



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica
Programa de Projeto de Estruturas

Rafael Nascimento da Encarnação

ANÁLISE DE FADIGA EM UNIDADES FLUTUANTES DO TIPO FPSO



UFRJ

Rafael Nascimento da Encarnação

ANÁLISE DE FADIGA EM UNIDADES FLUTUANTES DO TIPO FPSO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Projeto de Estruturas.

Orientador:

Gilberto Bruno Ellwanger

Rio de Janeiro

2018

Encarnação, Rafael Nascimento da
Análise de fadiga em unidades flutuantes do tipo FPSO /
Rafael Nascimento da Encarnação – 2018.
135 p.: 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Projeto de Estruturas) –
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica,
Programa de Projeto de Estruturas, Rio de Janeiro, 2018.

Orientador: Gilberto Bruno Ellwanger

1. Fadiga, 2. Análise espectral, 3. Método *full stochastic*, 4.
FPSO, 5. DNV GL. I. Ellwanger, Gilberto. II. Universidade Federal
do Rio de Janeiro. Escola Politécnica. III. Título.



UFRJ

ANÁLISE DE FADIGA EM UNIDADES FLUTUANTES DO TIPO FPSO

Rafael Nascimento da Encarnação

Orientador:

Gilberto Bruno Ellwanger

Dissertação de Mestrado apresentada Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Projeto de Estruturas.

Aprovada pela Banca:

Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, D. Sc.

Prof. Maria Cascão Ferreira de Almeida, D. Sc.

Eng. Paulo Mauricio Videiro, D. Sc.

Eng. Carlos Alberto Bardanachvili, D. Sc.

Rio de Janeiro
2018

Aos meus pais, Vera Lúcia e Ivo.

À minha esposa Roberta.

Ao meu filho, Rafael.

“Só há duas maneiras de viver a vida:
a primeira é vivê-la como se os milagres não existissem
e a segunda é vivê-la como se tudo fosse milagre”.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

A Deus por suas graças, pela beleza e pela perfeição presente em tudo aquilo o que é visível e também em tudo o que não é visível.

Aos meus pais, Vera Lúcia e Ivo, por todo o amor dedicado a mim e por me ensinarem a ser quem hoje sou. À minha querida irmã Danielle, por ter estado comigo durante toda a sua vida. À minha esposa Roberta pelo incentivo e companheirismo nos momentos de alegria e nas dificuldades e por ter me dado a oportunidade de viver a experiência mais importante e valiosa que tive: ser pai do Rafael Júnior, que em tão pouco tempo de vida já foi capaz de me fazer entender tanta coisa.

Ao grande mestre Gilberto Ellwanger pela orientação, apoio, paciência e amizade desde os tempos de graduação. Aos professores Sérgio Hampshire e Maria Cascão pela confiança depositada em mim.

Às empresas Genesis Oil and Gas e TechnipFMC, pelas oportunidades de aprendizado e vivência às quais fui apresentado. À Júlia Barros, pela orientação e incentivo que pautaram momentos importantes da minha carreira. Aos colegas/amigos de trabalho, pelos conhecimentos compartilhados e momentos de descontração que foram fundamentais para superar os desafios e dificuldades. Em especial ao Bardana, que foi o inspirador na escolha da minha linha de pesquisas e continua sendo um exemplo de dedicação e comprometimento. Também aos companheiros Wilson Damasceno, Rodrigo Nassur e Rafael Lara.

A todos os amigos, pela compreensão e apoio incondicionais. Cito aqui o Carlos Magno, um irmão que levarei para sempre comigo. E a todos aqueles que de alguma forma participaram direta ou indiretamente, dessa longa jornada.

RESUMO

ENCARNAÇÃO, Rafael Nascimento da. **Análise de fadiga em unidades flutuantes do tipo FPSO**. Rio de Janeiro. 2018. Dissertação (Mestrado) – Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2018.

Nesta dissertação, é desenvolvida a análise de fadiga estrutural de conexões entre estruturas transversais e longitudinais do casco de uma unidade flutuante do tipo FPSO. O foco do trabalho é a análise espectral pelo método estocástico completo (*full stochastic*), proposto pelas normas da DNV GL, utilizando os *softwares* do pacote Sesam®, desenvolvido pelo mesmo grupo de empresas dessa sociedade classificadora. Entretanto, outras metodologias também são abordadas.

Na parte teórica do texto, é apresentada uma descrição dos principais pontos da metodologia utilizada. Conceitos importantes para o desenvolvimento do tema são abordados, tais quais: a metodologia de *hot spot* com foco na modelagem em elementos finitos, fatores de concentração de tensões (SCF), fatores de projeto de fadiga (DFF), geração de operadores de resposta (RAO), estatística de curto e de longo prazos para cargas ambientais. Além disso, são apresentadas as mais importantes referências da indústria para os temas abordados.

Na parte prática do texto, são mostradas as principais funcionalidades de cada uma das ferramentas de análise utilizadas no fluxo de trabalho de uma análise de fadiga. Ao final, foram comparados os danos à fadiga calculados para as condições ambientais das bacias sedimentares de Campos e de Santos, as mais importantes regiões de exploração de petróleo na costa do Brasil.

Palavras-chave: fadiga, análise espectral, método *full stochastic*, FPSO, DNV GL.

ABSTRACT

ENCARNAÇÃO, Rafael Nascimento da. **Fatigue analysis of FPSO type floating units.** Rio de Janeiro. 2018. Thesis (Master) – Structure Design Program, Polytechnic School, Rio de Janeiro Federal University. Rio de Janeiro. 2018.

In this thesis, a FPSO floating unit hull transversal and longitudinal structures connections structural fatigue analysis is developed. The focus here is the spectral analysis through full stochastic method, proposed by DNV GL rules, using Sesam® software packages, developed by this classification society pool of companies. Nevertheless, other methodologies are also discussed.

In the text theoretical part, the chosen methodology main aspects description are presented. Some important aspects for the theme development are addressed, such as: finite elements modelling focused on hot spot methodology, stress concentration factors (SCF), design fatigue factors (DFF), response amplitude operators (RAO), environmental loads long-term and short-term statistics. Besides that, the industry's most important references for the approached themes are presented.

In the text practical part, each analysis tool main functionalities for a fatigue analysis work flow are shown. Finally, comparisons between fatigue damages calculated for Campos and Santos sedimentary basins, Brazilian coast most important oil exploitation region.

Keywords: fatigue, spectral analysis, full stochastic method, FPSO, DNV GL.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Revisão bibliográfica	4
1.3.1	<i>Normas DNV GL</i>	4
1.3.2	<i>Outras normas de projeto</i>	6
1.3.3	<i>Outras referências</i>	7
1.4	Estrutura da dissertação	8
2	CONCEITOS ESTATÍSTICOS	9
2.1	Processo determinístico	9
2.2	Processo aleatório	9
2.2.1	<i>Casos particulares de processos aleatórios</i>	10
2.3	Distribuições de probabilidades	11
2.3.1	<i>Função densidade de probabilidade (FDP)</i>	11
2.3.2	<i>Função cumulativa de probabilidade (FCP)</i>	11
2.3.3	<i>Parâmetros de um processo aleatório</i>	12
2.3.4	<i>Algumas FDP</i>	14
2.4	Representação de série no domínio do tempo.....	18
2.5	Domínio do tempo x domínio da frequência	19
2.6	Momentos espectrais.....	22
2.7	Largura de banda.....	22
2.8	Conclusões do capítulo	23
3	ANÁLISE DE FADIGA EM ESTRUTURAS OFFSHORE	24
3.1	Apresentação	24
3.2	Simulações hidrodinâmicas.....	25
3.2.1	<i>Teorias de ondas</i>	25
3.2.2	<i>Caracterização no curto prazo</i>	31
3.2.3	<i>Espectros de onda</i>	32
3.2.4	<i>Caracterização no longo prazo</i>	37
3.3	Modelagem da resposta da estrutura	39
3.3.1	<i>Movimentos de um corpo flutuante</i>	39

3.3.2	<i>Equações de movimento</i>	41
3.3.3	<i>Funções de transferência</i>	43
3.3.4	<i>Obtenção do espectro de resposta a partir de um RAO</i>	43
3.4	Metodologias de análise.....	44
3.4.1	<i>Método simplificado</i>	44
3.4.2	<i>Método espectral</i>	45
3.5	Acumulação de dano	50
3.5.1	<i>Correção da largura de banda</i>	53
3.6	Concentrações de tensões	54
3.6.1	<i>Fator de concentração de tensões (SCF)</i>	55
3.6.2	<i>Tensões no hot spot</i>	55
3.7	Curvas S-N.....	61
3.7.1	<i>Resistência e vida à fadiga</i>	62
3.7.2	<i>Fatores que afetam a vida à fadiga</i>	63
3.7.3	<i>Representação gráfica das curvas S-N</i>	64
3.7.4	<i>Classificação das curvas S-N</i>	65
3.7.5	<i>Efeitos de espessura</i>	65
3.8	Modelagem da estrutura em elementos finitos	66
3.9	Conclusões do capítulo	67
4	EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	69
4.1	Apresentação.....	69
4.2	Metodologia	70
4.3	Modelagem	72
4.3.1	<i>Modelo de difração</i>	73
4.3.2	<i>Modelo estrutural e modelo de massa</i>	75
4.3.3	<i>Carregamentos</i>	78
4.3.4	<i>Hot spots de fadiga selecionados</i>	83
4.3.5	<i>Curva de fadiga</i>	86
4.3.6	<i>Critérios de aceitação</i>	86
4.4	Resultados resumidos.....	87
4.4.1	<i>RAOs de movimentos</i>	87
4.4.2	<i>RAOs de tensões principais</i>	88
4.4.3	<i>Tensões e direções principais</i>	96
4.4.4	<i>Danos para a Bacia de Campos</i>	103

4.4.5	<i>Danos para a Bacia de Santos</i>	103
4.5	Conclusões do capítulo	104
5	CONCLUSÃO	106
5.1	Comentários finais	106
5.2	Sugestões para pesquisa futura	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
	ANEXO A – CURVAS S-N DNV GL.....	114
	ANEXO B – ENCHIMENTO DOS TANQUES	116
	ANEXO C – RESULTADOS COMPLETOS.....	118
C.1	Definição dos pontos de análise	118
C.1.1	<i>Hot spot 1</i>	119
C.1.2	<i>Hot spot 2</i>	120
C.1.3	<i>Hot spot 3</i>	121
C.2	Análise de fadiga espectral.....	122
C.2.1	<i>Bacia de Campos</i>	124
C.2.2	<i>Bacia de Santos</i>	130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Etapas do acidente da Alexander Kielland (FERREIRA, 2013).....	1
Figura 1.2 – Plataforma Alexander Kielland antes e depois do acidente (FERREIRA, 2013).....	2
Figura 1.3 – Maquete do projeto conceitual de um FPSO (Gomo Maquetes, 2009)	4
Figura 2.1 – Processo determinístico.....	9
Figura 2.2 – Processo aleatório (VASCONCELOS NETO, 2009)	10
Figura 2.3 – Coeficiente de assimetria	13
Figura 2.4 – Coeficiente de curtoses	13
Figura 2.5 – FDP e FCP de uma distribuição normal (padrão)	14
Figura 2.6 – FDP e FCP de uma distribuição uniforme	16
Figura 2.7 – Formulação discreta (BATALHA, 2009)	21
Figura 2.8 – Relação entre domínio do tempo e domínio da frequência (VASCONCELOS NETO, 2009)	21
Figura 2.9 – Largura de Banda – (a) Banda Estreita / (b) Banda Larga (VASCONCELOS NETO, 2009)	22
Figura 3.1 – Caracterização do processo de fadiga (fases)	24
Figura 3.2 – Principais características de uma onda regular (BATALHA, 2009).....	26
Figura 3.3 – Orbitais de movimento das partículas segundo a teoria linear (NAESS, 1985)	27
Figura 3.4 – Área de validade de diversas teorias de onda (CHAKRABARTI, 1987)..	29
Figura 3.5 – Sinal de onda randômico / Superposição de ondas regulares (VASCONCELOS NETO, 2009).....	30
Figura 3.6 – Definição de ângulo de espriamento (ABS, 2010).....	32
Figura 3.7 – Espectro de JONSWAP x Espectro de Pierson-Moskowitz	35
Figura 3.8 – Espectro de Ochi-Hubble	36
Figura 3.9 – Caracterização de parâmetros ambientais no curto e longo prazo (PAPALEO, 2009).....	38
Figura 3.10 – Movimentos de uma embarcação (BATALHA, 2009).....	39
Figura 3.11 – Sistema Clássico Massa-Mola-Amortecedor	41
Figura 3.12 – Modelagem espectral da resposta dinâmica.....	44
Figura 3.13 – Fluxograma - método estocástico por componentes de carga.....	47

Figura 3.14 – Fluxograma: método estocástico completo com modelo completo	48
Figura 3.15 – Fluxograma: método estocástico completo com modelo parcial	49
Figura 3.16 – Blocos de tensões (PRIMOZ, 1993)	51
Figura 3.17 – Combinação de dois processos dinâmicos (DNV GL, 2016b)	52
Figura 3.18 – Concentrações de tensões em um furo (PRIMOZ, 1993)	54
Figura 3.19 – Componentes de tensões em uma junta soldada (SSC, 1999)	54
Figura 3.20 Distribuição de tensões num hot spot (em corte) (DNV GL, 2016b)	56
Figura 3.21 Distribuição de tensões num hot spot (no plano) (DNV GL, 2016b)	57
Figura 3.22 Derivação da tensão de hot spot numa malha com tamanho $t \times t$ (DNV GL, 2016b).....	57
Figura 3.23 Tendências de formação de trincas x direção da tensão principal (DNV GL, 2016b).....	58
Figura 3.24 Tipos de hot spot (DNV GL, 2016b)	60
Figura 3.25 – Extrapolação das tensões no hot spot (DNV GL, 2017d)	61
Figura 3.26 – Transferência das tensões para a superfície do elemento (DNV GL, 2017d)	61
Figura 3.27 – Ciclos de tensões de amplitude constante (PRIMOZ, 1993)	63
Figura 3.28 – Curva S-N bi linear (PRIMOZ, 1993)	64
Figura 3.29 – Caminhos para extrapolação de tensões em hot spots dos tipos A, B e C (DNV GL, 2016b)	67
Figura 4.1 – Dimensões principais dos modelos	69
Figura 4.2 – Ambiente do software Sesam.....	72
Figura 4.3 – Orientação do FPSO em serviço e posições das estruturas.....	73
Figura 4.4 – Modelo de difração	74
Figura 4.5 – Malha de difração.....	74
Figura 4.6 – Modelo conceitual de estrutura	75
Figura 4.7 – Modelo de elementos finitos de estrutura (detalhe dos pontos de massa) .	76
Figura 4.8 – Modelo de estrutura – malha de elementos finitos em um hot spot.....	76
Figura 4.9 – Elemento BTSS do Sesam (DNV GL, 2018a).....	77
Figura 4.10 – Elemento SCTS do Sesam (DNV GL, 2018a)	77
Figura 4.11 – Elemento SCQS do Sesam (DNV GL, 2018a).....	77
Figura 4.12 Enchimento dos tanques para a condição de carga completa	82
Figura 4.13 Enchimento dos tanques para a condição de meia carga	82
Figura 4.14 Enchimento dos tanques para a condição de lastro	82

Figura 4.15	Região de transição entre malha grosseira e malha fina (tanque central) ..	83
Figura 4.16	Posições dos hot spots no modelo	84
Figura 4.17	Hot spot 1 - desenho de projeto x modelo de elementos finitos	84
Figura 4.18	Hot spot 2 - desenho de projeto x modelo de elementos finitos	85
Figura 4.19	Hot spot 3 - desenho de projeto x modelo de elementos finitos	85
Figura 4.20	RAO de movimentos HEAVE	87
Figura 4.21	RAO de movimentos ROLL	87
Figura 4.22	RAO de tensões principais a $t/2$ do HS03 (onda a 0°)	88
Figura 4.23	RAO de tensões principais a $3t/2$ do HS03 (onda a 0°)	88
Figura 4.24	RAO de tensões principais a $t/2$ do HS03 (onda a 45°)	89
Figura 4.25	RAO de tensões principais a $3t/2$ do HS03 (onda a 45°)	89
Figura 4.26	RAO de tensões principais a $t/2$ do HS03 (onda a 90°)	90
Figura 4.27	RAO de tensões principais a $3t/2$ do HS03 (onda a 90°)	90
Figura 4.28	RAO de tensões principais a $t/2$ do HS03 (onda a 135°)	91
Figura 4.29	RAO de tensões principais a $3t/2$ do HS03 (onda a 135°)	91
Figura 4.30	RAO de tensões principais a $t/2$ do HS03 (onda a 180°)	92
Figura 4.31	RAO de tensões principais a $3t/2$ do HS03 (onda a 180°)	92
Figura 4.32	RAO de tensões principais a $t/2$ do HS03 (onda a 225°)	93
Figura 4.33	RAO de tensões principais a $3t/2$ do HS03 (onda a 225°)	93
Figura 4.34	RAO de tensões principais a $t/2$ do HS03 (onda a 270°)	94
Figura 4.35	RAO de tensões principais a $3t/2$ do HS03 (onda a 270°)	94
Figura 4.36	RAO de tensões principais a $t/2$ do HS03 (onda a 315°)	95
Figura 4.37	RAO de tensões principais a $3t/2$ do HS03 (onda a 315°)	95
Figura 4.38	Hot spot 1 – tensões principais σ_1 , σ_2 (face superior)	97
Figura 4.39	Hot spot 1 - tensões principais σ_1 , σ_2 (face inferior)	98
Figura 4.40	Hot spot 1 – direção principal 1	98
Figura 4.41	Hot spot 2 - tensões principais σ_1 , σ_2 (face superior)	99
Figura 4.42	Hot spot 2 - tensões principais σ_1 , σ_2 (face inferior)	100
Figura 4.43	Hot spot 2 - direção principal 1	100
Figura 4.44	Hot spot 3 - tensões principais σ_1 , σ_2 (face superior)	101
Figura 4.45	Hot spot 3 - tensões principais σ_1 , σ_2 (face inferior)	102
Figura 4.46	Hot spot 3 – direção principal 1	102
Figura C.1	Hot spot 1 – numeração dos elementos	119
Figura C.2	Hot spot 1 – numeração dos nós (superfície superior)	119

Figura C.3 – Hot spot 2 – numeração dos elementos	120
Figura C.4 – Hot spot 2 – numeração dos nós (superfície superior)	120
Figura C.5 – Hot spot 3 – numeração dos elementos	121
Figura C.6 – Hot spot 3 – numeração dos nós (superfície superior)	121
Figura C.7 – Hot spot 3 – numeração dos nós (superfície inferior)	122

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 Diagrama de dispersão de ondas - navegação irrestrita.....	39
Tabela 4.1 Modelo de estrutura - características da malha de EF	77
Tabela 4.2 Diagrama de dispersão Hs x direção, Bacia de Campos (SOUZA, 2014) ..	79
Tabela 4.3 Diagrama de dispersão Hs x Tp, Bacia de Campos (SOUZA, 2014).....	79
Tabela 4.4 Diagrama de dispersão Hs x direção, Bacia de Santos (SOUZA, 2014).....	80
Tabela 4.5 Diagrama de dispersão Hs x Tp, Bacia de Santos (SOUZA, 2014)	80
Tabela 4.6 Tensões principais (face superior)	96
Tabela 4.7 Tensões principais (face inferior)	96
Tabela 4.8 Bacia de Campos - Danos nos hot spots calculados individualmente para cada condição de carga	103
Tabela 4.9 Bacia de Campos - Danos combinados e vida à fadiga por hot spot.....	103
Tabela 4.10 Bacia de Santos - Danos nos hot spots calculados individualmente para cada condição de carga	104
Tabela 4.11 Bacia de Santos - Danos combinados e vida à fadiga por hot spot	104
Tabela 4.12 Danos para a Bacia de Campos x Bacia de Santos.....	105

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Um elemento estrutural, quando submetido a carregamentos cíclicos pode sofrer um modo de falha conhecido como fadiga. Este fenômeno tem uma importante característica: pode levar a estrutura à falha sob tensões consideravelmente inferiores à resistência última do material. Portanto, em especial nas situações que envolvam carregamentos variáveis de magnitude importante, como é o caso das estruturas projetadas para operar *offshore*, este modo de falha deve ser cuidadosamente estudado.

Nas últimas décadas, grandes avanços científicos têm sido verificados nesta área: seja no que tange aos métodos de investigação experimentais ou numéricos. Estes avanços têm contribuído para uma redução significativa das falhas das estruturas em serviço. Contudo, acidentes continuam a ocorrer, constituindo grande preocupação. Estima-se que rupturas por fadiga representem cerca de 80 a 90% do total das falhas observadas em estruturas submetidas a carregamentos variáveis, ocorrendo a maioria destas de forma inesperada (ELLWANGER, 2006).

Um exemplo clássico de falha catastrófica por fadiga é o fatídico caso da plataforma semissubmersível de perfuração Alexander Kielland, que operou nas extremas condições ambientais do Mar do Norte entre 1977 e 1980. A estrutura de 10 mil toneladas emborcou e afundou após falha por fadiga de um dos seus elementos de contraventamento. A Figura 1.1 ilustra a sequência de eventos que levaram à catástrofe.

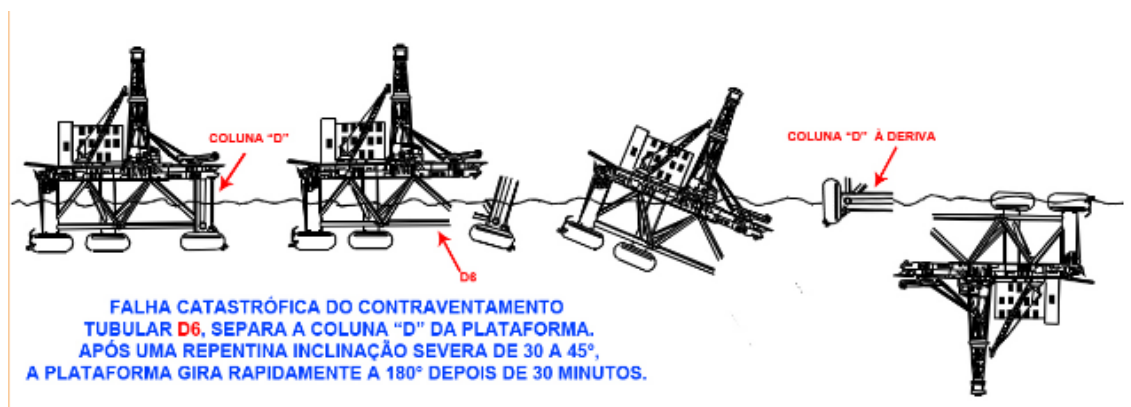


Figura 1.1 – Etapas do acidente da Alexander Kielland (FERREIRA, 2013)

Além das perdas materiais, o evento gerou 123 fatalidades entre os 212 trabalhadores embarcados. Após o acontecimento, uma série de medidas foram tomadas de forma a tronar o projeto e o trabalho em unidades offshore mais seguros. A Figura 1.2 mostra a plataforma antes e depois do acidente, respectivamente.



Figura 1.2 – Plataforma Alexander Kielland antes e depois do acidente (FERREIRA, 2013)

De um modo geral, a análise do comportamento à fadiga de estruturas sob carregamentos aleatórios (cíclicos) é feita com base em dados de ensaios experimentais. Destes estudos, são ajustadas curvas S-N de resistência à fadiga. A maioria das sociedades classificadoras propõe a estimativa da vida à fadiga com base na hipótese de Palmgren-Miner de acúmulo linear de dano. Assim, faz-se necessário entender esta metodologia, suas diversas variáveis e parâmetros envolvidos, a fim de obter estimativas adequadas às necessidades de projeto.

1.2 Objetivos

O estudo do fenômeno de fadiga pode ser abordado basicamente por dois tipos de aproximações: baseado em tensões e deformações. As metodologias baseadas em tensões são aplicáveis quando as tensões envolvidas no processo ocorrem no regime elástico do material, ou seja, tensões e deformações obedecem a lei de Hooke. As metodologias baseadas em deformações admitem que as tensões em determinadas regiões ultrapassem o limite elástico do material, num fenômeno conhecido como plastificação.

Nesta dissertação é apresentada a metodologia para cálculo de fadiga baseada em tensões proposta nas normas de projeto da DNV GL, sendo amplamente utilizada nos projetos de estruturas *offshore* e bastante similar às propostas das normas da BV e da ABS. Este trabalho apresenta o fundo teórico para a metodologia proposta, passando pelos principais conceitos estatísticos envolvidos e pela modelagem do comportamento da estrutura às condições impostas pelos carregamentos cíclicos gerados pelo movimento das ondas do mar, assim como aspectos sobre modelagem em elementos finitos.

Ao final, é apresentado um exemplo de cálculo de vida à fadiga de três conexões localizada no casco de uma plataforma flutuante do tipo FPSO, ver Figura 1.3, submetida a carregamentos cíclicos basicamente gerados pelos movimentos impostos por uma condição de mar definida por um diagrama de dispersão de ondas. Um modelo global em elementos finitos da estrutura do FPSO foi preparado utilizando o software DNV GL Sesam®, sendo o mesmo utilizado para gerar e aplicar todos os carregamentos, assim como realizar o pós-processamento dos resultados. Os cálculos são realizados pelo método espectral *full stochastic*, com modelo completo, utilizando curvas S-N, com acúmulo de dano pela regra de Palmgren-Miner.



Figura 1.3 – Maquete do projeto conceitual de um FPSO (Gomo Maquetes, 2009)

1.3 Revisão bibliográfica

A seguir, é apresentada uma lista de referências úteis no estudo e projeto de estruturas à fadiga. São citadas as normas de diversas sociedades classificadoras amplamente difundidas na indústria do petróleo e gás, livros de referência para embasamento e materiais didáticos de cursos.

1.3.1 Normas DNV GL

A DNV GL é uma instituição formada no ano de 2013, a partir da fusão entre a sociedade classificadora norueguesa *Det Norske Veritas* (DNV), fundada em 1864, e a alemã *Germanischer Lloyd* (GL), fundada em 1877. Ambas têm origem fortemente ligada à indústria naval e carregam vasta bagagem e experiência na certificação de estruturas flutuantes, estando atualmente o grupo presente em mais de 100 países.

A metodologia utilizada nesta dissertação foi desenvolvida originalmente pelo legado DNV da DNV GL. Esta dissertação faz referência à nomenclatura mais recente de cada documento de projeto. Entretanto, as normas da antiga DNV vêm sendo reorganizadas e complementadas nos últimos anos, em um processo que visa a levar a identidade do novo grupo aos documentos. Porém, este processo está em andamento e poderá ser notada a referência à DNV (e não DNV GL) em alguns documentos citados.

As normas da DNV GL são organizadas em alguns grandes grupos. Os principais grupos referidos nesta dissertação estão listados a seguir:

- **RU-SHIP – Normas para classificação: navios** (*rules for classification: ships*) – contêm procedimentos e requerimentos técnicos para obter e manter certificações da sociedade classificadora;
- **OS – Normas offshore** (*offshore standards*) – contêm requerimentos técnicos, princípios e critérios de aceitação para classificação de unidades *offshore*;
- **RP – Práticas recomendadas** (*recommended practices*) – contêm práticas de engenharia e orientações;
- **CN – Notas de classificação** (*classification notes*) – contêm informações práticas e interpretações bem aceitas das normas gerais da sociedade classificadora, tais quais soluções de projeto, métodos de cálculo, especificações de procedimentos, métodos de reparo, etc.

A seguir, estão descritos os temas abordados pelas principais referências:

- Normas *offshore* – “Projeto estrutural de unidades *offshore*” (métodos LRFD e WSD): aqui são apresentados os requisitos técnicos básicos de projeto. Alguns aspectos específicos para verificações de fadiga como as indicações de metodologias aceitas, fatores de projeto (DFF) e indicações das práticas recomendadas e notas de classificação para cada etapa do projeto também são referidos nos presentes documentos (DNV GL, 2017g) (DNV GL, 2017h);
- Práticas recomendadas – “Projeto à fadiga de estruturas metálicas *offshore*”: aqui são abordados temas gerais sobre fadiga, como as curvas S-N, tensões de *hot spot* e fatores de concentração. A metodologia para análise simplificada do estado limite de fadiga é descrita nesta norma (DNV GL, 2016b);
- Práticas recomendadas – “Metodologia de fadiga para navios *offshore*”: aqui são abordados alguns temas específicos para análise de fadiga em estruturas de FPSOs. São apresentados assuntos como a seleção de detalhes estruturais a analisar, técnicas de modelagem em elementos finitos, condições de carregamentos e condições de contorno para as análises em elementos finitos. A metodologia para análise espectral do estado limite de fadiga é descrita nesta norma (DNV GL, 2015b).

- Notas de classificação – “Avaliação de fadiga de estruturas de navios”: são trazidos uma série de detalhes sobre as análises, sendo apresentados alguns fluxogramas de cálculo e aspectos detalhados sobre diferentes metodologias. As notas trazem soluções de projeto e interpretações das normas mais gerais (DNV GL, 2014).
- Práticas recomendadas – “Condições ambientais e carregamentos ambientais”: aqui são apresentadas as teorias e métodos de tratamento estatísticos para as cargas ambientais, em especial as cargas de onda (DNV GL, 2017i);
- Além destas, há alguns aspectos interessantes sobre modelagem em elementos finitos nas notas de classificação – “Análise de resistência do casco de estruturas de petroleiros” (DNV GL, 1999) e são abordados diversos aspectos dos requisitos e metodologias para fadiga na norma para classificação de navios (parte 3 – casco / capítulo 9 – fadiga), em especial a forma de enchimento dos tanques de carga e lastro (DNV GL, 2018b);

1.3.2 Outras normas de projeto

O *American Bureau Shipping* (ABS) é uma sociedade classificadora americana, fundada em 1862. No que tange às verificações de fadiga, esta sociedade baseia sua metodologia para estruturas de FPSOs em normatizações bem aceitas e calibradas experimentalmente para navios. Entretanto, são propostos fatores de severidade ambiental (ESF), que levam em conta fatores como as ancoragens existentes nos FPSOs e aspectos como rotas de navegação pregressas e locações finais das estruturas flutuantes, tendo como base as condições do Atlântico Norte. Os fatores de severidade ajustam as respostas aos carregamentos dinâmicos de onda (ESF beta) e os danos de fadiga (ESF alfa) (BARROS, 2015). As principais referências para as análises de fadiga são o “Guia para a avaliação de fadiga de estruturas *offshore*” (ABS, 2003) e a norma para análise de fadiga espectral de instalações do tipo FPSO (ABS, 2010).

Outras normas bastante difundidas na indústria que surgem como referências são:

- As normas *NORSOK Standards*, norueguesa, (N-004, 2004) e *British Standards* (BS), britânica, (BS, 1993) têm suas próprias provisões para fadiga. Porém, são bastante parecidas com aquelas apresentadas pela DNV GL e em muitos aspectos acabam citando a própria como referência;

- A norma da AWS (*American Welding Society*), americana, para estruturas soldadas é uma das principais referências na indústria sobre soldas e processos de soldagem. Portanto, tornou-se importante referência no desenvolvimento de diversos trabalhos relacionados aos estudos de fadiga (AWS, 2006);
- A norma do API (*American Petroleum Institute*), API RP 2A, americana, é voltada para o projeto de jaquetas e estruturas tubulares, também mencionadas pela norma suíça ISO (*International Organization for Standardization*) 19902 (ISO 19902, 2007).

1.3.3 Outras referências

- O livro clássico “*Fatigue handbook*” (NAESS, 1985), é a principal referência no assunto fadiga, apesar de a edição de 1985 não ter sido revisada, enquanto o manual de Peterson (PILKEY e PILKEY, 2008) é a principal referência sobre fatores de concentração de tensões (SCF);
- Há também os livros: “*Fatigue of welded structures*” (GURNEY, 1979) (TWI), “*Fatigue Strength of welded structures*” (MADDOX, 1991) (TWI) e “*Fadiga de estruturas soldadas*” (BRANCO, FERNANDES e CASTRO, 2002), ambos sobre juntas soldadas; o livro “*Design of welded tubular connections*” (MARSHALL, 1992), sobre juntas tubulares (casca); e o livro “*Fatigue design of marine structures*” (LOTSBERG, 2016), voltado pra as práticas de projeto;
- Sobre análise dinâmica, um livro importante é o “*Dynamics of fixed marine structures*”, (BARLTROP e ADAMS, 1991). Além disso, temos a literatura básica como o “*Dynamics of structures*”, (CLOUGH e PENZIEN, 1975). Para aprofundar os conceitos de probabilidades e análise espectral, há o livro “*Probabilistic theory of ship dynamics*” (PRICE e BISHOP, 1974). E temos também o livro “*Floating Structures: a guide for design and analysis*” (BARLTROP, 1998) como referência para os principais aspectos de projeto;
- Algumas figuras e textos da apresentação foram copiados do site do curso de fadiga da faculdade de engenharia civil e geodésica da universidade de Liubliana, na Eslovênia. O curso é baseado nas normas do euro código (PRIMOZ, 1993).

1.4 Estrutura da dissertação

O capítulo 2 contém uma resumida apresentação de alguns conceitos estatísticos importantes no desenvolvimento do tema, como as definições de processos determinísticos e aleatórios (ou estocásticos), distribuições de probabilidades, representação de séries no domínio do tempo e domínio da frequência, dentre outros.

O capítulo 3 descreve os principais conceitos envolvidos na análise de fadiga em estruturas *offshore*. Aqui são apresentadas as curvas S-N, regra de Palmgren-Miner para acúmulo de dano, fatores de concentração de tensões, modelagem em elementos finitos, representação do comportamento do mar e resposta da estrutura, assim como as principais metodologias de análise e projeto.

O capítulo 4 apresenta o exemplo de aplicação analisado neste trabalho. São mostrados os detalhes e principais considerações feitas para o cálculo de vida à fadiga de conexões no casco de um FPSO utilizando o método espectral. Foi realizado estudo comparativo de vida à fadiga de conexões do casco, calculadas de acordo com a metodologia espectral proposta pela DNV GL, nas condições ambientais das Bacias de Campos e Santos.

O capítulo 5 contém as conclusões deste estudo com indicações e recomendações sobre a direção de futuras pesquisas nesta área.

E, finalmente, o capítulo 6 apresenta a lista de referências bibliográficas consultadas durante a elaboração deste trabalho.

2 CONCEITOS ESTATÍSTICOS

2.1 Processo determinístico

Um processo determinístico é aquele em que se pode definir seu valor exato em um dado instante de tempo. Como exemplo, pode-se citar um processo definido por uma função harmônica, conforme apresentado na Figura 2.1.

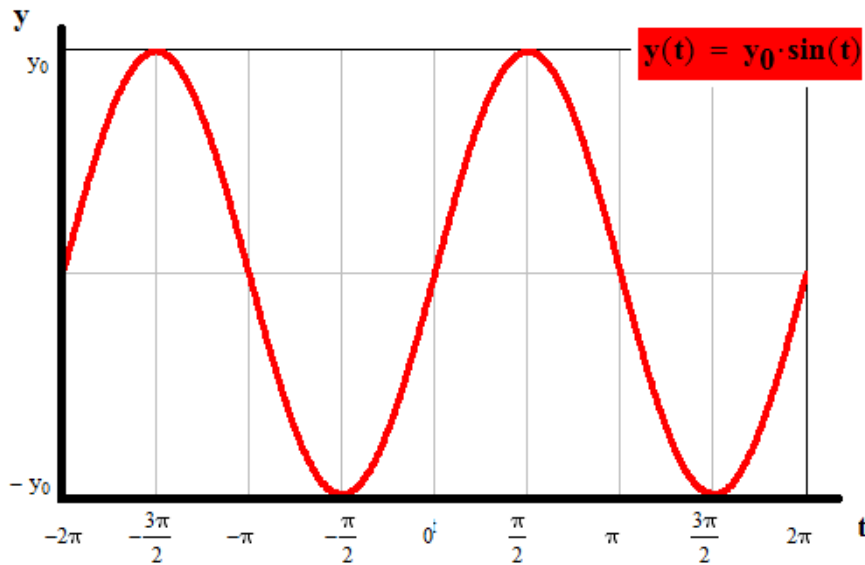


Figura 2.1 – Processo determinístico

2.2 Processo aleatório

Um processo randômico varia de forma irregular e seu valor exato não pode ser determinado para um dado instante de tempo futuro. Por este motivo, fenômenos randômicos que variam no tempo são caracterizados por processos aleatórios e devem ser descritos por seus parâmetros estatísticos.

Um processo aleatório é definido como sendo uma coleção de séries temporais que caracterizam ao longo do tempo um mesmo fenômeno com características randômicas. A Figura 2.2 ilustra várias realizações de um processo aleatório.

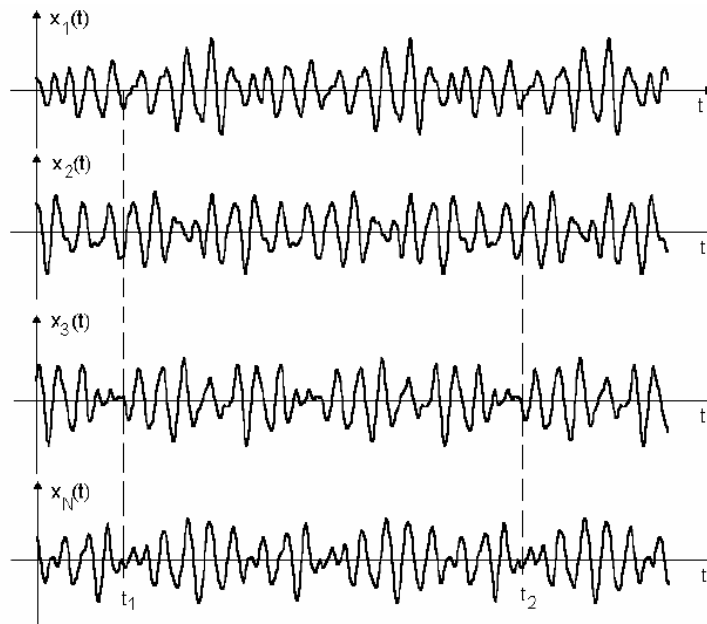


Figura 2.2 – Processo aleatório (VASCONCELOS NETO, 2009)

2.2.1 Casos particulares de processos aleatórios

Processo estacionário: processo aleatório com propriedades estatísticas (valor médio, variância, desvio padrão, distribuição de probabilidades, etc. – definidos no próximo item) independentes do instante de tempo para o qual são avaliadas, e com covariância dependente apenas do valor de separação temporal.

Processo ergódico: processo aleatório estacionário no qual os parâmetros estatísticos calculados para de uma única realização são os mesmos calculados ao longo de várias realizações.

Um processo aleatório ergódico é sempre estacionário, mas um processo estacionário nem sempre é ergódico. Quando é possível assumir que um processo estacionário é ergódico, o esforço necessário para descrevê-lo é drasticamente reduzido.

Processo gaussiano: é um processo aleatório onde qualquer variável aleatória possui uma distribuição de probabilidades gaussiana (conceito apresentado no próximo item). Desta forma, este é denominado gaussiano se o correspondente histograma puder ser bem ajustado por uma distribuição de Gauss.

2.3 Distribuições de probabilidades

A seguir, são apresentados os principais tipos de funções de probabilidades.

2.3.1 Função densidade de probabilidade (FDP)

A função densidade de probabilidade de um dado processo aleatório pode ser definida como a função cuja área sob sua curva em um dado intervalo, retorna a probabilidade de ocorrência de um processo neste intervalo (SAGRILO, 2013b). Ou seja:

$$f_X(x) = \int_x^{x+\Delta x} f_X(t) dt = \text{Prob}[x \leq X \leq x+\Delta x] \quad \text{Eq. 2.1}$$

onde:

X é uma variável aleatória.

Uma função densidade de probabilidade deve satisfazer às relações:

- A probabilidade de ocorrência está relacionada a frequência de ocorrência do evento;
- A probabilidade de ocorrência está definida entre os valores 0 e 1 (ou entre 0 e 100%);
- A soma das probabilidades de todos os resultados possíveis é igual a 1.

2.3.2 Função cumulativa de probabilidade (FCP)

Associada à função densidade de probabilidade, existe a função cumulativa de probabilidade. Esta função fornece a probabilidade de X ser menor ou igual a um dado valor de x. Ou seja:

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_X(t) dt = \text{Prob}[X \leq x] \quad \text{Eq. 2.2}$$

Uma função cumulativa de probabilidade deve satisfazer às relações:

- $FCP(-\infty) = \int_{-\infty}^{-\infty} FDP(y) = 0$;
- $0 \leq FCP(-\infty) \leq 1$;
- $FCP(+\infty) = \int_{-\infty}^{+\infty} FDP(y) = 1$.

Uma FDP pode ser obtida da derivada de sua FCP:

$$f_X(x) = \frac{d}{dx} F_X(x) \quad \text{Eq. 2.3}$$

2.3.3 Parâmetros de um processo aleatório

Neste item são apresentados os principais parâmetros estatísticos de um processo aleatório, caracterizando o comportamento das variáveis aleatórias.

- Valor médio: também definido como média, ou ainda, valor esperado, consiste no ponto y do centro de gravidade da figura plana que descreve a função FDP(y). Este parâmetro pode ser calculado conforme equação a seguir:

$$E(y) = \mu(y) = \bar{y} = \int_{-\infty}^{+\infty} y \text{FDP}(y) dy \quad \text{Eq. 2.4}$$

- Valor médio quadrático: mede em parte a dispersão em torno do eixo y de uma variável aleatória e é dado por:

$$E(y^2) = \bar{y}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} y^2 \text{FDP}(y) dy \quad \text{Eq. 2.5}$$

- Variância: mede a dispersão dos valores da distribuição em torno do valor médio, podendo ser escrita em termos do valor médio quadrático e do valor médio:

$$\text{VAR}(y) = \sigma_y^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (y - \bar{y})^2 \text{FDP}(y) dy = E(y^2) - [E(y)]^2 \quad \text{Eq. 2.6}$$

- Desvio padrão: é uma medida da dispersão estatística. Definido como a raiz quadrada da variância:

$$\sigma_y = \sqrt{\text{VAR}(y)} = \sqrt{E(y^2) - [E(y)]^2} \quad \text{Eq. 2.7}$$

- Coeficiente de variação: é uma medida de dispersão definido em termos da média e do desvio padrão:

$$\delta_y = \frac{\sigma_y}{\mu_y} \quad \text{Eq. 2.8}$$

- **Coefficiente de assimetria:** numa distribuição estatística, a assimetria é o quanto sua curva de frequência se desvia ou afasta da posição simétrica. Podemos caracterizar as distribuições de frequência em: assimétrica à direita, à esquerda ou assimetria nula (coeficiente de assimetria positivo, negativo e nulo, respectivamente). A Figura 2.3 ilustra a assimetria de uma distribuição.

$$\gamma_y = \int_{-\infty}^{+\infty} (y - \bar{y})^3 \text{FDP}(y) dy \quad \text{Eq. 2.9}$$

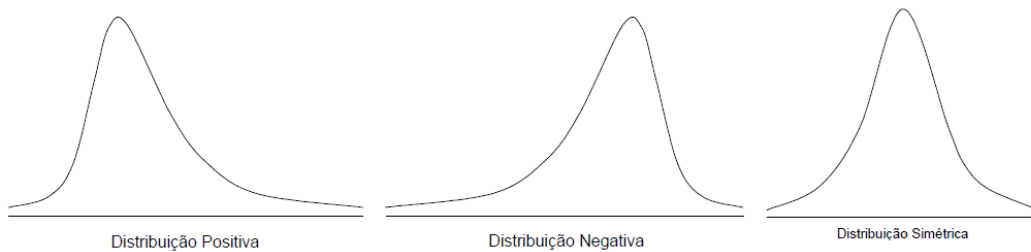


Figura 2.3 – Coeficiente de assimetria

- **Coefficiente de curtose:** é o grau de “achatamento” de uma distribuição em relação a uma distribuição padrão. São três os tipos curvas de distribuição no que se refere a curtose: leptocúrtica, mesocúrtica e platicúrtica. A Figura 2.4 ilustra o coeficiente de curtoses de uma distribuição de probabilidades.

$$\kappa_y = \int_{-\infty}^{+\infty} (y - \bar{y})^4 \text{FDP}(y) dy \quad \text{Eq. 2.10}$$

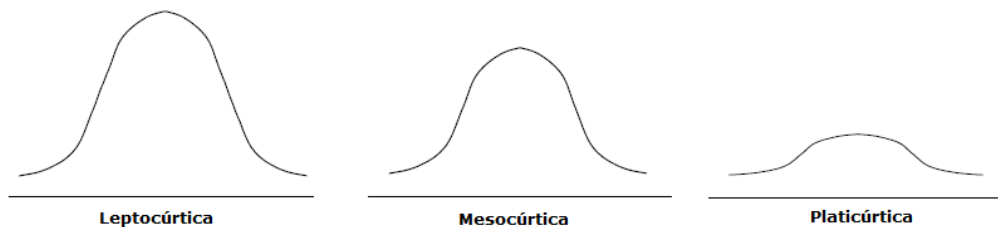


Figura 2.4 – Coeficiente de curtoses

2.3.4 Algumas FDP

2.3.4.1 Distribuição normal (gaussiana)

A função densidade de probabilidades da distribuição normal é definida por 2 parâmetros: a média (μ_X) e o desvio padrão (σ_X) da variável. A FDP $N(\mu_X; \sigma_X)$ e a FCP, expressa em termos da função cumulativa normal padrão, Φ , são dadas por:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma_X \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_X}{\sigma_X} \right)^2 \right] \quad \text{Eq. 2.11}$$

$$F_X(x) = \Phi \left(\frac{x - \mu_X}{\sigma_X} \right) \quad \text{Eq. 2.12}$$

- Propriedades: $\mu_X, \sigma_X, \gamma_X = 0$ e $\kappa_X = 3$.

CASO PARTICULAR: Distribuição Normal Padrão

A distribuição normal padrão equivale à distribuição normal com as seguintes propriedades: $\mu_X = 0$ e $\sigma_X = 1$. Assim, a FDP e a FCP, que é a própria função cumulativa normal padrão, são dadas por:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{1}{2} x^2 \right) \quad \text{Eq. 2.13}$$

$$F_X(x) = \Phi(x) \quad \text{Eq. 2.14}$$

A Figura 2.5 ilustra a FDP e FCP de uma distribuição normal padrão.

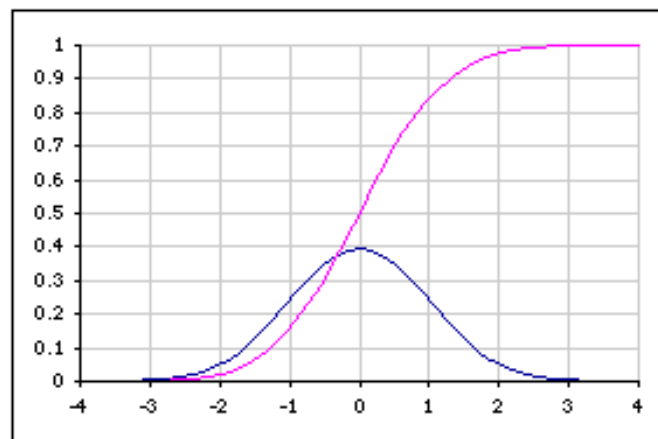


Figura 2.5 – FDP e FCP de uma distribuição normal (padrão)

2.3.4.2 Distribuição log-normal

Uma variável assume distribuição log-normal quando o seu logaritmo tem distribuição normal. Ela é definida por 2 parâmetros: a média (λ_X) e o desvio padrão (ξ_X) da variável. A FDP $N(\lambda_X; \xi_X)$ e a FCP, expressa em termos da FCP normal padrão, Φ , são dadas por:

$$f_X(x) = \frac{1}{x \xi_X \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - \lambda_X}{\xi_X} \right)^2 \right] \quad \text{Eq. 2.15}$$

$$F_X(x) = \Phi \left(\frac{\ln(x) - \lambda_X}{\xi_X} \right) \quad \text{Eq. 2.16}$$

- Propriedades: $\mu_X = \exp \left(\lambda_X + \frac{1}{2} \xi_X^2 \right)$; $\sigma_X = \exp \left(\lambda_X + \frac{1}{2} \xi_X^2 \right) \sqrt{\exp(\xi_X^2) - 1}$;
 $\gamma_X = \delta_X^3 + \delta_X > 0$; $\kappa_X = \delta_X^8 + 6\delta_X^6 + 15\delta_X^4 + 16\delta_X^2 + 3 > 3$.

2.3.4.3 Distribuição uniforme

Esta é a distribuição de probabilidades contínua mais simples de conceituar: a probabilidade de se gerar qualquer ponto em um intervalo contido no espaço amostral é proporcional ao tamanho do intervalo. Ela é definida para um espaço amostral $[a, b]$, sendo definida por 2 parâmetros: os extremos do espaço amostral.

A FDP $UN(a; b)$ e a FCP são dadas por:

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a \leq X \leq b \\ 0, & x < a \text{ ou } x > b \end{cases} \quad \text{Eq. 2.17}$$

$$F_X(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq X \leq b \\ 0, & x < a \\ 1, & x > b \end{cases} \quad \text{Eq. 2.18}$$

- Propriedades: $\mu_X = \frac{a+b}{2}$; $\sigma_X = \frac{b-a}{\sqrt{12}}$; $\gamma_X = 0$ e $\kappa_X = 1,8$.

A Figura 2.6 ilustra a FDP e FCP de uma distribuição uniforme.

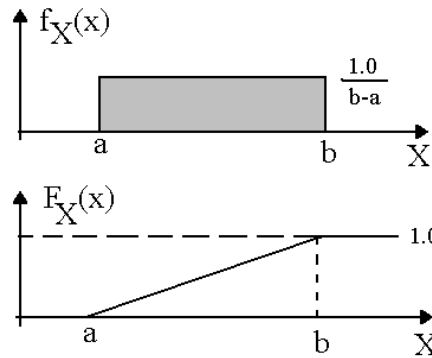


Figura 2.6 – FDP e FCP de uma distribuição uniforme

2.3.4.4 Distribuição de Gumbel (tipo I)

A distribuição de Gumbel (Tipo I) é utilizada extensivamente nas previsões meteorológicas e na descrição de movimentos de navios (CHAKRABARTI, 1987).

A distribuição de extremos dos picos de um processo gaussiano ergódico também pode ser representada por uma distribuição desse tipo. A FDP de 2 parâmetros, $TI(\beta; u)$, e a FCP são dadas por:

$$f_X(x) = \beta \exp[-\beta(x - u) - \exp(-\beta(x - u))] \quad \text{Eq. 2.19}$$

$$F_X(x) = \exp[-\exp(-\beta(x - u))] \quad \text{Eq. 2.20}$$

- Propriedades: $\mu_X = u + \frac{0,5772}{\beta}$; $\sigma_X = \frac{\pi}{u\sqrt{6}}$; $\gamma_X = 1,139$ e $\kappa_X = 5,4$.

2.3.4.5 Distribuição de Frechet (tipo II)

A distribuição de Frechet (Tipo II) foi proposta para descrever a distribuição da máxima anual das alturas de onda extremas. Ela se relaciona com a distribuição Tipo I por uma transformação exponencial (CHAKRABARTI, 1987). A FDP, $TII(\beta; u)$, e a FCP são dadas por:

$$f_X(x) = \frac{u}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{-(u+1)} \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{-u}\right] \quad \text{Eq. 2.21}$$

$$F_X(x) = \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{-u}\right] \quad \text{Eq. 2.22}$$

2.3.4.6 Distribuição de Weibull (tipo III)

A distribuição de Weibull (Tipo III) é definida por 3 parâmetros: o parâmetro de escala (α_W), o parâmetro de forma (λ_W) e o parâmetro de posição (u). O parâmetro de forma, usualmente, assume valores entre 0,75 e 2,00 (CHAKRABARTI, 1987). A FDP, $WL(\alpha_W; \lambda_W; u)$, e a FCP são dadas por:

$$f_X(x) = \frac{\lambda_W}{\alpha_W} \left(\frac{x-u}{\alpha_W} \right)^{(\lambda_W-1)} \exp \left[- \left(\frac{x-u}{\alpha_W} \right)^{\lambda_W} \right] \quad \text{Eq. 2.23}$$

$$F_X(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x-u}{\alpha_W} \right)^{\lambda_W} \right] \quad \text{Eq. 2.24}$$

Uma forma alternativa, toma o parâmetro de posição nulo ($u = 0$).

- Propriedades (para $u = 0$): $\mu_X = u + \alpha_W \Gamma(1 + \lambda_W^{-1})$; $\sigma_X = \alpha_W g(\lambda_W)$, para $g(\lambda_W) = \Gamma(1 + 2\lambda_W^{-1}) - \Gamma^2(1 + \lambda_W^{-1})$; $\gamma_X = [\Gamma(1 + 4\lambda_W^{-1}) - 4\Gamma(1 + \lambda_W^{-1})\Gamma(1 + 3\lambda_W^{-1}) + 6\Gamma^2(1 + \lambda_W^{-1})\Gamma(1 + 2\lambda_W^{-1}) - 3\Gamma^4(1 + \lambda_W^{-1})]g(\lambda_W)^{-1}$ e $\kappa_X = [\Gamma(1 + 3\lambda_W^{-1}) - 3\Gamma(1 + \lambda_W^{-1})\Gamma(1 + 2\lambda_W^{-1}) + 2\Gamma^3(1 + \lambda_W^{-1})]g(\lambda_W)^{-1}$.

CASO PARTICULAR: Distribuição Exponencial

A distribuição exponencial é um caso particular da distribuição de Weibull com parâmetro de forma $\lambda_E = 1$ e parâmetro de posição $u = 0$. Assim, a FDP de um parâmetro, $EX(\alpha_E) = WL(\alpha_W = \alpha_E; \lambda_W = 1; u = 0)$, e a FCP são dadas por:

$$f_X(x) = \frac{1}{\alpha_E} \exp \left[- \left(\frac{x}{\alpha_E} \right) \right] \quad \text{Eq. 2.25}$$

$$F_X(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\alpha_E} \right) \right] \quad \text{Eq. 2.26}$$

CASO PARTICULAR: Distribuição de Rayleigh

A distribuição de Rayleigh é mais um caso particular da distribuição de Weibull com parâmetro de forma $\lambda_R = 2$ e parâmetro de posição $u = 0$. A FDP de um parâmetro, $RL(\alpha_R) = WL(\alpha_W = \alpha_R \sqrt{2}; \lambda_W = 2; u = 0)$, e a FCP são dadas por:

$$f_X(x) = \frac{x}{\alpha_R^2} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{\alpha_R} \right)^2 \right] \quad \text{Eq. 2.27}$$

$$F_X(x) = 1 - \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{\alpha_R} \right)^2 \right] \quad \text{Eq. 2.28}$$

2.3.4.7 Distribuição de Rice

A distribuição de Rice é utilizada para representar a distribuição de picos de um processo gaussiano ergódico. A FDP, $RC(m_0; \varepsilon)$, é dada por:

$$f_X(x) = \frac{\varepsilon}{\sqrt{2\pi}\sqrt{m_0}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{\varepsilon\sqrt{m_0}} \right)^2 \right] + \frac{x}{(\sqrt{m_0})^2} \sqrt{1 - \varepsilon^2} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{\sqrt{m_0}} \right)^2 \right] \Phi \left(\frac{x}{\varepsilon\sqrt{m_0}} \sqrt{1 - \varepsilon^2} \right) \quad \text{Eq. 2.29}$$

2.4 Representação de série no domínio do tempo

Um sinal temporal $x(t)$, contínuo em sua duração T , pode ser representado no domínio do tempo como uma série de senos e cossenos. Um sinal $x(t)$ é expresso através de uma série de Fourier por:

$$x(t) = a_0 + \sum_{j=1}^{\infty} [a_j \cos(j\omega_0 t) + b_j \sin(j\omega_0 t)] \quad \text{Eq. 2.30}$$

onde:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^{\infty} x(t) dt = \mu_x \quad \text{Eq. 2.31}$$

$$a_j = \frac{2}{T} \int_0^{\infty} x(t) \cos(j\omega_0 t) dt = \frac{2}{N} \sum_{j=0}^{N-1} [x(j\Delta t) \cos(j\omega_0 t)] \quad \text{Eq. 2.32}$$

$$b_j = \frac{2}{T} \int_0^{\infty} x(t) \sin(j\omega_0 t) dt = \frac{2}{N} \sum_{j=0}^{N-1} [x(j\Delta t) \sin(j\omega_0 t)] \quad \text{Eq. 2.33}$$

Que pode ser escrita em sua forma trigonométrica compacta:

$$x(t) = c_0 + \sum_{j=1}^{\infty} [c_j \cos(j\omega_0 t + \theta_j)] \quad \text{Eq. 2.34}$$

onde:

$$c_0 = \frac{a_0}{2} \quad \text{Eq. 2.35}$$

$$c_j = \sqrt{a_j^2 + b_j^2} \quad \text{Eq. 2.36}$$

$$\theta_j = \text{atan} \left(-\frac{b_j}{a_j} \right) \quad \text{Eq. 2.37}$$

A frequência ω_0 é denominada frequência fundamental, sendo dada por:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \quad \text{Eq. 2.38}$$

Observa-se que um sinal contínuo no tempo pode ser adequadamente processado por um sistema que opera em tempo discreto, desde que a taxa de amostragem seja suficientemente grande para representar bem o sinal temporal $x(t)$. Ou seja, o intervalo entre as medições Δt deve ser suficientemente pequeno.

2.5 Domínio do tempo x domínio da frequência

Pelo teorema de Parseval a energia média de um sinal periódico é igual à soma das energias de suas componentes de Fourier. Sabendo que a energia média ou potência de um sinal é dada pela expressão:

$$P_X = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt \quad \text{Eq. 2.39}$$

Resolvendo para um sinal escrito em séries de Fourier na forma trigonométrica compacta, para um sinal com média zero, temos:

$$P_X = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{c_j^2}{2} = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{a_j^2 + b_j^2}{2} \quad \text{Eq. 2.40}$$

COMENTÁRIO: Qualquer sinal pode ser transformado num sinal de média 0 (zero), bastando para isso subtrair do mesmo a sua média.

Finalmente, o teorema de Wiener-Khintchine (LIN, 1967) constrói a ponte entre um sinal no domínio do tempo e sua representação no domínio da frequência. Ele estabelece a seguinte relação para a função de autocovariância do processo:

$$R(\tau) = \int_0^{\infty} \cos(\omega\tau) Sp(\omega) d\omega \quad \text{Eq. 2.41}$$

onde:

$Sp(\omega)$ é chamada densidade espectral de $x(t)$.

Fazendo $\tau = 0$, temos:

$$R(0) = E[x(t)^2] = \int_0^{\infty} Sp(\omega) d\omega \quad \text{Eq. 2.42}$$

Reescrevendo na forma discreta e aplicando o resultado do Teorema de Parseval, temos uma formulação para a densidade espectral, conforme ilustra a Figura 2.7:

$$x(t) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{a_j^2 + b_j^2}{2} = \sum_{j=1}^{\infty} Sp(j\omega_0) \Delta\omega \quad \text{Eq. 2.43}$$

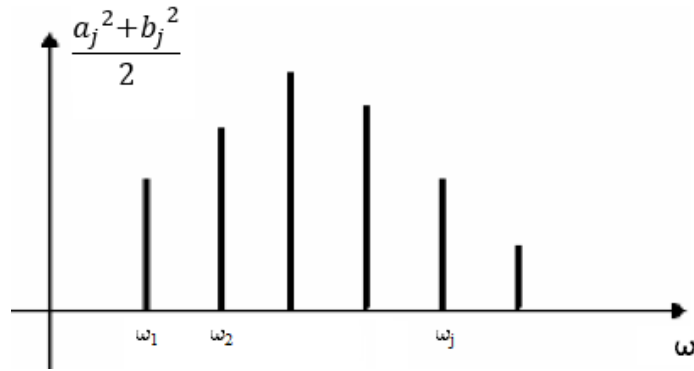


Figura 2.7 – Formulação discreta (BATALHA, 2009)

E a partir da relação acima podemos escrever:

$$Sp(\omega_j) = \frac{a_j^2 + b_j^2}{2\Delta\omega} = \frac{c_j^2}{2\Delta\omega} \quad \text{Eq. 2.44}$$

onde:

c_j^2 é a amplitude do harmônico de frequência ω_j . A Eq. 2.27 estabelece uma relação entre a contribuição para a energia total do espectro pelo harmônico de frequência ω_j e a sua amplitude, definindo uma forma eficiente de passarmos um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência e vice-versa, conforme ilustra a Figura 2.8.

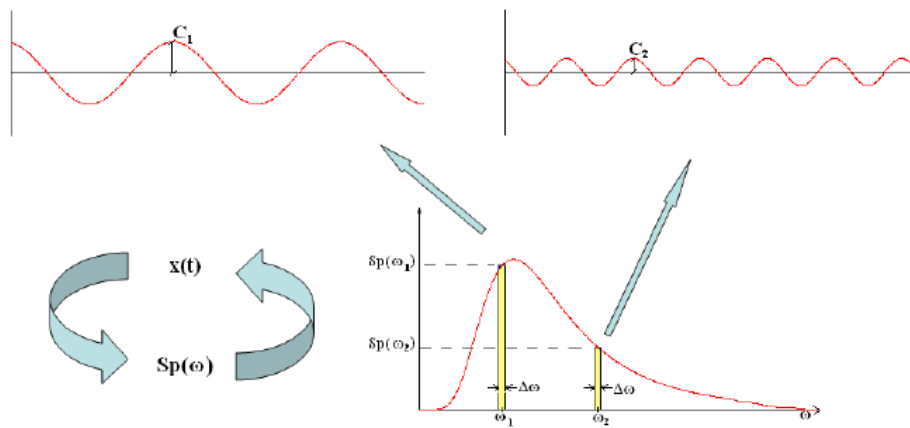


Figura 2.8 – Relação entre domínio do tempo e domínio da frequência (VASCONCELOS NETO, 2009)

É importante notar que a densidade espectral possui apenas a informação da energia de cada componente harmônico do sinal, não tendo nenhuma informação sobre a fase do mesmo.

2.6 Momentos espectrais

Os parâmetros estatísticos de um processo aleatório podem ser determinados em função dos momentos espectrais. Este processo é análogo às funções geométricas das propriedades de área. Assim, por exemplo, para um dado processo aleatório, os parâmetros média e variância correspondem respectivamente ao centro de gravidade e ao momento de inércia das figuras planas que representam a função de densidade espectral. Os momentos de ordem zero, um e dois correspondem, respectivamente, à área do espectro (ou variância), valor médio e valor médio quadrático (Eq. 2.6, Eq. 2.4 e Eq. 2.5). O n-ésimo momento do espectro $S(\omega)$ é dado por:

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega = \sum_{i=0}^{\infty} \omega_i^n S(\omega_i) \Delta\omega \quad \text{Eq. 2.45}$$

2.7 Largura de banda

A largura de banda do sinal nada é a diferença entre a frequência mais alta e a mais baixa do espectro. Quando a energia de um espectro está toda concentrada numa faixa pequena do espectro, dizemos que este espectro é de banda estreita, do contrário é de banda larga, como mostra a Figura 2.9. A largura de banda pode ser medida pelo parâmetro definido a seguir:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{m_0 m_4 - m_2^2}{m_0 m_4}}, \quad 0 \leq \varepsilon \leq 1 \quad \text{Eq. 2.46}$$

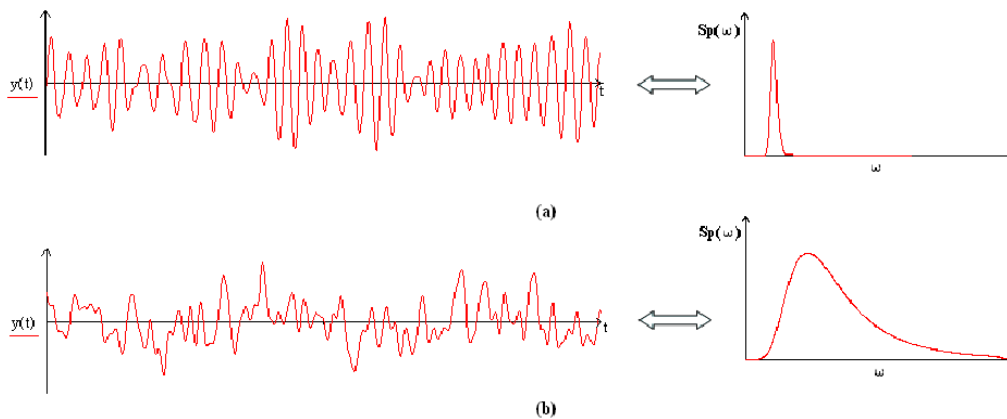


Figura 2.9 – Largura de Banda – (a) Banda Estreita / (b) Banda Larga

(VASCONCELOS NETO, 2009)

Tem-se um espectro de **banda estreita** quando $\varepsilon \rightarrow 0$ e um espectro de **banda larga** quando $\varepsilon \rightarrow 1$.

Propriedades dos espectros de acordo com sua largura de banda:

- Espectros de banda estreita são concentrados numa pequena faixa de frequência enquanto os espectros de banda larga possuem a energia distribuída por grandes faixas de frequências;
- Espectros de banda estreita possuem máximos predominantemente positivos, o que não ocorre nos espectros de banda larga;
- Espectros de banda estreita tendem a possuir um máximo para cada cruzamento positivo, diferente dos espectros de banda larga;
- Se a frequência de cruzamentos positivos de um processo de banda estreita for a mesma de um processo de banda larga, este possuirá menos máximos.
- Para os espectros de banda estreita, os ciclos individuais são contados facilmente. No caso dos espectros de banda larga, os maiores ciclos são descontinuados por ciclos de menor amplitude. Desta forma, alguns métodos especiais devem ser utilizados para determinação do número de ciclos, em função da largura de banda da resposta estrutural.

2.8 Conclusões do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os conceitos estatísticos fundamentais para o desenvolvimento das metodologias de análise apresentadas no capítulo a seguir. Muitas das definições aqui apresentadas serão referenciadas em outros pontos mais adiante.

As principais referências utilizadas neste capítulo são as notas de aula do curso de métodos probabilísticos do professor Luis Sagrilo do PEC/COPPE/UFRJ (SAGRILO, 2013b), em especial no desenvolvimento das funções de densidade, e a dissertação de mestrado de Antônio Vasconcelos, da COPPE/UFRJ (VASCONCELOS NETO, 2009).

3 ANÁLISE DE FADIGA EM ESTRUTURAS *OFFSHORE*

3.1 Apresentação

Fadiga é um processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado, que ocorre num material sujeito a condições que produzem tensões ou deformações dinâmicas num ponto ou em vários pontos, e que podem culminar em trincas ou numa fratura completa após um número suficiente de variações de carga. (ASTM, 2011)

O surgimento dos efeitos da fadiga está relacionado com a atuação de cargas dinâmicas de natureza cíclica sobre uma estrutura qualquer, onde pequenas trincas inicialmente aparecem e, se não houver nenhuma intervenção, estes defeitos podem crescer, levando à ruptura da estrutura. Pode-se dizer que a análise de fadiga constitui um estado limite especial, pois este seria um estado limite de utilização (serviço) que pode levar a ruína do material.

O processo de fadiga pode ser caracterizado por quatro fases, indicadas a seguir:

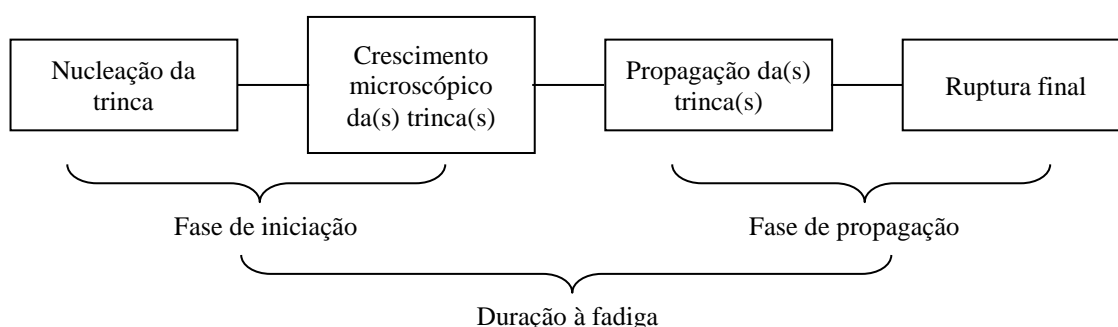


Figura 3.1 – Caracterização do processo de fadiga (fases)

As duas primeiras fases constituem o período de iniciação da trinca. Quando estamos lidando com material base, cerca de 90% do tempo de vida útil da peça está relacionado com o período de iniciação. Porém, nas juntas soldadas, desconsideramos as fases de iniciação já que o próprio processo de soldagem cria microfissuras na estrutura, muitas vezes detectáveis por ensaios não destrutivos (ELLWANGER, 2006). É importante ainda ressaltar que uma ruptura por fadiga é muitas vezes súbita e ocorre sem dar sinal porque a trinca não é visível ou está inacessível.

Este trabalho objetiva simular numericamente a resposta de uma estrutura sujeita a carregamentos de natureza cíclica (majoritariamente hidrodinâmicos) para, a partir desta resposta, realizar uma estimativa de vida à fadiga da mesma. Este processo envolve, basicamente, as seguintes etapas:

- Simulação dos carregamentos hidrodinâmicos;
- Análise da resposta da estrutura;
- Avaliação de fadiga.

3.2 Simulações hidrodinâmicas

3.2.1 Teorias de ondas

Onda de gravidade é o movimento oscilatório de um fluido devido a efeitos gravitacionais ocasionados pela presença de uma superfície livre (interface entre dois meios). Qualquer perturbação que ocasione uma variação da pressão do fluido próximo à superfície livre acarretará um movimento da massa fluida em busca do equilíbrio com a pressão atmosférica e com isto mudança de forma desta superfície.

O modelo matemático para estudo do comportamento das elevações da superfície do mar envolve um PVC, ou seja, uma equação diferencial e as condições de contorno associadas. Este modelo matemático é conhecido como teoria de onda e tem por objetivo determinar velocidades e acelerações do fluido desconsiderando a presença de corpos flutuantes ou imersos. Um modelo mais geral, denominado teoria da difração-irradiação, representa a interação das partículas do fluido com corpos flutuantes ou imersos, de grandes dimensões. Este modelo é tridimensional e tem por objetivo determinar as forças atuantes no corpo, que resultam da movimentação do fluido (induzida pelas ondas). Existem diversos métodos de solução para os referidos problemas. A teoria mais comumente aplicada ao projeto de sistemas *offshore* é a teoria linear de Airy, ou teoria das ondas senoidais. A principal premissa desta teoria é que a altura de onda é pequena comparada com o comprimento de onda. Esta hipótese permite a linearização do PVC, desprezando-se os termos de segunda ordem e de ordens superiores, ver, por exemplo, (ELLWANGER e LIMA, 2007).

3.2.1.1 Ondas Regulares

A maioria das teorias de onda assume que as ondas são periódicas e uniformes. Quando um grupo de ondas consiste em várias ondas em sequência, umas idênticas às outras, estas são denominadas ondas periódicas ou ondas regulares.

Embora as ondas regulares não existam na prática, elas são comumente utilizadas para estimar carregamentos em estruturas *offshore* que na realidade são submetidas à ação de ondas irregulares. O estudo de ondas regulares é também um ponto de partida muito importante para o entendimento das ondas irregulares, sendo uma prática muito comum na simulação de mares irregulares a superposição de resultados gerados para várias ondas regulares.

As ondas regulares são uma sequência de ondas bidimensionais periódicas, que podem ser divididas em ondas individuais de formato idêntico. Quando têm pequena amplitude, elas podem ser simuladas por funções senoidais, podendo ser descritas através dos parâmetros constantes na Figura 3.2:

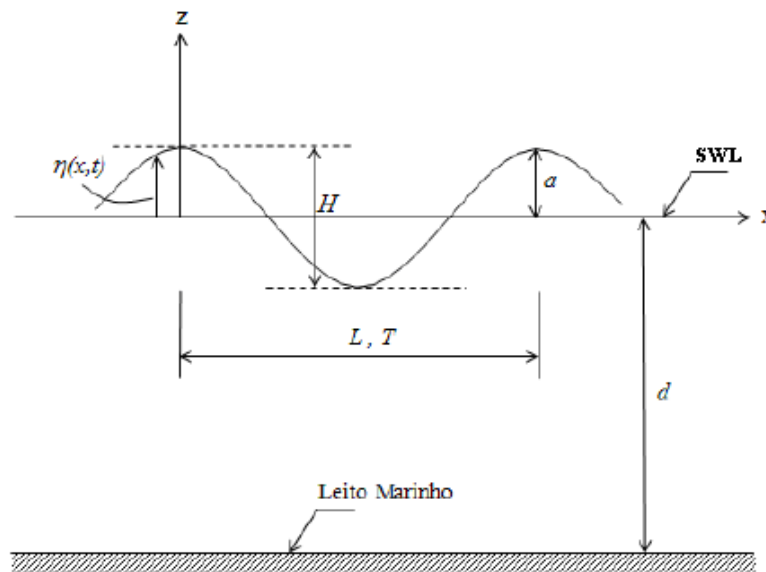


Figura 3.2 – Principais características de uma onda regular (BATALHA, 2009)

- Comprimento - L: Distância entre duas cristas ou cavados consecutivos.
- Período - T: O tempo necessário, geralmente em segundos, para que sucessivas cristas de ondas cruzem um ponto estacionário. Algumas vezes o período da onda pode ser substituído pelo seu inverso, a frequência, medida em Hertz ou raios por segundo.

- Altura - H: Distância vertical entre a crista da onda e o cavado, ou seja, entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo. A amplitude (a) é a metade da altura de onda.
- Elevação da superfície do mar - η : Elevação medida acima do nível de águas calmas (SWL).
- Lâmina d'água - d: Profundidade do mar a partir leito marinho até a elevação média do mar (MWL).

Segundo a mais simples das teorias de ondas, a teoria linear de Airy, a elevação média da superfície da onda pode ser descrita como apresentado a seguir:

$$\eta(t) = \frac{H}{2} \sin(\omega t - kx) \quad \text{Eq. 3.1}$$

onde:

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ é a frequência angular;

$k = \frac{2\pi}{L}$ é o número da onda.

A cinemática da onda sob uma teoria linear é descrita pelas variáveis na Figura 3.3:

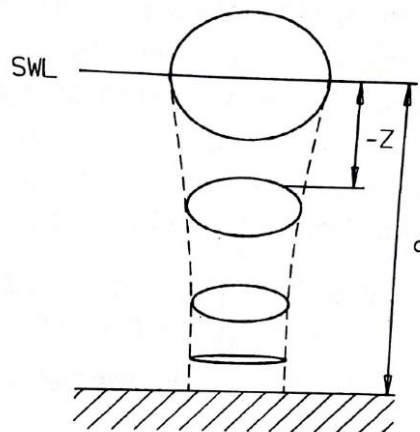


Figura 3.3 – Orbitais de movimento das partículas segundo a teoria linear (NAESS, 1985)

onde:

z é a distância entre a partícula e o MWL;

d é a lâmina d'água.

A seguir, são apresentados alguns parâmetros da teoria linear:

- Elevações da superfície

$$\eta(t) = \frac{H}{2} \cos(\omega t) \quad \text{Eq. 3.2}$$

- Comprimento de onda

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) = \frac{2\pi}{k} \quad \text{Eq. 3.3}$$

- Celeridade da onda

$$C = \frac{L}{T} \quad \text{Eq. 3.4}$$

- Velocidade da partícula

$$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh\left[\frac{2\pi(z+d)}{L}\right]}{\cosh\left[\frac{2\pi d}{L}\right]} \cos(\omega t) - \text{componente horizontal} \quad \text{Eq. 3.5}$$

$$w = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh\left[\frac{2\pi(z+d)}{L}\right]}{\cosh\left[\frac{2\pi d}{L}\right]} \sin(\omega t) - \text{componente vertical} \quad \text{Eq. 3.6}$$

- Aceleração da partícula:

$$a_x = \pi \frac{gH}{L} \frac{\cosh\left[\frac{2\pi(z+d)}{L}\right]}{\cosh\left[\frac{2\pi d}{L}\right]} \sin(\omega t) - \text{componente horizontal} \quad \text{Eq. 3.7}$$

$$a_z = \pi \frac{gH}{L} \frac{\sinh\left[\frac{2\pi(z+d)}{L}\right]}{\cosh\left[\frac{2\pi d}{L}\right]} \cos(\omega t) - \text{componente vertical} \quad \text{Eq. 3.8}$$

- Pressão de subsuperfície:

$$p = \rho g \eta(t) \frac{\cosh\left[\frac{2\pi(z+d)}{L}\right]}{\cosh\left[\frac{2\pi d}{L}\right]} - \rho g z \quad \text{Eq. 3.9}$$

Diversas teorias de onda foram desenvolvidas em conjunto com a teoria linear. Pode-se citar as teorias de Stokes, Cnoidal, Função de Corrente e Solitária como aplicações comuns para fins de projeto. A Figura 3.4, apresenta as faixas de validade de diversas teorias de onda.

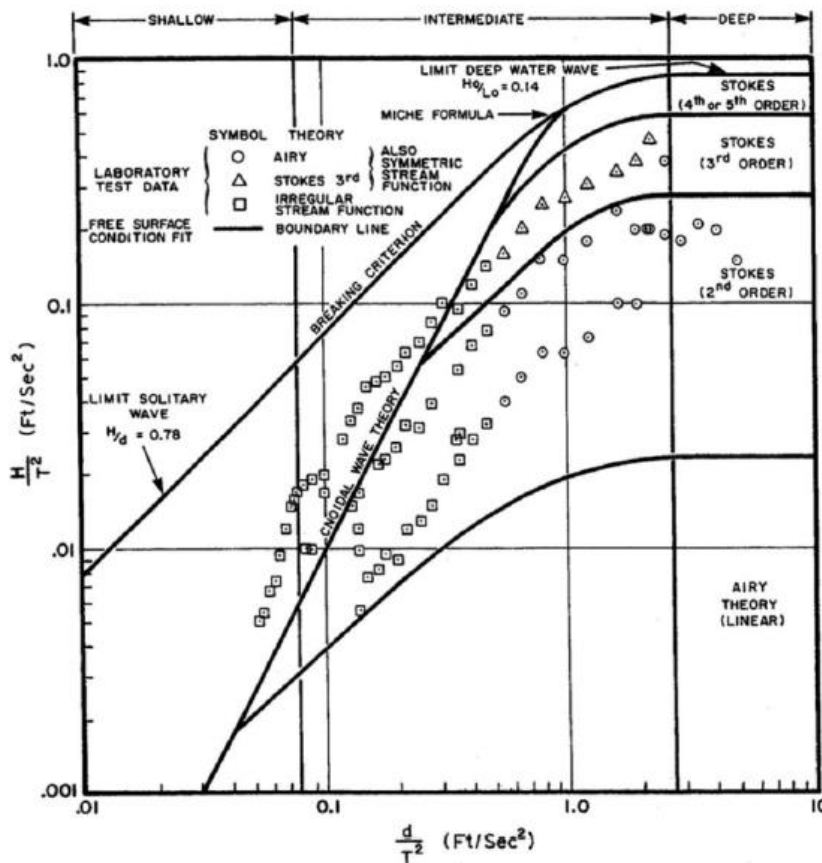


Figura 3.4 – Área de validade de diversas teorias de onda (CHAKRABARTI, 1987)

3.2.1.2 Ondas Irregulares

O modelo matemático para a representação das ondas do mar mencionado no item anterior trata de apenas um único trem de ondas, definido por sua altura H e período T , como indicado na Figura 3.2.

Uma representação mais realista consiste em empregar um modelo espectral para um estado de “mar irregular”, às vezes também referido como “ondas aleatórias”. Neste modelo, o estado de mar irregular geral é representado pela superposição linear de várias ondas regulares, com diferentes valores de período, amplitude e fase, conforme pode ser observado na Figura 3.5.

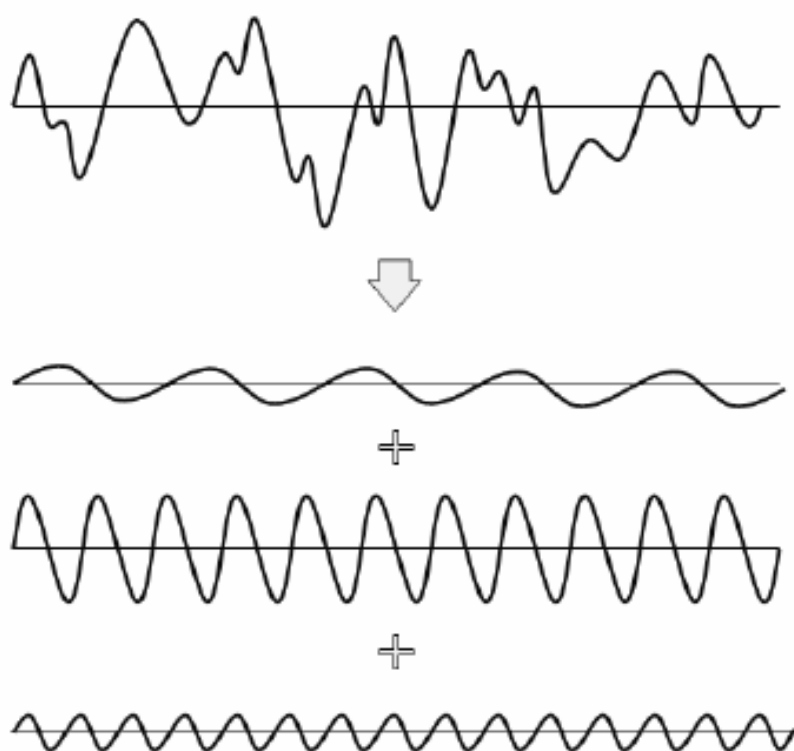


Figura 3.5 – Sinal de onda randômico / Superposição de ondas regulares
(VASCONCELOS NETO, 2009)

Para uma dada locação, medições e estudos estatísticos ajustam um modelo de espectro adequado para a representação da distribuição de densidade de energia apropriada das ondas do mar.

O ajuste do modelo espectral é feito em termos de parâmetros estatísticos, tais como fatores de forma espectral, altura significativa de onda e período de pico. Na estatística de curto prazo, estes parâmetros são supostos constantes, cada conjunto deles caracterizando um “estado de mar”. A escolha do espectro de mar e de seus parâmetros característicos é função do fenômeno a ser estudado e dos levantamentos em medições realizadas na posição geográfica a que se queira referir. (ELLWANGER e LIMA, 2007)

3.2.2 Caracterização no curto prazo

No ambiente marinho, as ondas, assim como o vento e a correnteza sofrem variações naturalmente aleatórias tanto no tempo quanto no espaço. Entretanto, observa-se que os processos se tornam estacionários em determinado momento. Em estatística, uma escala de curto prazo é o período de tempo para o qual um processo ganha estabilidade, passando a ser considerado estacionário. No curto prazo, os comportamentos de variáveis como as ondas e o vento são caracterizados por funções de densidades espectrais. (SAGRILO, 2013a)

Para as ondas, convencionou-se tomar medições em intervalos de tempo de três horas, sendo este período denominado estado de mar. Eles podem ser caracterizados por alguns parâmetros de curto prazo: a altura significativa de onda (H_s), que é a altura média do terço superior das ondas observadas, conforme a Eq. 3.10; o período de cruzamentos zero (T_z), conforme a Eq. 3.11; e a direção de propagação (θ_w). Além disso, as ondas podem ser classificadas em duas categorias: as ondas geradas pelos ventos de mar local (*sea*) e as ondas formadas em outras localidades (*swell*). (PAPALEO, 2009)

$$H_s = \frac{1}{3N} \sum_{i=\frac{2}{3}N}^N H_i \quad \text{Eq. 3.10}$$

$$T_z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad \text{Eq. 3.11}$$

O vento costuma ser caracterizado no curto prazo por um período de uma hora. É caracterizado como variável ao longo do tempo, com uma parcela fixa, a velocidade média (v_m), e uma parcela flutuante $v_f(t)$, conforme a Eq. 3.12. A relação entre as duas parcelas é dada por um espectro $S_v(\omega, v_m)$, que tem os modelos de Harris, Davenport e Kaimal (MIGUEL, MIGUEL, *et al.*, 2012) como os mais difundidos na indústria.

$$v_v(t) = v_m + v_f(t) \quad \text{Eq. 3.12}$$

Para a corrente, é comum considerar um perfil de velocidades constante em um dado estado de mar. Um perfil de correntes pode ser caracterizado no curto prazo pelos

seguintes parâmetros: velocidade na superfície (v_c), e direção de propagação (θ_c). Ambos os parâmetros variam de acordo com a profundidade, formando um perfil aproximadamente triangular, ou seja, $v_c \cong v_c^{max}$ na superfície e $v_c \cong 0$ perto do fundo.

3.2.3 Espectros de onda

Os espectros de onda descrevem a distribuição de energia entre as componentes de onda em diferentes frequências de um estado de mar. Eles podem ser obtidos diretamente a partir de dados medidos ou de forma analítica. Matematicamente, ele pode ser obtido a partir da transformada de Fourier da função de auto correlação do processo de elevação da superfície do mar. Ainda nesta seção são apresentadas algumas formulações propostas para representar as condições de mar em diversas localidades ao redor do mundo.

Uma característica importante de um espectro é seu comportamento direcional. As ondas geradas pelo vento não necessariamente se propagam em uma única direção, num efeito conhecido como mar de crista curta. Apenas aquelas ondas com frequências próximas ao pico do espectro viajam na direção do vento, sendo as demais ondas distribuídas por um intervalo de direções. Em outras palavras: apenas a direção principal de onda não define completamente a direcionalidade de um estado de mar (VIDEIRO, 1998). A Figura 3.6 ilustra os ângulos de espraiamento de uma onda.

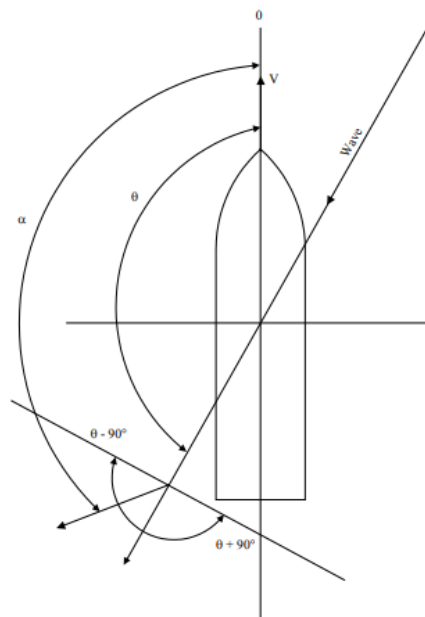


Figura 3.6 – Definição de ângulo de espraiamento (ABS, 2010)

Um espectro direcional pode ser definido pela função a seguir:

$$S(\omega, \theta) = S(\omega)D(\omega, \theta) = S(\omega)D(\theta) \quad \text{Eq. 3.13}$$

onde:

$S(\omega, \theta)$ é o espectro de energia de onda direcional;

$S(\omega)$ é o espectro de energia de onda unidirecional;

$D(\omega, \theta) \sim D(\theta)$ é a função de espreadimento.

Apesar de existirem outras formulações, a equação geral mais utilizada para a função de espreadimento é apresentada na equação a seguir:

$$D(\theta) = \frac{\Gamma(1 + n/2)}{\sqrt{\pi}\Gamma(1/2 + n/2)} \cos^2(\theta - \theta_p) \quad \text{Eq. 3.14}$$

onde:

Γ é a função Gamma;

n é o expoente da função de espreadimento

$\theta - \theta_p$ é o desvio em relação à direção de propagação principal, $|\theta - \theta_p| \leq \frac{\pi}{2}$.

Independentemente da formulação, esta função deve satisfazer a seguinte premissa:

$$\int_{\theta} D(\omega, \theta) d\theta = 1 \quad \text{Eq. 3.15}$$

A prática recomendada da DNV GL indica o uso de expoente “n” entre 2 e 4 para ondas de vento local usual (DNV GL, 2017i). Entretanto, a literatura indica valores de “n” até 8 como usuais em estados de mar com $H_s < 10\text{m}$ e não costuma recomendar o uso de funções de espreadimento para estados de mar com $H_s > 10\text{m}$ (VIDEIRO, 1998).

3.2.3.1 Formulação Pierson-Moskowitz

Esta é uma formulação para mares locais (*sea*), caracterizados por ondas geradas pelo vento local. É o espectro mais representativo para os mares ao redor do mundo. Este modelo descreve o mar completamente desenvolvido, caracterizado por um único parâmetro: a velocidade do vento. A pista e a duração são consideradas infinitas, ou seja, o modelo é melhor ajustado para ventos soprando por grandes períodos de tempo, em grandes áreas sem obstáculos. Este espectro também se mostrou aplicável para grandes tormentas. Segue a formulação (PIERSON e MOSKOWITZ, 1964):

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp \left[-1,25 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-4} \right] \quad \text{Eq. 3.16}$$

onde:

$\alpha = \frac{5 m_0 \omega_0^{-4}}{g^2}$ é o parâmetro de forma;

g é a aceleração da gravidade;

ω_0 é a frequência de pico (onde ocorre o máximo valor do espectro).

3.2.3.2 Formulação JONSWAP

Esta formulação foi proposta em 1973 e o nome é uma abreviação do programa de pesquisa que o originou (Joint North Sea Wave Program). É uma variação da formulação de Pierson-Moskowitz, ajustada aos dados obtidos naquela ocasião. Este tipo de espectro é comprovadamente representativo para ondas geradas por ventos locais, em mares com pista de vento limitada (HASSELMANN, BARNETT, *et al.*, 1973). A formulação original é apresentada abaixo:

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp \left[-1,25 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2 \tau^2 \omega_0^2} \right]} \quad \text{Eq. 3.17}$$

onde:

α e γ são parâmetros de forma, dados em função de H_s e T_z ;

τ é um parâmetro de forma, dado em função de ω e ω_0 ;

ω_0 é a frequência de pico (onde ocorre o máximo valor do espectro).

A Figura 3.7 ilustra a formulação original do JONSWAP.

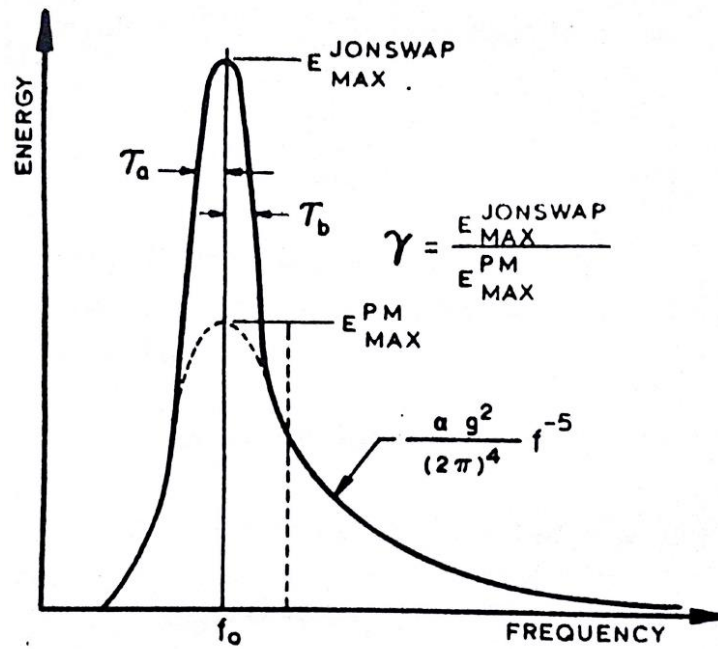


Figura 3.7 – Espectro de JONSWAP x Espectro de Pierson-Moskowitz

A formulação completa utilizada para representar o comportamento de mar nas principais regiões de exploração de petróleo da costa brasileira (bacias de Campos e Santos), já com os parâmetros de forma adequados, é apresentada a seguir:

$$S(\omega) = \frac{5}{16} H_s^2 T_p \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-5} [1 - 0,287 \ln(\gamma)] \exp \left[-1,25 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2 \tau^2 \omega_0^2} \right]} \quad \text{Eq. 3.18}$$

onde:

$\omega_0 = \frac{1}{T_p}$ é a frequência de picos;

$T_p = T_z \sqrt{\frac{5+\gamma}{10,89+\gamma}}$ é o período de picos;

T_z é o período de cruzamentos zero positivos;

$\tau = \begin{cases} 0,07 & \text{para } \omega \leq \omega_0 \\ 0,09 & \text{para } \omega > \omega_0 \end{cases}$ é um parâmetro de forma;

$\gamma = 6,4 T_p^{-0,491}$ é um parâmetro de forma.

3.2.3.3 Formulação de Ochi-Hubble

A formulação de Ochi-Hubble tem por característica principal, a presença de 2 picos de energia unidirecionais. Desta forma, ela pode ser utilizada para representar mares bimodais, com influência de ondas formadas pelos ventos locais (*sea* / frequências mais altas) e também ondas vindas de regiões distantes (*swell* / frequências mais baixas). É uma formulação de 6 parâmetros, sendo três parâmetros para cada um dos picos de energia, capaz de representar todos os estágios de desenvolvimento do mar (OCHI e HUBBLE, 1976). Segue a formulação:

$$S(\omega) = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^2 \frac{\left(\frac{4\lambda_j+1}{4} \omega_{0j}^4\right)^{\lambda_j}}{\Gamma(\lambda_j)} \frac{H_{sj}^2}{\omega_0^{4\lambda_j+1}} \exp\left[-\left(\frac{4\lambda_j+1}{4}\right)\left(\frac{\omega_{0j}}{\omega}\right)^4\right] \quad \text{Eq. 3.19}$$

onde:

H_{s1} , ω_{01} e λ_1 são a altura significativa de onda, a frequência modal e o fator de forma associados ao pico de menor frequência (pico primário);

H_{s2} , ω_{02} e λ_2 são a altura significativa de onda, a frequência modal e o fator de forma associados ao pico de maior frequência (pico secundário);

Para $\lambda_1 = 1$ e $\lambda_2 = 0$, temos o espectro de Pierson-Moskowitz. A Figura 3.8 ilustra a combinação de 2 espectros, formando o espectro final de Ochi-Hubble.

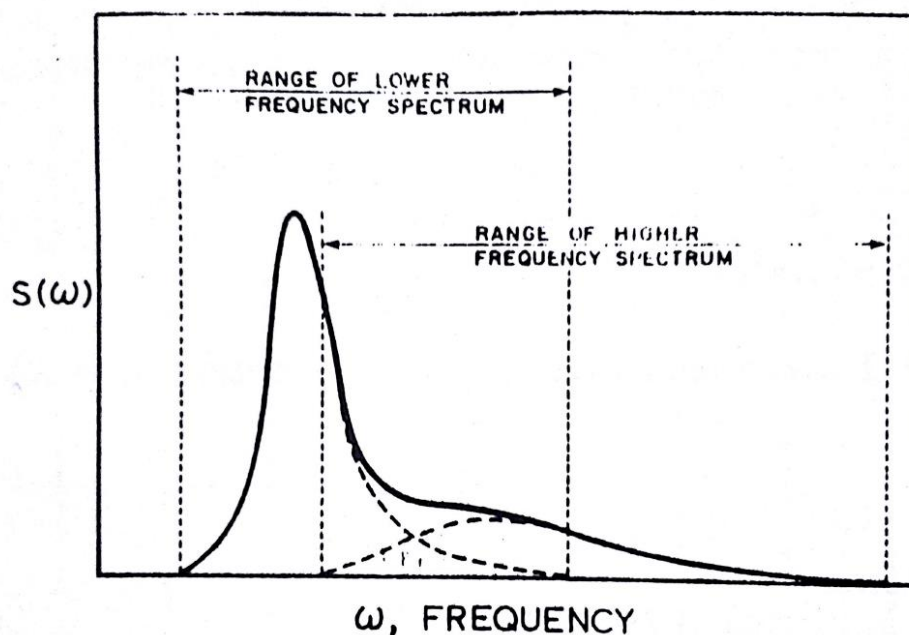


Figura 3.8 – Espectro de Ochi-Hubble

3.2.3.4 Outras formulações

Existem diversas outras formulações de espectros de onda na literatura. A seguir, são listadas as características de algumas delas, as quais são detalhadamente descritas nas referências desta dissertação (ABS, 2010) (DNV GL, 2017i) (VIDEIRO, 1998):

- Formulação de Newmann, de 1953: expressa em termos da velocidade do vento;
- Formulação de Bretshneider, de 1959 e 1969: que propõe uma adaptação à formulação de Pierson-Moskowitz para as condições do Golfo do México;
- Formulação do ISSC (sigla para *International Ship Structures Congress*), de 1964: que é uma evolução da formulação de Bretshneider;
- Formulação da ITTC (sigla para *International Towing Tank Conference*), de 1966, 1969 e 1972): que propõe modificações no cálculo das alturas e períodos de onda na formulação de PM;
- Formulação da Torsethaugen, de 1993: considera mares bimodais unidirecionais.

3.2.4 *Caracterização no longo prazo*

A caracterização de longo prazo de um processo estatístico é dada pela distribuição conjunta de probabilidades de ocorrência de suas variáveis. Para isso, são realizadas medições contínuas, em períodos idealmente bastante superiores a um ano, dos parâmetros ambientais relevantes. Entretanto, este processo de caracterização pode ser bastante complicado, já que todas as variáveis possuem certo grau de correlação entre si. Como podemos observar na Figura 3.9 , o longo prazo pode ser descrito como uma sequência de eventos de curto prazo.

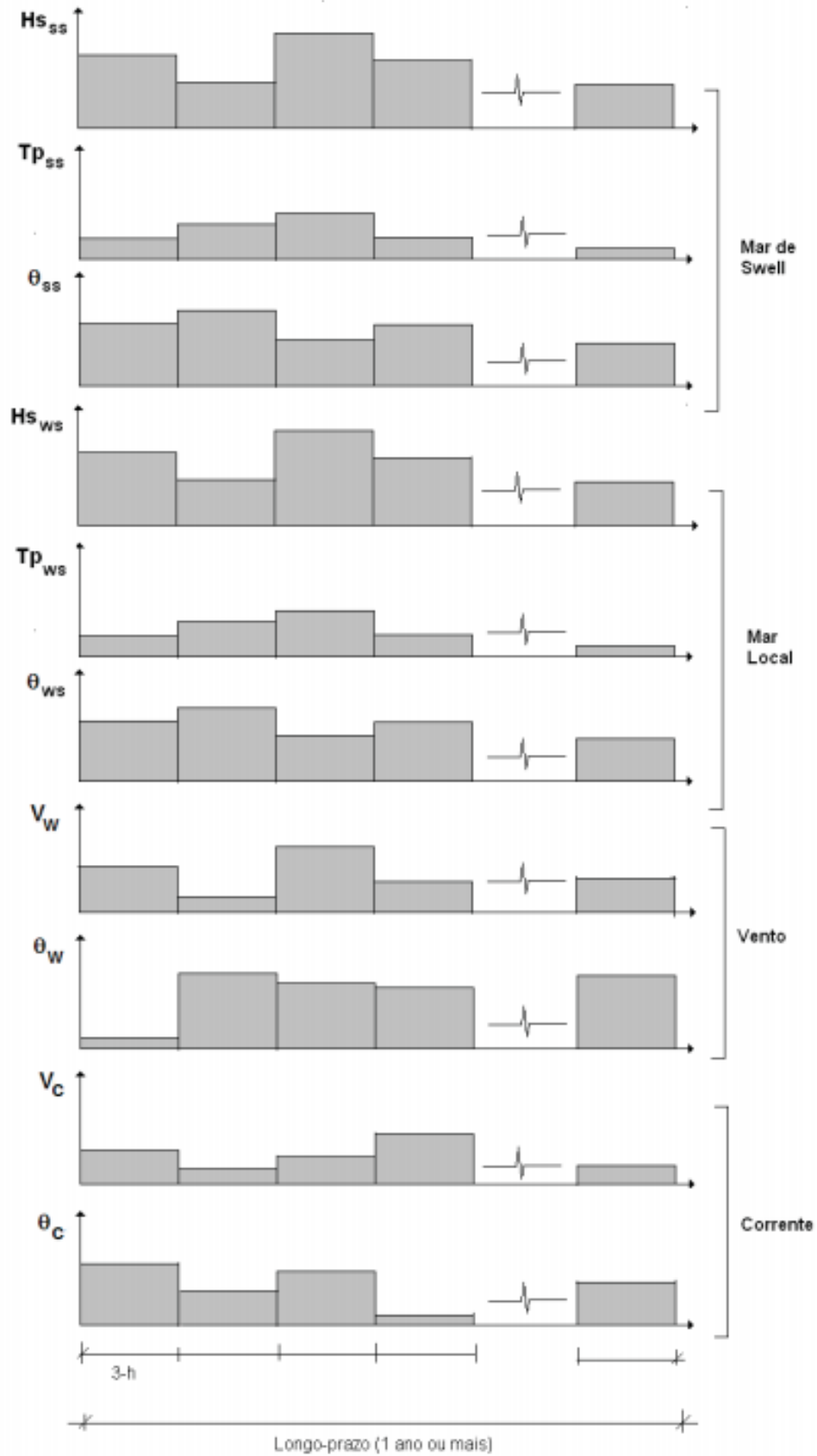


Figura 3.9 – Caracterização de parâmetros ambientais no curto e longo prazo (PAPALEO, 2009)

Como exemplo, podemos citar o caso das ondas, com as quais é prática comum de projeto o uso de diagramas de dispersão (*scatter diagrams*) para caracterizar a distribuição conjunta das probabilidades de ocorrência das alturas e períodos (H_s e T_z ou T_p). A Tabela 3.1 mostra o diagrama de dispersão de probabilidades conjuntas de ocorrência de alturas e períodos de ondas proposto pela DNV GL, para navegação irrestrita em rotas comerciais (DNV GL, 2017i).

Tabela 3.1 Diagrama de dispersão de ondas - navegação irrestrita

$T_z(s)$	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	Sum
H_s (m)																
1.0	311	2734	6402	7132	5071	2711	1202	470	169	57	19	6	2	1	0	26287
2.0	20	764	4453	8841	9045	6020	3000	1225	435	140	42	12	3	1	0	34001
3.0	0	57	902	3474	5549	4973	3004	1377	518	169	50	14	4	1	0	20092
4.0	0	4	150	1007	2401	2881	2156	1154	485	171	53	15	4	1	0	10482
5.0	0	0	25	258	859	1338	1230	776	372	146	49	15	4	1	0	5073
6.0	0	0	4	63	277	540	597	440	240	105	39	13	4	1	0	2323
7.0	0	0	1	15	84	198	258	219	136	66	27	10	3	1	0	1018
8.0	0	0	0	4	25	69	103	99	69	37	17	6	2	1	0	432
9.0	0	0	0	1	7	23	39	42	32	19	9	4	1	1	0	178
10.0	0	0	0	0	2	7	14	16	14	9	5	2	1	0	0	70
11.0	0	0	0	0	1	2	5	6	6	4	2	1	1	0	0	28
12.0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	2	1	1	0	0	0	11
13.0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	4
14.0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Sum	331	3559	11937	20795	23321	18763	11611	5827	2489	926	313	99	29	9	0	100000

3.3 Modelagem da resposta da estrutura

3.3.1 Movimentos de um corpo flutuante

Os 6 graus de liberdade de um navio são definidos conforme apresentado na Figura 3.10:

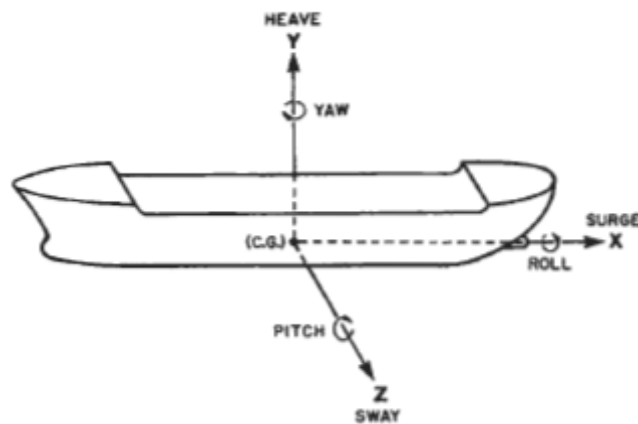


Figura 3.10 – Movimentos de uma embarcação (BATALHA, 2009)

a) **Surge (avanço):** movimento de translação que não provoca mudança no plano de flutuação do navio e a alteração está no deslocamento longitudinal do casco (direção popa-proa / positivo no sentido da proa). A esta solicitação o navio mantém um “equilíbrio indiferente”.

b) **Sway (deriva):** como no *avanço* o navio mantém seu plano de flutuação. Movimento de translação na direção transversal (direção boreste-bombordo – positivo no sentido bombordo). A esta solicitação o navio mantém um “equilíbrio indiferente”.

c) **Heave (afundamento):** movimento de translação vertical (positivo no sentido de baixo para cima). O *heave* provoca alteração no volume de deslocamento, ou seja, causa variação no empuxo. Isto gera perda do plano de flutuação do corpo flutuante que, a seguir, é reconquistado por ação da gravidade. Consequentemente, o corpo flutuante mantém “equilíbrio estável” a esta solicitação.

d) **Yaw (guinada):** movimento de rotação em torno do eixo vertical Z, que também não provoca mudança no plano de flutuação da embarcação. A posição do navio tem “equilíbrio indiferente”.

e) **Pitch (arfagem):** o movimento de rotação em torno do eixo bombordo-boreste que provoca variações instantâneas de *trim* (inclinação do navio) e com isto, variações na distribuição do volume submerso. Este movimento ocasiona o surgimento de um conjugado peso-empuxo já que o centro de carena (centro de gravidade do volume da água deslocado por um navio) é deslocado da posição de equilíbrio.

f) **Roll (jogo):** movimento de rotação em torno do eixo X, que de forma análoga ao movimento de *pitch*, provoca variações na distribuição do volume submerso. A estabilidade depende do momento do binário resultante.

Para navios e unidades flutuantes não ancoradas em geral, apenas três tipos de movimento são considerados puramente oscilatórios (*heave*, *roll* e *pitch*), já que estes atuam sob uma força de restauração quando o navio é perturbado a partir de sua posição de equilíbrio. No entanto, para unidades estacionárias de produção, como unidades do tipo FPSO, o sistema de amarração e ancoragem gera forças adicionais de restauração devido à tração nos cabos e linhas de ancoragem, transformando também em movimentos oscilatórios os demais graus de liberdade do navio e acrescentando forças restauradoras adicionais ao sistema.

Uma análise de movimentos para unidades flutuantes pode levar em consideração efeitos muito mais complexos do que aqueles mencionados neste capítulo, tais como: forças de amortecimento, rigidez do sistema de amarração, amortecimento, vento sobre o conjunto, peso da unidade para diversos níveis de carregamento de seus tanques de lastro e armazenamento e muitos outros aspectos não detalhados neste trabalho.

Deste ponto em diante, a nomenclatura adotada para identificar os tipos de movimentos será exclusivamente a nomenclatura em inglês, por ser esta muito mais usual em quase todas as referências disponíveis.

3.3.2 Equações de movimento

O modelo matemático clássico de um grau de liberdade conhecido como sistema massa-mola-amortecedor em movimento, representado de forma esquemática pela Figura 3.11, pode ser utilizado para fundamentar o conceito de cargas inerciais.

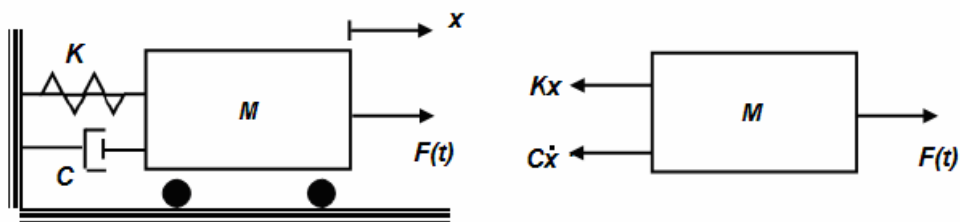


Figura 3.11 – Sistema Clássico Massa-Mola-Amortecedor

Aplicando a equação de movimento, também conhecida como 2ª lei de Newton, ao diagrama de corpo livre da massa (M), submetida a um carregamento $F(t)$, podemos os deslocamentos do conjunto $x(t)$.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad \text{Eq. 3.20}$$

onde:

C é constante de amortecimento viscoso;

K é a constante elástica da mola;

M é a massa do corpo em movimento;

\dot{x} e \ddot{x} são as derivadas primeira e segunda do deslocamento em relação ao tempo;

F é o carregamento dinâmico.

O princípio D'Alembert estabelece que: o equilíbrio dinâmico de um sistema pode ser obtido adicionando-se às forças externas aplicadas uma força fictícia, chamada de força de inércia, proporcional à aceleração e com sentido contrário ao do movimento, sendo a constante de proporcionalidade igual à massa do sistema, ver, por exemplo, (BATALHA, 2009).

Na Eq. 3.20, supondo que a soma de $M\ddot{x}(t)$ e $C\dot{x}(t)$ é muito pequena se comparada com $Kx(t)$, seria admissível resolver o sistema $Kx(t) = F(t)$, ignorando as demais parcelas. Esta hipótese seria válida no caso em que o período da excitação é muito maior que o período natural da estrutura.

Para uma análise de movimentos, o período das ondas é relativamente próximo em magnitude ao período natural de *heave*, *roll* e *pitch* do navio; em contrapartida este período é muito maior do que o período natural das estruturas *topsides* e por esta razão, as ondas não geram excitação dinâmica sobre a estrutura. Neste caso, a parcela $M\ddot{x}(t)$ é bastante significativa. No entanto, é o $M\ddot{x}(t)$ aplicado, calculado a partir das características de movimento do navio – e não o da resposta dinâmica da estrutura – que deve ser considerado importante.

Para esta situação, uma análise quasi-estática deve ser realizada reorganizando a Eq. 3.20 conforme demonstrado a seguir (BARLTROP e ADAMS, 1991):

$$Kx(t) = F(t) - M\ddot{x}_B(t) - C\dot{x}_B(t) \quad \text{Eq. 3.21}$$

$$Kx(t) = F_e(t) \quad \text{Eq. 3.22}$$

$$F_e(t) = F(t) - M\ddot{x}_B(t) - C\dot{x}_B(t) \quad \text{Eq. 3.23}$$

onde:

\ddot{x}_B é a aceleração da estrutura *topside* causada pelo movimento do navio;

$C\dot{x}_B$ é a força de amortecimento (pode ser desprezada);

x é o deslocamento da estrutura.

3.3.3 Funções de transferência

A resposta da estrutura quando submetida a uma onda regular pode ser facilmente determinada, conforme visto nos itens anteriores deste trabalho. A amplitude da resposta geralmente é normalizada com relação à amplitude da onda e para um sistema linear, a resposta dinâmica normalizada não varia para uma dada altura e frequência de onda. Se uma função desta resposta dinâmica for construída a partir de um intervalo de frequências de interesse para uma dada estrutura *offshore*, então esta é chamada de função de transferência, mais conhecida no meio técnico pelo termo em inglês, *response-amplitude operator (RAO)*. A função é assim chamada porque permite que uma função do comportamento da excitação se transforme em uma função que descreve a resposta dinâmica da estrutura para uma onda de amplitude unitária. (CHAKRABARTI, 1987)

3.3.4 Obtenção do espectro de resposta a partir de um RAO

Conforme mencionado anteriormente, o RAO serve como uma função de transferência que traduz a resposta dinâmica da estrutura para diversos tipos de ondas regulares, em diferentes frequências em uma resposta irregular.

De posse de uma função que descreve o espectro de mar, que representa o espectro da excitação, podemos obter para um sistema linear o espectro de resposta através da seguinte relação (CHAKRABARTI, 1987):

$$s_R(\omega) = [RAO(\omega)]^2 \times s_\eta(\omega) \quad \text{Eq. 3.24}$$

onde:

ω é a frequência angular;

$s_\eta(\omega)$ é o espectro de mar;

$RAO(\omega)$ é uma função de transferência.

Para obter-se um espectro de acelerações, o RAO deve ser o de acelerações e de forma análoga, para obter-se um espectro de tensões na estrutura, o RAO utilizado deve ser o de tensões. A Figura 4-10 ilustra de forma esquemática o cruzamento da função de transferência com o espectro de mar, apresentando a forma do espectro de resposta:

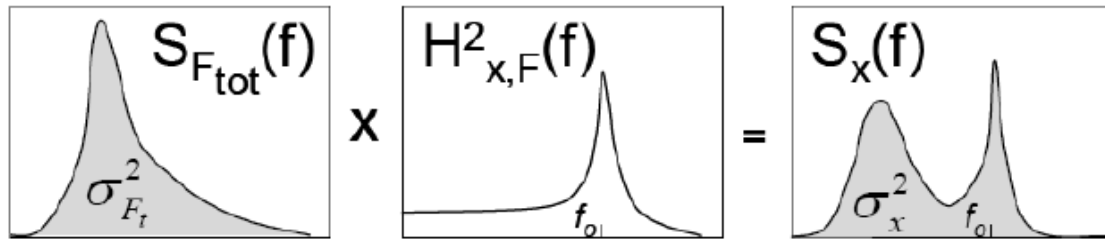


Figura 3.12 – Modelagem espectral da resposta dinâmica

Com isto é possível transformar a resposta para um conjunto de várias ondas regulares em uma resposta dinâmica para um mar irregular e, de posse deste espectro de resposta, é possível realizar todo o tratamento estatístico para obtenção de dados da resposta dinâmica.

3.4 Metodologias de análise

3.4.1 Método simplificado

A prática recomendada da DNV GL (DNV GL, 2016b) apresenta um método simplificado par o cálculo da vida à fadiga. Esta metodologia se vale da premissa de que os picos de tensão seguem uma distribuição de Weibull, cuja equação é apresentada a seguir:

$$Q(\Delta\sigma) = \exp \left[- \left(\frac{\Delta\sigma}{q} \right)^h \right] \quad \text{Eq. 3.25}$$

onde:

Q é a probabilidade de excedência da variação de tensões $\Delta\sigma$;

h é o parâmetro de forma da distribuição de Weibull;

q é o parâmetro de escala da distribuição de Weibull, definido a partir da variação de tensões $\Delta\sigma_0$ (maior variação de tensões esperada em n_0 ciclos):

$$q = \frac{\Delta\sigma_0}{\ln(n_0)^{\frac{1}{h}}} \quad \text{Eq. 3.26}$$

Quando a distribuição de longo prazo das tensões é definida aplicando-se a distribuição de Weibull para a carga em diferentes condições, e uma curva S-N de um único declive, o dano fadiga é dada por:

$$D = \frac{v_0 \times T_d}{\bar{a}} \times q^m \times \Gamma\left(1 + \frac{m}{h}\right) \leq \eta \quad \text{Eq. 3.27}$$

onde:

T_d é a vida de projeto em segundos;

h é o parâmetro de forma de Weibull;

q é o parâmetro de escala de Weibull;

v_0 é a frequência de cruzamento zero média;

\bar{a} e m são parâmetros da curva S-N

Γ é a função gamma, definida como $\Gamma(t) = \int_0^{\infty} x^{t-1} e^{-x} dx$;

η é o máximo fator de utilização.

3.4.2 Método espectral

A norma DNV GL indica dois métodos para análise de fadiga espectral:

- Método de estocástico por componentes de carga (*load component stochastic*);
- Método estocástico completo (*full stochastic*).

Ambos os métodos são baseados nas seguintes premissas para o cálculo dos danos:

- As ações ambientais, tais quais onda, corrente, vento, etc., são representados a partir das suas distribuições de curto prazo, i.e., seus diagramas de dispersão ou distribuições conjuntas ajustadas a partir dos mesmos;
- Cada condição de curto prazo tem distribuição que segue o modelo de Rayleigh, pois de forma conservadora tratamos as mesmas como processos gaussianos de banda estreita, com correção pelo fator de Wirsching;
- A contagem de ciclos é dada pela frequência de cruzamentos zero da resposta de curto prazo, calculada com facilidade por conta da premissa anterior;
- Acumulação de dano calculada pela regra de Palmgren-Miner pois a metodologia assume tanto efeitos de carregamentos quanto respostas no regime linear-elástico;

- As cargas hidrodinâmicas são calculadas pela teoria potencial 3D;
- As respostas estruturais são calculadas por análise de elementos finitos;
- As tensões para os cálculos de fadiga são obtidas pela metodologia de hot spot;
- Outros efeitos com influência relevante na vida à fadiga, mesmo efeitos não lineares, devem ser levados em conta de alguma forma nas análises.

A seguir, são apresentadas as características e abrangência de cada um dos métodos. Esta seção é baseada nas práticas recomendadas da DNV GL (DNV GL, 2015b).

3.4.2.1 Método estocástico por componentes de carga

Este método é baseado na separação dos carregamentos em componentes de carga e posterior sobreposição de funções de transferência obtidas para cada componente. As diferenças de fase entre as componentes de carga são incluídas nas funções de transferência de cargas, calculadas pelo programa de análise hidrodinâmica, geralmente calculados como carregamentos unitários. A partir destas informações, as contribuições simultâneas de cada componente são sobrepostas, sendo calculada uma função de transferência de tensões combinadas. Ao final, é realizada uma avaliação estocástica de fadiga (DNV GL, 2015b). A Figura 3.13 mostra um exemplo de fluxograma simplificado da análise pelo método estocástico por componentes de carga.

A principal vantagem deste método é que os resultados de diferentes componentes podem ser obtidos de diferentes fontes realizando as análises em paralelo, o que reduz consideravelmente o tempo para obter o resultado final. Outra vantagem importante é que os efeitos não lineares são muito mais fáceis de considerar por este método já que as cargas podem ser isoladas e analisadas separadamente.

A principal desvantagem deste método é que é necessário ter muito cuidado ao separar as componentes de carga para que não sejam considerados efeitos de forma duplicada. Isto pode ocorrer facilmente quando um determinado carregamento não é facilmente separável de outro. Nestes casos, o ideal é considera-los numa mesma componente e excluí-los das demais. Outra desvantagem é uma preocupação adicional com as condições de contorno do modelo, que precisam ser bem definidas de forma a não distorcer os resultados globais.

Este método é utilizado com modelo parcial (de três tanques) na análise de elementos finitos. Segue exemplo de separação de componentes de carga para a análise de um FPSO:

1. Esforços cortantes e momentos fletores de viga-navio devido aos esforços globais;
2. Movimentos e acelerações nos 6 graus de liberdade;
3. Pressões locais nas paredes externas e internas dos tanques.

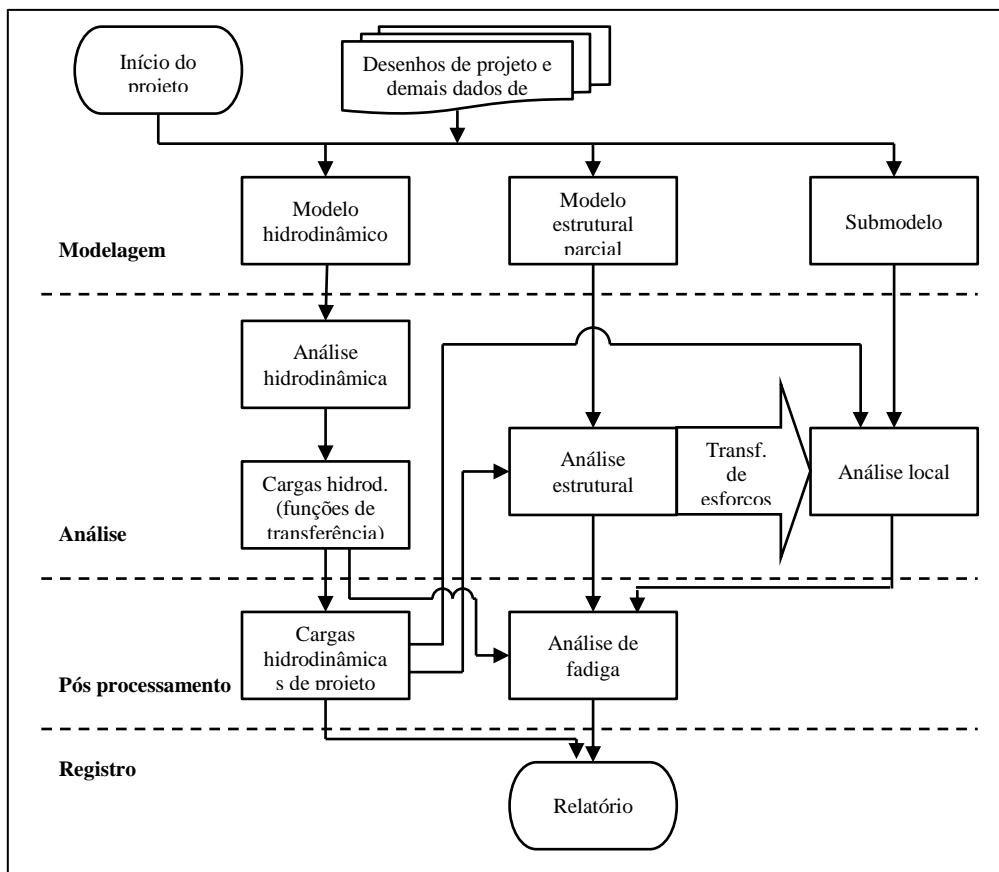


Figura 3.13 – Fluxograma - método estocástico por componentes de carga

3.4.2.2 Método estocástico completo

Este método consiste em transferir todos os carregamentos atuantes diretamente do modelo hidrodinâmico para o modelo estrutural, obtendo-se diretamente as funções de transferência de tensões final. As cargas aplicadas no modelo devem estar em equilíbrio, de forma que sejam necessárias apenas molas de pequena rigidez para dar estabilidade numérica ao modelo. Desta forma, são esperados baixos valores de reações de apoio nas análises.

O método pode ser aplicado tanto com modelo completo quanto com modelo parcial na análise de elementos finitos. A vantagem de realizar a análise com modelo parcial é que o tempo de processamento pode ser consideravelmente menor, obtendo respostas igualmente confiáveis num modelo de três tanques. Entretanto, um esforço maior na definição das condições de contorno do modelo e na verificação da resposta se faz necessário. No caso de análise com modelo completo, a malha de elementos finitos pode ser relativamente grosseira no modelo global, porém torna-se necessário transferir os resultados para um modelo refinado para obter os resultados finais. Uma alternativa é ter um modelo global com a região de interesse refinada conforme metodologia de *hot spot* e uma transição para malha grosseira nas regiões afastadas. Porém, este processo pode consumir um grande tempo de processamento (DNV GL, 2015b). A Figura 3.14 e a Figura 3.15 mostram exemplos de fluxogramas simplificados da análise pelo método estocástico completo.

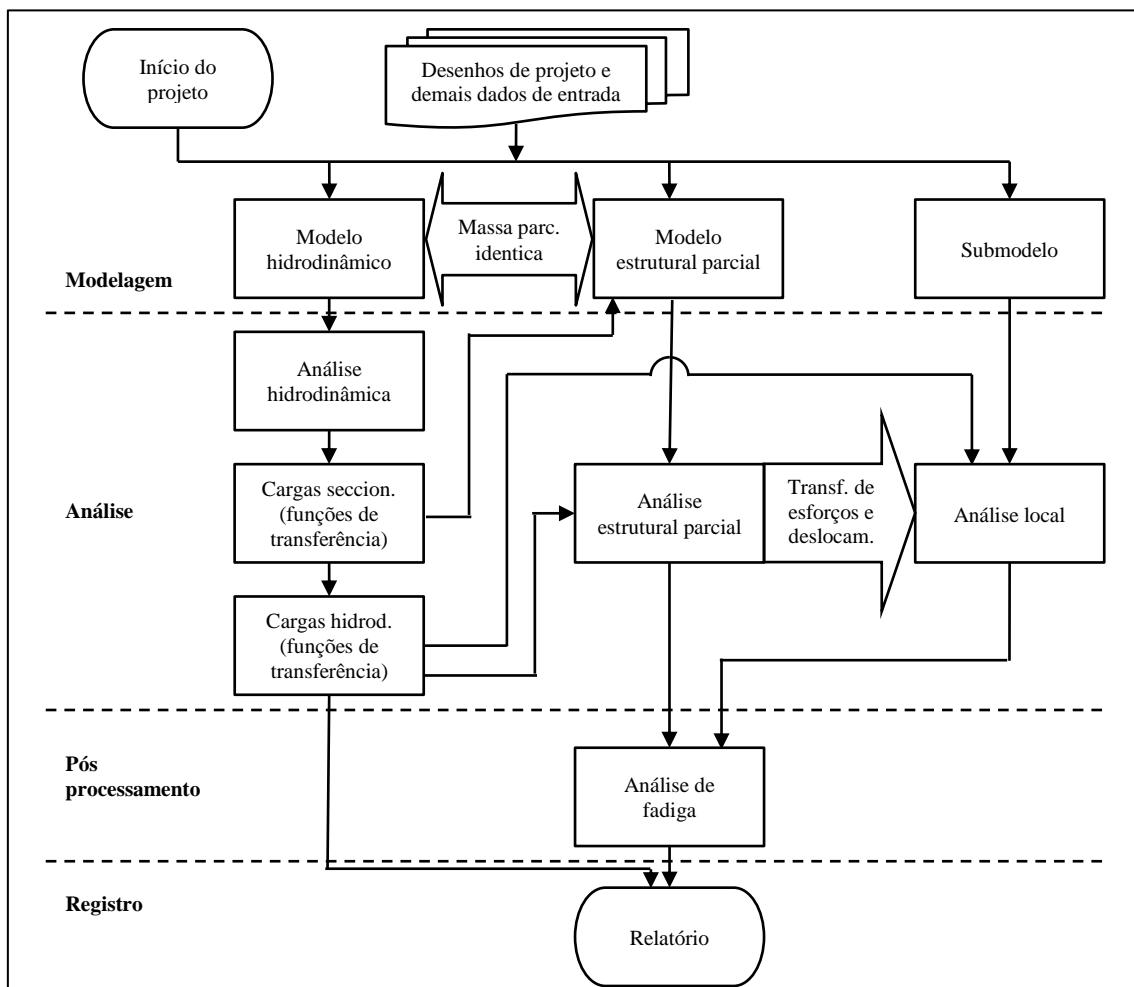


Figura 3.14 – Fluxograma: método estocástico completo com modelo completo

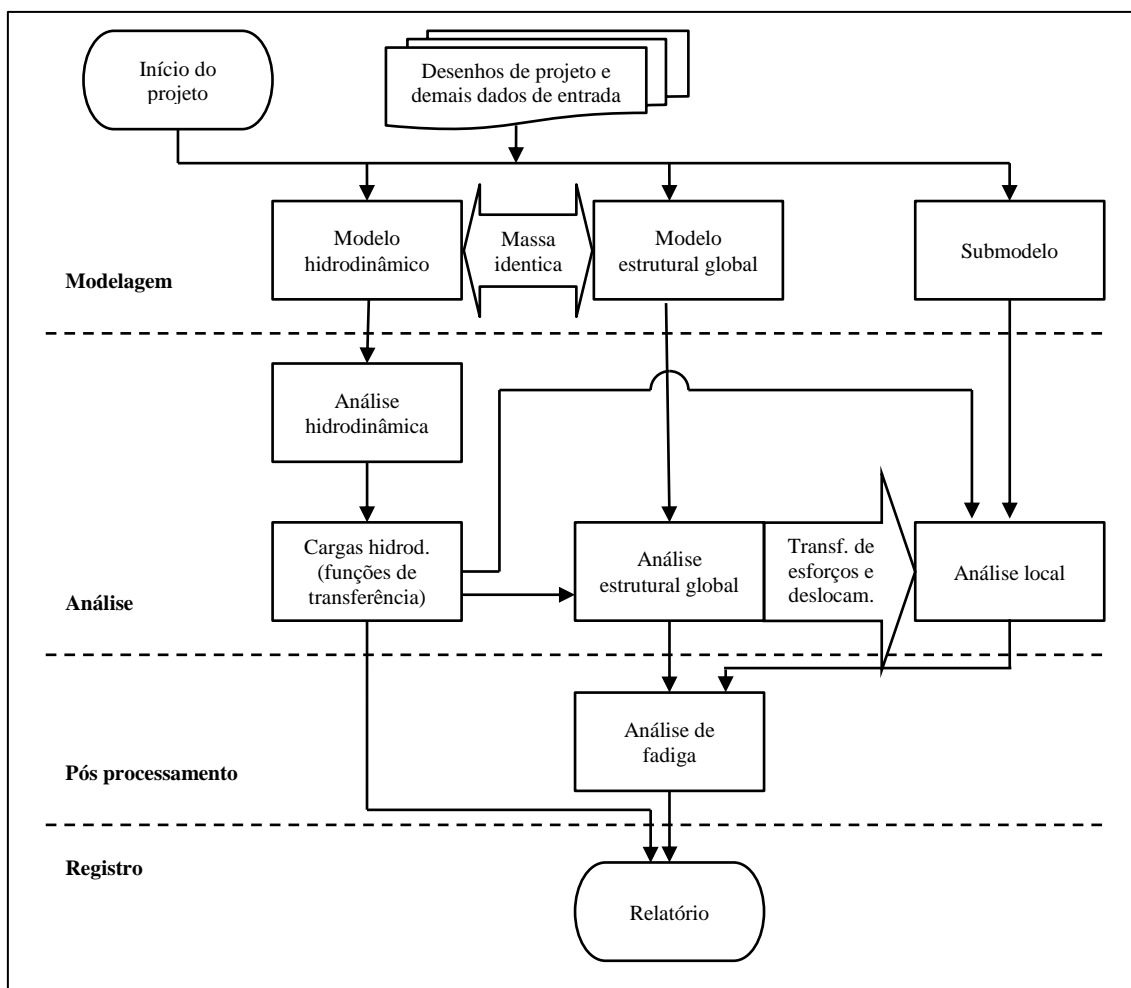


Figura 3.15 – Fluxograma: método estocástico completo com modelo parcial

A principal vantagem deste método é que todos os efeitos lineares de carregamentos são automaticamente incluídos no modelo via análise hidrodinâmica. Adicionalmente, verificação da resposta global da estrutura fica mais simples.

A principal desvantagem deste método é o tempo processamento já que o modelo é recebe cargas de diferentes origens. Também, os efeitos não lineares são mais complicados de levar em conta.

3.5 Acumulação de dano

A metodologia para avaliação de fadiga aqui apresentada utiliza a Regra de Palmgren-Miner para a acumulação de dano, ver, por exemplo (NAESS, 1985). O dano total, ou dano acumulado devido à fadiga, é a soma algébrica do dano gerado por cada um dos ciclos de carga ao qual a estrutura é submetida ao longo do período desejado. Pelo método, o dano total é definido por:

$$D = \sum_{i=1}^j d_i = \sum_{i=1}^j \frac{n_i}{N_i} \quad \text{Eq. 3.28}$$

onde:

d_i é o dano associado a uma certa amplitude de variação de tensão;

n_i é o número de ciclos associados a variação de tensão $\Delta\sigma_i$;

N_i é o número de ciclos que leva à falha estrutural da junta submetida a variação de tensão $\Delta\sigma_i$;

j é o número de intervalos de variação de tensão.

A regra assume que a falha ocorrerá se o dano total for unitário. Desta forma, a vida fadiga será dada por:

$$L = \frac{L_0}{D} \quad \text{Eq. 3.29}$$

onde:

L_0 é o tempo para a estrutura atingir o número total de ciclos n_0 (vida útil);

O número total de ciclos é dado por:

$$n_0 = \sum_{i=1}^j n_i \quad \text{Eq. 3.30}$$

O parâmetro L_0 , definido anteriormente como vida útil, pode ser definido também como período de referência e o número de ciclos no deve ser sempre definido em função deste período de referência.

Para cargas com amplitudes variáveis, como é o caso das cargas devido a movimentos de unidades flutuantes, deve-se determinar primeiramente uma distribuição de longa duração para as variações de tensão. Esta distribuição é dividida em blocos com uma variação de tensão $\Delta\sigma_i$ constante e um número de ciclos associado n_i . O dano é calculado para cada bloco conforme a equação da curva S-N apropriada e aplica-se a regra de Palmgren-Miner para obter o dano total durante a vida útil da estrutura. O dano total, portanto, será a soma dos danos de cada bloco. A Figura 3.16 ilustra a divisão de uma distribuição tensões em blocos.

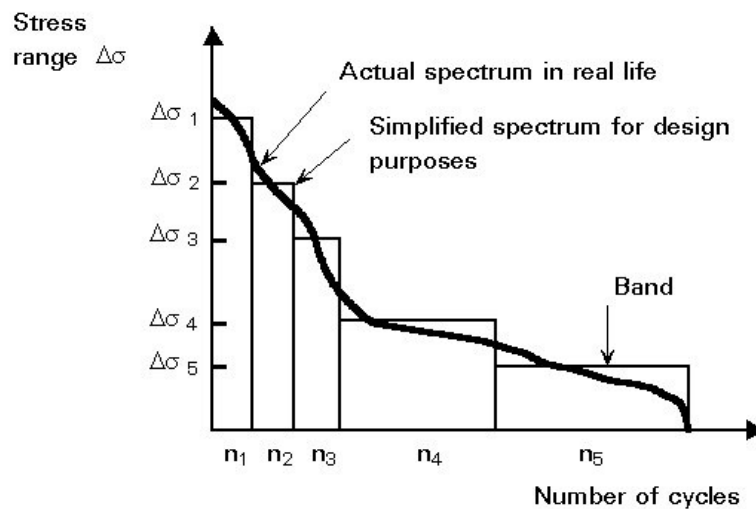


Figura 3.16 – Blocos de tensões (PRIMOZ, 1993)

Frequentemente, as estruturas *offshore* estão expostas a carregamentos provenientes de processos dinâmicos independentes, com respostas em diferentes bandas de frequências. Em grande parte destes casos, é conveniente calcular os danos à fadiga para cada um dos processos de forma separada para depois combiná-los. Porém, não é conservador calcular o dano total por uma simples soma dos danos provenientes de cada processo individual. São exemplos as estruturas de *topside*s sujeitas a cargas de onda e vento ou as estruturas do casco de FPSOs que estão sujeitos a cargas de onda e pressões internas devido ao enchimento e esvaziamento dos tanques. Um esquema de respostas combinadas é apresentado na Figura 3.17.

O dano combinado, no caso de curvas S-N de uma única inclinação, pode ser calculado a partir de equação a seguir, baseada em uma analogia com o processo de contagem de ciclos de *Rainflow*:

$$D = D_1 \left(\frac{v_2}{v_1} \right) + v_2 \left[\left(\frac{D_1}{v_1} \right)^{\frac{1}{m}} + \left(\frac{D_2}{v_2} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^m \quad \text{Eq. 3.31}$$

onde:

D_1 e D_2 são os danos calculados para os processos de frequência mais alta e mais baixa, respectivamente;

v_1 e v_2 são as frequências médias de cruzamentos zero positivos calculadas para os processos de frequência mais alta e mais baixa, respectivamente;

m é o expoente da curva S-N de uma única inclinação, conforme Eq. 3.42 (apresentada mais à frente, na seção 3.7 desta dissertação).

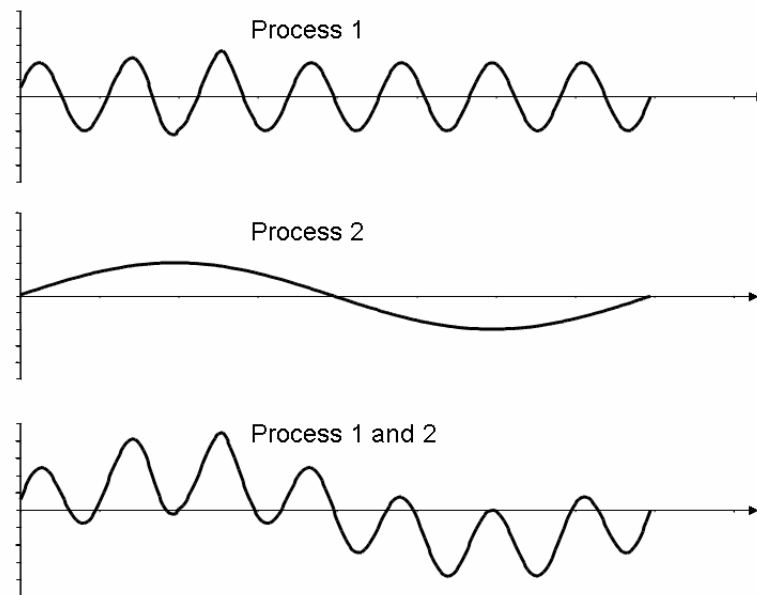


Figura 3.17 – Combinação de dois processos dinâmicos (DNV GL, 2016b)

Para curvas de fadiga com duas inclinações, a norma recomenda que, de forma conservadora, seja utilizada a equação acima considerando o maior valor de m da curva S-N considerada, caso os danos parciais para os dois processos dinâmicos tenham sido calculados com base na mesma curva. Uma alternativa dada pela prática recomendada é calcular o dano para o processo dinâmico de baixa frequência a partir de uma curva S-N de inclinação única e calcular o dano para o processo dinâmico de frequência mais alta a partir de uma curva S-N de duas inclinações. Desta forma, pode ser utilizada a equação aqui apresentada, aplicando o menor valor de m .

A DNV GL dá a opção de utilizar simulações no domínio do tempo para obter contagens de ciclo de curto prazo e combiná-las de acordo com o diagrama de dispersão de ondas, obtendo as respostas de longo prazo. E adicionalmente, é indicado o método do espectro combinado que fornece como dados para cálculo dos danos, as variações de tensões e frequências de cruzamento zero dos processos individuais somadas de forma quadrática. (DNV GL, 2015b)

3.5.1 Correção da largura de banda

Em função da complexidade dos métodos para contagem de ciclos em um processo de banda larga, na prática, a contagem de ciclos é realizada sob aproximações que envolvem conceitos para processos de banda estreita e correção do dano à fadiga para simular o resultado para um processo de banda larga. A equação do dano devido à fadiga definida no item anterior é apropriada para espectros de resposta com largura de banda estreita ($\varepsilon \rightarrow 0$). Desta forma, é apresentada a seguir a formulação de Wirsching, que é uma das mais bem aceitas na indústria para correção à equação do dano de modo a contemplar esta variação da largura de banda. O fator de correção de Wirsching, também chamado de fator de *Rainflow*, tem a seguinte forma (WIRSCHING e LIGHT, 1980):

$$\lambda(m, \varepsilon) = a(m) + (1 + a(m))(1 - \varepsilon)^{b(m)} \quad \text{Eq. 3.32}$$

onde:

$$a(m) = 0,926 - 0,033m \text{ e } b(m) = 1,587m - 2,323;$$

m é o expoente da curva S-N, conforme Eq. 3.42 (apresentada mais à frente, na seção 3.7 desta dissertação);

ε é a largura de banda do espectro, conforme definido na Eq. 2.46 (apresentada na seção 2.7 desta dissertação).

O dano corrigido pelo fator de Wirsching é calculado pela seguinte equação:

$$D = D_{BE} \lambda(m, \varepsilon) \quad \text{Eq. 3.33}$$

onde:

D_{BE} é o dano obtido a partir da equação deduzida para espectros de banda estreita.

3.6 Concentrações de tensões

Na grande maioria dos casos, a resistência à fadiga é seriamente reduzida quando existe um acidente geométrico que provoque concentração de tensões. Outro fator muito importante para avaliação de concentração de tensões é a presença juntas soldadas em conexões.

A Figura 3.18 mostra as distribuições de tensões em uma chapa tracionada, segundo as duas direções no plano (longitudinal e transversal à aplicação da carga).

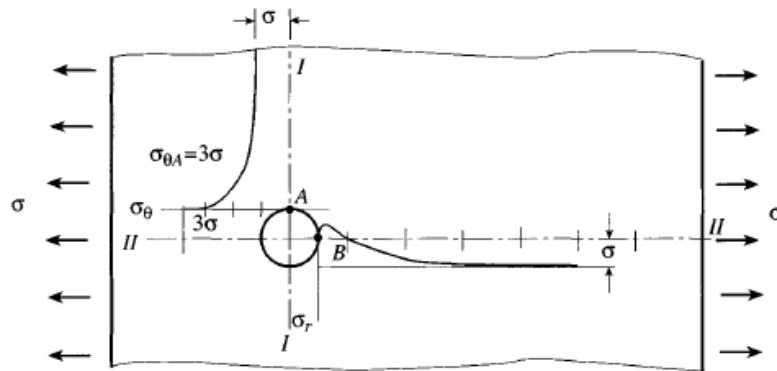


Figura 3.18 – Concentrações de tensões em um furo (PRIMOZ, 1993)

A Figura 3.19 mostra as componentes de tensão em uma junta soldada, onde uma trinca iniciou-se.

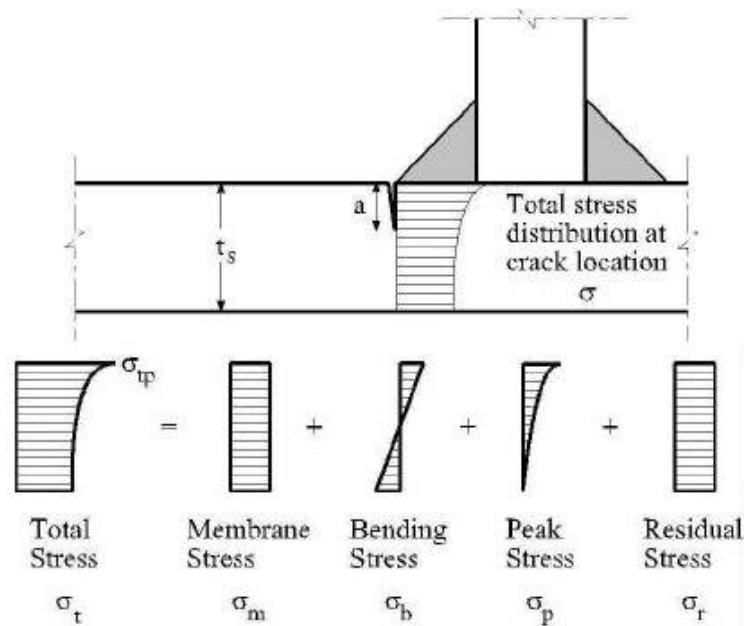


Figura 3.19 – Componentes de tensões em uma junta soldada (SSC, 1999)

3.6.1 Fator de concentração de tensões (SCF)

A concentração de tensões quantifica-se geralmente através de um fator de concentração de tensões (SCF), definido por:

$$SCF = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad \text{Eq. 3.34}$$

onde:

σ_{max} é a tensão máxima na fronteira de uma descontinuidade geométrica;

σ_{nom} é a tensão nominal é definida como o nível de tensões em uma região afastada o suficiente da região de concentração, onde o comportamento linear da distribuição de tensões não seja modificado pela descontinuidade geométrica.

Como exemplo, podemos citar a concentração de tensões no furo apresentado na Figura 3.18. Na direção longitudinal, temos: $\sigma_{max} = 3\sigma_{nom}$. Logo, em uma chapa tracionada, o SCF na direção longitudinal à carga é dado por:

$$SCF = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} = \frac{3\sigma_{nom}}{\sigma_{nom}} = 3 \quad \text{Eq. 3.35}$$

Peterson reuniu os resultados de diversos estudos acerca de SCF's em um manual que engloba a maioria das descontinuidades geométricas de interesse prático. Este documento serve de referência de projetos até os dias atuais (PILKEY e PILKEY, 2008). Algumas normas e recomendações de projeto também possuem fórmulas paramétricas que definem fatores de concentração de tensões para diversos tipos de ligações e detalhes de descontinuidades geométricas. Dentre elas, podemos citar a DNV GL (DNV GL, 2016b).

3.6.2 Tensões no hot spot

Num detalhe soldado, existem pontos críticos onde se espera que trincas de fadiga se propaguem. Nesse local, em geral no pé da solda ou no fim da mesma, ocorrem deformações plásticas anteriormente à formação da trinca e, como consequência, há um

aumento de temperatura naquela região. É deste efeito que vem o termo *hot spot* (em português, ponto quente).

A seguir, são apresentadas as metodologias da DNV GL para *hot spots*. De acordo com as práticas recomendadas (DNV GL, 2016b), temos as seguintes definições:

- *Hot spot* é um ponto na estrutura onde uma falha por fadiga pode iniciar devido ao efeito combinado de flutuações de tensões estruturais e de tensões associadas à geometria de uma solda ou de um entalhe.
- Tensão de *hot spot* é o valor da tensão estrutural sobre a superfície, no ponto de *hot spot*, também conhecido como tensão geométrica ou tensão estrutural.

A distribuição de tensões nas proximidades de um *hot spot* tem comportamento conforme mostrado na Figura 3.21 e na Figura 3.21.

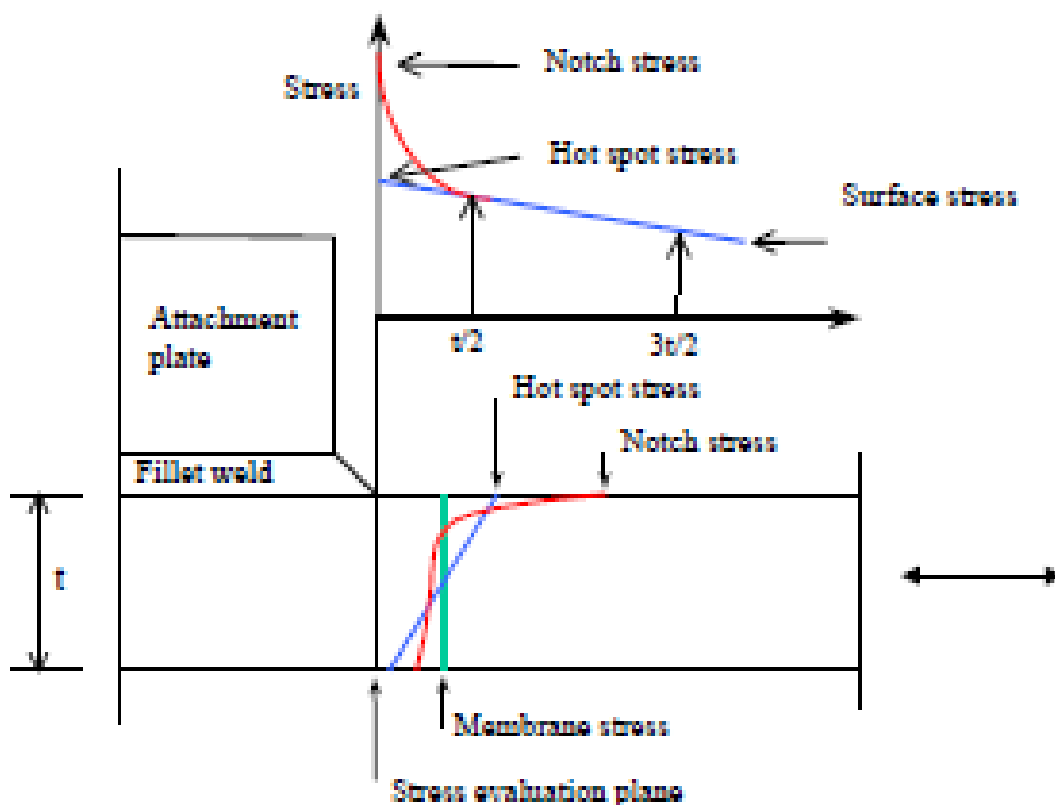


Figura 3.20 Distribuição de tensões num *hot spot* (em corte) (DNV GL, 2016b)

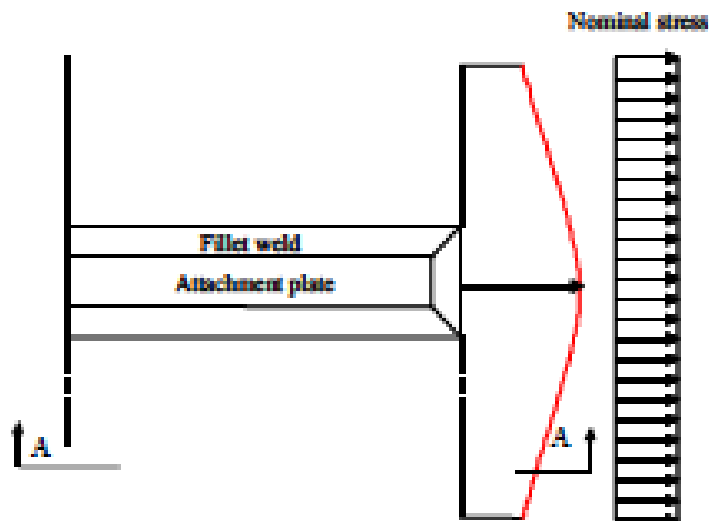


Figura 3.21 Distribuição de tensões num *hot spot* (no plano) (DNV GL, 2016b)

O efeito da tensão *notch* é proveniente do pico de tensão não linear que aparece devido às variações bruscas de geometria na região da solda. Na metodologia apresentada na norma DNV GL (DNV GL, 2016b), os cálculos de fadiga são feitos com base nas tensões de *hot spot*, ficando o efeito *notch* considerado nas curvas de fadiga, melhor descritas na seção 0 desta dissertação.

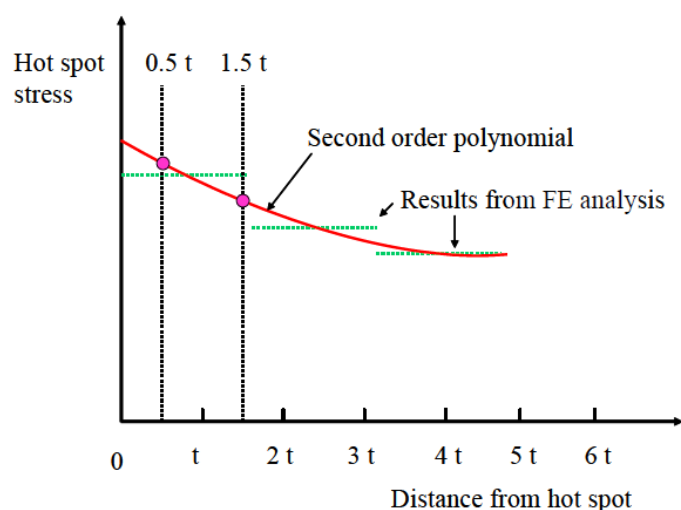


Figura 3.22 Derivação da tensão de *hot spot* numa malha com tamanho $t \times t$ (DNV GL, 2016b)

De acordo com a direção da tensão principal, na chapa principal da junta soldada, pode haver diferentes tendências de formação de trincas, conforme ilustra a Figura 3.23.

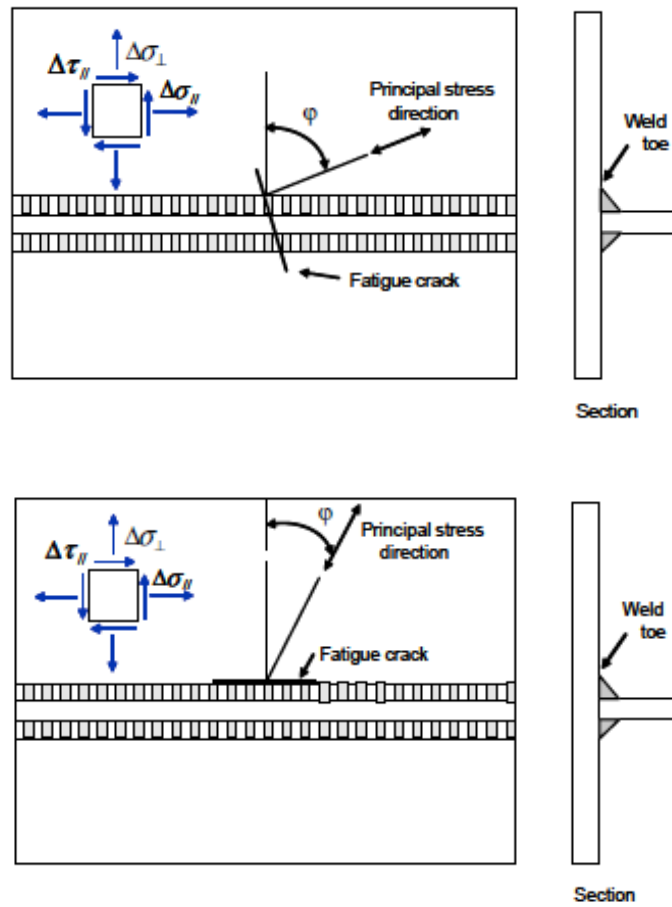


Figura 3.23 Tendências de formação de trincas x direção da tensão principal (DNV GL, 2016b)

Para levar em conta este efeito, a tensão de *hot spot* efetiva é calculada a partir de um dos métodos a seguir:

$$\text{Método A: } \Delta\sigma_{Eff} = \max \begin{cases} \sqrt{\Delta\sigma_{\perp}^2 + 0.81\Delta\tau_{//}^2} \\ \alpha|\Delta\sigma_1| \\ \alpha|\Delta\sigma_2| \end{cases} \quad \text{Eq. 3.36}$$

$$\text{Método B: } \Delta\sigma_{Eff} = \max \begin{cases} 1.12\sqrt{\Delta\sigma_{\perp}^2 + 0.81\Delta\tau_{//}^2} \\ 1.12|\Delta\sigma_1| \\ 1.12|\Delta\sigma_2| \end{cases} \quad \text{Eq. 3.37}$$

onde:

$\Delta\sigma_1$ e $\Delta\sigma_2$ são as tensões principais 1 e 2, calculadas a partir das equações a seguir:

$$\Delta\sigma_1 = \frac{\Delta\sigma_{\perp} + \Delta\sigma_{//}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\Delta\sigma_{\perp} - \Delta\sigma_{//})^2 + 4\Delta\tau_{//}^2} \quad \text{Eq. 3.38}$$

$$\Delta\sigma_2 = \frac{\Delta\sigma_{\perp} + \Delta\sigma_{//}}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\Delta\sigma_{\perp} - \Delta\sigma_{//})^2 + 4\Delta\tau_{//}^2} \quad \text{Eq. 3.39}$$

$\Delta\sigma_{\perp}$ é a tensão normal na direção perpendicular à solda;

$\Delta\sigma_{//}$ é a tensão normal na direção paralela à solda;

$\Delta\tau_{//}$ é a cisalhante na direção paralela à solda;

α é um fator que varia entre 0,72 e 0,90, conforme a classificação do detalhe soldado.

O método A é válido para modelos sem o cordão de solda modelado, com a tensão de *hot spot* sendo definida a partir da extrapolação linear das tensões nos pontos a 0,5t e 1,5t de distância da intercessão entre elementos e para modelos com a solda incluída e as distâncias 0,5t e 1,5t sendo medidas a partir do pé da solda. O método B é válido para modelos sem o cordão de solda modelado, com a tensão de *hot spot* sendo a tensão no ponto a 0,5t de distância da intercessão entre elementos e para modelos com a solda incluída e a distância 0,5t sendo medida a partir do pé da solda. Ambos os métodos são válidos para ambas situações apresentadas na Figura 3.23.

Limitação: o conceito de *hot spot* não pode ser aplicado para verificações de fadiga em trincas iniciadas na raiz de soldas de filete ou penetração parcial.

Em estruturas de casca, podemos definir três tipos de *hot spot*, conforme ilustrado na Figura 3.24:

- Tipo A no pé da solda, localizado na borda da chapa principal ou carregada;
- Tipo B no pé da solda, localizado na borda da chapa soldada;
- Tipo C ao longo da solda (pé da solda tanto na superfície da chapa principal quanto na superfície da chapa soldada).

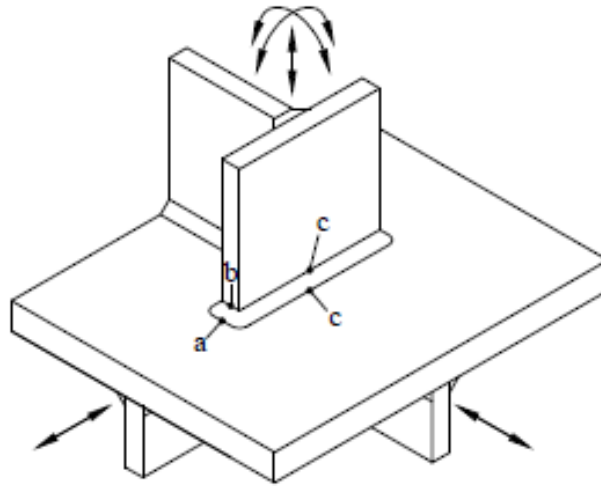


Figura 3.24 Tipos de *hot spot* (DNV GL, 2016b)

Nos exemplos analisados nesta dissertação, foi utilizado o software StoFat, do pacote Sesam. Neste programa, o cálculo das tensões principais extrapoladas nos *hot spots* é feito a partir das componentes de tensões nos pontos a $0,5t$ e $1,5t$ do ponto desejado. No caso de malha com dimensões t por t , os pontos de interpolação ficam localizados nos nós intermediários dos elementos de casca segunda ordem adjacentes ao ponto desejado. Os dados de entrada para o StoFat são três nós (ou posições) e os elementos de casca onde estão localizados: *hot spot*, posição $t/2$ e posição $3t/2$, conforme pode ser observado na Figura 3.25.

As tensões componentes no *hot spot* podem ser calculada pela fórmula da quação abaixo para posterior cálculo das tensões principais para cálculos de fadiga.

$$\sigma_{hot} = \sigma_{t/2} \frac{L_{hot-t/2}}{L_{t/2-3t/2}} \quad \text{Eq. 3.40}$$

onde:

hot e σ_{hot} são o *hot spot* e a tensão neste ponto ;

$t/2$ e $\sigma_{t/2}$ são o ponto de interpolação a $t/2$ do *hot spot* e a tensão neste ponto ;

$3t/2$ e $\sigma_{3t/2}$ são o ponto de interpolação a $3t/2$ do *hot spot* e a tensão neste ponto.

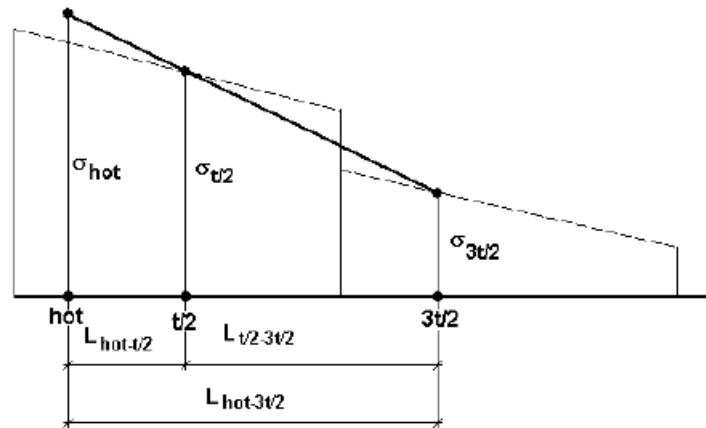


Figura 3.25 – Extrapolação das tensões no *hot spot* (DNV GL, 2017d)

Para transferir as tensões componentes para a superfície do elemento, o StoFat solicita ainda como dado de entrada um ponto auxiliar. A Figura 3.26 ilustra duas seleções de pontos auxiliares. Nos exemplos apresentados, os cálculos de fadiga do StoFat para os nós A, B, C e D serão realizados para os pontos de superfície A', B', C' e D'.

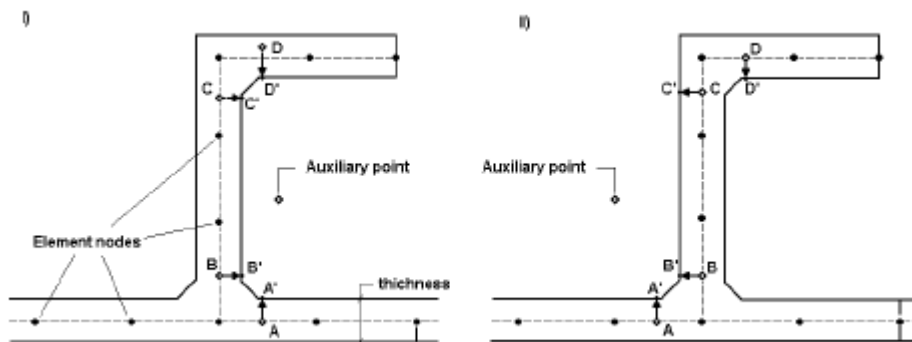


Figura 3.26 – Transferência das tensões para a superfície do elemento (DNV GL, 2017d)

3.7 Curvas S-N

As curvas S-N são curvas empíricas que relacionam uma dada amplitude de tensões ao número de ciclos que leva ruptura um dado material. Mais uma vez, a abreviação vem do termo em inglês, *Stress level x Number of endurance cycles* (S-N). Ensaios de laboratório em escala reduzida são realizados em corpos de prova, com o objetivo de estimar a quantidade de ciclos, a vários níveis de variações de tensões, que levam à ruptura do espécime.

Como se esperada, um corpo de prova submetido a ensaios em faixas baixas de tensões leva mais ciclos para ter uma trinca iniciada e romper do que outro submetido a faixas altas de tensões. Para valores do número de ciclos de ruptura superiores a 10^4 ou 10^5 , a representação gráfica da tensão alternada em função do número de ciclos de ruptura fornece uma curva. Esta curva pode ser apresentada em um gráfico bi logarítmico conhecido como “curva S-N”. Essas curvas são utilizadas para se estimar a vida em qualquer faixa de tensão.

3.7.1 Resistência e vida à fadiga

A resistência à fadiga de um componente soldado é definida como a variação de tensão ($\Delta\sigma_R$) constante que provoca falha do componente após um determinado número de ciclos (N). A variação de tensão é a diferença entre os pontos máximos e mínimos no ciclo, como pode ser visto na Figura 3.27. O número de ciclos até à falha é conhecido como resistência à fadiga.

Convenciona-se denominar vida em serviço o tempo estimado para que uma estrutura falhe por fadiga, quando submetida aos carregamentos variáveis aos quais se esperam que a mesma seja submetida ao longo de sua vida útil. Para calcular a vida à fadiga de projeto ainda deve ser aplicado o fator de projeto de fadiga (DFF, da sigla em inglês, *design fatigue factor*), que é um fator de segurança na vida em serviço, aplicado para reduzir a probabilidade de falha por fadiga. Desta forma, a vida à fadiga, fornecida em anos nos projetos usuais, é calculada pela seguinte equação:

$$\text{Vida à fadiga} = \text{Vida em serviço} \times \text{DFF} \quad \text{Eq. 3.41}$$

De acordo com as recomendações da DNV GL (DNV GL, 2015a), o DFF para cada detalhe é escolhido de acordo com dois aspectos:

- As consequências de uma eventual falha do detalhe;
- Acessibilidade do detalhe para inspeções em serviço e execução de reparos.

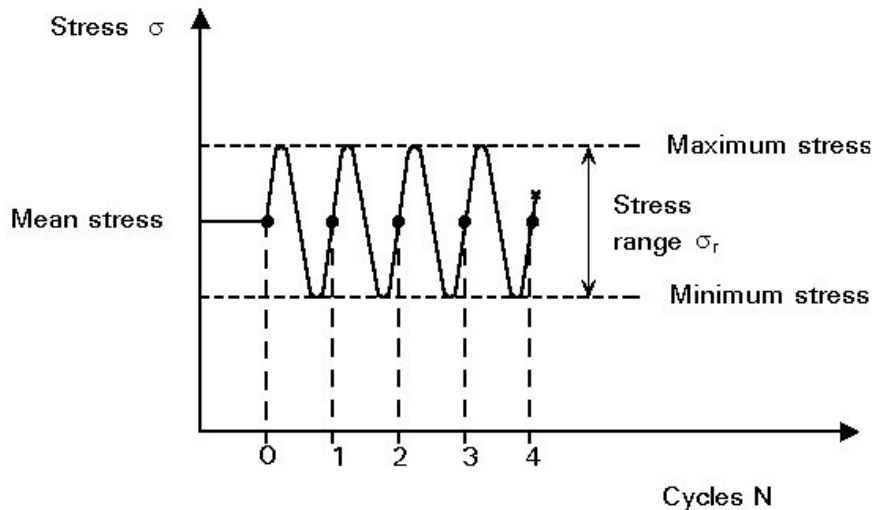


Figura 3.27 – Ciclos de tensões de amplitude constante (PRIMOZ, 1993)

3.7.2 Fatores que afetam a vida à fadiga

Para fins práticos de projeto, há dois fatores principais que afetam a vida à fadiga de um detalhe:

- A variação de tensões ($\Delta\sigma_R$) no local de iniciação de trincas (existem regras especiais para o cálculo desta variação);
- Curva de fadiga do detalhe. Esta curva é principalmente uma função da geometria e é definida pelos parâmetros 'a' e 'm', os quais variam de conjunto para conjunto.

A vida à fadiga (N) em número de ciclos até à falha pode ser calculada a partir de uma das expressões a seguir:

$$N = a \times \Delta\sigma_R^{-m} \quad \text{Eq. 3.42}$$

$$\log(N) = \log(a) - m \log(\Delta\sigma_R) \quad \text{Eq. 3.43}$$

onde:

a e m são constantes que indicam o ponto onde a curva de fadiga (plotada em gráfico log-log) intercepta o eixo N e o coeficiente angular da mesma, respectivamente.

Previsões de vida são, portanto, particularmente sensíveis à precisão da previsão tensões. Isto ocorre porque o termo variação de tensões aparece elevado a uma potência na equação do número de ciclos (Eq. 3.42).

3.7.3 Representação gráfica das curvas S-N

A expressão de ligação entre a vida à fadiga e a variação de tensões constante pode ser representada numa escala bi logarítmica como uma ou duas linhas retas, e é referida como uma curva S-N. A relação é válida para uma ampla gama de resistências.

Para alguns materiais, existe uma faixa de tensão abaixo da qual a rachadura não se inicia (como aço e titânio) definindo o limite de fadiga do material. Nestes casos, para variações de tensões abaixo desse limite, a fadiga não é considerada nem para um número de ciclos infinito. Este comportamento não pode ser generalizado porque em muitos metais ferrosos (como alumínio, magnésio e ligas de cobre), a inclinação da curva S-N decresce gradualmente não tendo um limite de fadiga verdadeiro (visto que a curva nunca se torna horizontal). Para esses materiais, é comum definir o limite de fadiga como sendo da ordem de 10^8 ciclos.

Outra característica importante para algumas aplicações é a bi linearidade das curvas S-N. Para a maioria dos tipos de ligações estruturais, as normas de projeto de estruturas *offshore* indicam pontos de mudança de inclinação das curvas S-N, para contemplar a amplitude variável de tensões a que estas estruturas são submetidas (HAIBACH, 1970). A norma DNV GL indica mudança de inclinação em $N = 10^7$ e $N = 10^6$ ciclos para detalhes expostos ao ar e à água do mar (em estruturas com proteção catódica), respectivamente. Desta forma, o que observamos no gráfico bi logarítmico são 2 retas com inclinações dadas pelo valor de m na (Eq. 3.43), como pode ser observado na Figura 3.28.

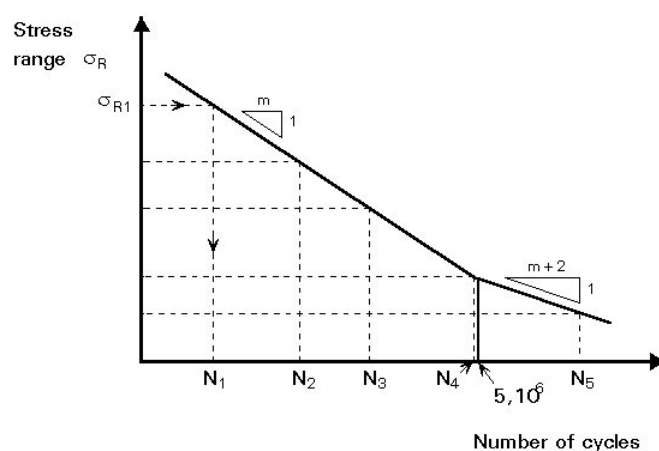


Figura 3.28 – Curva S-N bi linear (PRIMOZ, 1993)

3.7.4 Classificação das curvas S-N

As normas utilizadas em projetos de estruturas *offshore* apresentam uma série de curvas com os detalhes típicos para estas estruturas. As curvas S-N são classificadas de acordo com os seguintes fatores, dentre outros:

- Ambiente ao qual o detalhe está exposto
- Geometria do detalhe;
- Direção de atuação das tensões;
- Método de execução do detalhe;
- Condições de inspeção e fabricação;
- Nível de proteção contra agentes ambientais;
- Tipo e forma de execução da solda.

No ANEXO A são apresentadas as curvas S-N propostas pela DNV GL.

3.7.5 Efeitos de espessura

A norma DNV GL explicita que a resistência à fadiga de juntas soldadas depende da espessura das chapas. As curvas S-N são obtidas por ensaios experimentais e estão associadas a determinada espessura. Para chapas com espessura superiores a esta referência, a variação de tensões deve ser corrigida por conta da própria escala e também por conta do comportamento das tensões (gradiente) ao longo da espessura. A seguir, é apresentada a fórmula de correção proposta:

$$\Delta\sigma_{corr} = \Delta\sigma \left(\frac{t}{t_{ref}} \right)^k \quad \text{Eq. 3.44}$$

onde:

$\Delta\sigma$ é a tensão de *hot spot* na superfície;

t é a espessura real do detalhe na região, medida perpendicularmente à superfície;

t_{ref} é a espessura de referência;

k é o expoente de espessura (dado na curva S-N).

A norma menciona espessuras de referência de 32 mm para juntas tubulares e 25 mm para outros tipos de juntas soldadas e parafusos. Já para peças fundidas, temos espessuras de referência de 38 mm.

Quando temos elementos submetidos a um mesmo nível de amplitudes de tensões, quanto maior for a sua espessura, maior é a chance de surgir uma trinca ao longo da mesma. Isto ocorre porque quanto maior a área exposta, maior a possibilidade de ocorrência de defeitos ou de danos devidos a intempéries ou processos de fabricação. Desta forma, a resistência à fadiga é menor quanto maior a espessura de chapa de um dado detalhe estrutural submetido a uma mesma amplitude de tensões. Sabe-se também que para uma espessura maior da solda, são exigidos procedimentos mais complexos de execução e que eventualmente acarretam níveis mais elevados de tensões residuais.

3.8 Modelagem da estrutura em elementos finitos

Alguns aspectos precisam ser observados na geração da malha de elementos finitos. Análises de sensibilidade são fundamentais para que sejam obtidos resultados confiáveis. A seguir são destacadas as principais recomendações da DNV para a modelagem em elementos de casca:

- O tamanho da malha na região do *hot spot* deve ficar entre uma vez e duas vezes a espessura da chapa principal. Para facilitar a leitura dos resultados para aplicar a metodologia aqui descrita, uma malha $t \times t$ é recomendável;
- Em modelos grandes, a transição entre a malha fina e a malha grosseira deve ser a mais suave e contínua possível;
- O modelo deve ser grande o suficiente para que considerações relativas a condições de contorno não afetem os resultados nos *hot spots*;
- Elementos de casca de 8 nós são recomendados, em especial quando há variação abrupta nas tensões. Entretanto, elementos de casca de 4 nós com graus de liberdade internos adicionais podem oferecer resultados satisfatórios;
- É dispensada a modelagem das soldas, exceto quando há efeitos consideráveis de flexão local. Nos casos em que for necessário incluí-las no modelo, a norma indica as seguintes técnicas: o aumento da espessura da chapa soldada na região da solda, a

modelagem de elementos rígidos ou elementos de casca ou placa ligando a chapa principal e a chapa soldada;

- É necessário obter resultados de tensões em dois pontos de leitura nas proximidades do *hot spot*, além do próprio. Os pontos ficam localizados a distâncias de $0,5t$ e $1,5t$ do *hot spot* (t é a espessura da chapa principal). A figura ilustra os caminhos para derivação das tensões de *hot spot*;
- Para verificações de fadiga a partir de resultados de elementos finitos, utilizando a metodologia de *hot spot*, o uso da curva S-N “D” da DNV GL é recomendado. Esta curva engloba os efeitos das concentrações de tensões de *notch*, ou seja, já foi *rebaixada*, sendo consistente com a tensão geométrica de comportamento linear próximo à margem da solda. Portanto, o fator K_w , que contempla a majoração das tensões causadas pela solda não precisa ser aplicado.

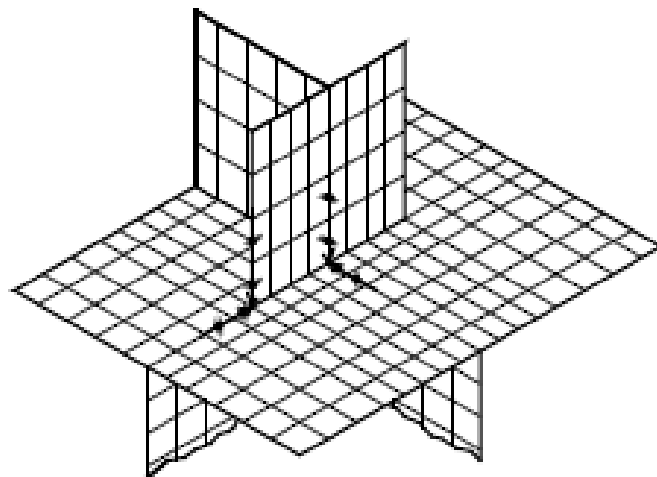


Figura 3.29 – Caminhos para extrapolação de tensões em *hot spots* dos tipos A, B e C (DNV GL, 2016b)

3.9 Conclusões do capítulo

Neste capítulo foram apresentadas as principais metodologias propostas pela DNV GL para as avaliações de fadiga em estruturas *offshore*. Atenção especial foi dada ao método espectral *full stochastic*, que é aquele utilizado nos exemplos de aplicação propostos no próximo capítulo. Todas as etapas de uma análise foram abordadas, desde as teorias de onda, passando pela modelagem da resposta e modelagem em elementos

finitos da estrutura, até chegar aos aspectos mais específicos de fadiga como as curvas S-N, conceito de *hot spot* e regras de acumulação de danos.

As principais referências utilizadas neste capítulo teses de doutorado de Antônio Papaleo da COPPE/UFRJ (PAPALEO, 2009) e Paulo Maurício Videiro do FMT/NTNU (VIDEIRO, 1998), para os processos de caracterização das ondas; o livro de hidrodinâmica de Subrata Chakrabarti (CHAKRABARTI, 1987) e a dissertação de mestrado de Alessandro Batalha (BATALHA, 2009) para os conceitos de RAOs, SCF e teorias de ondas; o livro Fatigue Handbook (NAESS, 1985), para assuntos gerais; e as notas de aula do curso de tecnologias de exploração de petróleo do professor Gilberto Ellwanger do PEC/COPPE/UFRJ (ELLWANGER, 2006).

4 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

4.1 Apresentação

A análise a seguir tem por objetivo avaliar o estado limite de fadiga de uma unidade de produção do tipo FPSO. A seguir, são descritos alguns pontos fundamentais na preparação desta análise:

- O FPSO é uma embarcação de casco simples;
- As dimensões principais são: comprimento de 322 m, boca de 54,5 m, pontal de 33,5 m e espaçamento entre cavernas de 5,1 m;
- O calado de operação pode variar entre 10 m e 24 m;
- A lâmina d'água de operação é de 1246 m;
- A embarcação tem 12 tanques centrais de carga, com capacidade total de 347000 m³ de óleo cada e 16 tanques laterais de lastro com capacidade total de 118500 m³ de água salgada, e cada um dos tanques principais tem comprimento de 40,8 m;
- O óleo deve ser exportado periodicamente por meio um sistema de alívio, através de navio petroleiro;
- A vida útil de projeto é de 25 anos sem docagem;
- A locação de operação é o campo de Jubarte, localizado ao norte da Bacia de Campos;

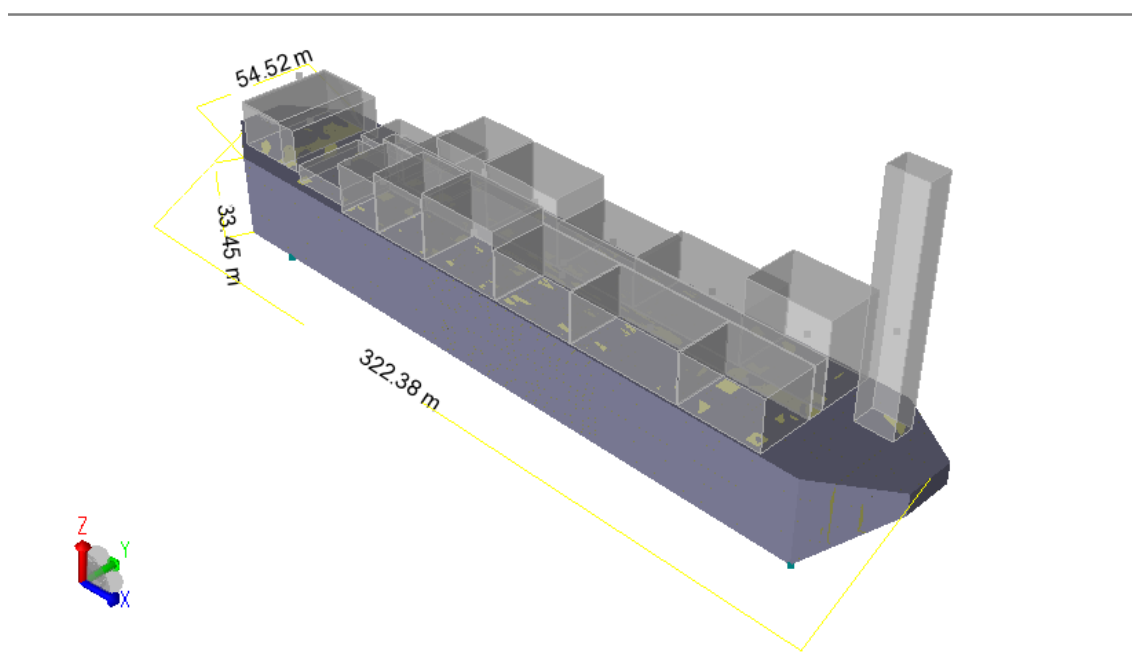


Figura 4.1 – Dimensões principais dos modelos

As análises para avaliação de fadiga foram realizadas com o modelo completo em elementos finitos da estrutura do FPSO. A verificação foi realizada em alguns detalhes identificados como pontos críticos da estrutura. Os carregamentos dinâmicos foram obtidos de modelos hidrodinâmicos e de massa para cada uma das condições propostas, permitindo a aplicação do método espectral *full stochastic* de avaliação, onde:

- Todos os efeitos lineares são incluídos nos carregamentos locais e globais;
- A diferença de fase entre os esforços globais, pressão externa devido às ondas, pressão interna nos tanques e acelerações inerciais são combinados de forma automática,
- As concentrações geométricas de tensões são consideradas diretamente, através de malha de elementos finitos refinada.

As análises aqui apresentadas seguem as recomendações das normas, práticas recomendadas e notas de classificação da DNV GL (seção 1.3.1 desta dissertação).

4.2 Metodologia

A teoria de onda de Airy linear foi adotada para descrever a cinemática das partículas de água pois as alturas de onda são muito menores que os comprimentos de onda e a profundidade do leito marinho. Esta escolha foi feita com base nas práticas recomendadas da DNV GL de condições ambientais (DNV GL, 2017i), de acordo com o gráfico apresentado na Figura 3.4.

O mar foi descrito por meio de um diagrama de dispersão, que é um conjunto de estados de mar de curto prazo estacionários representativos da locação, cada um deles caracterizado por sua probabilidade de ocorrência, altura significativa de onda (H_s) e período de pico (T_p) ou período médio de cruzamento zero (T_z), espectro de energia de JONSWAP, direção principal de onda e função de espreadimento (*spreading*) da energia de onda.

O software Sesam da DNV GL foi utilizado para realizar as análises aqui apresentadas. A seguir, são apresentados os principais passos e pacotes do Sesam. O gerenciamento do fluxo de trabalho e organização dos arquivos dentro do ambiente Sesam é realizado através do Sesam Manager (DNV GL, 2017c).

A modelagem conceitual da estrutura, módulos e tanques do FPSO foi realizada dentro do ambiente de pré-processamento do Sesam, o Genie (DNV GL, 2016a). Com os conceitos de vigas, cascas, equipamentos e compartimentos inseridos, são geradas automaticamente as malhas de elementos finitos para as análises, a partir de parâmetros definidos na interface de usuário.

As forças dinâmicas devidas às ondas, fluido interno dos tanques e acelerações inerciais são calculadas usando o pacote de análise de difração e irradiação do Sesam, o Wadam (DNV GL, 2017e). A interface de usuário fornecida pelo Sesam para o pré-processamento destes cálculos é o HydroD (DNV GL, 2017a). As condições de carregamento de operação são obtidas para um intervalo de frequências e direções de onda através da aplicação de ondas harmônicas de amplitude unitária sobre a estrutura.

Com os resultados do Wadam, podemos calcular os esforços seccionais globais para eventual uso num modelo parcial de três tanques da embarcação, listar as variáveis de resposta da estrutura ou ainda tratar estatisticamente as respostas obtidas, utilizando o pacote de pós-processamento de análises de difração do Sesam, o PostResp (DNV GL, 2017b).

Os carregamentos hidrodinâmicos calculados pelo Wadam, assim como o peso próprio de operação da estrutura e dos equipamentos são diretamente inseridos num arquivo de interface para análise estrutural do Sesam, o arquivo “FEM”. A partir dele, são calculadas as funções de transferência, utilizando o solver de análise estrutural quase-estática do Sesam, o Sestra (DNV GL, 2018a).

A partir dos resultados do Sestra, o pacote pós processamento StoFat (DNV GL, 2017d) é utilizado para realizar os cálculos de fadiga espectral de longo prazo, considerando que as tensões determinísticas e o número de ciclos são calculados a partir do espectro de resposta, assumindo distribuição de Rayleigh para as variações de tensões. A metodologia de Palmgreen-Miner foi utilizada para calcular os danos acumulado em cada detalhe analisado, para cada direção, altura e período de onda do diagrama de dispersão.

Finalmente, os resultados podem ser visualizados utilizando o pacote de extração de resultados do Sesam, o Xtract (DNV GL, 2017f).

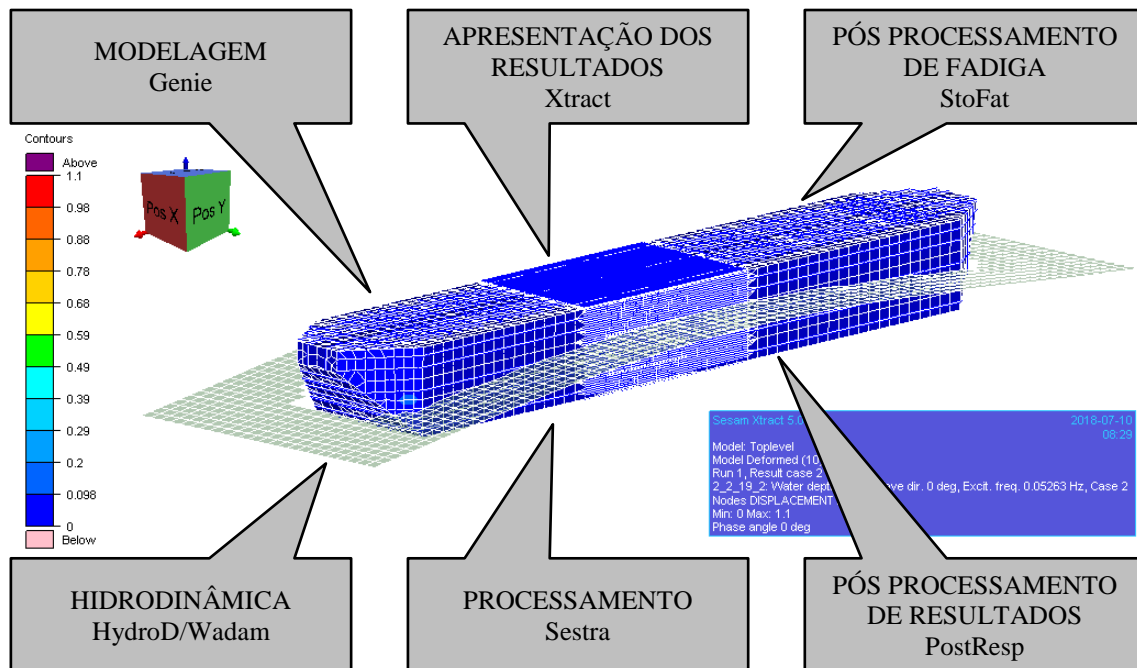


Figura 4.2 – Ambiente do software Sesam

4.3 Modelagem

As principais características e detalhes deste processo são apresentadas a seguir.

O sistema de coordenadas global foi definido da seguinte forma no sistema Sesam, conforme apresentado na Figura 4.1:

- X direção longitudinal da embarcação, positivo na direção da proa;
- Y direção transversal da embarcação, positivo na direção de bombordo;
- Z vertical, positivo para cima.

Foram observadas as seguintes considerações a respeito de orientação, de acordo com o esquema apresentado na Figura 4.3:

- A linha de centro do FPSO coincide com a direção X global do Sesam;
- A direção X global do Sesam é paralela à direção sudoeste-nordeste (sentido positivo aponta para sudoeste);
- O eixo Y global do Sesam é paralelo às cavernas e estruturas transversais do FPSO (sentido positivo aponta para bombordo);

- O sentido positivo do eixo Z global do Sesam aponta para o convés do FPSO (Z é zero no fundo);

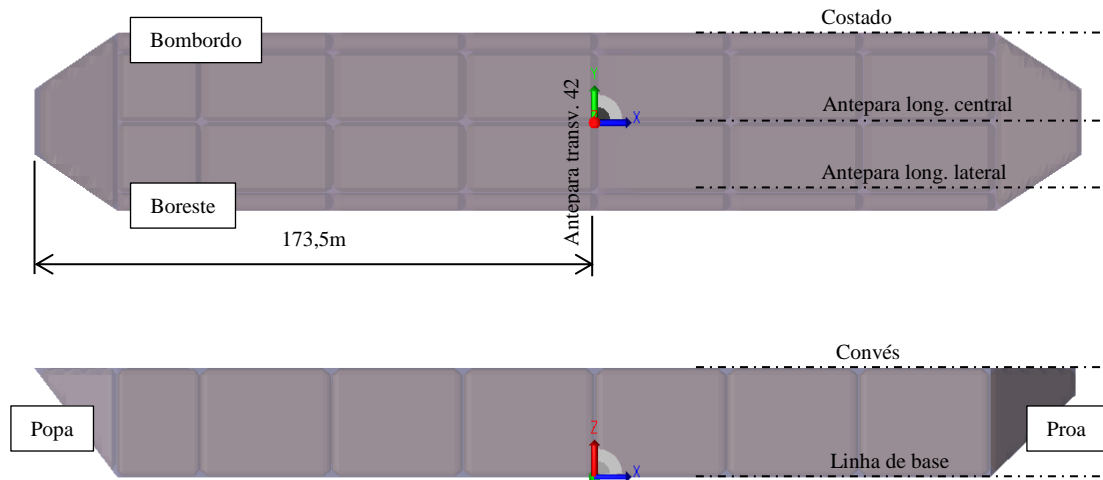


Figura 4.3 – Orientação do FPSO em serviço e posições das estruturas

A modelagem compreende o comprimento total do corpo do FPSO e 3 modelos FEM são gerados: de difração, de massa e de estrutura. Para esta análise, o modelo de massa e o modelo de estrutura coincidem.

A modelagem da geometria, propriedades, tamanho de malha e condições de contorno para os modelos anteriormente mencionados foram gerados de acordo com as recomendações da nota de classificação da DNV GL (DNV GL, 2014)

O modelo de massa foi executado levando em conta as características navais do FPSO, para as condições de carga completa, meia carga e lastro, de forma que as respostas de movimentos e forças seccionais nas análises hidrodinâmicas sejam as mais realistas possíveis.

4.3.1 Modelo de difração

Foram modeladas as estruturas planas que recebem cargas hidrostáticas e hidrodinâmicas, no caso, o fundo e as paredes externas do FPSO.

Um carregamento fictício é criado para indicar a face molhada de cada elemento, já que este modelo serve apenas para calcular algumas propriedades hidrodinâmicas do corpo submerso e mapear as regiões para posterior aplicação de pressões devido à dinâmica dos fluidos. A Figura 4.4 abaixo ilustra o modelo de difração conceitual, criado no Genie e a Figura 4.5 mostra a malha de contorno gerada, com aproximadamente 1400 elementos.

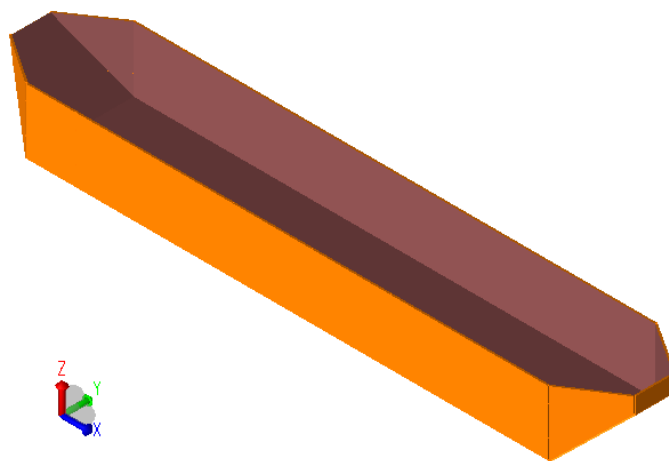


Figura 4.4 – Modelo de difração

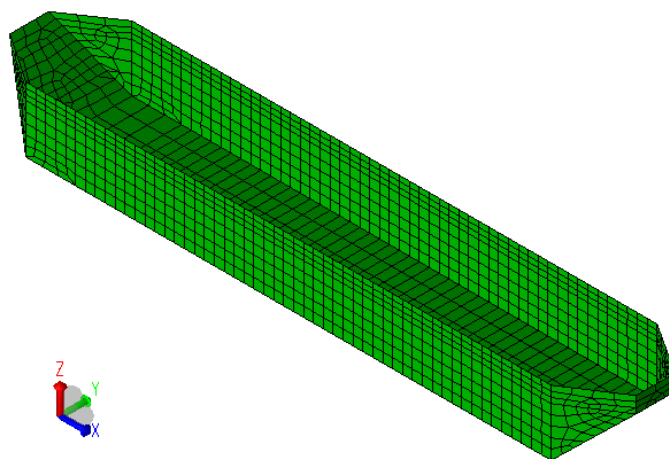


Figura 4.5 – Malha de difração

4.3.2 Modelo estrutural e modelo de massa

Para estes modelos, foram utilizados elementos de segunda ordem nas vigas e cascas. Os enrijecedores longitudinais, flanges das estruturas transversais principais e enrijecedores das anteparas transversais foram incluídos no modelo como elementos de viga de 3 nós do tipo BTSS do SESAM, ilustrado na . Elementos de casca de 6 e 8 nós (elemento dos tipos SCTS e SCQS no Genie) foram utilizados para modelar as estruturas planas. Os módulos do topside foram modelados como elementos de massa de 1 nó excêntricos (elemento do tipo GMAS no Genie), conectados aos nós de anteparas transversais ou longitudinais ou estruturas transversais principais mais próximas. O tamanho de malha foi ajustado para 5 m nas regiões afastadas dos pontos de interesse da análise e 1 m nas proximidades dos pontos de interesse. Nas regiões ao redor dos *hot spots* verificados à fadiga, o tamanho de malha foi reduzido para dimensões da ordem da espessura do elemento (cerca de 20 mm nos casos analisados), conforme recomendação na nota de classificação da DNV GL (DNV GL, 2014). A figura a seguir ilustra a transição de malha.

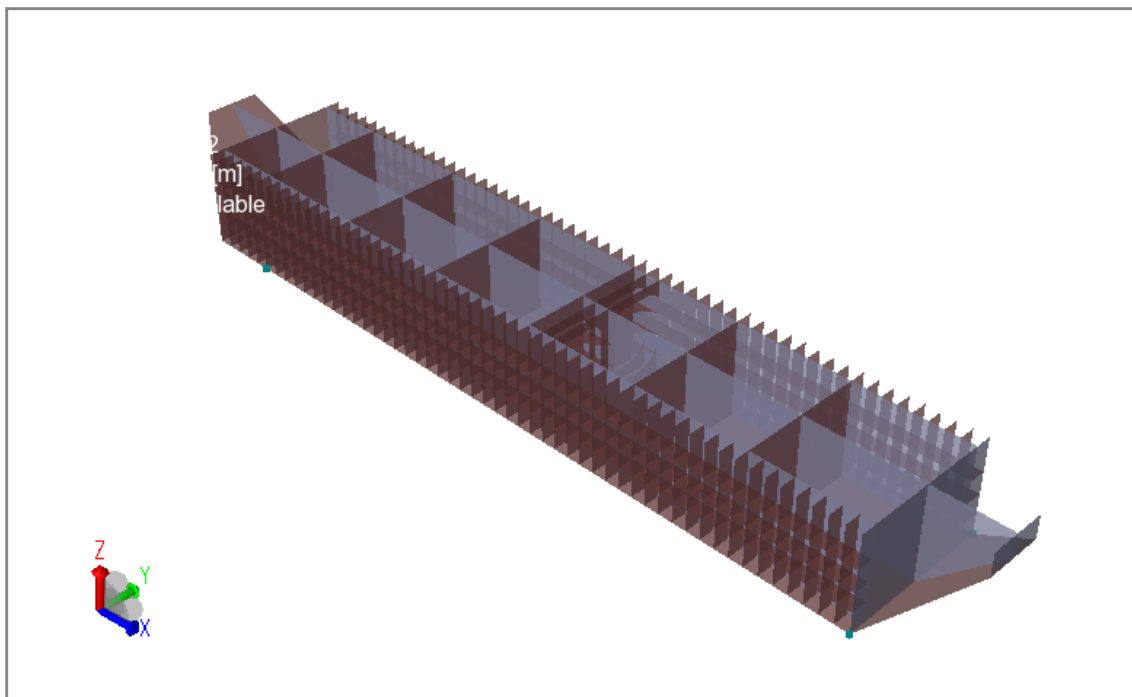


Figura 4.6 – Modelo conceitual de estrutura

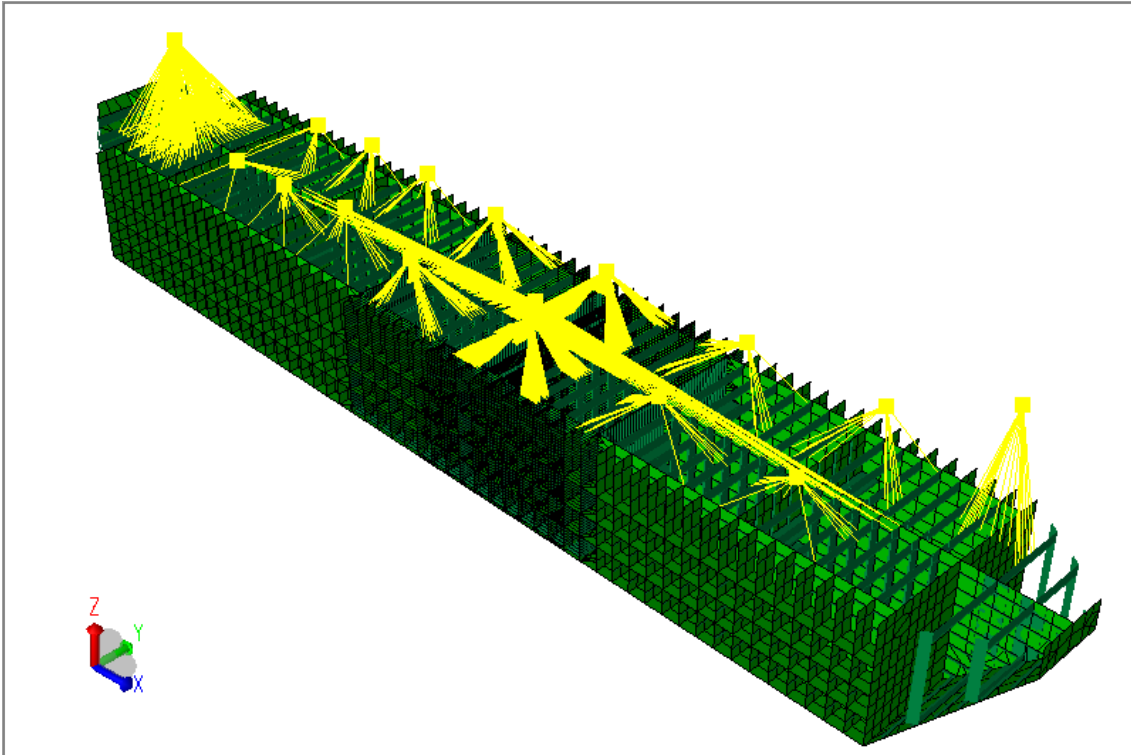


Figura 4.7 – Modelo de elementos finitos de estrutura (detalhe dos pontos de massa)

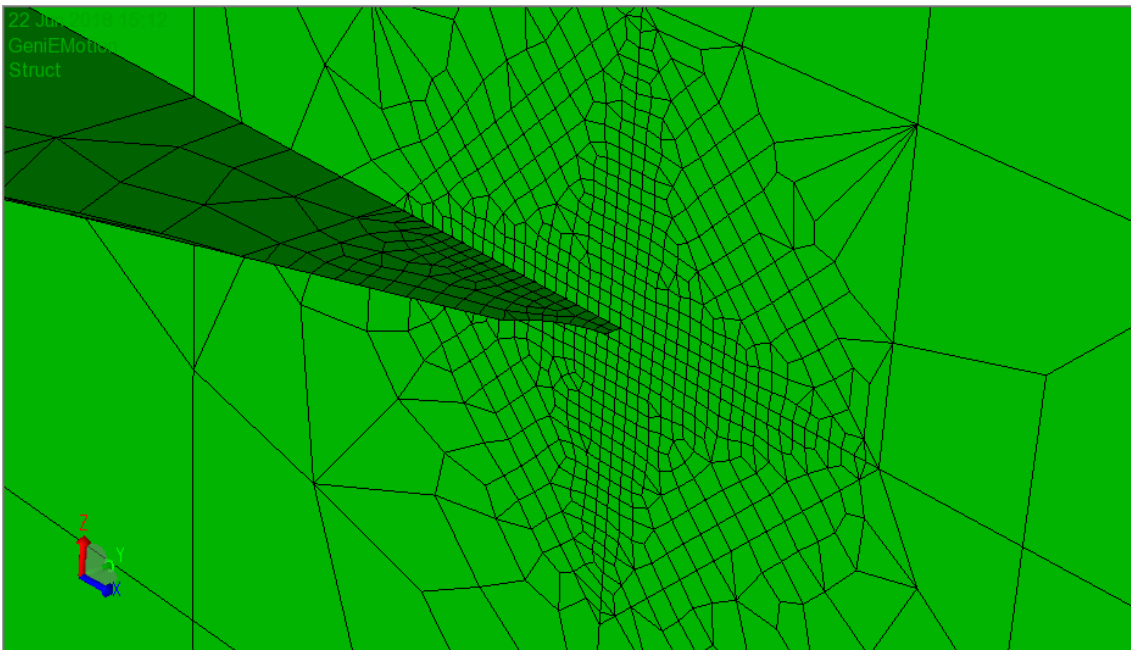


Figura 4.8 – Modelo de estrutura – malha de elementos finitos em um *hot spot*

A tabela a seguir mostra as características do modelo de elementos finitos.

Tabela 4.1 Modelo de estrutura - características da malha de EF

Contagens da malha de EF					
Nós	Elementos				
	GMAS	BTSS	SCTS	SCQS	Total
138417	2185	37588	7486	44784	92043

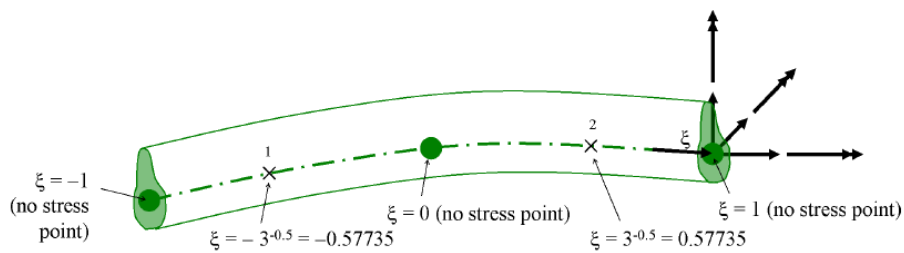


Figura 4.9 – Elemento BTSS do Sesam (DNV GL, 2018a)

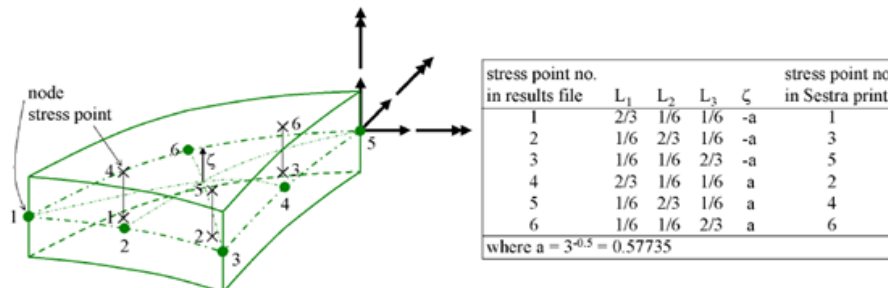


Figura 4.10 – Elemento SCTS do Sesam (DNV GL, 2018a)

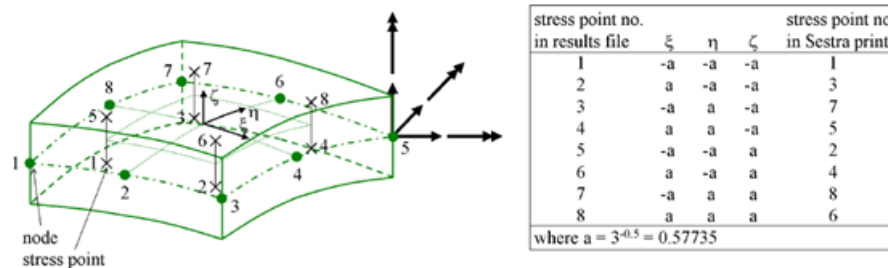


Figura 4.11 – Elemento SCQS do Sesam (DNV GL, 2018a)

De acordo com a prática recomendada da DNV GL (DNV GL, 2015b), as superestruturas, pedestais e outros elementos que não contribuem para a resistência global da estrutura não precisam ser incluídos no modelo estrutural, mas suas massas devem refletir a influência dos mesmos.

As espessuras brutas foram utilizadas nas regiões distantes dos pontos de interesse da análise. Conservadoramente, as espessuras líquidas dos elementos de cascas e vigas, descontadas as sobresspessuras de corrosão de acordo com a DNV GL (DNV GL, 2014), foram utilizadas na região próxima aos pontos de interesse.

4.3.3 Carregamentos

A DNV GL (DNV GL, 2014) indica que os efeitos não lineares devidos à movimentos de grande amplitude e ondas grandes não precisa ser considerado em análises de fadiga espectral desde que as amplitudes de tensões a níveis baixos de carregamentos tenham grande importância relativa para o dano à fadiga. Desta forma, devido às características do comportamento do mar na locação do FPSO, de águas calmas, apenas efeitos lineares foram considerados nas análises aqui apresentadas.

Foi assumida função de espraçamento cossenoide de ordem 2.

A distribuição dos carregamentos para a análise de fadiga espectral *full stochastic* foi considerada da seguinte forma:

- 3 condições de operação – carga completa, meia carga e lastro (óleo e água com densidades de 940 e 1025 kg/m³, respectivamente);
- 8 direções de onda variando entre 0° e 360°, com passo de 45°;
- 25 períodos entre 3 e 35 s, com passo variável de acordo com a resposta da estrutura nas análises preliminares.

Logo, foram rodados 600 casos para calcular os *RAOs* de tensões necessários para realização da análise completa da estrutura.

Tabela 4.4 Diagrama de dispersão Hs x direção, Bacia de Santos (SOUZA, 2014)

DIAGRAMA DE DISPERSAO: EIXO HORIZONTAL: dir
 BACIA DE SANTOS EIXO VERTICAL: hs

HS TOTAL (m)		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL	%
.00	.25	0	0	0	0	1	0	0	0	1	.00
.25	.50	1	11	22	10	11	2	0	5	62	.19
.50	.75	30	226	159	97	93	59	15	10	689	2.11
.75	1.00	109	748	494	249	377	193	29	25	2224	6.82
1.00	1.25	174	1532	936	409	605	242	24	27	3949	12.10
1.25	1.50	175	1950	1393	590	668	325	31	28	5160	15.82
1.50	1.75	101	2007	1305	604	807	350	25	13	5212	15.98
1.75	2.00	55	1495	886	509	734	393	27	6	4105	12.58
2.00	2.25	31	1057	582	452	782	440	5	6	3355	10.28
2.25	2.50	18	774	373	327	578	379	8	2	2459	7.54
2.50	2.75	7	406	220	271	483	364	14	1	1766	5.41
2.75	3.00	1	213	138	167	348	291	3	1	1162	3.56
3.00	3.25	1	134	68	87	236	236	3	0	765	2.34
3.25	3.50	0	63	38	48	142	161	1	0	453	1.39
3.50	3.75	0	29	21	44	96	154	3	0	347	1.06
3.75	4.00	0	31	14	33	54	121	3	0	256	.78
4.00	4.25	0	12	8	15	53	99	4	0	191	.59
4.25	4.50	0	9	0	13	38	56	1	0	117	.36
4.50	4.75	0	5	2	9	19	60	1	0	96	.29
4.75	5.00	0	2	6	2	17	60	4	0	91	.28
5.00	5.25	0	0	1	2	16	37	1	0	57	.17
5.25	5.50	0	0	1	4	10	24	4	0	43	.13
5.50	5.75	0	0	0	0	5	22	0	0	27	.08
5.75	6.00	0	0	0	0	3	10	0	0	13	.04
6.00	6.25	0	0	0	0	1	5	0	0	6	.02
6.25	6.50	0	0	0	0	1	3	0	0	4	.01
6.50	6.75	0	0	0	0	1	4	0	0	5	.02
6.75	7.00	0	0	0	0	1	3	0	0	4	.01
7.00	7.25	0	0	0	0	4	0	0	0	4	.01
7.25	7.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00
TOTAL		703	10704	6667	3942	6184	4093	206	124	32623	
%		2.15	32.81	20.44	12.08	18.96	12.55	.63	.38		
MEDIAS DE HS		1.36	1.69	1.65	1.87	2.04	2.44	1.84	1.25	1.85	

Tabela 4.5 Diagrama de dispersão Hs x Tp, Bacia de Santos (SOUZA, 2014)

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

HS TOTAL (n)		2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	freq	%	
.00	.25	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	.00	
.25	.50	0	1	0	7	3	6	17	7	1	2	11	0	4	2	0	1	0	0	62	.19	
.50	.75	0	35	24	66	122	121	97	59	43	42	20	20	35	5	0	0	0	0	689	2.11	
.75	1.00	0	9	231	354	342	371	262	156	104	139	69	78	76	25	8	0	0	0	2224	6.82	
1.00	1.25	0	0	213	840	932	631	316	212	191	206	172	107	101	14	13	0	1	0	3949	12.10	
1.25	1.50	0	0	44	918	1514	914	460	274	209	292	287	125	101	15	3	3	1	0	5160	15.82	
1.50	1.75	0	0	2	321	1528	1410	599	311	227	267	211	184	119	25	8	0	0	0	5212	15.98	
1.75	2.00	0	0	0	37	993	1361	577	284	240	218	210	102	67	13	2	0	1	0	4105	12.58	
2.00	2.25	0	0	0	6	334	1304	563	301	244	230	186	100	62	17	3	2	3	0	3355	10.28	
2.25	2.50	0	0	0	0	55	919	521	236	196	175	155	111	56	26	6	1	2	0	2459	7.54	
2.50	2.75	0	0	0	0	8	425	452	228	213	143	165	84	26	19	1	1	1	0	1766	5.41	
2.75	3.00	0	0	0	0	2	72	392	237	183	122	71	48	22	8	2	2	1	0	1162	3.56	
3.00	3.25	0	0	0	0	1	23	215	181	87	84	80	43	32	13	4	2	0	0	765	2.34	
3.25	3.50	0	0	0	0	0	4	92	111	76	62	48	27	17	11	1	4	0	0	453	1.39	
3.50	3.75	0	0	0	0	0	2	20	117	72	39	46	30	13	2	5	1	0	0	347	1.06	
3.75	4.00	0	0	0	0	0	0	14	79	55	31	29	25	9	8	6	0	0	0	256	.78	
4.00	4.25	0	0	0	0	0	0	4	37	56	30	25	25	10	2	2	0	0	0	191	.59	
4.25	4.50	0	0	0	0	0	0	0	11	25	36	16	11	12	5	1	0	0	0	117	.36	
4.50	4.75	0	0	0	0	0	0	0	7	27	23	11	11	9	6	2	0	0	0	96	.29	
4.75	5.00	0	0	0	0	0	0	0	4	17	24	17	5	8	8	8	0	0	0	91	.28	
5.00	5.25	0	0	0	0	0	0	0	0	6	15	14	5	3	7	7	0	0	0	57	.17	
5.25	5.50	0	0	0	0	0	0	0	0	8	9	9	6	4	5	2	0	0	0	43	.13	
5.50	5.75	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	7	6	2	3	4	0	0	0	27	.08	
5.75	6.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	0	3	3	0	0	0	0	13	.04	
6.00	6.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	1	0	0	0	0	6	.02	
6.25	6.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	4	.01	
6.50	6.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	0	0	0	5	.02	
6.75	7.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	0	0	4	.01	
7.00	7.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	4	.01	
7.25	7.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00
freq.		0	46	514	2549	5934	7563	4601	2852	2283	2193	1866	1157	796	252	90	17	10	0	32623		
%		.00	.14	1.58	7.81	17.88	23.18	14.10	8.74	7.00	6.72	5.72	3.55	2.44	.77	.28	.05	.03	.00			
hs medio		.00	.67	1.01	1.25	1.50	1.80	2.01	2.19	2.26	2.12	2.15	2.14	1.98	2.68	3.02	2.54	2.07	.00			

É importante observar que, para análises de condições extremas, como nas verificações de estado limite último, por exemplo, os estados de mar tendem a ser unimodais. Ou seja: extremas vindas de uma dada direção tendem a predominar sobre outras ondas que ocorram concomitantemente. Porém, nas análises de fadiga, onde precisamos analisar condições frequentes, as ocorrências de estados de mar bimodais (e bidirecionais) devem ser consideradas na obtenção das respostas. Ou seja, ondas provenientes de diferentes direções precisam ser combinadas, ondas estas que eventualmente têm alturas próximas entre si. Como os boletins das condições de mar da Bacia de Campos mostram que esta situação ocorre frequentemente, é preciso tratar com atenção estes dados, já que o StoFat não contempla automaticamente os cálculos de estados de mar bimodais bidirecionais. A técnica aqui utilizada para tratar este problema foi considerar como onda primária aquela que tem a maior altura e onda secundária aquela que tem a menor altura. Desta forma, a onda equivalente terá o período e direção da onda primária e calcular a altura equivalente a partir da seguinte equação, ver por exemplo (SOUZA, 2014).

$$H_s = \sqrt{H_{s[1]}^2 + H_{s[2]}^2} \quad 4.1$$

onde,

$H_{s[1]}$ e $H_{s[2]}$ são a altura da onda primária e secundária, respectivamente;

O plano de capacidades dos tanques do FPSO, assim como suas frações de enchimento para cada uma das condições analisadas são apresentados no ANEXO B. A escolha das frações de enchimento por tanque foram realizadas de forma a manter a posição de estabilidade da estrutura, com a máxima amplitude de tensões no trecho de interesse. O equilíbrio hidrostático da estrutura foi obtido através de análises realizadas no pacote DNV GL HydroD/WADAM. As frações de tempo em cada uma das condições de operação, de acordo com as normas da DNV GL (DNV GL, 2018b) (DNV GL, 2015b). Desta forma, foram arbitradas as seguintes frações de enchimento dos tanques para as análises aqui apresentadas:

- Carga completa (calado de 24m) – 10% do tempo;
- Meia carga (calado de 17m) – 60% do tempo;
- Lastro (calado de 10m) – 30% do tempo.

CONDIÇÃO CARGA COMPLETA

TLAFT 0%	Utility Room + Slope Tanks	TLPS6 0%	TLPS5 0%	TLPS4 0%	TLPS3 0%	TLPS2 0%	TLPS1 0%	FPT 0%
		TCPS6 95%	TCPS5 95%	TCPS4 95%	TCPS3 95%	TCPS2 95%	TCPS1 41%	
		TCSB6 95%	TCSB5 95%	TCSB4 95%	TCSB3 95%	TCSB2 95%	TCSB1 40%	
		TLSB6 0%	TLSB5 0%	TLSB4 0%	TLSB3 0%	TLSB2 0%	TLSB1 0%	

Figura 4.12 Enchimento dos tanques para a condição de carga completa

CONDIÇÃO MEIA CARGA

TLAFT 22%	Utility Room + Slope Tanks	TLPS6 4%	TLPS5 4%	TLPS4 4%	TLPS3 4%	TLPS2 4%	TLPS1 4%	FPT 0%
		TCPS6 48%	TCPS5 48%	TCPS4 48%	TCPS3 48%	TCPS2 48%	TCPS1 48%	
		TCSB6 75%	TCSB5 48%	TCSB4 48%	TCSB3 48%	TCSB2 48%	TCSB1 48%	
		TLSB6 4%	TLSB5 4%	TLSB4 4%	TLSB3 4%	TLSB2 4%	TLSB1 4%	

Figura 4.13 Enchimento dos tanques para a condição de meia carga

CONDIÇÃO DE LASTRO

TLAFT 0%	Utility Room + Slope Tanks	TLPS6 55%	TLPS5 48%	TLPS4 48%	TLPS3 48%	TLPS2 48%	TLPS1 63%	FPT 0%
		TCPS6 0%	TCPS5 0%	TCPS4 0%	TCPS3 0%	TCPS2 0%	TCPS1 0%	
		TCSB6 0%	TCSB5 0%	TCSB4 0%	TCSB3 0%	TCSB2 0%	TCSB1 0%	
		TLSB6 48%	TLSB5 95%	TLSB4 48%	TLSB3 48%	TLSB2 48%	TLSB1 65%	

Figura 4.14 Enchimento dos tanques para a condição de lastro

4.3.4 Hot spots de fadiga selecionados

Numa primeira triagem, foram analisadas as parcelas cíclicas das tensões extremas em 10 pontos da estrutura, para cada uma das condições de lastreamento, nas conexões entre as anteparas longitudinais (central e laterais) com a antepara transversal e as cavernas. Após a triagem, foram selecionados três *hot spots* para as análises de estado limite de fadiga. Nestes pontos, foram realizados cuidadosos refinamentos de malha conforme indicado na nota da DNV GL (DNV GL, 2014). As descrições são listadas a seguir e as figuras abaixo ilustram os planos e a malha de elementos finitos para cada um dos *hot spots*:

- *Hot spot 1* Interseção entre a viga gigante vertical do convés na caverna 44 e a antepara longitudinal lateral (bombordo);
- *Hot spot 2* Interseção entre a escoa (viga transversal horizontal no nível) 3 da antepara transversal 42 e a antepara longitudinal lateral (bombordo);
- *Hot spot 3* Interseção entre a escoa (viga transversal horizontal no nível) 3 da antepara transversal 42 e a antepara longitudinal central (bombordo);

A Figura 4.15 mostra uma vista do modelo de elementos finitos, com destaque para a região de transição no tanque central do FPSO.

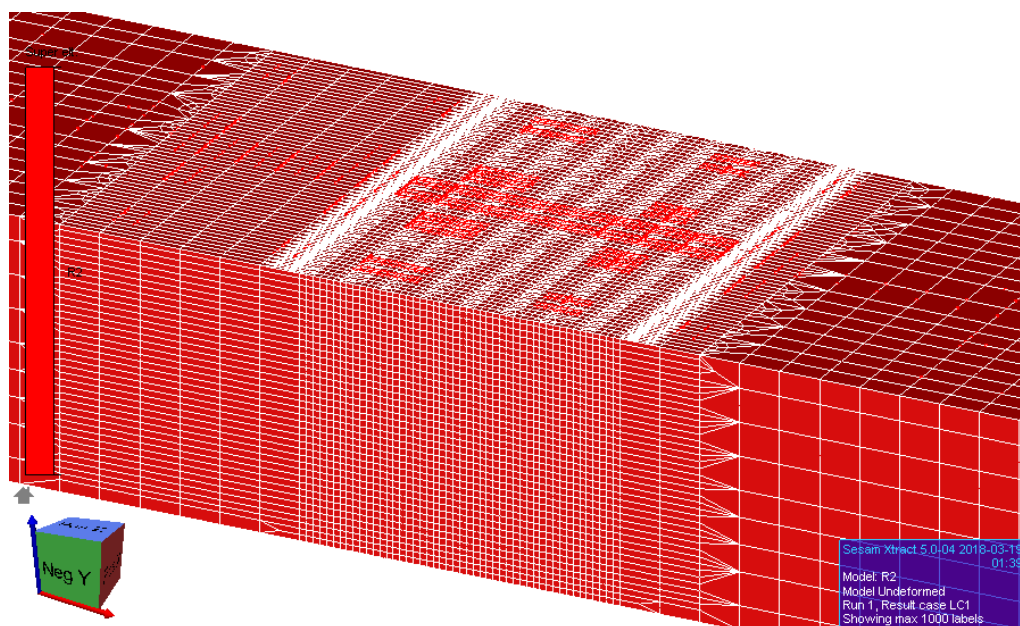


Figura 4.15 Região de transição entre malha grosseira e malha fina (tanque central)

A Figura 4.16 mostra as posições de cada um dos *hot spots* no modelo de EF.

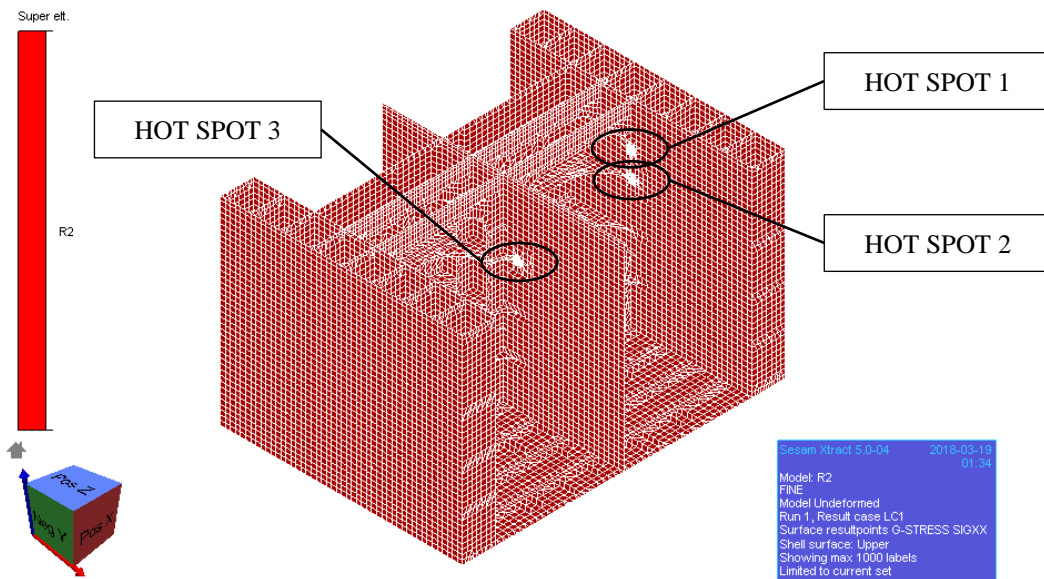


Figura 4.16 Posições dos *hot spots* no modelo

A Figura 4.17, a Figura 4.18 e a Figura 4.19 mostram a comparação entre os *hot spots* indicados nos desenhos de projeto e aqueles idealizados no modelo de elementos finitos.

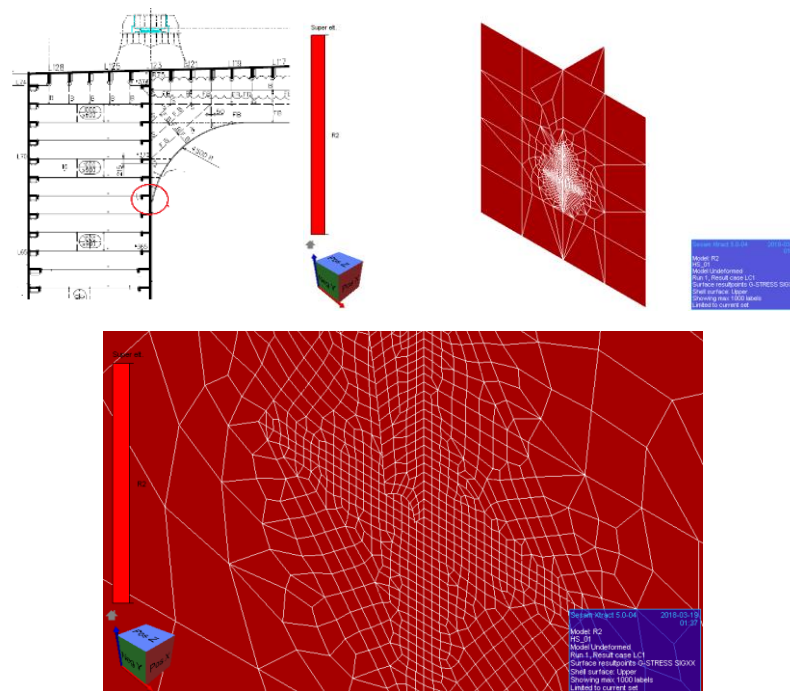


Figura 4.17 *Hot spot* 1 - desenho de projeto x modelo de elementos finitos

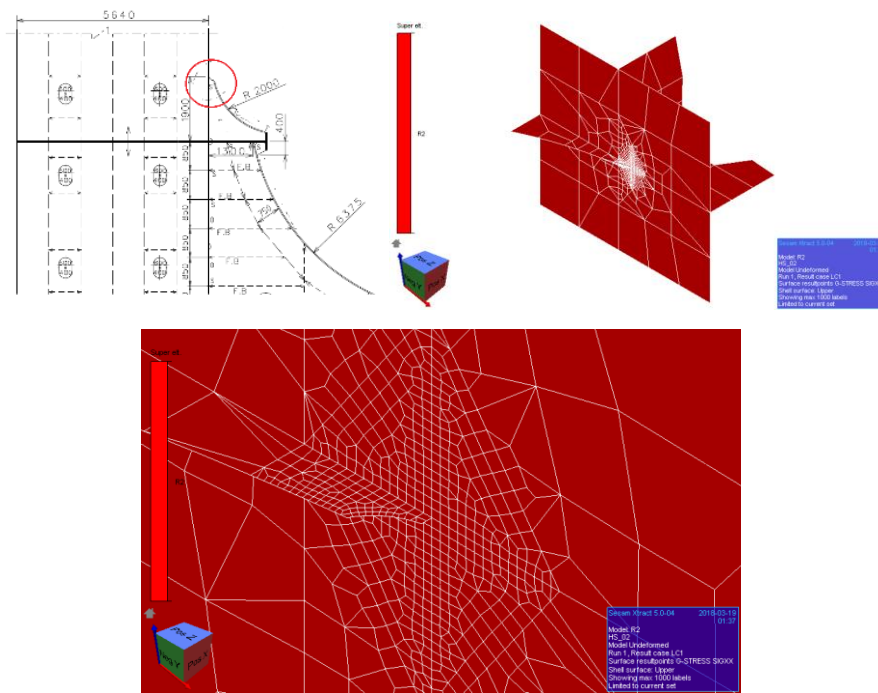


Figura 4.18 – *Hot spot 2* - desenho de projeto x modelo de elementos finitos

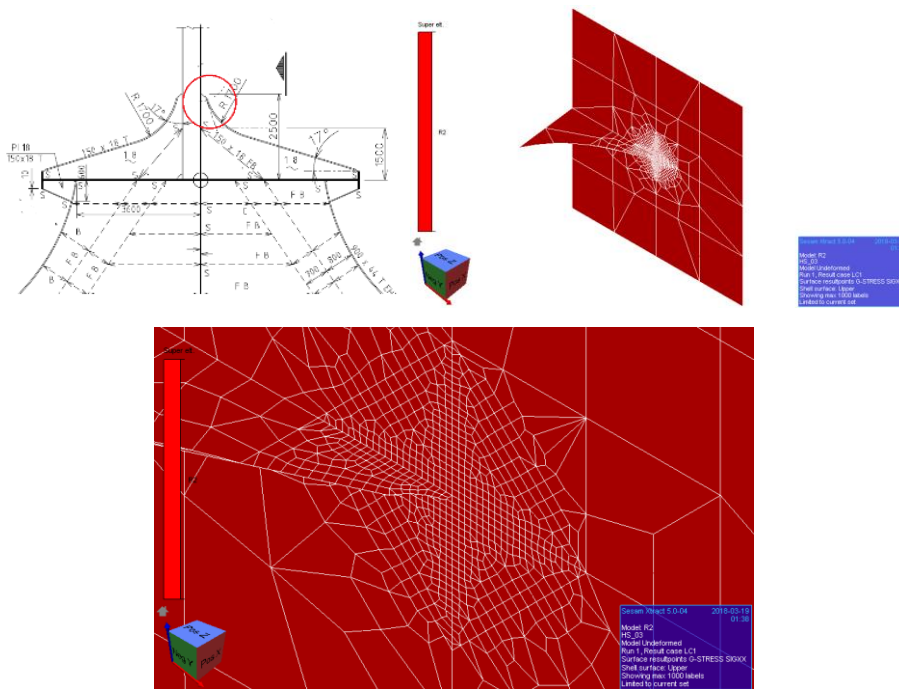


Figura 4.19 – *Hot spot 3* - desenho de projeto x modelo de elementos finitos

4.3.5 Curva de fadiga

Neste trabalho, foi utilizada a curva D das práticas recomendadas da DNV GL (DNV GL, 2016b), válida para estruturas expostas ao ar. Esta curva equivale à curva I das notas de classificação da DNV GL (DNV GL, 2014), que vale tanto para estruturas no ar ou na água do mar com proteção catódica. As curvas são apresentadas no ANEXO A.

4.3.6 Critérios de aceitação

O fator de projeto de fadiga (design fatigue factor, DFF) para os detalhes aqui analisados é um, de acordo com a norma DNV GL (DNV GL, 2015a), já que os tanques do FPSO são acessíveis para inspeção e os detalhes não estão conectados à parte submersa. Entretanto, pela prática recomendada pela própria DNV GL, que trata os eventuais reparos que venham a ser realizados como de alta consequência, para os mesmos casos o DFF a considerar é dois. Assim, seguindo a prática de projeto das operadoras da indústria, foi adotado um $DFF = 2$ para as análises apresentadas nesta dissertação. Desta forma, devemos atender a uma das seguintes equações para que o projeto seja considerado aprovado:

$$\begin{aligned} \text{Dano} &\leq \frac{1}{DFF} \text{ ou} \\ \text{Vida} &\geq (\text{Vida Útil de Projeto}) \times DFF \end{aligned} \tag{4.2}$$

Desta forma, como a vida útil de projeto foi fixada em 25 anos, devemos ter dano limitado a $\frac{1}{2}$ ou a vida calculada mínima deve ser 50 anos.

4.4 Resultados resumidos

4.4.1 RAOs de movimentos

A seguir, são apresentados os RAOs de movimentos de *heave* e *roll* da embarcação, numa condição de peso leve, obtidos das análises iniciais de movimento da embarcação. Foi utilizado amortecimento viscoso de 5% do amortecimento crítico de *roll*, representando um casco com bolinas ampliadas, de acordo com as recomendações da DNV GL (DNV GL, 2015b). As análises foram realizadas utilizando o WADAM e os resultados foram extraídos no pós processamento com auxílio do POSTRESP.

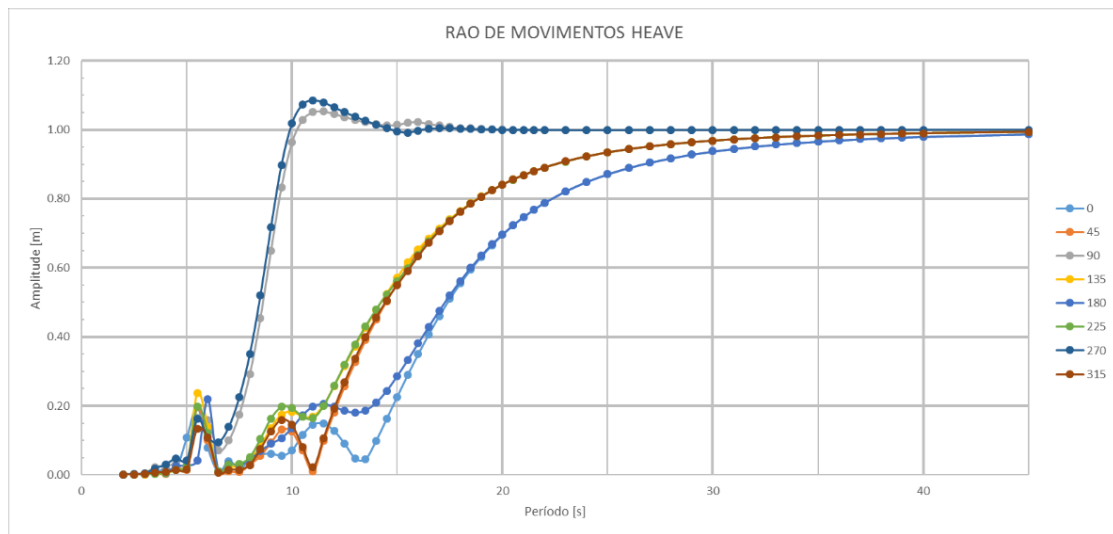


Figura 4.20 – RAO de movimentos *HEAVE*

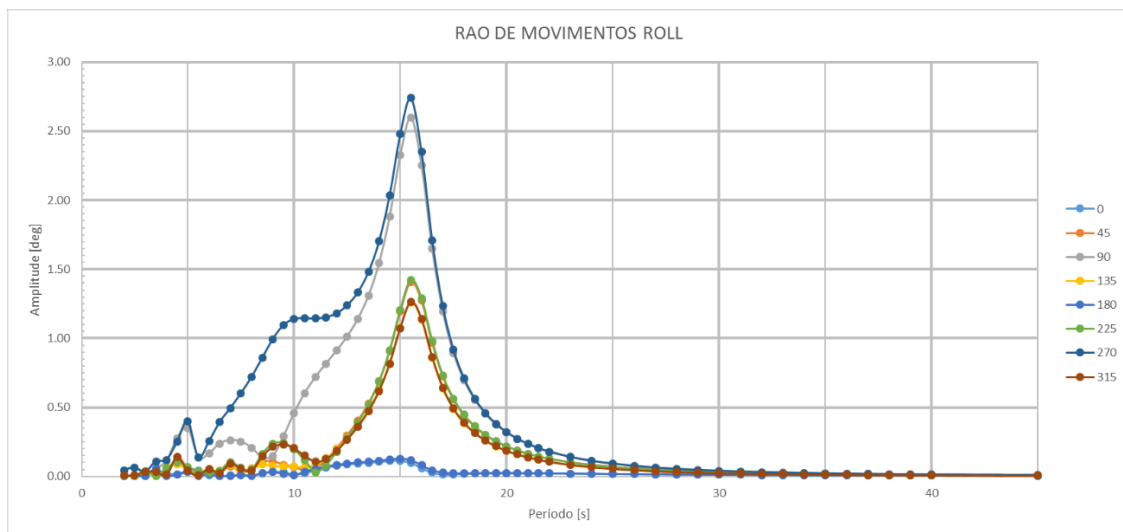


Figura 4.21 – RAO de movimentos *ROLL*

4.4.2 RAOs de tensões principais

A seguir, são apresentados os RAOs de tensões principais 1 (faces superior, inferior e membrana) nos pontos a $t/2$ e a $3t/2$ do *hot spot* 3 para a condição de carga completa.

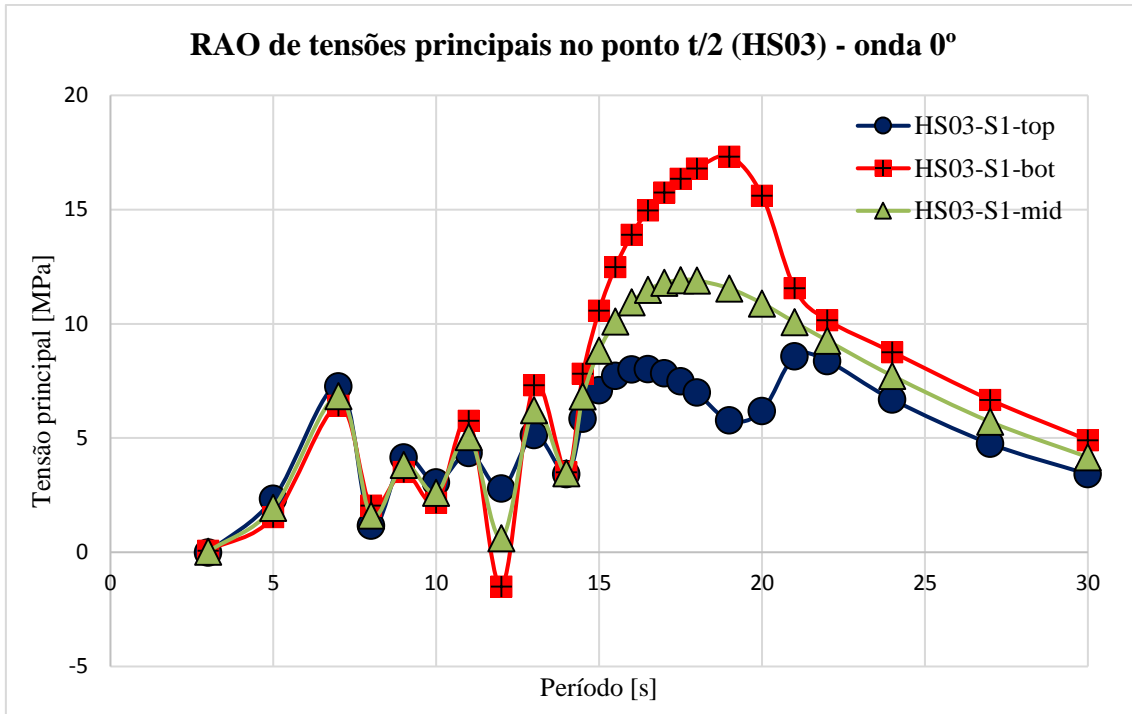


Figura 4.22 – RAO de tensões principais a $t/2$ do HS03 (onda a 0°)

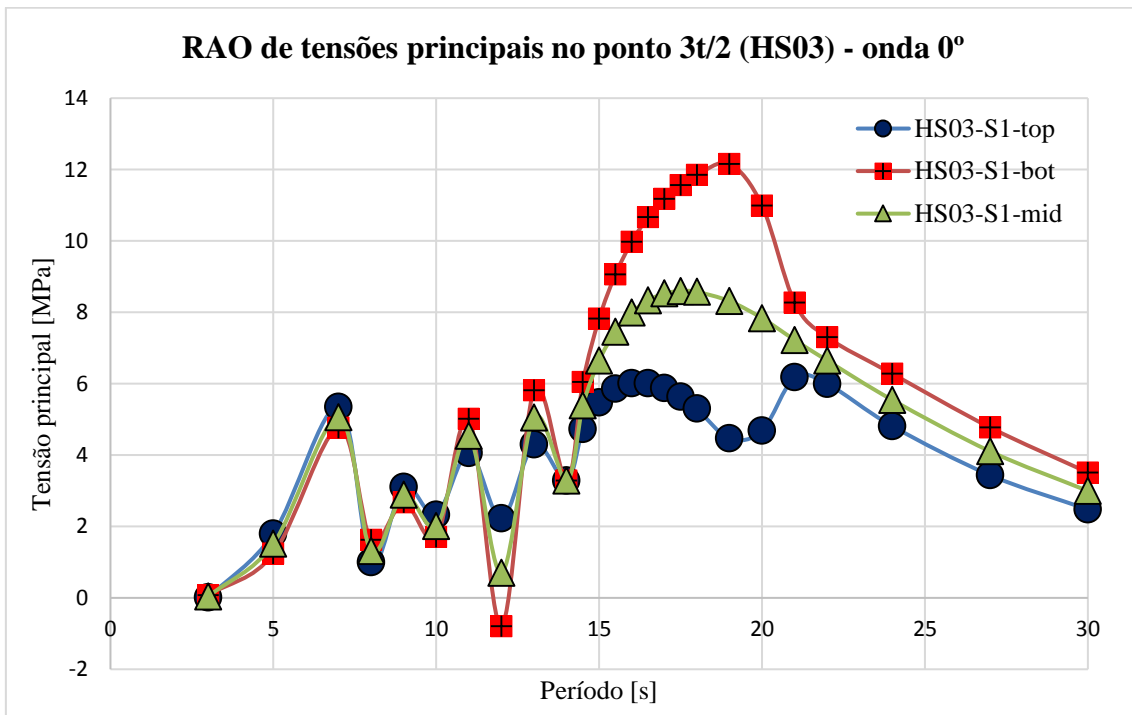


Figura 4.23 – RAO de tensões principais a $3t/2$ do HS03 (onda a 0°)

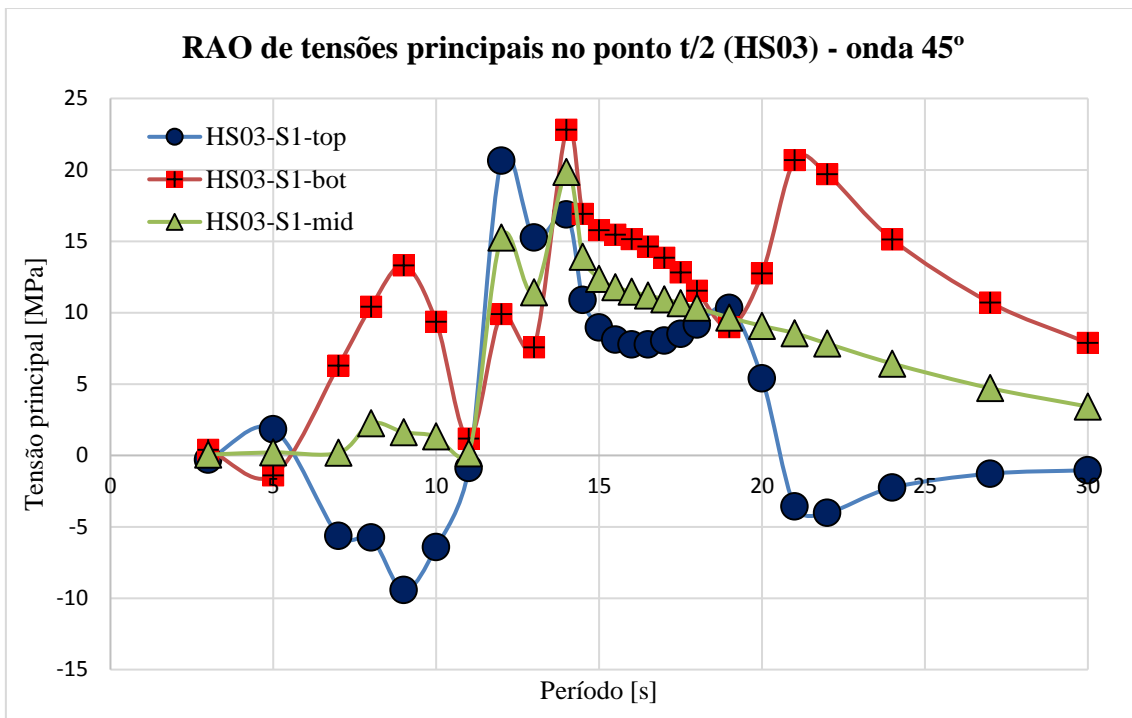


Figura 4.24 – RAO de tensões principais a $t/2$ do HS03 (onda a 45°)

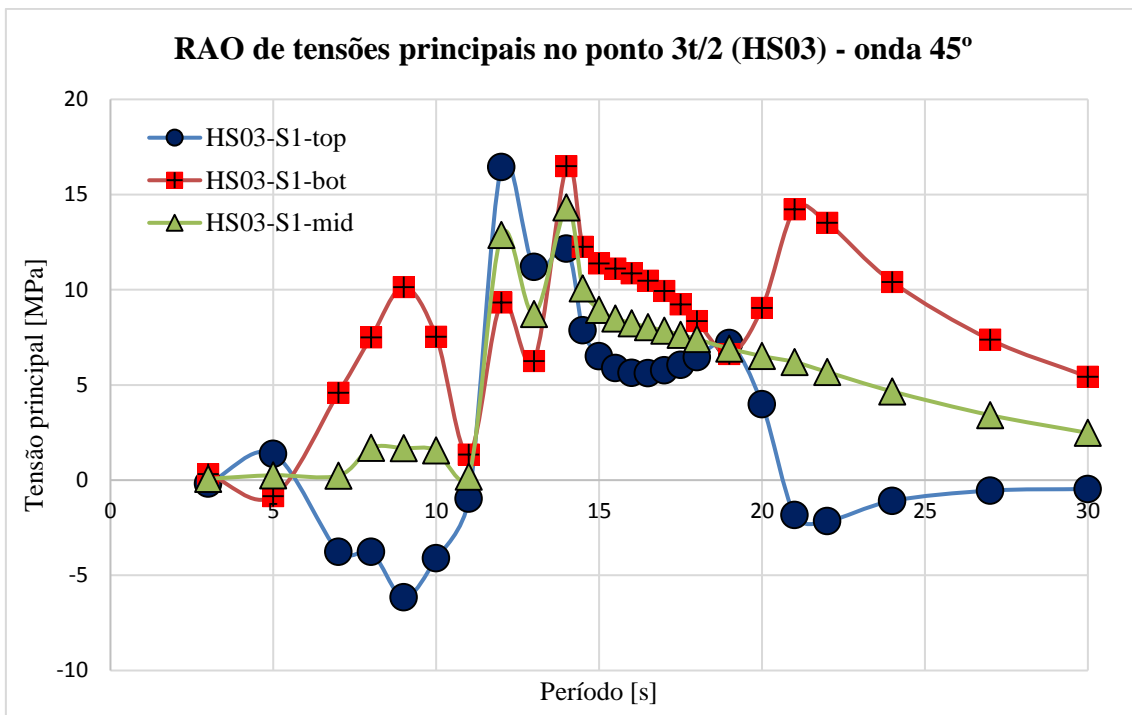


Figura 4.25 – RAO de tensões principais a $3t/2$ do HS03 (onda a 45°)

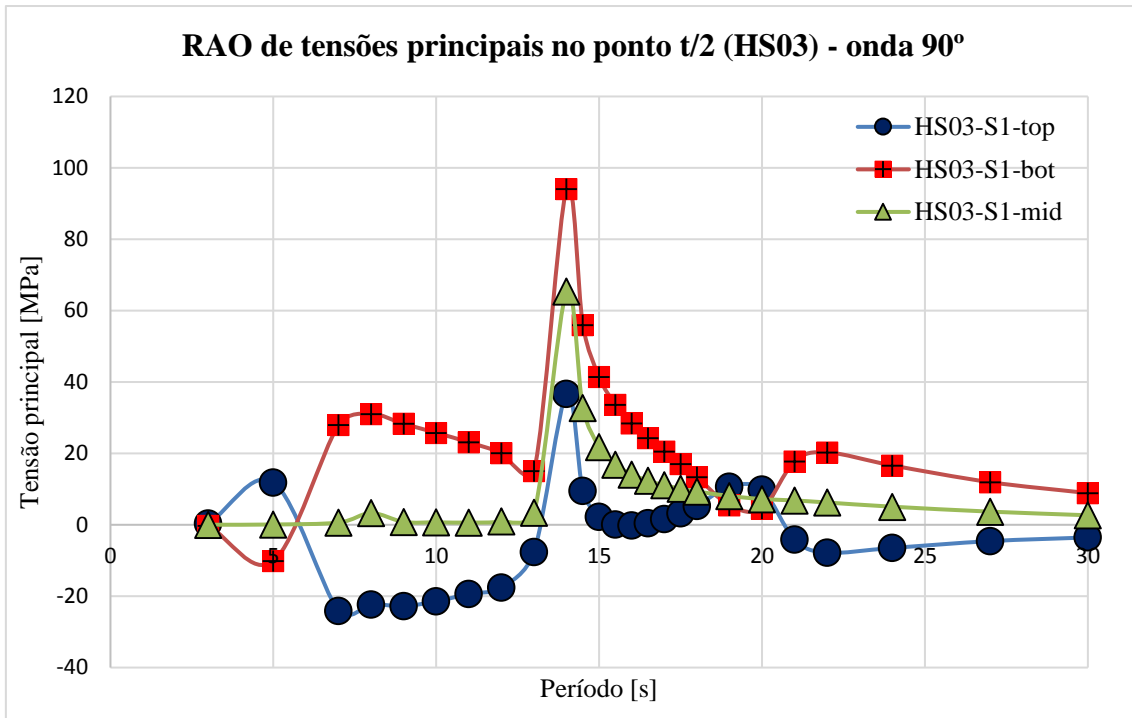


Figura 4.26 – RAO de tensões principais a $t/2$ do HS03 (onda a 90°)

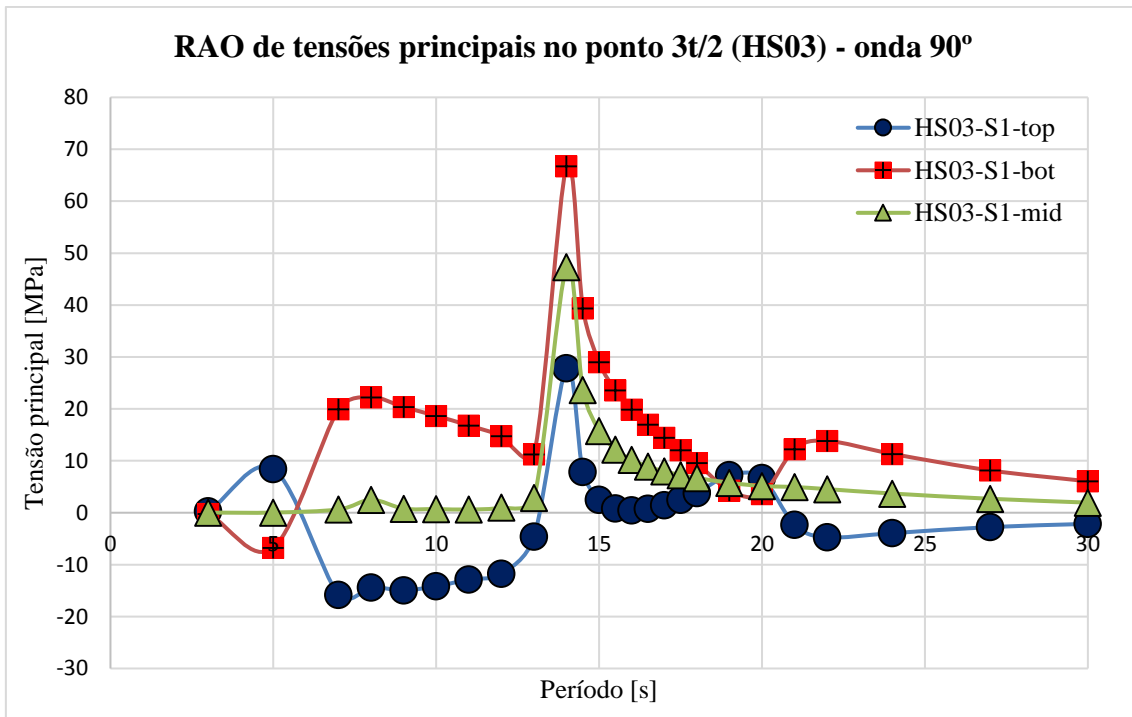


Figura 4.27 – RAO de tensões principais a $3t/2$ do HS03 (onda a 90°)

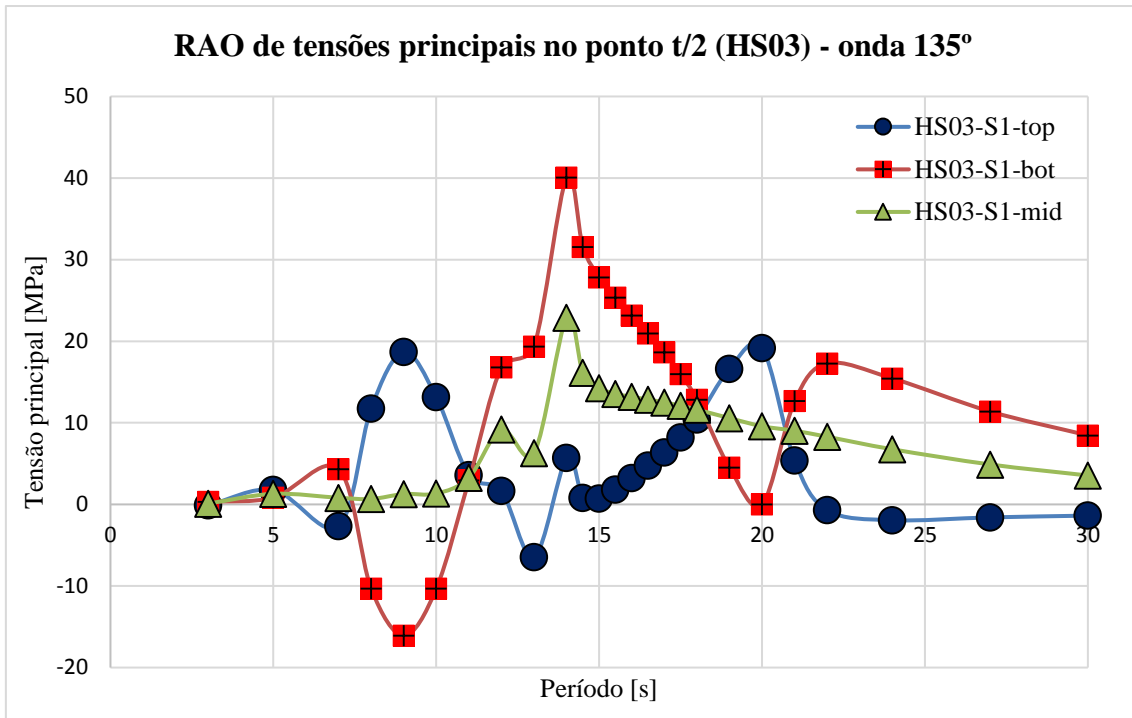


Figura 4.28 – RAO de tensões principais a $t/2$ do HS03 (onda a 135°)

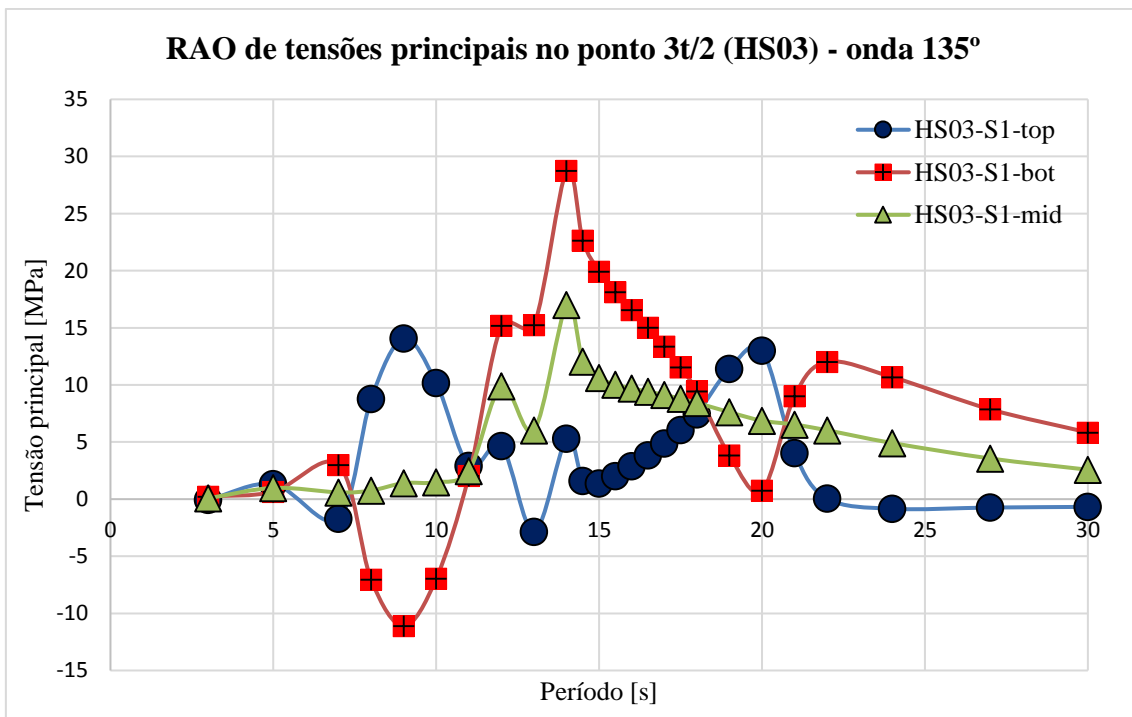


Figura 4.29 – RAO de tensões principais a $3t/2$ do HS03 (onda a 135°)

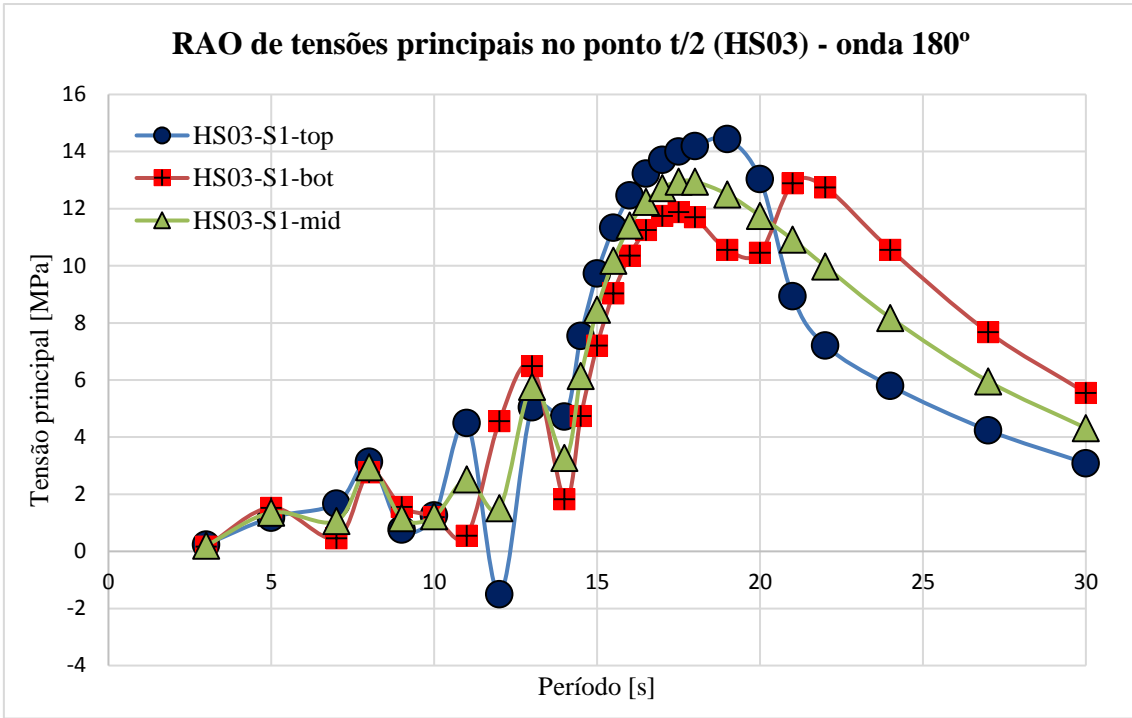


Figura 4.30 – RAO de tensões principais a $t/2$ do HS03 (onda a 180°)

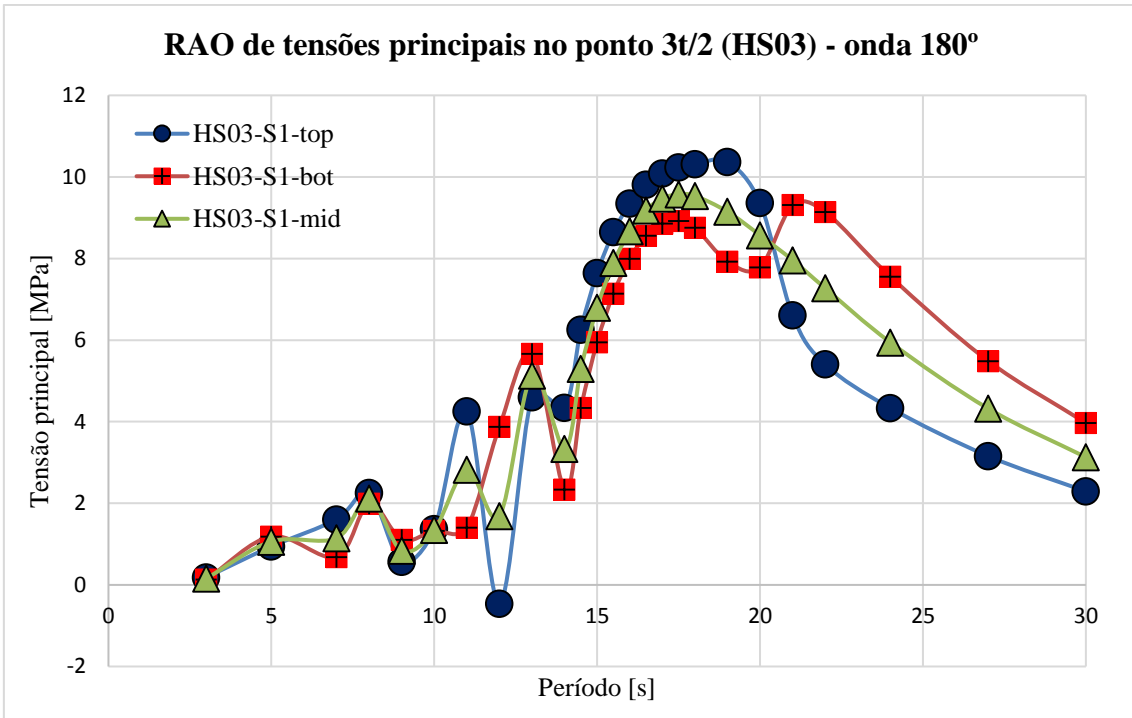


Figura 4.31 – RAO de tensões principais a $3t/2$ do HS03 (onda a 180°)

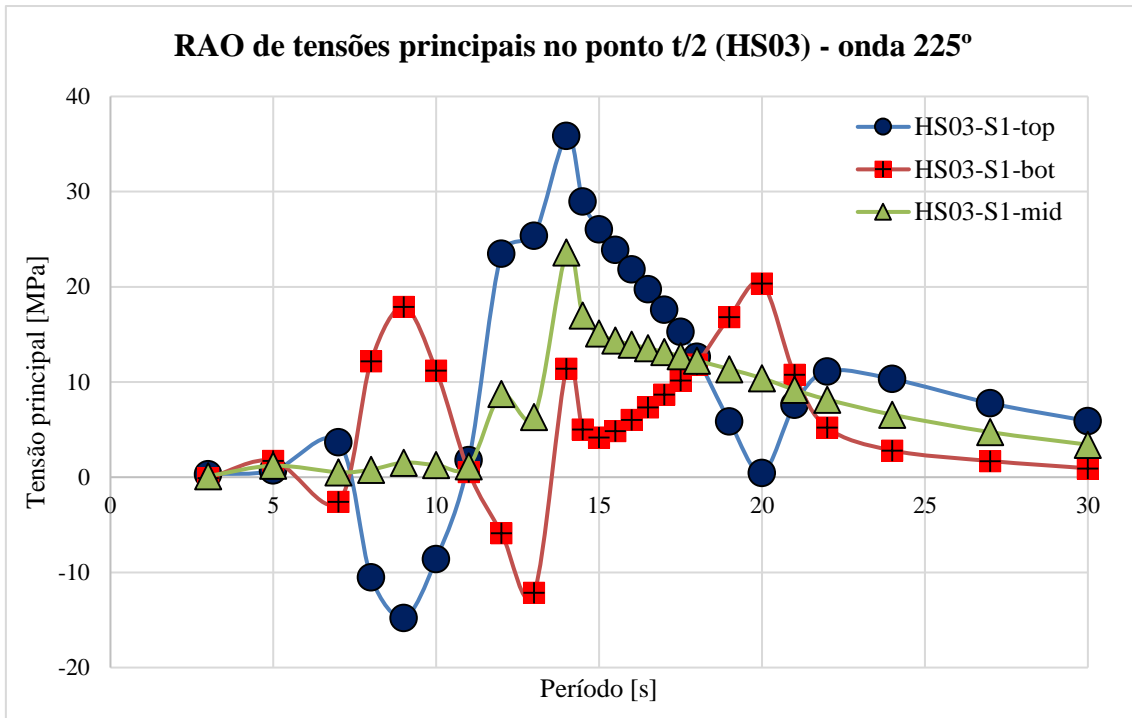


Figura 4.32 – RAO de tensões principais a $t/2$ do HS03 (onda a 225°)

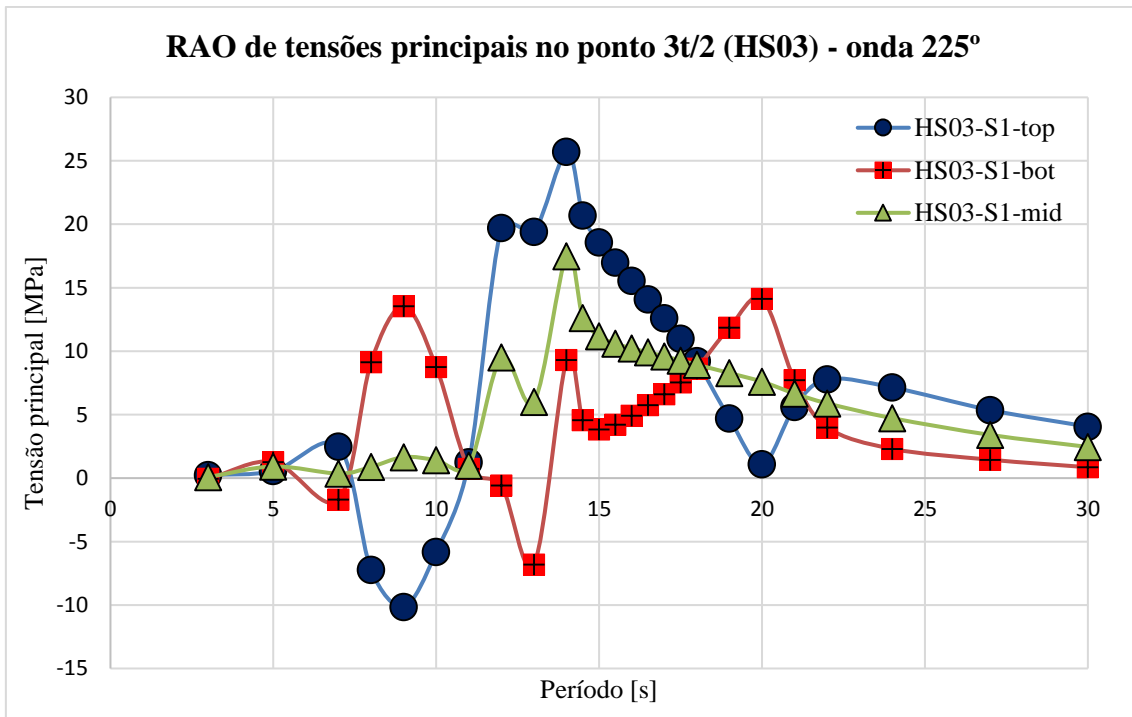


Figura 4.33 – RAO de tensões principais a $3t/2$ do HS03 (onda a 225°)

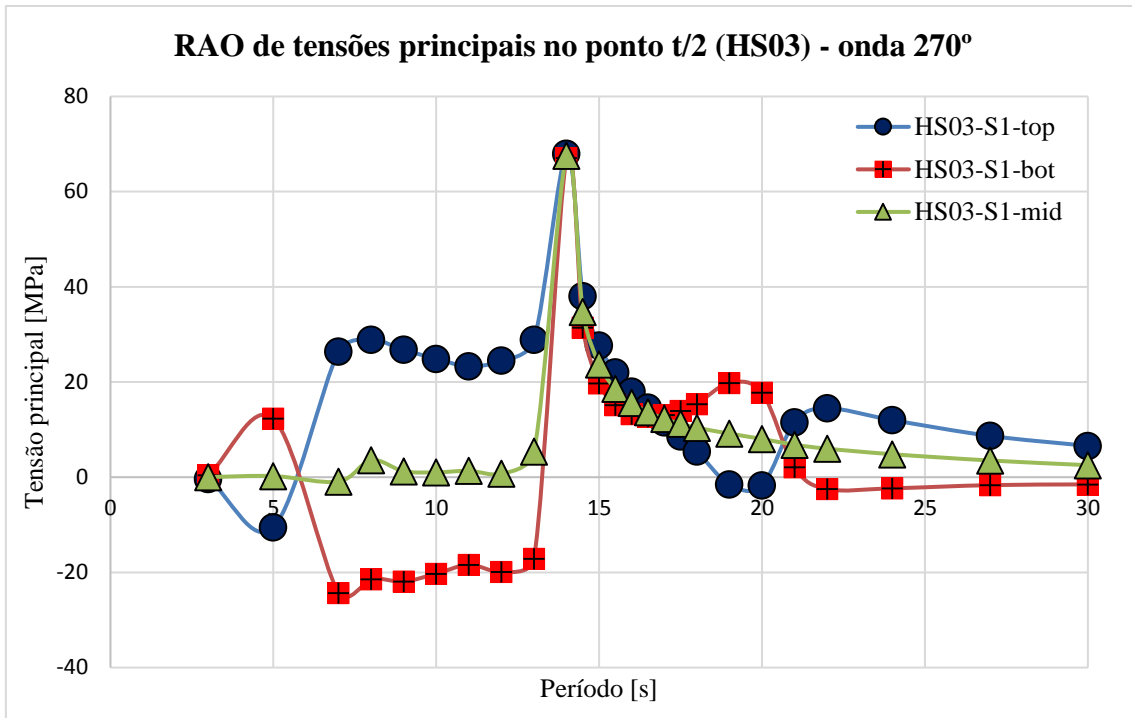


Figura 4.34 – RAO de tensões principais a t/2 do HS03 (onda a 270°)

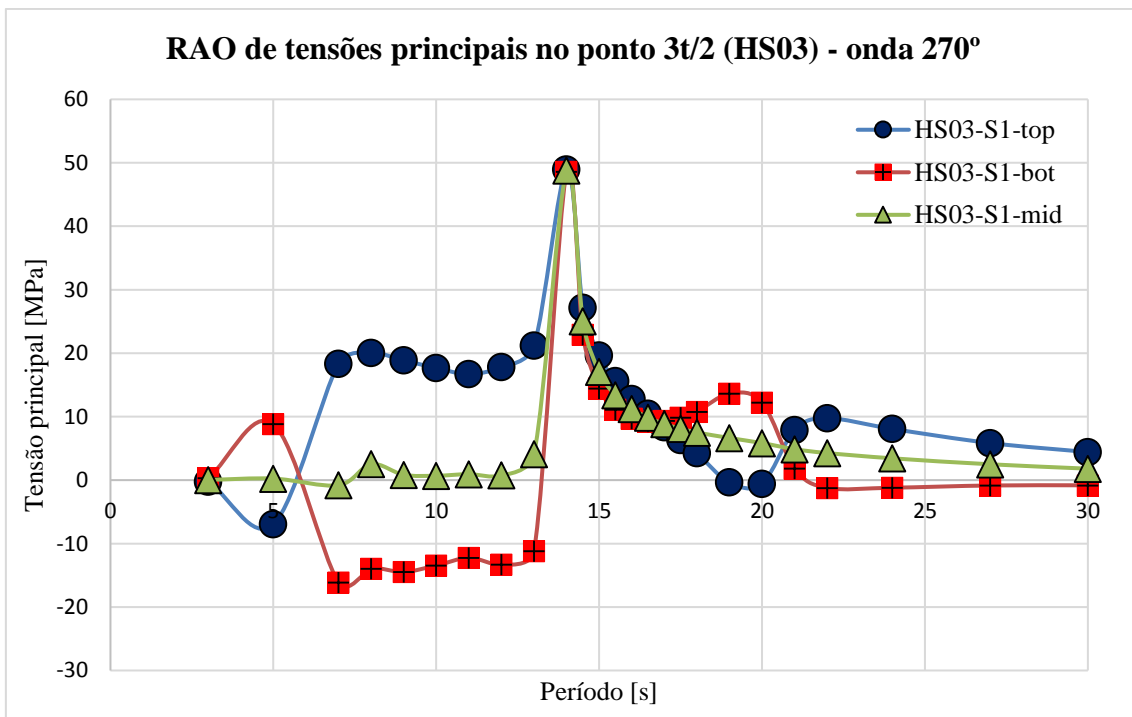


Figura 4.35 – RAO de tensões principais a 3t/2 do HS03 (onda a 270°)

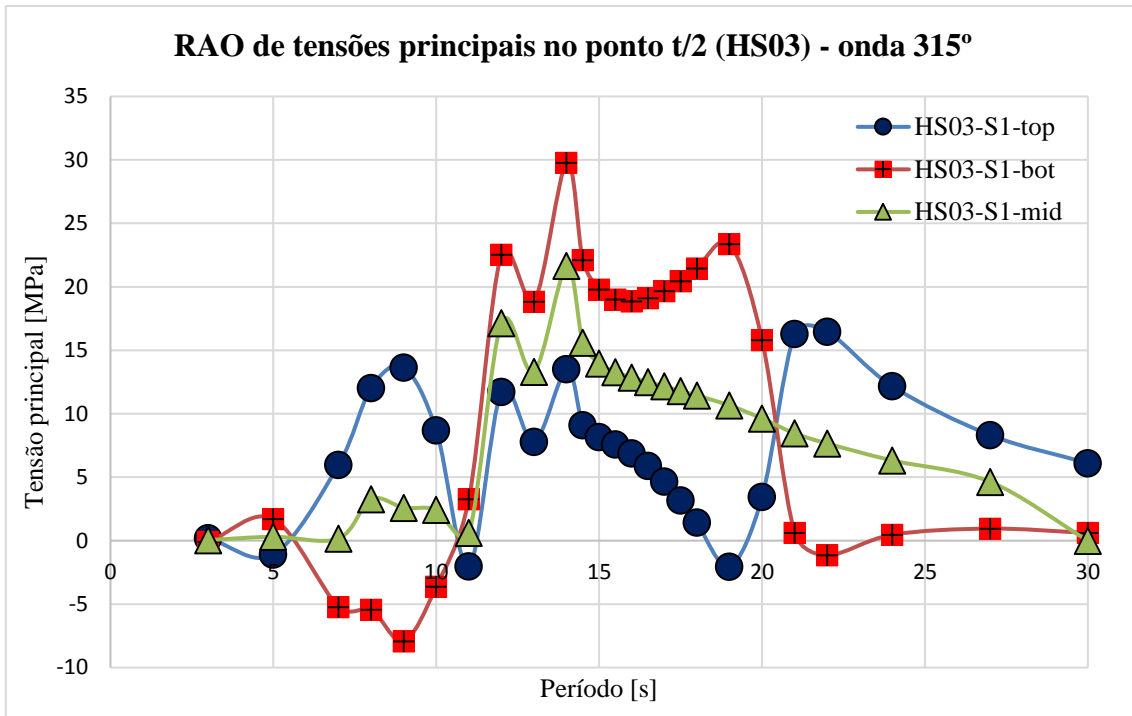


Figura 4.36 – RAO de tensões principais a $t/2$ do HS03 (onda a 315°)

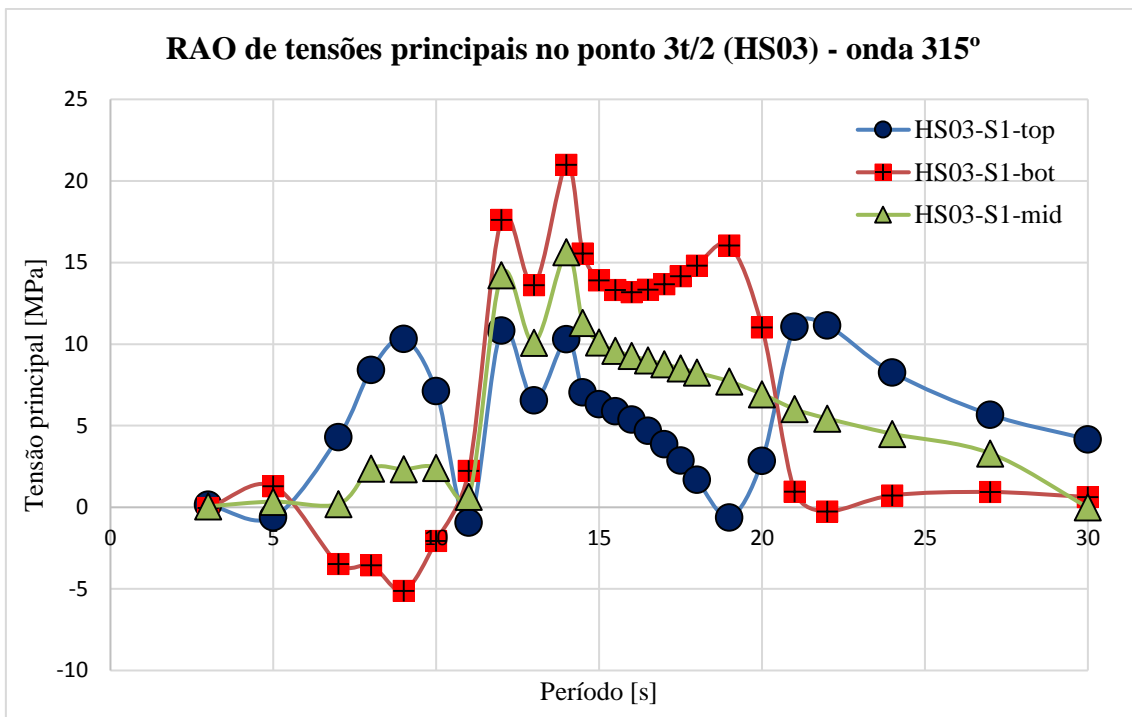


Figura 4.37 – RAO de tensões principais a $3t/2$ do HS03 (onda a 315°)

4.4.3 Tensões e direções principais

A seguir, são apresentados os resultados de tensões principais em ambas as faces dos elementos de casca e direções principais, para os casos críticos (maior amplitude de tensões) em cada um dos *hot spots* analisados. Apenas os resultados para a condição de carga completa são apresentados. Estes resultados refletem a passagem de uma onda de amplitude unitária pela estrutura.

Após o processo de triagem inicial, foram identificados os ângulos de fase que geraram as tensões extremas em cada *hot spot*. São eles:

- *Hot spot* 1 – 50 graus;
- *Hot spot* 2 – 31 graus;
- *Hot spot* 3 – 60 graus;

As tabelas a seguir resumem os resultados e as figuras mais adiante ilustram as distribuições de tensões dos mesmos.

Tabela 4.6 Tensões principais (face superior)

HOT SPOT	Tensões face superior [MPa]			
	Ponto t/2		Ponto 3t/2	
	P1	P2	P1	P2
HS01	40,0	-6,8	40,0	-4,0
HS02	100,0	-18,0	56,0	-39,0
HS03	96,0	30,0	67,0	22,0

Tabela 4.7 Tensões principais (face inferior)

Hot spot	Tensões face inferior [MPa]			
	Ponto t/2		Ponto 3t/2	
	P1	P2	P1	P2
HS01	50,0	-1,7	49,0	-0,9
HS02	91,0	-21,0	81,0	1,3
HS03	39,0	-41,0	28,0	-30,0

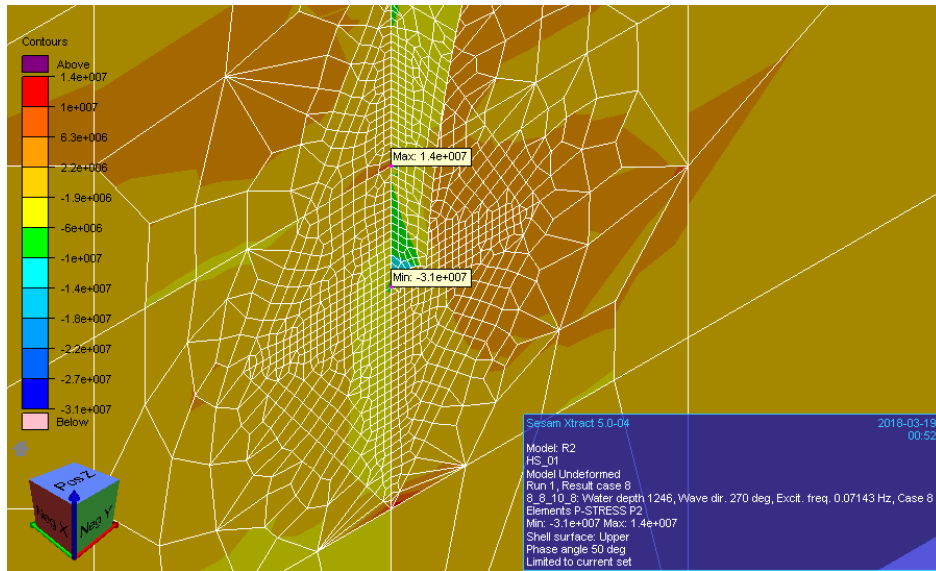
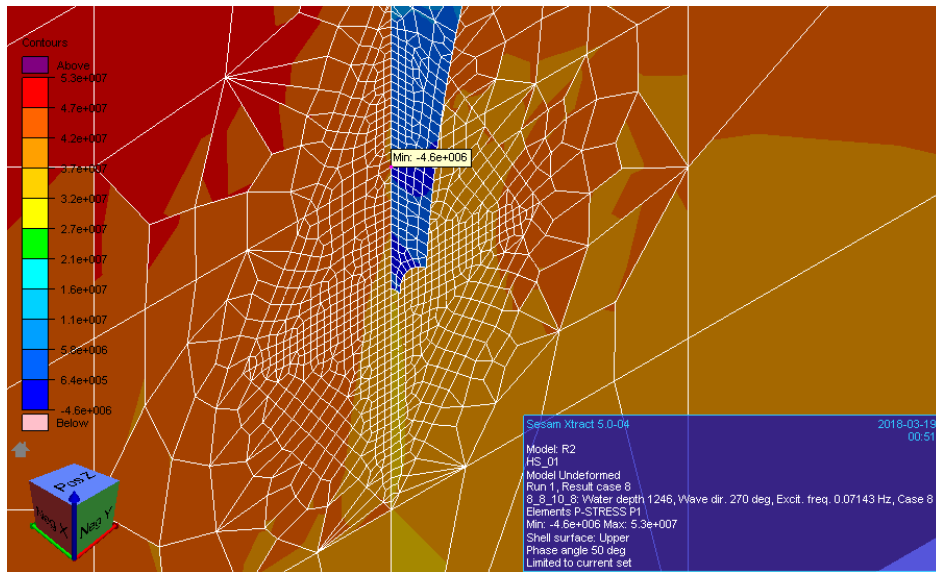


Figura 4.38 – Hot spot 1 – tensões principais σ_1 , σ_2 (face superior)

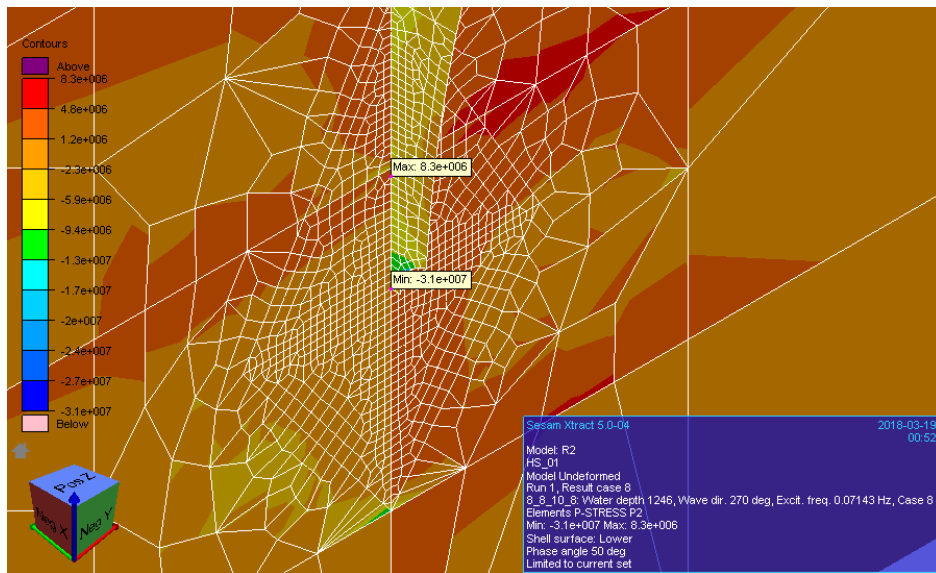
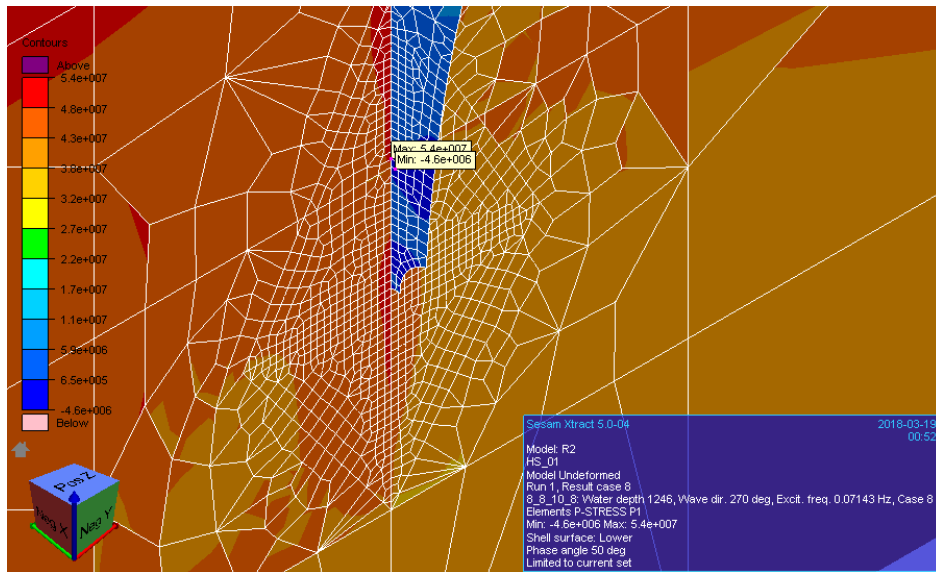


Figura 4.39 – Hot spot 1 - tensões principais σ_1 , σ_2 (face inferior)

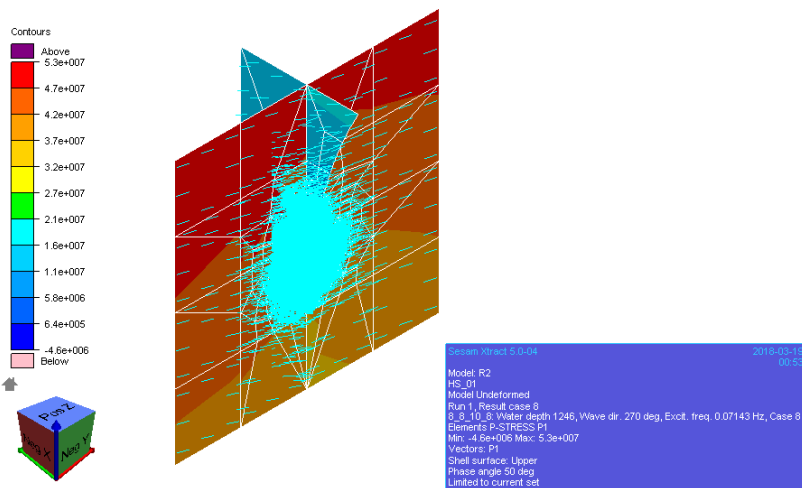


Figura 4.40 – Hot spot 1 – direção principal 1

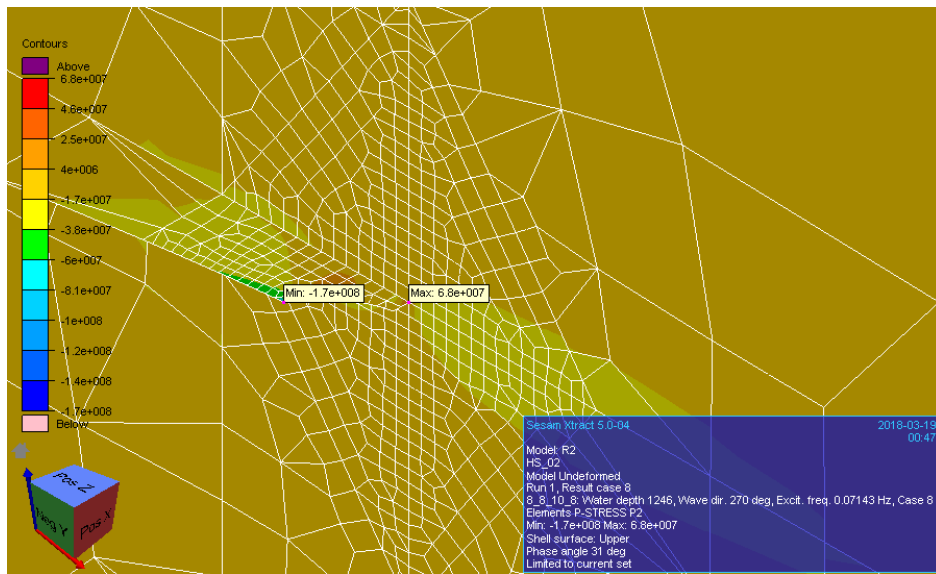
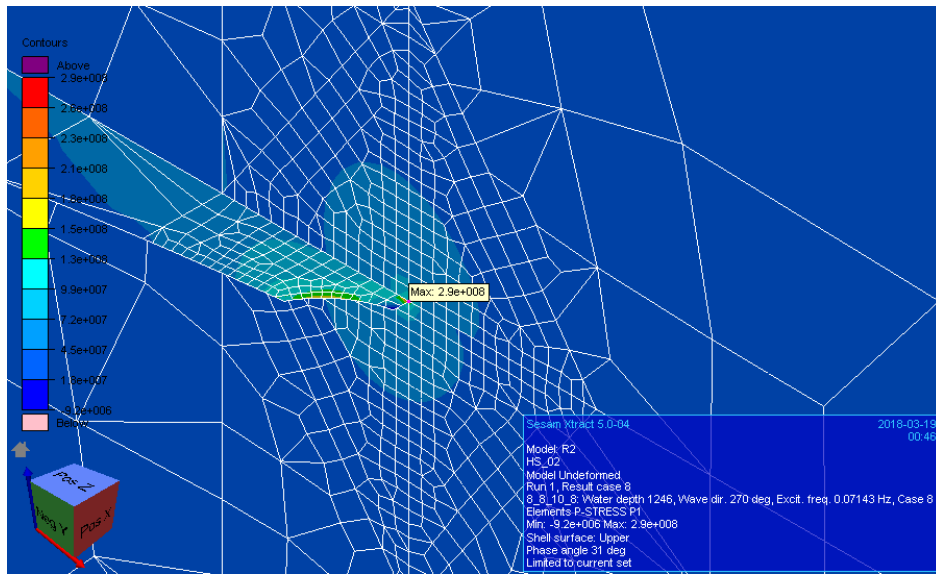


Figura 4.41 – Hot spot 2 - tensões principais σ_1 , σ_2 (face superior)

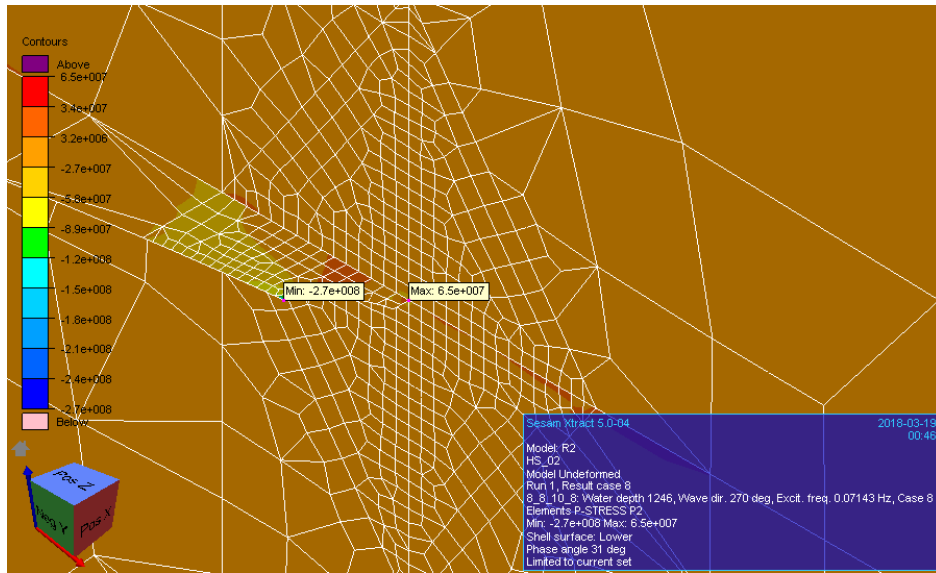
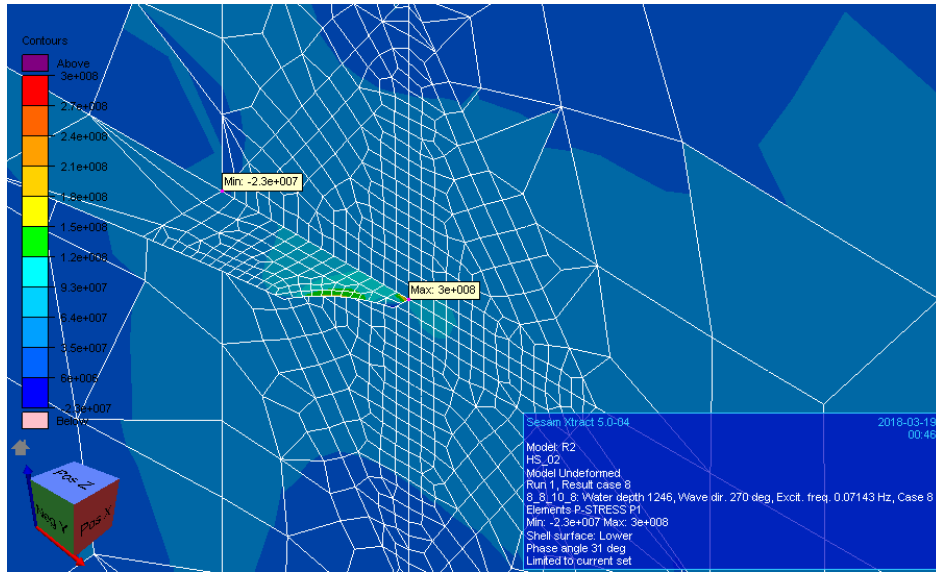


Figura 4.42 – Hot spot 2 - tensões principais σ_1 , σ_2 (face inferior)

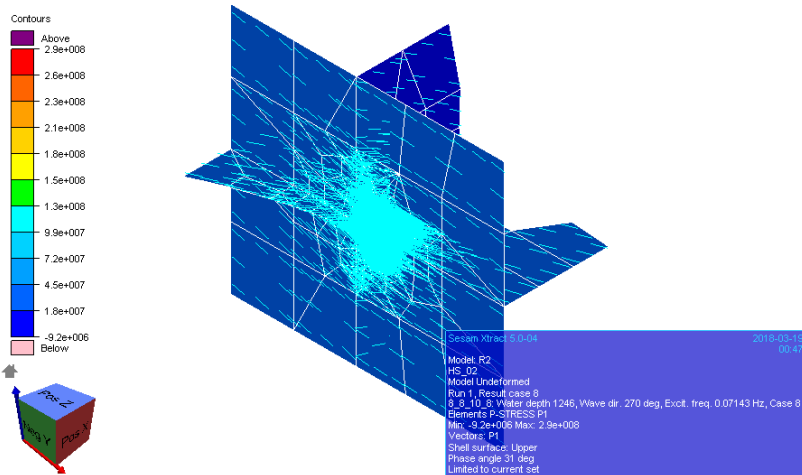


Figura 4.43 – Hot spot 2 - direção principal 1

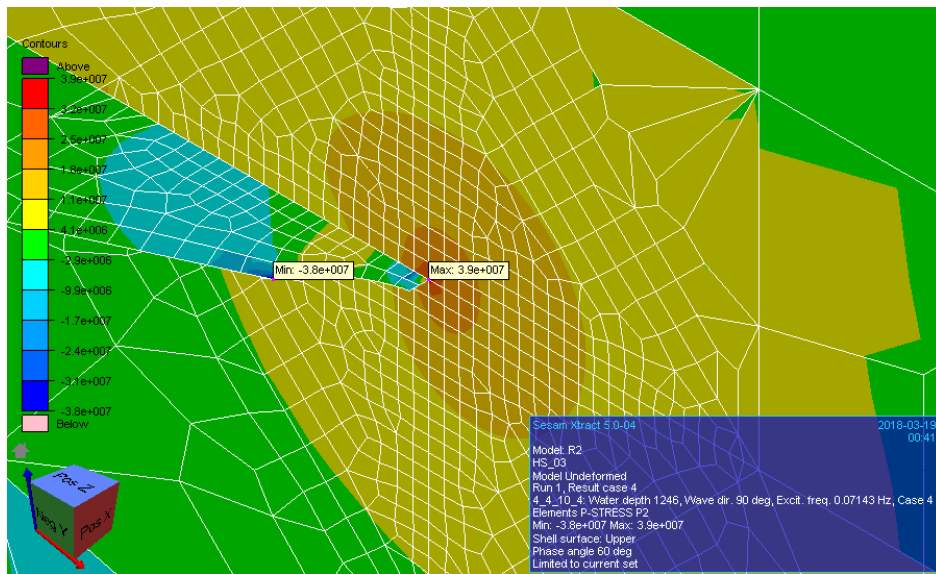
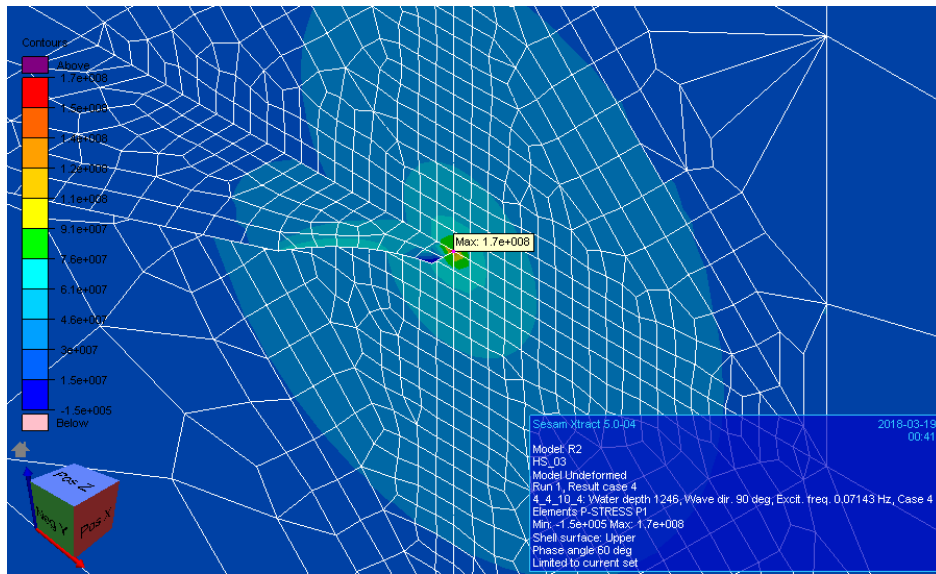


Figura 4.44 – Hot spot 3 - tensões principais σ_1 , σ_2 (face superior)

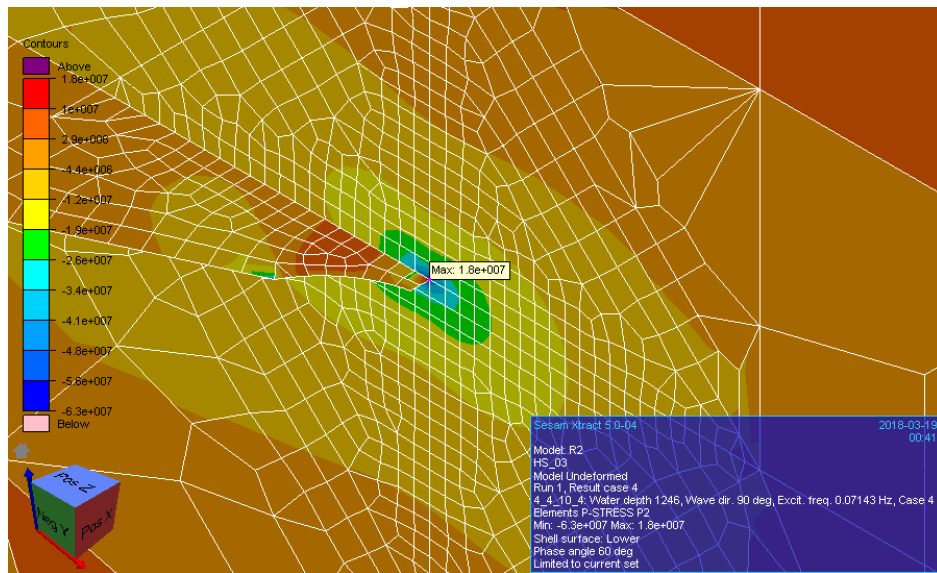
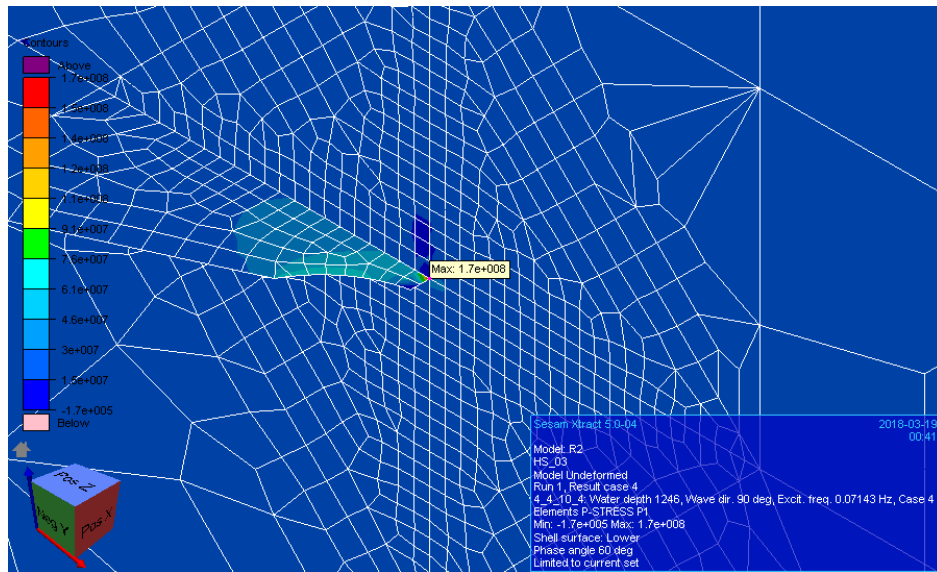


Figura 4.45 – Hot spot 3 - tensões principais σ_1 , σ_2 (face inferior)

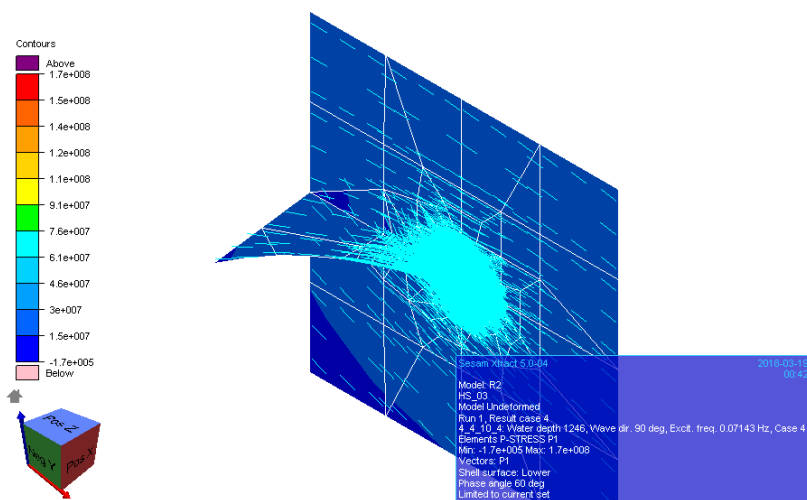


Figura 4.46 – Hot spot 3 – direção principal 1

4.4.4 Danos para a Bacia de Campos

A seguir são apresentados os danos à fadiga calculados para cada um dos pontos de medições dos hot spots analisados, sob as condições ambientais da bacia de Campos. Os resultados na Tabela 4.8 são apresentados separadamente para cada condição de carregamento analisada (carga completa, meia carga e lastro), sem levar em conta as frações de tempo para cada condição. Os fatores relativos à fração de tempo em que a condição é esperada (10% com carga completa, 60% com meia carga e 30% em lastro) somente estão levados em conta nos resultados apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.8 Bacia de Campos - Danos nos *hot spots* calculados individualmente para cada condição de carga

Hot Spot	Danos parciais Bacia de Campos		
	Condição de Carga		
	Completa	Meia	Lastro
HS01	0,003	0,003	0,013
HS02	0,258	0,136	0,489
HS03	0,297	0,164	0,554

Tabela 4.9 Bacia de Campos - Danos combinados e vida à fadiga por *hot spot*

Hot Spot	Bacia de Campos	
	Dano Combinado	Vida [anos]
HS01	0,003	7872
HS02	0,156	160
HS03	0,184	136

4.4.5 Danos para a Bacia de Santos

A seguir são apresentados os danos à fadiga calculados para cada um dos pontos de medições dos hot spots analisados, sob as condições ambientais da bacia de Campos. Os resultados na Tabela 4.10 são apresentados separadamente para cada condição de carregamento analisada (carga completa, meia carga e lastro), sem levar em conta as frações de tempo para cada condição. Os fatores relativos à fração de tempo em que a condição é esperada (10% com carga completa, 60% com meia carga e 30% em lastro) somente estão levados em conta nos resultados apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.10 Bacia de Santos - Danos nos *hot spots* calculados individualmente para cada condição de carga

Hot Spot	Danos parciais Bacia de Santos		
	Condição de Carga		
	Completa	Meia	Lastro
HS01	0,006	0,005	0,024
HS02	0,399	0,230	0,763
HS03	0,434	0,273	0,895

Tabela 4.11 Bacia de Santos - Danos combinados e vida à fadiga por *hot spot*

Hot Spot	Bacia de Santos	
	Dano Combinado	Vida [anos]
HS01	0,006	4141
HS02	0,254	98
HS03	0,297	84

4.5 Conclusões do capítulo

Neste capítulo foram apresentados exemplos de aplicação da teoria apresentada anteriormente a projetos de verificação de fadiga estrutural. Além das premissas de projeto, foram apresentadas e discutidas as funcionalidades e especificidades de cada um dos *softwares* do pacote Sesam da DNV GL, escolhido para executar as análises aqui apresentadas.

Podemos observar na tabela a seguir que os valores de vida útil para as condições da Bacia de Santos foram até 47% inferiores aos obtidos para a Bacia de Campos. Apesar de o detalhe do *hot spot* 1 ter tido vida calculada consistentemente muito superior aos demais, a diferença percentual (calculada tomando o valor da vida à fadiga para a Bacia de Campos como referência) teve valores bem próximos dos demais detalhes. Podemos observar em destaque na tabela que todos os *hot spots* atendem aos critérios de projeto, já que é requerida vida útil de 25 anos com DFF=2. Ou seja: seria necessário valor de vida calculada de, no mínimo, 50 anos.

Tabela 4.12 Danos para a Bacia de Campos x Bacia de Santos

Hot Spot	Bacia de Campos		Bacia de Santos		Diferença
	Dano	Vida [anos]	Dano	Vida [anos]	
HS01	0,00318	7872	0,00604	4141	-47%
HS02	0,15630	160	0,25420	98	-39%
HS03	0,18350	136	0,29670	84	-38%

5 CONCLUSÃO

A seguir, são apresentados as considerações e comentários finais desta dissertação e sugestões para pesquisa e trabalhos futuros.

5.1 Comentários finais

Conforme pudemos observar durante o desenvolvimento desta dissertação, o estudo de fadiga demanda algum aprofundamento teórico em temas relacionados a diversas disciplinas da engenharia. Temas como oceanografia, análise estatística, mecânica dos materiais e dos fluidos e processos de soldagem, dentre outros foram abordados. Além de ser um assunto abrangente, observamos que os resultados de vida à fadiga são bastante sensíveis às modificações nos parâmetros das análises. Desta forma, antes de qualquer coisa, é preciso entender o fenômeno para isolar corretamente os pontos de sensibilidade e tratá-los cuidadosamente ao realizar as avaliações de projeto. Estes cuidados levam ao aumento da segurança, reduzindo os riscos e minimização de conservadorismos excessivos, gerando economia.

A metodologia proposta pela DNV GL para o cálculo de fadiga é amplamente difundida na indústria de petróleo e gás. O método espectral *full stochastic* aqui desenvolvido mostrou-se bem referenciado. As normas, práticas recomendadas e notas de classificação se complementam, facilitando o entendimento dos critérios e premissas. A aplicação da metodologia utilizando o *software* da própria DNV GL torna-se bastante simplificada já que diversos pontos abordados nas regras estão ali implementados.

Os resultados dos estudos aqui mostrados constatarem um fato já conhecido: além do desafio da exploração de petróleo em águas e camadas do subsolo cada vez mais profundas, a indústria terá de lidar com condições ambientais jamais enfrentadas no território brasileiro para prosseguir o desenvolvimento de campos petrolíferos na bacia sedimentar de Santos. Observado isto, fica mais uma vez comprovada a necessidade de aprofundar e avançar os estudos tanto na área acadêmica quanto na indústria, em cooperação para que tenhamos práticas cada vez mais seguras, ambientalmente mais responsáveis e economicamente mais eficientes no futuro.

5.2 Sugestões para pesquisa futura

Durante o desenvolvimento das análises aqui descritas, foram encontrados alguns gargalos que, embora tenham sido contornados, merecem alguma atenção e desenvolvimento no futuro. A seguir são listadas algumas sugestões para pesquisa e trabalhos, baseadas nesta experiência e nos problemas enfrentados pela indústria como um todo:

- Estudar e desenvolver técnicas de modelagem e pós-processamento de resultados que reduzam a sensibilidade dos danos à fadiga ao grau de refinamento das malhas de elementos finitos;
- Desenvolver um método prático para obter resultados de fadiga considerando diagramas de dispersão de ondas bimodais (*sea* e *swell*) e bidirecionais, aplicando diferentes técnicas para combinar os danos em diferentes faixas de frequências;
- Desenvolver dentro da universidade um programa de código aberto para pós-processamento de resultados de fadiga, em especial os provenientes de metodologia espectral, já que o StoFat ainda não dispõe de uma ferramenta gráfica de fácil utilização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABS. **“Guide for fatigue assessment of offshore structures”**. mar 2018. ed. Houston, EUA: American Bureau of Shipping, 2003. Disponível em: <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/offshore/115_fatigueassessmentoffshorestructures/Fatigue_Guide_e-Mar18.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2018.

ABS. **“Guide for spectral-based fatigue analysis for floating production, storage and offloading (FPSO) installations”**. janeiro 2018. ed. Houston, EUA: American Bureau of Shipping, 2010. Disponível em: <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/design_and_analysis/104_sfaforfloatingoffshorestructures/SFA-FPSO_Guide_e-Jan18.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2018.

ASTM. **ASTM-E1823 “Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing”**. West Conshohocken, EUA: ASTM International, 2011.

AWS. **AWS-D1.1 “Structural Welding Code – Steel”**. 20^a. ed. Miami, EUA: American Welding Society, 2006.

BARLTROP, N. **“Floating Structures: a guide for design and analysis”**. Herefordshire, Reino Unido: OPL, v. 2, 1998.

BARLTROP, N.; ADAMS, A. **“Dynamics of fixed marine structures”**. Butterworth-Heinemann, Reino Unido: Marine Technology Directorate Limited, v. 2, 1991.

BARROS, M. R. C. **“Análise de fadiga em estruturas offshore tipo unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência (FPSO)”**: Dissertação de M Sc. Rio de Janeiro, Brasil: COPPE/UFRJ, 2015.

BATALHA, A. F. **“Análise de fadiga de estruturas offshore tipo topside”**: Dissertação de M Sc. Rio de Janeiro, Brasil: COPPE/UFRJ, 2009.

BOMOS. **“Brazil Offshore Metocean Storm Joint Industry Project”**. Brasil: Oceanweather Inc., 1999.

BRANCO, C.; FERNANDES, A.; CASTRO, P. **“Fadiga de Estruturas Soldadas”**. 3^a. ed. Lisboa, Portugal: Gulbenkian, 2002.

BS. BS-7608 “Code of practice for fatigue design and assessment of steel structures”.

Londres, Reino Unido: British Standard Institution, 1993.

CHAKRABARTI, S. “Hydrodynamics of Offshore Structures”. Southampton, Reino

Unido: Computational Mechanics Publications, 1987.

CLOUGH, R.; PENZIEN, J. “Dynamics of structures”. Nova Iorque, EUA,: McGraw-

Hill, 1975.

DNV GL. DNVGL-CN-31.3 “Strength analysis of hull structures in tankers”:

Classification notes. Noruega: DNV AS, 1999. Disponível em:

<<http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNV/cn/1999-01/CN31-3.pdf>>. Acesso em: 07 mar.

2018.

DNV GL. DNVGL-CN-30.7 “Fatigue assessment of ship structures”: Classification

notes. Noruega: DNV AS, 2014. Disponível em:

<<http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNV/cn/2014-04/CN30-7.pdf>>. Acesso em: 07 mar.

2018.

DNV GL. DNV GL-OS-C102 “Structural design of offshore ships”: Offshore

standard. Noruega: DNV GL AS, 2015a. Disponível em:

<<https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/dnvgl/os/2015-07/DNVGL-OS-C102.pdf>>. Acesso

em: 03 jul. 2018.

DNV GL. DNVGL-RP-C206 “Fatigue methodology of offshore ships”:

Recommended practice. Noruega: DNV GL AS, 2015b. Disponível em:

<<https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RP/2015-07/DNVGL-RP-C206.pdf>>.

Acesso em: 07 mar. 2018.

DNV GL. “Sesam user manual - GENIE v7.3”. Noruega: DNV GL Software, v. 1 to 5,

2016a.

DNV GL. DNVGL-RP-C203 “Fatigue design of offshore steel structures”:

Recommended practice. Noruega: DNV GL AS, 2016b. Disponível em:

<<http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/dnvgl/RP/2016-04/DNVGL-RP-C203.pdf>>. Acesso

em: 07 mar. 2018.

DNV GL. “Sesam user manual - HYDROD v4.10”: Wave load & stability analysis of

fixed and floating structures. 1ª. ed. Noruega: DNV GL Software, 2017a.

DNV GL. “**Sesam user manual - POSTRESP v6.6**”: Postprocessor for statistical response calculations. 12^a. ed. Noruega: DNV GL Software, 2017b.

DNV GL. “**Sesam user manual - SESAM MANAGER v6.5**”: Managing sesam workflow. 6^a. ed. Noruega: DNV GL - Software, 2017c.

DNV GL. “**Sesam user manual - STOFAT v3.5-08**”: Fatigue damage calculation of welded plates and shells. Noruega: DNV GL Software, 2017d.

DNV GL. “**Sesam user manual - WADAM v9.4**”: Wave analysis by diffraction and Morison theory. Noruega: DNV GL Software, 2017e.

DNV GL. “**Sesam user manual - XTRACT v5.1**”: Postprocessor for presentation, animation and reporting of results. 18^a. ed. Noruega: DNV GL Software, 2017f.

DNV GL. **DNVGL-OS-C101 “Design of offshore steel structures, general (LRFD method)”**: Offshore standard. Noruega: DNV GL AS, 2017g. Disponível em: <<https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/OS/2017-07/DNVGL-OS-C101.pdf>>. Acesso em: 07 mar. 2018.

DNV GL. **DNVGL-OS-C201 “Structural design of offshore units - WSD method”**: Offshore standard. Noruega: DNV GL AS, 2017h. Disponível em: <<https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/OS/2017-07/DNVGL-OS-C201.pdf>>. Acesso em: 07 mar. 2018.

DNV GL. **DNVGL-RP-C205 “Environmental conditions and environmental loads”**: Recommended practice. Noruega: DNV GL AS, 2017i. Disponível em: <<https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RP/2017-08/DNVGL-RP-C205.pdf>>. Acesso em: 07 mar. 2018.

DNV GL. “**Sesam user manual - SESTR v10.3**”: Finite element analysis solver. Noruega: DNV GL Software, 2018a.

DNV GL. **DNVGL-RU-SHIP-Pt3-Ch9 “Ships - Part 3 Hull / Chapter 9 Fatigue”**: Rules for classification. Noruega: DNV GL AS, 2018b. Disponível em: <<https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RU-SHIP/2018-01/DNVGL-RU-SHIP-Pt3Ch9.pdf>>. Acesso em: 07 mar. 2018.

ELLWANGER, G. B. **“Tecnologias de Exploração de Petróleo, Apostila”**. Rio de Janeiro, Brasil: MBP/COPPE/UFRJ, 2006.

ELLWANGER, G. B.; LIMA, A. **“Tópicos Básicos de Hidrodinâmica Aplicados a Estruturas Offshore”**. Rio de Janeiro, Brasil: COPPE/UFRJ, 2007.

FERREIRA, C. C. **“Inspeção de Equipamentos: Estudo de Casos”**. **inspecaoequipto.blogspot**, 2013. Disponível em: <<http://inspecaoequipto.blogspot.com.br/2013/09/caso-035-e-plataforma-virou-mar-do.html>>. Acesso em: 08 mar. 2018.

GOMO Maquetes. **Gomo Maquetes web site**, 2009. Disponível em: <http://gomomaquetes.com.br/Maquetes_Engenharia/Maquete-Plataforma-Petrobras-P57.htm>. Acesso em: 7 Março 2018.

GURNEY, T. **“Fatigue of Welded Structures”**. 2. ed. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 1979.

HAIBACH, E. **The allowable stresses under variable amplitude loading of welded joints**. Brighton, United Kingdom: Welded structures conference on fatigue of welded structures, 1970.

HASSELMANN, K. et al. **“Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)”**. A8. ed. Hamburgo, Alemanha: Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe, v. Nr. 12, 1973.

ISO 19902. **“Petroleum and natural gas industries - Fixed steel offshore structures”**. Genebra, Suíça: International Organization for Standardization, 2007.

LIN, Y. **“Probabilistic theory of structural dynamics”**. New York, EUA: McGraw-Hill, 1967.

LOTSBERG, I. **“Fatigue design of marine structures”**. Nova Iorque, EUA: Cambridge University Press, 2016.

MADDOX, S. **“Fatigue Strength of Welded Structures”**. 2ª. ed. Cambridge, Reino Unido: Abington Publishing, 1991.

MARSHALL, P. **“Design of welded tubular connections: basis and use of AWS code provisions”**. Amsterdam, Países Baixos: Elsevier Science Publishers, 1992.

MIGUEL, L. F. F. et al. **“Assesment of code recommendation through simulation of EPS wind loads along a segmento of a transmission line”**. [S.l.]: Engineering Structures, 2012.

N-004, N. **“Design of steel structures”**. Lysaker, Noruega: Standards Norway, 2004.

NAESS, A. **“Fatigue Handbook”**. 3ª. ed. Toronto, Canadá: Tapir publishers, 1985.

OCHI, M. K.; HUBBLE, E. N. **“Six-parameter wave spectra”**. Honolulu, EUA: Proc 15th Coastal Engineering Conference, 1976.

PAPALEO, A. **“Metodologia para definição de casos de carregamentos ambientais equivalentes para o projeto de risers em catenária”**: Tese de D Sc. Rio de Janeiro, Brasil: COPPE/UFRJ, 2009.

PIERSON, W.; MOSKOWITZ, L. **“A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii”**. [S.l.]: Journal of Geophysical Research, v. 69, 1964. 5181-5203 p. ISBN 24.

PILKEY, W.; PILKEY, D. **“Pettersen’s stress concentration factors”**. 3ª. ed. Hoboken, EUA: John Wiley & Sons, 2008.

PRICE, W.; BISHOP, R. **“Probabilistic theory of ship dynamics”**. Londres, Reino Unido: Chapman and Hall, 1974.

PRIMOZ, M. **“ESDEP Course”**. University of Ljubljana - Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Liubliana, Eslováquia, 1993. Disponível em: <<http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~pmpoze/ESDEP/master/toc.htm>>. Acesso em: 07 mar. 2018.

SAGRILO, L. V. S. **“Notas de aula de estruturas offshore I do programa de engenharia civil – área de estruturas”**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2013a.

SAGRILO, L. V. S. **“Notas de aula de métodos probabilísticos aplicados a estruturas offshore do programa de engenharia civil – área de estruturas”**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2013b.

SOUZA, G. L. **“Metodologia para estimativa da vida à fadiga da estrutura de interface do casco de um FPSO com módulos da planta com suportaço tipo multicoluna sob esforços de viga-navio”**: Dissertação de M Sc. Rio de Janeiro, Brasil: PPE/UFRJ, 2014.

SSC. “Fatigue Resistant Detail Design Guide For Ship Structures” (SSC-405). **Ship Structure Comitee**, Washington, USA., 1999.

VASCONCELOS NETO, A. G. D. “**Análise de incertezas no cálculo do dano de estruturas marítimas pela técnica Bootstrap**”: Dissertação de M Sc. Rio de Janeiro, Brasil: COPPE/UFRJ, 2009.

VIDEIRO, P. M. “**Reliability based design of marine structures**“. Thronnheim, Noruega: FMT/NTNU, 1998.

WIRSCHING, P.; LIGHT, M. “Fatigue under wide band random process”. **Journal of the Structural Division**, v. 106, p. 1593–1607, Julho 1980. ISSN ST7.

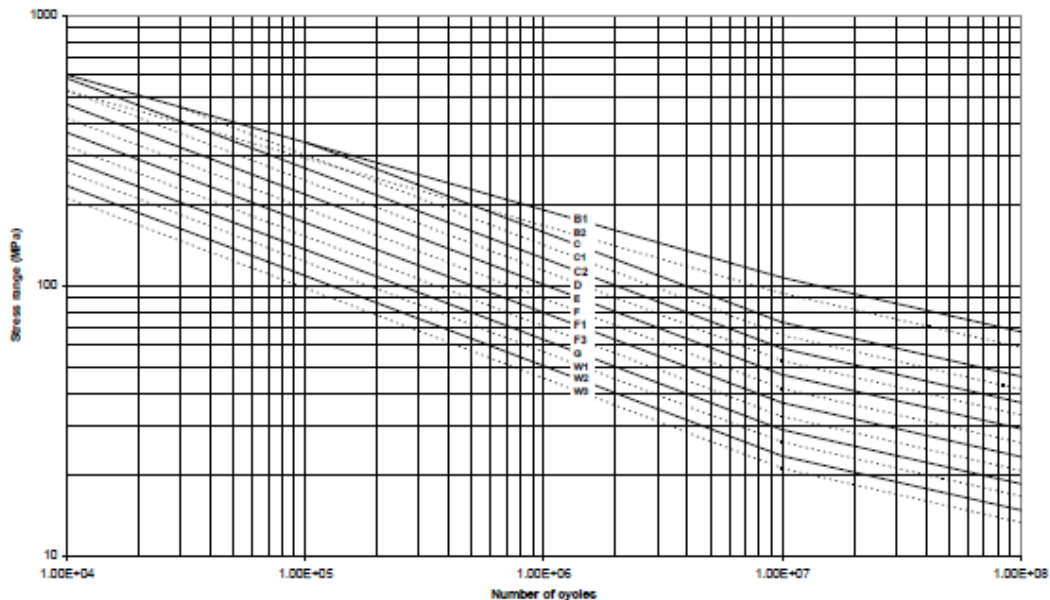
ANEXO A – CURVAS S-N DNV GL

As curvas S-N aqui apresentadas foram retiradas das práticas recomendadas DNV GL (DNV GL, 2016b). Como citado anteriormente, no caso de avaliações a partir de modelos de elementos finitos criados com base nas notas de classificação da DNV GL (DNV GL, 2014), deve ser utilizada a curva D. No anexo A da referida norma, são apresentados os critérios para classificação das juntas soldadas e escolha das curvas S-N.

A seguir, são apresentadas as curvas para detalhes expostos ao ar:

S-N curve	$N \leq 10^7$ cycles		$N > 10^7$ cycles $\log \bar{a}_2$ $m_2 = 5.0$	Fatigue limit at 10^7 cycles (MPa) *)	Thickness exponent k	Structural stress concentration embedded in the detail (S-N class), see also equation (2.3.2)
	m_1	$\log \bar{a}_1$				
B1	4.0	15.117	17.146	106.97	0	
B2	4.0	14.885	16.856	93.59	0	
C	3.0	12.592	16.320	73.10	0.05	
C1	3.0	12.449	16.081	65.50	0.10	
C2	3.0	12.301	15.835	58.48	0.15	
D	3.0	12.164	15.606	52.63	0.20	1.00
E	3.0	12.010	15.350	46.78	0.20	1.13
F	3.0	11.855	15.091	41.52	0.25	1.27
F1	3.0	11.699	14.832	36.84	0.25	1.43
F3	3.0	11.546	14.576	32.75	0.25	1.61
G	3.0	11.398	14.330	29.24	0.25	1.80
W1	3.0	11.261	14.101	26.32	0.25	2.00
W2	3.0	11.107	13.845	23.39	0.25	2.25
W3	3.0	10.970	13.617	21.05	0.25	2.50

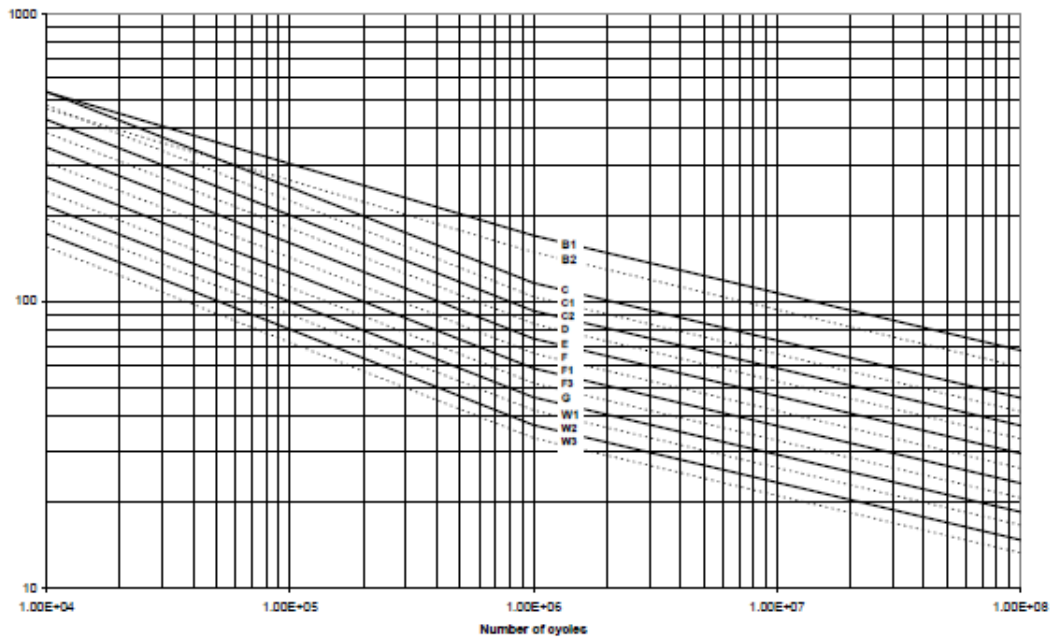
*) see also [2.11]



A seguir, são apresentadas as curvas para detalhes expostos à água do mar, em estruturas com proteção catódica:

S-N curve	$N \leq 10^6$ cycles		$N > 10^6$ cycles $\log \bar{a}_2$ $m_2 = 5.0$	Fatigue limit at 10^7 cycles (MPa) *)	Thickness exponent k	Structural stress concentration embedded in the detail (S-N class), see also equation (2.3.2)
	m_1	$\log \bar{a}_1$				
B1	4.0	14.917	17.146	106.97	0	
B2	4.0	14.685	16.856	93.59	0	
C	3.0	12.192	16.320	73.10	0.05	
C1	3.0	12.049	16.081	65.50	0.10	
C2	3.0	11.901	15.835	58.48	0.15	
D	3.0	11.764	15.606	52.63	0.20	1.00
E	3.0	11.610	15.350	46.78	0.20	1.13
F	3.0	11.455	15.091	41.52	0.25	1.27
F1	3.0	11.299	14.832	36.84	0.25	1.43
F3	3.0	11.146	14.576	32.75	0.25	1.61
G	3.0	10.998	14.330	29.24	0.25	1.80
W1	3.0	10.861	14.101	26.32	0.25	2.00
W2	3.0	10.707	13.845	23.39	0.25	2.25
W3	3.0	10.570	13.617	21.05	0.25	2.50

*) see also [2.11]



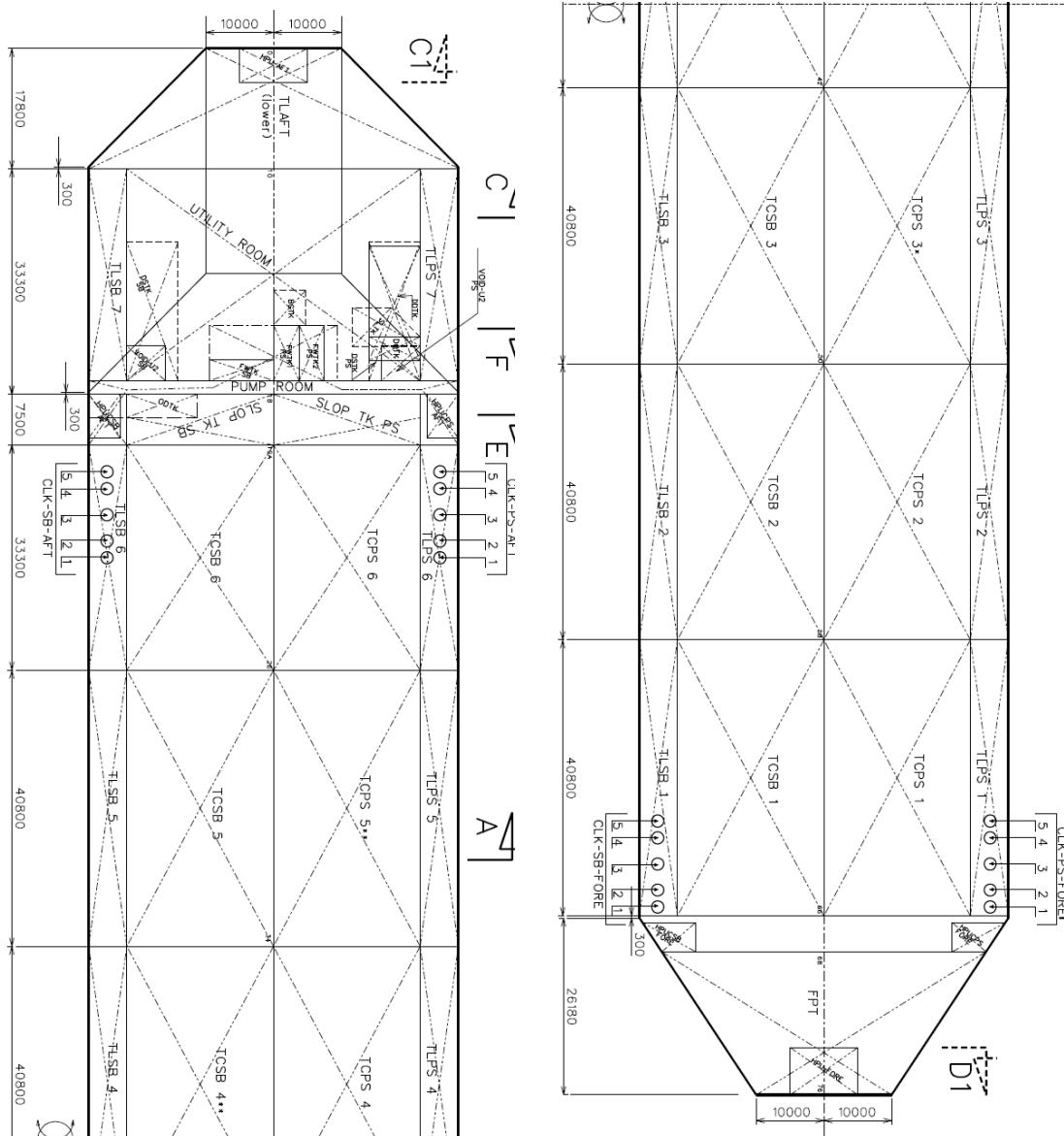
A norma apresenta ainda curvas e recomendações específicas para juntas tubulares, nós fundidos, nós forjados, juntas sem proteção contra corrosão, materiais de alta resistência, materiais inoxidáveis, umbilicais de pequeno diâmetro e estacas metálicas, além de definir as diretrizes para construção de novas curvas S-N baseadas em dados de testes de fadiga. Entretanto, aqui foram somente apresentadas as curvas pertinentes a este trabalho.

ANEXO B – ENCHIMENTO DOS TANQUES

A tabela a seguir mostra o enchimento dos tanques do FPSO para cada condição analisada.

Nome	Conteúdo	Densid. [kg/m ³]	Capac. [m ³]	CND 1: carga completa		CND 2: meia carga		CND 3: lastro	
				Fração [%]	Massa [ton]	Fração [%]	Massa [ton]	Fração [%]	Massa [ton]
TCSB1	Óleo	940	29506	40%	11185	48%	13174	0%	0
TCPS1	Óleo	940	29506	41%	11368	48%	13174	0%	0
TCSB2	Óleo	940	29506	95%	26349	48%	13174	0%	0
TCPS2	Óleo	940	29506	95%	26349	48%	13174	0%	0
TCSB3	Óleo	940	29506	95%	26349	48%	13174	0%	0
TCPS3	Óleo	940	29506	95%	26349	48%	13174	0%	0
TCSB4	Óleo	940	29506	95%	26349	48%	13174	0%	0
TCPS4	Óleo	940	29506	95%	26349	48%	13174	0%	0
TCSB5	Óleo	940	29506	95%	26349	48%	13174	0%	0
TCPS5	Óleo	940	29506	95%	26349	48%	13174	0%	0
TCSB6	Óleo	940	29506	95%	26349	75%	20784	0%	0
TCPS6	Óleo	940	29506	95%	26349	48%	13279	0%	0
TLSB1	Água	1025	7697	0%	0	4%	337	65%	5131
TLPS1	Água	1025	7697	0%	0	4%	337	63%	4944
TLSB2	Água	1025	7697	0%	0	4%	337	48%	3748
TLPS2	Água	1025	7697	0%	0	4%	337	48%	3748
TLSB3	Água	1025	7697	0%	0	4%	337	48%	3748
TLPS3	Água	1025	7697	0%	0	4%	337	48%	3748
TLSB4	Água	1025	7697	0%	0	4%	337	48%	3748
TLPS4	Água	1025	7697	0%	0	4%	337	48%	3748
TLSB5	Água	1025	7697	0%	0	4%	337	95%	7495
TLPS5	Água	1025	7697	0%	0	4%	337	48%	3748
TLSB6	Água	1025	7697	0%	0	4%	337	48%	3748
TLPS6	Água	1025	7697	0%	0	4%	337	55%	4363
TLSB7	Água	1025	4811	95%	4684	95%	4684	95%	4684
TLPS7	Água	1025	4811	26%	1285	95%	4684	95%	4684
TLAFT	Água	1025	9208	0%	0	22%	2073	0%	0
TLAFT	Água	1025	9208	0%	0	0%	0	0%	0
FPT	Água	1025	11235	0%	0	0%	0	0%	0
FPT	Água	1025	11235	0%	0	0%	0	0%	0
Massa carga [ton]				286043		165808		0	
Massa lastro[ton]				5969		15490		61284	
Massa total [ton]				292012		181297		61284	

A figura a seguir mostra um desenho esquemático dos tanques do FPSO.



Legenda da nomenclatura:

T = Tank / Tanque;

C = Cargo / Carga (óleo) - B = Ballast / Lastro (água);

P = Portside (bombordo) - S = Starboard (boreste)

ANEXO C – RESULTADOS COMPLETOS

C.1 Definição dos pontos de análise

A seguir, são apresentadas as numerações de elementos e nós utilizadas na definição dos pontos de leitura para cálculo das tensões nos hot spots. Estas informações serviram de base para criação dos arquivos de entrada do StoFat.

Há 3 parâmetros geométricos e/ou de leitura de resultados que definem cada *hot spots*. São eles:

- O caminho de falha (há necessariamente três caminhos partindo de cada *hot spot*);
- A superfície do elemento onde o *hot spot* está localizado (são verificadas uma ou duas superfícies externas por caminho de falha, dependendo do *hot spot*);
- O elemento de onde a tensão nodal é extraída (há duas possibilidades por caminho).

Assim, a nomenclatura adotada para os *hot spots* tem o seguinte formato: **HS0N_XYZ**. Onde:

N = 1 a 3 – indica o número do *hot spot*;

X = A – indica que o caminho de falha é paralelo à chapa soldada;

X = B ou C – indica que o caminho de falha é um dos perpendiculares à chapa soldada;

Y = T ou B – indica a superfície do elemento onde o *hot spot* está localizado, superior ou inferior, respectivamente;

Z = M – indica que as tensões nodais são extraídas do elemento posicionado mais próximo à proa, mais a boreste ou com menor elevação Z (menores coordenadas X, Y e Z, respectivamente);

Z = P – indica que as tensões nodais são extraídas do elemento posicionado mais próximo à popa, mais a bombordo ou com maior elevação Z (maiores coordenadas X, Y e Z, respectivamente).

C.1.1 Hot spot 1

- Interseção entre a viga gigante vertical do convés na caverna 44 e a antepara longitudinal lateral (bombordo);

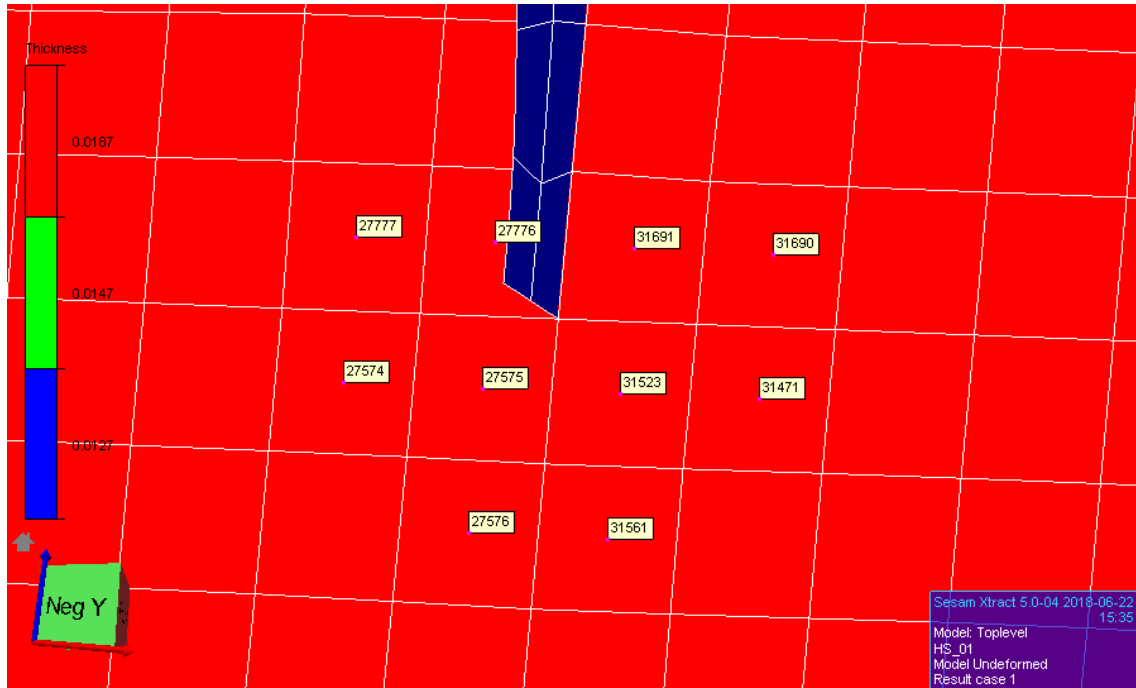


Figura C.1 – Hot spot 1 – numeração dos elementos

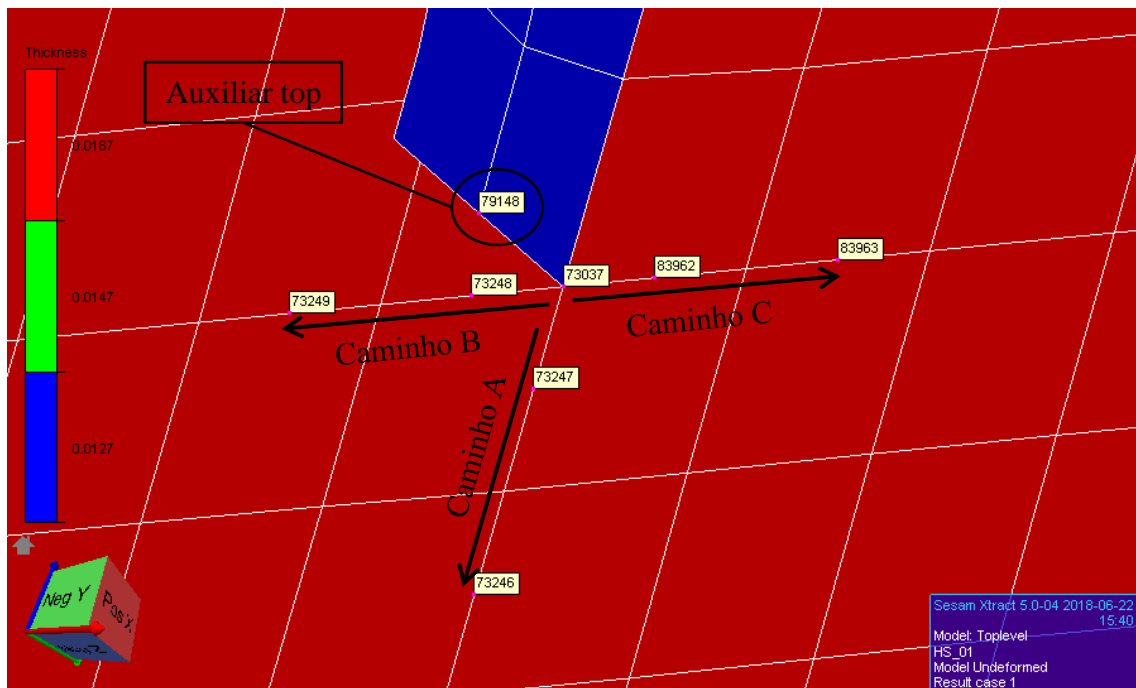


Figura C.2 – Hot spot 1 – numeração dos nós (superfície superior)

C.1.2 Hot spot 2

- Interseção entre a escoa (viga transversal horizontal no nível) 3 da antepara transversal 42 e a antepara longitudinal lateral (bombordo);

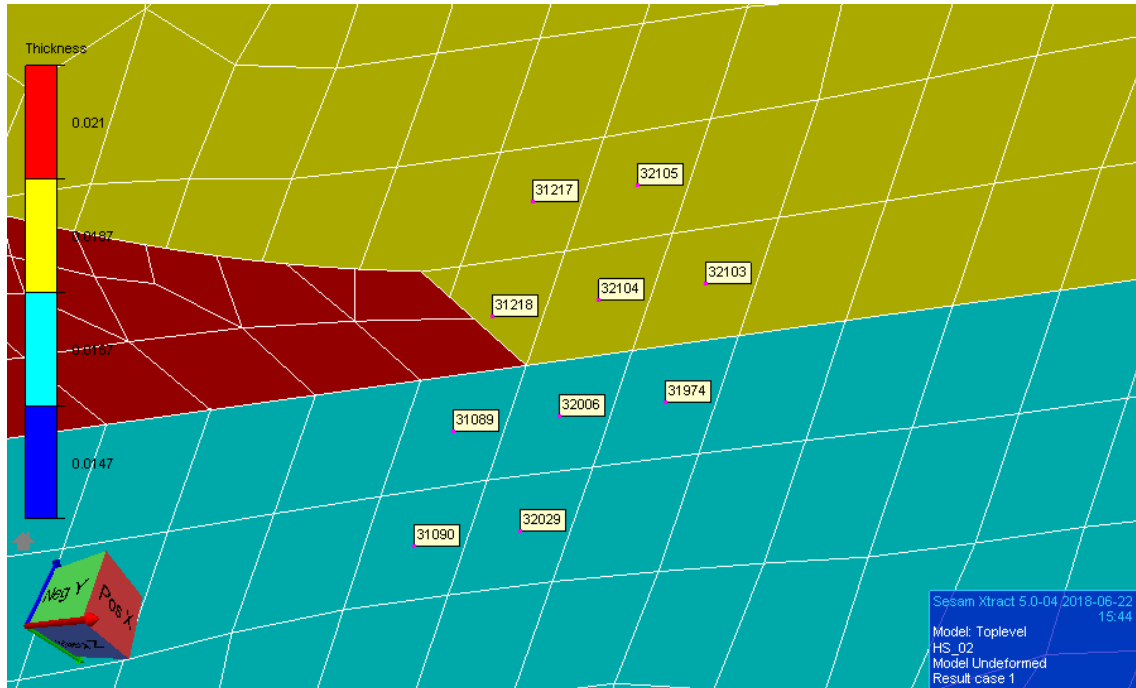


Figura C.3 – Hot spot 2 – numeração dos elementos

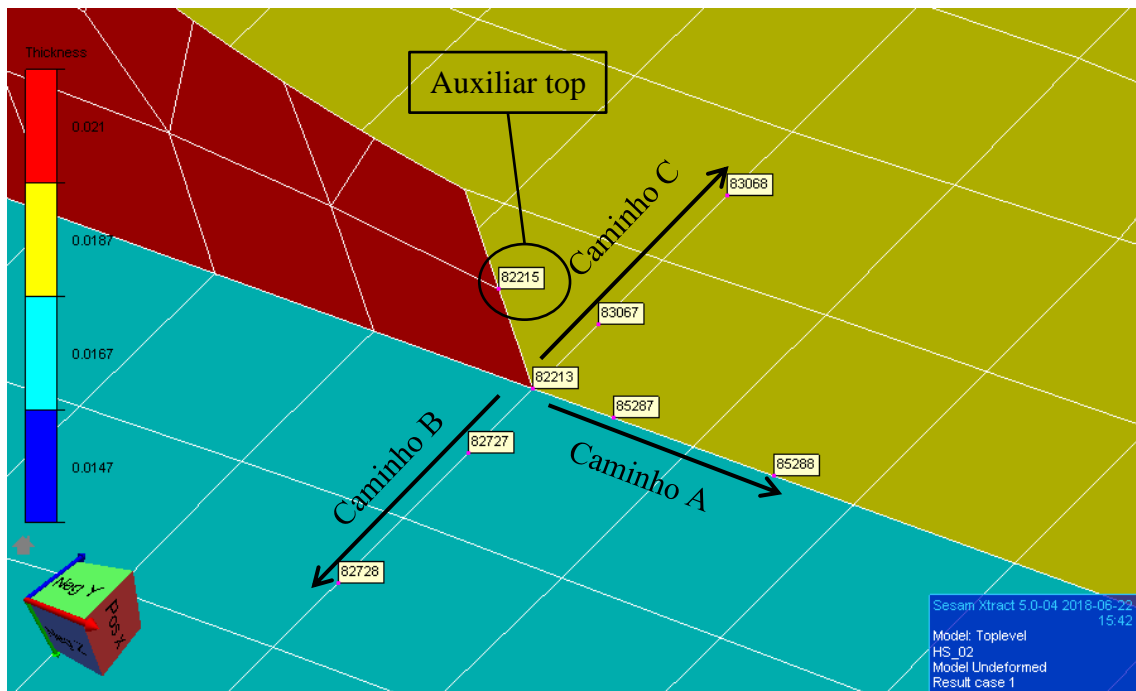


Figura C.4 – Hot spot 2 – numeração dos nós (superfície superior)

C.1.3 Hot spot 3

- Interseção entre a escoa (viga transversal horizontal no nível) 3 da antepara transversal 42 e a antepara longitudinal central (bombordo);

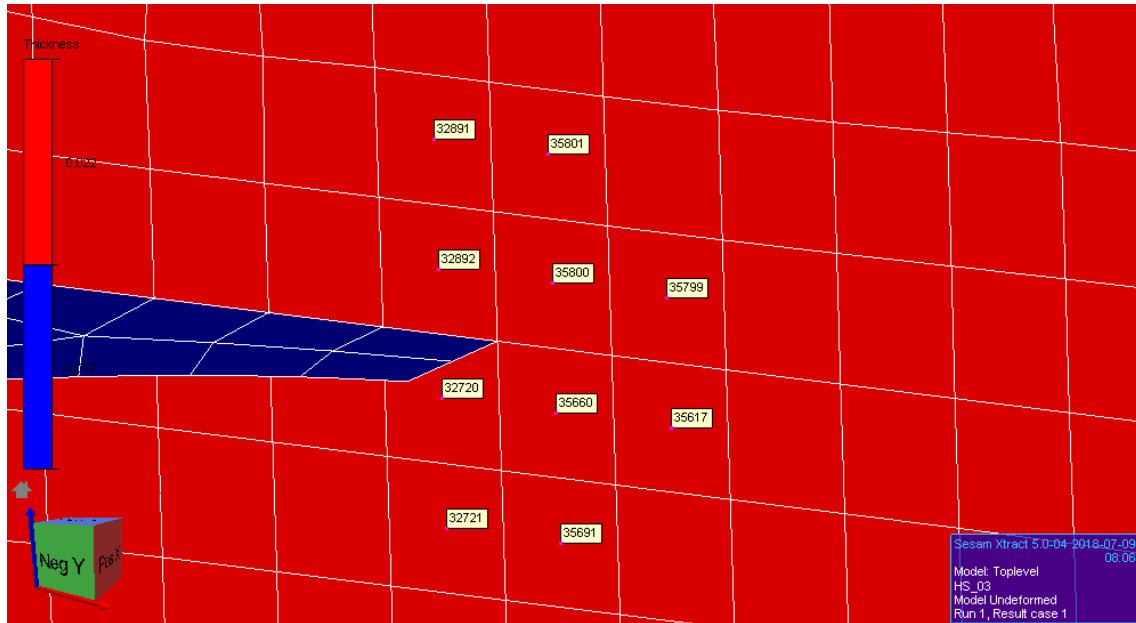


Figura C.5 – Hot spot 3 – numeração dos elementos

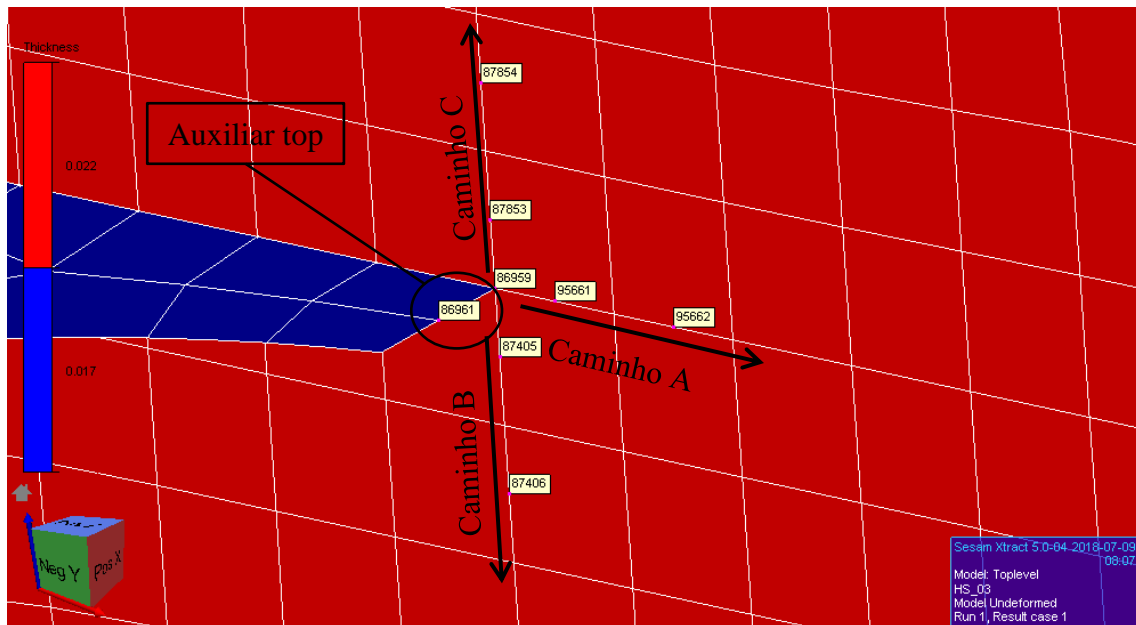


Figura C.6 – Hot spot 3 – numeração dos nós (superfície superior)

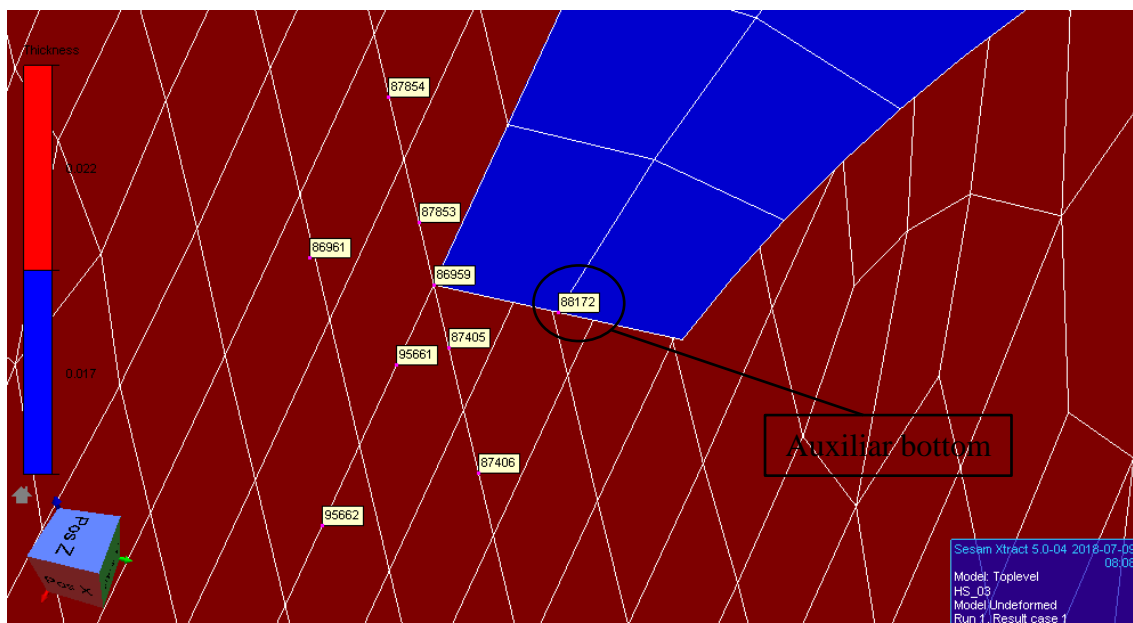


Figura C.7 – Hot spot 3 – numeração dos nós (superfície inferior)

C.2 Análise de fadiga espectral

A seguir são apresentados os resultados completos da análise de fadiga espectral pelo método estocástico completo da DNV GL, com modelo completo, segundo as premissas e características apresentados na seção 4.2 desta dissertação. Os fatores de utilização dos danos para cada condição individual têm como referência a vida útil da estrutura (25 anos), conforme indicado na seção 4.3.6. Desta forma, os resultados apresentados na seção foram multiplicados pelo fator que indica a parcela de tempo em que a estrutura estará submetida àquela condição, que pode ser obtido na seção 4.3.3.

A seguir são apresentadas as listagens do StoFat com as probabilidades de ocorrência de ondas direcionais consideradas para as Bacias de Campos e de Santos:

<pre> Overview of current selection of: - Wave direction data ----- SUB PAGE: 1 Current setting of wave direction data ***** Name Dir Angle Probability Statistics WaveSpread SeaStates Current 1 0.0 8.45E-02 WSCAMPOS COS2 1 - 230 2 45.0 .1523 WSCAMPOS COS2 1 - 230 3 90.0 .1202 WSCAMPOS COS2 1 - 230 4 135.0 .2351 WSCAMPOS COS2 1 - 230 5 180.0 .3617 WSCAMPOS COS2 1 - 230 6 225.0 4.17E-02 WSCAMPOS COS2 1 - 230 7 270.0 1.8E-03 WSCAMPOS COS2 1 - 230 8 315.0 2.6E-03 WSCAMPOS COS2 1 - 230 </pre>	<pre> Overview of current selection of: - Wave direction data ----- SUB PAGE: 1 Current setting of wave direction data ***** Name Dir Angle Probability Statistics WaveSpread SeaStates Current 1 0.0 .1255 WSSANTOS COS2 1 - 264 2 45.0 .1896 WSSANTOS COS2 1 - 264 3 90.0 .1208 WSSANTOS COS2 1 - 264 4 135.0 .2044 WSSANTOS COS2 1 - 264 5 180.0 .3281 WSSANTOS COS2 1 - 264 6 225.0 2.15E-02 WSSANTOS COS2 1 - 264 7 270.0 3.8E-03 WSSANTOS COS2 1 - 264 8 315.0 6.3E-03 WSSANTOS COS2 1 - 264 </pre>
---	--

A seguir, é apresentado o cabeçalho da listagem de resultados do StoFat para as análises de fadiga espectral, especificando os *hot spots*, válido para todos os resultados aqui apresentados:

```
STOCHASTIC      HOTSPOT fatigue check results
Run: FHC        Superelement MODEL
Priority.....: Selected Hotspots
Usage Factor : Above 0.00
Design Fatigue Life: 25.0 Years          SUB PAGE: 1
```

NOMENCLATURE:

```
HotName        Name of hotspot
FatPnt         Fatigue Point: Hotspot, interpolation points (HotS, t/2, 3t/2)
Stat           = PASS or FAIL: *FAIL = UsageFactor > 1.0
UsageFac       Accumulated damage (Usage factor)
Element        Name of element
AccFatLif      Design fatigue life/usage factor (year)
StrCycle       Total number of stress cycles
SNCurve        SN curve name.
atNode         Input node defining the point
EleType        Element type
X-coord.       X coordinate of fatigue check point
Y-coord.       Y coordinate of fatigue check point
Z-coordinate    Z coordinate of fatigue check point
atSide         Element side (see manual).
AxialScf       Resulting Axial stress K-factor (SCF factor)
BendScf        Resulting Bending stress K-factor (SCF factor)
ShearScf       Resulting Shear stress K-factor (SCF factor)
WnlAng         Sector Angle of Weld Normal Line. Sector Stress Method.
ELThick        Thickness of element
RefSyst        Coordinate reference system
DistanceToHot  Distance of interpolation point to hotspot.
WeiScale       Scale parameter of Weibull distribution
WeiShape       Shape parameter of Weibull distribution
StressRange    Maximum Stress Range of principal stress
```

```
Hotspot name      : HS01_ATM
Description of hotspot : FR44xIS
Coordinate reference system : Current superelement
Hotspot name      : HS01_ATP
Description of hotspot : FR44xIS
Coordinate reference system : Current superelement
Hotspot name      : HS01_BTM
Description of hotspot : FR44xIS
Coordinate reference system : Current superelement
Hotspot name      : HS01_BTP
Description of hotspot : FR44xIS
Coordinate reference system : Current superelement
Hotspot name      : HS01_CTM
Description of hotspot : FR44xIS
Coordinate reference system : Current superelement
Hotspot name      : HS01_CTP
Description of hotspot : FR44xIS
Coordinate reference system : Current superelement
Hotspot name      : HS02_ATM
Description of hotspot : ST42L3xIS
Coordinate reference system : Current superelement
Hotspot name      : HS02_ATP
Description of hotspot : ST42L3xIS
Coordinate reference system : Current superelement
Hotspot name      : HS02_BTM
Description of hotspot : ST42L3xIS
Coordinate reference system : Current superelement
Hotspot name      : HS02_BTP
Description of hotspot : ST42L3xIS
Coordinate reference system : Current superelement
Hotspot name      : HS02_CTM
Description of hotspot : ST42L3xIS
Coordinate reference system : Current superelement
Hotspot name      : HS02_CTP
Description of hotspot : ST42L3xIS
Coordinate reference system : Current superelement

Hotspot name      : HS03_ATM
Description of hotspot : ST42L3xCL
Coordinate reference system : Current superelement
Hotspot name      : HS03_ABM
Description of hotspot : ST42L3xCL
Coordinate reference system : Current superelement
Hotspot name      : HS03_ATP
Description of hotspot : ST42L3xCL
Coordinate reference system : Current superelement
Hotspot name      : HS03_ABP
Description of hotspot : ST42L3xCL
Coordinate reference system : Current superelement
Hotspot name      : HS03_BTM
Description of hotspot : ST42L3xCL
Coordinate reference system : Current superelement
Hotspot name      : HS03_BBM
Description of hotspot : ST42L3xCL
Coordinate reference system : Current superelement
Hotspot name      : HS03_BTP
Description of hotspot : ST42L3xCL
Coordinate reference system : Current superelement
Hotspot name      : HS03_CTM
Description of hotspot : ST42L3xCL
Coordinate reference system : Current superelement
Hotspot name      : HS03_CBM
Description of hotspot : ST42L3xCL
Coordinate reference system : Current superelement
Hotspot name      : HS03_CTP
Description of hotspot : ST42L3xCL
Coordinate reference system : Current superelement
Hotspot name      : HS03_CBP
Description of hotspot : ST42L3xCL
Coordinate reference system : Current superelement

Status on failure      : *FAIL* when UsageFactor > 1.0
Design fatigue life    : 25.0 years
Fatigue calculation based on : Spectraoaf maximum principal stresses
Wave spectrum          : Jonswap
```


	82213		SCQS28	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01		45.0	0.022	CurrSupE	9.6588E-03				
			+zSide	1.5	1.5	1.5					1.3680E+08				
			45.0	0.0187	CurrSupE	0.0000E+00					DNV2010_D-AIR				
				1.05E+06	7.41E-01	4.5859E+07	HS03_BTP	t3/2	PASS	2.66E-03	32721	9.41E+03	9.85E+07	2.1771E+01	
	HS02_CTP	t1/2	PASS	8.55E-05	31218	2.50E+04	1.03E+08	DNV2010_D-AIR				1.27E+01	1.10E-02	1.5	
	83067				SCQS28	1.05E+01	2.16E+01	2.1810E+01			45.0	0.022	CurrSupE	2.8976E-02	
					+zSide	1.5	1.5	1.5				2.74E+06	8.29E-01	8.1433E+07	
			45.0	0.0187	CurrSupE	9.6607E-03									
				1.04E+06	7.40E-01	4.5361E+07	HS03_BBP	HotS	PASS	4.11E-02	32720	6.08E+02	1.03E+08	DNV2010_D-AIR	
	HS02_CTP	t3/2	PASS	7.48E-05	32105	2.50E+04	1.03E+08	DNV2010_D-AIR				1.27E+01	-1.10E-02	1.5	
	83068				SCQS28	1.05E+01	2.16E+01	2.1829E+01			45.0	0.022	CurrSupE	1.5179E+08	
					+zSide	1.5	1.5	1.5						1.5	
			45.0	0.0187	CurrSupE	2.8978E-02								0.0000E+00	
				1.06E+06	7.54E-01	4.3108E+07	HS03_BBP	t1/2	PASS	1.75E-02	32720	1.43E+03	1.03E+08	DNV2010_D-AIR	
	HS03_ATM	HotS	PASS	1.39E-01	35660	1.80E+02	1.02E+08	DNV2010_D-AIR				1.27E+01	-1.10E-02	1.5	
	86959				SCQS28	1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01			45.0	0.022	CurrSupE	9.6588E-03	
					+zSide	1.5	1.5	1.5				4.66E+06	8.90E-01	1.0954E+08	
			45.0	0.022	CurrSupE	0.0000E+00								1.5	
				6.30E+06	8.09E-01	1.9155E+08	HS03_BBP	t3/2	PASS	1.82E-03	32721	1.37E+04	1.02E+08	DNV2010_D-AIR	
	HS03_ATM	t1/2	PASS	7.82E-02	35660	3.20E+02	1.02E+08	DNV2010_D-AIR				1.27E+01	-1.10E-02	1.5	
	95661				SCQS28	1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01			45.0	0.022	CurrSupE	2.8976E-02	
					+zSide	1.5	1.5	1.5				2.80E+06	8.69E-01	7.2376E+07	
			45.0	0.022	CurrSupE	9.6588E-03								1.5	
				5.46E+06	8.08E-01	1.6561E+08	HS03_CTM	HotS	PASS	7.39E-02	35800	3.38E+02	1.02E+08	DNV2010_D-AIR	
	HS03_ATM	t3/2	PASS	1.68E-02	35617	1.49E+03	1.02E+08	DNV2010_D-AIR				1.27E+01	1.10E-02	1.5	
	95662				SCQS28	1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01			45.0	0.022	CurrSupE	0.0000E+00	
					+zSide	1.5	1.5	1.5				6.33E+06	8.92E-01	1.5179E+08	
			45.0	0.022	CurrSupE	2.8977E-02								1.5	
				3.82E+06	8.08E-01	1.1508E+08	HS03_CTM	t1/2	PASS	3.52E-02	35800	7.11E+02	1.01E+08	DNV2010_D-AIR	
	HS03_ABM	HotS	PASS	2.97E-01	35660	8.43E+01	9.97E+07	DNV2010_D-AIR				1.27E+01	1.10E-02	1.5	
	86959				SCQS28	1.27E+01	-1.10E-02	2.1800E+01			45.0	0.022	CurrSupE	9.6607E-03	
					+zSide	1.5	1.5	1.5				5.39E+06	8.92E-01	1.2860E+08	
			45.0	0.022	CurrSupE	0.0000E+00								1.5	
				6.83E+06	7.62E-01	2.7667E+08	HS03_CTM	t3/2	PASS	2.34E-03	35801	1.07E+04	9.83E+07	DNV2010_D-AIR	
	HS03_ABM	t1/2	PASS	1.71E-01	35660	1.46E+02	9.97E+07	DNV2010_D-AIR				1.27E+01	1.10E-02	1.5	
	95661				SCQS28	1.27E+01	-1.10E-02	2.1800E+01			45.0	0.022	CurrSupE	2.8978E-02	
					+zSide	1.5	1.5	1.5				2.83E+06	8.53E-01	7.6115E+07	
			45.0	0.022	CurrSupE	9.6588E-03								1.5	
				5.91E+06	7.62E-01	2.3924E+08	HS03_CBM	HotS	PASS	5.18E-02	35800	4.83E+02	1.06E+08	DNV2010_D-AIR	
	HS03_ABM	t3/2	PASS	3.87E-02	35617	6.46E+02	9.97E+07	DNV2010_D-AIR				1.27E+01	-1.10E-02	1.5	
	95662				SCQS28	1.27E+01	-1.10E-02	2.1800E+01			45.0	0.022	CurrSupE	0.0000E+00	
					+zSide	1.5	1.5	1.5				6.08E+06	9.12E-01	1.3312E+08	
			45.0	0.022	CurrSupE	2.8977E-02								1.5	
				4.07E+06	7.61E-01	1.6538E+08	HS03_CBM	t1/2	PASS	2.24E-02	35800	1.11E+03	1.04E+08	DNV2010_D-AIR	
	HS03_ATP	HotS	PASS	1.40E-01	35800	1.79E+02	1.02E+08	DNV2010_D-AIR				1.27E+01	-1.10E-02	1.5	
	86959				SCQS28	1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01			45.0	0.022	CurrSupE	9.6607E-03	
					+zSide	1.5	1.5	1.5				5.00E+06	9.00E-01	1.1461E+08	
			45.0	0.022	CurrSupE	0.0000E+00								1.5	
				6.44E+06	8.17E-01	1.8774E+08	HS03_CBM	t3/2	PASS	2.26E-03	35801	1.10E+04	1.01E+08	DNV2010_D-AIR	
	HS03_ATP	t1/2	PASS	7.83E-02	35800	3.19E+02	1.02E+08	DNV2010_D-AIR				1.27E+01	-1.10E-02	1.5	
	95661				SCQS28	1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01			45.0	0.022	CurrSupE	2.8978E-02	
					+zSide	1.5	1.5	1.5				2.89E+06	8.61E-01	7.7533E+07	
			45.0	0.022	CurrSupE	9.6588E-03								1.5	
				5.56E+06	8.16E-01	1.6273E+08	HS03_CTP	HotS	PASS	7.32E-02	32892	3.41E+02	1.00E+08	DNV2010_D-AIR	
	HS03_ATP	t3/2	PASS	1.68E-02	35799	1.49E+03	1.02E+08	DNV2010_D-AIR				1.27E+01	1.10E-02	1.5	
	95662				SCQS28	1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01			45.0	0.022	CurrSupE	0.0000E+00	
					+zSide	1.5	1.5	1.5				6.01E+06	8.67E-01	1.5762E+08	
			45.0	0.022	CurrSupE	2.8977E-02								1.5	
				3.80E+06	8.07E-01	1.1557E+08	HS03_CTP	t1/2	PASS	3.10E-02	32892	8.07E+02	1.00E+08	DNV2010_D-AIR	
	HS03_ABP	HotS	PASS	2.91E-01	35800	8.59E+01	9.96E+07	DNV2010_D-AIR				1.27E+01	1.10E-02	1.5	
	86959				SCQS28	1.27E+01	-1.10E-02	2.1800E+01			45.0	0.022	CurrSupE	9.6607E-03	
					+zSide	1.5	1.5	1.5				4.94E+06	8.64E-01	1.3038E+08	
			45.0	0.022	CurrSupE	0.0000E+00								1.5	
				6.85E+06	7.67E-01	2.7230E+08	HS03_CTP	t3/2	PASS	2.17E-03	32891	1.15E+04	9.83E+07	DNV2010_D-AIR	
	HS03_ABP	t1/2	PASS	1.68E-01	35800	1.49E+02	9.96E+07	DNV2010_D-AIR				1.27E+01	1.10E-02	1.5	
	95661				SCQS28	1.27E+01	-1.10E-02	2.1800E+01			45.0	0.022	CurrSupE	2.8978E-02	
					+zSide	1.5	1.5	1.5				2.78E+06	8.52E-01	7.5053E+07	
			45.0	0.022	CurrSupE	9.6588E-03								1.5	
				5.92E+06	7.66E-01	2.3597E+08	HS03_CBP	HotS	PASS	4.29E-02	32892	5.83E+02	1.03E+08	DNV2010_D-AIR	
	HS03_ABP	t3/2	PASS	3.92E-02	35799	6.38E+02	9.97E+07	DNV2010_D-AIR				1.27E+01	-1.10E-02	1.5	
	95662				SCQS28	1.27E+01	-1.10E-02	2.1800E+01			45.0	0.022	CurrSupE	0.0000E+00	
					+zSide	1.5	1.5	1.5				5.71E+06	8.94E-01	1.3380E+08	
			45.0	0.022	CurrSupE	2.8977E-02								1.5	
				4.09E+06	7.62E-01	1.6602E+08	HS03_CBP	t1/2	PASS	1.89E-02	32892	1.32E+03	1.02E+08	DNV2010_D-AIR	
	HS03_BTM	HotS	PASS	7.51E-02	35660	3.33E+02	1.02E+08	DNV2010_D-AIR				1.27E+01	-1.10E-02	1.5	
	86959				SCQS28	1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01			45.0	0.022	CurrSupE	9.6607E-03	
					+zSide	1.5	1.5	1.5				4.72E+06	8.87E-01	1.1393E+08	
			45.0	0.022	CurrSupE	0.0000E+00								1.5	
				6.09E+06	8.71E-01	1.5749E+08	HS03_CBP	t3/2	PASS	2.08E-03	32891	1.20E+04	1.01E+08	DNV2010_D-AIR	
	HS03_BTM	t1/2	PASS	3.64E-02	35660	6.87E+02	1.01E+08	DNV2010_D-AIR				1.27E+01	-1.10E-02	1.5	
	87405				SCQS28	1.27E+01	1.10E-02	2.1790E+01			45.0	0.022	CurrSupE	2.8978E-02	
					+zSide	1.5	1.5	1.5				2.84E+06	8.61E-01	7.6276E+07	
			45.0	0.022	CurrSupE	9.6588E-03								1.5	
				5.17E+06	8.69E-01	1.3431E+08	Number of hotspots printed	:	24						
	HS03_BTM	t3/2	PASS	2.82E-03	35691	8.86E+03	9.85E+07	DNV2010_D-AIR						1.5	
	87406				SCQS28	1.27E+01	1.10E-02	2.1771E+01						0	
					+zSide	1.5	1.5	1.5						0	
			45.0	0.022	CurrSupE	2.8976E-02								0	
				2.75E+06	8.27E-01	8.2780E+07									

C.2.1.2 Meia carga

A seguir, são apresentadas as listagens do StoFat com os resultados da análise espectral de fadiga para cada um dos *hot spots* considerados, nas condições ambientais da Bacia de Campos, para a condição de meia carga:

11-MAR-2018 11:32 PROGRAM: SESAM STOFAT 3.5-07 06-MAY-2016 PAGE: 8															
HotName	FatPnt atNode	Stat	UsageFac	Element EleType atSide WnlAng	AccFatLif X-coord. AxialScf EIThick WeiScale	StrCycle Y-coord. BendScf RefSyst WeiShape	SNCurve Z-coordinate ShearScf DistanceToHot StressRange								
				STOCHASTIC HOTSPOT fatigue check results			HS01_CTP t3/2	PASS 2.66E-03	31690	+zSide 1.5	1.5	1.5	9.6588E-03		
				Run: FHC Superelement MODEL			83963		SCQ528	2.65E+06	8.21E-01	8.5037E+07			
				Priority..... Selected Hotspots					SCQ528	9.40E+03	1.03E+08	DNV2010_D-AIR	2.5750E+01		
				Usage factor : Above 0.00					+zSide	1.02E+01	2.16E+01	2.8977E-02			
				Design Fatigue Life: 25.0 Years			SUB PAGE: 2		45.0	0.0187	CurrSupE	2.41E+06	7.85E-01	9.1550E+07	
HS01_ATM Hot5	73037	PASS	4.41E-05	27575	2.50E+04	1.06E+08	DNV2010_D-AIR	HS02_ATM Hot5	82213	PASS	1.36E-01	32006	1.84E+02	1.04E+08	DNV2010_D-AIR
				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01					SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	0.0000E+00					45.0	0.0167	CurrSupE	1.0000E-02
					1.16E+06	8.17E-01	3.6999E+07						4.87E+06	7.76E-01	1.8481E+08
					2.50E+04	1.06E+08	DNV2010_D-AIR						3.39E+03	1.04E+08	DNV2010_D-AIR
				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5740E+01					SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	9.8209E-03					45.0	0.0167	CurrSupE	3.0000E-02
					1.11E+06	8.24E-01	3.3988E+07						2.97E+06	7.79E-01	1.1287E+08
					2.50E+04	1.06E+08	DNV2010_D-AIR								
				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5721E+01					SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	2.9465E-02					45.0	0.0187	CurrSupE	0.0000E+00
					1.02E+06	7.98E-01	2.8207E+07						5.87E+06	7.78E-01	2.1992E+08
					2.50E+04	1.07E+08	DNV2010_D-AIR						3.67E+02	1.04E+08	DNV2010_D-AIR
				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01					SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	0.0000E+00					45.0	0.0187	CurrSupE	1.0000E-02
					1.09E+06	7.96E-01	3.7496E+07						4.94E+06	7.78E-01	1.8639E+08
					2.50E+04	1.07E+08	DNV2010_D-AIR						2.51E+03	1.04E+08	DNV2010_D-AIR
				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5740E+01					SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	9.8209E-03					45.0	0.0187	CurrSupE	3.0000E-02
					1.02E+06	7.98E-01	3.4344E+07						3.11E+06	7.71E-01	1.2285E+08
					2.50E+04	1.06E+08	DNV2010_D-AIR								
				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5721E+01					SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	2.9465E-02					45.0	0.0167	CurrSupE	0.0000E+00
					9.21E+05	8.02E-01	2.9520E+07						7.25E+05	7.47E-01	3.1645E+07
					9.72E+03	1.03E+08	DNV2010_D-AIR						2.50E+04	1.09E+08	DNV2010_D-AIR
				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01					SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1790E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	0.0000E+00					45.0	0.0167	CurrSupE	9.6588E-03
					2.69E+06	8.23E-01	8.4397E+07						7.86E+05	7.61E-01	3.1570E+07
					9.46E+03	1.03E+08	DNV2010_D-AIR						2.50E+04	1.08E+08	DNV2010_D-AIR
				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01					SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1771E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	9.6588E-03					45.0	0.0167	CurrSupE	2.8976E-02
					2.67E+06	8.19E-01	8.6587E+07						8.75E+05	7.75E-01	3.1769E+07
					8.66E+03	1.03E+08	DNV2010_D-AIR								
				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01					SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	2.8977E-02					45.0	0.0167	CurrSupE	0.0000E+00
					2.42E+06	7.80E-01	9.3812E+07						7.76E+05	7.57E-01	3.1844E+07
					9.40E+03	1.03E+08	DNV2010_D-AIR						2.50E+04	1.09E+08	DNV2010_D-AIR
				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01					SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1790E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	0.0000E+00					45.0	0.0167	CurrSupE	9.6588E-03
					2.70E+06	8.21E-01	8.5447E+07						7.91E+05	7.61E-01	3.1694E+07
					9.23E+03	1.03E+08	DNV2010_D-AIR						2.50E+04	1.08E+08	DNV2010_D-AIR
				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01					SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1771E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	9.6588E-03					45.0	0.0167	CurrSupE	2.8976E-02
					2.64E+06	8.13E-01	8.8194E+07						8.73E+05	7.75E-01	3.1843E+07
					8.67E+03	1.03E+08	DNV2010_D-AIR								
				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01					SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	2.8977E-02					45.0	0.0187	CurrSupE	0.0000E+00
					2.42E+06	7.80E-01	9.3613E+07						6.63E+05	7.57E-01	2.7531E+07
					1.06E+04	1.03E+08	DNV2010_D-AIR						2.50E+04	1.08E+08	DNV2010_D-AIR
				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01					SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1810E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	0.0000E+00					45.0	0.0187	CurrSupE	9.6607E-03
					2.67E+06	8.26E-01	8.2472E+07						7.42E+05	7.80E-01	2.7497E+07
					1.03E+04	1.03E+08	DNV2010_D-AIR						2.50E+04	1.08E+08	DNV2010_D-AIR
				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01					SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1829E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	9.6588E-03					45.0	0.0187	CurrSupE	2.8978E-02
					2.66E+06	8.23E-01	8.4162E+07						8.66E+05	8.05E-01	2.7988E+07
					9.39E+03	1.03E+08	DNV2010_D-AIR								
				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01					SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	2.8977E-02					45.0	0.0187	CurrSupE	0.0000E+00
					2.41E+06	7.85E-01	9.1733E+07						7.53E+05	7.85E-01	2.7880E+07
					1.06E+04	1.03E+08	DNV2010_D-AIR						2.50E+04	1.08E+08	DNV2010_D-AIR
				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01					SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1810E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	0.0000E+00					45.0	0.0187	CurrSupE	9.6607E-03
					2.67E+06	8.26E-01	8.2424E+07						7.69E+05	7.87E-01	2.7399E+07
					1.02E+04	1.03E+08	DNV2010_D-AIR						2.50E+04	1.08E+08	DNV2010_D-AIR
				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01					SCQ528	1.05E+01	2.16	

C.1.2.3 Lastro

A seguir, são apresentadas as listagens do StoFat com os resultados da análise espectral de fadiga para cada um dos *hot spots* considerados, nas condições ambientais da Bacia de Campos, para a condição de lastro:

11-MAR-2018 11:52 PROGRAM: SESAM STOFAT 3.5-07 06-MAY-2016 PAGE: 8										
HotName	FatPnt atNode	Stat	UsageFac	Element EleType atSide WnlAng	AccFatLif X-coord. AxialScf ElThick WeiScale	StrCycle Y-coord. RefSyst WeiShape	SNCurve Z-coordinate DistanceToHot StressRange			
STOCHASTIC HOTSPOT fatigue check results										
Run: FHC Superelement MODEL										
Priority.....: Selected Hotspots										
Usage factor : Above 0.00										
Design Fatigue Life: 25.0 Years SUB PAGE: 2										
HS01_ATM	HotS 73037	PASS	2.11E-04	27575 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5 0.0187	1.09E+08 2.16E+01 1.5 CurrSupE	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01 1.5 0.0000E+00	HS01_CTP t3/2 83963	PASS	1.50E-02 31690 SCQ528 +zSide 45.0
HS01_ATM	t1/2 73247	PASS	1.29E-04	27575 SCQ528 +zSide 45.0	1.66E+06 2.50E+04 1.02E+01 1.5 0.0187	8.36E-01 1.10E+08 2.16E+01 1.5 8.42E-01	4.6403E+07 2.5740E+01 1.5 9.8209E-03	HS02_ATM t3/2 85288	PASS	2.93E-02 31974 SCQ528 +zSide 45.0
HS01_ATM	t3/2 73246	PASS	4.63E-05	27576 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5 0.0187	1.10E+08 2.16E+01 1.5 8.72E-01	DNV2010_D-AIR 2.5721E+01 1.5 2.9465E-02	HS02_ATM t1/2 85287	PASS	2.47E-01 32006 SCQ528 +zSide 45.0
HS01_ATP	HotS 73037	PASS	1.72E-04	31523 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5 0.0187	1.10E+08 2.16E+01 1.5 8.40E-01	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01 1.5 0.0000E+00	HS02_ATP HotS 82213	PASS	4.89E-01 32006 SCQ528 +zSide 45.0
HS01_ATP	t1/2 73247	PASS	1.17E-04	31523 SCQ528 +zSide 45.0	1.61E+06 2.50E+04 1.02E+01 1.5 0.0187	8.40E-01 1.10E+08 2.16E+01 1.5 8.47E-01	4.4342E+07 2.5740E+01 1.5 9.8209E-03	HS02_ATP t1/2 85288	PASS	2.47E-01 32104 SCQ528 +zSide 45.0
HS01_ATP	t3/2 73246	PASS	5.58E-05	31561 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5 0.0187	1.11E+08 2.16E+01 1.5 8.66E-01	DNV2010_D-AIR 2.5721E+01 1.5 2.9465E-02	HS02_ATP t3/2 85288	PASS	4.77E-02 32103 SCQ528 +zSide 45.0
HS01_BTM	HotS 73037	PASS	1.15E-02	27575 SCQ528 +zSide 45.0	2.18E+03 1.02E+01 1.5 0.0187	1.06E+08 2.16E+01 1.5 7.71E-01	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01 1.5 0.0000E+00	HS02_BTM HotS 82213	PASS	7.26E-06 32006 SCQ528 +zSide 45.0
HS01_BTM	t1/2 73248	PASS	1.27E-02	27575 SCQ528 +zSide 45.0	1.98E+03 1.02E+01 1.5 0.0187	1.06E+08 2.16E+01 1.5 7.71E-01	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01 1.5 9.6588E-03	HS02_BTM t3/2 82728	PASS	2.19E-05 31090 SCQ528 +zSide 45.0
HS01_BTM	t3/2 73249	PASS	1.60E-02	27574 SCQ528 +zSide 45.0	1.56E+03 1.02E+01 1.5 0.0187	1.06E+08 2.16E+01 1.5 7.77E-01	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01 1.5 2.8977E-02	HS02_BTM t1/2 82727	PASS	8.91E-06 31089 SCQ528 +zSide 45.0
HS01_BTP	HotS 73037	PASS	1.25E-02	27776 SCQ528 +zSide 45.0	2.00E+03 1.02E+01 1.5 0.0187	1.06E+08 2.16E+01 1.5 7.71E-01	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01 1.5 0.0000E+00	HS02_BTP HotS 82213	PASS	8.91E-06 31089 SCQ528 +zSide 45.0
HS01_BTP	t1/2 73248	PASS	1.34E-02	27776 SCQ528 +zSide 45.0	3.23E+06 1.86E+03 1.02E+01 1.5 0.0187	7.71E-01 1.06E+08 2.16E+01 1.5 7.72E-01	1.2576E+08 2.5750E+01 1.5 9.6588E-03	HS02_BTP t3/2 82728	PASS	2.09E-05 32029 SCQ528 +zSide 45.0
HS01_BTP	t3/2 73249	PASS	1.60E-02	27777 SCQ528 +zSide 45.0	1.56E+03 1.02E+01 1.5 0.0187	1.06E+08 2.16E+01 1.5 7.72E-01	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01 1.5 1.2760E+08	HS02_BTP t1/2 82727	PASS	1.03E-05 31089 SCQ528 +zSide 45.0
HS01_CTM	HotS 73037	PASS	1.03E-02	31523 SCQ528 +zSide 45.0	2.44E+03 1.02E+01 1.5 0.0187	1.06E+08 2.16E+01 1.5 7.74E-01	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01 1.5 0.0000E+00	HS02_CTM HotS 82213	PASS	1.03E-05 32104 SCQ528 +zSide 45.0
HS01_CTM	t1/2 83962	PASS	1.15E-02	31523 SCQ528 +zSide 45.0	3.12E+06 2.17E+03 1.02E+01 1.5 0.0187	7.74E-01 1.06E+08 2.16E+01 1.5 7.74E-01	1.1961E+08 2.5750E+01 1.5 9.6588E-03	HS02_CTM t3/2 83068	PASS	1.88E-05 31217 SCQ528 +zSide 45.0
HS01_CTM	t3/2 83963	PASS	1.50E-02	31471 SCQ528 +zSide 45.0	1.66E+03 1.02E+01 1.5 0.0187	1.06E+08 2.16E+01 1.5 7.74E-01	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01 1.5 1.2257E+08	HS02_CTM t1/2 83067	PASS	1.22E-05 31218 SCQ528 +zSide 45.0
HS01_CTP	HotS 73037	PASS	1.05E-02	31691 SCQ528 +zSide 45.0	2.37E+03 1.02E+01 1.5 0.0187	1.06E+08 2.16E+01 1.5 7.75E-01	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01 1.5 0.0000E+00	HS02_CTP HotS 82213	PASS	1.43E-05 31218 SCQ528 +zSide 45.0
HS01_CTP	t1/2 83962	PASS	1.18E-02	31691 SCQ528 +zSide 45.0	3.16E+06 2.12E+03 1.02E+01 1.5 0.0187	7.75E-01 1.06E+08 2.16E+01 1.5 7.81E-01	1.2014E+08 2.5750E+01 1.5 2.8977E-02	HS02_CTP t3/2 83068	PASS	1.87E-05 32105 SCQ528 +zSide 45.0

C.2.2 Bacia de Santos

C.2.2.1 Carga completa

A seguir, são apresentadas as listagens do STOFAT com os resultados da análise espectral de fadiga para cada um dos *hot spots* considerados, nas condições ambientais da Bacia de Santos, para a condição de carga completa:

11-MAR-2018 10:43 PROGRAM: SESAM STOFAT 3.5-07 06-MAY-2016 PAGE: 8 73037											
		SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01						
		+zSide	1.5	1.5	1.5						
		45.0	0.0187	CurrSupE	0.0000E+00						
			3.05E+06	8.07E-01	9.6264E+07						
		STOCHASTIC HOTSPOT fatigue check results									
		Run: FHS Superelement MODEL									
		Priority.....: Selected Hotspots									
		Usage factor : Above 0.00									
		Design Fatigue Life: 25.0 Years									
			SUB PAGE: 2								
HotName	FatPnt atNode	Stat	UsageFac	Element EleType atSide WnlAng	AccFatLif X-coord. AxialScf ElThick WeIScale	StrCycLe Y-coord. CurrSupE WeIShape	SNCurve Z-coordinate ShearScf DistanceToHot StressRange				
HS01_CTP	t1/2	PASS	5.70E-03	31691	SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01	4.39E+03	9.75E+07	DNV2010_D-AIR
				83962	SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01			
					+zSide	1.5	1.5	1.5			
					45.0	0.0187	CurrSupE	9.6588E-03			
						3.03E+06	8.03E-01	9.8061E+07			
						4.18E+03	9.73E+07	DNV2010_D-AIR			
					+zSide	1.5	1.5	1.5			
					45.0	0.0187	CurrSupE	2.8977E-02			
						3.00E+06	7.97E-01	1.0042E+08			
HS01_ATM	Hot5	PASS	8.48E-05	27575	SCQ528	2.50E+04	1.01E+08	DNV2010_D-AIR			
				73037	SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01			
					+zSide	1.5	1.5	1.5			
					45.0	0.0187	CurrSupE	0.0000E+00			
						1.18E+06	7.75E-01	4.5973E+07			
HS01_ATM	t1/2	PASS	7.46E-05	27575	SCQ528	2.50E+04	1.01E+08	DNV2010_D-AIR			
				73247	SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5740E+01			
					+zSide	1.5	1.5	1.5			
					45.0	0.0187	CurrSupE	9.8209E-03			
						1.13E+06	7.69E-01	4.5244E+07			
HS01_ATM	t3/2	PASS	5.61E-05	27576	SCQ528	2.50E+04	1.00E+08	DNV2010_D-AIR			
				73246	SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5721E+01			
					+zSide	1.5	1.5	1.5			
					45.0	0.0187	CurrSupE	2.9465E-02			
						1.01E+06	7.52E-01	4.3885E+07			
HS02_ATM	Hot5	PASS	3.84E-01	32006	SCQ528	6.51E+01	9.76E+07	DNV2010_D-AIR			
				82213	SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01			
					+zSide	1.5	1.5	1.5			
					45.0	0.0167	CurrSupE	0.0000E+00			
						7.67E+06	7.78E-01	2.7578E+08			
HS02_ATM	t1/2	PASS	1.91E-01	32006	SCQ528	1.31E+02	9.77E+07	DNV2010_D-AIR			
				85287	SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01			
					+zSide	1.5	1.5	1.5			
					45.0	0.0167	CurrSupE	1.0000E-02			
						6.37E+06	7.79E-01	6.3741E+08			
HS02_ATM	t3/2	PASS	2.31E-02	31974	SCQ528	1.08E+03	9.78E+07	DNV2010_D-AIR			
				85288	SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01			
					+zSide	1.5	1.5	1.5			
					45.0	0.0167	CurrSupE	3.0000E-02			
						3.77E+06	7.79E-01	1.3301E+08			
HS02_ATP	Hot5	PASS	3.99E-01	32104	SCQ528	6.27E+01	9.74E+07	DNV2010_D-AIR			
				82213	SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01			
					+zSide	1.5	1.5	1.5			
					45.0	0.0187	CurrSupE	0.0000E+00			
						7.75E+06	7.77E-01	2.7841E+08			
HS02_ATP	t1/2	PASS	2.01E-01	32104	SCQ528	1.24E+02	9.75E+07	DNV2010_D-AIR			
				85287	SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01			
					+zSide	1.5	1.5	1.5			
					45.0	0.0187	CurrSupE	1.0000E-02			
						6.43E+06	7.78E-01	6.4379E+08			
HS02_ATP	t3/2	PASS	2.54E-02	32103	SCQ528	9.84E+02	9.77E+07	DNV2010_D-AIR			
				85288	SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01			
					+zSide	1.5	1.5	1.5			
					45.0	0.0187	CurrSupE	3.0000E-02			
						3.84E+06	7.76E-01	1.3888E+08			
HS02_BTM	Hot5	PASS	4.59E-04	32006	SCQ528	2.50E+04	1.03E+08	DNV2010_D-AIR			
				82213	SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01			
					+zSide	1.5	1.5	1.5			
					45.0	0.0167	CurrSupE	0.0000E+00			
						1.35E+06	7.17E-01	7.0332E+07			
HS02_BTM	t1/2	PASS	4.22E-04	32006	SCQ528	2.50E+04	1.03E+08	DNV2010_D-AIR			
				82727	SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1790E+01			
					+zSide	1.5	1.5	1.5			
					45.0	0.0167	CurrSupE	9.6588E-03			
						1.33E+06	7.16E-01	6.9393E+07			
HS02_BTM	t3/2	PASS	3.38E-04	31090	SCQ528	2.50E+04	1.03E+08	DNV2010_D-AIR			
				82728	SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1771E+01			
					+zSide	1.5	1.5	1.5			
					45.0	0.0167	CurrSupE	2.8976E-02			
						1.30E+06	7.21E-01	6.6034E+07			
HS02_BTP	Hot5	PASS	4.96E-04	31089	SCQ528	2.50E+04	1.03E+08	DNV2010_D-AIR			
				82213	SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01			
					+zSide	1.5	1.5	1.5			
					45.0	0.0167	CurrSupE	0.0000E+00			
						1.37E+06	7.17E-01	7.1432E+07			
HS02_BTP	t1/2	PASS	4.32E-04	31089	SCQ528	2.50E+04	1.03E+08	DNV2010_D-AIR			
				82727	SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1790E+01			
					+zSide	1.5	1.5	1.5			
					45.0	0.0167	CurrSupE	9.6588E-03			
						2.99E+06	7.92E-01	1.0104E+08			
HS02_BTP	t3/2	PASS	6.58E-03	27777	SCQ528	3.80E+03	9.81E+07	DNV2010_D-AIR			
				73249	SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01			
					+zSide	1.5	1.5	1.5			
					45.0	0.0187	CurrSupE	2.8977E-02			
						3.02E+06	7.92E-01	1.0175E+08			
HS02_CTM	Hot5	PASS	1.56E-04	32104	SCQ528	2.50E+04	1.01E+08	DNV2010_D-AIR			
				82213	SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01			
					+zSide	1.5	1.5	1.5			
					45.0	0.0187	CurrSupE	0.0000E+00			
						1.16E+06	7.33E-01	5.5122E+07			
HS02_CTM	t1/2	PASS	1.68E-04	32104	SCQ528	2.50E+04	1.01E+08	DNV2010_D-AIR			
				83067	SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1810E+01			
					+zSide	1.5	1.5	1.5			
					45.0	0.0187	CurrSupE	9.6607E-03			
						1.18E+06	7.35E-01	5.6049E+07			
HS02_CTM	t3/2	PASS	1.39E-04	31217	SCQ528	2.50E+04	1.01E+08	DNV2010_D-AIR			
				83068	SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1829E+01			
					+zSide	1.5	1.5	1.5			
					45.0	0.0187	CurrSupE	2.8978E-02			
						1.19E+06	7.48E-01	5.2727E+07			
HS02_CTP	Hot5	PASS	1.65E-04	31218	SCQ528	2.50E+04	1.01E+08	DNV2010_D-AIR			

				82213	SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01			45.0	0.022	CurrSupE	9.6588E-03
					+zSide	1.5	1.5	1.5						5.26E+06
					0.0187	CurrSupE	0.0000E+00		HS03_BTP	t3/2	PASS	4.68E-03	32721	8.31E-01
					1.19E+06	7.38E-01	5.5361E+07		87406				SCQ528	5.34E+03
					2.50E+04	1.01E+08	DNV2010_D-AIR						-zSide	9.73E+07
					1.05E+01	2.16E+01	2.1810E+01						45.0	1.27E+01
					1.5	1.5	1.5						1.5	1.10E-02
					0.0187	CurrSupE	9.6607E-03						0.022	2.8976E-02
					1.18E+06	7.36E-01	5.5409E+07		HS03_BBP	Hot5	PASS	6.07E-02	32720	8.17E-01
					2.50E+04	1.01E+08	DNV2010_D-AIR		86959				SCQ528	4.12E+02
					1.05E+01	2.16E+01	2.1829E+01						+zSide	1.27E+01
					1.5	1.5	1.5						45.0	-1.10E-02
					0.0187	CurrSupE	9.6607E-03						0.022	1.02E+08
					1.18E+06	7.36E-01	5.5409E+07						1.5	DNV2010_D-AIR
					2.50E+04	1.01E+08	DNV2010_D-AIR						1.5	2.1800E+01
					1.05E+01	2.16E+01	2.1829E+01						45.0	1.27E+01
					1.5	1.5	1.5						1.5	1.10E-02
					0.0187	CurrSupE	9.6607E-03						0.022	0.0000E+00
					1.18E+06	7.36E-01	5.5409E+07		HS03_BBP	t1/2	PASS	2.68E-02	32720	9.32E+02
					2.50E+04	1.01E+08	DNV2010_D-AIR		87405				SCQ528	1.27E+01
					1.05E+01	2.16E+01	2.1829E+01						+zSide	1.10E-02
					1.5	1.5	1.5						45.0	1.5
					0.0187	CurrSupE	9.6607E-03						0.022	1.02E+08
					1.18E+06	7.36E-01	5.5409E+07						1.5	DNV2010_D-AIR
					2.50E+04	1.01E+08	DNV2010_D-AIR						1.5	2.1790E+01
					1.05E+01	2.16E+01	2.1829E+01						45.0	1.27E+01
					1.5	1.5	1.5						1.5	1.10E-02
					0.0187	CurrSupE	9.6607E-03						0.022	0.0000E+00
					1.18E+06	7.36E-01	5.5409E+07		HS03_BBP	t3/2	PASS	3.08E-03	32721	4.85E+06
					2.50E+04	1.01E+08	DNV2010_D-AIR		87406				SCQ528	8.12E+03
					1.05E+01	2.16E+01	2.1829E+01						+zSide	1.01E+08
					1.5	1.5	1.5						45.0	1.10E-02
					0.0187	CurrSupE	9.6607E-03						0.022	2.1771E+01
					1.18E+06	7.36E-01	5.5409E+07						1.5	1.5
					2.50E+04	1.01E+08	DNV2010_D-AIR						0.022	2.8976E-02
					1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01						45.0	8.0401E+07
					1.5	1.5	1.5						1.5	2.97E+06
					0.022	CurrSupE	9.6588E-03						0.022	8.46E-01
					5.89E+06	7.92E-01	1.9226E+08		HS03_CTM	Hot5	PASS	1.09E-01	35800	2.29E+02
					9.31E+02	1.00E+08	DNV2010_D-AIR		86959				SCQ528	1.27E+01
					1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01						-zSide	1.10E-02
					1.5	1.5	1.5						45.0	1.5
					0.022	CurrSupE	9.6588E-03						0.022	0.0000E+00
					5.89E+06	7.92E-01	1.9226E+08						1.5	DNV2010_D-AIR
					9.31E+02	1.00E+08	DNV2010_D-AIR						1.5	2.1800E+01
					1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01						45.0	1.27E+01
					1.5	1.5	1.5						1.5	1.10E-02
					0.022	CurrSupE	9.6588E-03						0.022	0.0000E+00
					5.89E+06	7.92E-01	1.9226E+08		HS03_CTM	t1/2	PASS	5.42E-02	35800	4.62E+02
					9.31E+02	1.00E+08	DNV2010_D-AIR		87853				SCQ528	1.27E+01
					1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01						-zSide	1.10E-02
					1.5	1.5	1.5						45.0	1.5
					0.022	CurrSupE	9.6588E-03						0.022	9.6607E-03
					5.89E+06	7.92E-01	1.9226E+08						1.5	9.6607E-03
					9.31E+02	1.00E+08	DNV2010_D-AIR						1.5	1.4758E+08
					1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01						45.0	6.16E+03
					1.5	1.5	1.5						1.5	9.71E+07
					0.022	CurrSupE	9.6588E-03						0.022	2.1829E+01
					5.89E+06	7.92E-01	1.9226E+08		HS03_CTM	t3/2	PASS	4.06E-03	35801	5.76E+06
					9.31E+02	1.00E+08	DNV2010_D-AIR		87854				SCQ528	8.70E-01
					1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01						-zSide	1.10E-02
					1.5	1.5	1.5						45.0	1.5
					0.022	CurrSupE	9.6588E-03						0.022	2.8978E-02
					5.89E+06	7.92E-01	1.9226E+08						1.5	9.0071E+07
					9.31E+02	1.00E+08	DNV2010_D-AIR						45.0	3.07E+06
					1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01						1.5	8.37E-01
					1.5	1.5	1.5						1.5	9.6607E-03
					0.022	CurrSupE	9.6588E-03						0.022	1.4758E+08
					6.69E+06	7.57E-01	2.7863E+08		HS03_CBM	Hot5	PASS	7.46E-02	35800	3.35E+02
					3.99E+02	9.81E+07	DNV2010_D-AIR		86959				SCQ528	1.27E+01
					1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01						+zSide	1.10E-02
					1.5	1.5	1.5						45.0	1.5
					0.022	CurrSupE	9.6588E-03						0.022	0.0000E+00
					6.69E+06	7.57E-01	2.7863E+08						1.5	DNV2010_D-AIR
					3.99E+02	9.81E+07	DNV2010_D-AIR						1.5	2.1800E+01
					1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01						45.0	6.29E+06
					1.5	1.5	1.5						1.5	8.80E-01
					0.022	CurrSupE	9.6588E-03						0.022	1.4758E+08
					6.69E+06	7.57E-01	2.7863E+08		HS03_CBM	t1/2	PASS	3.41E-02	35800	7.33E+02
					3.99E+02	9.81E+07	DNV2010_D-AIR		87853				SCQ528	1.27E+01
					1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01						-zSide	1.10E-02
					1.5	1.5	1.5						45.0	1.5
					0.022	CurrSupE	9.6588E-03						0.022	2.1810E+01
					6.69E+06	7.57E-01	2.7863E+08						1.5	9.6607E-03
					3.99E+02	9.81E+07	DNV2010_D-AIR						1.5	1.4758E+08
					1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01						45.0	6.16E+03
					1.5	1.5	1.5						1.5	9.71E+07
					0.022	CurrSupE	9.6588E-03						0.022	2.1829E+01
					6.69E+06	7.57E-01	2.7863E+08		HS03_CBM	t3/2	PASS	3.81E-03	35801	6.56E+03
					3.99E+02	9.81E+07	DNV2010_D-AIR		87854				SCQ528	1.27E+01
					1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01						+zSide	1.10E-02
					1.5	1.5	1.5						45.0	1.5
					0.022	CurrSupE	9.6588E-03						0.022	2.8978E-02
					6.69E+06	7.57E-01	2.7863E+08						1.5	9.0071E+07
					3.99E+02	9.81E+07	DNV2010_D-AIR						45.0	8.40E-01
					1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01						1.5	8.46E+06
					1.5	1.5	1.5						1.5	8.40E-01
					0.022	CurrSupE	9.6588E-03						0.022	1.4758E+08
					6.69E+06	7.57E-01	2.7863E+08		HS03_CBP	Hot5	PASS	6.34E-02	32892	3.94E+02
					3.95E+02	9.81E+07	DNV2010_D-AIR		86959				SCQ528	1.27E+01

C.2.2.2 Meia carga

A seguir, são apresentadas as listagens do STOFAT com os resultados da análise espectral de fadiga para cada um dos *hot spots* considerados, nas condições ambientais da Bacia de Santos, para a condição de meia carga:

11-MAR-2018 11:35 PROGRAM: SESAM STOFAT 3.5-07 06-MAY-2016 PAGE: 8															
STOCHASTIC HOTSPOT fatigue check results						H501_CTP	t3/2	PASS	5.12E-03	31690	+zSide	1.5	1.5	1.5	
Run: FHS Superelement MODEL							83963					0.0187	CurrSupE	9.6588E-03	
Priority..... Selected Hotspots												2.76E+06	7.91E-01	9.5216E+07	
Usage factor : Above 0.00												4.88E+03	1.01E+08	DNV2010_D-AIR	
Design Fatigue Life: 25.0 Years												1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01	
												+zSide	1.5	1.5	
												45.0	0.0187	CurrSupE	2.8977E-02
												2.58E+06	7.61E-01	1.0121E+08	
HotName	FatPnt atNode	Stat	UsageFac	Element EleType	AccFatLif X-coord.	StrCycle Y-coord.	SNCurve Z-coordinate								
				atSide	AxialScf	BendScf	ShearScf								
				WnlAng	ElThick	RefSyst	DistanceToHot								
				WeiScale	WeiShape	StressRange									
H501_ATM	Hot5	PASS	8.16E-05	27575	2.50E+04	1.04E+08	DNV2010_D-AIR	H502_ATM	HotS	PASS	2.30E-01	32006	1.09E+02	1.02E+08	DNV2010_D-AIR
73037				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01	82213				SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	0.0000E+00					45.0	0.0167	CurrSupE	1.0000E-02
					1.27E+06	8.03E-01	4.0687E+07						5.60E+06	7.70E-01	2.0479E+08
H501_ATM	t1/2	PASS	5.76E-05	27575	2.50E+04	1.04E+08	DNV2010_D-AIR	H502_ATM	t3/2	PASS	1.47E-02	31974	1.69E+03	1.02E+08	DNV2010_D-AIR
73247				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5740E+01	85288				SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	9.8209E-03					45.0	0.0167	CurrSupE	3.0000E-02
					1.21E+06	8.10E-01	3.7329E+07						3.37E+06	7.69E-01	1.2354E+08
H501_ATM	t3/2	PASS	2.98E-05	27576	2.50E+04	1.03E+08	DNV2010_D-AIR	H502_ATP	HotS	PASS	2.30E-01	32104	1.09E+02	1.02E+08	DNV2010_D-AIR
73246				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5721E+01	82213				SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	2.9465E-02					45.0	0.0187	CurrSupE	0.0000E+00
					1.12E+06	8.31E-01	3.1019E+07						6.78E+06	7.72E-01	2.4526E+08
H501_ATP	Hot5	PASS	7.85E-05	31523	2.50E+04	1.04E+08	DNV2010_D-AIR	H502_ATP	t1/2	PASS	1.20E-01	32104	2.08E+02	1.02E+08	DNV2010_D-AIR
73037				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01	85287				SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	0.0000E+00					45.0	0.0187	CurrSupE	1.0000E-02
					1.19E+06	7.83E-01	4.2266E+07						5.69E+06	7.72E-01	2.0691E+08
H501_ATP	t1/2	PASS	5.51E-05	31523	2.50E+04	1.04E+08	DNV2010_D-AIR	H502_ATP	t3/2	PASS	1.98E-02	32103	1.26E+03	1.01E+08	DNV2010_D-AIR
73247				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5740E+01	85288				SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	9.8209E-03					45.0	0.0187	CurrSupE	3.0000E-02
					1.11E+06	7.84E-01	3.8989E+07						3.56E+06	7.63E-01	1.3384E+08
H501_ATP	t3/2	PASS	3.14E-05	31561	2.50E+04	1.04E+08	DNV2010_D-AIR	H502_BTM	HotS	PASS	2.32E-05	32006	2.50E+04	1.07E+08	DNV2010_D-AIR
73246				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5721E+01	82213				SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	2.9465E-02					45.0	0.0167	CurrSupE	0.0000E+00
					1.01E+06	7.92E-01	3.4036E+07						7.29E+05	7.20E-01	3.1322E+07
H501_BTM	Hot5	PASS	4.80E-03	27575	5.21E+03	1.01E+08	DNV2010_D-AIR	H502_BTM	t1/2	PASS	2.73E-05	32006	2.50E+04	1.06E+08	DNV2010_D-AIR
73037				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01	82727				SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1790E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	0.0000E+00					45.0	0.0167	CurrSupE	9.6588E-03
					2.93E+06	8.06E-01	9.3780E+07						7.90E+05	7.32E-01	3.1612E+07
H501_BTM	t1/2	PASS	4.96E-03	27575	5.04E+03	1.01E+08	DNV2010_D-AIR	H502_BTM	t3/2	PASS	3.70E-05	31090	2.50E+04	1.06E+08	DNV2010_D-AIR
73248				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01	82728				SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1771E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	9.6588E-03					45.0	0.0167	CurrSupE	2.8976E-02
					2.80E+06	7.90E-01	9.7025E+07						9.22E+05	7.56E-01	3.4217E+07
H501_BTM	t3/2	PASS	5.61E-03	27574	4.45E+03	1.01E+08	DNV2010_D-AIR	H502_BTP	HotS	PASS	2.77E-05	31089	2.50E+04	1.07E+08	DNV2010_D-AIR
73249				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01	82213				SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	2.8977E-02					45.0	0.0167	CurrSupE	0.0000E+00
					2.61E+06	7.58E-01	1.0355E+08						7.82E+05	7.29E-01	3.1935E+07
H501_BTP	Hot5	PASS	4.97E-03	27776	5.03E+03	1.01E+08	DNV2010_D-AIR	H502_BTP	t1/2	PASS	2.84E-05	31089	2.50E+04	1.06E+08	DNV2010_D-AIR
73037				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01	82727				SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1790E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	0.0000E+00					45.0	0.0167	CurrSupE	9.6588E-03
					2.87E+06	7.97E-01	9.6107E+07						8.01E+05	7.34E-01	3.2241E+07
H501_BTP	t1/2	PASS	5.10E-03	27776	4.90E+03	1.01E+08	DNV2010_D-AIR	H502_BTP	t3/2	PASS	3.67E-05	32029	2.50E+04	1.06E+08	DNV2010_D-AIR
73248				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01	82728				SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1771E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	9.6588E-03					45.0	0.0167	CurrSupE	2.8976E-02
					2.75E+06	7.82E-01	9.8554E+07						9.16E+05	7.55E-01	3.4112E+07
H501_BTP	t3/2	PASS	5.59E-03	27777	4.47E+03	1.01E+08	DNV2010_D-AIR	H502_CTM	HotS	PASS	1.20E-05	32104	2.50E+04	1.06E+08	DNV2010_D-AIR
73249				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01	82213				SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1800E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	2.8977E-02					45.0	0.0187	CurrSupE	0.0000E+00
					2.61E+06	7.59E-01	1.0339E+08						6.82E+05	7.37E-01	2.8236E+07
H501_CTM	Hot5	PASS	4.35E-03	31523	5.74E+03	1.01E+08	DNV2010_D-AIR	H502_CTM	t1/2	PASS	1.45E-05	32104	2.50E+04	1.06E+08	DNV2010_D-AIR
73037				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01	83067				SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1810E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	0.0000E+00					45.0	0.0187	CurrSupE	9.6607E-03
					2.90E+06	8.10E-01	9.1030E+07						7.60E+05	7.56E-01	2.8181E+07
H501_CTM	t1/2	PASS	4.51E-03	31523	5.54E+03	1.01E+08	DNV2010_D-AIR	H502_CTM	t3/2	PASS	2.10E-05	31217	2.50E+04	1.05E+08	DNV2010_D-AIR
83962				SCQ528	1.02E+01	2.16E+01	2.5750E+01	83068				SCQ528	1.05E+01	2.16E+01	2.1829E+01
				+zSide	1.5	1.5	1.5					+zSide	1.5	1.5	1.5
				45.0	0.0187	CurrSupE	9.6588E-03					45.0	0.0187	CurrSupE	2.8978E-02
					2.80E+06	7.96E-01	9.4462E+07						9.05E+05	7.83E-01	3.0164E+07
H501_CTM	t3/2	PASS	5.13E-03	31471	4.87E+03	1.01E+08	DN								

			45.0	0.0187 9.02E+05	CurrSupE 7.83E-01	2.8978E-02 3.0136E+07				3.35E+06 6.93E+03 1.27E+01 1.5	8.28E-01 1.02E+08 -1.10E-02 1.5	9.9568E+07 DNV2010_D-AIR 2.1790E+01	
HS03_ATM	HotS 86959	PASS 1.92E-01	35660	1.30E+02 1.27E+01 1.5	1.03E+08 1.10E-02 1.5	DNV2010_D-AIR 2.1800E+01 1.5	HS03_BBP	t1/2 87405	PASS 3.61E-03	32720	SCQ528 +zSide 45.0	0.022 CurrSupE 3.04E+06 8.46E-01 2.50E+04 1.03E+08 1.27E+01 -1.10E-02 1.5 0.022 CurrSupE 2.07E+06 8.49E-01	9.6588E-03 8.4054E+07 DNV2010_D-AIR 2.1771E+01
HS03_ATM	t1/2 95661	PASS 1.08E-01	35660	7.13E+06 2.31E+02 1.27E+01 1.5	8.07E-01 1.03E+08 1.10E-02 1.5	DNV2010_D-AIR 2.1800E+01 1.5	HS03_BBP	t3/2 87406	PASS 5.09E-04	32721	SCQ528 +zSide 45.0	0.022 CurrSupE 3.04E+06 8.46E-01 2.50E+04 1.03E+08 1.27E+01 -1.10E-02 1.5 0.022 CurrSupE 2.07E+06 8.49E-01	9.6588E-03 8.4054E+07 DNV2010_D-AIR 2.1771E+01
HS03_ATM	t3/2 95662	PASS 2.32E-02	35617	6.12E+06 1.08E+03 1.27E+01 1.5	8.06E-01 1.03E+08 1.10E-02 1.5	DNV2010_D-AIR 2.1800E+01 1.5	HS03_CTM	HotS 86959	PASS 1.75E-02	35800	SCQ528 -zSide 45.0	1.43E+03 1.02E+08 1.27E+01 1.10E-02 1.5 0.022 CurrSupE 3.34E+06 7.53E-01 3.14E+03 1.02E+08 1.27E+01 1.10E-02 1.5 0.022 CurrSupE 2.75E+06 7.48E-01	DNV2010_D-AIR 2.1800E+01 1.5 0.0000E+00 1.4237E+08 DNV2010_D-AIR 2.1810E+01
HS03_ABM	HotS 86959	PASS 2.73E-01	35660	9.17E+01 1.27E+01 1.5	1.02E+08 -1.10E-02 1.5	DNV2010_D-AIR 2.1800E+01 1.5	HS03_CTM	t1/2 87853	PASS 7.95E-03	35800	SCQ528 -zSide 45.0	1.43E+03 1.02E+08 1.27E+01 1.10E-02 1.5 0.022 CurrSupE 3.34E+06 7.53E-01 3.14E+03 1.02E+08 1.27E+01 1.10E-02 1.5 0.022 CurrSupE 2.75E+06 7.48E-01	9.6607E-03 1.2020E+08 DNV2010_D-AIR 2.1829E+01
HS03_ABM	t1/2 95661	PASS 1.58E-01	35660	6.47E+06 1.59E+02 1.27E+01 1.5	7.26E-01 1.02E+08 -1.10E-02 1.5	DNV2010_D-AIR 2.1800E+01 1.5	HS03_CTM	t3/2 87854	PASS 1.00E-03	35801	SCQ528 -zSide 45.0	2.50E+04 1.03E+08 1.27E+01 1.10E-02 1.5 0.022 CurrSupE 1.75E+06 7.46E-01	2.8978E-02 7.7301E+07
HS03_ABM	t3/2 95662	PASS 3.71E-02	35617	5.49E+06 6.75E+02 1.27E+01 1.5	7.24E-01 1.03E+08 1.10E-02 1.5	DNV2010_D-AIR 2.1800E+01 1.5	HS03_CBM	HotS 86959	PASS 6.62E-03	35800	SCQ528 +zSide 45.0	3.78E+03 1.03E+08 1.27E+01 -1.10E-02 1.5 0.022 CurrSupE 3.08E+06 8.05E-01 7.06E+03 1.03E+08 1.27E+01 -1.10E-02 1.5 0.022 CurrSupE 2.83E+06 8.20E-01	DNV2010_D-AIR 2.1800E+01 1.5 0.0000E+00 1.0051E+08 DNV2010_D-AIR 2.1810E+01
HS03_ATP	HotS 86959	PASS 2.03E-01	35800	1.23E+02 1.27E+01 1.5	1.03E+08 1.10E-02 1.5	DNV2010_D-AIR 2.1800E+01 1.5	HS03_CBM	t1/2 87853	PASS 3.54E-03	35800	SCQ528 +zSide 45.0	1.43E+03 1.02E+08 1.27E+01 1.10E-02 1.5 0.022 CurrSupE 2.83E+06 8.20E-01	9.6607E-03 8.6810E+07 DNV2010_D-AIR 2.1829E+01
HS03_ATP	t1/2 95661	PASS 1.14E-01	35800	7.30E+06 2.19E+02 1.27E+01 1.5	8.12E-01 1.03E+08 1.10E-02 1.5	DNV2010_D-AIR 2.1800E+01 1.5	HS03_CBM	t3/2 87854	PASS 7.08E-04	35801	SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.03E+08 1.27E+01 -1.10E-02 1.5 0.022 CurrSupE 2.16E+06 8.40E-01	2.8978E-02 5.9274E+07
HS03_ATP	t3/2 95662	PASS 2.31E-02	35799	6.24E+06 1.08E+03 1.27E+01 1.5	8.10E-01 1.03E+08 1.10E-02 1.5	DNV2010_D-AIR 2.1800E+01 1.5	HS03_CTP	HotS 86959	PASS 2.68E-02	32892	SCQ528 -zSide 45.0	9.33E+02 1.02E+08 1.27E+01 1.10E-02 1.5 0.022 CurrSupE 3.70E+06 7.53E-01	DNV2010_D-AIR 2.1800E+01 1.5 0.0000E+00 1.5695E+08
HS03_ABP	HotS 86959	PASS 2.58E-01	35800	9.67E+01 1.27E+01 1.5	1.02E+08 -1.10E-02 1.5	DNV2010_D-AIR 2.1800E+01 1.5	HS03_CTP	t1/2 87853	PASS 1.10E-02	32892	SCQ528 -zSide 45.0	9.33E+02 1.02E+08 1.27E+01 1.10E-02 1.5 0.022 CurrSupE 3.70E+06 7.53E-01	DNV2010_D-AIR 2.1810E+01 1.5 0.0000E+00 1.5695E+08
HS03_ABP	t1/2 95661	PASS 1.49E-01	35800	6.38E+06 1.67E+02 1.27E+01 1.5	7.27E-01 1.02E+08 -1.10E-02 1.5	DNV2010_D-AIR 2.1800E+01 1.5	HS03_CTP	t3/2 87854	PASS 9.55E-04	32891	SCQ528 -zSide 45.0	2.50E+04 1.03E+08 1.27E+01 1.10E-02 1.5 0.022 CurrSupE 1.74E+06 7.46E-01	2.1829E+01 2.1829E+01 2.8978E-02 7.6535E+07
HS03_ABP	t3/2 95662	PASS 3.75E-02	35799	5.41E+06 6.66E+02 1.27E+01 1.5	7.24E-01 1.03E+08 -1.10E-02 1.5	DNV2010_D-AIR 2.1800E+01 1.5	HS03_CBP	HotS 86959	PASS 8.03E-03	32892	SCQ528 +zSide 45.0	3.11E+03 1.03E+08 1.27E+01 -1.10E-02 1.5 0.022 CurrSupE 3.18E+06 8.02E-01	DNV2010_D-AIR 2.1800E+01 1.5 0.0000E+00 1.0505E+08
HS03_BTM	HotS 86959	PASS 1.93E-02	35660	1.29E+03 1.27E+01 1.5	1.02E+08 1.10E-02 1.5	DNV2010_D-AIR 2.1800E+01 1.5	HS03_CBP	t1/2 87853	PASS 3.96E-03	32892	SCQ528 +zSide 45.0	6.31E+03 1.03E+08 1.27E+01 -1.10E-02 1.5 0.022 CurrSupE 2.87E+06 8.17E-01	DNV2010_D-AIR 2.1810E+01 1.5 9.6607E-03 8.8920E+07
HS03_BTM	t1/2 87405	PASS 9.30E-04	35660	3.35E+06 2.69E+03 1.27E+01 1.5	7.45E-01 1.02E+08 1.10E-02 1.5	DNV2010_D-AIR 2.1790E+01 1.5	HS03_CBP	t3/2 87854	PASS 6.62E-04	32891	SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.03E+08 1.27E+01 -1.10E-02 1.5 0.022 CurrSupE 2.13E+06 8.41E-01	DNV2010_D-AIR 2.1829E+01 1.5 2.8978E-02 5.8212E+07
HS03_BTM	t3/2 87406	PASS 1.34E-03	35691	2.80E+06 1.87E+04 1.27E+01 1.5	7.41E-01 1.01E+08 1.10E-02 1.5	DNV2010_D-AIR 2.1771E+01 1.5	Number of hotspots printed : 24 Number of hotspots failed : 0 Number of interpolation points failed: 0						
HS03_BBM	HotS 86959	PASS 5.66E-03	35660	4.42E+03 1.27E+01 1.5	1.02E+08 -1.10E-02 1.5	DNV2010_D-AIR 2.1800E+01 1.5	*****						
HS03_BBM	t1/2 87405	PASS 2.96E-03	35660	0.022 3.33E+06 8.43E+03 1.27E+01 1.5	0.0000E+00 8.46E-01 1.02E+08 -1.10E-02 1.5	DNV2010_D-AIR 2.1790E+01 1.5							
HS03_BBM	t3/2 87406	PASS 5.29E-04	35691	0.022 3.04E+06 2.50E+04 1.27E+01 1.5	9.6588E-03 8.61E-01 1.03E+08 -1.10E-02 1.5	DNV2010_D-AIR 2.1771E+01 1.5							
HS03_BTP	HotS 86959	PASS 3.00E-02	32720	8.35E+02 1.27E+01 1.5	1.01E+08 1.10E-02 1.5	DNV2010_D-AIR 2.1800E+01 1.5							
HS03_BTP	t1/2 87405	PASS 1.29E-02	32720	0.022 3.77E+06 1.94E+03 1.27E+01 1.5	0.0000E+00 7.48E-01 1.01E+08 1.10E-02 1.5	DNV2010_D-AIR 2.1790E+01 1.5							
HS03_BTP	t3/2 87406	PASS 1.24E-03	32721	0.022 3.03E+06 2.01E+04 1.27E+01 1.5	7.42E-01 1.01E+08 1.10E-02 1.5	DNV2010_D-AIR 2.1771E+01 1.5							
HS03_BBP	HotS 86959	PASS 7.35E-03	32720	0.022 3.40E+03 1.27E+01 1.5	1.02E+08 -1.10E-02 1.5	DNV2010_D-AIR 2.1800E+01 1.5							

C.2.2.3 Lastro

A seguir, são apresentadas as listagens do STOFAT com os resultados da análise espectral de fadiga para cada um dos *hot spots* considerados, nas condições ambientais da Baía de Santos, para a condição de lastro:

11-MAR-2018 11:54 PROGRAM: SESAM STOFAT 3.5-07 06-MAY-2016 PAGE: 8									
STOCHASTIC HOTSPOT fatigue check results									
Run: FHS Superelement MODEL									
Priority:..... Selected Hotspots									
Usage factor : Above 0.00									
Design Fatigue Life: 25.0 Years SUB PAGE: 2									
HotName	FatPnt atNode	Stat	UsageFac	Element EleType	AccFatLif	StrCycle	SNCurve	Z-coordinate	
				atSide WnlAng	AxialScf ElThick WeisScale	BendScf RefSyst WeisShape	ShearScf DistanceToHot StressRange		
		PASS	4.05E-04	27575 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5	1.06E+08 2.16E+01 1.5	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01		83962
		PASS	2.89E-02	31690 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5	1.06E+08 2.16E+01 1.5	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01		83963
		PASS	7.63E-01	32006 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5	1.06E+08 2.16E+01 1.5	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01		83962
		PASS	3.96E-01	32006 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5	1.06E+08 2.16E+01 1.5	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01		85287
		PASS	5.31E-02	31974 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5	1.06E+08 2.16E+01 1.5	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01		85288
		PASS	7.05E-01	32104 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5	1.06E+08 2.16E+01 1.5	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01		82213
		PASS	3.96E-01	32104 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5	1.06E+08 2.16E+01 1.5	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01		85287
		PASS	8.40E-02	32103 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5	1.06E+08 2.16E+01 1.5	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01		85288
		PASS	1.49E-05	32006 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5	1.06E+08 2.16E+01 1.5	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01		82213
		PASS	1.77E-05	32006 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5	1.06E+08 2.16E+01 1.5	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01		82727
		PASS	4.25E-05	31090 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5	1.06E+08 2.16E+01 1.5	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01		82728
		PASS	1.80E-05	31089 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5	1.06E+08 2.16E+01 1.5	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01		82213
		PASS	2.07E-05	31089 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5	1.06E+08 2.16E+01 1.5	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01		82727
		PASS	4.05E-05	32029 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5	1.06E+08 2.16E+01 1.5	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01		82728
		PASS	2.01E-05	32104 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5	1.06E+08 2.16E+01 1.5	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01		82213
		PASS	2.40E-05	32104 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5	1.06E+08 2.16E+01 1.5	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01		83067
		PASS	3.61E-05	31217 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5	1.06E+08 2.16E+01 1.5	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01		83068
		PASS	2.32E-05	31218 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5	1.06E+08 2.16E+01 1.5	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01		82213
		PASS	2.70E-05	31218 SCQ528 +zSide 45.0	2.50E+04 1.02E+01 1.5	1.06E+08 2.16E+01 1.5	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01		83067
		PASS	3.58E-05	32105 SCQ528	2.50E+04 1.02E+01 1.5	1.06E+08 2.16E+01 1.5	DNV2010_D-AIR 2.5750E+01		83068

			+zSide	1.5	1.5	1.5		-zSide	1.5	1.5	1.5	
			45.0	0.0187	CurrSupE	2.8978E-02		45.0	0.022	CurrSupE	0.0000E+00	
				1.22E+06	8.56E-01	2.8717E+07			7.71E+06	8.51E-01	1.9510E+08	
H503_ATM	HotS	PASS 6.36E-01	35660	3.93E+01	1.05E+08	DNV2010_D-AIR	H503_BTP	t1/2	PASS 1.04E-01	32720	DNV2010_D-AIR	
86959			SCQS28	1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01	87405			SCQS28	DNV2010_D-AIR	
			-zSide	1.5	1.5					-zSide	2.1790E-01	
			45.0	0.022	CurrSupE	0.0000E+00				45.0	9.6588E-03	
				1.17E+07	9.02E-01	2.4610E+08				0.022	CurrSupE	6.58E+06
H503_ATM	t1/2	PASS 3.83E-01	35660	6.52E+01	1.05E+08	DNV2010_D-AIR	H503_BTP	t3/2	PASS 2.28E-03	32721	DNV2010_D-AIR	
95661			SCQS28	1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01	87406			SCQS28	DNV2010_D-AIR	
			-zSide	1.5	1.5					-zSide	2.1771E+01	
			45.0	0.022	CurrSupE	9.6588E-03				45.0	2.8976E-02	
				1.02E+07	9.02E-01	2.1303E+08				0.022	CurrSupE	7.9516E+07
H503_ATM	t3/2	PASS 2.18E-02	35617	1.15E+03	1.05E+08	DNV2010_D-AIR	H503_BBP	HotS	PASS 1.85E-03	32720	DNV2010_D-AIR	
95662			SCQS28	1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01	86959			SCQS28	DNV2010_D-AIR	
			-zSide	1.5	1.5					-zSide	2.1800E+01	
			45.0	0.022	CurrSupE	2.8977E-02				45.0	0.0000E+00	
				4.20E+06	8.16E-01	1.2313E+08				0.022	CurrSupE	2.93E+06
H503_ABM	HotS	PASS 8.95E-01	35660	2.79E+01	1.03E+08	DNV2010_D-AIR	H503_BBP	t1/2	PASS 9.74E-04	32720	DNV2010_D-AIR	
86959			SCQS28	1.27E+01	-1.10E-02	2.1800E+01	87405			SCQS28	DNV2010_D-AIR	
			+zSide	1.5	1.5					+zSide	2.1790E+01	
			45.0	0.022	CurrSupE	0.0000E+00				45.0	0.022	
				1.04E+07	7.72E-01	3.7873E+08				0.022	CurrSupE	9.6588E-03
H503_ABM	t1/2	PASS 5.24E-01	35660	4.77E+01	1.03E+08	DNV2010_D-AIR	H503_BBP	t3/2	PASS 2.35E-04	32721	DNV2010_D-AIR	
95661			SCQS28	1.27E+01	-1.10E-02	2.1800E+01	87406			SCQS28	DNV2010_D-AIR	
			+zSide	1.5	1.5					+zSide	2.1771E+01	
			45.0	0.022	CurrSupE	9.6588E-03				45.0	2.8976E-02	
				8.75E+06	7.68E-01	3.1761E+08				0.022	CurrSupE	4.1113E+07
H503_ABM	t3/2	PASS 1.26E-01	35617	1.99E+02	1.03E+08	DNV2010_D-AIR	H503_CTM	HotS	PASS 1.12E-01	35800	DNV2010_D-AIR	
95662			SCQS28	1.27E+01	-1.10E-02	2.1800E+01	86959			SCQS28	DNV2010_D-AIR	
			+zSide	1.5	1.5					-zSide	2.1800E+01	
			45.0	0.022	CurrSupE	2.8977E-02				45.0	0.0000E+00	
				5.65E+06	7.60E-01	2.1373E+08				0.022	CurrSupE	6.73E+06
H503_ATP	HotS	PASS 6.32E-01	35800	3.96E+01	1.05E+08	DNV2010_D-AIR	H503_CTM	t1/2	PASS 6.19E-02	35800	DNV2010_D-AIR	
86959			SCQS28	1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01	87853			SCQS28	DNV2010_D-AIR	
			-zSide	1.5	1.5					-zSide	2.1810E+01	
			45.0	0.022	CurrSupE	0.0000E+00				45.0	0.022	
				1.18E+07	9.06E-01	2.4593E+08				0.022	CurrSupE	9.6607E-03
H503_ATP	t1/2	PASS 3.81E-01	35800	6.56E+01	1.05E+08	DNV2010_D-AIR	H503_CTM	t3/2	PASS 1.32E-03	35801	DNV2010_D-AIR	
95661			SCQS28	1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01	87854			SCQS28	DNV2010_D-AIR	
			-zSide	1.5	1.5					-zSide	2.1829E+01	
			45.0	0.022	CurrSupE	9.6588E-03				45.0	2.8978E-02	
				1.03E+07	9.06E-01	2.1276E+08				0.022	CurrSupE	7.88E-01
H503_ATP	t3/2	PASS 2.20E-02	35799	1.14E+03	1.06E+08	DNV2010_D-AIR	H503_CBM	HotS	PASS 2.65E-03	35800	DNV2010_D-AIR	
95662			SCQS28	1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01	86959			SCQS28	DNV2010_D-AIR	
			-zSide	1.5	1.5					+zSide	2.1800E+01	
			45.0	0.022	CurrSupE	2.8977E-02				45.0	0.0000E+00	
				4.21E+06	8.16E-01	1.2332E+08				0.022	CurrSupE	3.34E+06
H503_ABP	HotS	PASS 7.83E-01	35800	3.19E+01	1.03E+08	DNV2010_D-AIR	H503_CBM	t1/2	PASS 1.62E-03	35800	DNV2010_D-AIR	
86959			SCQS28	1.27E+01	-1.10E-02	2.1800E+01	87853			SCQS28	DNV2010_D-AIR	
			+zSide	1.5	1.5					+zSide	2.1810E+01	
			45.0	0.022	CurrSupE	0.0000E+00				45.0	0.022	
				9.85E+06	7.68E-01	3.5861E+08				0.022	CurrSupE	9.6607E-03
H503_ABP	t1/2	PASS 4.67E-01	35800	5.35E+01	1.03E+08	DNV2010_D-AIR	H503_CBM	t3/2	PASS 5.39E-04	35801	DNV2010_D-AIR	
95661			SCQS28	1.27E+01	-1.10E-02	2.1800E+01	87854			SCQS28	DNV2010_D-AIR	
			+zSide	1.5	1.5					+zSide	2.1829E+01	
			45.0	0.022	CurrSupE	9.6588E-03				45.0	2.8978E-02	
				8.37E+06	7.65E-01	3.0853E+08				0.022	CurrSupE	4.8014E+07
H503_ABP	t3/2	PASS 1.28E-01	35799	1.95E+02	1.03E+08	DNV2010_D-AIR	H503_CTP	HotS	PASS 1.59E-01	32892	DNV2010_D-AIR	
95662			SCQS28	1.27E+01	-1.10E-02	2.1800E+01	86959			SCQS28	DNV2010_D-AIR	
			+zSide	1.5	1.5					-zSide	2.1800E+01	
			45.0	0.022	CurrSupE	2.8977E-02				45.0	0.0000E+00	
				5.69E+06	7.60E-01	2.1472E+08				0.022	CurrSupE	7.35E+06
H503_BTM	HotS	PASS 1.46E-01	35660	1.71E+02	1.06E+08	DNV2010_D-AIR	H503_CTP	t1/2	PASS 8.23E-02	32892	DNV2010_D-AIR	
86959			SCQS28	1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01	87853			SCQS28	DNV2010_D-AIR	
			-zSide	1.5	1.5					-zSide	2.1810E+01	
			45.0	0.022	CurrSupE	0.0000E+00				45.0	0.022	
				7.25E+06	8.56E-01	1.7935E+08				0.022	CurrSupE	9.6607E-03
H503_BTM	t1/2	PASS 8.31E-02	35660	3.01E+02	1.07E+08	DNV2010_D-AIR	H503_CTP	t3/2	PASS 1.28E-03	32891	DNV2010_D-AIR	
87405			SCQS28	1.27E+01	1.10E-02	2.1790E+01	87854			SCQS28	DNV2010_D-AIR	
			-zSide	1.5	1.5					-zSide	2.1829E+01	
			45.0	0.022	CurrSupE	9.6588E-03				45.0	2.8978E-02	
				6.29E+06	8.58E-01	1.5421E+08				0.022	CurrSupE	6.9762E+07
H503_BTM	t3/2	PASS 2.47E-03	35691	1.01E+04	1.08E+08	DNV2010_D-AIR	H503_CBP	HotS	PASS 3.49E-03	32892	DNV2010_D-AIR	
87406			SCQS28	1.27E+01	1.10E-02	2.1771E+01	86959			SCQS28	DNV2010_D-AIR	
			+zSide	1.5	1.5					+zSide	2.1800E+01	
			45.0	0.022	CurrSupE	2.8976E-02				45.0	0.0000E+00	
				2.30E+06	7.75E-01	8.0905E+07				0.022	CurrSupE	3.50E+06
H503_BBM	HotS	PASS 1.09E-03	35660	2.29E+04	1.10E+08	DNV2010_D-AIR	H503_CBP	t1/2	PASS 1.92E-03	32892	DNV2010_D-AIR	
86959			SCQS28	1.27E+01	-1.10E-02	2.1800E+01	87853			SCQS28	DNV2010_D-AIR	
			+zSide	1.5	1.5					+zSide	2.1810E+01	
			45.0	0.022	CurrSupE	0.0000E+00				45.0	0.022	
				2.65E+06	8.93E-01	5.8362E+07				0.022	CurrSupE	1.5
H503_BBM	t1/2	PASS 6.21E-04	35660	2.50E+04	1.10E+08	DNV2010_D-AIR	H503_CBP	t3/2	PASS 5.17E-04	32891	DNV2010_D-AIR	
87405			SCQS28	1.27E+01	-1.10E-02	2.1790E+01	87854			SCQS28	DNV2010_D-AIR	
			+zSide	1.5	1.5					+zSide	2.1829E+01	
			45.0	0.022	CurrSupE	9.6588E-03				45.0	2.8978E-02	
				2.42E+06	9.03E-01	5.0950E+07				0.022	CurrSupE	2.37E+06
H503_BBM	t3/2	PASS 2.40E-04	35691	2.50E+04	1.11E+08	DNV2010_D-AIR				9.09E-01	4.7680E+07	
87406			SCQS28	1.27E+01	-1.10E-02	2.1771E+01						
			+zSide	1.5	1.5							
			45.0	0.022	CurrSupE	2.8976E-02						
				1.98E+06	8.99E-01	4.1236E+07						
H503_BTP	HotS	PASS 1.97E-01	32720	1.27E+02	1.06E+08	DNV2010_D-AIR						
86959			SCQS28	1.27E+01	1.10E-02	2.1800E+01						
				Number of hotspots printed : 24								
				Number of hotspots failed : 0								
				Number of interpolation points failed: 0								
