



## ANÁLISE ESTOCÁSTICA DOS TENDÕES DE UMA TLP

Jane Vieira Volotão Fernandes

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

Orientadores: Luis Volnei Sudati Sagrilo

Paulo Mauricio Videiro

Rio de Janeiro  
Setembro de 2011

ANÁLISE ESTOCÁSTICA DOS TENDÕES DE UMA TLP

Jane Vieira Volotão Fernandes

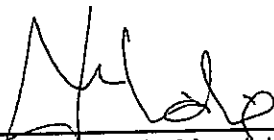
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:



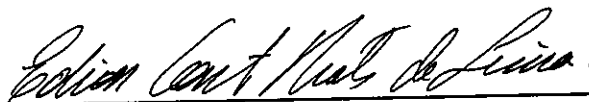
---

Prof. Luis Volnei Sudati Sagrilo, D.Sc.



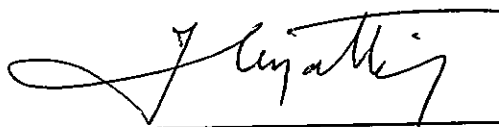
---

Eng. Paulo Mauricio Videiro, D.Sc.



---

Prof. Edison Castro Prates de Lima, D.Sc.



---

Eng. Isaias Quaresma Masetti, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2011

Fernandes, Jane Vieira Volotão

Análise estocástica dos tendões de uma TLP. / Jane Vieira Volotão Fernandes. – Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE, 2011.

XV, 83 p.:il; 29,7 cm.

Orientador(es): Luis Volnei Sudati Sagrilo

Paulo Mauricio Videiro

Dissertação (Mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 82-83.

1. Plataformas de Pernas Atirantadas. 2. Tendões. 3. Critérios de Projeto. 4. Análise Estocástica. I. Sagrilo, Luis Volnei Sudati. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

## AGRADECIMENTOS

Devemos reconhecer que nenhuma conquista é obtida quando estamos sozinhos. Na reta final desta caminhada, gostaria de agradecer às pessoas que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

Primeiramente agradeço a Deus, por tudo.

Ao meu orientador, Professor Sagrilo, pela sua dedicação ao desenvolvimento deste trabalho, pela paciência de me orientar desde o primeiro período do curso.

Ao meu orientador Paulo Mauricio, pela idéia deste trabalho e por todas as valiosas contribuições durante a pesquisa.

Ao meu marido Leonardo, que me incentivou em cada passo desta caminhada.

Aos meus pais, Elena e Alcino e ao meu irmão Sérgio.

A Denis Alvin Liang por ceder o modelo numérico utilizado neste trabalho, e por todo auxílio com o programa SITUA/PROSIM.

A toda minha família, em especial Telma Abreu Vieira, Wilson Cesar Coelho, Raquel Barbosa Fernandes, Sérgio Leonardo Fernandes e Ivanilda Cabral Barbosa.

À minha família de coração Izabel Cristina Cunha da Costa Silva, Rebecca Charlotte da Costa Silva e Luiz Antonio da Costa Silva.

Aos amigos Luciana de Sá Marques, Graciane Silva, Flávia Elisabeth Cardoso Pires, Roberto Possolo Jermann, Fernando Antonio Pontes, Antonio Gonçalves de Vasconcelos Neto, Dilnei Schmidt, Diego Foppa, Alessandra Guerghe de Carvalho e Diogo do Amaral Macedo Amante.

A Elisabeth de Campos Porto e Roberto Najar Bazolli por todo incentivo dado ao meu curso de mestrado.

Aos colegas de turma Andréa Sampaio Pitta, Pablo César Lazzaroni Garat e José Renato Bravo e a todos os professores do curso.

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

## ANÁLISE ESTOCÁSTICA DOS TENDÕES DE UMA TLP

Jane Vieira Volotão Fernandes

Setembro/2011

Orientadores: Luis Volnei Sudati Sagrilo

Paulo Mauricio Videiro

Programa: Engenharia Civil

A resposta da estrutura sob ação de carregamentos ambientais é o resultado final de um projeto estrutural de uma estrutura oceânica. Para um sistema de ancoragem, a resposta extrema pode ser determinada através de algumas metodologias. Estas metodologias diferem quanto ao grau de simplificação e ao grau de incerteza na estimativa. O método mais exato deles, a análise estocástica de longo prazo, não é comumente utilizado em projetos, devido a seu custo computacional e complexidade. Neste trabalho é descrita uma metodologia para determinação de resposta extrema em estruturas oceânicas, através de uma análise estocástica de longo prazo. O caso particular da tensão de Von Mises nos tendões de uma plataforma de pernas atirantadas (TLP) é estudado, sendo a tensão extrema determinada através da metodologia descrita comparada com a tensão determinada através de outras metodologias, a saber: onda de projeto regular determinística, onda de projeto irregular (análise de curto prazo) e contorno ambiental. O objetivo final é comparar o resultado obtido pela análise de longo prazo estocástica com as metodologias utilizadas em um projeto na prática, tanto as utilizadas atualmente quanto às que eram utilizadas no passado.

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

## STOCHASTIC ANALYSIS OF TLP TENDONS

Jane Vieira Volotão Fernandes

September/2011

Advisors: Luis Volnei Sudati Sagrilo

Paulo Mauricio Videiro

Department: Civil Engineering

The response of the structure under the action of environmental loads is the final result of a structural design of an ocean structure. For an anchoring system, the extreme response can be determined by some methodologies. These methodologies differ in the degree of simplification and the degree of uncertainty in the estimate. The most accurate of them, the long-term stochastic analysis, is not commonly used in projects, due to its computational cost and complexity. In this work it is described a methodology for determining an extreme response in oceanic structures, through a long-term stochastic analysis. The particular case of Von Mises stress in the tendons of a Tension Leg Platform (TLP) is studied, and the extreme tension determined by the described methodology compared to the stress determined by other methods, namely, regular deterministic design wave, irregular wave project (short-term analysis) and environmental contour. The final goal is to compare the results obtained by long-term stochastic analysis with the methodologies used in a project in practice, both those currently in use and those which were used in the past.

# SUMÁRIO

1.	Introdução.....	1
1.1.	Contexto e Motivação.....	1
1.2.	Objetivo.....	2
1.3.	Organização da Dissertação .....	3
2.	Determinação de Resposta Extrema em Projetos de Estruturas Oceânicas.....	4
2.1.	Análise Dinâmica.....	4
2.2.	Parâmetros ambientais para projeto e análise de estruturas oceânicas.....	5
2.2.1.	Conceitos básicos de processos aleatórios .....	6
2.2.1.1.	Espectro e Distribuições de Probabilidades de Processos Aleatórios.....	8
2.2.2.	Ondas.....	11
2.2.3.	Vento.....	16
2.2.4.	Corrente.....	18
2.3.	Metodologias de Projeto e Análise de Estruturas Oceânicas.....	19
2.3.1.	Onda de projeto determinística centenária.....	20
2.3.2.	Onda irregular ou tempestade de projeto centenária (análise de curto prazo) .....	21
2.3.3.	Contorno ambiental extremo (contorno centenário) .....	24
2.3.4.	Análise de longo prazo da resposta.....	30
3.	Estudo de Caso: Tensão de Von Mises Extrema nos Tendões de uma TLP.....	38
3.1.	Descrição do modelo.....	38
3.1.1.	Tensão combinada de Von Mises.....	43
3.2.	Resultados obtidos.....	44
3.2.1.	Metodologia da Onda de Projeto Determinística Centenária.....	45
3.2.2.	Metodologia Onda Irregular (Tempestade de Projeto) Centenária.....	45

3.2.2.1.	Estado de Mar Centenário.....	45
3.2.2.2.	Contorno ambiental centenário.....	46
3.2.3.	Análise pela Metodologia da Análise de Longo Prazo da Resposta.....	59
3.2.3.1.	Descrição dos procedimentos de interpolação utilizados.....	59
3.2.3.2.	Resultados obtidos.....	61
3.2.4.	Comparação dos Resultados das Metodologias.....	76
4.	Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros.....	79
4.1 .	Conclusões.....	79
4.2 .	Sugestões para futuros trabalhos.....	80
5.	Referências Bibliográficas.....	82

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1: Vista geral de uma TLP.....	2
Figura 2. 1: Parâmetros ambientais para projeto de estrutura oceânica.....	6
Figura 2. 2: Várias realizações de um processo estocástico.....	7
Figura 2. 3: Função densidade espectral de um processo aleatório.....	9
Figura 2. 4: Principais distribuições de probabilidades associadas a um processo aleatório.....	10
Figura 2. 5: Direção de incidência das ondas.....	13
Figura 2. 6: Função densidade de probabilidade de $H_s$ .....	15
Figura 2. 7: Função densidade de probabilidade de $T_p$ .....	16
Figura 2. 8: Definição da velocidade do vento ( $V_v$ ) a partir da altura significativa de onda ( $H_s$ ).....	17
Figura 2. 9: Perfil triangular de corrente.....	19
Figura 2. 10: Papel de Weibull.....	23
Figura 2. 11: Definição do espaço normal padrão (BAARHOLM <i>et al.</i> , 2010).....	26
Figura 2. 12: Transformação do espaço normal padrão para o espaço físico $H_s \times T_p$ (BAARHOLM <i>et al.</i> , 2010).....	27
Figura 2. 13: Contorno ambiental correspondente ao período de retorno de 100 anos no espaço original.....	28
Figura 2. 14: Contorno ambiental correspondente ao período de retorno de 100 anos no espaço original com 19 pontos discretos.....	28
Figura 2. 15: Contorno ambiental correspondente ao período de retorno de 100 anos no espaço normal padrão com 19 pontos discretos.....	29
Figura 2. 16: Discretização dos estados de mar (VIDEIRO, 1998).....	32
Figura 2. 17: Malha $H_s$ - $T_p$ para as análises de curto prazo realizadas inicialmente para estimativa de longo prazo da tensão de Von Mises nos tendões da TLP.....	32

Figura 2. 18: Malha Hs-Tp para as análises de curto prazo realizadas para estimativa de longo prazo da tensão de Von Mises nos tendões da TLP – malha 9 x 9.....	34
Figura 3. 1: Principais dimensões da TLP. Vista em Planta (LIANG,2009).....	39
Figura 3. 2: Principais dimensões da TLP. Elevação (LIANG,2009).....	40
Figura 3. 3: Malha do casco gerada pelo software SITUA (LIANG,2009).....	41
Figura 3. 4: Modelo 3D do casco gerado pelo software SITUA – Vista sólida (LIANG,2009).....	41
Figura 3. 5: Modelo estrutural acoplado para análise dinâmica da TLP (CICILIA,2004) .....	42
Figura 3. 6: Tensões principais atuantes em uma seção de um tubo metálico.....	44
Figura 3. 7: Valores da média da tensão de Von Mises (MPa) no topo do Tendão 3 nos pontos discretos Hs-Tp do contorno ambiental centenário analisados.....	55
Figura 3. 8: Valores do desvio padrão da tensão de Von Mises (MPa) no topo do Tendão 3 nos pontos discretos Hs-Tp do contorno ambiental centenário analisados .....	55
Figura 3. 9: Valores da frequência de máximos (1/s) da tensão de Von Mises no topo do Tendão 3 nos pontos discretos Hs-Tp do contorno ambiental centenário analisados .....	56
Figura 3. 10: Valores da alfa ( $\alpha$ ) da distribuição de Weibull ajustada para a tensão de Von Mises no topo do Tendão 3 nos pontos discretos Hs-Tp do contorno ambiental centenário analisados.....	56
Figura 3. 11: Valores da lambda ( $\lambda$ ) da distribuição de Weibull ajustada para a tensão de Von Mises no topo do Tendão 3 nos pontos discretos Hs-Tp do contorno ambiental centenário analisados.....	57
Figura 3. 12: Valores extremos mais prováveis (3-h) para a tensão de Von Mises no tendão mais carregado (Tendão 3) pela metodologia do contorno ambiental.....	58
Figura 3. 13: Coordenadas naturais para o elemento retangular isoparamétrico.....	59

Figura 3. 14: Valores da tensão (MPa) de Von Mises média (funcional + ambiental) do Tendão 7 nos pontos Hs-Tp da malha 5x5 na análise de longo prazo da resposta ....	62
Figura 3. 15: Valores do desvio padrão (MPa) da tensão de Von Mises do Tendão 7 nos pontos Hs-Tp da malha 5x5 na análise de longo prazo da resposta.....	62
Figura 3. 16: Valores das frequências de máximos da tensão de Von Mises do Tendão 7 nos pontos Hs-Tp da malha 5x5 na análise de longo prazo da resposta.....	63
Figura 3. 17: Valores de alfa ( $\alpha$ ) do ajuste de uma distribuição de Weibull da tensão de Von Mises do Tendão 7 nos pontos Hs-Tp da malha 5x5 na análise de longo prazo da resposta.....	63
Figura 3. 18: Valores de lambda ( $\lambda$ ) do ajuste de uma distribuição de Weibull da tensão de Von Mises do Tendão 7 nos pontos Hs-Tp da malha 5x5 na análise de longo prazo da resposta .....	64
Figura 3. 19: Valores da tensão (MPa) de Von Mises média (funcional + ambiental) do Tendão 7 nos pontos Hs-Tp da malha 9x9 na análise de longo prazo da resposta .....	65
Figura 3. 20: Valores do desvio padrão (MPa) da tensão de Von Mises do Tendão 7 nos pontos Hs-Tp da malha 9x9 na análise de longo prazo da resposta.....	66
Figura 3. 21: Valores das frequências de máximos da tensão de Von Mises do Tendão 7 nos pontos Hs-Tp da malha 9x9 na análise de longo prazo da resposta.....	66
Figura 3. 22: Valores de alfa ( $\alpha$ ) do ajuste de uma distribuição de Weibull da tensão de Von Mises do Tendão 7 nos pontos Hs-Tp da malha 9x9 na análise de longo prazo da resposta.....	67
Figura 3. 23: Valores de lambda ( $\lambda$ ) do ajuste de uma distribuição de Weibull da tensão de Von Mises do Tendão 7 nos pontos Hs-Tp da malha 9x9 na análise de longo prazo da resposta.....	67
Figura 3. 24: Análises do contorno ambiental selecionadas para comparação dos parâmetros interpolados da análise de longo prazo.....	69

Figura 3. 25: Tendão 1. Coeficientes de participação na resposta. Método da Superfície de Resposta e malha 9x9.....	71
Figura 3. 26: Tendão 2. Coeficientes de participação na resposta. Método da Superfície de Resposta e malha 9x9.....	72
Figura 3. 27: Tendão 3. Coeficientes de participação na resposta. Método da Superfície de Resposta e malha 9x9.....	72
Figura 3. 28: Tendão 4. Coeficientes de participação na resposta. Método da Superfície de Resposta e malha 9x9.....	73
Figura 3. 29: Tendão 5. Coeficientes de participação na resposta. Método da Superfície de Resposta e malha 9x9.....	73
Figura 3. 30: Tendão 6. Coeficientes de participação na resposta. Método da Superfície de Resposta e malha 9x9.....	74
Figura 3. 31: Tendão 7. Coeficientes de participação na resposta. Método da Superfície de Resposta e malha 9x9.....	75
Figura 3. 32: Tendão 8. Coeficientes de participação na resposta. Método da Superfície de Resposta e malha 9x9.....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 – Altura de onda e períodos associados da onda regular centenária.....	21
Tabela 2. 2 – Altura significativa de onda irregular centenária e períodos associados considerados nas análises.....	24
Tabela 2. 3 – Altura significativa de onda irregular centenária e períodos associados considerados nas análises.....	29
Tabela 2. 4 – Malha Hs-Tp para as análises de curto prazo realizadas inicialmente para estimativa de longo prazo da tensão de Von Mises nos tendões da TLP.....	33
Tabela 2. 5 – Malha Hs-Tp para as análises de curto prazo realizadas para estimativa de longo prazo da tensão de Von Mises nos tendões da TLP – malha 9 x 9 – Parte A .....	35
Tabela 2. 6 – Malha Hs-Tp para as análises de curto prazo realizadas para estimativa de longo prazo da tensão de Von Mises nos tendões da TLP – malha 9 x 9 – Parte B .....	36
Tabela 3. 1 – Principais dimensões da TLP .....	38
Tabela 3. 2 – Propriedades de massa da TLP.....	38
Tabela 3. 3 – Raios de giração da TLP.....	39
Tabela 3. 4 – Propriedades dos tendões.....	40
Tabela 3. 5 – Períodos e frequências naturais da TLP em estudo .....	42
Tabela 3. 6 – Tensão de Von Mises (MPa) máxima no topo do tendão para onda regular centenária.....	45
Tabela 3. 7 – Tensão de Von Mises (MPa) máxima no topo do tendão para onda irregular centenária.....	46
Tabela 3. 8 – Valores médios (funcional) da tensão de Von Mises (MPa) associados à pré-tração nos tendões.....	47

Tabela 3. 9 – Parâmetros da tensão de Von Mises obtidos nas análises de contorno ambiental - Tendão 1 .....	47
Tabela 3. 10 – Parâmetros da tensão de Von Mises (MPa) obtidos nas análises de contorno ambiental – Tendão 2.....	48
Tabela 3. 11 – Parâmetros da tensão de Von Mises (MPa) obtidos nas análises de contorno ambiental - Tendão 3.....	49
Tabela 3. 12 – Parâmetros da tensão de Von Mises (MPa) obtidos nas análises de contorno ambiental - Tendão 4.....	50
Tabela 3. 13 – Parâmetros da tensão de Von Mises (MPa) obtidos nas análises de contorno ambiental - Tendão 5.....	51
Tabela 3. 14 – Parâmetros da tensão de Von Mises (MPa) obtidos nas análises de contorno ambiental - Tendão 6 .....	52
Tabela 3. 15 – Parâmetros da tensão de Von Mises (MPa) obtidos nas análises de contorno ambiental - Tendão 7.....	53
Tabela 3. 16 – Parâmetros da tensão de Von Mises (MPa) obtidos nas análises de contorno ambiental - Tendão 8.....	54
Tabela 3. 17 – Valores extremos mais prováveis da tensão de Von Mises (MPa) no topo dos tendões pela análise do contorno ambiental centenário.....	58
Tabela 3. 18 – Tensão de Von Mises (MPa) centenária a partir da malha inicial 5x5...64	
Tabela 3. 19 – Tensão de Von Mises (MPa) centenária a partir da malha 9x9.....	68
Tabela 3. 20 –Comparação dos parâmetros interpolados para a análise de longo prazo através da interpolação linear isoparamétrica.....	69
Tabela 3. 21 –Comparação dos parâmetros interpolados para a análise de longo prazo através da superfície de resposta linear.....	70
Tabela 3. 22 – Estados de mar com maior contribuição na resposta. Método da Superfície de Resposta e malha 9 x 9.....	71

Tabela 3. 23 – Tensão de Von Mises (MPa) centenária para os tendões mais carregados. Método Superfície de Resposta e malhas 9x9 e 9 x 9 + 1 ponto de refinamento.....	76
Tabela 3. 24 – Tensão de Von Mises (MPa) extrema: Resumo de resultados do valor total (funcional + ambiental).....	77
Tabela 3. 25 – Tensão de Von Mises (MPa) extrema: Resumo de resultados da parcela ambiental.....	77

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

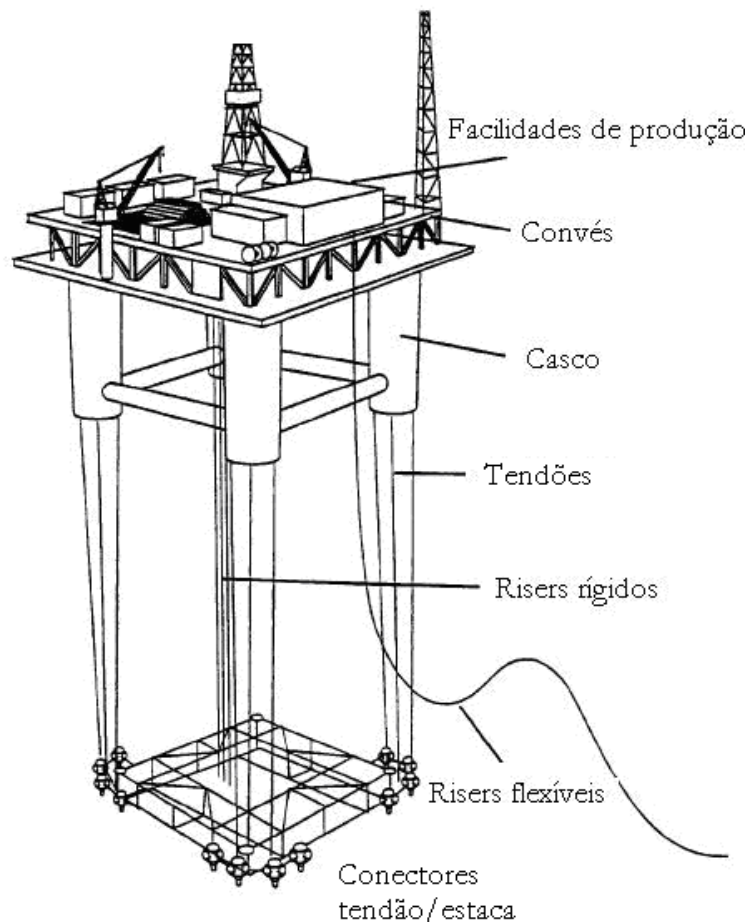
### 1.1. Contexto e Motivação

Entre as diversas alternativas para a exploração de petróleo em águas profundas, as plataformas de pernas atirantadas do tipo TLP (*Tension Leg Platform*) aparecem como uma opção estrutural viável e já vem sendo utilizadas em diversas localidades mundo afora.

Com relação aos graus de liberdade horizontais a TLP é complacente como um sistema flutuante e nos graus de liberdade verticais ela é rígida como uma plataforma fixa. Essas características possibilitam a substituição de alguns equipamentos submarinos por superficiais e a intervenção dos poços desde o convés da plataforma. No entanto, apesar da TLP apresentar vantagens técnicas e econômicas, a escolha da melhor alternativa do sistema estrutural para explorar um campo petrolífero depende de outros fatores, tais como características próprias do reservatório, lâmina d'água e condições ambientais da locação. Também são importantes os requerimentos técnicos e econômicos de cada projeto. A Figura 1.1 mostra as partes principais de uma plataforma tipo TLP.

Encontra-se em fase de construção a primeira TLWP (*Tension Leg Wellhead Platform*) para produção de petróleo na costa brasileira. A plataforma P-61 foi projetada para operar numa lâmina d'água de 1180m no campo de Papa-Terra (Bacia de Campos) ao lado do FPSO (*Floating Production Storage Offloading*) P-63. Esta plataforma terá uma capacidade de processamento de até 180 mil barris de petróleo por dia. Está sendo construída no estaleiro Brasfels, em Angra dos Reis, RJ, cumprindo exigências de conteúdo local. Os tendões, módulos de flutuação temporária e estacas estão sendo fabricados nos Estados Unidos. A previsão do primeiro óleo é para 2013.

Com o início da aplicação deste tipo de estrutura para produção de petróleo no Brasil, torna-se necessário investigar mais profundamente o comportamento e a resposta destas estruturas sob a ação de carregamentos ambientais atuantes na costa brasileira.



**Figura 1. 1: Vista geral de uma TLP**

## 1.2. Objetivo

A resposta de uma estrutura oseânica é o produto final de uma análise estrutural. A TLP é um tipo de estrutura em que o comportamento dinâmico é muito importante. Para a determinação da resposta extrema existem várias metodologias de análise. As diferenças entre estas metodologias estão no grau de simplificação e no grau de incerteza na estimativa. A metodologia mais precisa, que é a análise dinâmica estocástica de longo prazo da resposta, não é comumente utilizado em projetos devido a seu alto custo computacional e complexidade. Outras metodologias constituem-se na onda regular de projeto (análise determinística) e a tempestade de projeto (análise estocástica de curto-prazo).

Neste trabalho busca-se fazer uma comparação dos resultados de diversas metodologias para dinâmica de estruturas oceânicas na análise da resposta extrema de uma plataforma do tipo TLP. Particularmente, a tensão de Von Mises extrema em cada um dos tendões de uma TLP é analisada. Este parâmetro de resposta é

investigado através da metodologia de longo-prazo da resposta e de outras metodologias, a saber: resposta para onda de projeto regular determinística e resposta para onda de projeto irregular considerando a altura significativa extrema e o contorno ambiental extremo. O objetivo final é comparar o resultado obtido pela análise de longo prazo da resposta com as metodologias utilizadas normalmente em um projeto, tanto as mais atuais quanto às que eram utilizadas no passado.

### **1.3. Organização da Dissertação**

Essa dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos.

No presente capítulo, como motivação, foi comentado que a primeira TLP projetada para operar na costa brasileira encontra-se em fase de construção. Também foram relacionados os objetivos deste trabalho.

O Capítulo 2 descreve as metodologias de projeto utilizadas para a determinação de resposta extrema em estruturas oceânicas, citando as principais características de cada uma delas. Os dados ambientais necessários para o projeto de uma estrutura oceânica também são comentados neste capítulo. Já neste capítulo são definidas todas as condições ambientais que serão utilizadas por cada metodologia no caso prático descrito no Capítulo 3.

O Capítulo 3 apresenta a descrição do modelo de uma TLP utilizado como estudo de caso neste trabalho. Posteriormente, os resultados obtidos por cada metodologia são apresentados os procedimentos de interpolação utilizados. Ao final do capítulo apresenta-se uma comparação entre os resultados de todas as metodologias investigadas.

No Capítulo 4 são apresentadas as principais conclusões obtidas durante a realização deste estudo e são apresentadas algumas sugestões de estudos futuros.

Finalmente, o Capítulo 5 é destinado às referências bibliográficas.

# CAPÍTULO 2

## DETERMINAÇÃO DE RESPOSTA EXTREMA EM PROJETOS DE ESTRUTURAS OCEÂNICAS

### 2.1. Análise Dinâmica

Em geral, para uma estrutura flutuante uma análise dinâmica não-linear torna-se necessária quando os movimentos da mesma são tão grandes que as propriedades de rigidez do sistema devem ser atualizadas durante a análise. Estruturas deste tipo são denominadas complacentes. Para analisar a resposta dos tendões de uma TLP, objeto de estudo deste trabalho, são necessárias análises dinâmicas não-lineares no domínio do tempo. Somente no domínio do tempo é possível considerar todas as não-linearidades do sistema. Segundo CICILIA (2004), a principal fonte de não linearidade estrutural de uma TLP sob ações ambientais é a não-linearidade da rigidez geométrica dos tendões devida ao deslocamento lateral (*offset*) e vertical descendente (*setdown*) da plataforma. Além disto, outros efeitos não-lineares do carregamento hidrodinâmico também devem ser considerados na análise, tais como:

- as forças de segunda ordem das ondas (efeitos destas forças são o *slow drift* e o *springing*);
- o termo de arrasto, com variação quadrática da velocidade das partículas d'água, na equação de Morison para avaliar a parcela viscosa das forças de onda.

As análises no domínio do tempo são muito “caras” computacionalmente, pois demandam recursos computacionais avançados e tempos de simulação muito grandes. Além disso, por serem processos de natureza estocástica, o sinal produzido em cada análise não é único e o tamanho da série temporal deve ser adequado para garantir a estabilidade dos parâmetros estatísticos.

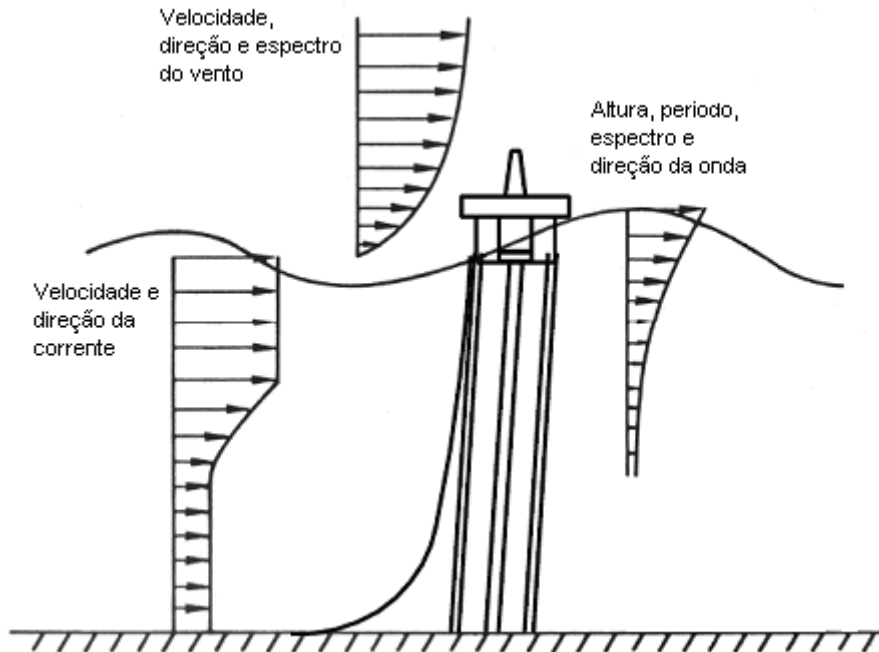
Os carregamentos considerados sobre a estrutura são provenientes da ação dinâmica simultânea de ondas, ventos e correnteza. Para efeito de simplificação neste trabalho a ação da correnteza sobre a estrutura é considerada constante no tempo, conforme será descrito na Seção 2.2.4.

Neste trabalho utilizou-se um modelo acoplado casco-linhas para a análise dinâmica dos tendões da TLP. A metodologia acoplada de análise é aquela que permite uma melhor representação do efeito da resposta dinâmica das linhas sobre o casco e vice-versa. Nesta metodologia se considera o modelo hidrodinâmico do casco da unidade flutuante acoplado ao modelo de elementos finitos das linhas de ancoragem em um mesmo modelo numérico computacional. Esta metodologia tem sido cada vez mais aplicada, em função do aumento da lâmina d'água em que se instalam unidades oceânicas para exploração e produção de petróleo. Em uma análise acoplada todos os efeitos dinâmicos não-lineares estão sendo levados em conta implicitamente, sendo calculados a cada passo de tempo.

## **2.2. Parâmetros ambientais para projeto e análise de estruturas oceânicas**

Os fenômenos ambientais mais importantes para a análise e projeto de estruturas oceânicas são as ondas, o vento e a correnteza. Para um projeto de uma estrutura oceânica são consideradas simultaneamente as ações das ondas, vento e correnteza atuando sobre o casco da plataforma e a ação da correnteza e ondas atuando sobre linhas de ancoragem e risers, conforme ilustra a Figura 2.1.

O vento, além de gerar um carregamento sobre a parte não imersa do flutuante, também atua na geração de ondas e correntes. As ondas geram carregamentos na parte imersa do flutuante e nas linhas e risers a ele conectados. As ondas podem ser geradas pelo vento (locais ou ventos constantes sobre uma longa superfície de água) ou ondas de *swell* (sistemas de ondas que se movem para longe da área onde foram geradas). As correntes geram carregamentos no casco, linhas e risers do sistema flutuante e, dependendo do caso, podem gerar as vibrações induzidas por vórtices (VIV- *vortex induced vibration*) em risers, linhas e tendões.

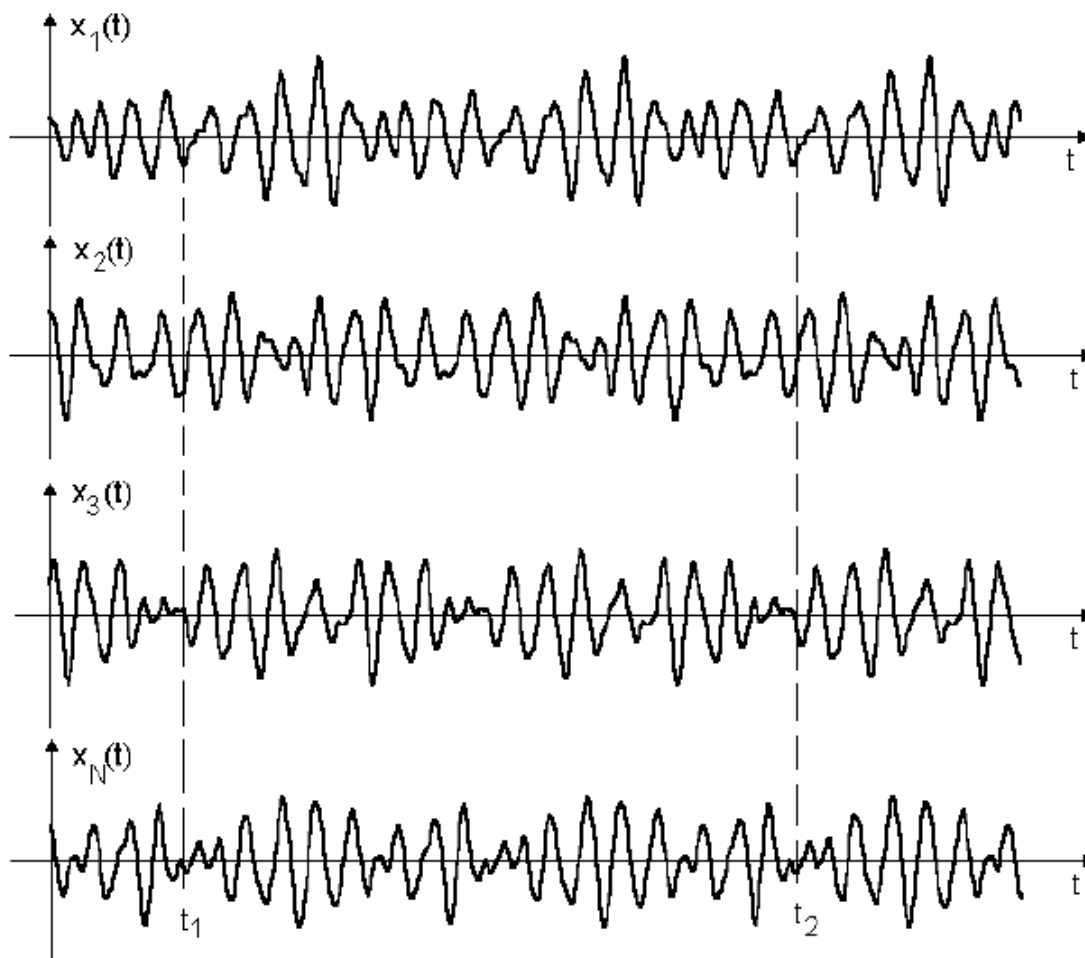


**Figura 2. 1: Parâmetros ambientais para projeto de estrutura oceânica**

A determinação correta dos carregamentos ambientais atuantes sobre uma estrutura é essencial para o correto projeto do mesmo. Em um projeto de estrutura oceânica a determinação destes carregamentos se torna mais complexa, devido à natureza aleatória das cargas ambientais (onda, vento e correnteza). Para melhor caracterizá-los é interessante inicialmente apresentar resumidamente alguns conceitos básicos de processos aleatórios.

### **2.2.1. Conceitos básicos de processos aleatórios**

As ações das ondas, o vento e a correnteza no tempo constituem-se de realizações de processos estocásticos. Por definição, um processo estocástico é constituído por um conjunto de séries temporais aleatórias, conforme pode ser visto na Figura 2.2. Cada série do conjunto representa uma realização do processo em questão (NEWLAND, 1993).



**Figura 2. 2: Várias realizações de um processo estocástico**

Um processo estocástico é dito estacionário no tempo ou simplesmente estacionário quando sua média e sua variância não variam com o tempo, i.e.,  $E[x_1(t)] = E[x_2(t)] = E[x(t)]$  e  $Var[x(t_1)] = Var[x(t_2)] = Var[x(t)]$  e sua covariância é dependente somente das translações no tempo. Se o processo estocástico é estacionário, a probabilidade de ocorrência de um evento é a mesma, para qualquer instante de tempo considerado.

Um processo estocástico estacionário é dito ergódico quando uma realização do processo é capaz de representar o conjunto de realizações do processo. Neste caso, por exemplo a média e variância de uma única realização, medidas ao longo do tempo, são iguais à média e variância do processo. Isto significa que uma única realização do processo contém as informações estatísticas do mesmo. Assim, nenhuma informação adicional é obtida ao se observar mais de uma realização do mesmo processo, em relação ao que se obtém ao observar uma única realização.

Raramente em processos físicos é possível justificar formalmente a estacionariedade e ergodicidade.

Ao longo do tempo os processos aleatórios que caracterizam os fenômenos ambientais não podem ser considerados estacionários. Eles apresentam características de estacionariedade para períodos curtos de tempo, que na prática se caracterizam por períodos usualmente de 3 horas de duração (comumente chamados “estados de mar”). Desta forma, os parâmetros ambientais são caracterizados por duas escalas de tempo: uma de curto-prazo (3 h) e outra de longo prazo (anos). No curto-prazo cada fenômeno ambiental é caracterizado por parâmetros específicos descritos mais adiante.

### **2.2.1.1. Espectro e Distribuições de Probabilidades de Processos Aleatórios**

O espectro ou função densidade espectral  $S_x(\omega)$  é a representação de um processo aleatório no domínio da frequência, conforme ilustra a Figura 2.3. Na prática esta representação pode ser obtida através da Transforma Rápida de Fourier (FFT). Os momentos de um espectro são definidos por:

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S_x(\omega) d\omega \quad (2.1)$$

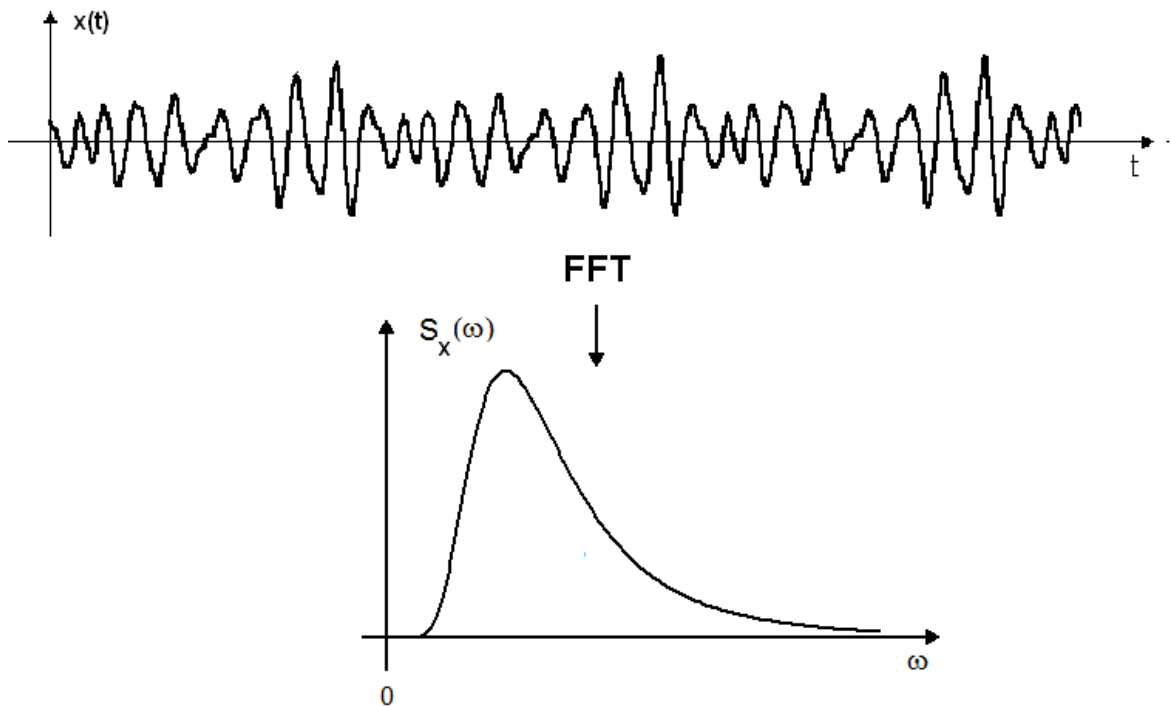
onde  $n$  é a ordem do momento. É importante observar que a área do espectro, ou momento de ordem zero  $m_0$ , corresponde exatamente a variância do processo aleatório (NEWLAND, 1993), i.e.,

$$m_0 = \int_0^{\infty} S_x(\omega) d\omega = \text{Var}[x(t)] \quad (2.2)$$

Outro parâmetro de algum interesse prático é o fator de largura de banda de um espectro, que é definido por:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{(m_2)^2}{m_2 m_4}} \quad (2.3)$$

Quando  $\varepsilon \rightarrow 0$  o espectro é dito ser de banda estreita e quando  $\varepsilon \rightarrow 1$  o espectro é chamado de espectro de banda larga.



**Figura 2. 3: Função densidade espectral de um processo aleatório**

As principais distribuições que caracterizam um processo aleatório, conforme a Figura 2.4, são: a) a do processo propriamente dito, b) a distribuição dos picos (ou máximos) e c) a distribuição do pico extremo. Um processo é chamado de Gaussiano quando a distribuição do mesmo pode ser modelada por uma distribuição de Gauss, i.e.,

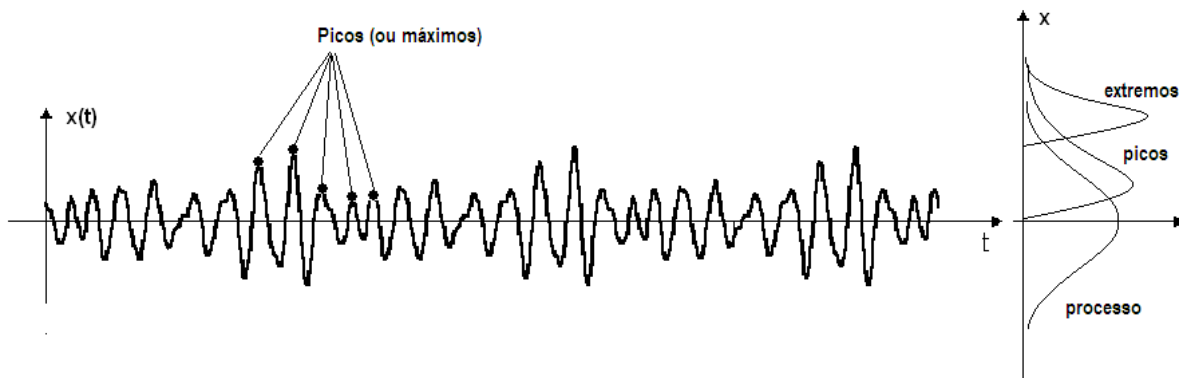
$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{m_0}} \exp\left(-\frac{x^2}{2m_0}\right) \quad (2.4)$$

onde implicitamente assume-se que a média do processo é zero.

A distribuição de picos de um processo Gaussiano é teoricamente definida pela distribuição de Rice dada por:

$$f_{X_m}(x_m) = \frac{\varepsilon}{\sqrt{m_0} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{x_m^2}{m_0 \varepsilon^2}\right) + \frac{y_m \sqrt{1-\varepsilon^2}}{m_0} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{x_m^2}{m_0}\right) \Phi\left(\frac{x_m}{\sqrt{m_0} \varepsilon} \sqrt{1-\varepsilon^2}\right) \quad (2.5)$$

onde  $\Phi(\cdot)$  corresponde a função cumulativa da distribuição de probabilidades Normal padrão.



**Figura 2. 4: Principais distribuições de probabilidades associadas a um processo aleatório**

No caso também de um processo Gaussiano a distribuição do valor extremo segue uma distribuição de Gumbel ou Tipo I dada por:

$$f_{Y_E}(x_e) = \exp(-\alpha(x_e - u) - \exp(-\alpha(x_e - u))) \quad (2.6)$$

cujos parâmetros  $\alpha$  e  $u$  (valor mais extremo mais provável) são dados por:

$$u = \sqrt{m_0} \sqrt{2 \ln(v_0 T)} \quad (2.7)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{2 \ln(v_0 T)}}{\sqrt{m_0}}$$

onde T é o tempo de referência para análise (usualmente 3-h em análises de estruturas oceânicas) e  $v_0$  é a frequência de cruzamento zero definida por:

$$v_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \quad (2.8)$$

Todos os parâmetros estatísticos de um processo aleatório podem ser matematicamente definidos a partir da sua função de densidade espectral.

### 2.2.2. Ondas

Normalmente no curto-prazo as ondas são representadas por: altura significativa de onda ( $H_s$ ), período de cruzamento zero ascendente ( $T_z$ ) e direção principal de incidência ( $\theta_w$ ). A altura significativa de onda ( $H_s$ ) é definida como a média da terça parte das ondas individuais com maior altura num registro medido.  $T_z$  corresponde ao período médio de todas as ondas identificadas no registro. Adicionalmente, através do uso da Transforma de Fourier, pode ser obtida a função densidade espectral (ou espectro) que caracteriza o registro medido. Na prática o espectro é representado por uma função analítica conhecida que, dentre outras, destacam-se:

- espectro de Pierson-Moskowitz (PIERSON & MOSKOWITZ,1964): Considera que se o vento incidir de uma forma constante por um longo tempo sobre uma grande área, as ondas entram em equilíbrio com o vento. Mares com esta característica são chamados mares totalmente desenvolvidos.
- espectro JONSWAP (HASSELMAN *et al.*, 1973): foi estabelecido durante um projeto conjunto de pesquisa, o "JOint North Sea WAVE Project". Considera que o mar nunca está totalmente desenvolvido. Ele sempre continua a se desenvolver através de interações não lineares

onda-onda, mesmo para longo tempo e grandes distâncias. Apresenta uma boa descrição de ondas geradas por vento local.

- espectro de Torsethaugen: é uma formulação com dois picos, incluindo ondas geradas por mar local e por swell.

O período associado à frequência de pico do espectro ( $\omega_p$ ) é identificado como período de pico do espectro ( $T_p$ ), i.e.,

$$T_p = \frac{2\pi}{\omega_p} \quad (2.9)$$

Neste trabalho será utilizado o espectro JONSWAP. A formulação deste espectro é dada por:

$$S(f) = \frac{5}{16} H_s^2 T_p \left( \frac{f_p}{f} \right)^5 (1 - 0.287 \ln(\gamma)) \exp \left( -1.25 \left( \frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right) \gamma^{\exp \left( -\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right)} \quad (2.10)$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a = 0.07, & \text{para } f \leq f_p \\ \sigma_a = 0.09, & \text{para } f > f_p \end{cases}$$

onde :

$f$  – frequência em Hertz

$f_p$  – frequência de pico em Hertz ( $f_p = \frac{1}{T_p}$ )

$\gamma$  – fator de intensificação de pico (neste trabalho  $\gamma = 6.4 * T_p^{-0.491}$ )

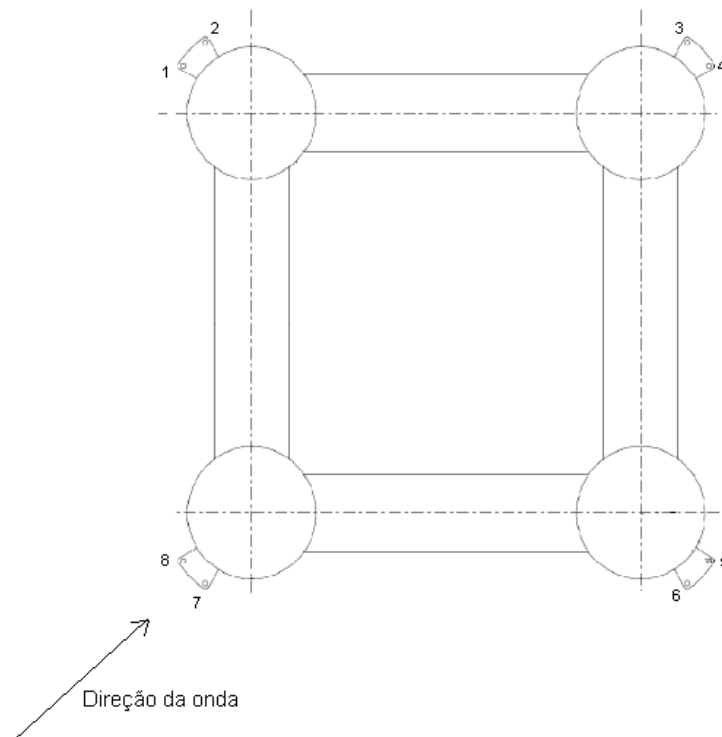
$\sigma$  – parâmetro de forma ou largura de pico

Uma realização das elevações do mar no domínio do tempo pode ser gerada artificialmente através da técnica de decomposição espectral (ou superposição de harmônicos) dada por:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t + \theta_i) \quad (2.11)$$

sendo:  $N$  o número de subdivisões do espectro do mar  $S(\omega)$ ;  
 $\omega_i$  é a frequência do  $i$ -ésimo harmônico;  
 $A_i = \sqrt{2S(\omega_i)\Delta\omega}$  é a amplitude do  $i$ -ésimo harmônico;  
 $\theta_i$  é a  $i$ -ésima fase aleatória (uniformemente distribuída entre 0 e  $2\pi$ );  
 $\Delta\omega$  é a largura de cada faixa na divisão do espectro;

A direção da onda  $\theta_w$  influencia diretamente a resposta da estrutura a um determinado carregamento de onda. Neste trabalho, como a grandeza de interesse é a tensão de Von Mises nos tendões mais carregados da TLP a onda foi considerada omnidirecional, conforme pode ser visto na Figura 2.5.



**Figura 2. 5: Direção de incidência das ondas**

No longo prazo o comportamento das elevações do mar pode ser caracterizado pelos pares de valores  $H_s$  e  $T_p$  identificados em cada estado de mar observado no período de medições. Este conjunto de dados pode ser apresentado na forma de um diagrama de dispersão ou de forma mais elaborada por uma distribuição conjunta de probabilidades representada pela seguinte equação:

$$f_{H_s, T_p}(h, t) = f_{H_s}(h) f_{T_p|H_s}(t|h) \quad (2.12)$$

onde  $f_{H_s}(h)$  é a função densidade de probabilidades ajustada para os valores observados de  $H_s$  e  $f_{T_p|H_s}(t|h)$  é a função densidade de probabilidades de  $T_p$  condicionada a valores de  $H_s$ , também ajustada para os dados medidos.

Em termos práticos é necessário definir um critério de quebra de onda, ou seja, uma relação entre a altura significativa e o período de pico da onda que defina o limiar de quebra das ondas. Neste trabalho foi considerado o critério apresentado por HAVER & NYHUS(1986), que sugere o seguinte limite de truncamento empírico:

$$T_p > 3.2\sqrt{H_s} \quad (2.13)$$

Deve-se observar que para levar em conta este limite de quebra de ondas a função cumulativa de probabilidades de  $T_p$  condicionada a  $H_s$  deve ser escrita da seguinte forma:

$$F'_{T_p|H_s}(t|h) \geq \frac{F_{T_p|H_s}(t|h) - F_{T_p|H_s}(t|h = (t/3.2)^2)}{1 - F_{T_p|H_s}(t|h = (t/3.2)^2)} \quad t > 3.2\sqrt{h} \quad (2.14)$$

Especificamente neste trabalho, considerando as características da costa brasileira, a distribuição de probabilidades da altura significativa de onda foi representada por uma distribuição Lognormal dada por:

$$f_{H_s}(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi_{H_s}h} \exp\left(-\left(\frac{\ln(h) - \lambda_{H_s}}{\xi_{H_s}}\right)^2\right) \quad (2.15)$$

com os parâmetros  $\lambda_{H_s} = 0,62$  e  $\xi_{H_s} = 0,333$ . Esta distribuição é ilustrada na Figura 2.6.

A distribuição de  $T_p$  foi representada por um lognormal condicional a  $H_s$  dada por:

$$f_{T_p|H_s}(t|h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi_{T_p}(h)t} \exp\left(-\left(\frac{\ln(h) - \lambda_{T_p}(h)}{\xi_{T_p}(h)}\right)^2\right) \quad (2.16)$$

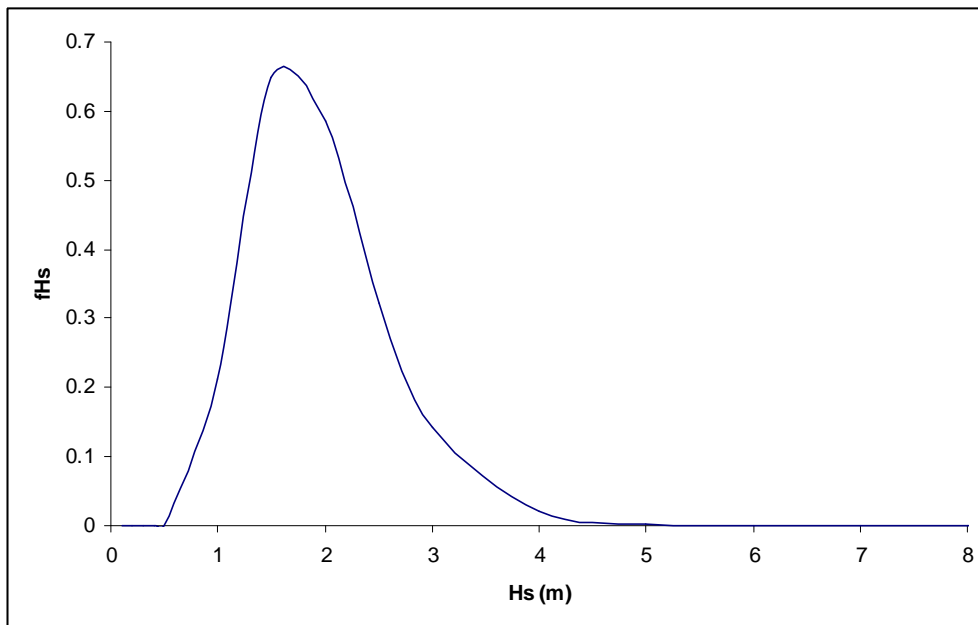
com os parâmetros

$$\lambda_{T_p}(h) = 1,827 + 0,181h^{0,85} \quad (2.17)$$

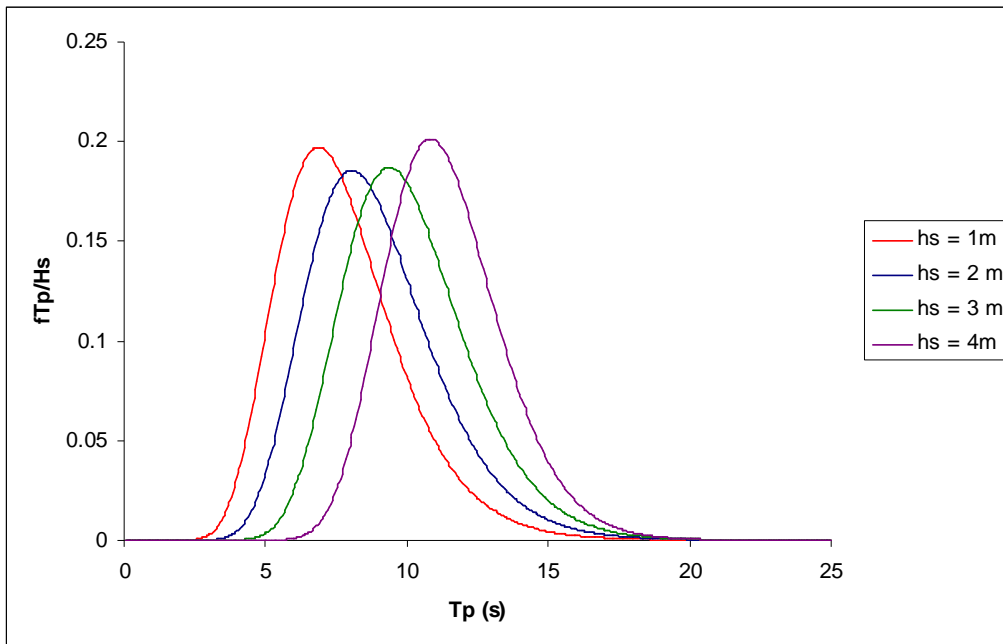
e

$$\xi_{T_p}(h) = 0,00638 + 0,285 \exp(-0,031 * h s^2). \quad (2.18)$$

A Figura 2.7 mostra a distribuição de  $T_p$  para vários valores de  $H_s$ .



**Figura 2. 6: Função densidade de probabilidade de  $H_s$**



**Figura 2. 7: Função densidade de probabilidade de Tp condicionada a valores de Hs**

Como será visto mais adiante, muitas metodologias de projeto se baseiam em valores extremos dos parâmetros ambientais. O valor extremo de Hs associado a um período de N anos, i.e,  $Hs_N$ , pode ser calculado através da seguinte equação:

$$F_{H_s}(Hs_N) = 1 - \frac{1}{2920N} \tag{2.19}$$

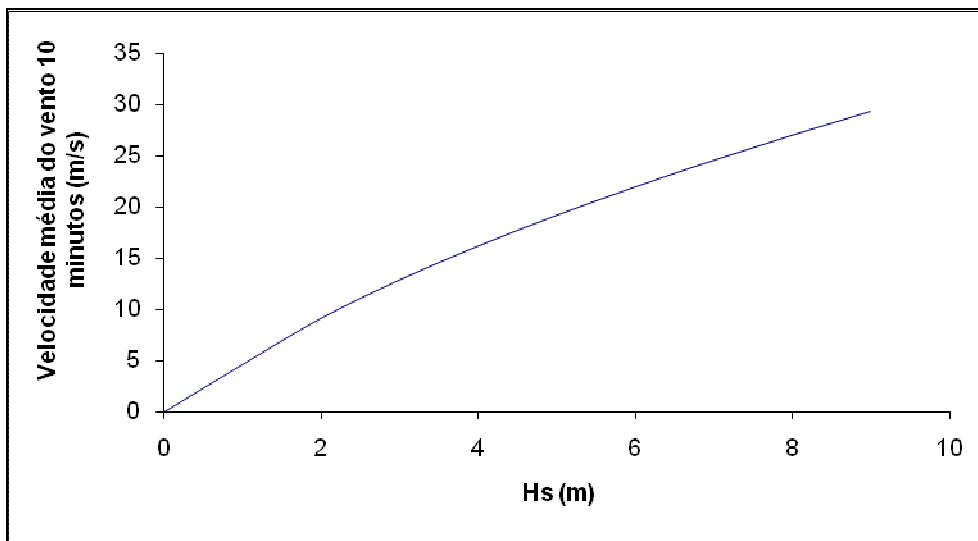
onde  $F_{H_s}(\cdot)$  é função cumulativa de probabilidades associada a altura significativa de onda é 2920 é o número de estados de mar de 3 horas de duração observados em 1 ano. Os valores de Tp associados aos valores extremos podem ser definidos através da distribuição condicional deste parâmetro aos valores de Hs.

### 2.3.3 - Vento

A velocidade do vento é um processo aleatório composto de um valor médio mais uma parcela flutuante (ou rajada). Normalmente a parcela dinâmica do vento é caracterizada por uma função densidade espectral analítica dependente da velocidade média. Assim, os parâmetros característicos de vento utilizados para definir este fenômeno ambiental no curto prazo são sua velocidade média (horária ou em 10 minutos) e sua direção principal de incidência. Neste trabalho foi considerada que o

vento atua colinearmente com a onda. Além disto, para simplificar as combinações de parâmetros ambientais em situações extremas, considerou-se que a velocidade do vento é completamente correlacionada com a altura significativa de onda. Assim, a partir de valores típicos de  $H_s$  e velocidade de vento anuais, decenários, cinquentenários e centenários estabeleceu-se que a velocidade média de 10 minutos do vento pode ser representada pela seguinte equação (vide também Figura 2.8):

$$V_V(h_s) = 21,401\sqrt{h_s} - 16,746\sqrt[3]{h_s} \quad (2.20)$$



**Figura 2. 8: Definição da velocidade do vento ( $V_v$ ) a partir da altura significativa de onda ( $H_s$ )**

Neste trabalho o espectro adotado para representar a parcela flutuante da velocidade do vento foi o recomendado pela API RP 2A (2000), que é descrito a partir das seguintes equações:

$$S(f) = \frac{\sigma(z)^2}{f_p \left[ 1 + 1.5 \frac{f}{f_p} \right]^{5/3}} \quad (2.21)$$

$$\sigma(z) = V_{1h}(z) * \begin{cases} 0.15 \left( \frac{z}{z_s} \right)^{-0.125} & , z \leq z_s \\ 0.15 \left( \frac{z}{z_s} \right)^{-0.275} & , z > z_s \end{cases} \quad (2.22)$$

$$V_{1h}(z) = V_{1h}(z_r) \left( \frac{z}{z_r} \right)^{0.125} \quad (2.23)$$

$$0.01 \leq \frac{f_p z}{V_{1h}(z)} \leq 0.10 \quad (2.24)$$

onde:

$S(f)$  – função densidade espectral da parcela dinâmica do vento na elevação  $z$ ;

$f$  – frequência em Hertz;

$f_p$  – frequência de pico característica do espectro;

$V_{1h}(z)$  – velocidade média horária do vento, na elevação  $z$ ;

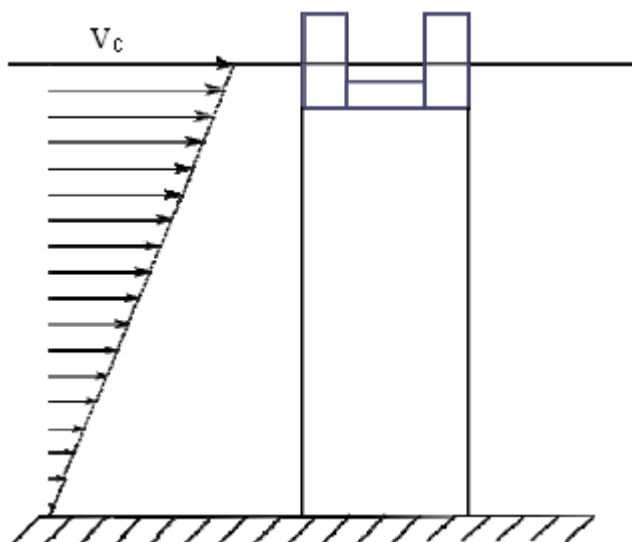
$z_s$  – espessura da “camada superficial”, igual a 20m;

$z_r$  – altura de referência, igual a 10 m.

Séries temporais da velocidade do vento podem ser geradas de forma similar a geração de realizações da elevação do mar.

#### 2.2.4 - Corrente

Apesar de na realidade a velocidade e a direção da correnteza não serem constantes com a profundidade, algumas simplificações são usuais em projetos de estruturas oceânicas e serão utilizadas neste trabalho. Aqui a velocidade de corrente será representada através de um perfil triangular, definido a partir da velocidade superficial  $V_c$ , conforme Figura 2.9. A direção ao longo da profundidade também será considerada constante e colinear com a onda. Neste trabalho, de forma simplificada, considerou-se um perfil de corrente “fixo” em todas as análises com velocidade superficial igual 1,6 m/s (da ordem de grandeza da corrente decenária em algumas localidades da costa brasileira).



**Figura 2. 9: Perfil triangular de corrente**

### **2.3. Metodologias de Projeto e Análise de Estruturas Oceânicas**

Existem diversas metodologias disponíveis para análise e projeto de estruturas oceânicas que variam em complexidade e demanda computacional. Em geral as análises, principalmente de estruturas flutuantes, são de caráter dinâmico determinístico ou aleatório e procura-se estimar o valor extremo de um parâmetro de projeto para proceder as apropriadas verificações estruturais. Neste trabalho o foco é a verificação dos tendões de uma TLP onde o principal parâmetro de projeto é a tensão de Von Mises.

A metodologia mais simples de projeto consiste numa análise dinâmica determinística com uma onda regular extrema. Esta metodologia é denominada “onda de projeto”. Aumentando a complexidade, há outra metodologia de projeto, também denominada “tempestade de projeto”. Consiste em análises aleatórias (ou análises de mar irregular) utilizando um estado de mar extremo. O estado de mar extremo pode ser apenas, por exemplo, o estado mar centenário ou conjunto de mares centenários definidos segundo a metodologia dos contornos ambientais extremos. Finalmente, num grau mais elevado de complexidade, outra metodologia de projeto baseia-se na resposta extrema de longo-prazo da resposta é obtida pela integração da mesma sobre todos os estados de mar de curto-prazo. Estas metodologias serão descritas em detalhes a seguir.

### 2.3.1. Onda de projeto determinística centenária

O método mais simplificado e o primeiro a ser usado em projetos de estruturas oceânicas foi o método da onda de projeto. Este método é descrito por HAVER (2007). É adequado para estruturas de comportamento quasi-estático, ou seja, estruturas cujas respostas extremas são definidas por carregamentos externos instantâneos. Como exemplo de estrutura com este comportamento podemos citar as plataformas fixas e *jack-ups*, instaladas em águas rasas.

Este método emprega uma onda regular associada um período de retorno requerido de N anos. É comum na prática de projeto a verificação do projeto sob a ação da onda centenária.

A resposta à onda centenária é obtida incidindo o carregamento hidrodinâmico gerado pela onda regular na estrutura. Como o carregamento é determinístico e regular a resposta também tem o mesmo comportamento. Assim resposta extrema associada à onda centenária será o valor máximo obtido na série temporal da mesma.

Um projeto que segue esta metodologia pode ser dividido nas seguintes etapas, segundo NAESS & MOAN(2005):

- a) A altura de onda individual de projeto é estabelecida com base em dados disponíveis para a locação *offshore* em questão;
- b) Um intervalo aceitável de períodos de onda regulares também são definidos;

Os itens a e b são combinados para obter pares de altura de onda e períodos associados e então obter a resposta dinâmica determinística da estrutura através, por exemplo, de um modelo numérico computacional.

Em geral, guias de projeto aplicáveis em cada caso específico especificarão como a onda de projeto deve ser escolhida. Por exemplo, para simplificar os cálculos, a NORSOK Standard N-003 (1999) sugere tomar  $H_{100} = 1.9H_s$ , se estimativas mais precisas não estão disponíveis. O mesmo documento também recomenda variar o período de onda correspondente T no intervalo  $(\sqrt{6.5H_{100}} \leq T \leq \sqrt{11H_{100}})$ .

Neste trabalho será considerada a seguinte relação:

$$H_{100} = 1.86H_{s100} \quad (2.25)$$

que é o valor mais provável da altura da onda extrema do estado de mar centenário assumindo-se que o processo de elevações do mar é Gaussiano com aproximadamente 1000 ondas individuais em 3-h. Utilizando-se as expressões 2.19 e 2.26, neste trabalho chegou-se aos seguintes valores:

$$H_{s100} = 8,3m$$

$$H_{100} = 15,5m$$

Além disto, para a metodologia em estudo, foram considerados cinco períodos de onda distintos. Estes valores correspondem aos valores de  $T_p$  condicionados a  $H_{s100}$  cuja função cumulativa de probabilidades  $F_{T_p|H_s}(\cdot)$  assume os seguintes valores: 5%, 25%, 50%, 75% e 95%. Com os valores de  $H_{s100}$  também foi definida velocidade correspondente do vento, conforme Equação 2.20. O carregamento de vento foi imposto como uma carga dinâmica nas análises. A Tabela 2.1 apresenta um resumo dos parâmetros das análises determinísticas realizadas neste trabalho.

**Tabela 2. 1 – Altura de onda e períodos associados da onda regular centenária**

<b>H<sub>máx</sub> (m)</b>	<b>T<sub>p</sub> (s)</b>	<b>V<sub>v</sub> (m/s)</b>	<b>V<sub>c</sub> (m/s)</b>
15,5	17,4	27,8	1,6
15,5	18,1	27,8	1,6
15,5	18,6	27,8	1,6
15,5	19,1	27,8	1,6
15,5	19,8	27,8	1,6

### **2.3.2. Onda irregular ou tempestade de projeto centenária (análise de curto prazo)**

A metodologia chamada tempestade de projeto consiste em realizar uma análise dinâmica aleatória da estrutura submetida ao estado de mar centenário. Se a estrutura não tem comportamento linear, esta análise é feita no domínio do tempo e

obtem-se uma série temporal aleatória do parâmetro de interesse e um tratamento estatístico da mesma deve ser realizado de forma a obter um valor característico de projeto. Usualmente as normas de projeto consideram o valor extremo mais provável de curto-prazo (3-h) como valor característico de projeto.

Usualmente, como a resposta não pode ser caracterizada como Gaussiana, deve se usar algum método numérico para estimar o valor extremo da resposta de curto-prazo. No presente trabalho utilizou-se um método que consiste em ajustar uma distribuição de Weibull à cauda superior dos picos da série temporal da resposta (Weibull-Tail) proposto por SODAHL (1991). A distribuição cumulativa de probabilidades de Weibull é definida por:

$$F_X(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\lambda\right) \quad (2.26)$$

cujos parâmetros  $\alpha$  e  $\lambda$  são, respectivamente os parâmetros de escala e forma da distribuição.

No presente trabalho o ajuste da distribuição de Weibull foi feita para os picos da série normalizada da resposta (tensão de Von Mises):

$$X'(t) = \frac{X(t) - \mu_X}{\sigma_X} \quad (2.27)$$

onde  $\mu_X$  e  $\sigma_X$  são, respectivamente, a média e o desvio-padrão da resposta. Para ajustar a distribuição os picos positivos (e maiores que zero) da série normalizada são inicialmente selecionados e plotados num papel de Weibull, conforme ilustra a Figura 2.10, onde  $Y = \ln(-\ln(1 - F_X(x)))$  e  $P' = \ln(x)$ . Plotando-se a distribuição cumulativa dos picos nesta escala e utilizando-se a técnica de regressão linear são obtidos os parâmetros  $a$  e  $b$  ilustrados na Figura 2.10. Estes parâmetros se relacionam com  $\alpha$  e  $\lambda$  através das seguintes relações:

$$\begin{aligned} \lambda &= a \\ \alpha &= \exp\left(-\frac{b}{a}\right) \end{aligned} \quad (2.28)$$

Entretanto, como para os valores extremos o mais importante é a cauda da distribuição, os parâmetros  $\alpha$  e  $\lambda$  finais da distribuição são calculados como os valores médios de 7 regressões lineares para diferentes níveis de probabilidade de excedência dos picos. Os 7 ajustes foram feitos considerando-se, respectivamente, os pares de pontos associados a níveis de excedência maiores ou iguais a 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90% e 95%.

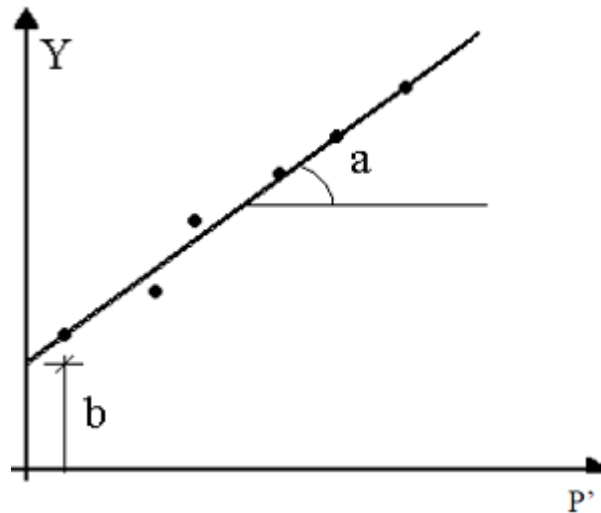


Figura 2. 10: Papel de Weibull

Uma vez definida a distribuição de Weibull (Equação 2.26) o valor normalizado do pico extremo mais provável em 3-h  $x_{\max}$  pode ser obtido por (ANG and TANG, 1984):

$$F_X(x_{\max}) = 1 - \frac{1}{N_{\max}} \quad (2.29)$$

onde  $N_{\max}$  é o número de picos esperado no período de curto-prazo, i.e.,  $N_{\max} = v_p 10800$ , sendo  $v_p$  a frequência média de picos da série temporal da resposta. O valor mais provável da resposta na escala original é dado por:

$$X_{\max} = x_{\max} \sigma_x + \mu_X \quad (2.30)$$

Nesta metodologia também existem duas maneiras de se definir a condição ambiental extrema para realizar a análise aleatória. A primeira delas considera simplesmente a condição com  $H_{s100}$  variando-se os períodos de pico conforme a distribuição deste condicionada a altura significativa centenária. Para cada condição é realizada uma análise aleatória calculando-se o valor extremo mais provável da resposta e o valor característico para verificação é o mais crítico deles. Especificamente neste trabalho, e seguindo a escolha de períodos conforme descrito para onda regular, as condições extremas de projeto são apresentadas na Tabela 2.2. A outra alternativa usa como condições ambientais de projeto condições definidas segundo a técnica do contorno ambiental extremo, que será descrita em detalhes a seguir.

**Tabela 2. 2 – Altura significativa de onda irregular centenária e períodos associados considerados nas análises**

$H_{s100}$ (m)	$T_p$ (s)	$\gamma$ (JONSWAP)	$V_v$ (m/s)	$V_c$ (m/s)
8,3	17,4	1,57	27,8	1,6
8,3	18,1	1,55	27,8	1,6
8,3	18,6	1,52	27,8	1,6
8,3	19,1	1,50	27,8	1,6
8,3	19,8	1,48	27,8	1,6

### 2.3.3. Contorno ambiental extremo (contorno centenário)

O método do contorno ambiental foi desenvolvido por WINTERSTEIN *et al.*(1993) e tem sido muito usado atualmente para obter resposta extrema de plataformas de petróleo fixas e flutuantes. É derivado do método de confiabilidade de primeira ordem clássico FORM (*First Order Reliability Method*). A aplicação do método é recomendada pela DnV-OS-E301 (2008) para o projeto de linhas de ancoragem de sistemas flutuantes. Maiores detalhes sobre sua aplicação pode ser encontrada em WINTERSTEIN *et al.* (1993) e WINTERSTEIN & ENGBRETSSEN (1998).

Segundo HAVER (2007) é um método conveniente para sistemas estruturais complexos onde uma análise completa de resposta no longo prazo não pode ser realizada no desenvolvimento de um projeto. Para estes sistemas, grandes simulações no domínio do tempo ou testes em modelos reduzidos seriam necessárias para um grande número de realizações com o objetivo de determinar a distribuição de curto

prazo dado um estado de mar. O método do contorno ambiental torna possível obter extremos de longo prazo razoáveis, concentrando considerações de curto prazo especialmente em uma área mais estreita do diagrama de dispersão.

O método pode ser aplicado para uma locação no oceano se a função densidade de probabilidades conjunta de  $H_s$  e  $T_p$  estiver disponível na forma conforme descrito na Equação 2.12. A partir desta distribuição um contorno de  $H_s$  extremo e  $T_p$  é definido, associado a uma determinada probabilidade de excedência (associada a um período de retorno), e análises de curto prazo para pontos localizados sobre o contorno são realizadas. Como valor característico de projeto toma-se o valor mais crítico entre todos os valores extremos mais prováveis associados a todos os pontos do contorno analisados.

Linhas do contorno ambiental correspondentes a uma probabilidade de excedência podem ser determinadas através da transformação da distribuição conjunta no espaço físico real para um espaço de variáveis gaussianas normais padrão independentes  $U_1$  e  $U_2$ . As relações entre altura significativa de onda ( $H_s$ ) e período de pico ( $T_p$ ) e as variáveis normais padrão são dadas através da Transformada de Roseblatt (MADSEN *et al.*, 1986):

$$\begin{aligned} \Phi(u_1) &= F_{H_s}(h_s) & \rightarrow & u_1 = \Phi^{-1}(F_{H_s}(h_s)) \\ \Phi(u_2) &= F_{T_p|H_s}(t_p|h_s) & \rightarrow & u_2 = \Phi^{-1}(F_{T_p|H_s}(t_p|h_s)) \end{aligned} \quad (2.31)$$

sendo  $\Phi(\cdot)$  a função cumulativa de probabilidades da distribuição normal padrão e  $\Phi^{-1}(\cdot)$  a sua inversa.

No espaço normal padrão, ou espaço reduzido ( $U_1, U_2$ ), usando a metodologia do FORM, a linha de contorno correspondente a uma probabilidade de excedência igual a  $q$  é um círculo que satisfaz a seguinte condição:

$$u_1^2 + u_2^2 = \beta^2 \quad (2.32)$$

onde  $\beta = \Phi^{-1}(q)$ . Este círculo é ilustrado na Figura 2.11. A probabilidade  $q$  está relacionada ao período de retorno e ao número de estados de mar por ano, i.e.,

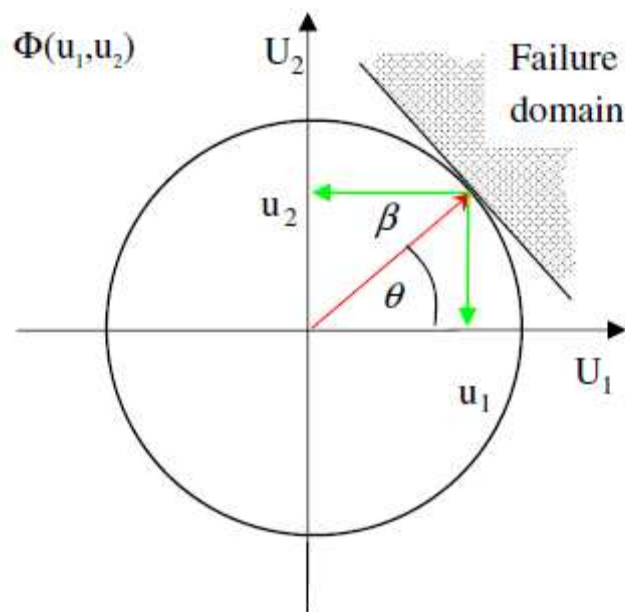
$$q = \frac{1}{2920.N} \quad (2.33)$$

onde N é número de anos (período de retorno). Por exemplo, o contorno ambiental centenário é obtido com os seguintes valores:

$$q = \frac{1}{2920.100} = 3.425E - 6 \quad (2.34)$$

$$\beta = \Phi^{-1}(q) = \Phi^{-1}(3.425E - 6) = 4.498$$

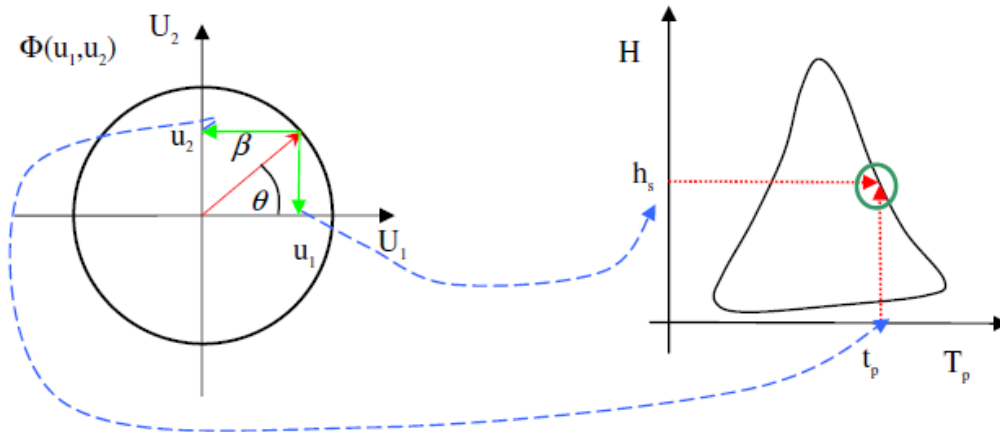
A transformação inversa, i.e., do espaço reduzido para o espaço original conduz ao contorno ambiental de projeto, conforme ilustra a Figura 2.12.



**Figura 2. 11: Definição do espaço normal padrão (BAARHOLM *et al.*, 2010)**

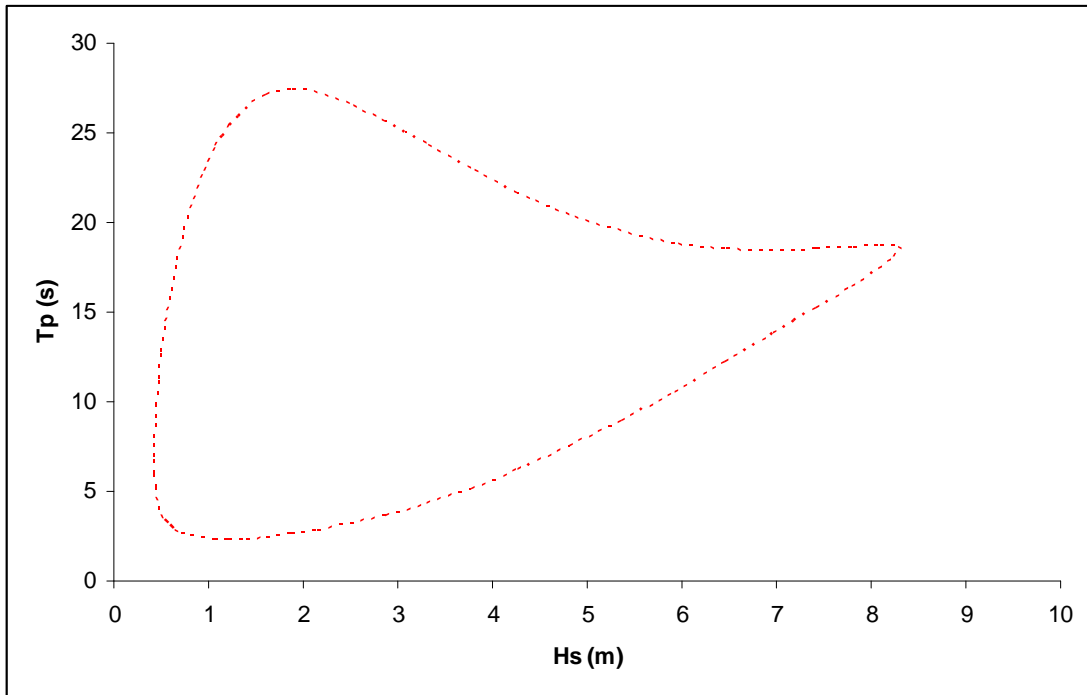
A Figura 2.13 apresenta o contorno ambiental centenário obtido utilizando a distribuição conjunta apresentada nas Equações 2.15 e 2.16. Observa-se que contorno apresenta dois valores de Hs para um mesmo Tp, porém não há sentido algum analisar o ponto com menor valor de Hs. Desta forma, o contorno ambiental efetivo utilizado neste trabalho é aquele ilustrado na Figura 2.14. Adicionalmente, nesta figura e na Tabela 2.3 são apresentados os pontos discretos de Hs e Tp para os quais foram realizadas as análises aleatórias de curto-prazo. A Figura 2.15 ilustra a

discretização no espaço das variáveis reduzidas. O critério adotado foi subdividir o espaço reduzido em 18 semi-arcos e transformando os respectivos pontos para o espaço original.

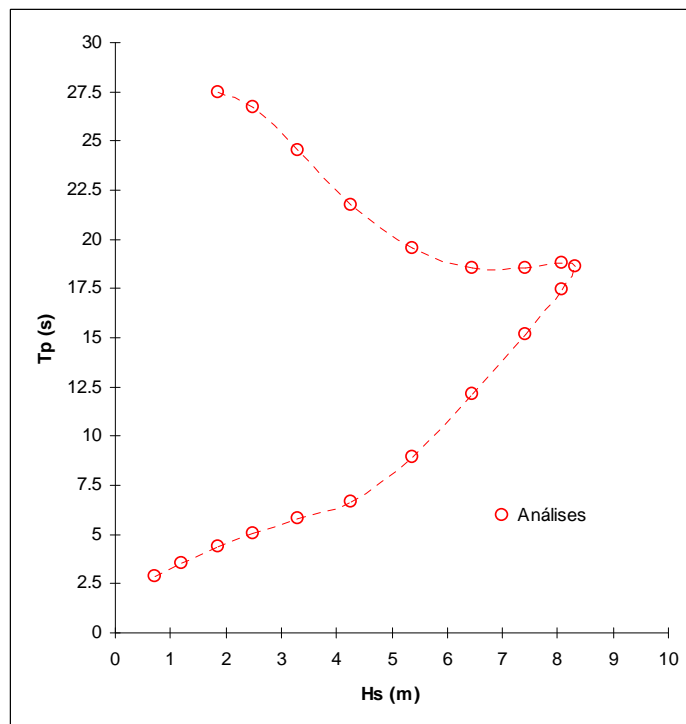


**Figura 2. 12: Transformação do espaço normal padrão para o espaço físico HsxTp (BAARHOLM *et al.*, 2010)**

Observando a Tabela 2.2 e a Tabela 2.3 nota-se que o par de pontos  $H_s = 8,3\text{m}$  e  $T_p = 18,6\text{s}$  é comum a ambas. Em outras palavras, o contorno ambiental centenário inclui o estado de mar centenário ( $H_{s100}$ ) com o período  $T_p$  associado ao valor de 50% de probabilidade de excedência na distribuição deste parâmetro condicionada ao valor da altura significativa de onda centenária.



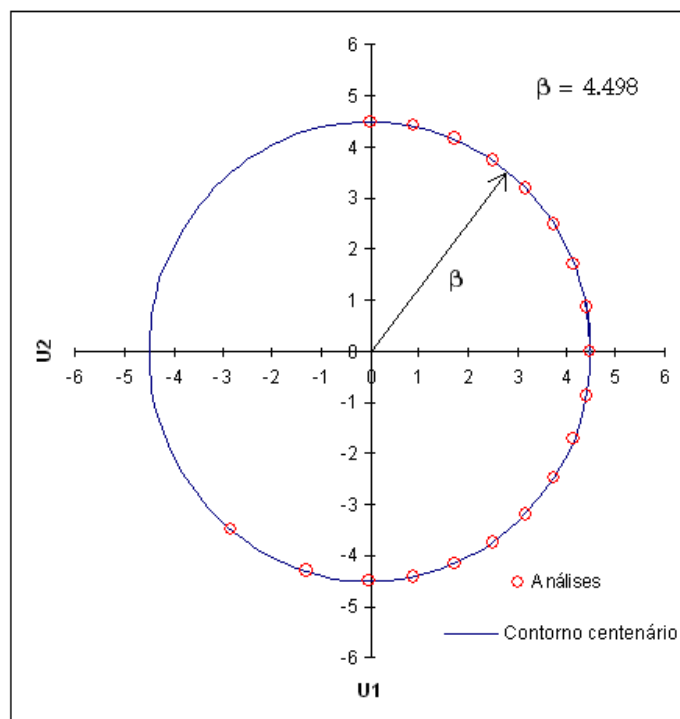
**Figura 2. 13: Contorno ambiental correspondente ao período de retorno de 100 anos no espaço original.**



**Figura 2. 14: Contorno ambiental correspondente ao período de retorno de 100 anos no espaço original com 19 pontos discretos**

**Tabela 2. 3 – Altura significativa de onda irregular centenária e períodos associados considerados nas análises**

Hs (m)	Tp (s)	Vv (m/s)	Vc (m/s)
0,7	2,8	3,1	1,6
1,2	3,5	5,7	1,6
1,9	4,4	8,6	1,6
2,5	5,1	11,1	1,6
3,3	5,8	13,9	1,6
4,3	6,7	17,1	1,6
5,4	8,9	20,2	1,6
6,5	12,2	23,2	1,6
7,4	15,2	25,6	1,6
8,1	17,4	27,2	1,6
8,3	18,6	27,8	1,6
8,1	18,8	27,2	1,6
7,4	18,6	25,6	1,6
6,5	18,6	23,2	1,6
5,4	19,6	20,2	1,6
4,3	21,7	17,1	1,6
3,3	24,5	13,9	1,6
2,5	26,7	11,1	1,6
1,9	27,5	8,6	1,6



**Figura 2. 15: Contorno ambiental correspondente ao período de retorno de 100 anos no espaço normal padrão com 19 pontos discretos.**

### 2.3.4. Análise de longo prazo da resposta

A metodologia de projeto mais complexa é baseada na estatística de longo-prazo da resposta. Esta metodologia inicialmente estima a distribuição de probabilidades de longo-prazo do pico da resposta considerada (que no presente trabalho consiste na tensão de Von Mises dos tendões de uma TLP) levando em conta a contribuição de todos os estados de mar de curto-prazo que atuam sobre a estrutura na locação planejada. Depois disto estima-se como valor característico de projeto o valor mais provável da resposta extrema para um período de retorno pré-definido que usualmente é 100 anos.

A distribuição de longo prazo da resposta é dada por:

$$F_X(x) = \int \int \frac{v(h, t)}{\bar{v}} F_{x|H_s, T_p}(x|h, t) f_{H_s, T_p}(h, t) dt dh \quad (2.35)$$

onde  $f_{H_s, T_p}(h, t)$  é a distribuição conjunta de probabilidades (longo-prazo) da altura significativa de onda  $H_s$  e do período de pico  $T_p$ ,  $F_{x|H_s, T_p}(x|h, t)$  é a função cumulativa de probabilidades dos picos da resposta distribuição de curto prazo,  $v(h, t)$  é a frequência de picos da resposta de curto-prazo e  $\bar{v}$  é a frequência média dos picos dada por:

$$\bar{v} = \int \int v(h, t) f_{H_s, T_p}(h, t) dt dh \quad (2.36)$$

Nas equações 2.35 e 2.36 a variabilidade de longo prazo e de curto prazo são combinadas por convolução sobre todos os estados de mar de curto prazo.

O valor extremo de longo prazo  $x_{ip}$  pode ser obtido resolvendo-se a seguinte equação:

$$F_X(x_{lp}) = 1 - \frac{1}{N_{lp}} \quad (2.37)$$

$$x_{lp} = F_X^{-1}\left(1 - \frac{1}{N_{lp}}\right)$$

onde  $N_{lp}$  é o número esperado de picos da resposta no período de retorno considerado. Por exemplo, a resposta centenária é obtida com:

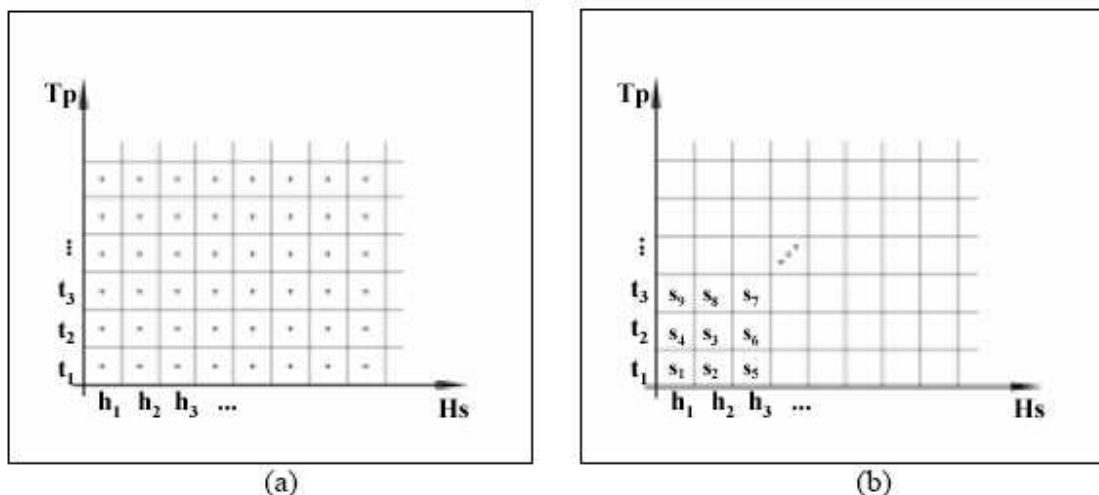
$$N_{lp} = \bar{v} \times 10800 \times 2920 \times 100 \quad (2.38)$$

A princípio, a análise de longo prazo da resposta é o método preferido para projetos de estruturas oceânicas. Porém, ele não é tão comumente utilizado em projetos devido a seu alto custo computacional, principalmente para problemas que envolvam análises de curto-prazo no domínio do tempo. O uso em casos práticos requer algum nível de interpolação de resultados.

Numericamente a Equação 2.35 pode ser escrita na forma discreta como:

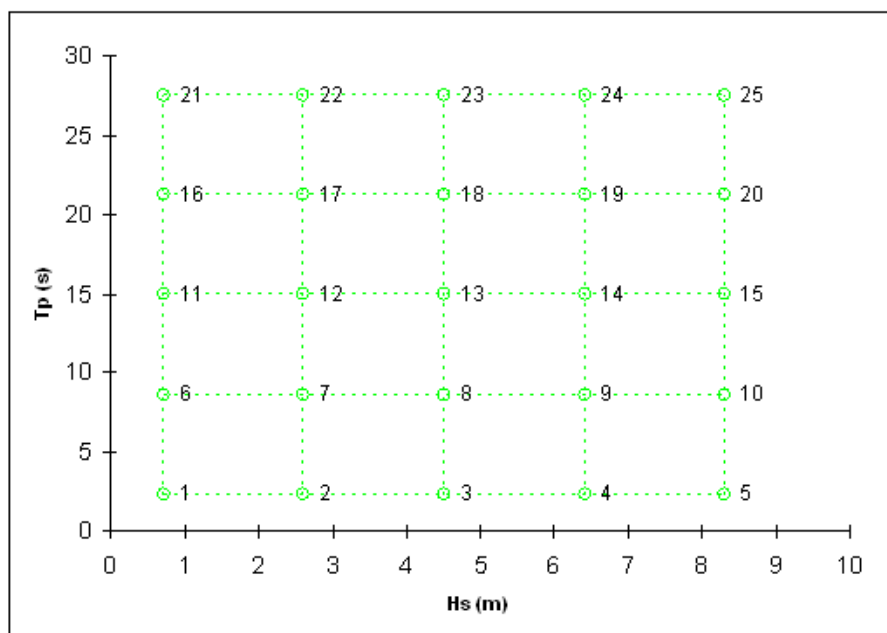
$$F_X(x) = \sum_{i=1}^{N_{H_s}} \sum_{j=1}^{N_{T_p}} \frac{v(h_i, t_j)}{\bar{v}} F_{x|H_s, T_p}(x|h_i, t_j) f_{H_s, T_p}(h_i, t_j) \Delta h \Delta t \quad (2.39)$$

onde  $N_{H_s}$  e  $N_{T_p}$  é o número de pontos discretos para  $H_s$  e  $T_p$  adotados para representar apropriadamente o domínio de integração de acordo os intervalos de integração  $\Delta h$  e  $\Delta t$ . Esta discretização é ilustrada na Figura 2.16. É interessante observar que a discretização tem que seguir uma malha fina para garantir a precisão nos resultados. Por outro lado, uma discretização elevada exige um número significativo de análises de curto-prazo que podem inviabilizar a análise devido ao alto custo computacional. A solução é realizar análises aleatórias para pontos de uma malha mais grosseira e interpolar os valores dos parâmetros da distribuição de curto-prazo da resposta para os pontos utilizados na integração numérica (VIDEIRO, 1998).



**Figura 2. 16: Discretização dos estados de mar (VIDEIRO,1998)**

Neste trabalho foram realizadas análises dinâmicas aleatórias inicialmente para uma malha de pontos Hs e Tp com a dimensão 5x5, conforme ilustra a Figura 2.17. Os valores dos pares de ponto desta malha são mostrados na Tabela 2.4. Posteriormente, uma mais refinada de dimensão 9x9, mostrada na Figura 2.18 e Tabela 2.5, foi utilizada. A integração propriamente dita feita com uma malha 40 x 40. Os esquemas de interpolação utilizados e um procedimento de refinamento da solução serão descritos no Capítulo 3 deste trabalho.

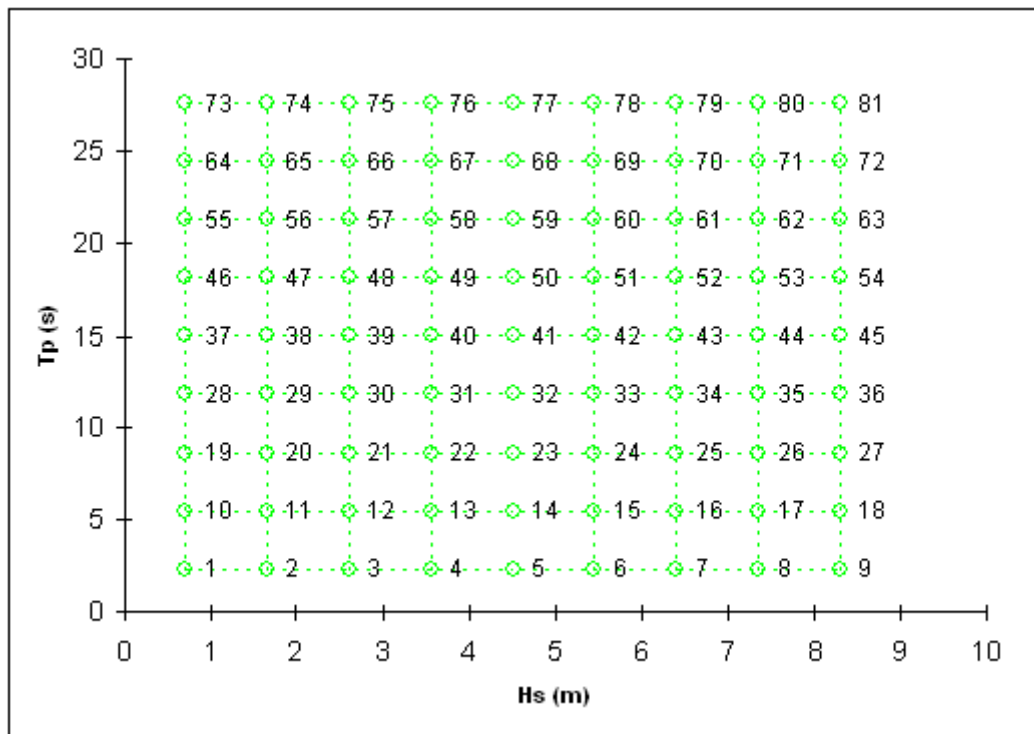


**Figura 2. 17: Malha Hs-Tp para as análises de curto prazo realizadas inicialmente para estimativa de longo prazo da tensão de Von Mises nos tendões da TLP**

**Tabela 2. 4 – Malha Hs-Tp para as análises de curto prazo realizadas inicialmente para estimativa de longo prazo da tensão de Von Mises nos tendões da TLP**

Ponto	Hs (m)	Tp (s)	$\gamma$ (Jonswap)	Vv (m/s)	Vc (m/s)
1	0,7	2,3	4,24	3,1	1,6
2	0,7	8,6	2,22	3,1	1,6
3	0,7	14,9	1,70	3,1	1,6
4	0,7	21,2	1,43	3,1	1,6
5	0,7	27,5	1,26	3,1	1,6
6	2,6	2,3	4,24	11,5	1,6
7	2,6	8,6	2,22	11,5	1,6
8	2,6	14,9	1,70	11,5	1,6
9	2,6	21,2	1,43	11,5	1,6
10	2,6	27,5	1,26	11,5	1,6
11	4,5	2,3	4,24	17,8	1,6
12	4,5	8,6	2,22	17,8	1,6
13	4,5	14,9	1,70	17,8	1,6
14	4,5	21,2	1,43	17,8	1,6
15	4,5	27,5	1,26	17,8	1,6
16	6,4	2,3	4,24	23,1	1,6
17	6,4	8,6	2,22	23,1	1,6
18	6,4	14,9	1,70	23,1	1,6
19	6,4	21,2	1,43	23,1	1,6
20	6,4	27,5	1,26	23,1	1,6
21	8,3	2,3	4,24	27,8	1,6
22	8,3	8,6	2,22	27,8	1,6
23	8,3	14,9	1,70	27,8	1,6
24	8,3	21,2	1,43	27,8	1,6
25	8,3	27,5	1,26	27,8	1,6

A partir dos resultados obtidos, conforme será discutido no Capítulo 3, concluiu-se que a discretização de 5 x 5 não era precisa o suficiente e foi feita uma nova discretização de 9 x 9 conforme mostrado na Figura 2.18 e na Tabela 2.5.



**Figura 2. 18: Malha Hs-Tp para as análises de curto prazo realizadas para estimativa de longo prazo da tensão de Von Mises nos tendões da TLP – malha 9 x 9.**

**Tabela 2. 5 – Malha Hs-Tp para as análises de curto prazo realizadas para estimativa de longo prazo da tensão de Von Mises nos tendões da TLP – malha 9**

**x 9 – Parte A**

Ponto	Hs (m)	Tp (s)	$\gamma$ Jonswap	Vv (m/s)	V <sub>c</sub> (m/s)
1	0,7	2,3	7,53	10,4	1,6
2	1,7	2,3	4,98	10,4	1,6
3	2,6	2,3	3,99	10,4	1,6
4	3,6	2,3	3,43	10,4	1,6
5	4,5	2,3	3,05	10,4	1,6
6	5,5	2,3	2,78	10,4	1,6
7	6,4	2,3	2,57	10,4	1,6
8	7,4	2,3	2,40	10,4	1,6
8	8,3	2,3	2,26	10,4	1,6
10	0,7	5,5	7,53	20,5	1,6
11	1,7	5,5	4,98	20,5	1,6
12	2,6	5,5	3,99	20,5	1,6
13	3,6	5,5	3,43	20,5	1,6
14	4,5	5,5	3,05	20,5	1,6
15	5,5	5,5	2,78	20,5	1,6
16	6,4	5,5	2,57	20,5	1,6
17	7,4	5,5	2,40	20,5	1,6
18	8,3	5,5	2,26	20,5	1,6
19	0,7	8,6	7,53	28,5	1,6
20	1,7	8,6	4,98	28,5	1,6
21	2,6	8,6	3,99	28,5	1,6
22	3,6	8,6	3,43	28,5	1,6
23	4,5	8,6	3,05	28,5	1,6
24	5,5	8,6	2,78	28,5	1,6
25	6,4	8,6	2,57	28,5	1,6
26	7,4	8,6	2,40	28,5	1,6
27	8,3	8,6	2,26	28,5	1,6
28	0,7	11,8	7,53	35,3	1,6
29	1,7	11,8	4,98	35,3	1,6
30	2,6	11,8	3,99	35,3	1,6
31	3,6	11,8	3,43	35,3	1,6
32	4,5	11,8	3,05	35,3	1,6
33	5,5	11,8	2,78	35,3	1,6
34	6,4	11,8	2,57	35,3	1,6
35	7,4	11,8	2,40	35,3	1,6
36	8,3	11,8	2,26	35,3	1,6
37	0,7	14,9	7,53	41,4	1,6
38	1,7	14,9	4,98	41,4	1,6
39	2,6	14,9	3,99	41,4	1,6
40	3,6	14,9	3,43	41,4	1,6
41	4,5	14,9	3,05	41,4	1,6
42	5,5	14,9	2,78	41,4	1,6

**Tabela 2. 6 – Malha Hs-Tp para as análises de curto prazo realizadas para estimativa de longo prazo da tensão de Von Mises nos tendões da TLP – malha 9 x 9 – Parte B**

Ponto	Hs (m)	Tp (s)	$\gamma$ Jonswap	Vv (m/s)	Vc (m/s)
43	6,4	14,9	2,57	41,4	1,6
44	7,4	14,9	2,40	41,4	1,6
45	8,3	14,9	2,26	41,4	1,6
46	0,7	18,1	7,53	47,0	1,6
47	1,7	18,1	4,98	47,0	1,6
48	2,6	18,1	3,99	47,0	1,6
49	3,6	18,1	3,43	47,0	1,6
50	4,5	18,1	3,05	47,0	1,6
51	5,5	18,1	2,78	47,0	1,6
52	6,4	18,1	2,57	47,0	1,6
53	7,4	18,1	2,40	47,0	1,6
54	8,3	18,1	2,26	47,0	1,6
55	0,7	21,2	7,53	52,2	1,6
56	1,7	21,2	4,98	52,2	1,6
57	2,6	21,2	3,99	52,2	1,6
58	3,6	21,2	3,43	52,2	1,6
59	4,5	21,2	3,05	52,2	1,6
60	5,5	21,2	2,78	52,2	1,6
61	6,4	21,2	2,57	52,2	1,6
62	7,4	21,2	2,40	52,2	1,6
63	8,3	21,2	2,26	52,2	1,6
64	0,7	24,3	7,53	57,1	1,6
65	1,7	24,3	4,98	57,1	1,6
66	2,6	24,3	3,99	57,1	1,6
67	3,6	24,3	3,43	57,1	1,6
68	4,5	24,3	3,05	57,1	1,6
69	5,5	24,3	2,78	57,1	1,6
70	6,4	24,3	2,57	57,1	1,6
71	7,4	24,3	2,40	57,1	1,6
72	8,3	24,3	2,26	57,1	1,6
73	0,7	27,5	7,53	61,7	1,6
74	1,7	27,5	4,98	61,7	1,6
75	2,6	27,5	3,99	61,7	1,6
76	3,6	27,5	3,43	61,7	1,6
77	4,5	27,5	3,05	61,7	1,6
78	5,5	27,5	2,78	61,7	1,6
79	6,4	27,5	2,57	61,7	1,6
80	7,4	27,5	2,40	61,7	1,6
81	8,3	27,5	2,26	61,7	1,6

No presente trabalho a distribuição da resposta condicionada às condições ambientais de curto-prazo  $F_{X|Hs, Tp}(x|h, t)$ , conforme descrito no item 2.3.2, foi representada por uma distribuição de Weibull. Outro aspecto importante para a

integração de longo-prazo é observar que a tensão de Von Mises num tendão de uma TLP tem uma componente funcional  $X_0$  (devida unicamente a pré-tensão do tendão) e uma componente ambiental causada pelas ações ambientais  $X_E$ . Esta última por sua vez, pode ser representada por um valor médio  $\bar{x}_E$  mais uma parcela variável e aleatória. Assim, para a integração de longo prazo, onde somente a parcela ambiental é avaliada (a outra parcela pode ser somada a resposta a qualquer momento), é conveniente escrever a distribuição de Weibull da seguinte forma:

$$F_{X|Hs, Tp}(x|h, t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x - \bar{x}_E(h, t)}{\frac{\sigma(h, t)}{\alpha(h, t)}} \right)^{\lambda(h, t)} \right] \quad (2.40)$$

Assim, os parâmetros  $\bar{x}_E$ ,  $\alpha$  e  $\lambda$  (e também a frequência de picos) são calculados para cada um dos pontos Hs-Tp da malha mais grosseira, através de um ajuste aos picos observados na correspondente série temporal da resposta, e depois interpolados para valores intermediários que são necessários para a integração numérica.

Como proposto por VIDEIRO (1998), é possível calcular a contribuição de cada estado de mar para o valor extremo mais provável  $x_{lp}$  e com isto verificar quais deles são os mais importantes para a resposta dinâmica da estrutura. O coeficiente de participação  $C_{i,j}$  de cada estado de mar ( $Hs_i, Tp_j$ ) da integração numérica é dado por:

$$C_{i,j} = \frac{\nu(hs_i, tp_j) (1 - F_{x|Hs, Tp}(x_{lp}|hs_i, tp_j)) f_{Hs, Tp}(hs_i, tp_j) \Delta h \Delta t}{Q} \quad (2.41)$$

onde  $Q$  é dado por:

$$Q = 1 - F_X(x_{lp}) \quad (2.42)$$

sendo  $F_X(x_{lp})$  calculado pela Eq. (2.37).

# CAPÍTULO 3

## ESTUDO DE CASO: TENSÃO DE VON MISES EXTREMA NOS TENDÕES DE UMA TLP

### 3.1.1. Descrição do modelo

O modelo de TLP utilizado neste trabalho consiste no modelo numérico desenvolvido por LIANG (2009). O modelo consiste de um modelo numérico acoplado, incluindo o casco e os tendões, desenvolvido no programa SITUA/PROSIM e representa uma TLP com 8 tendões (2 por coluna) numa lâmina d'água de 1200 m.

O casco é do tipo convencional com 4 colunas e 4 *pontoons*, conforme ilustrado na Figura 3.1. As principais dimensões da TLP estão apresentadas na Tabela 3.1 e nas Figuras 3.1 e 3.2. As propriedades de massa e raios de giração da unidade flutuante encontram-se nas Tabelas 3.2 e 3.3.

**Tabela 3. 1 – Principais dimensões da TLP**

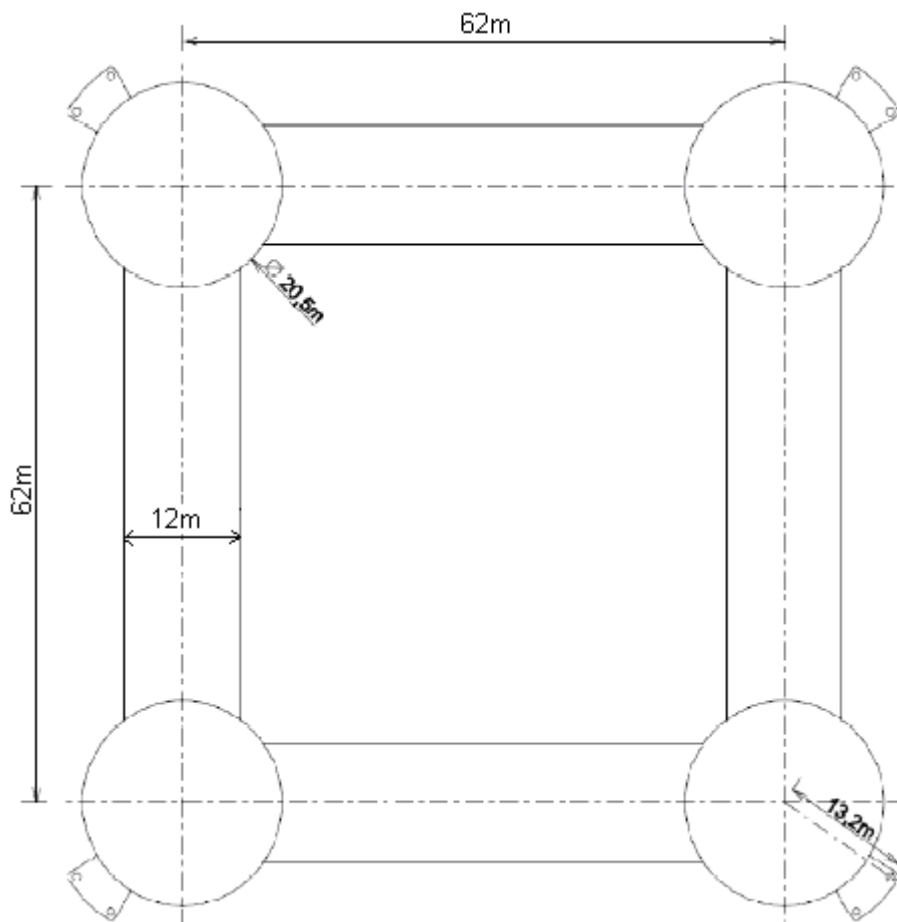
Diâmetro das colunas (m)	20,5
Distância entre as colunas (m)	62
Altura da coluna (m)	49,5
Altura do <i>pontoon</i> (m)	9
Largura do <i>pontoon</i> (m)	12
Calado (m)	28,7
Deslocamento (ton)	58026
Área vélica (m <sup>2</sup> )	1250

**Tabela 3. 2 – Propriedades de massa da TLP**

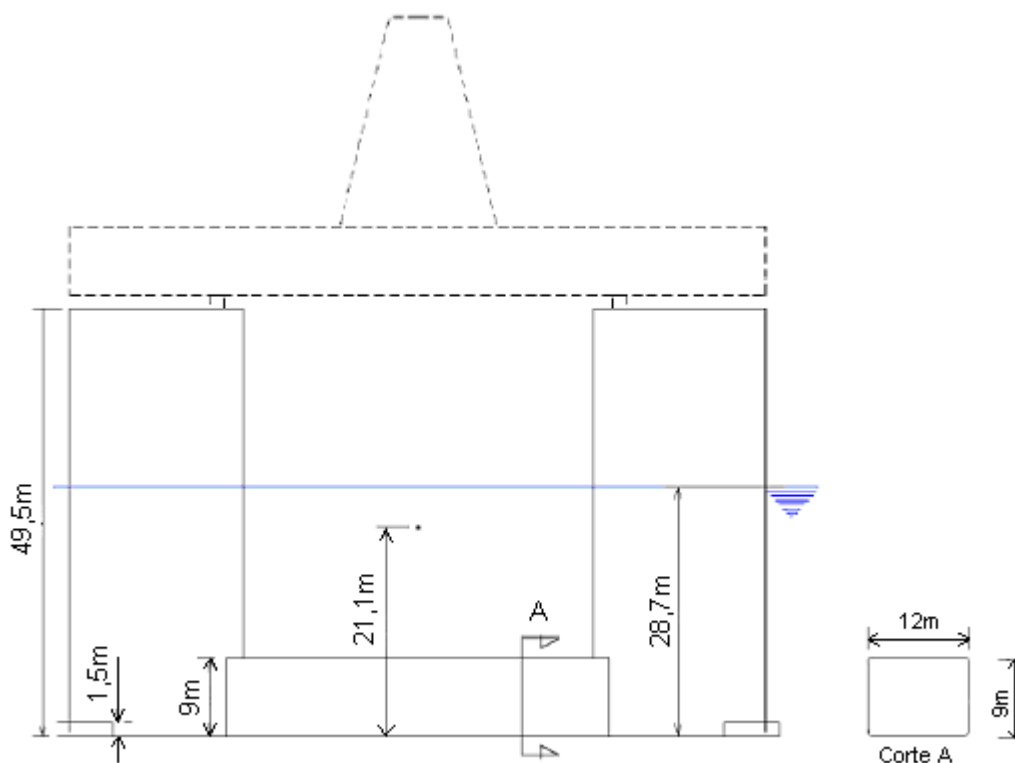
Massa (toneladas)	43319,5	
Centro de Gravidade	X <sub>CG</sub> (m)	0
	Y <sub>CG</sub> (m)	0
	Z <sub>CG</sub> (m)	21,119

**Tabela 3. 3 – Raios de giração da TLP**

Raios de giração (m)			
	Roll	Pitch	Yaw
Roll	30,7	12,5	-6,53
Pitch	12,5	32,1	-9,8
Yaw	-6,53	-9,8	32,7



**Figura 3. 1: Principais dimensões da TLP. Vista em Planta (LIANG,2009).**



**Figura 3. 2: Principais dimensões da TLP. Elevação (LIANG,2009).**

Os oito tendões consistem de tubos de aço estanques não pressurizados, ou seja, produzem empuxo, com as características físicas descritas na Tabela 3.4.

**Tabela 3. 4 – Propriedades dos tendões**

Comprimento (m)	1170,218
Diâmetro externo físico (m)	0,8128
Diâmetro externo hidrodinâmico (m)	0,8128
Espessura (mm)	38,1
Peso seco (kN)	8518
Peso submerso (kN)	2413
Pré-tração (kN)	18004
Tensão de escoamento do aço (MPa)	450
CD	1,7
CM	2
EA (kN)	19472768
Relação Diâmetro/Espessura	21,33

Foi empregado um modelo hidro-aerodinâmico híbrido para modelar as cargas sobre a estrutura. O casco é representado por elementos cilíndricos de grandes

dimensões cujas propriedades hidrodinâmicas para o carregamento de onda foram geradas pelo programa WAMIT (NEWMAN & SCLAVOUNOS, 1988) e consideram os coeficientes de baixa (*slow-drift*) e alta (*springing*) frequências. A força de corrente sobre o casco é calculada pela equação de Morison (FALTINSEN, 1990). As forças hidrodinâmicas de onda e corrente sobre os tendões são modeladas pela equação de Morison. A força de vento sobre o casco baseia-se na equação de Morison considerando a área de obstrução do casco da TLP projetada na direção perpendicular à ação do vento.

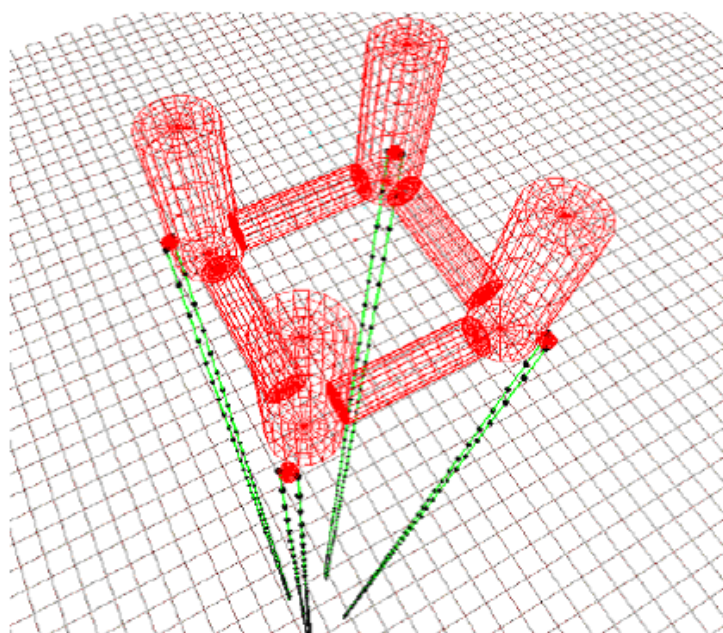


Figura 3. 3: Malha do casco gerada pelo software SITUA (LIANG,2009)

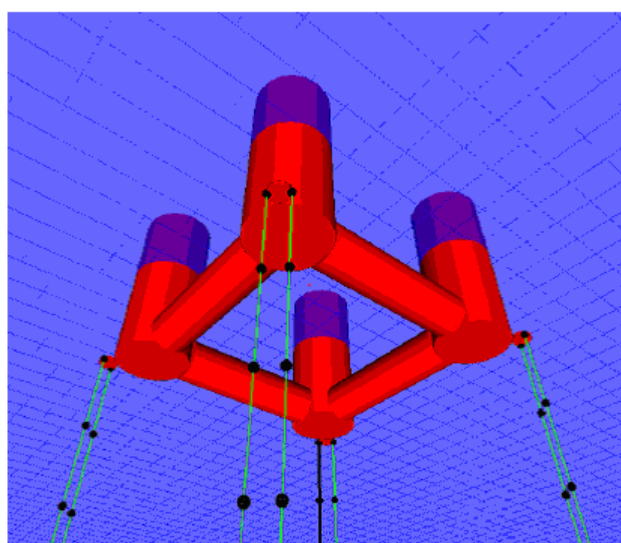
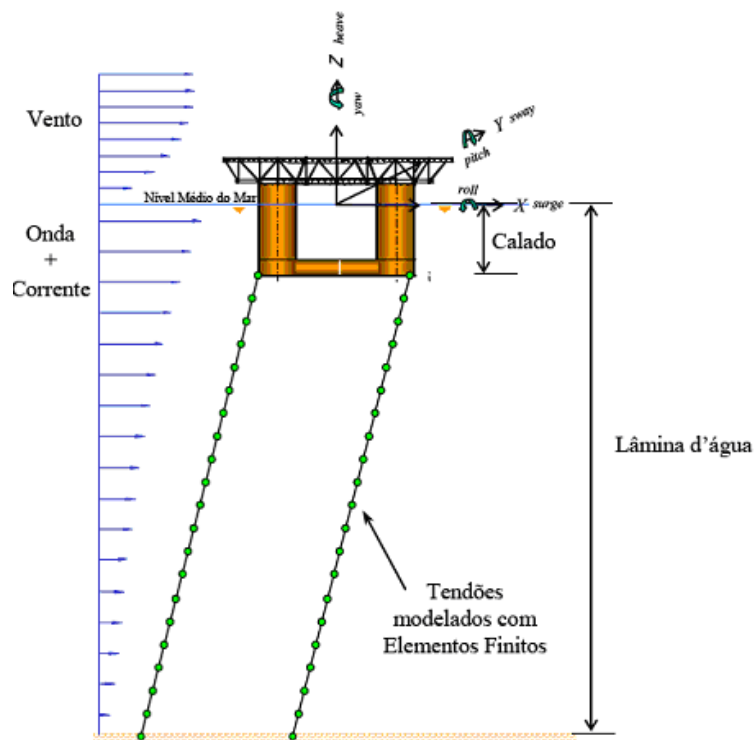


Figura 3. 4: Modelo 3D do casco gerado pelo software SITUA – Vista sólida (LIANG,2009)

O modelo de elementos finitos para cada tendão consiste de uma malha de elementos de pórtico com 6 graus de liberdade em cada nó. Foram adotadas malhas com 59 elementos (60 nós), com cerca de 20m de comprimento cada elemento. A Figura 3.5 mostra o modelo acoplado utilizado para a análise dinâmica da TLP.



**Figura 3. 5: Modelo estrutural acoplado para análise dinâmica da TLP (CICILIA,2004)**

A Tabela 3.5 apresenta os períodos e frequências naturais do modelo de TLP considerado neste trabalho. Observa-se que os períodos naturais de surge, sway e yaw são bem altos enquanto que os demais são baixos se aproximando dos períodos das ondas.

**Tabela 3. 5 – Períodos e frequências naturais da TLP em estudo**

	Período natural (s)	Frequência natural (rad/s)
Surge	128,32	0,04896
Sway	348,26	0,01804
Heave	4,59	1,36952
Roll	3,22	1,95005
Pitch	3,69	1,70064
Yaw	165,26	0,03802

### 3.1.1 - Tensão combinada de Von Mises

Neste trabalho o parâmetro de interesse é a tensão de Von Mises nos tendões da TLP por ser utilizada num dos critérios de verificação estrutural dos mesmos. Este parâmetro é calculado automaticamente pelo programa SITUA/PROSIM utilizado nas análises. A seguir será descrito brevemente a formulação matemática deste parâmetro.

Desprezando-se os efeitos de esforços cortantes, as tensões que atuam em uma seção qualquer de um tubo metálico são, conforme Figura 3.6:

- $\sigma_1$  – tensão longitudinal;
- $\sigma_2$  - *hoop stress*;
- $\sigma_3$  - tensão radial.

Em função dos esforços atuantes e considerando a formulação para tubos de paredes grossas, estas tensões são dadas por (API RP-2RD, 2006):

$$\sigma_3 = \frac{p_i r_i^2 - p_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} - (p_i - p_o) \frac{r_o^2 r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \frac{1}{r^2} \quad (3.1)$$

$$\sigma_2 = \frac{p_i r_i^2 - p_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} + (p_i - p_o) \frac{r_o^2 r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \frac{1}{r^2} \quad (3.2)$$

$$\sigma_1 = \frac{T}{A} \pm \frac{Mr}{I} + \frac{p_i r_i^2 - p_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (3.3)$$

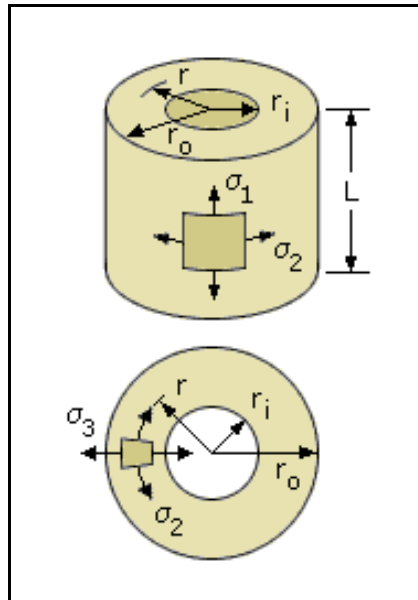
onde

- $p_o$       pressão externa;
- $p_i$       pressão interna;
- $r_o$       raio externo do tubo;
- $r_i$       raio interno do tubo;
- $r$         raio que localiza um ponto qualquer dentro da espessura do tubo;

- A     área da seção do tubo;
- T     tração atuante;
- M     momento fletor atuante na seção;
- I     momento de inércia da seção.

A tensão combinada de Von Mises  $\sigma_{vM}$  é definida pela seguinte equação:

$$\sigma_{vM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_3 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (3.4)$$



**Figura 3. 6: Tensões principais atuantes em uma seção de um tubo metálico**

### 3.2 – Resultados obtidos

A seguir serão apresentados os resultados obtidos por todas as metodologias de projeto descritas no Capítulo 2. São observados os valores da tensão de Von Mises mais críticos de cada tendão da TLP analisada. A região do tendão que apresenta maiores valores de tensão situa-se sempre próxima do topo.

### 3.2.1 – Metodologia da Onda de Projeto Determinística Centenária

Os resultados para a tensão de Von Mises máxima no topo de cada tendão da TLP em estudo obtidos através do método da onda determinística de projeto centenária, descrito no item 2.3.1, são apresentados na Tabela 3.6.

A partir dos resultados obtidos pode-se observar que os valores da tensão de Von Mises extrema no topo dos tendões da TLP em geral aumentam com o aumento do período da onda. Também pode se observar que o tendão mais solicitado varia com o período da onda. Para períodos de onda com probabilidade de ocorrência de até 75% os tendões mais solicitados são o 7 e o 8, enquanto que para períodos maiores os mais solicitados passam a ser os tendões 3 e 4. O maior valor obtido por esta metodologia foi de 333,1 MPa, para os tendões 3 e 4 com uma onda regular de altura 15,5m e período 19,8s.

**Tabela 3. 6 – Tensão de Von Mises (MPa) máxima no topo do tendão para onda regular centenária**

Parâmetros da Onda	Tensão de Von Mises Máxima (MPa)							
	Tendão 1	Tendão 2	Tendão 3	Tendão 4	Tendão 5	Tendão 6	Tendão 7	Tendão 8
H = 15,5m T = 17,4s	293,6	293,3	287,7	287,7	290,8	291,0	298,3	298,3
H = 15,5m T = 18,1s	299,5	298,9	289,8	289,7	298,4	299,0	303,9	304,0
H = 15,5m T = 18,6s	315,4	314,5	303,4	303,4	313,8	314,8	323,8	323,8
H = 15,5m T = 19,1s	327,5	327,3	322,4	322,4	326,9	327,1	328,3	328,3
H = 15,5m T = 19,8s	329,7	330,2	333,1	333,1	330,0	329,5	322,1	322,1

### 3.2.2 – Metodologia Onda Irregular (Tempestade de Projeto) Centenária

#### 3.2.2.1- Estado de Mar Centenário

Os resultados obtidos para a metodologia de onda irregular ou tempestade de projeto, descrita no item 2.3.2, utilizando o valor da altura significativa de onda centenária  $H_{s100}$  com variação do período de pico  $T_p$  associado estão apresentados na Tabela 3.7. Observa-se que cada resultado é proveniente do tratamento estatístico

de uma série temporal proveniente de uma análise dinâmica aleatória de curto-prazo com o programa SITUA/PROSIM com 3600s de duração.

**Tabela 3. 7 – Tensão de Von Mises (MPa) extrema no topo do tendão para onda irregular centenária**

Ondas		Tensão de Von Mises (MPa)							
Hs (m)	Tp (s)	Tendão 1	Tendão 2	Tendão 3	Tendão 4	Tendão 5	Tendão 6	Tendão 7	Tendão 8
8,3	17,4	270,1	269,7	280,9	280,7	268,5	269,1	292,8	292,6
8,3	18,1	271,3	270,7	280,6	280,3	271,3	272,6	294,0	293,7
8,3	18,6	272,6	271,8	278,5	278,3	271,6	273,7	293,0	292,8
8,3	19,1	275,1	274,1	277,8	277,7	274,0	275,8	293,2	293,1
8,3	19,8	277,8	277,6	278,4	278,3	277,5	278,5	295,9	295,8

A partir dos resultados da Tabela 3.6 pode-se perceber que há uma pequena tendência em aumentar a tensão de Von Mises extrema com o aumento do período de pico da onda irregular. Para esta metodologia, observa-se que os maiores valores para a tensão de Von Mises extrema ocorrem sempre para os tendões 7 e 8. O maior valor de tensão obtido por esta metodologia foi de 295,9 MPa para o tendão 7.

### 3.2.2.2- Contorno ambiental centenário

Como descrito no item 2.3.3 deste trabalho, na metodologia baseada nas condições ambientais determinadas pelo contorno ambiental centenário, realizou-se uma análise dinâmica aleatória, com características idênticas as análises do item anterior, para cada um dos pares de Hs e Tp localizados sobre este contorno e identificados na Tabela 2.3.

Os parâmetros estatísticos e da distribuição de Weibull ajustada aos picos das séries temporais da tensão de Von Mises, no ponto mais solicitado de cada tendão, obtidos nas análises aleatórias referentes aos pontos Hs-Tp do contorno ambiental centenário, envolvendo os oito tendões, estão apresentados nas Tabelas 3.9 a 3.16. Observa-se que nestas tabelas o valor da tensão associado à pré-tração inicial dos tendões (vide Tabela 3.8) e o valor da tensão média causada pelas ações ambientais encontram-se numa mesma parcela que a média apresentada.

**Tabela 3. 8 – Valores médios (funcional) da tensão de Von Mises (MPa) associados à pré-tração nos tendões**

Tendão 1	Tendão 2	Tendão 3	Tendão 4	Tendão 5	Tendão 6	Tendão 7	Tendão 8
193,8	193,8	193,8	193,8	193,8	193,8	193,8	193,8

**Tabela 3. 9 – Parâmetros da tensão de Von Mises (MPa) obtidos nas análises de contorno ambiental - Tendão 1**

Ondas		Tensão de Von Mises				
Hs (m)	Tp (s)	Par. Estatísticos			Par. Weibull	
		Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Freq. max (1/s)	Alfa ( $\alpha$ )	Lambda ( $\lambda$ )
0,7	2,8	225,54	2,03	0,5244	0,6969	1,1369
1,2	3,5	225,90	3,38	0,3692	1,2014	1,7583
1,9	4,4	226,34	3,32	0,3525	1,0906	1,4680
2,5	5,1	227,01	3,70	0,3456	1,1642	1,6225
3,3	5,8	227,90	4,06	0,3158	1,1648	1,6482
4,3	6,7	229,07	4,56	0,3022	1,2641	1,8679
5,4	8,9	230,49	6,10	0,2494	1,3164	1,7117
6,5	12,2	231,87	5,80	0,2197	1,2755	1,6723
7,4	15,2	232,73	6,75	0,1919	1,2142	1,6980
8,1	17,4	233,29	9,29	0,1522	1,1187	1,6411
8,3	18,6	233,47	10,88	0,1392	1,1699	1,7700
8,1	18,8	233,05	10,87	0,1322	1,1577	1,7570
7,4	18,6	232,05	9,71	0,1361	1,1716	1,8263
6,5	18,6	230,65	8,49	0,1336	1,1765	1,8470
5,4	19,6	229,16	7,85	0,1142	1,1553	1,7944
4,3	21,7	227,84	7,41	0,0856	1,1932	1,8091
3,3	24,5	226,91	6,74	0,0600	1,3090	1,8811
2,5	26,7	226,28	5,62	0,0489	1,2020	1,5302
1,9	27,5	225,89	4,39	0,0453	1,0907	1,2857

**Tabela 3. 10 – Parâmetros da tensão de Von Mises (MPa) obtidos nas análises de contorno ambiental - Tendão 2**

Ondas		Tensão de Von Mises				
Hs (m)	Tp (s)	Par. Estatísticos			Par. Weibull	
		Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Freq. max (1/s)	Alfa ( $\alpha$ )	Lambda ( $\lambda$ )
0,7	2,8	225,40	2,85	0,4031	1,0496	1,5627
1,2	3,5	225,75	4,93	0,3406	1,3821	2,0394
1,9	4,4	226,17	4,86	0,3311	1,3541	1,8983
2,5	5,1	226,83	5,34	0,3319	1,3144	1,8721
3,3	5,8	227,71	5,65	0,3153	1,3963	2,1140
4,3	6,7	228,85	6,28	0,3111	1,3809	2,1005
5,4	8,9	230,25	6,83	0,2747	1,3211	1,7208
6,5	12,2	231,60	6,16	0,2431	1,2908	1,7150
7,4	15,2	232,44	6,87	0,2114	1,2415	1,7598
8,1	17,4	233,00	9,30	0,1689	1,1366	1,6779
8,3	18,6	233,18	10,84	0,1594	1,1705	1,8039
8,1	18,8	232,76	10,82	0,1489	1,1578	1,7867
7,4	18,6	231,78	9,68	0,1547	1,1664	1,8380
6,5	18,6	230,40	8,47	0,1506	1,1514	1,8125
5,4	19,6	228,94	7,81	0,1369	1,1136	1,7500
4,3	21,7	227,65	7,37	0,1036	1,1521	1,7953
3,3	24,5	226,74	6,70	0,0603	1,3038	1,8719
2,5	26,7	226,12	5,59	0,0475	1,2092	1,5310
1,9	27,5	225,74	4,37	0,0461	1,0724	1,2657

**Tabela 3. 11 – Parâmetros da tensão de Von Mises (MPa) obtidos nas análises de contorno ambiental - Tendão 3**

Ondas		Tensão de Von Mises				
Hs (m)	Tp (s)	Par. Estatísticos			Par. Weibull	
		Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Freq. max (1/s)	Alfa ( $\alpha$ )	Lambda ( $\lambda$ )
0,7	2,8	223,82	12,61	0,4203	1,4137	2,3165
1,2	3,5	224,13	22,19	0,3242	1,4220	2,0146
1,9	4,4	224,45	22,21	0,3219	1,4135	1,9590
2,5	5,1	224,99	24,40	0,3206	1,4324	2,0864
3,3	5,8	225,68	25,13	0,3169	1,4387	2,1049
4,3	6,7	226,55	27,39	0,3172	1,4506	2,1892
5,4	8,9	227,62	21,55	0,3111	1,4062	1,9900
6,5	12,2	228,98	15,95	0,3008	1,4503	2,0634
7,4	15,2	229,79	12,38	0,2878	1,3863	1,9458
8,1	17,4	230,28	12,43	0,2658	1,3373	1,9521
8,3	18,6	230,43	12,61	0,2453	1,2776	1,8887
8,1	18,8	230,07	12,16	0,2458	1,2770	1,9486
7,4	18,6	229,20	11,26	0,2453	1,2491	1,8173
6,5	18,6	228,01	9,83	0,2456	1,2323	1,7892
5,4	19,6	226,75	8,36	0,2339	1,1773	1,7318
4,3	21,7	225,64	7,26	0,1994	1,2070	1,8884
3,3	24,5	224,88	6,32	0,0972	1,1816	1,7594
2,5	26,7	224,38	5,27	0,0783	1,0132	1,3634
1,9	27,5	224,08	4,13	0,0731	0,9282	1,1874

**Tabela 3. 12 – Parâmetros da tensão de Von Mises (MPa) obtidos nas análises de contorno ambiental - Tendão 4**

Ondas		Tensão de Von Mises				
Hs (m)	Tp (s)	Par. Estatísticos			Par. Weibull	
		Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Freq. max (1/s)	Alfa ( $\alpha$ )	Lambda ( $\lambda$ )
0,7	2,8	223,82	12,48	0,4222	1,4112	2,3113
1,2	3,5	224,13	21,98	0,3239	1,4222	2,0149
1,9	4,4	224,45	22,00	0,3217	1,4118	1,9558
2,5	5,1	224,99	24,18	0,3203	1,4331	2,0881
3,3	5,8	225,68	24,91	0,3167	1,4363	2,0972
4,3	6,7	226,55	27,15	0,3172	1,4517	2,1922
5,4	8,9	227,61	21,38	0,3106	1,4055	1,9892
6,5	12,2	228,98	15,84	0,3011	1,4470	2,0570
7,4	15,2	229,79	12,32	0,2872	1,3853	1,9454
8,1	17,4	230,29	12,38	0,2650	1,3347	1,9464
8,3	18,6	230,43	12,57	0,2442	1,2782	1,8922
8,1	18,8	230,07	12,13	0,2450	1,2756	1,9459
7,4	18,6	229,20	11,23	0,2431	1,2483	1,8164
6,5	18,6	228,01	9,80	0,2444	1,2330	1,7923
5,4	19,6	226,75	8,34	0,2333	1,1764	1,7311
4,3	21,7	225,64	7,25	0,1986	1,2056	1,8846
3,3	24,5	224,88	6,32	0,0994	1,1773	1,7608
2,5	26,7	224,38	5,27	0,0789	1,0109	1,3624
1,9	27,5	224,08	4,13	0,0731	0,9276	1,1862

**Tabela 3. 13 – Parâmetros da tensão de Von Mises (MPa) obtidos nas análises de contorno ambiental - Tendão 5**

Ondas		Tensão de Von Mises				
Hs (m)	Tp (s)	Par. Estatísticos			Par. Weibull	
		Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Freq. max (1/s)	Alfa ( $\alpha$ )	Lambda ( $\lambda$ )
0,7	2,8	225,40	1,61	0,7058	0,4142	0,9004
1,2	3,5	225,75	2,96	0,3722	1,0258	1,4825
1,9	4,4	226,19	3,02	0,3578	0,9847	1,3789
2,5	5,1	226,87	3,31	0,3356	1,1259	1,5918
3,3	5,8	227,75	3,81	0,3014	1,0003	1,3642
4,3	6,7	228,86	4,20	0,2814	1,2920	1,8605
5,4	8,9	230,10	5,91	0,2331	1,2119	1,6400
6,5	12,2	231,57	5,64	0,2133	1,1881	1,5488
7,4	15,2	232,46	6,66	0,1822	1,2014	1,7129
8,1	17,4	233,03	9,18	0,1442	1,1812	1,7444
8,3	18,6	233,21	10,77	0,1286	1,2024	1,8230
8,1	18,8	232,79	10,77	0,1244	1,1752	1,7851
7,4	18,6	231,80	9,62	0,1250	1,1959	1,8375
6,5	18,6	230,42	8,41	0,1219	1,2111	1,9107
5,4	19,6	228,95	7,79	0,1006	1,1577	1,7776
4,3	21,7	227,66	7,36	0,0819	1,2078	1,7957
3,3	24,5	226,74	6,70	0,0619	1,2789	1,8392
2,5	26,7	226,12	5,59	0,0517	1,1698	1,4888
1,9	27,5	225,74	4,37	0,0486	1,0600	1,2673

**Tabela 3. 14 – Parâmetros da tensão de Von Mises (MPa) obtidos nas análises de contorno ambiental - Tendão 6**

Ondas		Tensão de Von Mises				
Hs (m)	Tp (s)	Par. Estatísticos			Par. Weibull	
		Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Freq. max (1/s)	Alfa ( $\alpha$ )	Lambda ( $\lambda$ )
0,7	2,8	225,55	2,16	0,5294	0,7683	1,2171
1,2	3,5	225,91	3,77	0,3642	1,2348	1,7740
1,9	4,4	226,36	3,76	0,3422	1,2169	1,6969
2,5	5,1	227,05	4,14	0,3378	1,2688	1,7750
3,3	5,8	227,95	4,51	0,3142	1,2119	1,6880
4,3	6,7	229,08	4,98	0,3047	1,3453	1,9523
5,4	8,9	230,35	6,25	0,2517	1,2278	1,6364
6,5	12,2	231,84	5,87	0,2308	1,1797	1,5154
7,4	15,2	232,74	6,79	0,1900	1,1881	1,6978
8,1	17,4	233,32	9,31	0,1544	1,1888	1,7707
8,3	18,6	233,50	10,90	0,1353	1,1799	1,7421
8,1	18,8	233,08	10,88	0,1339	1,1585	1,7565
7,4	18,6	232,07	9,73	0,1336	1,1649	1,7383
6,5	18,6	230,67	8,50	0,1333	1,1950	1,8787
5,4	19,6	229,17	7,85	0,1156	1,1451	1,7747
4,3	21,7	227,85	7,41	0,0936	1,1438	1,7340
3,3	24,5	226,92	6,74	0,0622	1,2763	1,8354
2,5	26,7	226,28	5,62	0,0503	1,1808	1,5044
1,9	27,5	225,89	4,39	0,0475	1,0641	1,2667

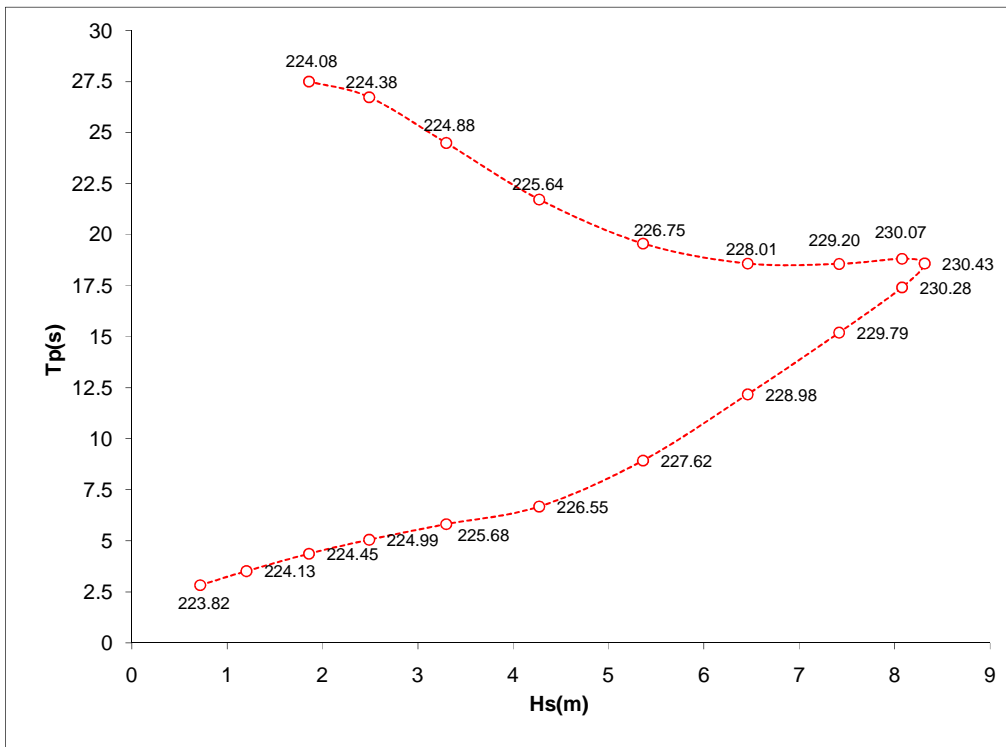
**Tabela 3. 15 – Parâmetros da tensão de Von Mises (MPa) obtidos nas análises de contorno ambiental - Tendão 7**

Ondas		Tensão de Von Mises				
Hs (m)	Tp (s)	Par. Estatísticos			Par. Weibull	
		Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Freq. max (1/s)	Alfa ( $\alpha$ )	Lambda ( $\lambda$ )
0,7	2,8	227,19	11,70	0,4403	1,4000	2,2659
1,2	3,5	227,71	20,18	0,3258	1,4319	2,0037
1,9	4,4	228,26	20,15	0,3242	1,4301	1,9851
2,5	5,1	229,11	22,25	0,3228	1,4351	2,1004
3,3	5,8	230,22	22,82	0,3172	1,4674	2,1651
4,3	6,7	231,66	24,92	0,3164	1,4197	2,1074
5,4	8,9	233,28	20,16	0,3078	1,3876	1,9109
6,5	12,2	235,17	15,40	0,2981	1,3177	1,6943
7,4	15,2	236,31	12,48	0,2747	1,3576	1,9395
8,1	17,4	237,00	13,34	0,2500	1,2239	1,7455
8,3	18,6	237,20	14,04	0,2283	1,2080	1,7267
8,1	18,8	236,66	13,67	0,2250	1,1650	1,6966
7,4	18,6	235,41	12,46	0,2283	1,1873	1,6812
6,5	18,6	233,64	10,82	0,2278	1,1814	1,6874
5,4	19,6	231,74	9,34	0,2192	1,1210	1,6005
4,3	21,7	230,06	8,20	0,1822	1,1376	1,7405
3,3	24,5	228,87	7,16	0,0853	1,1959	1,7480
2,5	26,7	228,07	5,93	0,0686	1,1578	1,5454
1,9	27,5	227,58	4,62	0,0622	1,0620	1,3954

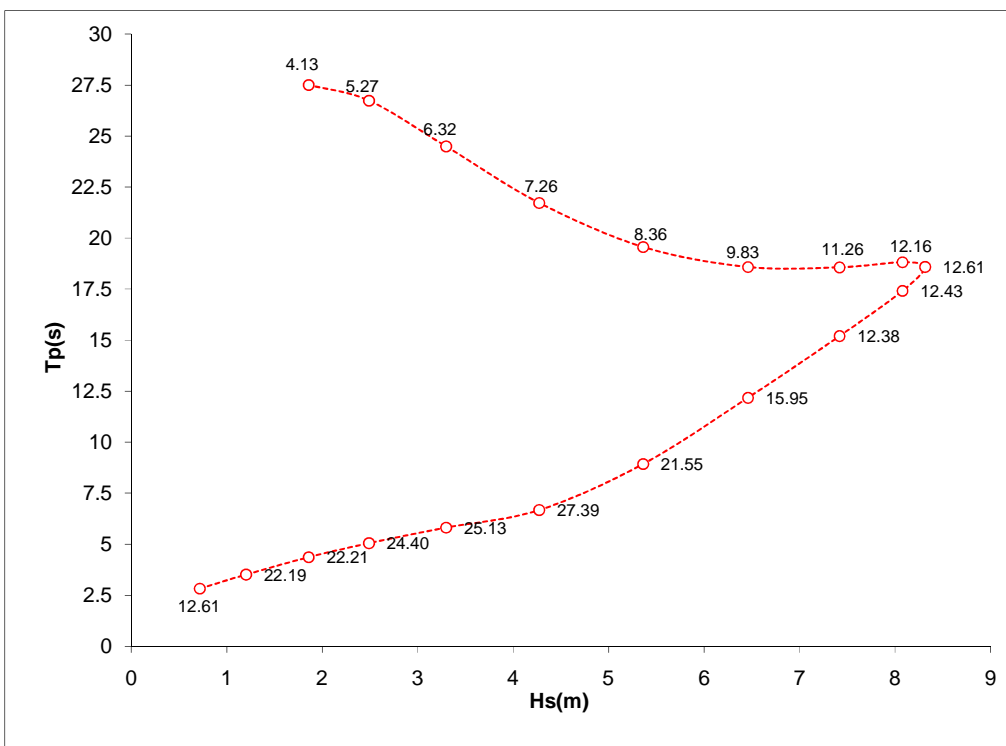
**Tabela 3. 16 – Parâmetros da tensão de Von Mises (MPa) obtidos nas análises de contorno ambiental - Tendão 8**

Ondas		Tensão de Von Mises				
Hs (m)	Tp (s)	Par. Estatísticos			Par. Weibull	
		Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Freq. max (1/s)	Alfa ( $\alpha$ )	Lambda ( $\lambda$ )
0,7	2,8	227,18	11,57	0,4406	1,4000	2,2660
1,2	3,5	227,71	19,96	0,3264	1,4306	2,0017
1,9	4,4	228,26	19,94	0,3242	1,4275	1,9798
2,5	5,1	229,11	22,02	0,3228	1,4354	2,1022
3,3	5,8	230,21	22,60	0,3169	1,4666	2,1602
4,3	6,7	231,66	24,67	0,3158	1,4204	2,1086
5,4	8,9	233,28	20,00	0,3072	1,3893	1,9108
6,5	12,2	235,17	15,29	0,2978	1,3135	1,6860
7,4	15,2	236,31	12,42	0,2750	1,3519	1,9290
8,1	17,4	237,00	13,30	0,2492	1,2210	1,7399
8,3	18,6	237,20	14,01	0,2272	1,2061	1,7247
8,1	18,8	236,66	13,64	0,2247	1,1622	1,6929
7,4	18,6	235,41	12,43	0,2275	1,1853	1,6797
6,5	18,6	233,64	10,79	0,2264	1,1833	1,6914
5,4	19,6	231,74	9,32	0,2175	1,1217	1,6002
4,3	21,7	230,06	8,20	0,1819	1,1380	1,7427
3,3	24,5	228,87	7,16	0,0861	1,2105	1,7662
2,5	26,7	228,07	5,93	0,0689	1,1509	1,5342
1,9	27,5	227,58	4,62	0,0606	1,0569	1,3345

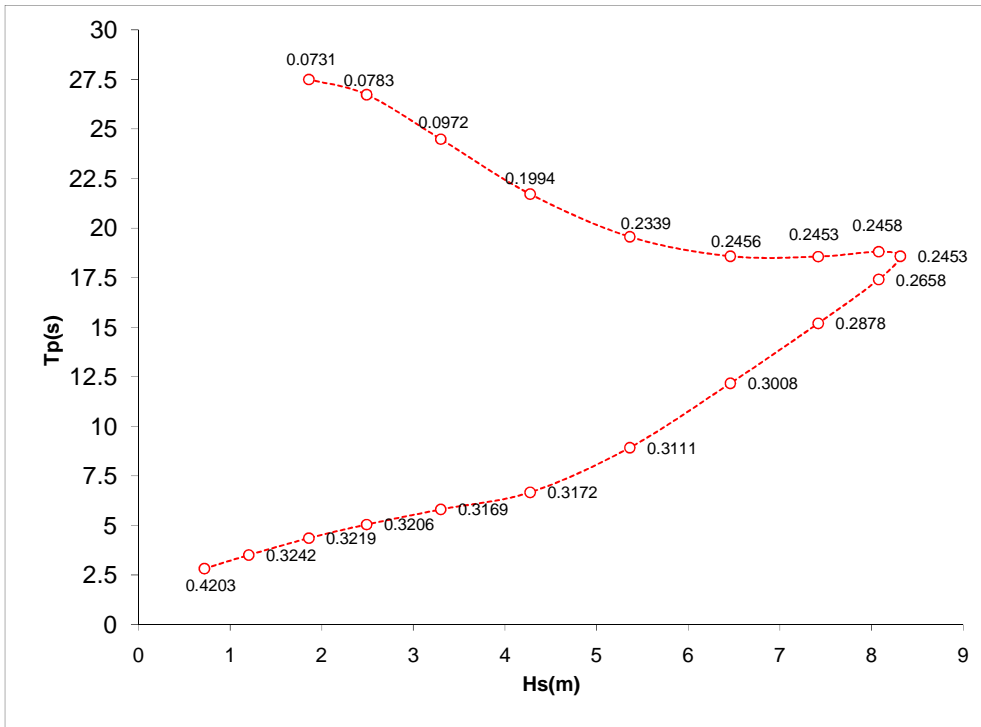
A partir da observação dos resultados apresentados nestas tabelas pode-se observar que o valor da média das análises de curto prazo aumenta com o aumento da altura significativa de onda. Já o valor do desvio padrão apresentou seu valor máximo para altura significativa de onda Hs de 4,3m e período de pico Tp de 6,7s para os Tendões 3, 4, 7 e 8. Este resultado está associado ao fato de que o espectro para este estado de mar tem uma energia significativa na faixa de frequências na região da frequência (período) natural de *heave* (vide Tabela 3.5) da plataforma. Para os tendões 1, 2, 5 e 6 os valores máximos de desvio padrão ocorreram para o maior valor de altura significativa de onda, ou seja, para Hs = 8,3m e Tp = 18,6s. Os maiores valores da frequência de máximos ocorrem para os períodos de pico mais baixos. As Figuras de 3.7 a 3.11 apresentam, em gráficos no formato do contorno ambiental, os valores dos parâmetros média, desvio padrão, frequência de máximos e alfa ( $\alpha$ ) e lambda ( $\lambda$ ) da distribuição de Weibull da tensão de Von Mises obtidos nas análises de curto prazo para o Tendão 3.



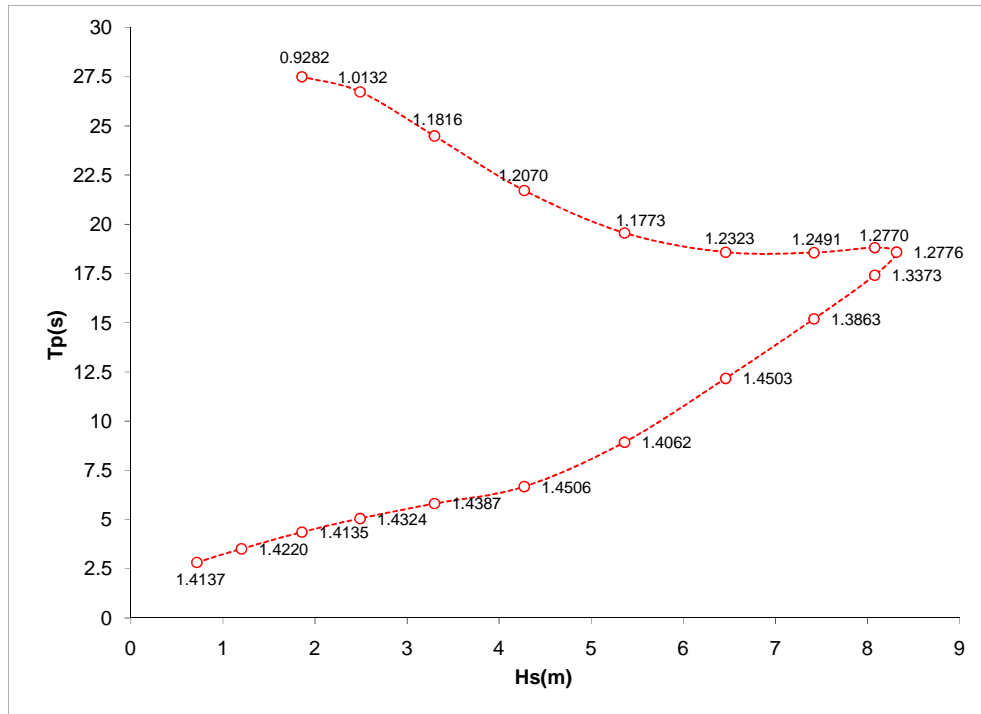
**Figura 3. 7: Valores da média da tensão de Von Mises (MPa) no topo do Tendão 3 nos pontos discretos Hs-Tp do contorno ambiental centenário analisados**



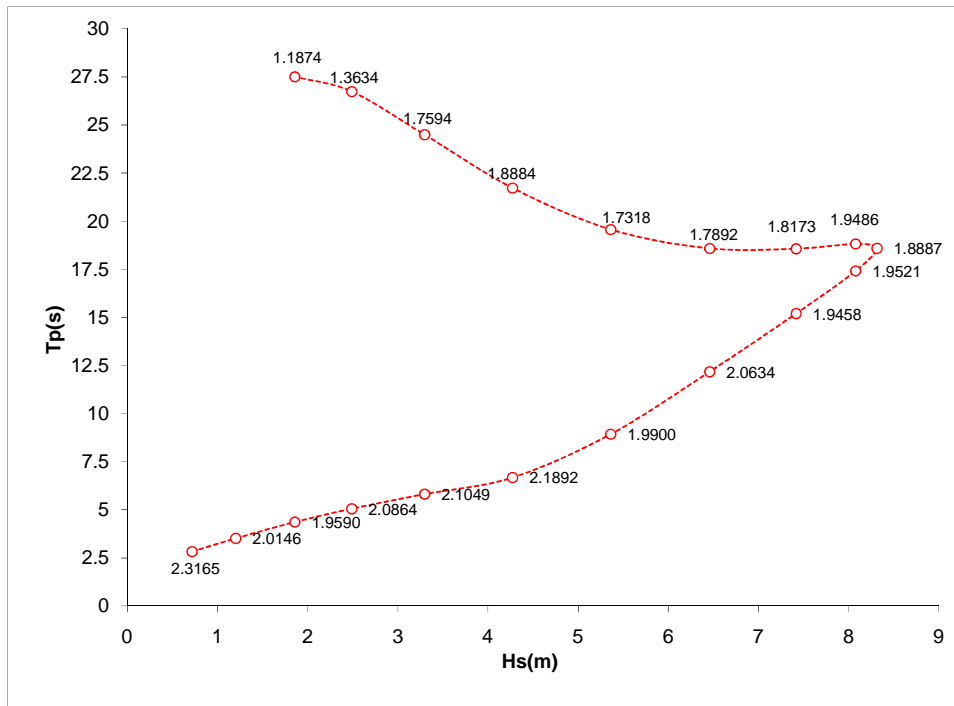
**Figura 3. 8: Valores do desvio padrão da tensão de Von Mises (MPa) no topo do Tendão 3 nos pontos discretos Hs-Tp do contorno ambiental centenário analisados**



**Figura 3. 9: Valores da frequência de máximos (1/s) da tensão de Von Mises no topo do Tendão 3 nos pontos discretos Hs-Tp do contorno ambiental centenário analisados.**



**Figura 3. 10: Valores da alfa (α) da distribuição de Weibull ajustada para a tensão de Von Mises no topo do Tendão 3 nos pontos discretos Hs-Tp do contorno ambiental centenário analisados**



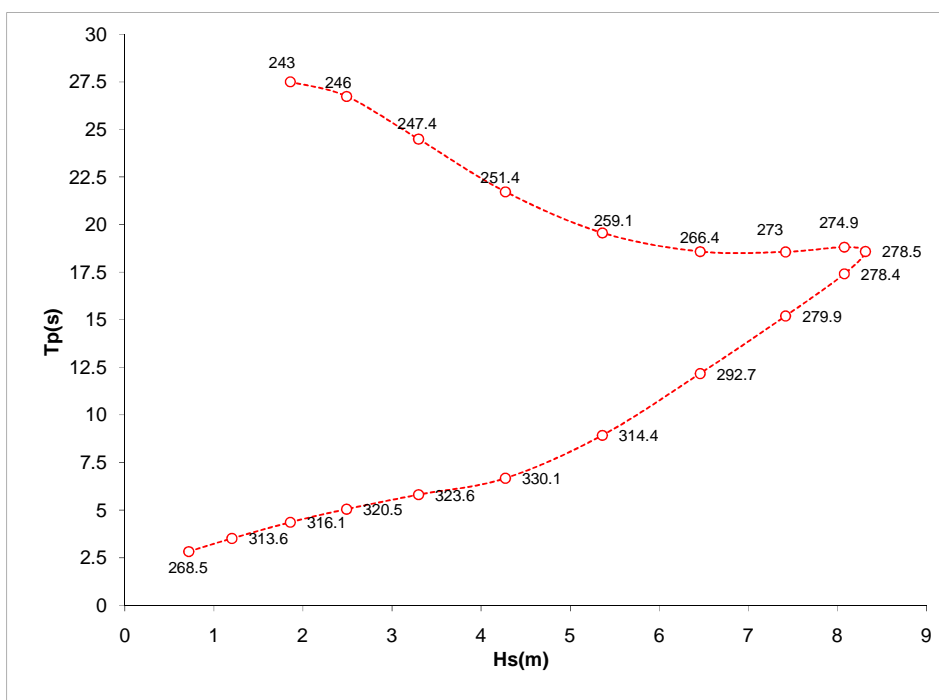
**Figura 3. 11: Valores da lambda ( $\lambda$ ) da distribuição de Weibull ajustada para a tensão de Von Mises no topo do Tendão 3 nos pontos discretos Hs-Tp do contorno ambiental centenário analisados**

A Tabela 3.17 apresenta o valor extremo mais provável de curto prazo da tensão de Von Mises para cada um dos pontos Hs-Tp do contorno ambiental centenário. Estes valores incluem a parcela funcional e a ambiental, i.e., representam a tensão total atuante. Esta tabela inclui os 8 tendões analisados. A partir dos resultados apresentados nesta tabela observa-se que o valor máximo de tensão de Von Mises extrema obtida entre todos os tendões foi de 330,1 MPa para o Tendão 3. Este máximo ocorreu para uma altura significativa de onda de 4,3m e um período de pico de 6,7s. Como já descrito anteriormente, embora a altura não seja excessiva, este estado de mar produz uma parcela de carregamento que é ressonante com a plataforma. A Figura 3.12 apresenta os valores obtidos para a tensão de Von Mises extrema para o tendão mais carregado (Tendão 3) na forma de um diagrama reproduzindo o contorno ambiental centenário.

**Tabela 3. 17 – Valores extremos mais prováveis da tensão de Von Mises (MPa)  
no topo dos tendões pela análise do contorno ambiental centenário.**

Par. onda		Tensão de Von Mises Extrema no Topo do Tendão (MPa)							
Hs (m)	Tp (s)	Tendão 1	Tendão 2	Tendão 3	Tendão 4	Tendão 5	Tendão 6	Tendão 7	Tendão 8
0,7	2,8	235	237,1	268,5	268,1	233	235,3	269,2	268,8
1,2	3,5	239,4	244,9	313,6	312,7	238,4	241,2	310,1	309,2
1,9	4,4	241,6	246,1	316,1	315,3	239,9	242,2	311,2	310,5
2,5	5,1	242,8	248,4	320,5	319,6	240,8	244,2	315,8	314,9
3,3	5,8	244,8	249	323,6	322,9	245,4	246,9	318,4	317,7
4,3	6,7	246,7	252,4	330,1	329,1	245,5	248,6	327,3	326,4
5,4	8,9	257,3	260,5	314,4	313,7	255,2	257,5	316,9	316,4
6,5	12,2	257,1	258,1	292,7	292,3	256,7	258,7	304,8	304,5
7,4	15,2	259,9	259,7	279,9	279,6	258,6	259,4	285,8	285,6
8,1	17,4	268,5	268,1	278,4	278,3	267,1	267,6	290,4	290,3
8,3	18,6	272,6	271,8	278,5	278,3	271,6	273,7	293	292,8
8,1	18,8	272	271,1	274,9	274,8	271	272,1	290,1	290
7,4	18,6	265,8	265,4	273	272,9	265,5	267,6	285,6	285,5
6,5	18,6	259,9	259,8	266,4	266,2	259	259,9	276,8	276,7
5,4	19,6	256,2	256	259,1	259	255,9	256,4	269,4	269,4
4,3	21,7	253,4	252,8	251,4	251,4	253,5	253,7	259,9	259,9
3,3	24,5	250,7	250,4	247,4	247,3	250,5	250,8	254,6	254,6
2,5	26,7	248,7	248,5	246	246	248,7	248,8	251,4	251,4
1,9	27,5	245,7	245,6	243	243,1	245,4	245,7	246,4	247,4

<b>Máximo</b>	272,6	271,8	330,1	329,1	271,6	273,7	327,3	326,4
---------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------



**Figura 3. 12: Valores extremos mais prováveis (3-h) para a tensão de Von Mises no tendão mais carregado (Tendão 3) pela metodologia do contorno ambiental.**



inicialmente identificando o retângulo que contém este ponto. Uma vez identificado o retângulo o valor de  $p$  pode ser obtido a partir da interpolação linear usando os 4 valores nodais de  $p$  através da seguinte equação:

$$p(h_s, t_p) = \sum_{i=1}^4 h_i(r(h_s), s(t_p)) p_i$$

onde  $P_i$  é o  $i$ -ésimo valor nodal do parâmetro,  $r(h_s)$  e  $s(t_p)$  são as coordenadas naturais (descritas abaixo) e  $h_i(\dots)$  são as funções peso calculadas para o ponto de coordenadas cartesianas  $(h_s, t_p)$ . Estas funções são dadas por:

$$h_1(r, s) = \frac{1}{4}(1+r)(1+s)$$

$$h_2(r, s) = \frac{1}{4}(1-r)(1+s)$$

$$h_3(r, s) = \frac{1}{4}(1-r)(1-s)$$

$$h_4(r, s) = \frac{1}{4}(1+r)(1-s)$$

Como para o retângulo  $h_{s_1} \equiv h_{s_4}$ ,  $h_{s_2} \equiv h_{s_3}$ ,  $t_{p_1} \equiv t_{p_2}$  e  $t_{p_3} \equiv t_{p_4}$ , a relação entre coordenadas cartesianas e as naturais é dada por:

$$r(h_s) = \frac{2h_s - h_{s_1} - h_{s_2}}{h_{s_2} - h_{s_1}}$$

$$s(h_s) = \frac{2t_p - t_{p_1} - t_{p_4}}{t_{p_1} - t_{p_4}}$$

O método da Superfície de Resposta Linear implementado consiste basicamente em aproximar o comportamento do parâmetro  $p$  no ponto de interesse por uma superfície linear definida pelos pontos nodais da malha que são mais próximos deste. Num domínio de 2 dimensões como é o presente caso (domínio  $H_s, T_p$ ) a superfície se resume a um plano. Assim a equação de interpolação é dada por:

$$p(h_s, t_p) = a_0 + a_1 h_s + a_2 t_p$$

onde  $a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$  são os coeficientes lineares da equação. Estes coeficientes são obtidos a partir dos 3 pontos da malha mais próximos ao ponto de interesse  $(h_s, t_p)$  através da solução do seguinte sistema de equações:

$$\begin{pmatrix} 1 & h_{s1} & t_{p1} \\ 1 & h_{s2} & t_{p2} \\ 1 & h_{s3} & t_{p3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix}$$

onde  $(h_{s_i}, t_{p_i})$  e  $p_i$ ,  $i = 1,2,3$ , são, respectivamente, as coordenadas cartesianas e o valor do parâmetro nos três pontos mais próximos ao ponto de interesse. Neste procedimento, o único cuidado requerido é verificar se os três pontos não estão alinhados, o que conduz a uma sistema de equações singular.

O procedimento da Superfície de Resposta Linear, em relação ao método de Interpolação Linear Isoparamétrica, é bem mais flexível, pois não necessita de uma malha regular para a sua aplicação. Esta flexibilidade permite que a malha possa ser refinada com o acréscimo de novos pontos localizados em qualquer ponto do domínio. Como será visto mais adiante, a malha pode ser refinada com o acréscimo de apenas um novo ponto.

### 3.2.3.2- Resultados obtidos

Conforme descrito no item 2.3.4, inicialmente foi adotado uma malha 5x5 conforme Figura 2.17. Os valores da média (funcional mais ambiental), desvio padrão, frequência de máximos e os parâmetros alfa e lambda do ajuste de Weibull da tensão de Von Mises para o Tendão 7 são apresentados nas Figuras 3.14 a 3.18. Para cada um dos pares de pontos Hs-Tp da malha foi realizada uma análise dinâmica aleatória no SITUA/PROSIM com uma duração de 3600 s e os parâmetros apresentados nestas figuras foram calculados a partir das séries temporais de resposta obtidas.

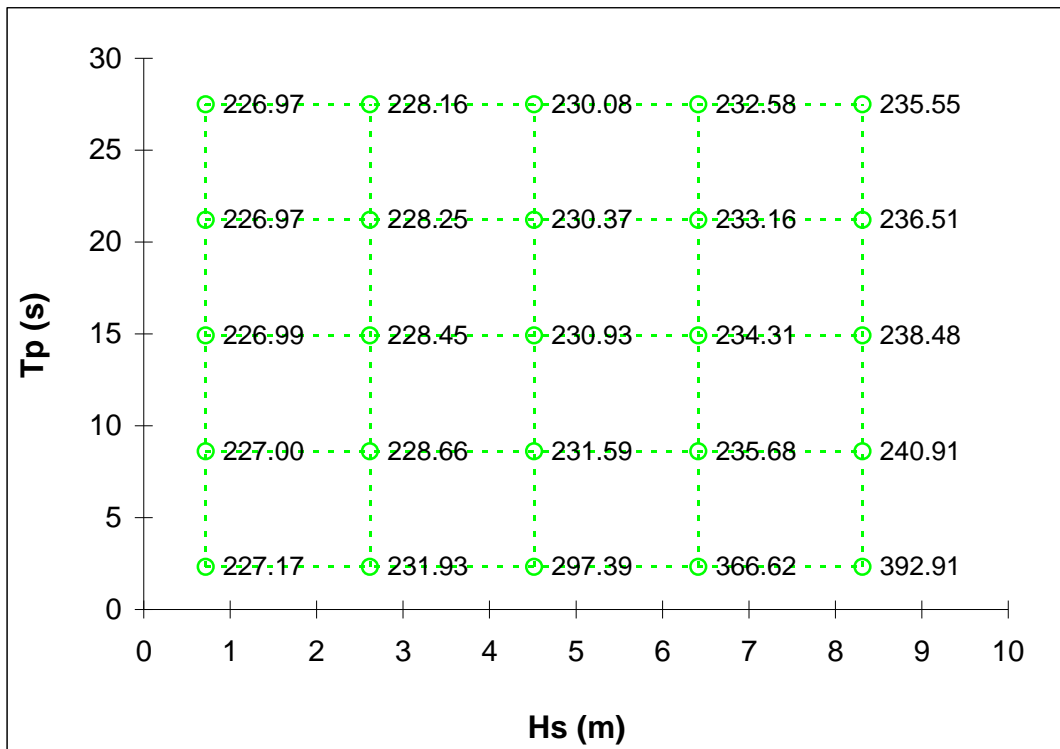


Figura 3. 14: Valores da tensão (MPa) de Von Mises média (funcional + ambiental) do Tendão 7 nos pontos Hs-Tp da malha 5x5 na análise de longo prazo da resposta.

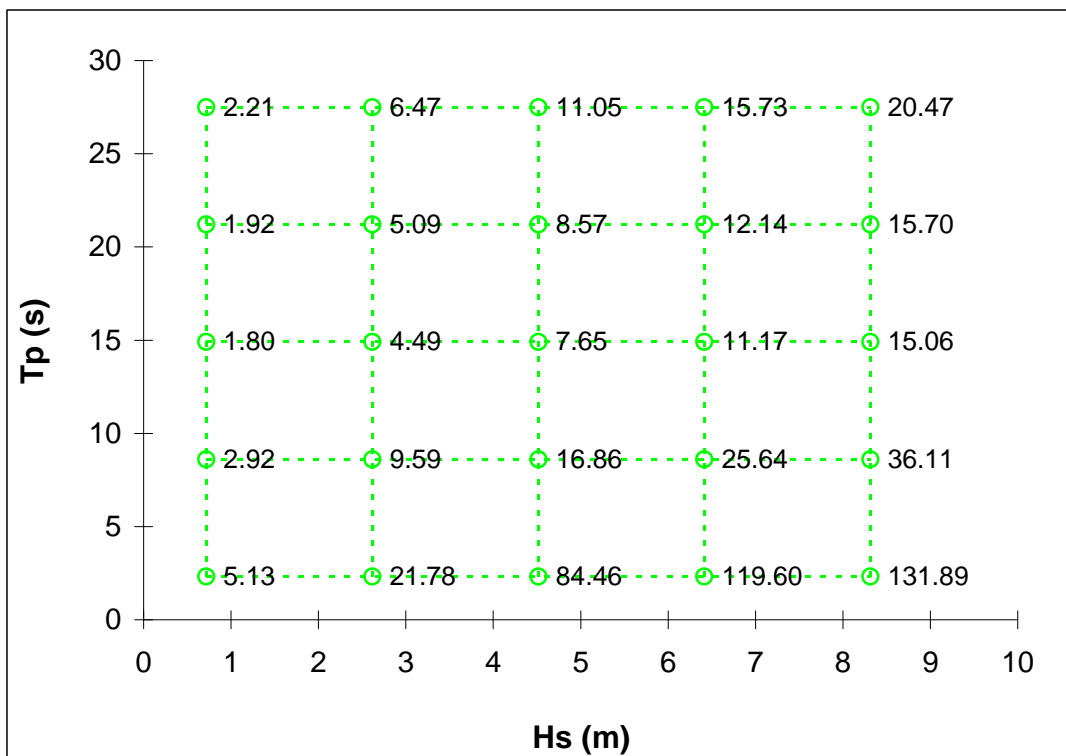


Figura 3. 15: Valores do desvio padrão (MPa) da tensão de Von Mises do Tendão 7 nos pontos Hs-Tp da malha 5x5 na análise de longo prazo da resposta.

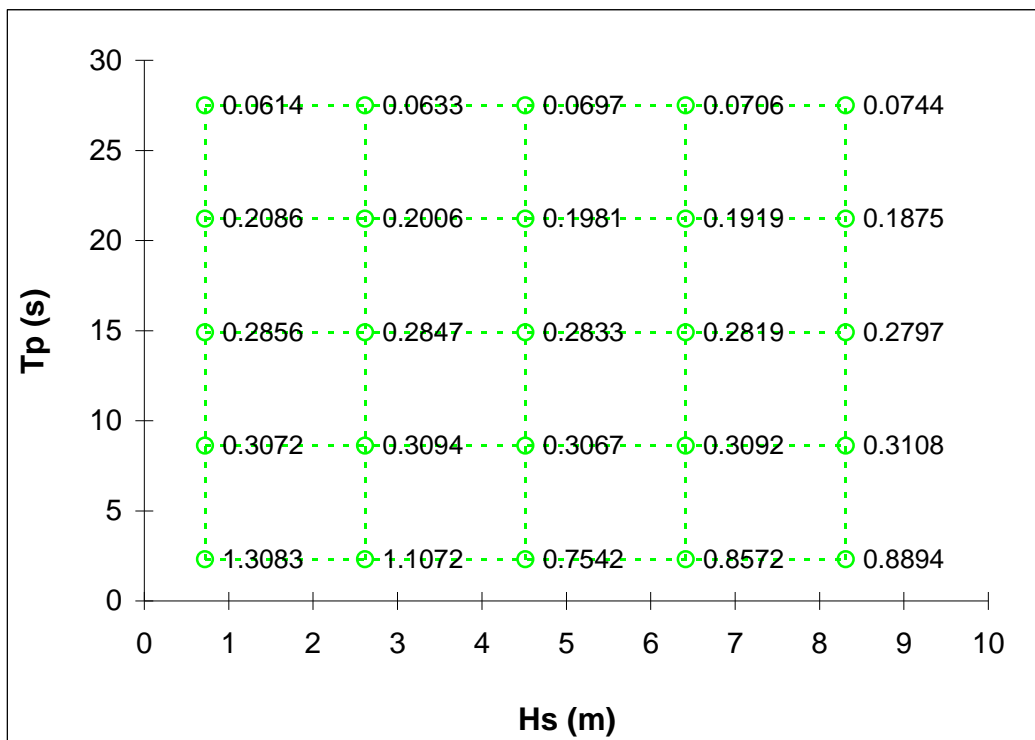


Figura 3. 16: Valores das frequências de máximos da tensão de Von Mises do Tendão 7 nos pontos Hs-Tp da malha 5x5 na análise de longo prazo da resposta.

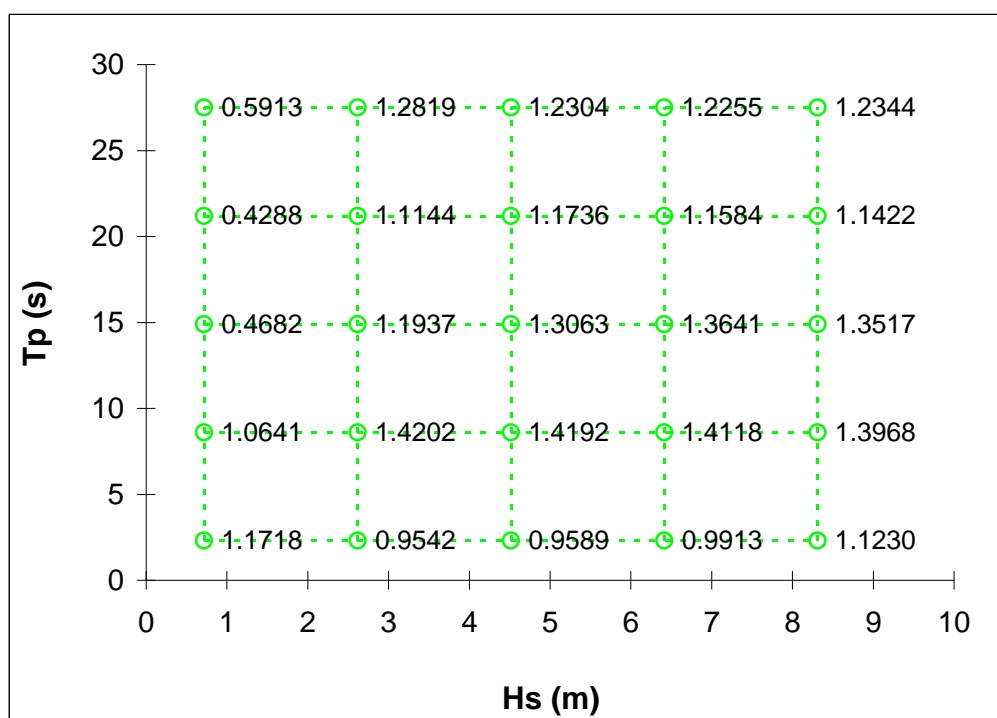
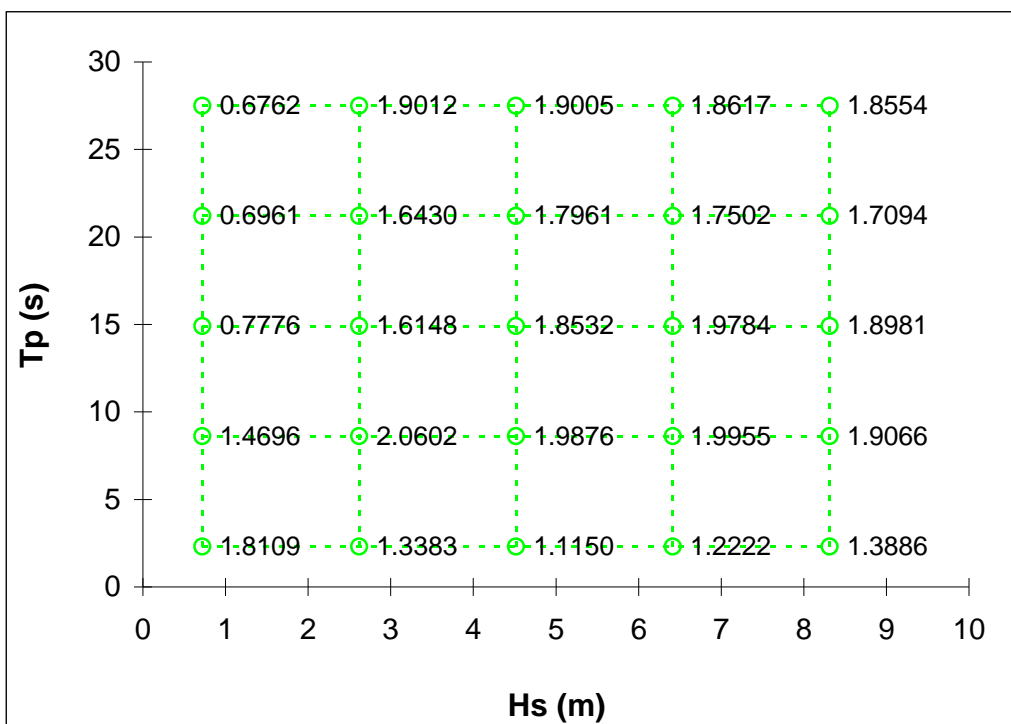


Figura 3. 17: Valores de alfa ( $\alpha$ ) do ajuste de uma distribuição de Weibull da tensão de Von Mises do Tendão 7 nos pontos Hs-Tp da malha 5x5 na análise de longo prazo da resposta.



**Figura 3. 18: Valores de lambda ( $\lambda$ ) do ajuste de uma distribuição de Weibull da tensão de Von Mises do Tendão 7 nos pontos Hs-Tp da malha 5x5 na análise de longo prazo da resposta.**

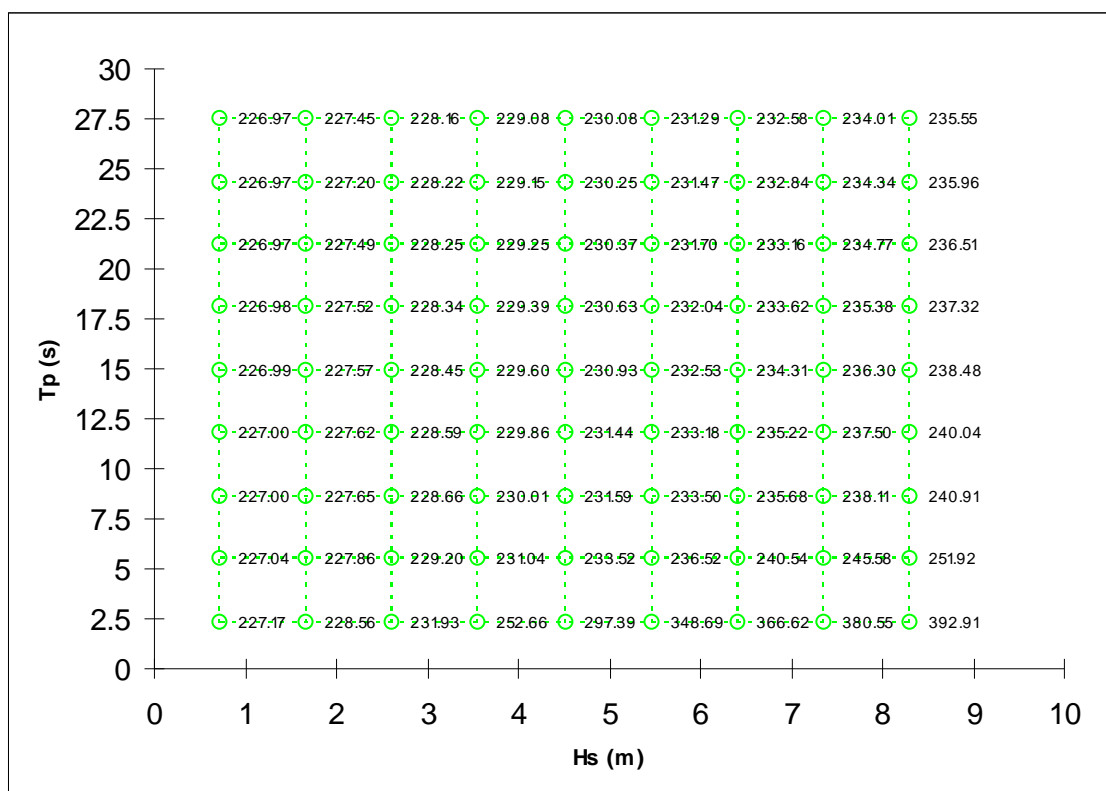
Os valores extremos centenários da tensão de Von Mises, em função do esquema de interpolação, para cada um dos tendões foram obtidos interpolando os resultados apresentados anteriormente e são apresentados na Tabela 3.18. O maior valor de tensão centenária obtido foi o de 405,95 MPa para o Tendão 7.

**Tabela 3. 18 – Tensão de Von Mises (MPa) centenária a partir da malha inicial 5x5.**

TENDÃO	Esquema de Interpolação	
	Int. Linear Isoparamétrica	Superfície de Resposta Linear
1	318,29	295,58
2	300,28	278,48
3	392,41	353,57
4	391,06	352,54
5	318,98	305,78
6	316,33	290,57
7	405,95	349,32
8	404,77	348,31

Observando os resultados apresentados na Tabela 3.18 conclui-se que o resultado varia bastante dependendo do procedimento de interpolação utilizado. O método da superfície de resposta gera resultados até 16,20% menores que o método da interpolação linear isoparamétrica. Por este motivo foi feita uma nova análise com uma malha mais refinada, conforme descrito a seguir.

No intuito de avaliar a influência da malha inicial e verificar também se uma malha mais refinada alteraria os resultados, foi utilizada uma malha 9x9 onde cada intervalo da malha anterior (5x5) foi dividido ao meio. Os pontos Hs-Tp desta malha são apresentados na Tabela 2.5 da seção 2.3.4. Os valores da média, desvio padrão, frequência de máximos, alfa e lambda de Weibull para o Tendão 7 com esta nova discretização estão apresentados, respectivamente, nas Figuras de 3.19 a 3.23.



**Figura 3. 19: Valores da tensão (MPa) de Von Mises média (funcional + ambiental) do Tendão 7 nos pontos Hs-Tp da malha 9x9 na análise de longo prazo da resposta.**

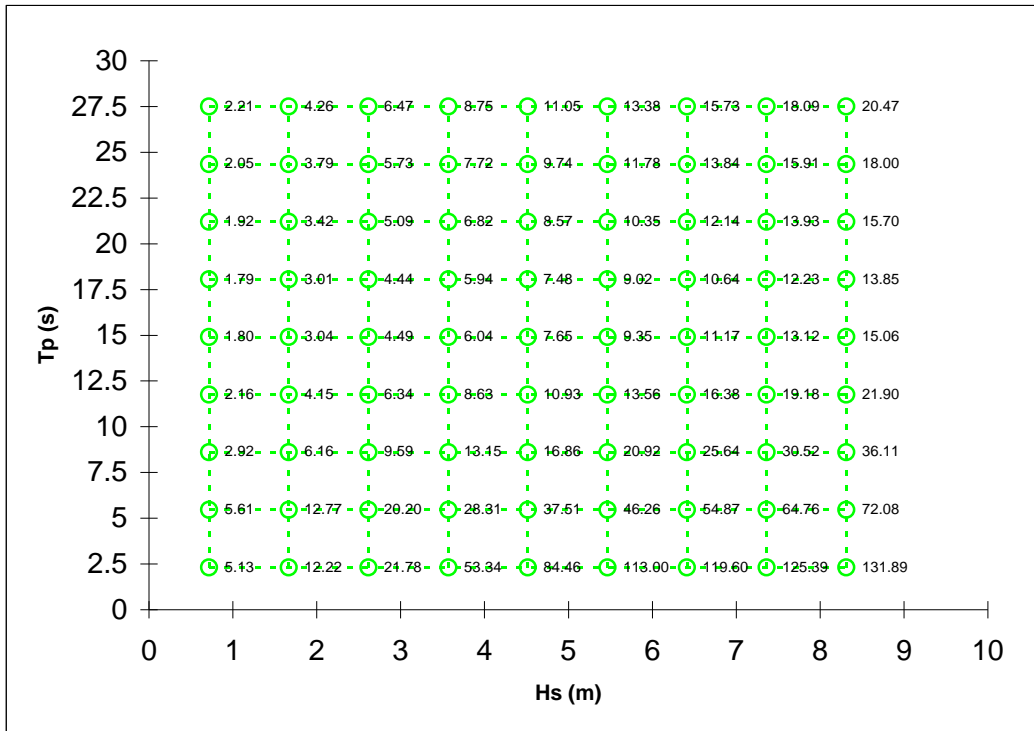


Figura 3. 20: Valores do desvio padrão (MPa) da tensão de Von Mises do Tendão 7 nos pontos Hs-Tp da malha 9x9 na análise de longo prazo da resposta.

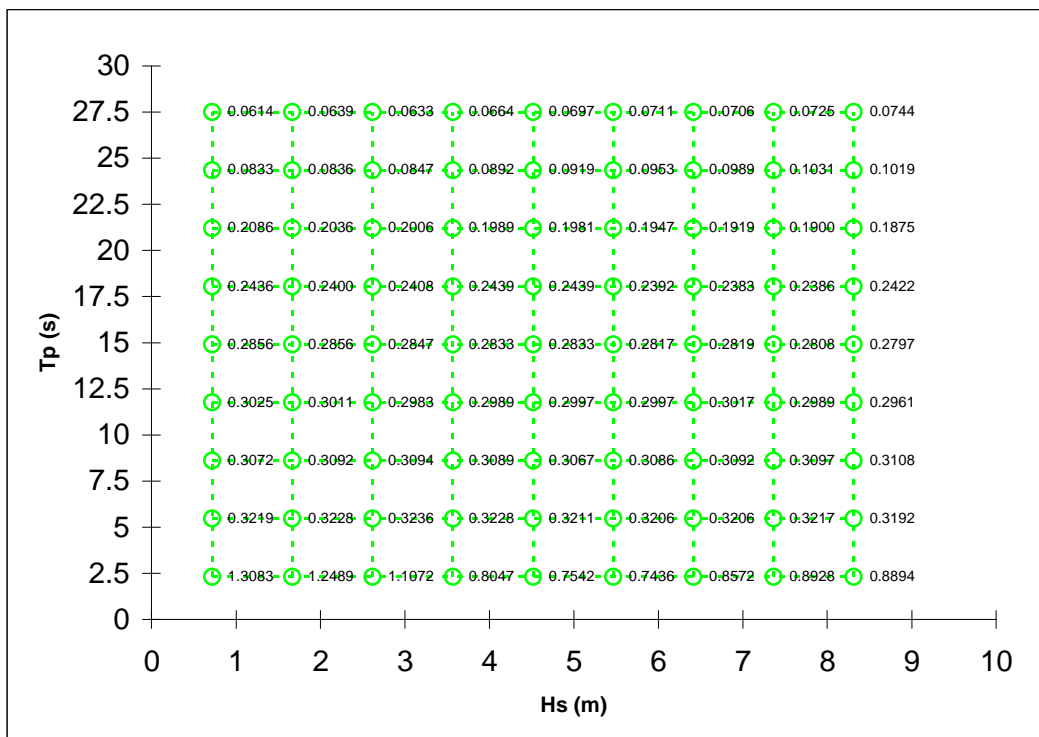


Figura 3. 21: Valores das frequências de máximos da tensão de Von Mises do Tendão 7 nos pontos Hs-Tp da malha 9x9 na análise de longo prazo da resposta.

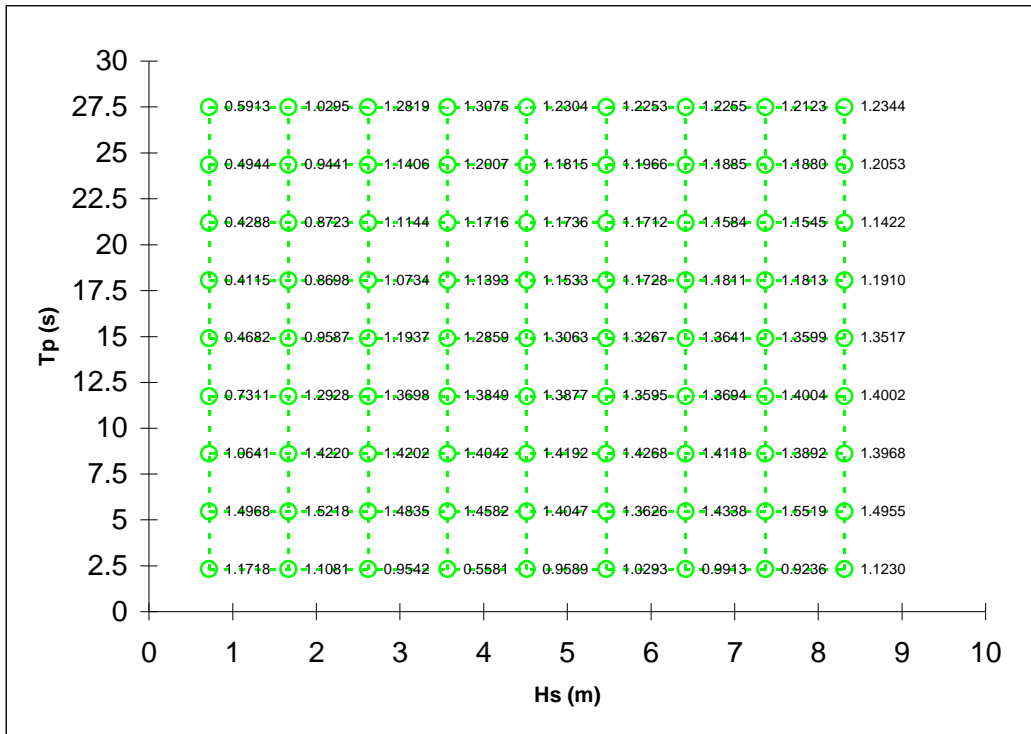


Figura 3. 22: Valores de  $\alpha$  do ajuste de uma distribuição de Weibull da tensão de Von Mises do Tendão 7 nos pontos  $H_s$ - $T_p$  da malha 9x9 na análise de longo prazo da resposta.

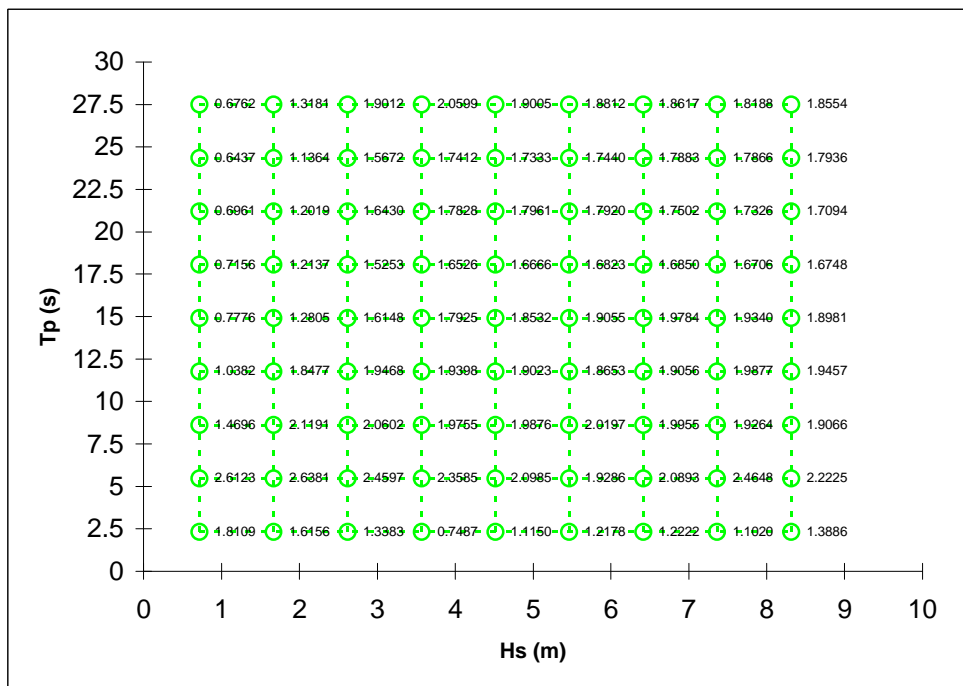


Figura 3. 23: Valores de  $\lambda$  do ajuste de uma distribuição de Weibull da tensão de Von Mises do Tendão 7 nos pontos  $H_s$ - $T_p$  da malha 9x9 na análise de longo prazo da resposta.

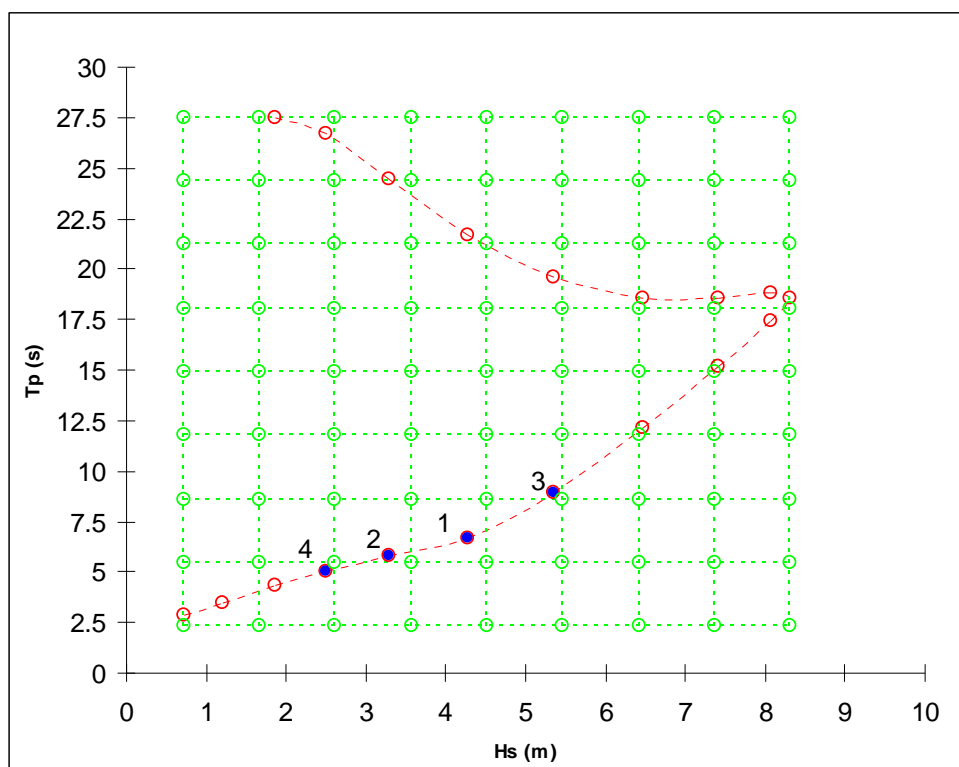
A Tabela 3.19 apresenta os resultados obtidos com a malha de interpolação 9x9 para as tensões de Von Mises centenárias nos oito tendões. O maior valor de tensão centenária obtido foi o de 349,42 MPa para o Tendão 3.

**Tabela 3. 19 –Tensão de Von Mises (MPa) centenária a partir da malha 9x9**

Tendão	Esquema de Interpolação	
	Int. Linear Isoparamétrica	Superfície de Resposta Linear
1	293,87	294,27
2	277,30	277,46
3	348,57	349,42
4	347,64	348,44
5	300,76	301,22
6	288,91	289,28
7	345,37	346,36
8	344,40	345,36

Comparando-se os resultados da Tabela 3.18 (malha 5x5) com os resultados apresentados na Tabela 3.19 (malha 9x9) observa-se que para a malha 5x5 há grande diferença de resultados entre os dois métodos de interpolação estudados. Porém, para a malha 9x9 os resultados são muito próximos para ambos os procedimentos, ou seja, pode-se considerar os resultados confiáveis para esta malha independentemente do interpolador utilizado.

Com o objetivo de complementar a avaliação sobre os valores obtidos para os parâmetros interpolados na análise de longo prazo, realizou-se também uma comparação entre os parâmetros interpolados e os resultados exatos das análises dos pontos do contorno ambiental que forneceram maiores valores do valor extremo centenário, tomando como referência o Tendão 7. A Figura 3.24 ilustra as análises de contorno ambiental consideradas na comparação. Os valores obtidos para o procedimento da interpolação linear isoparamétrica são apresentados na Tabela 3.20. Os valores obtidos para o procedimento da superfície de resposta linear são apresentados na Tabela 3.21. Observando-se os resultados obtidos nesta comparação observa-se que a malha de 9x9 produz resultados satisfatórios para os parâmetros interpolados para ambos os procedimentos de interpolação.



**Figura 3. 24: Análises do contorno ambiental selecionadas para comparação dos parâmetros interpolados da análise de longo prazo.**

**Tabela 3. 20 – Comparação dos parâmetros interpolados para a análise de longo prazo através da interpolação linear isoparamétrica**

Parâmetro	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4	
	Hs = 4,3 m		Hs = 3,3 m		Hs = 5,4 m		Hs = 2,5 m	
	Yp = 6,7 s		Tp = 5,8 s		Tp = 8,9 s		Tp = 5,1 s	
	Cont.Amb. (Exato)	Longo Prazo (Interpolado)	Cont.Amb. (Exato)	Longo Prazo (Interpolado)	Cont.Amb. (Exato)	Longo Prazo (Interpolado)	Cont.Amb. (Exato)	Longo Prazo (Interpolado)
Alfa ( $\alpha$ )	1,4197	1,4210	1,4674	1,4600	1,3876	1,4200	1,4351	1,4160
Lambda ( $\lambda$ )	2,1074	2,1250	2,1651	2,3450	1,9109	2,0030	2,1004	2,3220
Média (MPa)	231,66	232,02	230,22	230,37	233,28	233,28	229,11	229,46
Desvio padrão (MPa)	24,92	27,61	22,82	24,18	20,16	19,87	22,25	19,88
Frequência de máximos (1/s)	0,3164	0,3170	0,3172	0,3210	0,3078	0,3080	0,3228	0,4310
Valor extremo mais provável no curto prazo (MPa)	327,30	337,24	318,40	316,76	316,90	313,48	315,80	300,00

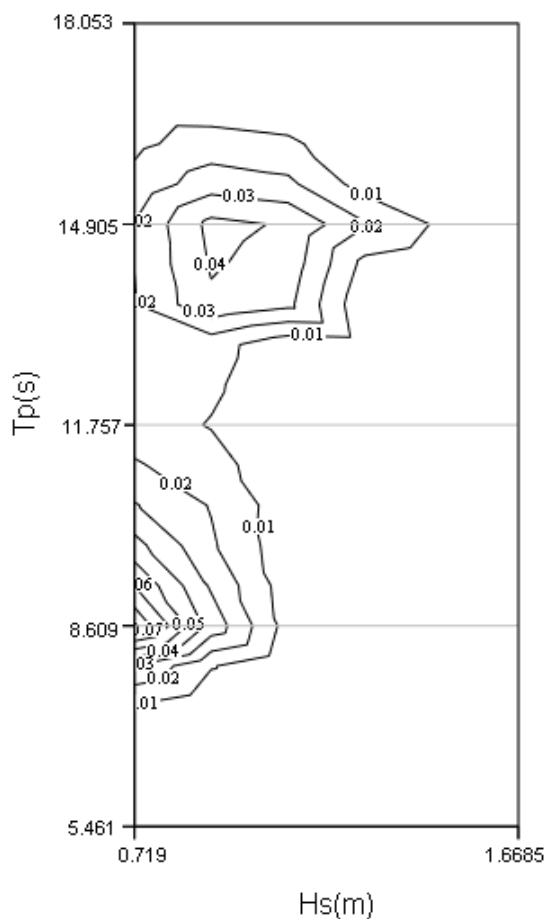
**Tabela 3. 21 –Comparação dos parâmetros interpolados para a análise de longo prazo através da superfície de resposta linear**

Parâmetro	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4	
	Hs = 4,3 m		Hs = 3,3 m		Hs = 5,4 m		Hs = 2,5 m	
	Tp = 6,7 s		Tp = 5,8 s		Tp = 8,9 s		Tp = 5,1 s	
	Cont.Amb. (Exato)	Longo Prazo (Interpolado)	Cont.Amb. (Exato)	Longo Prazo (Interpolado)	Cont.Amb. (Exato)	Longo Prazo (Interpolado)	Cont.Amb. (Exato)	Longo Prazo (Interpolado)
Alfa ( $\alpha$ )	1,4197	1,4300	1,4674	1,4600	1,3876	1,4200	1,4351	1,4150
Lambda ( $\lambda$ )	2,1074	2,1610	2,1651	2,3460	1,9109	2,0030	2,1004	2,3210
Média (MPa)	231,66	231,90	230,22	230,34	233,28	233,28	229,11	229,48
Desvio padrão (MPa)	24,92	26,87	22,82	24,00	20,16	19,86	22,25	19,90
Frequência de máximos (1/s)	0,3164	0,3170	0,3172	0,3220	0,3078	0,3080	0,3228	0,4290
Valor extremo mais provável no curto prazo (MPa)	327,30	333,28	318,40	316,05	316,90	313,44	315,80	300,06

As Figuras 3.25 a 3.32 apresentam para cada tendão, respectivamente, as isolinhas com os coeficientes de participação dos estados de mar no valor extremo centenário obtido (vide seção 2.3.4). Estes resultados baseiam-se na malha 9x9 e no método de interpolação Superfície de Resposta Linear. Observa-se a semelhança de comportamento para os pares de tendões diagonalmente opostos (Tendões 1 e 2 com Tendões 5 e 6 e dos Tendões 3 e 4 com os Tendões 6 e 7). Além disto, verifica-se também que os tendões os estados de mar com maiores contribuições podem variar de tendão para tendão, bem como casos com mais de uma região com contribuição significativa na resposta. A Tabela 3.22 apresenta individualmente por tendão os estados de mar mais participativos na resposta centenária. A resposta dos tendões mais carregados (3, 4, 7 e 8) é predominantemente oriunda de uma região pequena centralizada no em torno de Hs = 3,9m e Tp = 6,7 s.

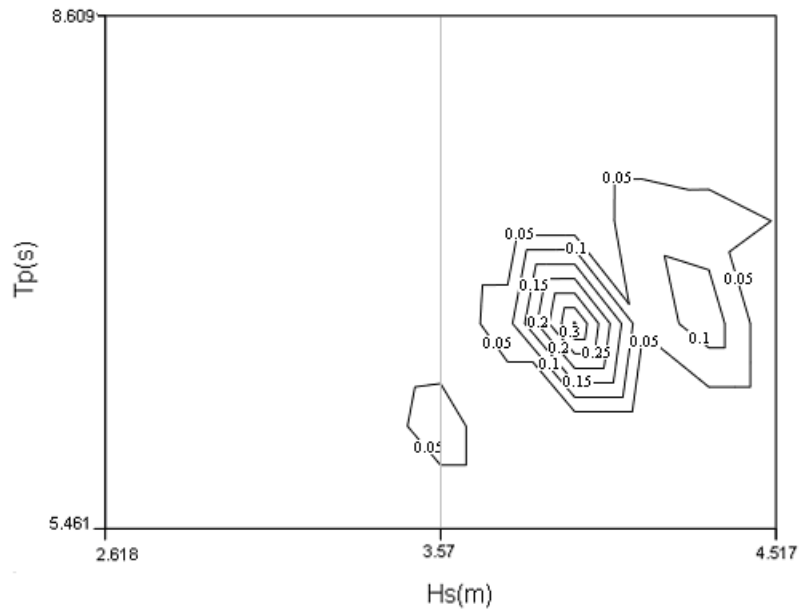
**Tabela 3. 22 – Estados de mar com maior contribuição na resposta. Método da Superfície de Resposta e malha 9 x 9 .**

Tendão	Estado de mar do maior coeficiente de participação	
	Hs (m)	Tp (s)
1	0,7	8,6
2	0,9	14,9
3	3,9	6,7
4	3,9	6,7
5	0,9	13,6
6	0,7	8,6
7	3,9	6,7
8	3,9	6,7

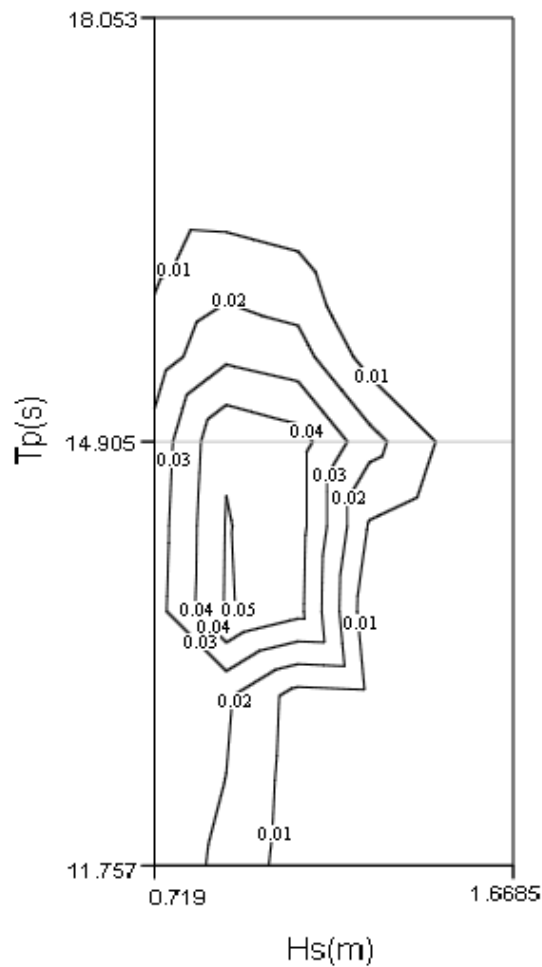


**Figura 3. 25: Tendão 1. Coeficientes de participação na resposta. Método da Superfície de Resposta e malha 9x9.**





**Figura 3. 28: Tendão 4. Coeficientes de participação na resposta. Método da Superfície de Resposta e malha 9x9.**



**Figura 3. 29: Tendão 5. Coeficientes de participação na resposta. Método da Superfície de Resposta e malha 9x9.**

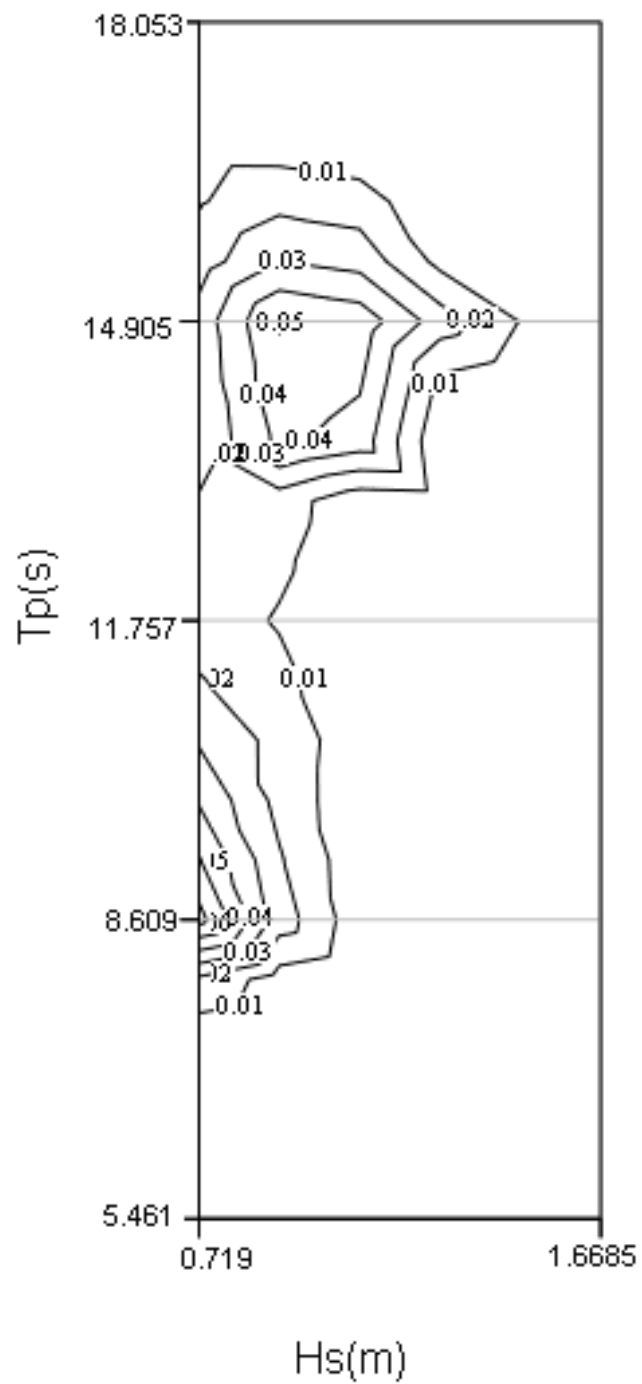
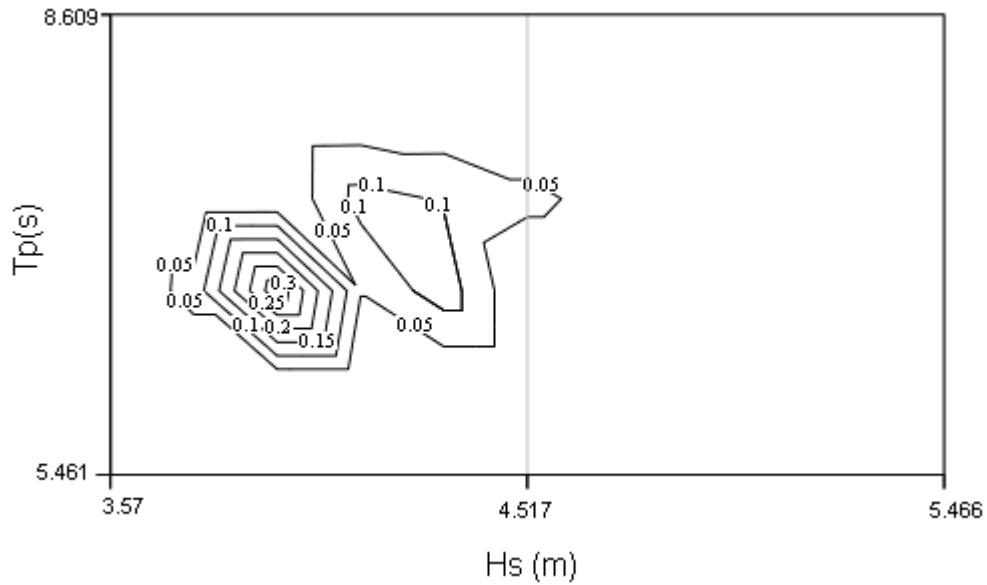
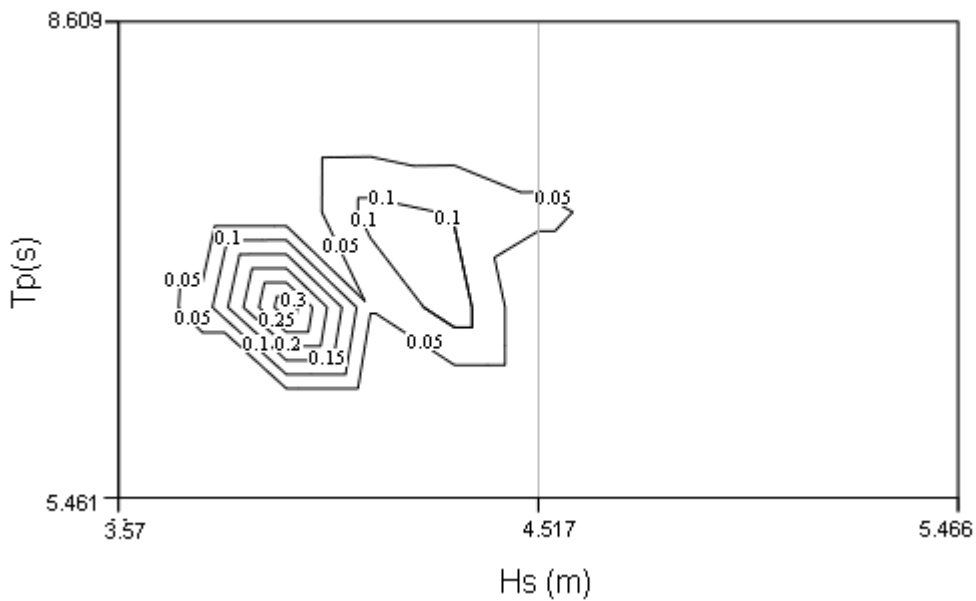


Figura 3. 30: Tendão 6. Coeficientes de participação na resposta. Método da Superfície de Resposta e malha 9x9.



**Figura 3. 31: Tendão 7. Coeficientes de participação na resposta. Método da Superfície de Resposta e malha 9x9.**



**Figura 3. 32: Tendão 8. Coeficientes de participação na resposta. Método da Superfície de Resposta e malha 9x9.**

Diante da importância da região no entorno do estado de mar de  $H_s=3,9\text{m}$  e  $T_p=6,7\text{ s}$ , foi então realizada uma análise dinâmica aleatória de curto prazo adicional para este estado de mar de maior contribuição e refez-se a integração, agora com uma malha mais refinada (9x9 mais 1 ponto extra). Com este ponto adicional, dentre os apresentados, o método de interpolação mais apropriado é o da Superfície de Resposta. A Tabela 3.23 apresenta os resultados desta análise mais refinada e

também os da malha regular 9x9 para os tendões mais carregados (3, 4, 7 e 8). Os resultados são apresentados somente para os tendões para os quais o estado de mar acrescentado nas análises foi o mais relevante (teve maior coeficiente de participação na resposta de longo prazo), ou seja, os tendões 3,4,7 e 8.

**Tabela 3. 23 – Tensão de Von Mises (MPa) centenária para os tendões mais carregados. Método Superfície de Resposta e malhas 9x9 e 9 x 9 + 1 ponto de refinamento.**

<b>Tendão</b>	<b>Malha 9x 9 (sem refinar)</b>	<b>Malha 9x 9 (com refinamento)</b>
3	349,4	341,4
4	348,4	340,3
7	346,4	337,0
8	345,4	335,9

Observando-se a Tabela 3.23, observa-se uma diferença nos resultados bem pequena (diminuição entre 2% e 2,5%) o pode-se concluir em termos práticos que o resultado obtido é bastante satisfatório.

### **3.2.4 – Comparação dos Resultados das Metodologias**

A Tabela 3.24 apresenta um resumo comparativo dos resultados obtidos para a tensão extrema de Von Mises através de todas as metodologias de análise investigadas neste trabalho. Para a metodologia de longo-prazo da resposta são apresentados os resultados do esquema de interpolação Superfície de Resposta com a malha 9x9 (sem o ponto de refinamento). A Tabela 3.25 apresenta os resultados descontando-se os valores da tensão de Von Mises devido à pré-tração inicial do sistema, ou seja, nesta tabela encontra-se apenas os resultados da parcela ambiental deste parâmetro.

**Tabela 3. 24 – Tensão de Von Mises (MPa) extrema: Resumo de resultados do valor total (funcional + ambiental)**

Tendão	Metodologia de Análise			
	Onda Regular	Onda Irregular (Hs <sub>100</sub> )	Onda Irregular (Contorno Ambiental)	Integração de Longo-Prazo
1	329,7	277,8	272,6	294,3
2	330,2	277,6	271,8	277,5
3	333,1	280,9	330,1	349,4
4	333,1	280,7	329,1	348,4
5	330,0	277,5	271,6	301,2
6	329,5	278,5	273,7	289,3
7	328,3	295,9	327,3	346,4
8	328,3	295,8	326,4	345,4

**Tabela 3. 25 – Tensão de Von Mises (MPa) extrema: Resumo de resultados da parcela ambiental.**

Tendão	Metodologia de Análise			
	Onda Regular	Onda Irregular (Hs <sub>100</sub> )	Onda Irregular (Contorno Ambiental)	Integração de Longo-Prazo
1	135,9	84,0	78,8	100,5
2	136,4	83,8	78,0	83,7
3	139,3	87,1	136,3	155,6
4	139,3	86,9	135,3	154,7
5	136,2	83,7	77,8	107,4
6	135,7	84,7	79,9	95,5
7	134,5	102,1	133,5	152,6
8	134,5	102,0	132,6	151,6

Após a comparação dos resultados obtidos pelas metodologias estudadas para estimativa de tensão de Von Mises extrema centenária nos tendões de uma TLP, observa-se que o tendão mais carregado não é sempre o mesmo, ele varia de acordo com a metodologia utilizada. Isto significa que não é possível na prática de projeto eleger a priori o par de tendões que será considerado relevante para o dimensionamento, é preciso analisar a resposta de todos os tendões aos carregamentos ambientais.

A partir do resumo dos resultados apresentado na Tabela 3.25, observa-se também que o método da onda regular levou a resultados mais conservadores que o da onda irregular. O método do contorno ambiental se mostrou bastante adequado para aplicações na prática, quando análise de longo prazo não for viável. Este método

levou a resultados mais conservadores que a metodologia de onda irregular para os tendões mais solicitados da TLP. Isto significa que o estado de mar em que os tendões encontram-se mais solicitados não é necessariamente o de maior intensidade (altura de onda).

A análise de longo prazo, que a metodologia mais precisa do ponto de vista teórico, foi a metodologia que apresentou os maiores resultados entre todas, para os tendões mais carregados. Apesar de ser a mais complexa e “cara” computacionalmente, deve-se sempre se considerar a possibilidade de sua aplicação em projetos estruturais da prática, uma vez que leva a resultados mais corretos para estimativa de resposta extrema de estruturas oceânicas. Entretanto, outras metodologias podem ser usadas, principalmente a do contorno ambiental extremo, desde que sejam calibrados coeficientes de segurança apropriados para que o índice de confiabilidade (ou probabilidade de falha) alvo seja mantido.

# CAPÍTULO 4

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

### 4.1 – Conclusões

Este trabalho comparou as principais metodologias de projeto existentes para a estimativa de resposta extrema de estruturas oceânicas. Como estudo de caso foi utilizado um modelo numérico acoplado (casco e tendões) de uma TLP e o parâmetro de resposta investigado foi a tensão combinada de Von Mises nos tendões.

As metodologias de análise utilizadas no trabalho foram as seguintes:

- Onda de projeto (determinística) centenária;
- Tempestade de projeto (aleatória) usando o estado de mar centenário “tradicional” (com variações no período de pico);
- Resposta máxima para tempestades de projeto (aleatórias) para vários estados de mar localizados sobre o contorno ambiental centenário;
- Resposta extrema centenária baseada na integração de longo-prazo.

Um aspecto importante a ser observado fundamental para a comparação é que todos os dados ambientais utilizados nas análises são coerentes, pois foram definidos a partir da mesma distribuição conjunta de  $H_s$  e  $T_p$ .

A análise de longo-prazo é a metodologia mais precisa por considerar apropriadamente a contribuição dinâmica na resposta de todos os estados de mar da locação. Por outro lado, esta é a metodologia que demanda maior esforço computacional e também o uso de técnicas apropriadas de interpolação para realizar a integração numérica da resposta. Durante o desenvolvimento do trabalho foi possível observar que para utilização da análise de longo prazo de forma correta é preciso observar se o número de pontos ( $H_s$ - $T_p$ ) adotado para a discretização é suficiente para obtenção de resultados apropriados. Inicialmente foi estudada uma malha de 5 x 5 que não apresentou resultados satisfatórios, quando comparou-se os resultados obtidos por diferentes técnicas de interpolação. Uma nova malha de 9 x 9 foi adotada e, então, chegou-se aos resultados mais precisos.

Dentre os métodos de interpolação utilizados na integração numérica da análise de longo prazo, a Técnica de Superfície de Resposta Linear se mostrou o mais versátil, pois se aplica a malhas irregulares. Esta característica do procedimento permite o acréscimo de novos pontos individuais na malha de interpolação sem nenhuma dificuldade. Assim, o refinamento na estimativa da resposta pode-se facilmente feito acrescentando-se na malha de interpolação os pontos característicos das regiões de maior contribuição para a resposta de longo prazo.

No presente trabalho, a análise de longo prazo foi a que apresentou os maiores resultados entre todas as metodologias analisadas. A metodologia da tempestade de projeto baseada no contorno ambiental centenário apresentou sempre resultados inferiores, porém, com uma “coerência” com relação aos resultados de longo prazo. Isto sugere investigar um valor de um coeficiente de majoração para relacionar um resultado ao outro. A metodologia da onda determinística centenária e a do estado de mar “tradicional” centenário não são as mais recomendadas para estruturas oceânicas com um comportamento dinâmico acentuado. Conforme a situação elas podem superestimar ou subestimar (como no presente caso) a resposta dependendo dos períodos naturais da estrutura e dos períodos da onda. Em termos práticos, o método do contorno ambiental é o mais indicado para ser utilizado em projetos sempre que uma análise de longo prazo não puder ser realizada.

#### **4.2 – Sugestões para futuros trabalhos**

Como continuações deste trabalho existem vários temas que podem ser abordados. Alguns deles são listados a seguir:

- Investigar a possibilidade de metodologia auto-adaptativa mais eficiente (redução do número de pontos da malha de integração, i.e., diminuir o número de análises aleatórias de curto prazo) para integração da resposta de longo-prazo;
- Analisar também outras funções de interpolação tais como: interpolação quadrática incompleta, etc...
- Consideração da direcionalidade das ações ambientais e da ocorrência simultânea dos estados de mar de *sea* e de *swell*;

- Desenvolver uma metodologia que analise conjuntamente a fadiga e valores extremos através da análise de longo prazo;
- Calibração de fatores de segurança, através de confiabilidade estrutural, apropriados para o dimensionamento dos tendões de TLPs na costa brasileira para as metodologias do contorno ambiental e a baseada na estatística da resposta (longo-prazo).

# CAPÍTULO 5

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANG, A.S., and TANG, W.,1984, *Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Volume II - Decision, Risk and Reliability*. John Wiley & Sons, New York.

API, 2000, *Recommended Practice for Planning Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms. API RP 2A*. 21 ed. API Publishing Services, Washington.

API, 2006, *Design of Risers for Floating Producing Systems (FPSs) and Tension-Leg Platforms (TLPs).API RP 2RD*. 1 ed. API Publishing Services, Washington.

BAARHOLM, G.S., HAVER,S., OKLAND, O.L., 2010, "Combining contours of significant wave height and peak period with platform response distributions for predicting design response", *Marine Structures*,v.23,n.2 (Abril), pp.147-163.

BATHE,K.J., 1982, *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. Prentice Hall, New Jersey.

CICILIA, F. B., 2004, *Critério de Projeto Baseado em Confiabilidade para o Sistema de Tendões de uma TLP*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DNV,2008, *Offshore Standard –Position Mooring- DNV-OS-E301*, Det Norske Veritas.

FALTINSEN, O. M., 1990, *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*, Press Syndicate of the University of Cambridge, New York.

HASSELMANN, K. *et al*, 1973, *Measurements of the wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*. Deutsches Hydrographisches Institut, Series A, 12.

HAVER, S.K., NYHUS, K.A., 1986, "A Wave Climate Description for Long Term Response Calculations". *Proceedings of the 5th International Offshore Mechanics and Artic Engineering Symposium*, Vol. IV, New York, pp. 27-34.

HAVER,S.K.,2007,*Prediction of Characteristics Response for Design Purposes*, StatoilHydro, Stavanger.

LIANG,D.A.,2009, *Avaliação de Metodologia de Projeto com Análise Acoplada para Plataforma do Tipo TLP*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MADSEN, H. O., KRENK, S., LIND, N. C.,1986, *Methods of structural safety*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

NAESS,A.,MOAN,T.,2005,"Probabilistic Design of Offshore Structures". In: Chakrabarti, S. (ed), *Handbook of Offshore Engineering*, 1 ed, chapter 5, Elsevier.

NEWLAND, D.E., 1993, *An Introduction to Random Vibrations and Spectral Analysis*, 3rd Edition, Longman, Cambridge.

NEWMAN, J.N.; SCLAVOUNOS, P.D. ,1988, "The computation of wave loads on large offshore structures". *Proceedings of Boss 88*, Norway, pp. 1-19.

NORSOK, 1999, *Actions and action effects –NORSOK Standard N-003*, NORSOK.

PIERSON Jr, W.J., MOSKOWITZ, L., 1964, "A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii". *Journal of Geophysical Research*, 69, 24, pp. 5181-5203.

VIDEIRO, P.M.,1998, *Reliability Based Design of Marine Structures*, PhD. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway.

SØDAHL, N.R., 1991, *Methods for Design and Analysis of Flexible Risers*, Dr.Ing. Thesis, The Norwegian Institute of Technology, 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.

WINTERSTEIN, S. R., and ENGBRETSEN, K., 1998, "Reliability-Based Prediction of Design Loads and Responses for Floating Ocean Structures", *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering(OMAE)*, Lisbon.