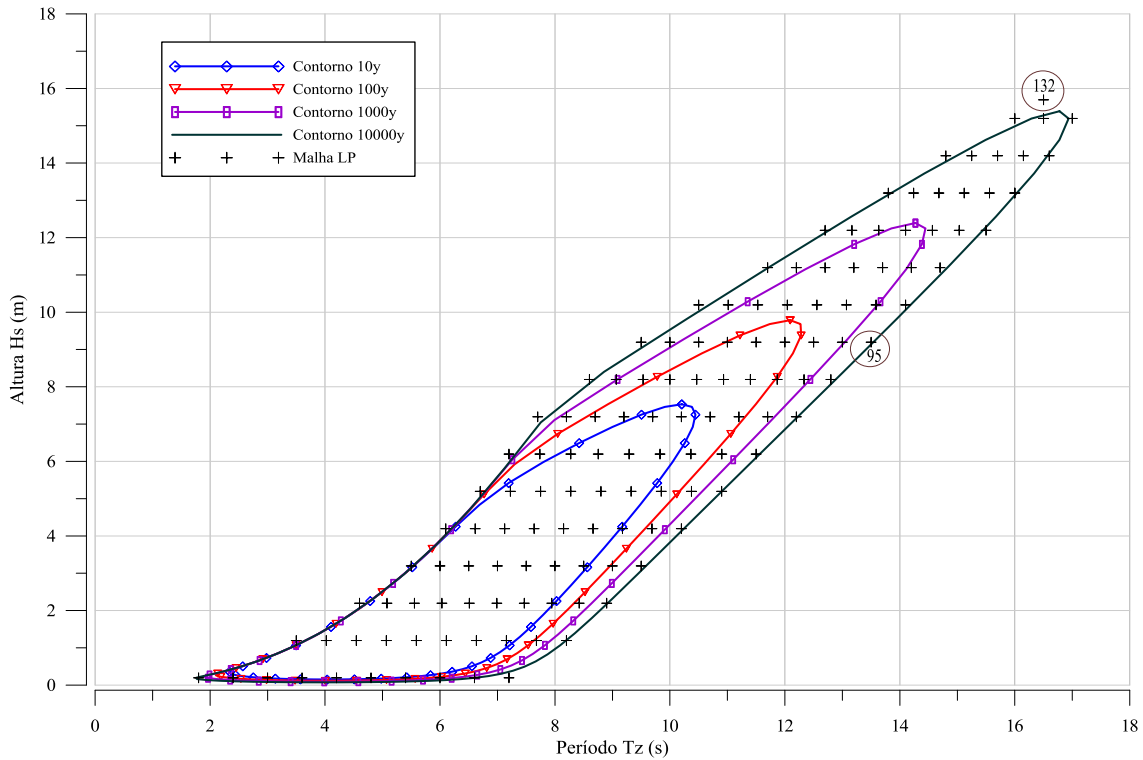


Figura IV.57 – Estudo de Caso 3: Malha de interpolação de 132 pontos.

- **Caso de carregamento 95 ( $H_s=9.2\text{m}$ ,  $T_z=13.5\text{s}$ )**

As Tabelas IV.28 a V.30 apresentam comparações entre os resultados obtido no modelo FEM e pelo modelo semi-analítico para os parâmetros estatísticos que caracterizam o passeio do TDP, tração e momentos fletores na TDZ. É possível observar grande concordância entre os valores de máximos para o passeio e tração, com diferenças máximas entre os modelos menores a 4%.

Para o caso dos momentos fletores, pode-se observar que, o modelo semi-analítico foi capaz de prever os momentos fletores máximos de forma eficiente, visto que foram observadas diferenças sempre inferiores a 6%. Isto pode ser visto graficamente na Figura IV.58, que mostra as séries temporais de momentos fletores obtidos com ambas

metodologias na posição  $7\lambda$ , onde foi observada diferença de 2% para os valores de máximos.

Tabela IV.28– Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 95: Parâmetros estatísticos do passeio do TDP (m) (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	Origem	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
95	FEM	2146.5	6.8	2170.8	2120.0
	Semi-analítico	2140.0	9.3	2176.1	2103.1

Tabela IV.29– Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 95: Parâmetros estatísticos da série de tração (kN) na TDZ (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	Origem	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
95	FEM	474.9	25.9	598.8	368.7
	Semi-analítico	476.2	21.5	576.4	368.3

Tabela IV.30– Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 95: Parâmetros estatísticos dos momentos fletores na TDZ (kN\*m),  $\lambda=6.1m$  (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	Posição	Modelo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
95	$-\lambda$	FEM	5.4	10.6	41.4	-1.7
		Semi-analítico	13.4	15.2	43.8	0.0
	0	FEM	16.6	14.0	44.0	-1.6
		Semi-analítico	24.0	15.9	45.7	0.0
	$1\lambda$	FEM	32.8	11.0	47.2	-1.7
		Semi-analítico	33.3	12.9	47.6	0.0
	$2\lambda$	FEM	39.6	6.6	49.6	-1.5
		Semi-analítico	39.3	8.4	49.3	0.0
	$3\lambda$	FEM	42.7	3.5	51.8	1.3
		Semi-analítico	42.4	4.9	51.0	0.0
	$4\lambda$	FEM	44.0	2.1	53.9	26.5
		Semi-analítico	43.9	2.7	52.6	0.0
	$5\lambda$	FEM	44.3	2.1	55.1	35.9
		Semi-analítico	44.5	1.9	54.0	11.1
	$6\lambda$	FEM	44.5	2.3	56.4	35.9
		Semi-analítico	44.7	1.8	55.3	37.0
	$7\lambda$	FEM	44.4	2.4	57.1	35.9
		Semi-analítico	44.8	2.0	56.3	37.0
	$8\lambda$	FEM	44.3	2.4	57.3	35.9
		Semi-analítico	44.8	2.0	57.0	37.0
$9\lambda$	FEM	44.1	2.4	57.1	36.0	
	Semi-analítico	44.8	2.0	57.4	37.0	
$10\lambda$	FEM	44.0	2.4	56.7	35.9	
	Semi-analítico	43.8	2.0	56.6	35.9	

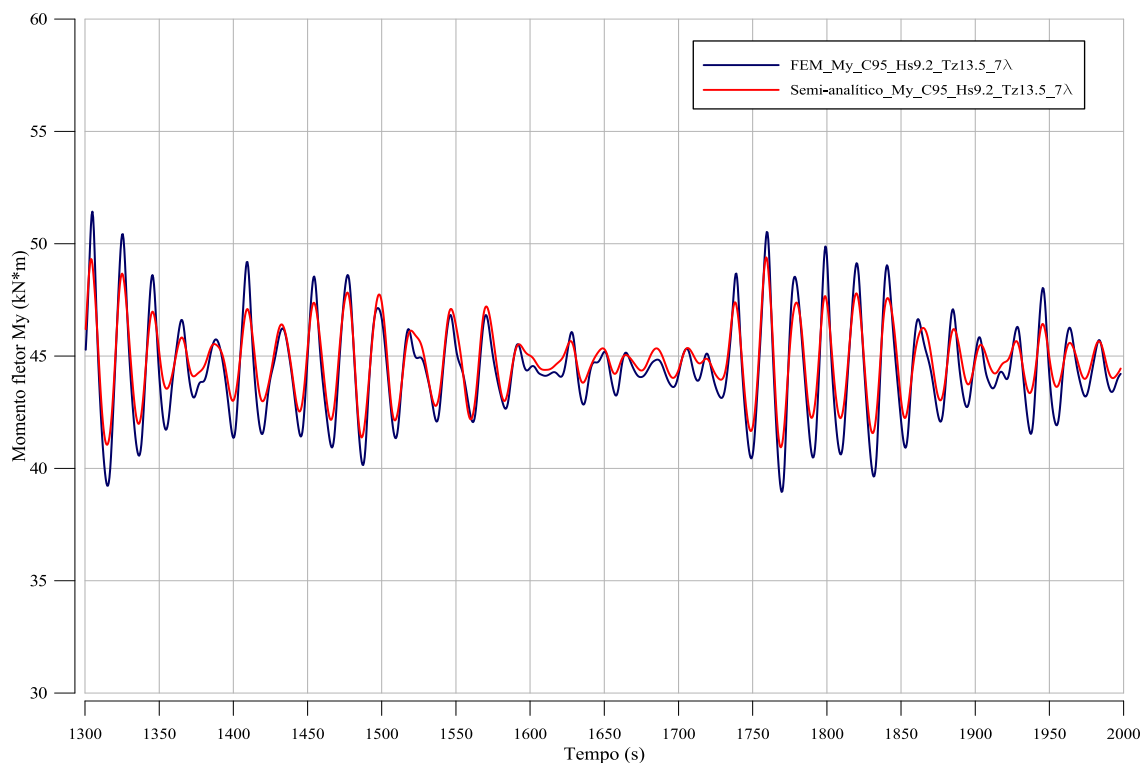


Figura IV.58 – Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 95: Séries temporais de momentos fletores no TDZ. Posição  $7\lambda$  (FEM vs. Semi-analítico).

A Tabela IV.31 apresenta a comparação dos fatores de utilização de curto prazo obtidos com os dois modelos. Os fatores de utilização foram calculados segundo a norma DNV-OS-F201 (2001) versão LRFD, supondo uma classe de segurança normal e estado limite operacional.

Analisando-se os resultados é possível constatar que o modelo semi-analítico apresentou resultados com uma concordância bastante razoável quando comparados com os resultados no modelo FEM, com diferenças máximas entre os modelos menor que 9%. Esta concordância pode ser também observada graficamente na Figura IV.59, que mostra a comparação das séries dos fatores de utilização obtidas com ambos modelos na posição  $7\lambda$ , onde as diferenças entre os modelos estudados é de 1%.

A Figura IV.60 apresenta uma comparação entre os valores extremos mais prováveis dos fatores de utilização avaliados a cada metro na região do TDP. Nota-se que o método semi-analítico foi capaz de prever os fatores de utilização de forma eficiente, visto que foram observadas diferenças inferiores a 3% no valor do máximo extremo mas provável na região do TDP, sendo um valor de 0.27 no modelo FEM e 0.26 para o modelo semi-analítico.

Tabela IV.31– Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 95: Parâmetros estatísticos dos fatores de utilização de curto prazo na TDZ,  $\lambda=6.1m$  (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	Posição	Modelo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	VMP Extremo
95	$-\lambda$	FEM	0.16	0.02	0.23	0.15	0.23
		Semi-analítico	0.16	0.04	0.25	0.12	0.25
	0	FEM	0.18	0.02	0.23	0.15	0.24
		Semi-analítico	0.19	0.04	0.25	0.13	0.25
	$1\lambda$	FEM	0.21	0.02	0.24	0.15	0.24
		Semi-analítico	0.22	0.03	0.26	0.13	0.25
	$2\lambda$	FEM	0.22	0.01	0.25	0.15	0.25
		Semi-analítico	0.23	0.02	0.26	0.13	0.26
	$3\lambda$	FEM	0.23	0.01	0.26	0.15	0.25
		Semi-analítico	0.24	0.01	0.26	0.12	0.26
	$4\lambda$	FEM	0.23	0.01	0.26	0.19	0.26
		Semi-analítico	0.24	0.01	0.26	0.13	0.26
	$5\lambda$	FEM	0.24	0.01	0.26	0.21	0.27
		Semi-analítico	0.24	0.00	0.27	0.15	0.26
	$6\lambda$	FEM	0.24	0.01	0.27	0.21	0.27
		Semi-analítico	0.24	0.00	0.27	0.22	0.27
	$7\lambda$	FEM	0.24	0.01	0.27	0.22	0.27
		Semi-analítico	0.24	0.01	0.27	0.22	0.27
	$8\lambda$	FEM	0.24	0.01	0.27	0.22	0.27
		Semi-analítico	0.23	0.01	0.27	0.21	0.27
$9\lambda$	FEM	0.24	0.01	0.27	0.22	0.27	
	Semi-analítico	0.23	0.01	0.27	0.21	0.26	
$10\lambda$	FEM	0.24	0.01	0.27	0.22	0.27	
	Semi-analítico	0.23	0.01	0.26	0.21	0.26	

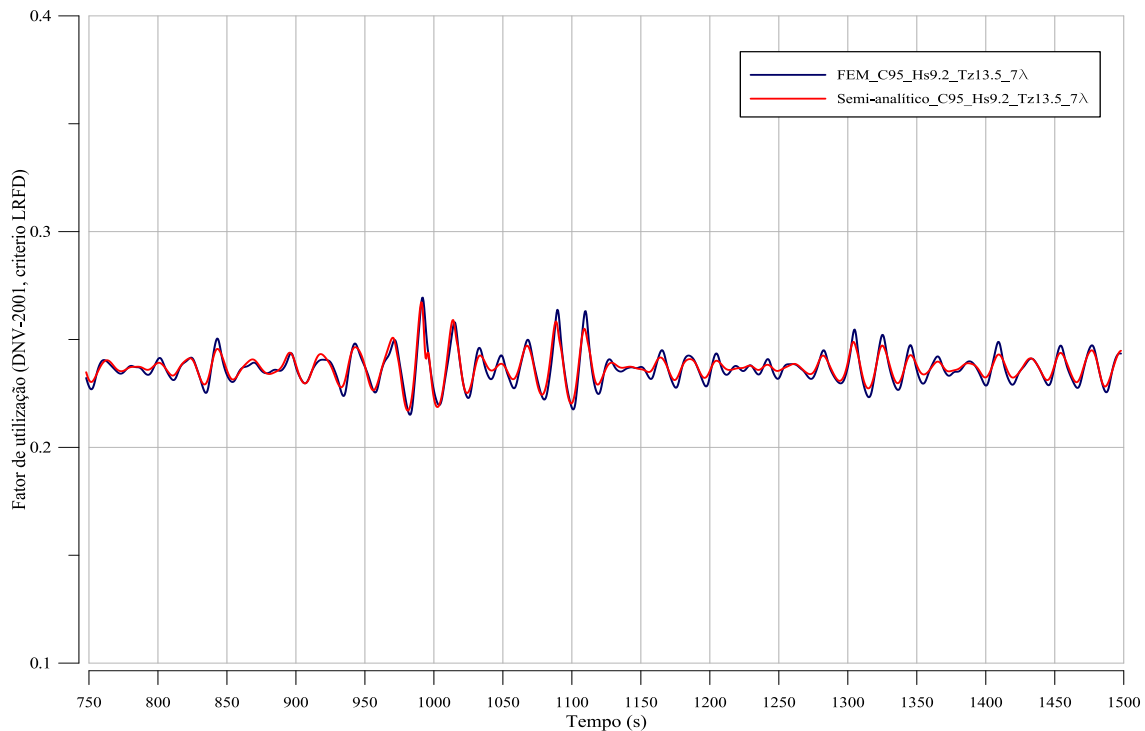


Figura IV.59 – Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 95: Séries temporais de fatores de utilização de curto prazo na região do TDP. Posição  $7\lambda$  (FEM vs. Semi-analítico).

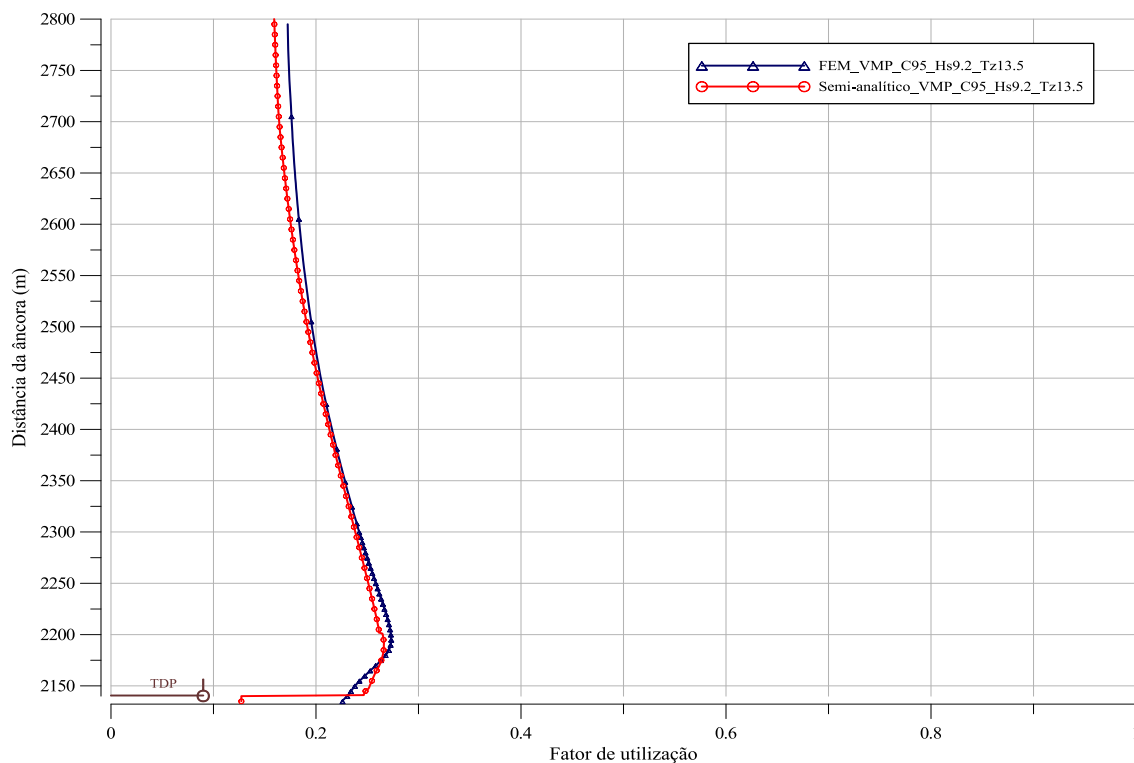


Figura IV.60 – Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 95: Valores extremos mais prováveis de curto prazo do fator de utilização na região do TDP (FEM vs. Semi-analítico).

- **Caso de carregamento 132 (Hs=15.7m, Tz=16.5s)**

As Tabelas V.32 a V.34 apresentam comparações entre os resultados obtidos pelo modelo FEM e pelo modelo semi-analítico para os parâmetros estatísticos que caracterizam o passeio do TDP, tração e momentos fletores na TDZ. Pode-se observar diferenças significativas na comparação dos picos de máximos de passeio de até 91m, e 125kN nas trações no TDP. Essas diferenças estão associadas principalmente a uma dinâmica muito intensa, que apresenta deslocamentos verticais no topo do *riser* com variação máxima de até 24m. Desta forma, a dinâmica acentuada leva à ocorrência de compressão dinâmica ao longo do comprimento do *riser*.

Para o caso dos momentos fletores, pode-se observar que a influência das diferenças encontradas entre ambos os modelos no cálculo do passeio e de tração é muito grande, apresentando as maiores diferenças nas posições  $-\lambda$  a  $3\lambda$  onde os valores obtidos analiticamente quase dobram os valores calculados numericamente. Mesmo assim, foi observado que os resultados do modelo semi-analítico foram concordantes com os obtidos no modelo FEM na maior parte do tempo na série temporal de momentos fletores. Este comportamento fica mais claramente evidenciado no gráfico da Figura IV.61, onde

é mostrada a comparação da séries de momentos fletores calculadas com ambos modelos na posição  $4\lambda$ . Nota-se, que os picos de máximos em ambas as séries coincidem em algumas partes da série temporal. Diferenças relativamente grandes são observadas nos instantes em que acontece o pico máximo de maior valor, o qual é associado por sua vez à ocorrência de compressão dinâmica no *riser*.

Tabela IV.32– Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 132: Parâmetros estatísticos do passeio do TDP (m), (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	Origem	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
132	FEM	2214.5	18.9	2287.0	2128.7
	Semi-analítico	2208.7	36.0	2378.2	1995.2

Tabela IV.33– Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 132: Parâmetros estatísticos da série de tração (kN) na TDZ (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	Origem	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
132	FEM	379.8	87.6	957.2	-54.3
	Semi-analítico	379.7	78.8	832.1	63.3

Tabela IV.34– Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 132: Parâmetros estatísticos dos momentos fletores na TDZ (kN\*m),  $\lambda=6.8m$  (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	Posição	Modelo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
132	$-\lambda$	FEM	15.5	19.8	83.8	-5.7
		Semi-analítico	21.8	23.7	159.8	0.0
	0	FEM	23.4	21.2	95.0	-7.9
		Semi-analítico	27.2	24.5	172.5	0.0
	$1\lambda$	FEM	31.3	21.1	107.1	-7.0
		Semi-analítico	32.6	24.3	193.4	0.0
	$2\lambda$	FEM	40.1	19.5	122.2	-6.9
		Semi-analítico	37.9	23.4	232.1	0.0
	$3\lambda$	FEM	45.1	17.3	135.3	-11.8
		Semi-analítico	42.2	22.5	257.3	0.0
	$4\lambda$	FEM	50.2	14.2	163.0	-14.3
		Semi-analítico	46.1	21.3	273.7	0.0
	$5\lambda$	FEM	52.6	12.7	177.8	-9.7
		Semi-analítico	48.7	20.1	284.4	0.0
	$6\lambda$	FEM	54.5	12.1	194.3	-10.6
		Semi-analítico	51.1	19.0	297.9	0.0
	$7\lambda$	FEM	55.2	12.1	228.2	-11.4
		Semi-analítico	53.0	18.4	311.0	0.0
	$8\lambda$	FEM	55.5	12.4	249.0	-10.6
		Semi-analítico	54.4	18.1	319.7	0.0
$9\lambda$	FEM	55.5	12.7	278.4	-6.3	
	Semi-analítico	55.4	18.2	325.4	0.0	
$10\lambda$	FEM	55.3	12.9	268.6	11.7	
	Semi-analítico	53.7	18.3	326.7	-2.6	

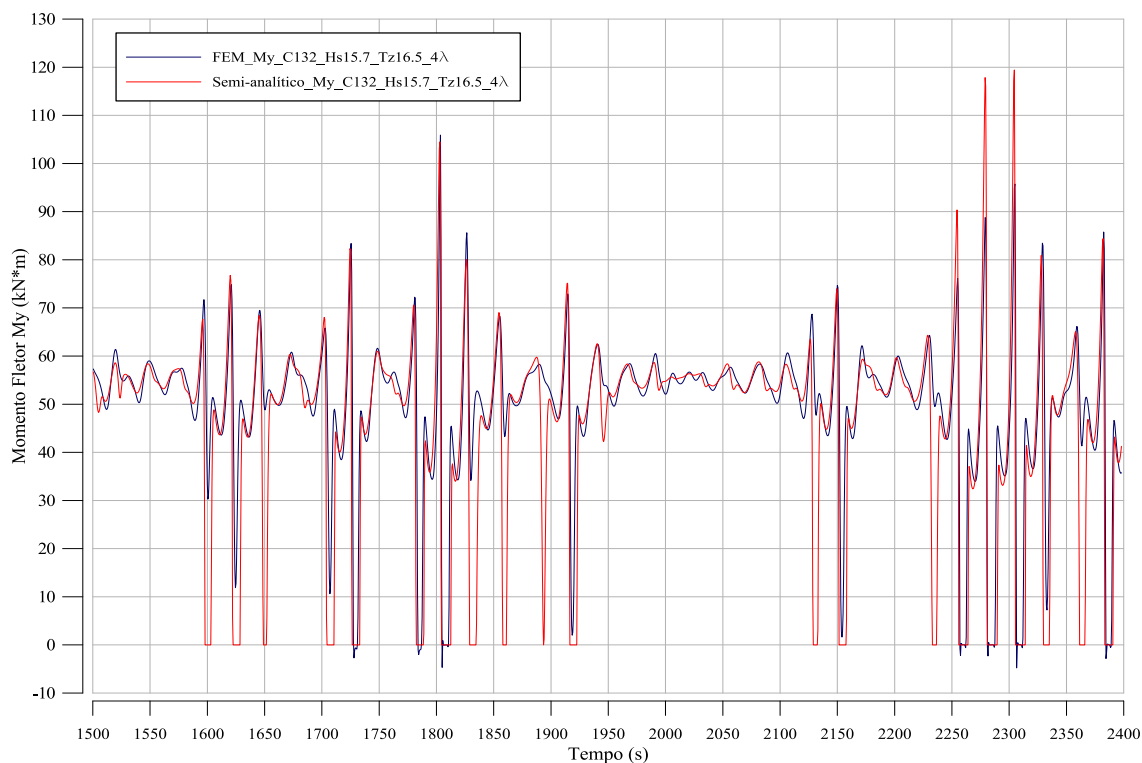


Figura IV.61 – Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 132: Séries temporais de momentos fletores no TDZ. Posição  $4\lambda$  (FEM vs. Semi-analítico).

Na Tabela IV.35, é realizada uma comparação dos fatores de utilização (DNV-OS-F201 versão LRFD) dos estados de mar de curto prazo supondo uma classe de segurança normal e estado limite operacional obtidos nos dois modelos. Pode-se observar, como seria de se esperar, que a influência das diferenças encontradas entre os modelos estudados no cálculo do passeio, trações e momentos fletores é relativamente grande, apresentando a maior diferença desses fatores na posição  $2\lambda$  com valores 50% maiores que os calculados no modelo FEM. Mesmo assim, como pode ser observado graficamente na Figura IV.62, as séries temporais dos fatores de utilização obtidos com ambas metodologias para a posição  $2\lambda$  coincidem a maior parte do tempo, apresentando diferenças significativas apenas num ponto de máximo.

A Figura IV.63 apresenta uma comparação entre os valores extremos mais prováveis avaliados a cada metro na região do TDP. Nota-se, que mesmo com a ocorrência de compressão dinâmica no *riser*, as diferenças entre ambos os modelos (Semi-analítico e FEM) não foi significativa, visto que os desvios entre os valores máximos é de 1%, sendo o fator de utilização igual a 0.97 no modelo FEM e 0.96 para o modelo semi-analítico.

Tabela IV.35– Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 132: Parâmetros estatísticos dos fatores de utilização de curto prazo na TDZ,  $\lambda=6.8m$  (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	Posição	Modelo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	VMP
132	$-\lambda$	FEM	0.18	0.04	0.34	0.15	0.32
		Semi-analítico	0.19	0.07	0.57	0.12	0.46
	0	FEM	0.19	0.04	0.37	0.15	0.34
		Semi-analítico	0.20	0.07	0.60	0.12	0.48
	$1\lambda$	FEM	0.21	0.04	0.41	0.15	0.36
		Semi-analítico	0.21	0.07	0.65	0.12	0.50
	$2\lambda$	FEM	0.23	0.04	0.45	0.15	0.39
		Semi-analítico	0.23	0.06	0.76	0.12	0.55
	$3\lambda$	FEM	0.24	0.04	0.49	0.15	0.43
		Semi-analítico	0.24	0.06	0.83	0.12	0.58
	$4\lambda$	FEM	0.25	0.03	0.56	0.15	0.48
		Semi-analítico	0.24	0.05	0.87	0.12	0.63
	$5\lambda$	FEM	0.26	0.03	0.61	0.15	0.53
		Semi-analítico	0.25	0.05	0.90	0.12	0.70
	$6\lambda$	FEM	0.26	0.03	0.65	0.14	0.59
		Semi-analítico	0.25	0.05	0.94	0.12	0.77
	$7\lambda$	FEM	0.27	0.03	0.75	0.15	0.65
		Semi-analítico	0.26	0.05	0.97	0.12	0.83
	$8\lambda$	FEM	0.27	0.03	0.81	0.14	0.72
		Semi-analítico	0.26	0.05	0.99	0.12	0.87
$9\lambda$	FEM	0.27	0.04	1.14	0.15	0.83	
	Semi-analítico	0.26	0.05	0.96	0.13	0.93	
$10\lambda$	FEM	0.27	0.04	1.48	0.16	0.96	
	Semi-analítico	0.25	0.05	0.99	0.13	0.96	

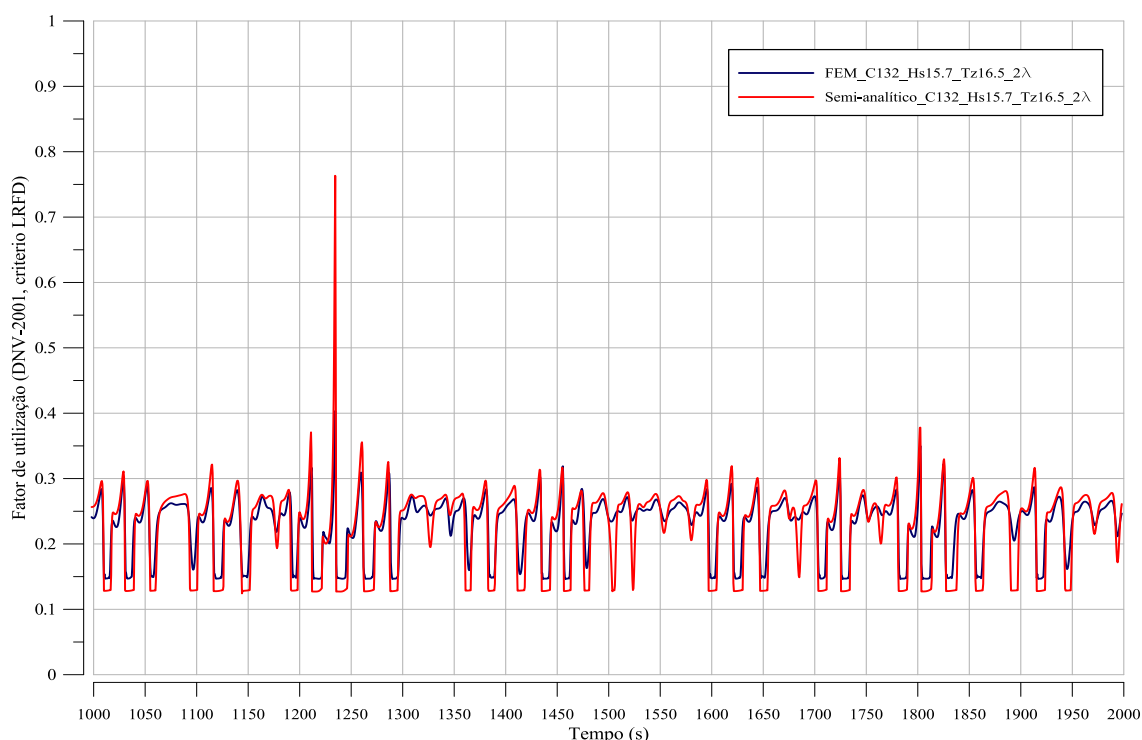


Figura IV.62 – Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 132: Séries temporais de fatores de utilização de curto prazo na região do TDP. Posição  $2\lambda$  (FEM vs. Semi-analítico).



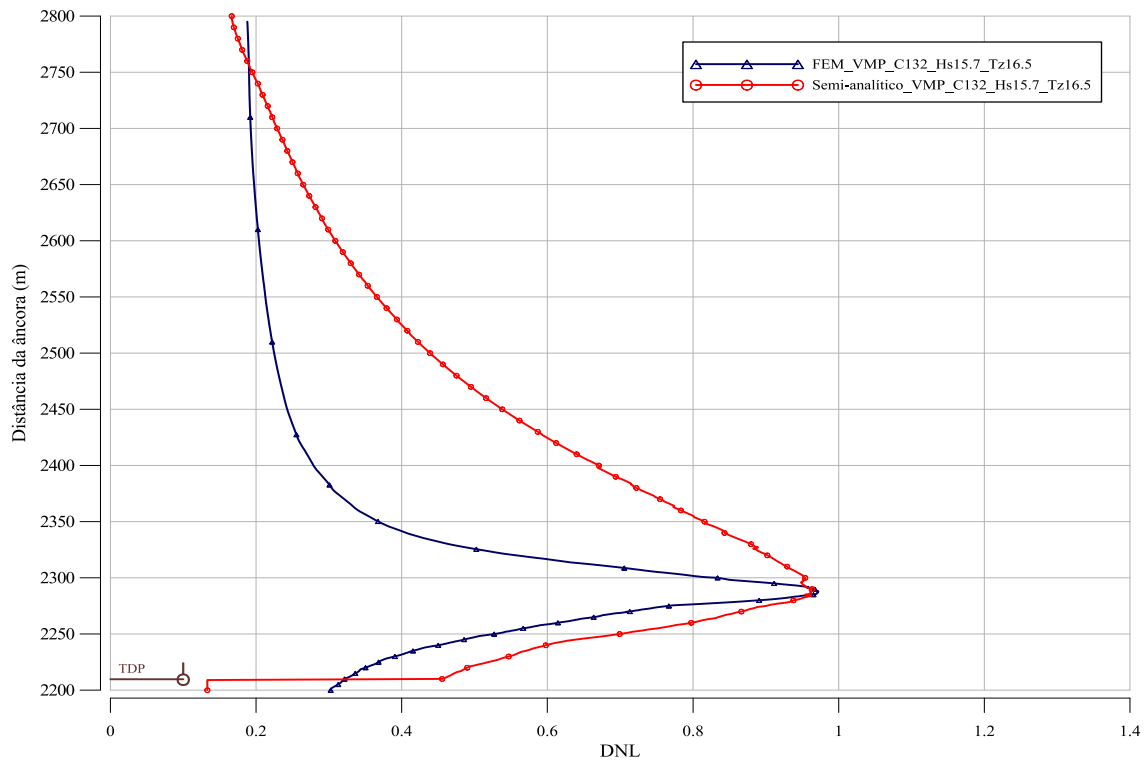
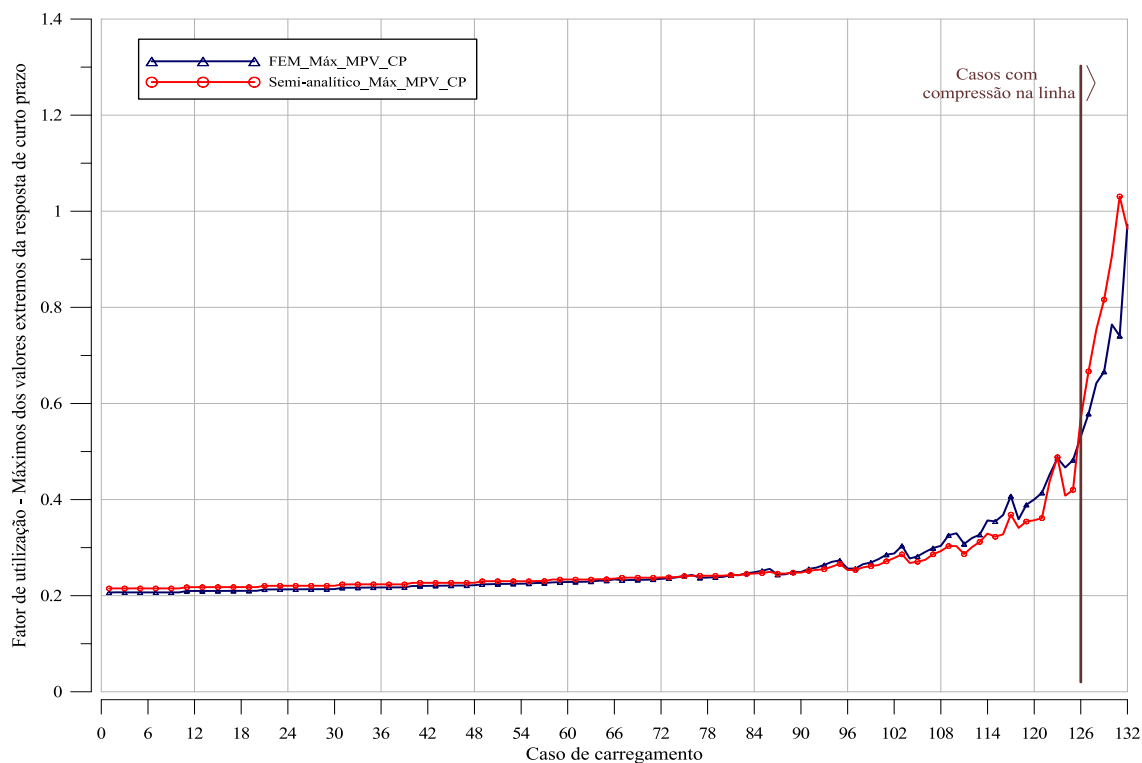


Figura IV.63 – Estudo de Caso 3- Caso de Carregamento 132: Valores extremos máximos mais prováveis de curto prazo do fator de utilização na TDZ (FEM vs. Semi-analítico).

#### IV.5.5 Resumo das análises dos fatores de utilização de curto prazo

Para finalizar os resultados de curto prazo, são mostrados na Figura IV.64 e também na Tabela C.2 do Anexo C os máximos valores extremos mais prováveis do fator de utilização ao longo da região do TDP para todos os estados de mar de curto prazo analisados. Analisando-se os resultados obtidos, é possível constatar que o método semi-analítico foi capaz de representar satisfatoriamente o comportamento do *riser* quando a linha não é submetida a esforços de compressão, visto que, para a maioria dos carregamentos onde o fenômeno de compressão não ocorreu, as diferenças máximas dos valores extremos do fator de utilização ficaram em torno de 14%. Já nos casos onde foi confirmada a ocorrência de compressão dinâmica no modelo FEM (casos 126-132), as diferenças dos valores extremos mais prováveis do fator de utilização chegaram a ser até de 64%.



*Figura IV.64 – Estudo de Caso 3: Máximos dos valores extremos mais prováveis de curto prazo do fator de utilização na região do TDP (FEM vs. Semi-analítico).*

#### IV.5.6 Resultados da análise de Longo Prazo

A Figura IV.65 apresenta a comparação entre os resultados dos fatores de utilização de longo prazo (período de retorno de 100 anos) na TDZ para ambos modelos (Semi-analítico e FEM). Esses fatores foram obtidos através do método de integração descrito na seção III.3 deste trabalho com uso do programa de computador PosLT (LACEO, 2015). A malha de interpolação utilizada foi a mesma do estudo de caso 1, apresentada previamente na Figura IV.3 e descrita na Tabela A.1 do Anexo A.

Na Figura IV.65, observa-se que o método semi-analítico foi capaz de prever os fatores de utilização de longo prazo de forma eficiente, uma vez que as metodologias apresentaram diferenças entre seus valores máximos próximos a 5%, sendo obtido um fator de utilização centenário igual a 0.38 pelo FEM e igual a 0.36 através do modelo semi-analítico.

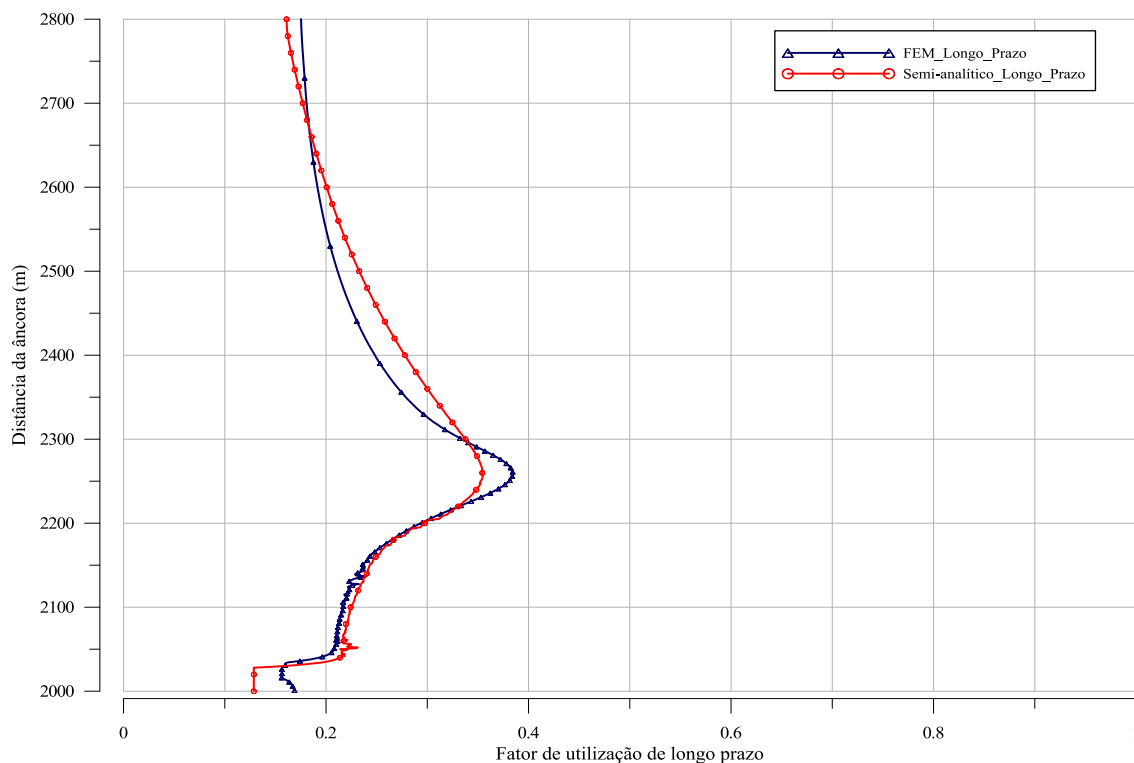
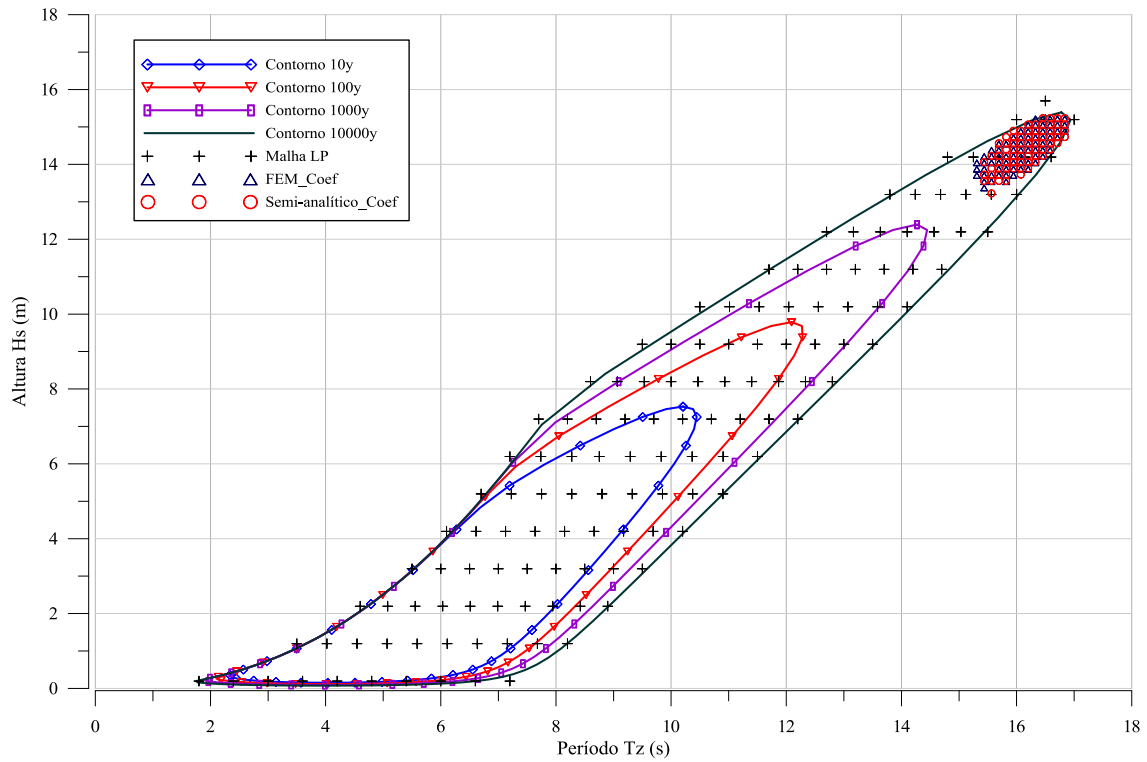


Figura IV.65 – Estudo de Caso 3: Fatores de utilização de longo prazo (100 anos) na região do TDP (FEM vs. Semi-analítico).

A Figura IV.66 apresenta graficamente, para ambos modelos, a comparação dos estados de mar com maior contribuição no valor máximo do fator de utilização de longo prazo, mostrado na Figura IV.65. Os estados mar mostrados nessa figura correspondem aos 100 primeiros estados de mar com maiores coeficientes de participação. Esses coeficientes foram calculados conforme o descrito na seção III.2 deste trabalho.

Verifica-se, a partir da Figura IV.66, que para ambas metodologias os estados de mar de curto prazo que mais contribuem na resposta de longo prazo estão contidos entre as curvas de contorno ambiental milenar e deca milenar, entre as faixas de 13-16m para altura significativa de onda, e de 15-17s para períodos de cruzamento zero. É possível observar que os estados de mar com maior contribuição na resposta de longo prazo praticamente coincidem em ambas as metodologias. Novamente, os resultados obtidos mostram que os estados de mar de curto prazo de maior contribuição na resposta de longo prazo, estão associados à função de transferência do movimento vertical da plataforma mostrado na Figura IV.55, que é maior para a plataforma monocolumna do que para a plataforma semi-submersível considerada nos estudos de casos 1 e 2.



*Figura IV.66 – Estudo de Caso 3: Estados de mar com maior contribuição para a resposta de longo prazo do máximo valor mais provável (100 anos) do fator de utilização na região do TDP (FEM vs. Semi-analítico).*

Em função da qualidade dos resultados obtidos, achou-se desnecessário analisar o modelo Híbrido para este estudo de caso.

## CAPÍTULO V

### CONDIÇÕES EQUIVALENTES DE PROJETO BASEADAS NO FATOR DE UTILIZAÇÃO DE LONGO PRAZO NA REGIÃO DO TDP

#### V.1 Introdução

Conforme apresentado na seção III.4, uma condição equivalente de projeto pode ser definida como aquela que apresenta resposta extrema de curto prazo igual ou muito similar àquela obtida com a estatística de longo prazo. O foco deste trabalho concentra-se na região do TDP de *risers* rígidos em catenária, por ser esta região um dos pontos críticos no projeto destas estruturas. O parâmetro de resposta escolhido para definir as condições equivalentes de projeto é o fator de utilização da seção transversal do *riser* de aço segundo os critérios apresentados na norma DNV-OS-F201 (2010) considerando a versão LRFD.

De acordo com esta ideia, qualquer condição ambiental de curto prazo, cujo valor extremo mais provável do fator de utilização seja igual ao valor máximo do fator de utilização de longo prazo calculado, pode ser considerada como uma condição ambiental equivalente de projeto.

A seguir são apresentadas as condições ambientais equivalentes de projeto para os três exemplos descritos no CAPÍTULO IV desta tese. Somente será avaliada a condição ambiental com maior fator de participação na resposta de longo prazo para cada estudo de caso, embora, num projeto real de *risers*, um conjunto de condições ambientais equivalentes podem e devem ser avaliadas. Para pesquisa dessa condição ambiental equivalente foram usados todos os estados de mar de curto prazo no qual a função de densidade de probabilidades conjunta dos parâmetros ambientais definida no item IV.2 apresenta valores significativos. Isto é, 2684 condições interpoladas para os estudos de caso 1 e 3, e 4295 condições para o estudo de caso 2.

## V.2 Condições ambientais equivalentes de projeto

Para ilustrar o procedimento de seleção de condições equivalentes de projeto, tomando como referência o fator de utilização de longo prazo do estudo de caso 1 apresentado na Figura IV.22 (0.75 no modelo FEM e 0.76 na metodologia semi-analítica). As condições equivalentes obtidas correspondem a carregamentos com altura de significativa onda e período de cruzamento zero entre as faixas de 11-13m e de 12-15s, respectivamente. A Figura V.1 apresenta graficamente, para ambos os modelos, a comparação das condições ambientais equivalentes obtidas. Pode-se observar que, em ambas as metodologias, a condição equivalente escolhida está próxima das curvas de contorno ambiental milenar e deca milenar.

Para os estudos de casos 2 e 3, a comparação das condições equivalentes são ilustradas pelas Figuras VI.2 e VI.3, para ambos os modelos, respectivamente. Foram tomados como referência os fatores de utilização de longo prazo, os quais são apresentados na Figura IV.50 (0.52 no FEM e 0.48 no modelo semi-analítico) e Figura IV.65 (0.38 no FEM e 0.36 no modelo semi-analítico), respectivamente para os estudos de caso 2 e 3.

Pode-se observar que, em ambas as metodologias, a condição ambiental equivalente escolhida no estudo de caso 2 corresponde a estados de mar contidos entre as faixas de 9-10m, de altura significativa de onda, e de 19-20s, de períodos de pico. Já para o estudo de caso 3, observa-se que, em ambas as metodologias, a condição ambiental equivalente coincide e corresponde a um estado de mar contido entre as faixas de 13-14m, para altura significativa de onda, e de 14-16s, para períodos de cruzamento zero.

A Tabela V.1 apresenta um resumo das condições ambientais equivalentes avaliadas com ambos modelos (FEM e Semi-analítico) para os três estudos de casos. Essas condições são aquelas com o maior fator de participação na resposta de longo prazo.

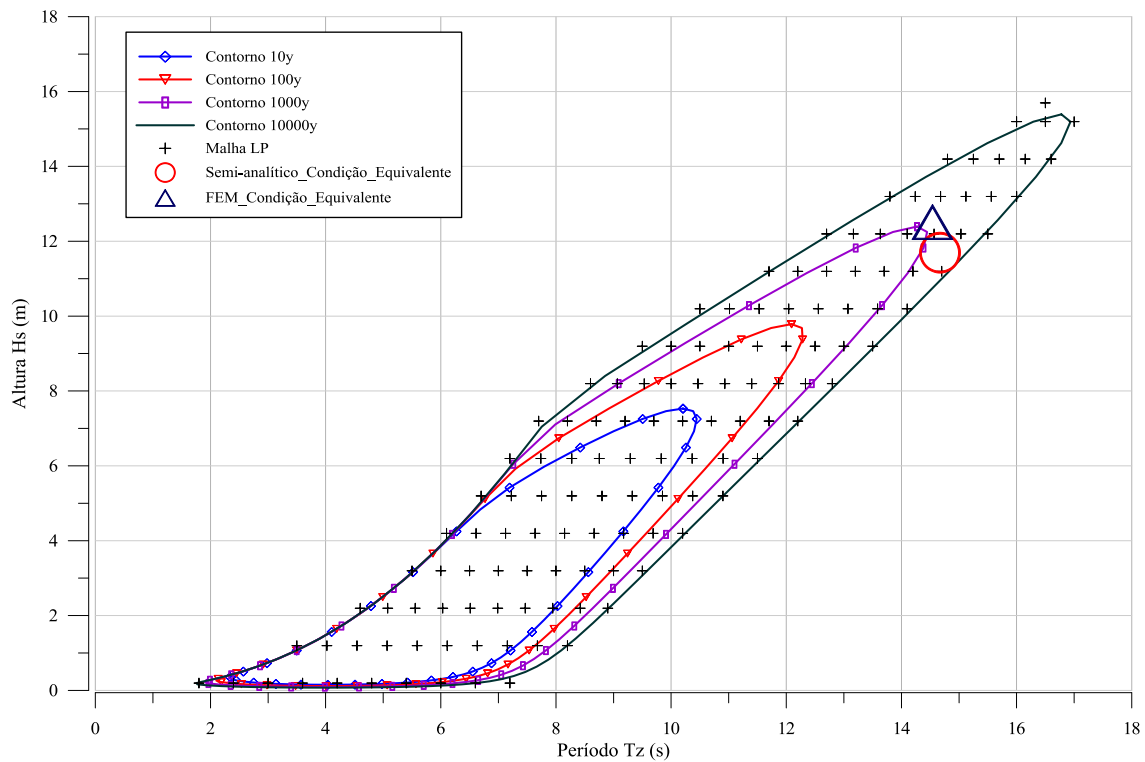


Figura V.1 – Estudo de Caso 1: Condições ambientais equivalentes de projeto baseadas no fator de utilização de longo prazo (100 anos) na região do TDP (FEM vs. Semi-analítico).

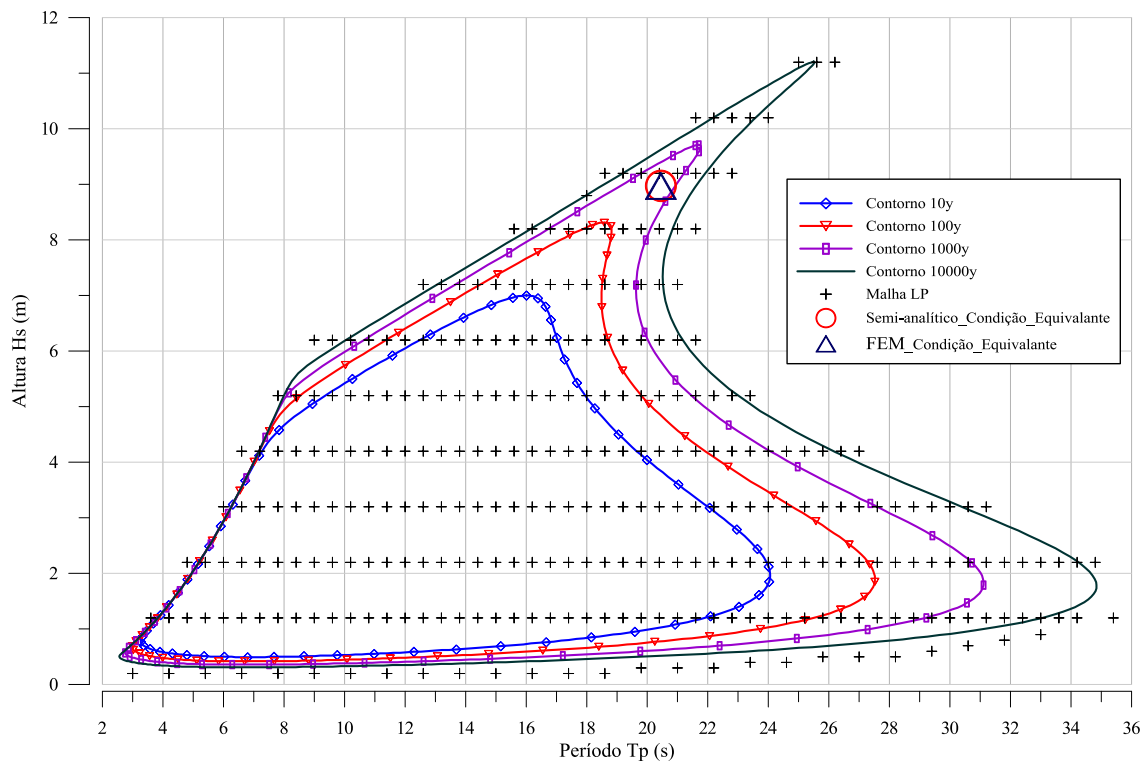


Figura V.2 – Estudo de Caso 2: Condições ambientais equivalentes de projeto baseadas no fator de utilização de longo prazo (100 anos) na região do TDP (FEM vs. Semi-analítico).

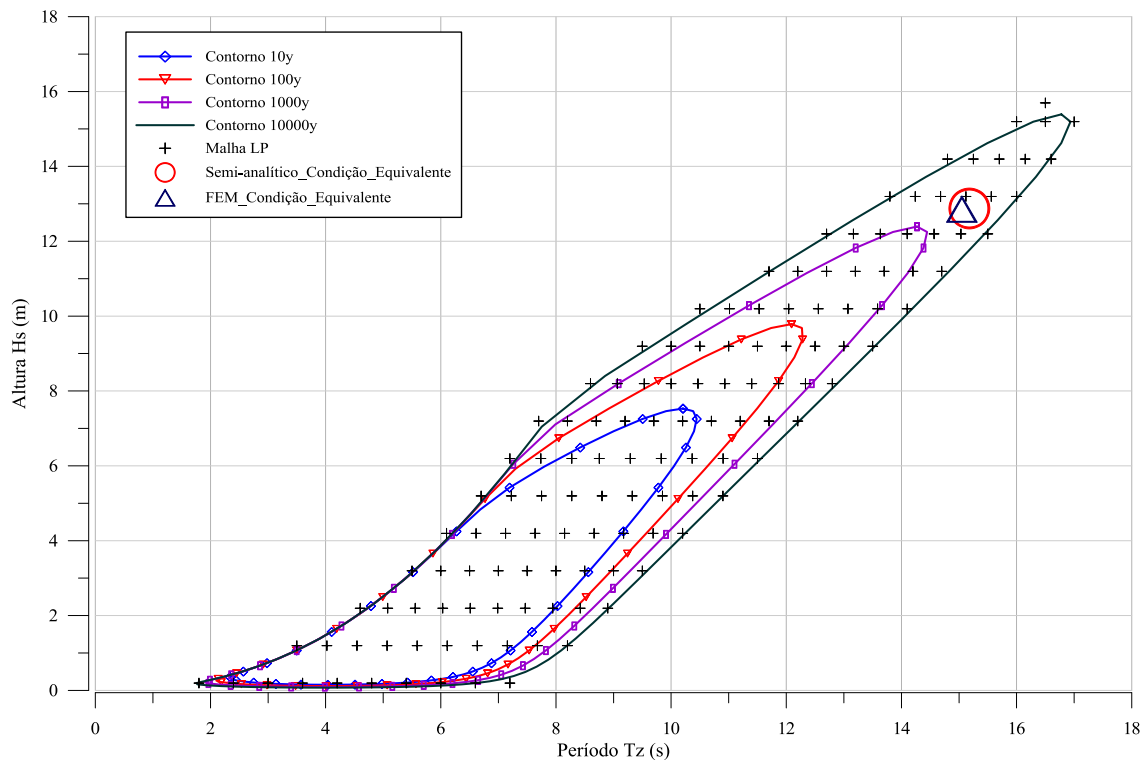


Figura V.3 – Estudo de Caso 3: Condições ambientais equivalentes de projeto baseadas no fator de utilização de longo prazo (100 anos) na região do TDP (FEM vs. Semi-analítico).

Tabela V.1 – Condições ambientais equivalentes baseadas no fator de utilização de longo prazo na região do TDP (FEM vs. Semi-analítico)

Estudo de Caso	Modelo	Fator de utilização de longo prazo	Condição ambiental equivalente		
			Hs (m)	Tp/Tz (s)	Fator de utilização de curto prazo (Extremo)
1	FEM	0.75	12.53	14.54	0.75
	Semi-analítico	0.76	11.71	14.67	0.76
2	FEM	0.52	8.98	20.45	0.52
	Semi-analítico	0.48	8.98	20.45	0.48
3	FEM	0.38	12.87	15.05	0.38
	Semi-analítico	0.36	12.89	15.18	0.36

Finalmente, é importante ressaltar que, para os três estudos de casos apresentados nesta tese, ou seja, para as combinações de condições ambientais, unidades flutuantes e estruturas analisadas, as condições ambientais equivalentes avaliadas correspondem a estados de mar com períodos elevados. Esses períodos de onda estão associados ao período do pico de máximo da função de transferência do movimento vertical de cada unidade flutuante estudada (vide Figuras IV.2 e IV.55). Os resultados apresentados são consistentes com os expostos no CAPÍTULO IV, uma vez que os



estados de mar de maior contribuição na resposta de longo prazo estão contidos entre as curvas de contorno ambiental milenar e deca milenar.

De tal forma, em um projeto tradicional de *risers*, onde se estabelece um período de recorrência específico (comumente 100 anos), ao determinar o valor característico de um determinado parâmetro de resposta (neste caso o fator de utilização da seção transversal do *riser*), a ser usado nas equações de verificação estrutural, estaríamos subestimando-o como mostrado na Tabela V.2. Esta tabela apresenta a comparação dos fatores de utilização associados à condição centenária usando a metodologia da tempestade de projeto com os fatores avaliados no longo prazo com ambas as metodologias (FEM vs. Semi-analítica)

*Tabela V.2– Fatores de utilização de curto prazo associados à condição centenária ( $H_{s100}$ ,  $T_{z100}/T_{p100}$ ), (FEM vs. Semi-analítico)*

Estudo de Caso	Modelo	Fator de utilização de curto prazo na condição centenária	Fator de utilização de longo prazo
1	FEM	0.23	0.75
	Semi-analítico	0.25	0.76
2	FEM	0.33	0.52
	Semi-analítico	0.37	0.48
3	FEM	0.25	0.38
	Semi-analítico	0.24	0.36

## CAPÍTULO VI

### COMENTÁRIOS FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

#### VI.1 Comentários finais

Este trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de uma metodologia semi-analítica para a determinação de condições ambientais de curto prazo baseadas no fator de utilização de longo prazo na região do TDP para o projeto de *risers* de aço em catenária livre. O fator de utilização foi calculado segundo a norma *offshore* DNV-OS-F201 (2010) pelo critério LRFD. As condições ambientais de curto prazo a serem utilizados no projeto são aquelas que apresentam o valor extremo mais provável do fator de utilização igual (ou muito) próximo ao valor extremo centenário mais provável obtido através da integração de longo prazo da resposta. Devido ao alto custo computacional das simulações numéricas baseadas no método dos elementos finitos, a ideia foi utilizar um modelo semi-analítico para obtenção dos esforços globais do *riser* na região do TDP e, a partir dos resultados deste modelo, efetuar a integração de longo prazo e a identificação das condições ambientais de curto prazo equivalentes para o projeto final deste tipo de estrutura. Observa-se que através desta metodologia, as condições ambientais para projeto são definidas individualmente para cada *riser* analisado.

A metodologia desenvolvida neste trabalho foi consolidada no programa F.U.LongTerm, implementado na linguagem de programação FORTRAN® (2010). Dentre as principais características da metodologia desenvolvida, destacam-se:

- Implementação de um modelo semi-analíticos proposto por ARANHA *et al.* (1997, 2001) e por PESCE *et al.* (1997) para a avaliação da tração e dos momentos fletores na região do TDP de *risers* em catenária livre.
- Desenvolvimento de um modelo polinomial de terceiro grau com trinta e um termos para cálculo da posição dinâmica do TDP em função dos deslocamentos do topo do *riser*. Os coeficientes deste modelo são calibrados através de cinco simulações numéricas baseados no método dos elementos finitos.

- Implementação do procedimento *Weibull Tail Fitting* (ZURITA, 1999) para modelagem da distribuição de curto prazo dos picos da série temporal dos fatores de utilização na região do TDP.
- Uso do programa PosLT (LACEO, 2015) para efetuar a integração da resposta de longo prazo do fator de utilização da seção transversal do *riser* na região do TDP, bem como a estimativa de valores centenários deste parâmetro.

A metodologia desenvolvida foi empregada em três estudos de casos cujas principais características são:

- Caso 1: trata-se de um *riser* rígido de aço de 10.75” de diâmetro externo, ligado a uma plataforma tipo semi-submersível localizada numa lâmina d’água de 910m numa locação com condições ambientais similares àquelas do Mar do Norte.
- Caso 2: constitui-se da mesma estrutura e plataforma flutuante do Caso 1, numa locação com condições ambientais similares àquelas da Bacia de Campos.
- Caso 3: trata-se de um *riser* rígido de aço de 8.625” de diâmetro externo, ligado a uma plataforma tipo monocoluna localizada numa lamina d’água de 2500m sob condições ambientais similares aquelas encontradas no Mar do Norte.

Para os três casos de estudo, inicialmente foram comparados os resultados de esforços obtidos a partir do modelo semi-analítico e por um programa de elementos finitos onde observou-se que:

- Os modelos analíticos de ARANHA *et al.* (1997, 2001) e de PESCE *et al.* (1997) permitiram a avaliação de forma satisfatória da tração e momentos fletores na região do TDP para todos os casos onde não foi observada a ocorrência de compressão dinâmica, visto que estes modelos analíticos foram idealizados supondo que o *riser* esteja sempre tracionado.

- Em geral, o modelo polinomial utilizado para aproximação do passeio do TDP apresentou bons resultados, apontando diferenças significativas unicamente nos casos onde foi detectada a ocorrência de compressão dinâmica na região do TDP do *riser*.

Foi também efetuada a integração de longo prazo da resposta utilizando resultados de ambos os modelos (numérico baseado em elementos finitos e semi-analítico) onde observou-se que:

- As condições ambientais de curto prazo equivalentes de projeto identificadas, mesmo com ocorrência de compressão dinâmica significativa (e.g. estudo de caso 1), foram praticamente iguais usando os resultados de ambos os modelos nos três casos de estudo.
- Para os três casos de estudos apresentados nesta tese, ou seja, para as combinações de condições ambientais, unidades flutuantes e estruturas analisadas, os estados de mar com maior contribuição no fator de utilização de longo prazo correspondem a estados de mar associados ao período do pico de máximo da função de transferência do movimento vertical da plataforma (vide Figuras IV.2 e IV.55). Esses estados de mar estão contidos acima da curva de contorno ambiental milenar, inclusive na maioria dos casos eles estão próximos da curva de contorno ambiental deca milenar. Em função disto, observou-se também que o uso de condições ambientais centenárias para estimar a resposta centenária, nos três casos investigados, conduz a resultados inapropriados, i.e. a valores sub-estimados para o valor centenário do fator de utilização da seção transversal.
- O custo computacional para realizar uma análise de longo prazo da resposta baseado nos resultados do método semi-analítico é muito menor (da ordem 1.500 vezes após das análises de calibração) quando comparado ao uso de resultados provenientes de simulações numéricas baseadas em elementos finitos.

Assim, pode-se concluir que a metodologia semi-analítica proposta nesta tese representa um caminho viável para obter condições ambientais de projeto para verificação estrutural da região do TDP para *risers* em catenária. Em outras palavras, a metodologia desenvolvida embora baseada em modelos semi-analíticos aproximados, serve para identificar algumas poucas condições ambientais a serem usadas na análise e verificação estrutural de um *riser* utilizando um modelo numérico robusto baseado em elementos finitos.

## **VI.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Ao longo do desenvolvimento da tese, e de posse das conclusões obtidas, alguns apontamentos passíveis de investigação mais detalhada para aprimoramento do modelo semi-analítico para obtenção dos esforços na região do TDP são os seguintes:

- Desenvolver uma metodologia completamente analítica para avaliação no passeio do TDP. Isto evitaria o uso de simulações numéricas iniciais para calibração dos coeficientes do polinômio.
- Estudo de formulações analíticas que permitam avaliar o decaimento do momento fletor após da ocorrência do pico de máximo.

O trabalho desenvolvido limitou-se à obtenção de condições ambientais equivalentes para o projeto da região do TDP de *risers* rígidos em catenária. Este mesmo procedimento pode ser investigado para definição de condições ambientais equivalentes para verificação de outras regiões do *riser* e também para outros tipos de configurações. Assim sugere-se as seguintes temas para possíveis trabalhos futuros:

- Desenvolvimento de metodologia baseada em fatores de utilização para seção transversal do *riser* para a verificação estrutural do topo de *risers* rígidos em catenária.
- Desenvolvimento de metodologia similar para verificação de *risers* rígidos instalados na configuração *lazy-wave* (SLWR);

- Verificação da possibilidade de obter condições ambientais de curto prazo equivalentes para o projeto e verificação de *risers* flexíveis tanto na configuração catenária livre bem como na configuração *lazy-wave*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIRRE, L.A., RODRIGUES, G.G., JÁCOME, C.R.F., 1998. “Identificação de Sistemas Não-Lineares Utilizando Modelos NARMAX Polinomiais – Uma Revisão e Novos Resultados”. *Controle & Automação, SBA*, vol. 9, no 2.
- ANFLEX, 2010. *Static and Dynamic Analysis for Mooring Systems and Risers – Manual de Entrada de Dados, Versão 6.6*, PETROBRAS / CENPES, Rio de Janeiro, RJ.
- ANG, A.H.S., TANG, W.H., 1984. *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*, Vol. II, John Willey and Sons, New York, USA.
- API RP 2RD, 2013. *Design of Risers for Floating Production Systems (FPSs)*, 2<sup>nd</sup> ed., American Petroleum Institute, Washington, USA.
- API RP 17B, 2014. *Recommended Practice for Flexible Pipe*, 5<sup>th</sup> ed., American Petroleum Institute Washington, USA.
- ARANHA, J.A.P., MARTINS, C.A., PESCE, C.P., 1997. “Analytical Approximation for the Dynamic Bending Moment at the Touchdown Point of a Catenary Riser”. *International Journal of Polar Engineering* vol 7 n° 4.
- ARANHA, J.A.P., PINTO, M.O., 2001 (a). “Dynamic Tension in Risers and Mooring Lines: an Algebraic Approximation for Harmonic Excitation”. *Applied Ocean Research* 23 (p. 63-81).
- ARANHA, J.A.P., PINTO, M.O., SILVA, R.M.C., 2001 (b). “On the Dynamic Compression of Risers: an Analytical Expression for the Critical Load”. *Applied Ocean Research* 23 (p. 83-91).
- ARANHA, J.A.P., PINTO, M.O., LEITE, A.J.P., 2001 (c). “Dynamic Tension of Cables in a Random Sea: Analytical Approximation for the Envelope Probability Density Function”. *Applied Ocean Research* 23 (p. 93-101).
- BARLTROP, N. D. P., 1998. *Floating Structures: a guide for design and analysis*, The Centre for Marine and Petroleum Technology (CMPT), England, OPL.

- BITNER-GREGERSEN, E.M., HARVER, S., 1991. “*Joint Model for Reliability Calculations*”. *Proceedings of the ISOPE Conference, Edinburgh, Scotland*.
- CHAKRABARTI, S.K., 1987. *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Computational Mechanics Publications, Wessex England.
- DANTAS, C.M.S., 2004. “Metodologia de Análise de Fadiga de *Risers* Rígidos no Domínio da Frequência com Utilização de Modelos Hidrodinâmicos Tridimensionais Linearizados”. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- DER KIUREGHIAN A.; LIU, P.L., *Structural Reliability Under Incomplete Probability Information*. *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE, v. 112, n.1, p. 85-104, 1986.
- DNV-OS-F201, *Offshore Standard – Dynamic risers*, Det Norske Veritas, Hovik, Norway, 2010.
- DNV (Det Norske Veritas), 2015. *Sesam – DeepC - Deep Water Floater Motion Analysis – User Manual*, Versão 5.0.
- FALTINSEN, O.M., 1990. *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge University Press, Cambridge, England.
- FORTRAN<sup>®</sup>, 2010, Intel Visual Fortran<sup>®</sup>, Intel Inc
- GOBAT, J.I., GROSENBAUGH, M.A., 2001. “*Dynamics in the Touchdown Region of Catenary Moorings*”. *11<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, Stavanger, Norway, June 17-22*.
- HASSELMAN, K., “*Measurement of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*”, *Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Ergänzungsheft 1973,13, No. A*.
- LACEO/COPPE/UFRJ, 2015. Programa PosLT. Manual de Utilização, versão 3.1, Rio de Janeiro, Brasil.



- LACERDA, T.A.G., 2005. Análise de Sistemas de Ancoragem de Plataformas Flutuantes. Projeto de Final de Curso, Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas da UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- LACERDA, T.A.G., 2011, Estimativa dos Movimentos Induzidos por Vórtices em Plataformas Flutuantes através de um Oscilador do tipo Van der Pol, Tese de D.Sc., PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- LAMCSO/COPPE/UFRJ, 2006. Programa PROSIM: Simulação Numérica do Comportamento de Sistemas para Exploração de Petróleo *Offshore* – Manual de Entrada de Dados, Rio de Janeiro, Brasil.
- MELCHERS, R.E., 1999. “*Structural Reliability Analysis and Prediction*”, 2a Edição, Editora John Wiley & Sons, New York, USA.
- NAESS, A., 1988. “*A Study of Linear Combination of Load Effects*”. *Journal of Sound and Vibration*, volume 129 (2), pp 83-98.
- NAESS, A. AND MOAN, T., *Probabilistic Design Of Offshore Structures, Chapter 5 In Handbook Of Offshore Engineering*, Elsevier, S.K. CHAKRABARTI (ED.), 197-278, 2005.
- NEWLAND, D.E., 1993. *An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis, 3<sup>rd</sup> Edition. Longman Scientific and Technical, Harlow, England.*
- ORCINA, 2016. OrcaFlex – *Dynamic Analysis of Offshore Marine Systems– User Manual*, Versão 10.0d.
- PAPALEO, A., 2009. Metodologia para Definição de Casos de Caso de Carregamentos Ambientais Equivalentes para o Projeto de *Risers* em Catenária. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- PEREIRA, V.M.S., 2011. Análise da Resposta Dinâmica do Tubo Vertical do Sistema de Riser Suspenso e Ancorado por Amarras (RSAA), Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

- PESCE, C.P., ARANHA, J.A.P., MARTINS, C.A., 1997. “*Dynamic Curvature in Catenary Risers at Touchdown Point: an Experimental Study and the Analytical Boundary-Layer Solution*”. 7<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, USA, May 25-30.
- REBELLO, A.M.V., 2013. Geração de diagramas de dispersão determinísticos equivalentes para análises de fadiga de *risers*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- SAGRILO, L.V.S., LIMA, E.C.P., PAPALEO, A., 2008. “*A Joint Probability Model for Environmental Parameters*”. *Proceedings of the 27th OMAE Conference*, Estoril, Portugal (OMAE2008-57890).
- SAGRILO, L.V.S., LIMA, E.C.P., PAPALEO, A., 2011a. “*A Joint Probability Model for Environmental Parameters*”. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 133 (031605).
- SAGRILO, L.V.S., 2011b, Notas de aula – Métodos Probabilísticos, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SAGRILO, L.V.S., 2011c, Apostila Confiabilidade Estrutural, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
- SENRA, S.F., 2004, Metodologias de análise e projeto integrado de sistemas flutuantes para exploração de petróleo *offshore*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- SIQUEIRA, E.F.N., SIQUEIRA, M.Q SOUSA, F.J.M., 2007. “*SCR Behavior for a GoM Deep Water Location Considering High Wellhead Pressure - Evaluation of Maximum Stress*”. *ISOPE-I-07-201, The Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference, 1-6 July, Lisbon, Portugal*.
- SOUSA, F.J.M., 2005, Estatística de Longo Prazo da Resposta Aplicada à Análise de *Risers* Metálicos, Dissertação de M.Sc., PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- SOUSA, F.J.M., 2011. Calibração de Condições de Projeto Baseada na Tração de Longo Prazo para *Risers* em Catenária. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- SOUSA, F.J.M., SAGRILO, L.V.S., LIMA, E.C.P., PAPALEO, A., 2012. *Calibration of Design Conditions Based on Long Term Top Tension for Catenary Risers. 31<sup>st</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2012-83506)*, 1-6 Julho, Rio de Janeiro, RJ.
- USP, 2000. DYNASIM – Manual Teórico. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP, São Paulo.
- VIDEIRO, P.M., 1998. *Reliability Based Design of Marine Structures, D.Sc. Thesis, NTNU, Norway.*
- WINTERSTEIN, S. R., UDE, T. C., CORNELL, C. A., BJERAGER, P., and HAVER, S., 1993, “*Environmental Contours for Extreme Response: Inverse FORM with Omission Factors*”, *Proceedings of the International Conference on Structural Safety and Reliability, Innsbruck.*
- ZURITA, B.I., 1999. Análise Estatística de Valores Extremos de Séries Temporais Gaussianas e Não Gaussianas. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

## ANEXO A

### RESULTADOS DE CURTO PRAZO (ESTUDO DE CASO 1)

*Tabela A.1 – Estudo de caso 1: Ondas para a análise de curto prazo.*

Caso	Onda			Caso	Onda		
	Hs (m)	Tz (s)	Azimute (deg)		Hs (m)	Tz (s)	Azimute (deg)
1	0.20	1.80	270	40	4.20	6.10	270
2	0.20	2.40	270	41	4.20	6.61	270
3	0.20	3.00	270	42	4.20	7.13	270
4	0.20	3.60	270	43	4.20	7.64	270
5	0.20	4.20	270	44	4.20	8.15	270
6	0.20	4.80	270	45	4.20	8.66	270
7	0.20	5.40	270	46	4.20	9.18	270
8	0.20	6.00	270	47	4.20	9.69	270
9	0.20	6.60	270	48	4.20	10.20	270
10	0.20	7.20	270	49	5.20	6.70	270
11	1.20	3.50	270	50	5.20	7.23	270
12	1.20	4.02	270	51	5.20	7.75	270
13	1.20	4.54	270	52	5.20	8.28	270
14	1.20	5.07	270	53	5.20	8.80	270
15	1.20	5.59	270	54	5.20	9.33	270
16	1.20	6.11	270	55	5.20	9.85	270
17	1.20	6.63	270	56	5.20	10.38	270
18	1.20	7.16	270	57	5.20	10.90	270
19	1.20	7.68	270	58	6.20	7.20	270
20	1.20	8.20	270	59	6.20	7.74	270
21	2.20	4.60	270	60	6.20	8.28	270
22	2.20	5.08	270	61	6.20	8.75	270
23	2.20	5.56	270	62	6.20	9.29	270
24	2.20	6.03	270	63	6.20	9.83	270
25	2.20	6.51	270	64	6.20	10.37	270
26	2.20	6.99	270	65	6.20	10.90	270
27	2.20	7.47	270	66	6.20	11.50	270
28	2.20	7.94	270	67	7.20	7.70	270
29	2.20	8.42	270	68	7.20	8.20	270
30	2.20	8.90	270	69	7.20	8.70	270
31	3.20	5.50	270	70	7.20	9.20	270
32	3.20	6.00	270	71	7.20	9.70	270
33	3.20	6.50	270	72	7.20	10.20	270
34	3.20	7.00	270	73	7.20	10.70	270
35	3.20	7.50	270	74	7.20	11.20	270
36	3.20	8.00	270	75	7.20	11.70	270
37	3.20	8.50	270	76	7.20	12.20	270
38	3.20	9.00	270	77	8.20	8.60	270
39	3.20	9.50	270	78	8.20	9.07	270

Tabela A.1 – Estudo de caso 1: Ondas para a análise de curto prazo (continuação).

Caso	Onda			Caso	Onda		
	Hs (m)	Tz (s)	Azimute (deg)		Hs (m)	Tz (s)	Azimute (deg)
79	8.20	9.53	270	106	11.20	12.70	270
80	8.20	10.00	270	107	11.20	13.20	270
81	8.20	10.47	270	108	11.20	13.70	270
82	8.20	10.93	270	109	11.20	14.20	270
83	8.20	11.40	270	110	11.20	14.70	270
84	8.20	11.87	270	111	12.20	12.70	270
85	8.20	12.33	270	112	12.20	13.17	270
86	8.20	12.80	270	113	12.20	13.63	270
87	9.20	9.50	270	114	12.20	14.10	270
88	9.20	10.00	270	115	12.20	14.57	270
89	9.20	10.50	270	116	12.20	15.03	270
90	9.20	11.00	270	117	12.20	15.50	270
91	9.20	11.50	270	118	13.20	13.80	270
92	9.20	12.00	270	119	13.20	14.24	270
93	9.20	12.50	270	120	13.20	14.68	270
94	9.20	13.00	270	121	13.20	15.12	270
95	9.20	13.50	270	122	13.20	15.56	270
96	10.20	10.50	270	123	13.20	16.00	270
97	10.20	11.01	270	124	14.20	14.80	270
98	10.20	11.53	270	125	14.20	15.25	270
99	10.20	12.04	270	126	14.20	15.70	270
100	10.20	12.56	270	127	14.20	16.15	270
101	10.20	13.07	270	128	14.20	16.60	270
102	10.20	13.59	270	129	15.20	16.00	270
103	10.20	14.10	270	130	15.20	16.50	270
104	11.20	11.70	270	131	15.20	17.00	270
105	11.20	12.20	270	132	15.70	16.50	270

Tabela A.2 – Estudo de caso 1: Comparação de trações e momentos fletores estáticas no TDP, posição do TDP e comprimento de flexão “ $\lambda$ ” (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	FEM				Semi-analítico			
	$F_x$ (kN)	$M_y$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)	$F_x$ (kN)	$M_y$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)
1	416.1	48.9	441.6	8.1	414.0	49.5	443.2	8.1
2	416.1	48.9	441.7	8.1	414.0	49.5	443.2	8.1
3	416.1	48.9	441.9	8.1	414.0	49.5	443.2	8.1
4	416.1	48.9	441.3	8.1	414.0	49.5	443.2	8.1
5	416.1	48.9	442.0	8.1	414.0	49.5	443.2	8.1
6	416.1	48.9	441.4	8.1	414.0	49.5	443.2	8.1
7	416.1	48.9	441.6	8.1	414.0	49.5	443.2	8.1
8	416.1	48.9	441.5	8.1	414.0	49.5	443.2	8.1
9	416.1	48.9	442.0	8.1	414.0	49.5	443.2	8.1
10	416.1	48.9	441.6	8.1	414.0	49.5	443.2	8.1
11	414.6	49.0	443.3	8.1	412.5	49.7	444.6	8.1
12	414.6	49.0	442.7	8.1	412.5	49.7	444.6	8.1
13	414.6	49.0	443.2	8.1	412.5	49.7	444.6	8.1
14	414.6	49.0	443.2	8.1	412.5	49.7	444.6	8.1
15	414.6	49.0	443.5	8.1	412.5	49.7	444.6	8.1
16	414.6	49.0	443.5	8.1	412.5	49.7	444.6	8.1
17	414.6	49.0	443.3	8.1	412.5	49.7	444.6	8.1
18	414.6	49.0	443.1	8.1	412.5	49.7	444.6	8.1
19	414.6	49.0	443.0	8.1	412.5	49.7	444.6	8.1
20	414.6	49.0	443.4	8.1	412.5	49.7	444.6	8.1
21	413.1	49.2	444.7	8.1	411.0	49.9	445.9	8.1
22	413.1	49.2	444.5	8.1	411.0	49.9	445.9	8.1
23	413.1	49.2	444.3	8.1	411.0	49.9	445.9	8.1
24	413.1	49.2	444.4	8.1	411.0	49.9	445.9	8.1
25	413.1	49.2	444.5	8.1	411.0	49.9	445.9	8.1
26	413.1	49.2	444.5	8.1	411.0	49.9	445.9	8.1
27	413.1	49.2	444.5	8.1	411.0	49.9	445.9	8.1
28	413.1	49.2	444.5	8.1	411.0	49.9	445.9	8.1
29	413.1	49.2	444.5	8.1	411.0	49.9	445.9	8.1
30	413.1	49.2	444.4	8.1	411.0	49.9	445.9	8.1
31	411.6	49.4	446.0	8.1	409.5	50.1	447.2	8.1
32	411.6	49.4	445.8	8.1	409.5	50.1	447.2	8.1
33	411.6	49.4	445.7	8.1	409.5	50.1	447.2	8.1
34	411.6	49.4	445.7	8.1	409.5	50.1	447.2	8.1
35	411.6	49.4	445.9	8.1	409.5	50.1	447.2	8.1
36	411.6	49.4	446.0	8.1	409.5	50.1	447.2	8.1
37	411.6	49.4	445.9	8.1	409.5	50.1	447.2	8.1
38	411.6	49.4	446.2	8.1	409.5	50.1	447.2	8.1
39	411.6	49.4	446.0	8.1	409.5	50.1	447.2	8.1
40	410.1	49.6	447.0	8.1	408.0	50.2	448.5	8.2
41	410.1	49.6	447.2	8.1	408.0	50.2	448.5	8.2
42	410.1	49.6	447.0	8.1	408.0	50.2	448.5	8.2
43	410.1	49.6	447.2	8.1	408.0	50.2	448.5	8.2
44	410.1	49.6	447.2	8.1	408.0	50.2	448.5	8.2

Tabela A.2 – Estudo de caso 1: Comparação de trações e momentos fletores estáticas no TDP, posição do TDP e comprimento de flexão “ $\lambda$ ” (FEM vs. Semi-analítico), continuação.

Caso	FEM				Semi-analítico			
	$F_x$ (kN)	$M_y$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)	$F_x$ (kN)	$M_y$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)
45	410.1	49.6	447.0	8.1	408.0	50.2	448.5	8.2
46	410.1	49.6	446.9	8.1	408.0	50.2	448.5	8.2
47	410.1	49.6	446.8	8.1	408.0	50.2	448.5	8.2
48	410.1	49.6	446.9	8.1	408.0	50.2	448.5	8.2
49	408.7	49.7	448.4	8.1	406.6	50.4	449.8	8.2
50	408.7	49.7	448.1	8.1	406.6	50.4	449.8	8.2
51	408.7	49.7	448.2	8.1	406.6	50.4	449.8	8.2
52	408.7	49.7	448.1	8.1	406.6	50.4	449.8	8.2
53	408.7	49.7	448.2	8.1	406.6	50.4	449.8	8.2
54	408.7	49.7	448.4	8.1	406.6	50.4	449.8	8.2
55	408.7	49.7	448.2	8.1	406.6	50.4	449.8	8.2
56	408.7	49.7	448.4	8.1	406.6	50.4	449.8	8.2
57	408.7	49.7	448.4	8.1	406.6	50.4	449.8	8.2
58	407.3	49.9	449.4	8.2	405.2	50.6	451.1	8.2
59	407.3	49.9	449.1	8.2	405.2	50.6	451.1	8.2
60	407.3	49.9	449.8	8.2	405.2	50.6	451.1	8.2
61	407.3	49.9	449.7	8.2	405.2	50.6	451.1	8.2
62	407.3	49.9	449.5	8.2	405.2	50.6	451.1	8.2
63	407.3	49.9	449.4	8.2	405.2	50.6	451.1	8.2
64	407.3	49.9	449.6	8.2	405.2	50.6	451.1	8.2
65	407.3	49.9	449.4	8.2	405.2	50.6	451.1	8.2
66	407.3	49.9	449.4	8.2	405.2	50.6	451.1	8.2
67	405.9	50.1	450.0	8.2	403.8	50.8	452.4	8.2
68	405.9	50.1	450.1	8.2	403.8	50.8	452.4	8.2
69	405.9	50.1	449.8	8.2	403.8	50.8	452.4	8.2
70	405.9	50.1	450.0	8.2	403.8	50.8	452.4	8.2
71	405.9	50.1	450.1	8.2	403.8	50.8	452.4	8.2
72	405.9	50.1	450.3	8.2	403.8	50.8	452.4	8.2
73	405.9	50.1	450.4	8.2	403.8	50.8	452.4	8.2
74	405.9	50.1	450.1	8.2	403.8	50.8	452.4	8.2
75	405.9	50.1	450.1	8.2	403.8	50.8	452.4	8.2
76	405.9	50.1	450.0	8.2	403.8	50.8	452.4	8.2
77	404.6	50.2	451.0	8.2	402.4	50.9	453.6	8.2
78	404.6	50.2	451.0	8.2	402.4	50.9	453.6	8.2
79	404.6	50.2	451.0	8.2	402.4	50.9	453.6	8.2
80	404.6	50.2	451.0	8.2	402.4	50.9	453.6	8.2
81	404.6	50.2	451.0	8.2	402.4	50.9	453.6	8.2
82	404.6	50.2	451.0	8.2	402.4	50.9	453.6	8.2
83	404.6	50.2	451.0	8.2	402.4	50.9	453.6	8.2
84	404.6	50.2	451.0	8.2	402.4	50.9	453.6	8.2
85	404.6	50.2	451.0	8.2	402.4	50.9	453.6	8.2
86	404.6	50.2	451.0	8.2	402.4	50.9	453.6	8.2
87	403.3	50.4	452.0	8.2	401.0	51.1	454.8	8.2
88	403.3	50.4	452.0	8.2	401.0	51.1	454.8	8.2

Tabela A.2 – Estudo de caso 1: Comparação de trações e momentos fletores estáticas no TDP, posição do TDP e comprimento de flexão “ $\lambda$ ” (FEM vs. Semi-analítico), continuação.

Caso	FEM				Semi-analítico			
	$F_x$ (kN)	$M_y$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)	$F_x$ (kN)	$M_y$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)
89	403.3	50.4	452.0	8.2	401.0	51.1	454.8	8.2
90	403.3	50.4	452.0	8.2	401.0	51.1	454.8	8.2
91	403.3	50.4	452.0	8.2	401.0	51.1	454.8	8.2
92	403.3	50.4	452.0	8.2	401.0	51.1	454.8	8.2
93	403.3	50.4	452.0	8.2	401.0	51.1	454.8	8.2
94	403.3	50.4	452.0	8.2	401.0	51.1	454.8	8.2
95	403.3	50.4	452.0	8.2	401.0	51.1	454.8	8.2
96	402.0	50.5	453.0	8.2	399.7	51.3	456.0	8.2
97	402.0	50.5	453.0	8.2	399.7	51.3	456.0	8.2
98	402.0	50.5	453.0	8.2	399.7	51.3	456.0	8.2
99	402.0	50.5	453.0	8.2	399.7	51.3	456.0	8.2
100	402.0	50.5	453.0	8.2	399.7	51.3	456.0	8.2
101	402.0	50.5	453.0	8.2	399.7	51.3	456.0	8.2
102	402.0	50.5	453.0	8.2	399.7	51.3	456.0	8.2
103	402.0	50.5	454.0	8.2	399.7	51.3	456.0	8.2
104	400.6	50.7	454.0	8.2	398.3	51.5	457.2	8.3
105	400.6	50.7	454.0	8.2	398.3	51.5	457.2	8.3
106	400.6	50.7	454.0	8.2	398.3	51.5	457.2	8.3
107	400.6	50.7	454.0	8.2	398.3	51.5	457.2	8.3
108	400.6	50.7	454.0	8.2	398.3	51.5	457.2	8.3
109	400.6	50.7	454.0	8.2	398.3	51.5	457.2	8.3
110	400.6	50.7	454.0	8.2	398.3	51.5	457.2	8.3
111	399.1	50.8	456.0	8.2	397.0	51.6	458.4	8.3
112	399.1	50.8	456.0	8.2	397.0	51.6	458.4	8.3
113	399.1	50.8	456.0	8.2	397.0	51.6	458.4	8.3
114	399.1	50.8	456.0	8.2	397.0	51.6	458.4	8.3
115	399.1	50.8	456.0	8.2	397.0	51.6	458.4	8.3
116	399.1	50.8	456.0	8.2	397.0	51.6	458.4	8.3
117	399.1	50.8	456.0	8.2	397.0	51.6	458.4	8.3
118	398.3	51.0	457.0	8.3	395.8	51.8	459.5	8.3
119	398.3	51.0	457.0	8.3	395.8	51.8	459.5	8.3
120	398.3	51.0	457.0	8.3	395.8	51.8	459.5	8.3
121	398.3	51.0	457.0	8.3	395.8	51.8	459.5	8.3
122	398.3	51.0	457.0	8.3	395.8	51.8	459.5	8.3
123	398.3	51.0	457.4	8.3	395.8	51.8	459.5	8.3
124	397.1	51.1	458.5	8.3	394.5	52.0	460.7	8.3
125	397.1	51.1	458.4	8.3	394.5	52.0	460.7	8.3
126	397.1	51.1	458.5	8.3	394.5	52.0	460.7	8.3
127	397.1	51.1	458.4	8.3	394.5	52.0	460.7	8.3
128	397.1	51.1	458.5	8.3	394.5	52.0	460.7	8.3
129	395.9	51.3	459.5	8.3	393.2	52.1	461.8	8.3
130	395.9	51.3	459.7	8.3	393.2	52.1	461.8	8.3
131	395.9	51.3	459.7	8.3	393.2	52.1	461.8	8.3
132	395.3	51.4	460.0	8.3	392.6	52.2	462.3	8.3



*Tabela A.3 – Estudo de caso 1: Comparação de máximos valores extremos do fator de utilização(DNV-2001) dos estados de mar de curto prazo na TDZ (FEM vs. Semi-analítico).*

Caso	VMP		Caso	VMP		Caso	VMP	
	FEM	Semi-analítico		FEM	Semi-analítico		FEM	Semi-analítico
1	0.13	0.14	45	0.14	0.15	89	0.23	0.20
2	0.13	0.14	46	0.14	0.15	90	0.21	0.23
3	0.13	0.14	47	0.14	0.15	91	0.23	0.26
4	0.13	0.14	48	0.14	0.15	92	0.22	0.25
5	0.13	0.14	49	0.14	0.15	93	0.24	0.31
6	0.13	0.14	50	0.14	0.15	94	0.27	0.30
7	0.13	0.14	51	0.14	0.15	95	0.31	0.42
8	0.13	0.14	52	0.15	0.15	96	0.24	0.22
9	0.13	0.14	53	0.15	0.15	97	0.24	0.27
10	0.13	0.14	54	0.15	0.15	98	0.26	0.34
11	0.13	0.14	55	0.15	0.15	99	0.25	0.30
12	0.13	0.14	56	0.15	0.15	100	0.29	0.44
13	0.13	0.14	57	0.15	0.16	101	0.34	0.42
14	0.13	0.14	58	0.15	0.15	102	0.41	0.67
15	0.13	0.14	59	0.15	0.16	103	0.44	0.67
16	0.13	0.14	60	0.15	0.16	104	0.29	0.46
17	0.13	0.14	61	0.15	0.16	105	0.31	0.43
18	0.13	0.14	62	0.15	0.16	106	0.36	0.61
19	0.13	0.14	63	0.16	0.16	107	0.42	0.64
20	0.13	0.14	64	0.16	0.16	108	0.54	0.77
21	0.13	0.14	65	0.16	0.17	109	0.55	0.78
22	0.13	0.14	66	0.17	0.17	110	0.51	0.86
23	0.13	0.14	67	0.15	0.16	111	0.44	0.86
24	0.13	0.14	68	0.16	0.16	112	0.51	0.78
25	0.13	0.14	69	0.16	0.17	113	0.70	0.79
26	0.13	0.14	70	0.16	0.17	114	0.78	0.89
27	0.13	0.14	71	0.16	0.17	115	0.69	0.83
28	0.13	0.14	72	0.17	0.17	116	0.68	0.86
29	0.13	0.14	73	0.18	0.17	117	0.96	0.94
30	0.13	0.14	74	0.18	0.19	118	1.00	0.95
31	0.13	0.14	75	0.18	0.19	119	0.97	1.00
32	0.14	0.14	76	0.18	0.19	120	0.90	0.98
33	0.14	0.14	77	0.17	0.18	121	0.96	1.06
34	0.14	0.14	78	0.17	0.18	122	0.93	1.04
35	0.14	0.14	79	0.17	0.18	123	1.15	0.99
36	0.14	0.14	80	0.18	0.18	124	1.13	1.10
37	0.14	0.14	81	0.19	0.18	125	1.36	1.18
38	0.14	0.15	82	0.19	0.20	126	1.43	1.12
39	0.14	0.15	83	0.20	0.22	127	1.39	1.06
40	0.14	0.15	84	0.20	0.21	128	1.01	0.98
41	0.14	0.15	85	0.21	0.23	129	1.83	1.13
42	0.14	0.15	86	0.23	0.25	130	1.45	1.02
43	0.14	0.15	87	0.19	0.20	131	1.30	0.98
44	0.14	0.15	88	0.19	0.20	132	1.56	1.06

## ANEXO B

### RESULTADOS DE CURTO PRAZO (ESTUDO DE CASO 2)

*Tabela B.1 – Estudo de caso 2: Ondas para a análise de curto prazo.*

Caso	Onda			Caso	Onda		
	Hs (m)	Tp (s)	Azimute (deg)		Hs (m)	Tp (s)	Azimute (deg)
1	0.20	1.80	45	44	1.20	13.20	45
2	0.20	3.00	45	45	1.20	13.80	45
3	0.20	4.20	45	46	1.20	14.40	45
4	0.20	5.40	45	47	1.20	15.00	45
5	0.20	6.60	45	48	1.20	15.60	45
6	0.20	7.80	45	49	1.20	16.20	45
7	0.20	9.00	45	50	1.20	16.80	45
8	0.20	10.20	45	51	1.20	17.40	45
9	0.20	11.40	45	52	1.20	18.00	45
10	0.20	12.60	45	53	1.20	18.60	45
11	0.20	13.80	45	54	1.20	19.20	45
12	0.20	15.00	45	55	1.20	19.80	45
13	0.20	16.20	45	56	1.20	20.40	45
14	0.20	17.40	45	57	1.20	21.00	45
15	0.20	18.60	45	58	1.20	21.60	45
16	0.30	19.80	45	59	1.20	22.20	45
17	0.30	21.00	45	60	1.20	22.80	45
18	0.30	22.20	45	61	1.20	23.40	45
19	0.40	23.40	45	62	1.20	24.00	45
20	0.40	24.60	45	63	1.20	24.60	45
21	0.50	25.80	45	64	1.20	25.20	45
22	0.50	27.00	45	65	1.20	25.80	45
23	0.50	28.20	45	66	1.20	26.40	45
24	0.60	29.40	45	67	1.20	27.00	45
25	0.70	30.60	45	68	1.20	27.60	45
26	0.80	31.80	45	69	1.20	28.20	45
27	0.90	33.00	45	70	1.20	28.80	45
28	1.20	3.60	45	71	1.20	29.40	45
29	1.20	4.20	45	72	1.20	30.00	45
30	1.20	4.80	45	73	1.20	30.60	45
31	1.20	5.40	45	74	1.20	31.20	45
32	1.20	6.00	45	75	1.20	31.80	45
33	1.20	6.60	45	76	1.20	32.40	45
34	1.20	7.20	45	77	1.20	33.00	45
35	1.20	7.80	45	78	1.20	33.60	45
36	1.20	8.40	45	79	1.20	34.20	45
37	1.20	9.00	45	80	1.20	35.40	45
38	1.20	9.60	45	81	2.20	4.80	45
39	1.20	10.20	45	82	2.20	5.40	45
40	1.20	10.80	45	83	2.20	6.00	45
41	1.20	11.40	45	84	2.20	6.60	45
42	1.20	12.00	45	85	2.20	7.20	45
43	1.20	12.60	45	86	2.20	7.80	45

*Tabela B.1 – Estudo de caso 2: Ondas para a análise de curto prazo (300c),  
(continuação).*

Caso	Onda			Caso	Onda		
	Hs (m)	Tp (s)	Azimute (deg)		Hs (m)	Tp (s)	Azimute (deg)
87	2.20	8.40	45	137	3.20	9.00	45
88	2.20	9.00	45	138	3.20	9.60	45
89	2.20	9.60	45	139	3.20	10.20	45
90	2.20	10.20	45	140	3.20	10.80	45
91	2.20	10.80	45	141	3.20	11.40	45
92	2.20	11.40	45	142	3.20	12.00	45
93	2.20	12.00	45	143	3.20	12.60	45
94	2.20	12.60	45	144	3.20	13.20	45
95	2.20	13.20	45	145	3.20	13.80	45
96	2.20	13.80	45	146	3.20	14.40	45
97	2.20	14.40	45	147	3.20	15.00	45
98	2.20	15.00	45	148	3.20	15.60	45
99	2.20	15.60	45	149	3.20	16.20	45
100	2.20	16.20	45	150	3.20	16.80	45
101	2.20	16.80	45	151	3.20	17.40	45
102	2.20	17.40	45	152	3.20	18.00	45
103	2.20	18.00	45	153	3.20	18.60	45
104	2.20	18.60	45	154	3.20	19.20	45
105	2.20	19.20	45	155	3.20	19.80	45
106	2.20	19.80	45	156	3.20	20.40	45
107	2.20	20.40	45	157	3.20	21.00	45
108	2.20	21.00	45	158	3.20	21.60	45
109	2.20	21.60	45	159	3.20	22.20	45
110	2.20	22.20	45	160	3.20	22.80	45
111	2.20	22.80	45	161	3.20	23.40	45
112	2.20	23.40	45	162	3.20	24.00	45
113	2.20	24.00	45	163	3.20	24.60	45
114	2.20	24.60	45	164	3.20	25.20	45
115	2.20	25.20	45	165	3.20	25.80	45
116	2.20	25.80	45	166	3.20	26.40	45
117	2.20	26.40	45	167	3.20	27.00	45
118	2.20	27.00	45	168	3.20	27.60	45
119	2.20	27.60	45	169	3.20	28.20	45
120	2.20	28.20	45	170	3.20	28.80	45
121	2.20	28.80	45	171	3.20	29.40	45
122	2.20	29.40	45	172	3.20	30.00	45
123	2.20	30.00	45	173	3.20	30.60	45
124	2.20	30.60	45	174	3.20	31.20	45
125	2.20	31.20	45	175	4.20	6.60	45
126	2.20	31.80	45	176	4.20	7.20	45
127	2.20	32.40	45	177	4.20	7.80	45
128	2.20	33.00	45	178	4.20	8.40	45
129	2.20	33.60	45	179	4.20	9.00	45
130	2.20	34.20	45	180	4.20	9.60	45
131	2.20	34.80	45	181	4.20	10.20	45
132	3.20	6.00	45	182	4.20	10.80	45
133	3.20	6.60	45	183	4.20	11.40	45
134	3.20	7.20	45	184	4.20	12.00	45
135	3.20	7.80	45	185	4.20	12.60	45
136	3.20	8.40	45	186	4.20	13.20	45

*Tabela B.1 – Estudo de caso 2: Ondas para a análise de curto prazo (300c),  
(continuação).*

Caso	Onda			Caso	Onda		
	Hs (m)	Tp (s)	Azimuth (deg)		Hs (m)	Tp (s)	Azimuth (deg)
187	4.20	13.80	45	237	6.20	9.00	45
188	4.20	14.40	45	238	6.20	9.60	45
189	4.20	15.00	45	239	6.20	10.20	45
190	4.20	15.60	45	240	6.20	10.80	45
191	4.20	16.20	45	241	6.20	11.40	45
192	4.20	16.80	45	242	6.20	12.00	45
193	4.20	17.40	45	243	6.20	12.60	45
194	4.20	18.00	45	244	6.20	13.20	45
195	4.20	18.60	45	245	6.20	13.80	45
196	4.20	19.20	45	246	6.20	14.40	45
197	4.20	19.80	45	247	6.20	15.00	45
198	4.20	20.40	45	248	6.20	15.60	45
199	4.20	21.00	45	249	6.20	16.20	45
200	4.20	21.60	45	250	6.20	16.80	45
201	4.20	22.20	45	251	6.20	17.40	45
202	4.20	22.80	45	252	6.20	18.00	45
203	4.20	23.40	45	253	6.20	18.60	45
204	4.20	24.00	45	254	6.20	19.20	45
205	4.20	24.60	45	255	6.20	19.80	45
206	4.20	25.20	45	256	6.20	20.40	45
207	4.20	25.80	45	257	6.20	21.00	45
208	4.20	26.40	45	258	6.20	21.60	45
209	4.20	27.00	45	259	7.20	12.60	45
210	5.20	7.80	45	260	7.20	13.20	45
211	5.20	8.40	45	261	7.20	13.80	45
212	5.20	9.00	45	262	7.20	14.40	45
213	5.20	9.60	45	263	7.20	15.00	45
214	5.20	10.20	45	264	7.20	15.60	45
215	5.20	10.80	45	265	7.20	16.20	45
216	5.20	11.40	45	266	7.20	16.80	45
217	5.20	12.00	45	267	7.20	17.40	45
218	5.20	12.60	45	268	7.20	18.00	45
219	5.20	13.20	45	269	7.20	18.60	45
220	5.20	13.80	45	270	7.20	19.20	45
221	5.20	14.40	45	271	7.20	19.80	45
222	5.20	15.00	45	272	7.20	20.40	45
223	5.20	15.60	45	273	7.20	21.00	45
224	5.20	16.20	45	274	8.20	15.60	45
225	5.20	16.80	45	275	8.20	16.20	45
226	5.20	17.40	45	276	8.20	16.80	45
227	5.20	18.00	45	277	8.20	17.40	45
228	5.20	18.60	45	278	8.20	18.00	45
229	5.20	19.20	45	279	8.20	18.60	45
230	5.20	19.80	45	280	8.20	19.20	45
231	5.20	20.40	45	281	8.20	19.80	45
232	5.20	21.00	45	282	8.20	20.40	45
233	5.20	21.60	45	283	8.20	21.00	45
234	5.20	22.20	45	284	8.20	21.60	45
235	5.20	22.80	45	285	9.20	18.60	45
236	5.20	23.40	45	286	9.20	19.20	45

*Tabela B.1 – Estudo de caso 2: Ondas para a análise de curto prazo (300c),  
(continuação).*

Caso	Onda			Caso	Onda		
	Hs (m)	Tp (s)	Azimute (deg)		Hs (m)	Tp (s)	Azimute (deg)
287	9.20	19.80	45	294	10.20	22.20	45
288	9.20	20.40	45	295	10.20	22.80	45
289	9.20	21.00	45	296	10.20	23.40	45
290	9.20	21.60	45	297	10.20	24.00	45
291	9.20	22.20	45	298	11.20	25.00	45
292	9.20	22.80	45	299	11.20	25.60	45
293	10.20	21.60	45	300	11.20	26.20	45

Tabela B.2 – Estudo de caso 2: Comparação de trações e momentos fletores estáticas no TDP, posição do TDP e comprimento de flexão “ $\lambda$ ” (FEM vs. Semi-analítico).

Caso	FEM				Semi-analítico			
	$F_{x0}$ (kN)	$M_{y0}$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)	$F_{x0}$ (kN)	$M_{y0}$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)
1	418.0	48.6	440.0	8.1	416.1	49.3	441.4	8.1
2	418.0	48.6	439.9	8.1	416.1	49.3	441.4	8.1
3	418.0	48.6	439.9	8.1	416.1	49.3	441.4	8.1
4	418.0	48.6	440.0	8.1	416.1	49.3	441.4	8.1
5	418.0	48.6	439.8	8.1	416.1	49.3	441.4	8.1
6	418.0	48.6	440.0	8.1	416.1	49.3	441.4	8.1
7	418.0	48.6	439.7	8.1	416.1	49.3	441.4	8.1
8	418.0	48.6	439.7	8.1	416.1	49.3	441.4	8.1
9	418.0	48.6	439.8	8.1	416.1	49.3	441.4	8.1
10	418.0	48.6	440.0	8.1	416.1	49.3	441.4	8.1
11	418.0	48.6	440.0	8.1	416.1	49.3	441.4	8.1
12	418.0	48.6	440.0	8.1	416.1	49.3	441.4	8.1
13	418.0	48.6	440.0	8.1	416.1	49.3	441.4	8.1
14	418.0	48.6	440.0	8.1	416.1	49.3	441.4	8.1
15	418.0	48.6	440.0	8.1	416.1	49.3	441.4	8.1
16	419.0	48.5	439.0	8.0	417.0	49.2	440.6	8.1
17	419.0	48.5	439.0	8.0	417.0	49.2	440.6	8.1
18	419.0	48.5	439.0	8.0	417.0	49.2	440.6	8.1
19	420.0	48.4	438.5	8.0	417.8	49.1	439.9	8.1
20	420.0	48.4	438.5	8.0	417.8	49.1	439.9	8.1
21	421.0	48.3	437.5	8.0	418.7	49.0	439.1	8.1
22	421.0	48.3	437.5	8.0	418.7	49.0	439.1	8.1
23	421.0	48.3	437.5	8.0	418.7	49.0	439.1	8.1
24	421.7	48.2	436.7	8.0	419.6	48.9	438.3	8.0
25	422.6	48.1	436.0	8.0	420.5	48.8	437.5	8.0
26	423.5	48.0	435.2	8.0	421.3	48.6	436.7	8.0
27	424.4	47.9	434.4	8.0	422.2	48.5	436.0	8.0
28	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
29	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
30	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
31	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
32	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
33	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
34	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
35	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
36	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
37	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
38	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
39	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
40	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
41	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
42	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
43	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
44	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0

Tabela B.2 – Estudo de caso 2: Comparação de trações e momentos fletores estáticas no TDP, posição do TDP e comprimento de flexão “ $\lambda$ ” (FEM vs. Semi-analítico), continuação.

Caso	FEM				Semi-analítico			
	$Fx_0$ (kN)	$My_0$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)	$Fx_0$ (kN)	$My_0$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)
45	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
46	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
47	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
48	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
49	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
50	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
51	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
52	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
53	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
54	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
55	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
56	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
57	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
58	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
59	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
60	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
61	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
62	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
63	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
64	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
65	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
66	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
67	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
68	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
69	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
70	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
71	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
72	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
73	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
74	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
75	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
76	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
77	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
78	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
79	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
80	427.0	47.6	432.0	8.0	424.9	48.2	433.6	8.0
81	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
82	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
83	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
84	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
85	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
86	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
87	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
88	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9

Tabela B.2 – Estudo de caso 2: Comparação de trações e momentos fletores estáticas no TDP, posição do TDP e comprimento de flexão “ $\lambda$ ” (FEM vs. Semi-analítico), continuação.

Caso	FEM				Semi-analítico			
	$F_{x0}$ (kN)	$M_{y0}$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)	$F_{x0}$ (kN)	$M_{y0}$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)
89	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
90	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
91	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
92	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
93	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
94	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
95	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
96	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
97	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
98	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
99	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
100	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
101	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
102	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
103	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
104	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
105	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
106	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
107	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
108	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
109	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
110	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
111	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
112	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
113	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
114	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
115	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
116	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
117	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
118	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
119	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
120	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
121	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
122	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
123	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
124	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
125	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
126	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
127	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
128	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
129	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
130	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
131	436.0	46.7	424.0	7.9	433.9	47.2	425.7	7.9
132	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8



Tabela B.2 – Estudo de caso 2: Comparação de trações e momentos fletores estáticas no TDP, posição do TDP e comprimento de flexão “ $\lambda$ ” (FEM vs. Semi-analítico), continuação.

Caso	FEM				Semi-analítico			
	$F_{x0}$ (kN)	$M_{y0}$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)	$F_{x0}$ (kN)	$M_{y0}$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)
133	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
134	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
135	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
136	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
137	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
138	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
139	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
140	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
141	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
142	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
143	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
144	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
145	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
146	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
147	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
148	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
149	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
150	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
151	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
152	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
153	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
154	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
155	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
156	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
157	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
158	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
159	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
160	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
161	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
162	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
163	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
164	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
165	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
166	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
167	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
168	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
169	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
170	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
171	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
172	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
173	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
174	445.0	45.9	416.0	7.8	443.2	46.3	417.6	7.8
175	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
176	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7

Tabela B.2 – Estudo de caso 2: Comparação de trações e momentos fletores estáticas no TDP, posição do TDP e comprimento de flexão “ $\lambda$ ” (FEM vs. Semi-analítico), continuação.

Caso	FEM				Semi-analítico			
	$Fx_0$ (kN)	$My_0$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)	$Fx_0$ (kN)	$My_0$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)
177	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
178	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
179	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
180	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
181	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
182	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
183	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
184	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
185	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
186	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
187	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
188	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
189	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
190	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
191	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
192	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
193	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
194	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
195	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
196	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
197	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
198	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
199	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
200	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
201	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
202	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
203	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
204	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
205	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
206	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
207	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
208	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
209	455.0	45.1	407.6	7.7	452.7	45.3	409.4	7.7
210	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
211	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
212	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
213	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
214	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
215	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
216	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
217	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
218	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
219	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
220	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7

Tabela B.2 – Estudo de caso 2: Comparação de trações e momentos fletores estáticas no TDP, posição do TDP e comprimento de flexão “ $\lambda$ ” (FEM vs. Semi-analítico), continuação.

Caso	FEM				Semi-analítico			
	$Fx_0$ (kN)	$My_0$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)	$Fx_0$ (kN)	$My_0$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)
221	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
222	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
223	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
224	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
225	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
226	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
227	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
228	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
229	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
230	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
231	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
232	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
233	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
234	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
235	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
236	465.0	44.2	399.3	7.6	462.4	44.3	401.0	7.7
237	475.0	43.2	390.7	7.6	472.3	43.4	392.4	7.6
238	475.0	43.2	390.7	7.6	472.3	43.4	392.4	7.6
239	475.0	43.2	390.7	7.6	472.3	43.4	392.4	7.6
240	475.0	43.2	390.7	7.6	472.3	43.4	392.4	7.6
241	475.0	43.2	390.7	7.6	472.3	43.4	392.4	7.6
242	475.0	43.2	390.7	7.6	472.3	43.4	392.4	7.6
243	475.0	43.2	390.7	7.6	472.3	43.4	392.4	7.6
244	475.0	43.2	390.7	7.6	472.3	43.4	392.4	7.6
245	475.0	43.2	390.7	7.6	472.3	43.4	392.4	7.6
246	475.0	43.2	390.7	7.6	472.3	43.4	392.4	7.6
247	475.0	43.2	390.7	7.6	472.3	43.4	392.4	7.6
248	475.0	43.2	390.7	7.6	472.3	43.4	392.4	7.6
249	475.0	43.2	390.7	7.6	472.3	43.4	392.4	7.6
250	475.0	43.2	390.7	7.6	472.3	43.4	392.4	7.6
251	475.0	43.2	390.7	7.6	472.3	43.4	392.4	7.6
252	475.0	43.2	390.7	7.6	472.3	43.4	392.4	7.6
253	475.0	43.2	390.7	7.6	472.3	43.4	392.4	7.6
254	475.0	43.2	390.7	7.6	472.3	43.4	392.4	7.6
255	475.0	43.2	390.7	7.6	472.3	43.4	392.4	7.6
256	475.0	43.2	390.7	7.6	472.3	43.4	392.4	7.6
257	475.0	43.2	390.7	7.6	472.3	43.4	392.4	7.6
258	475.0	43.2	390.7	7.6	472.3	43.4	392.4	7.6
259	485.0	42.2	381.8	7.5	482.6	42.5	383.7	7.5
260	485.0	42.2	381.8	7.5	482.6	42.5	383.7	7.5
261	485.0	42.2	381.8	7.5	482.6	42.5	383.7	7.5
262	485.0	42.2	381.8	7.5	482.6	42.5	383.7	7.5
263	485.0	42.2	381.8	7.5	482.6	42.5	383.7	7.5
264	485.0	42.2	381.8	7.5	482.6	42.5	383.7	7.5

Tabela B.2 – Estudo de caso 2: Comparação de trações e momentos fletores estáticas no TDP, posição do TDP e comprimento de flexão “ $\lambda$ ” (FEM vs. Semi-analítico), continuação.

Caso	FEM				Semi-analítico			
	$Fx_0$ (kN)	$My_0$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)	$Fx_0$ (kN)	$My_0$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)
265	485.0	42.2	381.8	7.5	482.6	42.5	383.7	7.5
266	485.0	42.2	381.8	7.5	482.6	42.5	383.7	7.5
267	485.0	42.2	381.8	7.5	482.6	42.5	383.7	7.5
268	485.0	42.2	381.8	7.5	482.6	42.5	383.7	7.5
269	485.0	42.2	381.8	7.5	482.6	42.5	383.7	7.5
270	485.0	42.2	381.8	7.5	482.6	42.5	383.7	7.5
271	485.0	42.2	381.8	7.5	482.6	42.5	383.7	7.5
272	485.0	42.2	381.8	7.5	482.6	42.5	383.7	7.5
273	485.0	42.2	381.8	7.5	482.6	42.5	383.7	7.5
274	496.0	41.2	372.9	7.4	493.0	41.6	374.9	7.4
275	496.0	41.2	372.9	7.4	493.0	41.6	374.9	7.4
276	496.0	41.2	372.9	7.4	493.0	41.6	374.9	7.4
277	496.0	41.2	372.9	7.4	493.0	41.6	374.9	7.4
278	496.0	41.2	372.9	7.4	493.0	41.6	374.9	7.4
279	496.0	41.2	372.9	7.4	493.0	41.6	374.9	7.4
280	496.0	41.2	372.9	7.4	493.0	41.6	374.9	7.4
281	496.0	41.2	372.9	7.4	493.0	41.6	374.9	7.4
282	496.0	41.2	372.9	7.4	493.0	41.6	374.9	7.4
283	496.0	41.2	372.9	7.4	493.0	41.6	374.9	7.4
284	496.0	41.2	372.9	7.4	493.0	41.6	374.9	7.4
285	506.7	40.2	363.8	7.3	503.7	40.7	365.8	7.3
286	506.7	40.2	363.8	7.3	503.7	40.7	365.8	7.3
287	506.7	40.2	363.8	7.3	503.7	40.7	365.8	7.3
288	506.7	40.2	363.8	7.3	503.7	40.7	365.8	7.3
289	506.7	40.2	363.8	7.3	503.7	40.7	365.8	7.3
290	506.7	40.2	363.8	7.3	503.7	40.7	365.8	7.3
291	506.7	40.2	363.8	7.3	503.7	40.7	365.8	7.3
292	506.7	40.2	363.8	7.3	503.7	40.7	365.8	7.3
293	517.8	39.4	354.5	7.2	514.7	39.8	356.6	7.3
294	517.8	39.4	354.5	7.2	514.7	39.8	356.6	7.3
295	517.8	39.4	354.5	7.2	514.7	39.8	356.6	7.3
296	517.8	39.4	354.5	7.2	514.7	39.8	356.6	7.3
297	517.8	39.4	354.5	7.2	514.7	39.8	356.6	7.3
298	529.0	38.5	345.0	7.2	526.0	39.0	347.2	7.2
299	529.0	38.5	345.0	7.2	526.0	39.0	347.2	7.2
300	529.0	38.5	345.0	7.2	526.0	39.0	347.2	7.2

*Tabela B.3 – Estudo de caso 2: Comparação de máximos valores extremos do fator de utilização (DNV-2001) dos estados de mar de curto prazo na TDZ (FEM vs. Semi-analítico).*

Caso	VMP		Caso	VMP		Caso	VMP	
	FEM	Semi-analítico		FEM	Semi-analítico		FEM	Semi-analítico
1	0.13	0.14	45	0.13	0.14	89	0.14	0.14
2	0.13	0.14	46	0.13	0.14	90	0.14	0.14
3	0.13	0.14	47	0.13	0.14	91	0.14	0.14
4	0.13	0.14	48	0.13	0.14	92	0.14	0.14
5	0.13	0.14	49	0.13	0.14	93	0.14	0.14
6	0.13	0.14	50	0.13	0.14	94	0.14	0.14
7	0.13	0.14	51	0.13	0.14	95	0.14	0.14
8	0.13	0.14	52	0.13	0.14	96	0.14	0.14
9	0.13	0.14	53	0.13	0.14	97	0.14	0.14
10	0.13	0.14	54	0.13	0.14	98	0.14	0.14
11	0.13	0.14	55	0.13	0.14	99	0.14	0.14
12	0.13	0.14	56	0.13	0.14	100	0.14	0.14
13	0.13	0.14	57	0.13	0.14	101	0.14	0.14
14	0.13	0.14	58	0.13	0.14	102	0.14	0.14
15	0.13	0.14	59	0.13	0.14	103	0.14	0.14
16	0.13	0.14	60	0.13	0.14	104	0.14	0.14
17	0.13	0.14	61	0.13	0.14	105	0.14	0.14
18	0.13	0.14	62	0.13	0.14	106	0.14	0.14
19	0.13	0.14	63	0.13	0.14	107	0.14	0.14
20	0.13	0.14	64	0.13	0.14	108	0.14	0.14
21	0.13	0.14	65	0.13	0.14	109	0.14	0.14
22	0.13	0.14	66	0.13	0.14	110	0.14	0.14
23	0.13	0.14	67	0.13	0.14	111	0.14	0.14
24	0.13	0.14	68	0.13	0.14	112	0.15	0.14
25	0.13	0.14	69	0.13	0.14	113	0.15	0.14
26	0.13	0.14	70	0.13	0.14	114	0.15	0.14
27	0.13	0.14	71	0.13	0.14	115	0.15	0.14
28	0.13	0.14	72	0.13	0.14	116	0.14	0.14
29	0.13	0.14	73	0.13	0.14	117	0.14	0.14
30	0.13	0.14	74	0.13	0.14	118	0.14	0.14
31	0.13	0.14	75	0.13	0.14	119	0.14	0.14
32	0.13	0.14	76	0.13	0.14	120	0.14	0.14
33	0.13	0.14	77	0.13	0.14	121	0.14	0.14
34	0.13	0.14	78	0.13	0.14	122	0.14	0.14
35	0.13	0.14	79	0.13	0.14	123	0.14	0.14
36	0.13	0.14	80	0.13	0.14	124	0.14	0.14
37	0.13	0.14	81	0.14	0.14	125	0.14	0.14
38	0.13	0.14	82	0.14	0.14	126	0.14	0.14
39	0.13	0.14	83	0.14	0.14	127	0.14	0.14
40	0.13	0.14	84	0.14	0.14	128	0.14	0.14
41	0.13	0.14	85	0.14	0.14	129	0.14	0.14
42	0.13	0.14	86	0.14	0.14	130	0.14	0.14
43	0.13	0.14	87	0.14	0.14	131	0.14	0.14
44	0.13	0.14	88	0.14	0.14	132	0.14	0.13

*Tabela B.3 – Estudo de caso 2: Comparação de máximos valores extremos do fator de utilização(DNV-2001) dos estados de mar de curto prazo na TDZ, continuação.*

Caso	VMP		Caso	VMP		Caso	VMP	
	FEM	Semi-analítico		FEM	Semi-analítico		FEM	Semi-analítico
133	0.14	0.13	177	0.14	0.14	221	0.16	0.17
134	0.14	0.14	178	0.15	0.14	222	0.16	0.17
135	0.14	0.14	179	0.15	0.14	223	0.16	0.17
136	0.14	0.14	180	0.15	0.15	224	0.16	0.17
137	0.15	0.14	181	0.16	0.15	225	0.16	0.17
138	0.15	0.14	182	0.15	0.15	226	0.17	0.17
139	0.15	0.14	183	0.15	0.15	227	0.17	0.17
140	0.15	0.15	184	0.15	0.16	228	0.17	0.17
141	0.15	0.15	185	0.15	0.16	229	0.18	0.17
142	0.15	0.15	186	0.15	0.16	230	0.18	0.17
143	0.15	0.15	187	0.15	0.16	231	0.19	0.17
144	0.15	0.15	188	0.15	0.16	232	0.19	0.17
145	0.15	0.15	189	0.15	0.16	233	0.19	0.17
146	0.15	0.15	190	0.16	0.15	234	0.19	0.17
147	0.15	0.15	191	0.15	0.15	235	0.19	0.17
148	0.15	0.15	192	0.16	0.15	236	0.19	0.17
149	0.15	0.15	193	0.16	0.15	237	0.15	0.15
150	0.15	0.15	194	0.16	0.15	238	0.16	0.16
151	0.15	0.15	195	0.16	0.15	239	0.16	0.17
152	0.15	0.15	196	0.16	0.15	240	0.16	0.18
153	0.15	0.15	197	0.16	0.15	241	0.19	0.19
154	0.15	0.15	198	0.17	0.16	242	0.18	0.20
155	0.15	0.15	199	0.17	0.16	243	0.17	0.20
156	0.15	0.15	200	0.17	0.16	244	0.17	0.21
157	0.15	0.15	201	0.17	0.16	245	0.17	0.21
158	0.15	0.15	202	0.17	0.16	246	0.17	0.20
159	0.15	0.15	203	0.17	0.16	247	0.17	0.19
160	0.15	0.15	204	0.17	0.16	248	0.18	0.19
161	0.15	0.15	205	0.17	0.16	249	0.19	0.19
162	0.15	0.15	206	0.17	0.15	250	0.21	0.19
163	0.15	0.15	207	0.17	0.15	251	0.19	0.19
164	0.15	0.15	208	0.16	0.15	252	0.19	0.19
165	0.15	0.15	209	0.16	0.15	253	0.19	0.19
166	0.15	0.15	210	0.14	0.14	254	0.20	0.19
167	0.15	0.15	211	0.15	0.14	255	0.21	0.20
168	0.15	0.14	212	0.15	0.15	256	0.22	0.20
169	0.15	0.14	213	0.15	0.15	257	0.23	0.20
170	0.15	0.14	214	0.15	0.16	258	0.24	0.20
171	0.15	0.14	215	0.16	0.16	259	0.17	0.25
172	0.15	0.14	216	0.16	0.17	260	0.17	0.26
173	0.15	0.14	217	0.16	0.17	261	0.18	0.26
174	0.15	0.14	218	0.16	0.17	262	0.18	0.25
175	0.14	0.13	219	0.16	0.18	263	0.18	0.23
176	0.14	0.13	220	0.16	0.18	264	0.18	0.23

*Tabela B.3 – Estudo de caso 2: Comparação de máximos valores extremos do fator de utilização(DNV-2001) dos estados de mar de curto prazo na TDZ, continuação.*

Caso	VMP		Caso	VMP		Caso	VMP	
	<i>FEM</i>	<i>Semi-analítico</i>		<i>FEM</i>	<i>Semi-analítico</i>		<i>FEM</i>	<i>Semi-analítico</i>
265	0.19	0.22	277	0.23	0.29	289	0.63	0.63
266	0.19	0.22	278	0.25	0.29	290	0.67	0.64
267	0.20	0.22	279	0.27	0.30	291	0.67	0.64
268	0.21	0.22	280	0.30	0.31	292	0.66	0.61
269	0.22	0.23	281	0.34	0.32	293	1.11	0.84
270	0.24	0.23	282	0.38	0.34	294	1.12	0.84
271	0.26	0.24	283	0.42	0.36	295	1.09	0.86
272	0.29	0.25	284	0.44	0.36	296	1.03	0.88
273	0.30	0.25	285	0.34	0.46	297	0.97	0.89
274	0.20	0.29	286	0.40	0.49	298	1.44	1.12
275	0.21	0.29	287	0.48	0.54	299	1.34	1.09
276	0.21	0.29	288	0.56	0.59	300	1.25	1.10

**ANEXO C**  
**RESULTADOS DE CURTO PRAZO (ESTUDO DE CASO 3)**

*Tabela C.1 – Estudo de caso 3: Comparação de trações e momentos fletores estáticas no TDP, posição do TDP e comprimento de flexão “ $\lambda$ ” (FEM vs. Semi-analítico).*

Caso	FEM				Semi-analítico			
	$Fx_0$ (kN)	$My_0$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)	$Fx_0$ (kN)	$My_0$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)
1	634.6	33.4	2029.0	5.2	637.4	33.4	2028.4	5.2
2	634.6	33.4	2029.0	5.2	637.4	33.4	2028.4	5.2
3	634.6	33.4	2029.0	5.2	637.4	33.4	2028.4	5.2
4	634.6	33.4	2029.0	5.2	637.4	33.4	2028.4	5.2
5	634.6	33.4	2029.0	5.2	637.4	33.4	2028.4	5.2
6	634.6	33.4	2029.0	5.2	637.4	33.4	2028.4	5.2
7	634.6	33.4	2029.0	5.2	637.4	33.4	2028.4	5.2
8	634.6	33.4	2029.0	5.2	637.4	33.4	2028.4	5.2
9	634.6	33.4	2029.0	5.2	637.4	33.4	2028.4	5.2
10	634.6	33.4	2029.0	5.2	637.4	33.4	2028.4	5.2
11	615.0	34.5	2043.0	5.3	617.7	34.5	2041.9	5.3
12	615.0	34.5	2043.0	5.3	617.7	34.5	2041.9	5.3
13	615.0	34.5	2043.0	5.3	617.7	34.5	2041.9	5.3
14	615.0	34.5	2043.0	5.3	617.7	34.5	2041.9	5.3
15	615.0	34.5	2043.0	5.3	617.7	34.5	2041.9	5.3
16	615.0	34.5	2043.0	5.3	617.7	34.5	2041.9	5.3
17	615.0	34.5	2043.0	5.3	617.7	34.5	2041.9	5.3
18	615.0	34.5	2043.0	5.3	617.7	34.5	2041.9	5.3
19	615.0	34.5	2043.0	5.3	617.7	34.5	2041.9	5.3
20	615.0	34.5	2043.0	5.3	617.7	34.5	2041.9	5.3
21	594.8	35.6	2056.0	5.4	598.4	35.6	2055.2	5.4
22	594.8	35.6	2056.0	5.4	598.4	35.6	2055.2	5.4
23	594.8	35.6	2056.0	5.4	598.4	35.6	2055.2	5.4
24	594.8	35.6	2056.0	5.4	598.4	35.6	2055.2	5.4
25	594.8	35.6	2056.0	5.4	598.4	35.6	2055.2	5.4
26	594.8	35.6	2056.0	5.4	598.4	35.6	2055.2	5.4
27	594.8	35.6	2056.0	5.4	598.4	35.6	2055.2	5.4
28	594.8	35.6	2056.0	5.4	598.4	35.6	2055.2	5.4
29	594.8	35.6	2056.0	5.4	598.4	35.6	2055.2	5.4
30	594.8	35.6	2056.0	5.4	598.4	35.6	2055.2	5.4
31	577.2	36.7	2069.0	5.5	579.7	36.8	2068.1	5.5
32	577.2	36.7	2069.0	5.5	579.7	36.8	2068.1	5.5
33	577.2	36.7	2069.0	5.5	579.7	36.8	2068.1	5.5
34	577.2	36.7	2069.0	5.5	579.7	36.8	2068.1	5.5
35	577.2	36.7	2069.0	5.5	579.7	36.8	2068.1	5.5
36	577.2	36.7	2069.0	5.5	579.7	36.8	2068.1	5.5
37	577.2	36.7	2069.0	5.5	579.7	36.8	2068.1	5.5
38	577.2	36.7	2069.0	5.5	579.7	36.8	2068.1	5.5
39	577.2	36.7	2069.0	5.5	579.7	36.8	2068.1	5.5
40	558.9	37.9	2081.7	5.6	561.4	38.0	2080.8	5.6
41	558.9	37.9	2081.7	5.6	561.4	38.0	2080.8	5.6
42	558.9	37.9	2081.7	5.6	561.4	38.0	2080.8	5.6
43	558.9	37.9	2081.7	5.6	561.4	38.0	2080.8	5.6
44	558.9	37.9	2081.7	5.6	561.4	38.0	2080.8	5.6



Tabela C.1 – Estudo de caso 3: Comparação de trações e momentos fletores estáticas no TDP, posição do TDP e comprimento de flexão “ $\lambda$ ” (FEM vs. Semi-analítico), continuação.

Caso	FEM				Semi-analítico			
	$F_{x_0}$ (kN)	$M_{y_0}$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)	$F_{x_0}$ (kN)	$M_{y_0}$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)
45	558.9	37.9	2081.7	5.6	561.4	38.0	2080.8	5.6
46	558.9	37.9	2081.7	5.6	561.4	38.0	2080.8	5.6
47	558.9	37.9	2081.7	5.6	561.4	38.0	2080.8	5.6
48	558.9	37.9	2081.7	5.6	561.4	38.0	2080.8	5.6
49	541.1	39.1	2094.2	5.7	543.5	39.2	2093.3	5.7
50	541.1	39.1	2094.2	5.7	543.5	39.2	2093.3	5.7
51	541.1	39.1	2094.2	5.7	543.5	39.2	2093.3	5.7
52	541.1	39.1	2094.2	5.7	543.5	39.2	2093.3	5.7
53	541.1	39.1	2094.2	5.7	543.5	39.2	2093.3	5.7
54	541.1	39.1	2094.2	5.7	543.5	39.2	2093.3	5.7
55	541.1	39.1	2094.2	5.7	543.5	39.2	2093.3	5.7
56	541.1	39.1	2094.2	5.7	543.5	39.2	2093.3	5.7
57	541.1	39.1	2094.2	5.7	543.5	39.2	2093.3	5.7
58	523.7	40.4	2106.0	5.8	526.0	40.5	2105.5	5.8
59	523.7	40.4	2106.0	5.8	526.0	40.5	2105.5	5.8
60	523.7	40.4	2106.0	5.8	526.0	40.5	2105.5	5.8
61	523.7	40.4	2106.0	5.8	526.0	40.5	2105.5	5.8
62	523.7	40.4	2106.0	5.8	526.0	40.5	2105.5	5.8
63	523.7	40.4	2106.0	5.8	526.0	40.5	2105.5	5.8
64	523.7	40.4	2106.0	5.8	526.0	40.5	2105.5	5.8
65	523.7	40.4	2106.0	5.8	526.0	40.5	2105.5	5.8
66	523.7	40.4	2106.0	5.8	526.0	40.5	2105.5	5.8
67	506.8	41.7	2118.0	5.9	509.0	41.9	2117.4	5.9
68	506.8	41.7	2118.0	5.9	509.0	41.9	2117.4	5.9
69	506.8	41.7	2118.0	5.9	509.0	41.9	2117.4	5.9
70	506.8	41.7	2118.0	5.9	509.0	41.9	2117.4	5.9
71	506.8	41.7	2118.0	5.9	509.0	41.9	2117.4	5.9
72	506.8	41.7	2118.0	5.9	509.0	41.9	2117.4	5.9
73	506.8	41.7	2118.0	5.9	509.0	41.9	2117.4	5.9
74	506.8	41.7	2118.0	5.9	509.0	41.9	2117.4	5.9
75	506.8	41.7	2118.0	5.9	509.0	41.9	2117.4	5.9
76	506.8	41.7	2118.0	5.9	509.0	41.9	2117.4	5.9
77	490.3	43.1	2129.7	6.0	492.3	43.3	2129.1	6.0
78	490.3	43.1	2129.7	6.0	492.3	43.3	2129.1	6.0
79	490.3	43.1	2129.7	6.0	492.3	43.3	2129.1	6.0
80	490.3	43.1	2129.7	6.0	492.3	43.3	2129.1	6.0
81	490.3	43.1	2129.7	6.0	492.3	43.3	2129.1	6.0
82	490.3	43.1	2129.7	6.0	492.3	43.3	2129.1	6.0
83	490.3	43.1	2129.7	6.0	492.3	43.3	2129.1	6.0
84	490.3	43.1	2129.7	6.0	492.3	43.3	2129.1	6.0
85	490.3	43.1	2129.7	6.0	492.3	43.3	2129.1	6.0
86	490.3	43.1	2129.7	6.0	492.3	43.3	2129.1	6.0
87	474.2	44.5	2141.2	6.1	476.1	44.8	2140.6	6.1
88	474.2	44.5	2141.2	6.1	476.1	44.8	2140.6	6.1

Tabela C.1 – Estudo de caso 3: Comparação de trações e momentos fletores estáticas no TDP, posição do TDP e comprimento de flexão “ $\lambda$ ” (FEM vs. Semi-analítico), continuação.

Caso	FEM				Semi-analítico			
	$F_{x_0}$ (kN)	$M_{y_0}$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)	$F_{x_0}$ (kN)	$M_{y_0}$ (kN*m)	TDP (m)	$\lambda$ (m)
89	474.2	44.5	2141.2	6.1	476.1	44.8	2140.6	6.1
90	474.2	44.5	2141.2	6.1	476.1	44.8	2140.6	6.1
91	474.2	44.5	2141.2	6.1	476.1	44.8	2140.6	6.1
92	474.2	44.5	2141.2	6.1	476.1	44.8	2140.6	6.1
93	474.2	44.5	2141.2	6.1	476.1	44.8	2140.6	6.1
94	474.2	44.5	2141.2	6.1	476.1	44.8	2140.6	6.1
95	474.2	44.5	2141.2	6.1	476.1	44.8	2140.6	6.1
96	458.4	46.0	2152.4	6.2	460.3	46.3	2151.9	6.2
97	458.4	46.0	2152.4	6.2	460.3	46.3	2151.9	6.2
98	458.4	46.0	2152.4	6.2	460.3	46.3	2151.9	6.2
99	458.4	46.0	2152.4	6.2	460.3	46.3	2151.9	6.2
100	458.4	46.0	2152.4	6.2	460.3	46.3	2151.9	6.2
101	458.4	46.0	2152.4	6.2	460.3	46.3	2151.9	6.2
102	458.4	46.0	2152.4	6.2	460.3	46.3	2151.9	6.2
103	458.4	46.0	2152.4	6.2	460.3	46.3	2151.9	6.2
104	444.6	47.6	2163.0	6.3	444.8	47.9	2162.9	6.3
105	444.6	47.6	2163.0	6.3	444.8	47.9	2162.9	6.3
106	444.6	47.6	2163.0	6.3	444.8	47.9	2162.9	6.3
107	444.6	47.6	2163.0	6.3	444.8	47.9	2162.9	6.3
108	444.6	47.6	2163.0	6.3	444.8	47.9	2162.9	6.3
109	444.6	47.6	2163.0	6.3	444.8	47.9	2162.9	6.3
110	444.6	47.6	2163.0	6.3	444.8	47.9	2162.9	6.3
111	428.0	49.2	2174.0	6.4	429.7	49.6	2173.7	6.4
112	428.0	49.2	2174.0	6.4	429.7	49.6	2173.7	6.4
113	428.0	49.2	2174.0	6.4	429.7	49.6	2173.7	6.4
114	428.0	49.2	2174.0	6.4	429.7	49.6	2173.7	6.4
115	428.0	49.2	2174.0	6.4	429.7	49.6	2173.7	6.4
116	428.0	49.2	2174.0	6.4	429.7	49.6	2173.7	6.4
117	428.0	49.2	2174.0	6.4	429.7	49.6	2173.7	6.4
118	413.6	50.9	2184.0	6.5	414.9	51.4	2184.2	6.5
119	413.6	50.9	2184.0	6.5	414.9	51.4	2184.2	6.5
120	413.6	50.9	2184.0	6.5	414.9	51.4	2184.2	6.5
121	413.6	50.9	2184.0	6.5	414.9	51.4	2184.2	6.5
122	413.6	50.9	2184.0	6.5	414.9	51.4	2184.2	6.5
123	413.6	50.9	2184.0	6.5	414.9	51.4	2184.2	6.5
124	399.1	52.7	2194.7	6.6	400.5	53.2	2194.6	6.6
125	399.1	52.7	2194.7	6.6	400.5	53.2	2194.6	6.6
126	399.1	52.7	2194.7	6.6	400.5	53.2	2194.6	6.6
127	399.1	52.7	2194.7	6.6	400.5	53.2	2194.6	6.6
128	399.1	52.7	2194.7	6.6	400.5	53.2	2194.6	6.6
129	386.5	54.6	2205.0	6.7	386.5	55.2	2204.7	6.7
130	385.0	54.6	2205.0	6.7	386.5	55.2	2204.7	6.7
131	385.0	54.6	2205.0	6.7	386.5	55.2	2204.7	6.7
132	378.5	55.5	2209.4	6.8	379.6	56.2	2209.7	6.8

*Tabela C.2 – Estudo de caso 3: Comparação de máximos valores extremos do fator de utilização(DNV-2001) dos estados de mar de curto prazo na TDZ (FEM vs. Semi-analítico).*

Caso	VMP		Caso	VMP		Caso	VMP	
	FEM	Semi-analítico		FEM	Semi-analítico		FEM	Semi-analítico
1	0.21	0.22	45	0.22	0.23	89	0.25	0.25
2	0.21	0.22	46	0.22	0.23	90	0.25	0.25
3	0.21	0.22	47	0.22	0.23	91	0.26	0.25
4	0.21	0.22	48	0.22	0.23	92	0.26	0.25
5	0.21	0.22	49	0.22	0.23	93	0.26	0.26
6	0.21	0.22	50	0.22	0.23	94	0.27	0.26
7	0.21	0.22	51	0.22	0.23	95	0.27	0.27
8	0.21	0.22	52	0.22	0.23	96	0.26	0.25
9	0.21	0.22	53	0.22	0.23	97	0.26	0.25
10	0.21	0.22	54	0.22	0.23	98	0.27	0.26
11	0.21	0.22	55	0.23	0.23	99	0.27	0.26
12	0.21	0.22	56	0.23	0.23	100	0.28	0.26
13	0.21	0.22	57	0.23	0.23	101	0.29	0.27
14	0.21	0.22	58	0.23	0.23	102	0.29	0.28
15	0.21	0.22	59	0.23	0.23	103	0.30	0.29
16	0.21	0.22	60	0.23	0.23	104	0.28	0.27
17	0.21	0.22	61	0.23	0.23	105	0.28	0.27
18	0.21	0.22	62	0.23	0.23	106	0.29	0.27
19	0.21	0.22	63	0.23	0.23	107	0.30	0.29
20	0.21	0.22	64	0.23	0.23	108	0.30	0.29
21	0.21	0.22	65	0.23	0.23	109	0.33	0.30
22	0.21	0.22	66	0.23	0.24	110	0.33	0.30
23	0.21	0.22	67	0.23	0.24	111	0.31	0.29
24	0.21	0.22	68	0.23	0.24	112	0.32	0.30
25	0.21	0.22	69	0.23	0.24	113	0.33	0.31
26	0.21	0.22	70	0.23	0.24	114	0.36	0.33
27	0.21	0.22	71	0.23	0.24	115	0.35	0.32
28	0.21	0.22	72	0.24	0.24	116	0.37	0.33
29	0.21	0.22	73	0.24	0.24	117	0.41	0.37
30	0.21	0.22	74	0.24	0.24	118	0.36	0.34
31	0.22	0.22	75	0.24	0.24	119	0.39	0.35
32	0.22	0.22	76	0.24	0.24	120	0.40	0.36
33	0.22	0.22	77	0.24	0.24	121	0.41	0.36
34	0.22	0.22	78	0.24	0.24	122	0.45	0.44
35	0.22	0.22	79	0.24	0.24	123	0.49	0.49
36	0.22	0.22	80	0.24	0.24	124	0.47	0.41
37	0.22	0.22	81	0.24	0.24	125	0.48	0.42
38	0.22	0.22	82	0.24	0.24	126	0.53	0.57
39	0.22	0.22	83	0.25	0.25	127	0.58	0.67
40	0.22	0.23	84	0.25	0.25	128	0.64	0.75
41	0.22	0.23	85	0.25	0.25	129	0.67	0.82
42	0.22	0.23	86	0.26	0.25	130	0.76	0.91
43	0.22	0.23	87	0.24	0.25	131	0.74	1.03
44	0.22	0.23	88	0.24	0.25	132	0.97	0.96