



ANÁLISE DE FADIGA DE ESTRUTURAS OFFSHORE TIPO TOPSIDE – ESTUDO DE CASO

Ana Maria Fernandes Valadão

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Gilberto Bruno Ellwanger

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2011

ANÁLISE DE FADIGA DE ESTRUTURAS OFFSHORE TIPO TOPSIDE –
ESTUDO DE CASO

Ana Maria Fernandes Valadão

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO
DE ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinada por:

Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, D.Sc.

Prof. José Antonio Fontes Santiago, D.Sc.

Pesq. José Renato Mendes de Sousa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO de 2011

Valadão, Ana Maria Fernandes

Análise de Fadiga de Estruturas Offshore Tipo
Topside – Estudo de Caso/ Ana Maria Fernandes Valadão.
– Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2011.

XII, 73.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Gilberto Bruno Ellwanger

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/
Curso de Engenharia Civil, 2011.

Referencias Bibliográficas: p. 72-73.

1. Fadiga. 2. Análise de Fadiga Estocástica. 3.
Estruturas *Offshore* tipo *Topsides*. 4. Plataformas
Flutuantes. 5. FPSO. I. Ellwanger, Gilberto Bruno. II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola
Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Título.

“Á Jesus Eucarístico”

AGRADECIMENTOS

Ao professor Gilberto Bruno Ellwanger pela orientação dada para o desenvolvimento deste trabalho. E pelos ensinamentos dados nas disciplinas cursadas ao longo de minha graduação.

Ao Alessandro Ferreira Batalha pela ajuda tanto na parte teórica quanto na prática de projetos em análise de fadiga de estruturas *offshore*. Por ceder à ferramenta computacional, de sua autoria, *FATDAM 2.0* para utilizar neste trabalho. E pela disponibilidade em sanar minhas dúvidas na realização deste trabalho e em meu estágio na Exactum Consultoria e Projetos.

À Exactum Consultoria e Projetos, e aos seus colaboradores, pela oportunidade de trabalhar num ambiente muito agradável e motivador. E por me ajudar na escolha da área de estruturas *offshore* para seguir em minha vida profissional.

À professora Michèle Schubert Pfeil pela oportunidade de fazer iniciação científica no LABEST e por estar sempre disposta a esclarecer as minhas dúvidas.

Aos meus amigos de curso que fizeram da universidade um lugar muito agradável. A todos que me ajudaram, não só com a teoria, mas com o incentivo e a amizade.

Aos meus amigos de fé que sempre me apoiaram e oraram por mim. Agradeço a presença, amizade e o amor de vocês.

Aos meus pais, José Lopes Valadão e Eulina Fernandes Valadão, esta conquista é mais de vocês do que minha. Muito obrigada pela oportunidade de crescer em uma verdadeira família que, apesar das diferenças, sabe se amar e apoiar.

Às minhas irmãs, Ana Paula, Maria Fernanda e Mariana pelo incentivo, amizade e orações. E à minhas avós, Yvonne e Maria José, pelo amor, cuidado e interseção desde minha infância.

Ao meu namorado, Daniel Davim Rebello, pelo amor, carinho, apoio e compreensão ao longo de todos esses anos de graduação. Obrigada, sem você eu teria desistido.

Ao meu amado Deus por me fazer experimentar a cada dia Seu amor misericordioso em minha vida. Por me proteger e abençoar. À Bem-aventurada Virgem Maria, minha mãe, pela interseção e amizade. Ao meu anjo da guarda por nunca me deixar desamparada.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Análise de Fadiga de Estruturas Offshore Tipo Topsides – Estudo de Caso

Ana Maria Fernandes Valadão

Fevereiro/2011

Orientador: Gilberto Bruno Ellwanger

Curso: Engenharia Civil

Quando uma estrutura é submetida a carregamentos de natureza cíclica pode ocorrer o fenômeno de fadiga, cujos efeitos podem ser pequenas trincas ou até mesmo a ruptura da estrutura. Os carregamentos dinâmicos que devem ser considerados na análise de fadiga de estruturas *offshore* são gerados principalmente por ondas e correntes marítimas e pelo vento. O objetivo deste trabalho é a análise de fadiga estocástica de um componente de uma estrutura *Topside* devido à incidência de ondas sobre a unidade flutuante. Esta análise considera a natureza aleatória das cargas provenientes das ondas do mar. O dano à fadiga é calculado com base no espectro de resposta de tensões que varia para cada calado, estado de mar, direção de incidência de ondas e junta da estrutura.

Palavras-chave: Fadiga, Estruturas Topsides, Análise de Fadiga Estocástica.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

FATIGUE ANALYSIS OF TOPSIDE OFFSHORE STRUCTURES – A CASE STUDY

Ana Maria Fernandes Valadão

Fevereiro/2011

Advisor: Gilberto Bruno Ellwanger

Course: Civil Engineering

When a structure is subject to cyclical loads may happen the phenomenon of fatigue, whose effects may be small cracks or even the break of the structure. The dynamic loads which must be considered in fatigue analysis of offshore structures are generated mostly by ocean waves, ocean currents and wind. The object of this study is the stochastic fatigue analysis of a component of a Topside structure caused by ocean wave's incidences on the floating unit. This analysis considers the random nature of the loads from sea waves. The fatigue damage is calculated based on the stress response spectrum that changes for each draft, sea state, direction of wave incidence and joint structure.

Keywords: Fatigue, Topsides Offshore Structure, Stochastic Fatigue Analysis.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 FPSO E ESTRUTURAS TOPSIDES	3
2.1 PLATAFORMAS FLUTUANTES TIPO FPSO E FSO	3
2.2 ESTRUTURAS TOPSIDES	5
3 DADOS AMBIENTAIS	7
3.1 TEORIA DAS ONDAS.....	7
3.1.1 Ondas Regulares	7
3.1.2 Ondas Irregulares (Randômicas)	8
3.2 REPRESENTAÇÃO DE ESTADO DE MAR IRREGULAR	10
3.2.1 Espectro de Onda	10
3.2.2 Diagrama de Dispersão de Ondas	12
3.3 ASPECTOS TEÓRICOS DA ANÁLISE ESPECTRAL.....	13
4 ANÁLISE DE MOVIMENTOS DO FPSO E FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA.....	16
4.1 EQUAÇÕES DE MOVIMENTOS, ACELERAÇÕES E FORÇAS INERCIAIS	17
4.1.1 Translações	18
4.1.2 Rotações.....	19
4.2 RAO DE DESLOCAMENTO DO NAVIO	21
4.3 RAO DE TENSÕES	23
4.4 ESPECTRO DE RESPOSTA.....	23
5 ANÁLISE DE FADIGA	25
5.1 CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES	26
5.1.1 Fator de Concentração de Tensão.....	28
5.1.2 Hot Spot Stress.....	29
5.2 CURVAS S-N.....	30
5.2.1 Classificação das Curvas S-N.....	31
5.2.2 Efeitos da Espessura	33
5.2.3 Cálculo do Dano e Vida à Fadiga	34
5.3 DANO À FADIGA – ANÁLISE ESPECTRAL	36
5.4 CRITÉRIOS DE PROJETO	40
6 ESTUDO DE CASO	42
6.1 FATDAM 2.0.....	42
6.2 CARACTERÍSTICAS DA UNIDADE FLUTUANTE.....	43
6.3 MODELO ESTRUTURAL E FORÇAS INERCIAIS	44

6.3.1	Condições de Contorno e Ligações do Modelo	46
6.3.2	Propriedades dos Membros.....	47
6.3.3	Carregamento e Forças de Inércia.....	48
6.3.4	Tensões Nominais	52
6.4	DADOS DE FADIGA	53
6.4.1	Dados de Fadiga e o <i>FATDAM 2.0</i>	55
6.5	DADOS AMBIENTAIS.....	56
6.5.1	Diagrama de Dispersão de Ondas	57
6.5.2	Espectros de Mar	58
6.5.3	Dados Ambientais e o <i>FATDAM 2.0</i>	58
6.6	RAO DE DESLOCAMENTOS DO FPSO	60
6.7	ANÁLISE DE FADIGA ESTOCÁSTICA	61
6.8	RAO DE TENSÕES DA ESTRUTURA	64
6.9	ESPECTROS DE RESPOSTA	65
6.10	CÁLCULO DO DANO E VIDA ÚTIL	67
6.10.1	Danos Parciais.....	68
6.10.2	Dano Final Acumulado e Vida à Fadiga.....	69
7	CONCLUSÃO.....	70
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 – FPSO em operação (SBM, 2011)	4
Figura 2-2 – Seção transversal típica de um FPSO (BATALHA, 2009)	5
Figura 3-1 – Principais parâmetros de uma onda regular (BATALHA, 2009).....	8
Figura 3-2 – Onda randômica vista como a soma de ondas regulares (BATALHA, 2009)	9
Figura 3-3 – Representação de um estado de mar irregular (ELLWANGER, 2010).....	9
Figura 3-4 – Representação de um espectro discreto para um espectro contínuo (BATALHA, 2009)	13
Figura 3-5 – Processo de Banda Estreita: (a) Série aleatória; (b) Densidade espectral. (BATALHA, 2009)	14
Figura 3-6 – Processo de Banda Larga: (a) Série aleatória; (b) Densidade espectral. (BATALHA, 2009)	15
Figura 4-1 – Tipos de movimentos do FPSO devido à incidência de ondas.....	16
Figura 4-2 – Movimento de <i>Roll</i> - Forças tangenciais (BHATTACHARYYA, 1978 e BATALHA, 2009).....	21
Figura 4-3 – Aproamento do navio e ângulo de incidência das ondas (BATALHA, 2009).....	22
Figura 4-4 – Modelagem espectral da resposta dinâmica.....	24
Figura 5-1 – Fases do processo de fadiga. (ELLWANGER, 2010)	26
Figura 5-2 – Concentração de Tensões em uma placa com orifício (DNV-RP-C203, 2008).....	27
Figura 5-3 – Desenho esquemático de uma curva S-N (BATALHA, 2009).....	31
Figura 5-4 – Curvas S-N para detalhes construtivos no ar. (DNV-RP-C203, 2008)	32
Figura 6-1 – Tela Inicial do <i>FATDAM 2.0</i>	43
Figura 6-2 – <i>FATDAM 2.0</i> – Características principais da unidade.....	44
Figura 6-3 – Modelo estrutural – Vista geral	45

Figura 6-4 – Modelo estrutural – Seção longitudinal típica	45
Figura 6-5 – Modelo estrutural – Seção transversal típica	46
Figura 6-6 – Modelo estrutural – Condições de Contorno	46
Figura 6-7 – Propriedades dos membros	47
Figura 6-8 – Geometria da seção transversal do membro 39 (GERDAU-AÇOMINAS, 2008).....	48
Figura 6-9 – Carga da Tubulação (kN/cm).....	49
Figura 6-10 – Componentes de tensão e convenções de eixos locais	52
Figura 6-11 – Classificação da Junta (da DNV-RP-C203, 2008).....	54
Figura 6-12 – Tela de Tensões para acelerações unitárias	56
Figura 6-13 – Espectros de ondas dos estados de mar de $H_s = 0.25\text{m}$ à $H_s = 3.25\text{m}$	59
Figura 6-14 – Espectros de ondas de estados de mar de $H_s = 3.75\text{m}$ à $H_s = 6.25\text{m}$	59
Figura 6-15 – <i>FATDAM 2.0</i> – Tabelas de RAO de deslocamentos	60
Figura 6-16 – RAOs de deslocamentos da unidade fictícia para calado intermediário com direção de incidência de ondas de 90° (BATALHA, 2009)	61
Figura 6-17 – <i>FATDAM 2.0</i> – Análise estocástica – Dados de entrada	62
Figura 6-18 – <i>FATDAM 2.0</i> – Opções de análise e apresentação	63
Figura 6-19 – <i>FATDAM 2.0</i> – Resumo e monitoramento da análise	64
Figura 6-20 – RAO de Tensões	65
Figura 6-21 – Espectro de resposta $H_s = 0.25\text{m}$ à $H_s = 1.75\text{m}$	66
Figura 6-22 – Espectro de resposta $H_s = 2.25\text{m}$ à $H_s = 3.75\text{m}$	66
Figura 6-23 – Espectro de resposta $H_s = 4.25\text{m}$ à $H_s = 6.25\text{m}$	67
Figura 6-24 – <i>FATDAM 2.0</i> – Resumo da análise.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 5-1 – Parâmetros das curvas S-N para detalhes no ar. (DNV-RP-C203, 2008) .	32
Tabela 5-2 – Fatores de segurança para cálculo de fadiga	40
Tabela 6-1 – Posição do Pipe-Rack com relação ao centro de movimentos do FPSO...	43
Tabela 6-2 – Propriedades do membro 39 (GERDAU-AÇOMINAS, 2008).....	48
Tabela 6-3 – Resumo das cargas estáticas sobre o <i>Pipe-Rack</i> na direção $-Z$	49
Tabela 6-4 – Carregamentos auxiliares	50
Tabela 6-5 – Combinações para obter as forças inerciais	50
Tabela 6-6 – Tensões no membro 39 (kN/cm^2).....	53
Tabela 6-7 – Características da junta de apoio e dados de fadiga	55
Tabela 6-8 – Diagrama de dispersão de ondas – Dado de “Projeto”	57
Tabela 6-9 – Diagrama de dispersão de ondas – Anual	58

1 INTRODUÇÃO

Diversos desafios tecnológicos surgiram devido à necessidade de exploração/exploração de petróleo em lâminas d'água cada vez mais profundas.

Para desenvolver as atividades da indústria de petróleo e gás nestas regiões, ferramentas numéricas sofisticadas são fundamentais para a análise do comportamento de sistemas *offshore*, tais como, de unidade flutuante, do sistema de ancoragem e do sistema de *risers*. (BRANDÃO, 2008)

Este trabalho tem por objetivo a análise de fadiga em estruturas de plataformas flutuantes devido aos movimentos cíclicos gerados pela incidência de ondas na unidade flutuante.

A metodologia utilizada para a análise de fadiga se baseia no comportamento aleatório das ondas do mar que a unidade flutuante está submetida. Esta análise baseada em processos aleatórios é conhecida como estocástica.

Neste estudo, foi avaliado o dano estrutural devido à fadiga de um componente estrutural do *Topside* de um FPSO. O dano estrutural e a vida fadiga deste estudo de caso foram realizados com auxílio de uma ferramenta computacional chamada *FATDAM 2.0*, de propriedade da Exactum Consultoria e Projetos Ltda.

A estrutura de organização deste trabalho é apresentada a seguir:

- Capítulo 2 (FPSO e Estruturas *Topsides*, página 3): Tipo de unidade flutuante, o FPSO e o tipo de estrutura que serão estudados;
- Capítulo 3 (Dados Ambientais, página 7): Apresentação de conceitos ambientais necessários para a análise de fadiga estocástica;
- Capítulo 4 (Análise de Movimentos do FPSO e Funções de Transferência, página 16): Utilização de dados provenientes dos movimentos das embarcações para a análise de fadiga;
- Capítulo 5 (Análise de Fadiga, página 25): Conceitos de fadiga e método de cálculo do dano à fadiga e vida fadiga;

- Capítulo 6 (Estudo de Caso, pagina 42): Análise de fadiga de um componente estrutural – Estudo de Caso;
- Capítulo 7 (Conclusão, página 70): Conclusão do que foi estudado e sugestões para trabalhos futuros;
- Capítulo 8 (Referências Bibliográficas, página 72): Referências bibliográficas.

2 FPSO E ESTRUTURAS TOPSIDES

O tipo de estrutura e o tipo de plataforma *offshore* que será estudado neste trabalho serão apresentados neste capítulo.

2.1 PLATAFORMAS FLUTUANTES TIPO FPSO E FSO

Devido à necessidade de exploração/exploração de petróleo em lâminas d'água cada vez mais profundas plataformas flutuantes se tornaram fundamentais na exploração e produção de petróleo.

Plataforma flutuante é uma estrutura complacente posicionada através de um sistema de ancoragem, caracterizada por apresentar grandes deslocamentos sob a ação das cargas ambientais e contar com a contribuição dos efeitos de inércia em sua estabilidade.

Navios tem se destacado como plataformas flutuantes na indústria de petróleo e gás.

Inicialmente, os navios eram utilizados somente para as operações de perfuração e/ou completação, chamados de navios sonda. Estes são navios de pequeno porte dotados de um sistema de posicionamento dinâmico, com uma sonda de perfuração. Posteriormente, os navios foram usados para produção através da conversão de navios petroleiros ou graneleiros em FPSO (“*Floating Production Storage and Offloading*”). (RIBEIRO, 1999)

Os FPSOs são navios ancorados com capacidade de produzir, armazenar e escoar a produção de petróleo e/ou gás. No convés, é instalada uma planta de processo para separar e tratar os fluidos produzidos nos poços. Depois de separado da água e do gás, o petróleo é armazenado nos tanques do próprio navio. Periodicamente, o óleo é escoado (transferido) para um navio, chamado aliviador, que atraca na popa do FPSO para receber o petróleo armazenado em seus tanques e transportá-lo para terra. O gás comprimido é enviado para a terra através de gasodutos e/ou re-injetado no reservatório. (NASCIMENTO, 2006)

Estes navios são muitas vezes utilizados como unidades de apoio para outras plataformas para apenas armazenar e transportar óleo, sendo chamados neste caso de FSO (*Floating Storage and Offloading*). (BATALHA, 2009)

A Figura 2-1 ilustra um exemplo de FPSO em operação no Brasil.



Figura 2-1 – FPSO em operação (SBM, 2011)

Para posicionamento e ancoragem dos FPSOs, existem atualmente diversos sistemas desenvolvidos, sendo o mais comum em navios convertidos em FPSOs o sistema composto por um ponto simples de ancoragem, ou SPM (*Single Point Mooring*). Em associação com um *Turret* interno, este sistema caracteriza-se por permitir que o navio gire livremente ao redor das linhas de ancoragem e *risers* e fique orientado na direção das cargas ambientais, reduzindo, por conseguinte, a atuação destas na estrutura. Outra opção seria a amarração com quadro de ancoragem SMS (*Spread Mooring System*) que consiste na adoção de linhas distribuídas em torno da embarcação, expondo o navio a maiores efeitos de cargas ambientais, fornecendo um alinhamento parcial com a pior direção de carregamentos ambientais. Neste caso, o aproamento do navio é fixo, com incidências de ondas em várias direções. (BATALHA, 2009)

2.2 ESTRUTURAS TOPSIDES

Nos conveses das unidades flutuantes, existem sistemas de Óleo, Compressão de Gás, Tratamento de Óleo, Utilidades, Geração de Energia, Injeção de Água, *Turret*, área de Carga e descarga e outros. Para isto são necessários equipamentos de grande porte que ficam posicionados sobre grandes estruturas.

As estruturas que estão sobre o convés principal da unidade são chamadas de estruturas *Topsides*. A Figura 2-2 contém uma seção transversal típica de uma unidade do tipo FPSO mostrando alguns módulos da planta de processo, e outras estruturas tipo *Topside*.

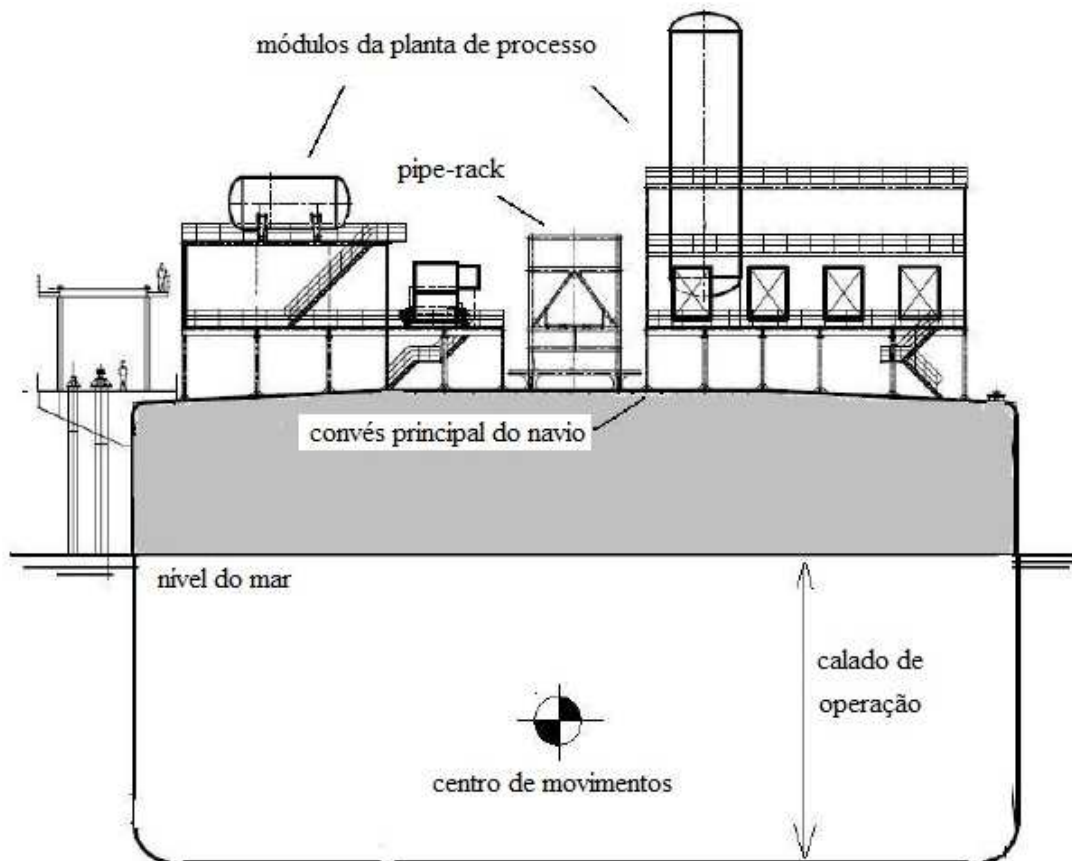


Figura 2-2 – Seção transversal típica de um FPSO (BATALHA, 2009)

Estas estruturas estão continuamente submetidas a cargas de movimentos (inerciais) de natureza cíclica, com grandes variações de tensões que podem levar a ruína da estrutura por fadiga, principalmente em juntas de conexões dos apoios na integração com o convés principal da unidade. (BATALHA, 2009)

As unidades flutuantes estão altamente sujeitos aos efeitos de cargas ambientais. Neste estudo, será analisado um caso de fadiga em uma estrutura *Topside* devido às cargas cíclicas geradas pela incidência de ondas sobre o FPSO.

3 DADOS AMBIENTAIS

Ações ambientais tais como ondas, correntes marítimas e vento são considerados no projeto de plataformas marítimas. Por ser de natureza cíclica, estes carregamentos dinâmicos são considerados na análise de fadiga destas estruturas.

Será estudado neste trabalho o carregamento hidrodinâmico de ondas que incidem no casco da unidade, pois estas cargas são a principal fonte de demanda à fadiga em estruturas offshore.

Os conceitos apresentados neste capítulo foram baseados em ELLWANGER (2010).

3.1 TEORIA DAS ONDAS

Na análise de fadiga de estruturas *offshore*, o carregamento devido à onda pode ser calculado por métodos determinísticos (ondas regulares) ou por métodos aleatórios (ondas irregulares).

3.1.1 Ondas Regulares

No método determinístico, a estrutura é carregada por uma onda regular aplicando, por exemplo, a Teoria Linear de Airy (Teoria das Ondas Senoidais) para o cálculo do carregamento hidrodinâmico. Esta teoria considera que a altura de onda é pequena quando comparada com o comprimento de onda. Assim, estas ondas regulares de pequena amplitude podem ser simuladas por funções senoidais. (BATALHA, 2009)

Ondas regulares são periódicas e uniformes e possuem um período T e uma altura H . Os principais parâmetros desta onda são apresentados na Figura 3-1.

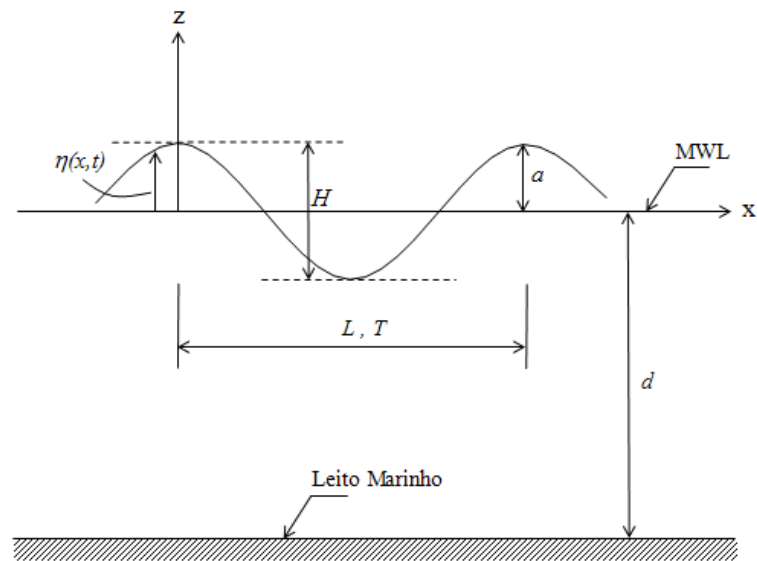


Figura 3-1 – Principais parâmetros de uma onda regular (BATALHA, 2009)

Onde:

L – Comprimento de onda;

H – Altura de onda (distância vertical entre a crista e o cavado);

T – Período (tempo necessário para que sucessivas cristas cruzem o ponto estacionário);

d – Profundidade da lâmina d'água;

MWL – Nível médio do mar (*Mean Water Level*);

η – Elevação da superfície do mar.

3.1.2 Ondas Irregulares (Randômicas)

O estado de mar regular, definido no item anterior, é formado por apenas um trem de ondas. Uma representação mais realística para o comportamento das ondas do mar é o estado de mar irregular. Este é representado pela superposição linear de ondas regulares com diferentes amplitudes, frequências e fases. (BRANDÃO, 2008)

A Figura 3-2 ilustra esta superposição de ondas regulares formando uma onda irregular.

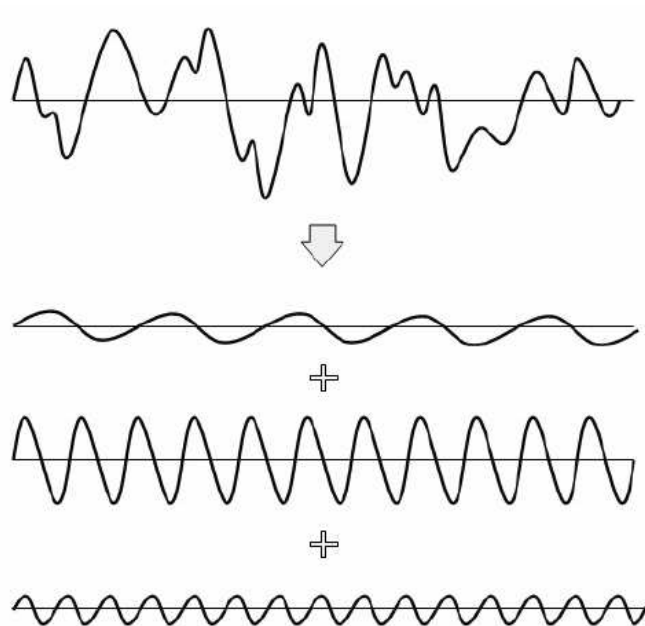


Figura 3-2 – Onda randômica vista como a soma de ondas regulares (BATALHA, 2009)

A Figura 3-3 apresenta alguns parâmetros de um estado de mar irregular.

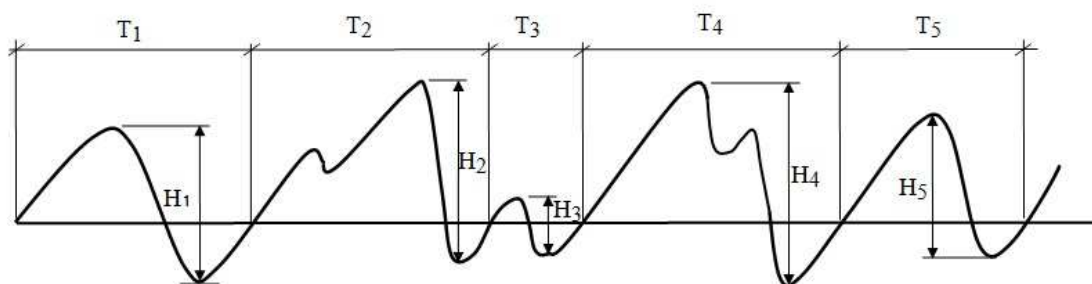


Figura 3-3 – Representação de um estado de mar irregular (ELLWANGER, 2010)

Onde:

T_1, \dots, T_n – Períodos de onda – tempo entre sucessivos cruzamentos da superfície do mar ao nível médio;

H_1, \dots, H_n – Alturas de onda – diferença entre o valor máximo e o valor mínimo dentro de um período de onda.

3.2 REPRESENTAÇÃO DE ESTADO DE MAR IRREGULAR

O carregamento devido ao estado de mar irregular (aleatório) não é constante e não pode ser determinado por uma função, ou seja, não se pode prever com certeza o que ocorrerá em um determinado instante. Este carregamento, conhecido como estocástico, é descrito por suas propriedades estatísticas, tais como média e desvio padrão.

As propriedades estatísticas dos processos aleatórios de interesse de projetos de estruturas offshore podem ser consideradas constantes em eventos de curta duração. Em períodos de longo-prazo estas ações ambientais apresentam variações nos seus parâmetros estatísticos. Por esta razão, no projeto de estruturas marítimas as séries temporais das ações ambientais são divididas em períodos de curta duração (usualmente de 3 horas) e considera-se que em cada um deles o processo é aleatório. A estes eventos ambientais de curto-prazo atribui-se o nome de estado de mar. (NASCIMENTO, 2009)

Um estado de mar pode ser descrito pelos seguintes parâmetros:

- Período de cruzamento zero (T_z) é a média dos valores dos períodos da onda (T_i), exemplificados na Figura 3-3;
- Altura de onda significativa (H_s) é a média do terço mais alto das alturas de onda.

É importante ressaltar que cruzamento zero é a ocorrência onde o histórico de carregamento cruza o nível de carregamento médio.

Os conceitos apresentados a seguir, neste item, foram baseados em BATALHA (2009).

3.2.1 Espectro de Onda

O estado de mar irregular é representado por um modelo espectral.

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 espectro de onda pode ser obtido através de análises de históricos de onda no tempo e também por modelos de espectro obtidos por expressões analíticas descritas por parâmetros estatísticos como H_s e T_z .

Neste trabalho será utilizado o espectro de JONSWAP.

O espectro de JONSWAP pode ser definido pela seguinte expressão:

$$S_{\eta}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \omega^{-5} \exp\left[-1,25 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right] \cdot \gamma^{\exp\left[-\frac{(\omega-\omega_p)^2}{2 \cdot \tau^2 \omega_p^2}\right]}$$

Os parâmetros α , γ e τ são parâmetros de forma, sendo τ fixo – determinado em função da relação entre a frequência ω e a frequência de pico ω_p .

Os parâmetros α , γ e são tabelados em função de H_s e T_z . A frequência angular de pico ω_p corresponde à frequência no valor máximo de $S(\omega)$.

O espectro de JONSWAP teve origem em um projeto no Mar do Norte de onde vem seu nome JOint North Sea WAve Project. A PETROBRAS propôs empregar o espectro de JONSWAP ajustado para as condições de mar da Bacia de Campos estabelecendo relações específicas para determinar os parâmetros de forma α e γ , a partir de H_s e T_p (período de pico).

O espectro de JONSWAP ajustado para a Bacia de Campos, em termos da frequência f (em Hz):

$$S_{\eta}(f) = \frac{5}{16} H_s^2 \cdot T_p \cdot \left(\frac{f_p}{f}\right)^5 \cdot (1 - 0,287 \cdot \ln \gamma) \cdot \exp\left[-1,25 \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right] \cdot \gamma^{\exp\left[-\frac{(f-f_p)^2}{2\tau^2 f_p^2}\right]}$$

Onde o parâmetro α está implícito na equação e γ ajustado para a Bacia de Campos está conforme a função: $\gamma = 6,4 \cdot T_p^{-0,491}$.

O período de pico é utilizado como alternativa ao período de cruzamento zero pela relação:

$$T_z = T_p \sqrt{\frac{5 + \gamma}{10,89 + \gamma}}$$

3.2.2 Diagrama de Dispersão de Ondas

Para a análise de fadiga espectral, utiliza-se uma tabela com dados dos estudos ambientais que quantifica a probabilidade de ocorrência de cada estado de mar em um período de referência. Estes estudos ambientais são feitos através de análises estatísticas através de medições experimentais e amostragens de resultados.

Os resultados dos estudos ambientais nos fornecem um conjunto de valores de H_s e T_z (ou T_p) para os diversos estados de mar. A representação gráfica destes valores de cada estado de mar, em termos de número ou percentuais de ocorrência, nos dá o Diagrama de Dispersão de Ondas.

Este diagrama representa todos os estados de mar numa determinada localidade, juntamente com as suas frequências de ocorrência. (LOUREIRO FILHO, 2008)

Para cada direção de incidência de onda tem-se um diagrama de dispersão característico, cujos resultados variam de acordo com a estação do ano e as condições ambientais, tais como vento, corrente, etc.

Para representar os diversos estados de mar, normalmente, forma-se um registro a partir de medições de 10 minutos de duração, em um intervalo de 3 horas, durante 1 ano ou mais. Assim, para um ano de registro, a amostra total de estados de mar é de 2920 ocorrências (365d x 24hs / 3hs).

O diagrama de dispersão de ondas apresenta dados necessários para a modelagem dos carregamentos de fadiga, assim como o número total de ciclos por carregamento.

No capítulo 6, será apresentado um caso de análise de fadiga, onde será apresentado o diagrama de dispersão de ondas e o espectro de JONSWAP ajustado para a Baía de Campos utilizados.

3.3 ASPECTOS TEÓRICOS DA ANÁLISE ESPECTRAL

Os conceitos apresentados neste item foram baseados em BATALAHA (2009).

A representação de um espectro pode ser dada de várias formas. Em geral, a ordenada é representada por valores de energia ou densidade de energia e a abscissa é sempre expressa em termos de frequência, que pode se cíclica (Δf em ciclos/s) ou circular ($\Delta \omega$ em rad/s).

A densidade de energia é obtida através da divisão do valor da ordenada de energia pelo incremento de frequência (Δf ou $\Delta \omega$). A vantagem da representação do espectro em termos de densidade de energia é que a área sob a curva resulta na energia total do sistema.

As funções de densidade espectral precisam ser representadas através de formulações que permitam aplicações numéricas com auxílio de ferramentas computacionais. Para este propósito, a função densidade espectral deve ser representada através de séries discretas, conforme ilustrado na Figura 3-4.

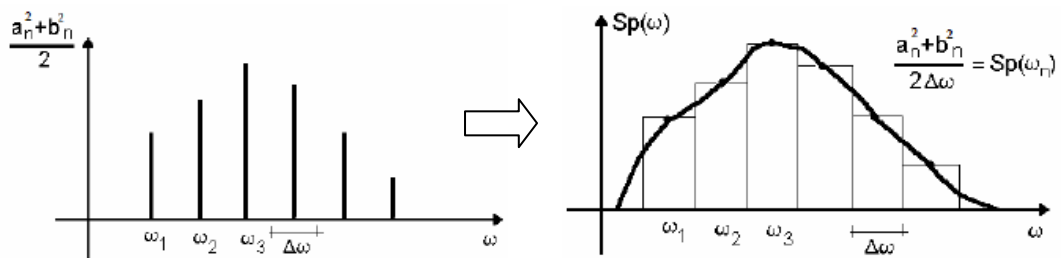


Figura 3-4 – Representação de um espectro discreto para um espectro contínuo (BATALHA, 2009)

Uma boa representação espectral dependerá sempre do nível de discretização adotado, que deverá ser definido criteriosamente, em função da forma do espectro.

Algumas propriedades que podem ser obtidas de um espectro de energia são mostradas a seguir:

- Momentos Espectrais: Os principais parâmetros estatísticos de um processo aleatório podem ser determinados em função destes.

O n-ésimo momento de $S(\omega)$ é dado por:

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n \cdot S(\omega) d\omega = \sum_{i=1}^{\infty} \omega_i^n \cdot S(\omega_i) \Delta\omega$$

O primeiro momento corresponde ao valor médio e o segundo momento corresponde ao valor médio quadrático. O momento de ordem zero corresponde à área do espectro (ou a variância).

- A largura de Banda de um Processo aleatório é medida pelo parâmetro de banda definido a seguir:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{(m_o \cdot m_4 - m_2^2)}{(m_o \cdot m_4)}}; \quad 0 \leq \varepsilon \leq 1$$

Um espectro é considerado de banda estreita quando $\varepsilon \rightarrow 0$. As definições de processos de Banda Larga e Banda Estreita são apresentadas a seguir:

- Processos de Banda Estreita – apresenta um único pico para cada cruzamento ascendente do seu nível médio e sua densidade espectral é concentrada em uma pequena faixa de frequências (ver Figura 3-5).

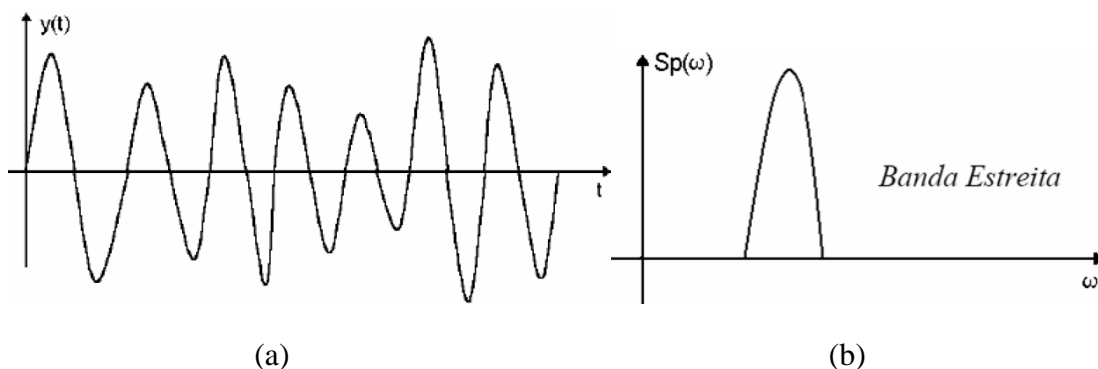


Figura 3-5 – Processo de Banda Estreita: (a) Série aleatória; (b) Densidade espectral.

(BATALHA, 2009)

b) Processos de Banda Larga – podem ter vários máximos entre dois cruzamentos ascendentes consecutivos, o maior destes valores é denominado como máximo global e os demais como máximos locais. O processo de banda larga apresenta densidade espectral espalhada sobre uma ampla faixa de frequências (ver Figura 3-6).

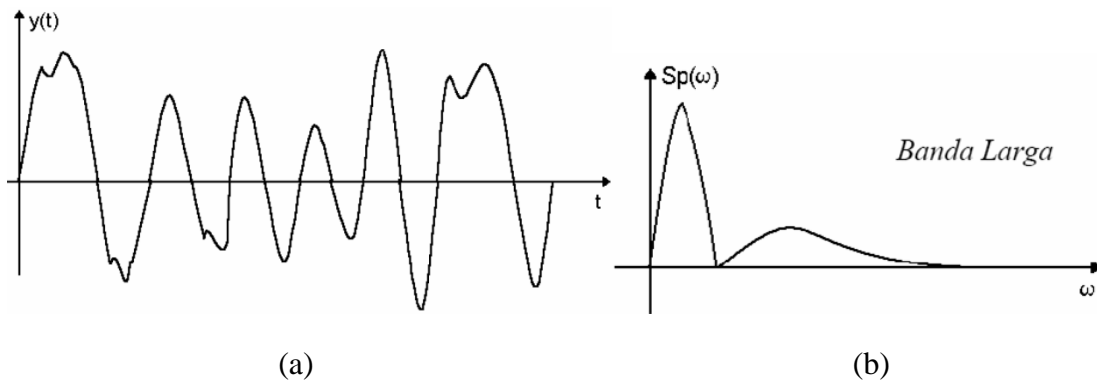


Figura 3-6 – Processo de Banda Larga: (a) Série aleatória; (b) Densidade espectral.
(BATALHA, 2009)

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 (ver item 5.3).

- Altura significativa – em análise espectral, é relacionada com a energia total contida no espectro de onda. Se m_0 é a área total abaixo do espectro de densidade de energia, então:

$$H_s = 4\sqrt{m_0}$$

Neste caso, o espectro é considerado de banda estreita.

- O período de cruzamento zero T_z e o período de cristas T_c , são calculados conforme apresentado a seguir:

$$T_z = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad \text{e} \quad T_c = \sqrt{\frac{m_2}{m_4}}$$

4 ANÁLISE DE MOVIMENTOS DO FPSO E FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA

O objetivo deste trabalho é a análise de fadiga em estruturas Topsides devido à incidência de ondas na unidade flutuante do tipo FPSO. Para isto é necessário estudar o efeito das ondas sobre esta unidade. O FPSO apresenta movimento de corpo rígido quando sofre incidência das ondas. Por isso, a unidade flutuante pode apresentar seis tipos de movimentos oscilatórios diferentes devidos às ondas, que estão representados na Figura 4-1. Destes três são de translação (SURGE, SWAY e HEAVE) e três são de rotação (YAW, PITCH e ROLL).

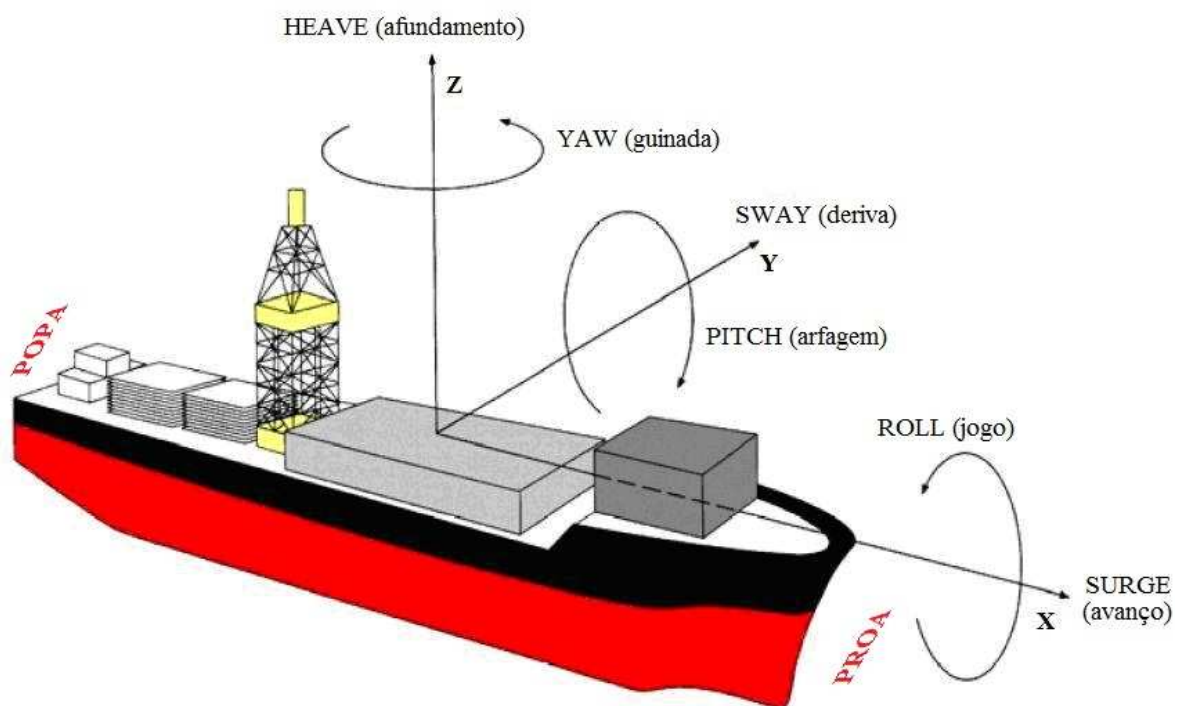


Figura 4-1 – Tipos de movimentos do FPSO devido à incidência de ondas

Os conceitos apresentados neste capítulo foram baseados em BATALHA (2009).

Se uma função da resposta dinâmica da estrutura, devido à incidência de ondas sobre uma embarcação, for construída a partir de um intervalo de frequências de interesse para uma dada estrutura offshore, então esta é chamada de Response-Amplitude Operator (RAO) ou Função de Transferência. 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 e BATALHA, 2009).

4.1 EQUAÇÕES DE MOVIMENTOS, ACELERAÇÕES E FORÇAS INERCIAIS

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 (PAZ, 1997 e BATALHA, 2009).

As equações dos movimentos e acelerações da unidade devem ser determinadas em termos de amplitude e fase, para cada um dos seis graus de liberdade, em função da posição do centro de movimentos, ângulo de incidência e frequências de ondas. Algumas destas equações serão apresentadas, resumidamente, neste item, para maiores informações consultar BATALHA (2009).

A posição do centro de movimentos da unidade é função do calado. Em geral, as análises são realizadas para três calados diferentes: máximo (carregamento total), mínimo (calado de sobrevivência), intermediário (calado de operação).

Neste estudo, foi adotado o método dos movimentos desacoplados. Embora um navio experimente todos os seis movimentos simultaneamente, neste método, vamos tratar de apenas um grau de liberdade por vez. Para ângulos de rotação de pequenas amplitudes, a soma dos esforços gerados para cada grau de liberdade atuando separadamente é aproximadamente o mesmo que em uma análise acoplada com todos os seis graus de liberdade atuando de forma simultânea.

A seqüência de rotação possui influência direta no resultado do deslocamento final, o que dependerá da formulação utilizada pelo programa de análise de movimentos de embarcações utilizado. Para este estudo, será sempre utilizada a seqüência de rotação *Roll – Pitch – Yaw*.

4.1.1 Translações

A equação do movimento de *heave*, em função do tempo, pode ser escrita da seguinte maneira:

$$z = z_a \cos \omega t$$

Onde ω é a freqüência angular.

Derivando a equação do movimento duas vezes no tempo, chegamos à equação da aceleração e a aceleração máxima de *heave*, na posição z_a , pode ser escrita como:

$$\ddot{z} = -\omega^2 z_a$$

Onde a aceleração com sinal negativo estaria atuando verticalmente para baixo, somando-se a carga de peso.

Assim, a carga inercial total máxima, no centro de gravidade de uma massa m qualquer, deve ser igual a:

$$F_{heave} = Fz = m \cdot \omega^2 z_a$$

Procedimento análogo pode ser utilizado para se determinar as acelerações e forças laterais de *surge* e *sway*.

4.1.2 Rotações

Se um corpo rígido possui um movimento rotacional, a aceleração de qualquer partícula do corpo perpendicular à distância r , a partir do eixo de rotação, possui duas componentes:

- $r\alpha$ – na direção da velocidade instantânea;
- $r\omega^2$ – voltada para o eixo de rotação.

E, conseqüentemente, duas componentes de força atuante:

- Força Tangencial: $T = m \cdot r \cdot \alpha$
- Força Centrífuga: $C = m \cdot r \cdot \omega^2$.

O movimento de *roll* é descrito por:

$$\theta = \theta_a \cos \omega t$$

Onde,

θ – rotação angular de *roll*

θ_a – amplitude máxima da rotação

Logo, a velocidade angular e a aceleração angular são respectivamente:

$$\dot{\theta} = -\omega \cdot \theta_a \sin \omega t \quad \text{e} \quad \ddot{\theta} = -\omega^2 \cdot \theta_a \cos \omega t$$

Sabendo que a aceleração angular instantânea é:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

E que a aceleração tangencial é:

$$r \times \frac{d^2\theta}{dt^2} = r \times \alpha$$

A aceleração máxima é: $\ddot{\theta}_{\max} = \omega^2 \cdot \theta_a$ para $\cos \omega t = -1$

A máxima aceleração tangencial é dada por:

$$r \times (\ddot{\theta})_{\max} = r \times \omega^2 \theta_a = \frac{4\pi^2 r \cdot \theta_a}{T^2} \quad (\text{ângulos em radianos})$$

Sabendo que $T = 2\pi/\omega$ – período de *roll*

Se o peso de um corpo qualquer a bordo do navio é dado por w , a força tangencial resultante é expressa por:

$$T_R = \frac{w}{g} \times \frac{4\pi^2 r \cdot \theta_a}{T^2} \quad (\text{ângulos em radianos})$$

A força tangencial pra um movimento de *roll* pode ser decomposta em uma parcela horizontal e outra vertical, chamadas de T_{RH} e T_{RV} , respectivamente, conforme mostrado na Figura 4-2. Na figura $y_0 = r \cdot \cos \beta$ e $z_0 = r \cdot \text{sen} \beta$, onde y_0 e z_0 são as distâncias horizontais e verticais respectivamente da massa w até o centro de rotações. Com isto, temos que:

$$T_{RH} = T_{RY} = \frac{w}{g} \times \frac{4\pi^2 z_0 \cdot \theta_a}{T^2}$$

$$T_{RV} = T_{RZ} = \frac{w}{g} \times \frac{4\pi^2 y_0 \cdot \theta_a}{T^2}$$

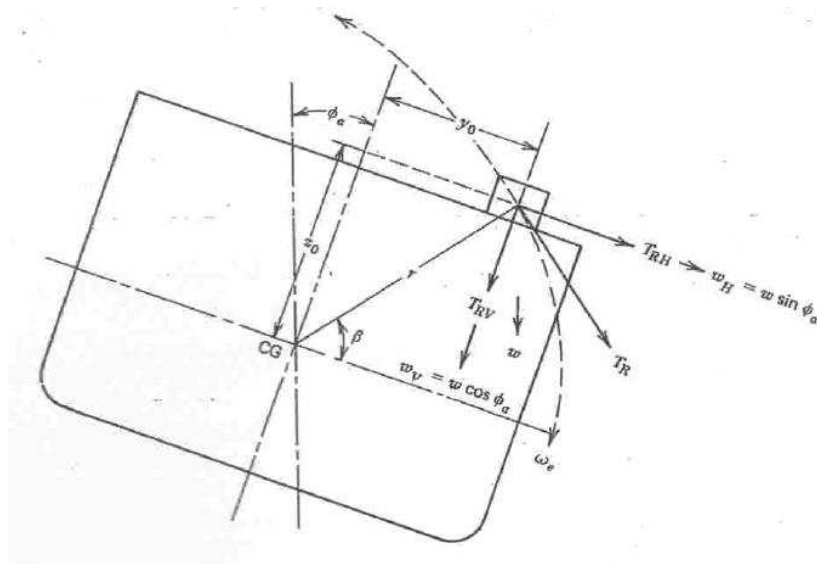


Figura 4-2 – Movimento de *Roll* - Forças tangenciais (BHATTACHARYYA, 1978 e BATALHA, 2009)

A parcela da força centrífuga é muito pequena em comparação as forças de gravidade e de aceleração tangencial. Adicionalmente, devemos observar que a força centrífuga atinge seu valor máximo no momento em que o ângulo de inclinação da oscilação é igual a zero, ou seja, quando o navio está na sua posição normal de equilíbrio durante o movimento de *roll*. E ainda, a força centrífuga é nula quando o ângulo de *roll* é máximo ($\theta = \theta_a$). Por estas razões, podemos desprezar a parcela referente à força centrífuga em nossos cálculos.

Procedimento análogo pode ser utilizado para se determinar as acelerações e forças laterais e/ou verticais de *pitch* e *yaw*.

4.2 RAO DE DESLOCAMENTO DO NAVIO

O RAO de deslocamento associado à embarcação é obtido por um programa de computador específico, como por exemplo, pelo programa WAMIT (1995). O RAO de deslocamento associa os movimentos da embarcação, correspondente aos seis graus de liberdade de corpo rígido, com a onda incidindo em uma determinada direção, para um determinado calado. Ou seja, o RAO do navio é diferente para cada um dos seis graus de liberdades, para cada direção de incidência e para cada calado.

O cálculo da função de transferência é realizado aplicando-se uma onda de altura (ou amplitude) unitária sobre a unidade flutuante, e observando sua resposta estrutural em um dado ponto. Repete-se o procedimento para um dado número de períodos de onda diferentes de modo a se obter um espectro. Os intervalos de frequências devem ser discretizados de maneira a se obter resultados satisfatórios. Pontos insuficientes nas curvas podem levar a resultados imprecisos nas equações do dano à fadiga.

Na prática, a função de transferência será construída da seguinte forma:

- Para uma dada condição de carregamento (cargas permanentes e estáticas, ou seja, peso), é definida a posição do centro de movimentos do navio. A leitura dos movimentos será para este ponto.
- O aproamento do navio e o ângulo de incidência das ondas são definidos, conforme Figura 4-3.
- Para um dado intervalo de frequências, são medidas as amplitudes de resposta da unidade devido à incidência de ondas de altura ou amplitude unitária para cada frequência. A discretização do intervalo dependerá do comportamento do navio e da “forma” do espectro de mar em cada intervalo de frequência.

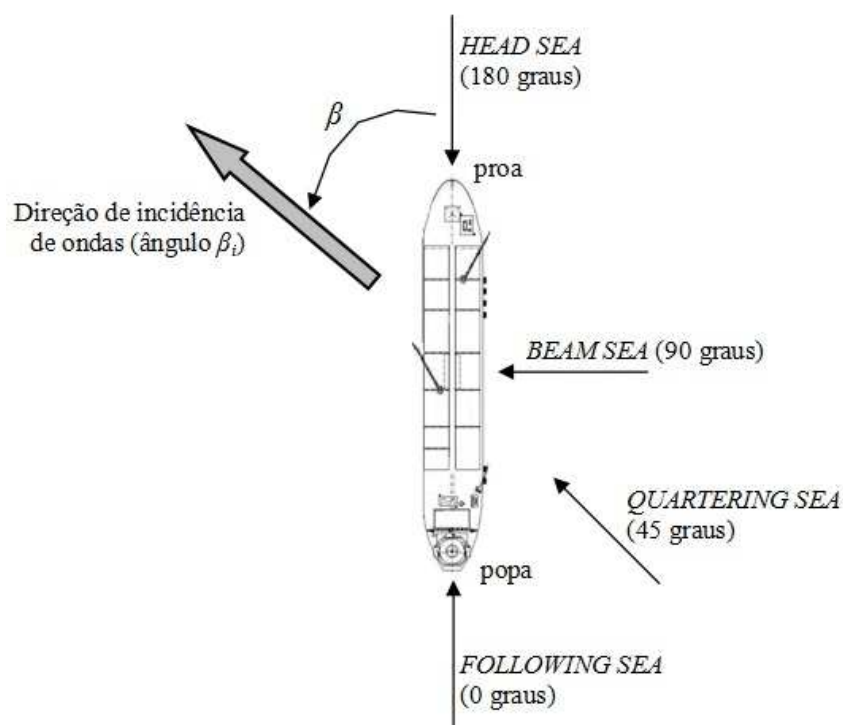


Figura 4-3 – Aproamento do navio e ângulo de incidência das ondas (BATALHA, 2009)

4.3 RAO DE TENSÕES

Da mesma forma que um RAO de deslocamentos, um RAO de tensões (definido pela posição do centro de movimentos (calado), ângulo de incidência das ondas, tempo e ângulo de fase), é formado pelo resultado dos níveis de tensões obtidos para a estrutura para cada período de ondas, com amplitudes unitárias, descrevendo o comportamento da estrutura para um dado intervalo de frequências.

São obtidos RAOs de tensões para cada ponto da estrutura da estrutura que se deseja fazer a análise espectral. Para cada ponto da estrutura, o RAO de tensão é diferente para cada direção de incidência em cada calado.

Neste trabalho, os RAOs de tensões serão gerados pelo programa *FATDAM 2.0*. Detalhes do método utilizado para a determinação do RAO de tensões por este programa consultar BATALHA (2009).

4.4 ESPECTRO DE RESPOSTA

Espectro de resposta é um gráfico que mostre a resposta máxima de deslocamento, velocidade, aceleração ou qualquer outra grandeza, função do período natural ou frequência natural, considerando uma determinada excitação.

O espectro de resposta, em termos de amplitude de tensões, é obtido através do cruzamento de um RAO de tensões com o espectro de mar, de acordo com a seguinte expressão:

$$S_R(\omega) = [RAO(\omega)]^2 S_\eta(\omega)$$

Onde:

$S_R(\omega)$ – espectro de resposta;

ω – frequência circular;

$S_\eta(\omega)$ – espectro de mar;

$RAO(\omega)$ – RAO de tensões em um dado ponto da estrutura.

Para se obter um espectro resposta de aceleração, a função de transferência deve ser a de aceleração. Para se obter espectro de um determinado parâmetro estrutural (deslocamento, esforços, tensões), de forma análoga o RAO deve ser deste parâmetro.

A Figura 4-4 ilustra o cruzamento da função de transferência, RAO, com o espectro de mar, resultando no espectro de resposta.

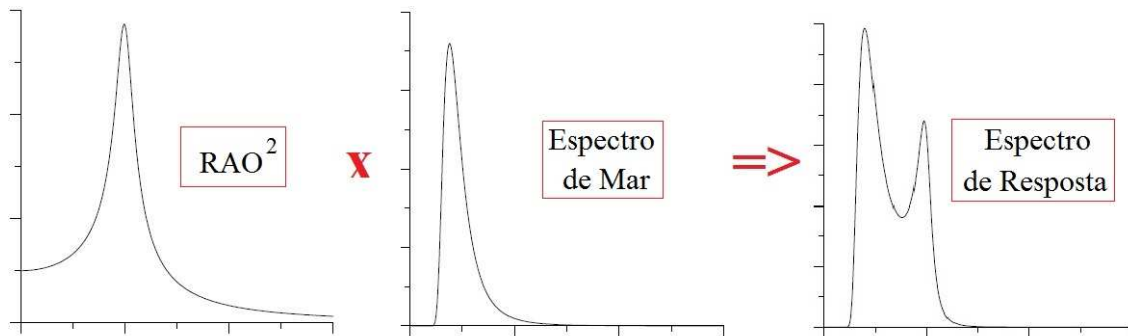


Figura 4-4 – Modelagem espectral da resposta dinâmica

Para cada estado de mar, direção de incidência de onda e calado é obtido um espectro de tensões diferente. O espectro representa a resposta estrutural para esta condição específica de carregamento de onda.

Dos espectros de resposta de tensões, são extraídos os danos parciais à fadiga para o cálculo do dano total acumulado e da vida útil da estrutura, conforme será apresentado nos capítulos 5 e 6.

5 ANÁLISE DE FADIGA

Quando uma estrutura é submetida a carregamentos de natureza cíclica pode ocorrer o fenômeno de fadiga, onde pequenas trincas inicialmente aparecem e, se não houver intervenção, estes defeitos podem crescer levando até a ruptura da estrutura.

Em estruturas *offshore*, os carregamentos dinâmicos devidos às ações ambientais que devem ser considerados na análise de fadiga são devido às correntes e ondas marítimas e ao vento. Como dito anteriormente, neste trabalho, será considerado apenas o efeito das ondas incidindo na unidade flutuante para a análise de fadiga.

Os conceitos apresentados neste capítulo foram baseados em ELLWANGER (2010).

Segundo a ASTM, temos a seguinte definição para fadiga: “Fadiga é um processo de alteração estrutural permanente, *progressivo* e *localizado*, que ocorre num material sujeito a condições que produzem tensões ou extensões 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”.

Onde:

- *Progressivo*: indica que o processo de fadiga se verifica durante um período;
- *Localizado*: significa que o processo de fadiga se dá em pequenas áreas em vez de ser em toda estrutura;
- *Trinca* e *fratura*: significam que numa zona crítica do material uma trinca cresce até um ponto em que o material restante na seção transversal não é capaz de suportar as tensões aplicadas, dando-se a fratura súbita.

A ruptura por fadiga ocorre com uma tensão menor do que a tensão de projeto no Estado Limite Último para carregamentos estáticos (de um ciclo). Pois, estrutura não possui mais a seção transversal de cálculo inicial para qual foi dimensionada. Devido à fratura de fadiga, a seção transversal efetiva é menor que a de cálculo, levando a estrutura ao colapso quando solicitada por uma carga que, a princípio, ela deveria resistir.

O processo de fadiga pode ser considerado dividido em quatro fases apresentadas na Figura 5-1.



Figura 5-1 – Fases do processo de fadiga. (ELLWANGER, 2010)

As duas primeiras fases constituem o período de iniciação da trinca. Para material base cerca de 90 % do tempo de vida útil da peça está relacionado com as fases A e B. Porém, para estruturas soldadas, desconsideramos as fases A e B, ficando estas com 0 % do tempo de vida útil da estrutura.

É importante ressaltar que uma ruptura por fadiga é muitas vezes súbita e ocorre sem dar sinal porque a trinca não é visível ou está inacessível.

5.1 CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES

Quando uma estrutura está submetida a um carregamento cíclico, uma trinca pode se desenvolver num ponto de tensão máxima. Quando temos concentração de tensões localizada numa região de tensão máxima de tração, uma trinca por fadiga poderá se propagar rapidamente. Logo, quanto maior a concentração de tensões, menor o tempo para se iniciar uma rachadura por fadiga.

No caso de materiais dúcteis, o efeito de concentração de tensões é muito atenuado quando a carga é puramente estática (pois permitem a plastificação localizada na vizinhança do entalhe, que gera uma acomodação das tensões). No caso das solicitações de fadiga, porém, o fenômeno da diminuição de resistência devido à concentração de tensões tem grande importância, como por exemplo, em estruturas dotadas de imperfeições geométricas variadas (variações bruscas de seções, orifícios, ranhuras, estrias, sulcos, rebaixos, entalhes, entre outras), estruturas com solda nas juntas de conexão e em pontos de aplicação de cargas na estrutura.

O princípio de Saint-Venant estabelece que distante da zona de concentração de tensão, exemplificada acima, a distribuição de tensões é a mesma que existiria se não houvesse a descontinuidade. Portanto, podemos classificar a concentração de tensão como um fenômeno localizado. Na Figura 5-2 este fenômeno pode ser observado.

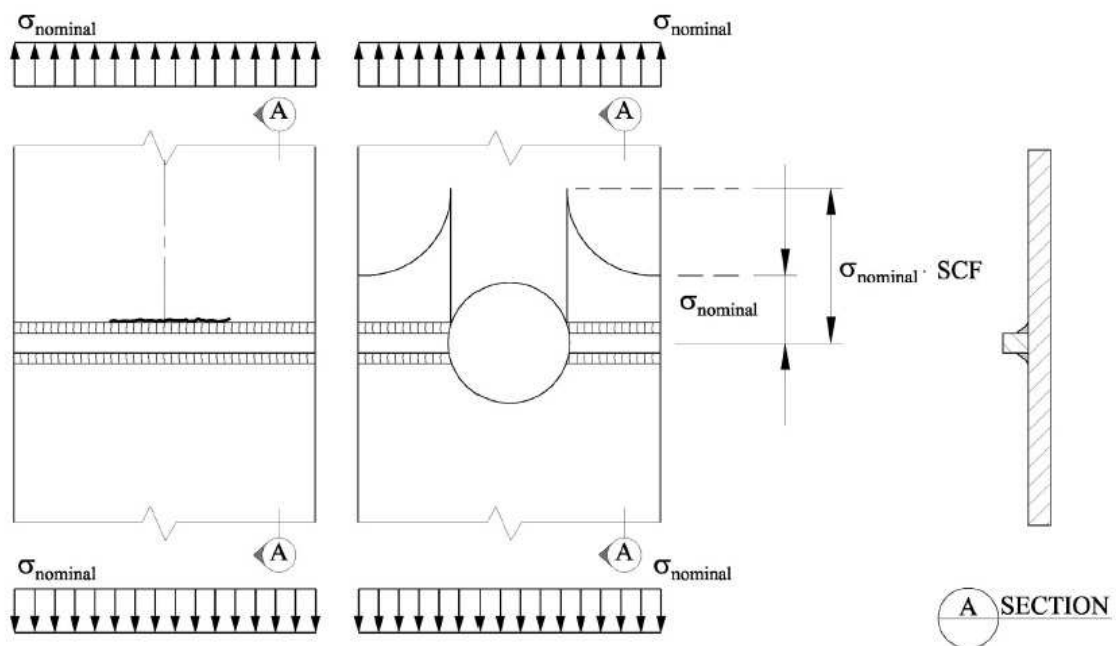


Figura 5-2 – Concentração de Tensões em uma placa com orifício (DNV-RP-C203, 2008)

As juntas soldadas são consideradas pontos críticos com relação à fadiga em função da presença de descontinuidades geradas pelo próprio perfil de solda ou por defeitos oriundos da fabricação e utilização da junta. Estes pontos são típicos locais de concentração de tensões.

5.1.1 Fator de Concentração de Tensão

Como os efeitos locais devidos às concentrações de tensões, em geral, não são detectados numa análise estrutural convencional, ou seja, na análise global, os resultados devem ser modificados a fim de simular estes efeitos locais. Isso é feito através da consideração de um fator que é aplicado a tensão nominal no ponto em questão. Este fator denomina-se Fator de Concentração de Tensões, ou simplesmente SCF (Stress Concentration Factor). (BATALHA, 2009)

O fator de concentração de tensões é definido por:

$$SCF = \frac{\text{Tensão máxima na fronteira da descontinuidade}}{\text{Tensão média ou nominal na seção transversal}}$$

Onde a tensão nominal (σ_{nom}) 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 por descontinuidades geométricas. A tensão nominal está exemplificada na Figura 5-2.

O fator de concentração de tensões é função do tipo de carga aplicada (axial, de torção ou de flexão). Logo, para um mesmo elemento numa estrutura há um fator de concentração de tensão para cada tipo de tensão.

Existem referências para se obter o fator de concentração de tensões da maior parte das descontinuidades geométricas que surgem em máquinas. Algumas normas e recomendações de projeto possuem fórmulas paramétricas que definem fatores de concentração de tensões para diversos tipos de ligações e detalhes de descontinuidades geométricas. (BATALHA, 2009)

A norma DNV-RP-C203 (2008) apresenta métodos amplamente utilizados para cálculos de fatores de concentrações de tensões em diversos tipos de ligações comuns em estruturas offshore, como, para juntas tubulares, solda entre chapas de diferentes espessuras ou com desalinhamento, juntas cruciformes (chapas unidas em forma de cruz, onde uma chapa é passante e duas outras são conectadas a ela em forma de cruz), entre outras.

Outra maneira de se determinar o fator de concentração de tensões é através de análise por elementos finitos.

Muitos detalhes estruturais são de geometria mais complexa que as apresentadas em normas e referências de projetos. Neste caso, deve-se partir para análise em elementos finitos. Pode-se determinar o fator de concentração de tensões ou determinar a tensão de Hot Spot Stress diretamente (através de um modelo detalhado da junta). Este método não é o objetivo deste estudo.

5.1.2 Hot Spot Stress

De acordo com a norma DNV-RP-C203 (2008), a tensão de Hot Spot é definida por:

$$\sigma_{hot-spot} = SCF \cdot \sigma_{nom}$$

Para o cálculo de fadiga de uma junta qualquer, o parâmetro de entrada nas curvas S-N (ver item 5.2) é a variação de tensões final, considerando todos os efeitos de concentração de tensões, conhecida como Hot Spot Stress. Em outras palavras, Hot Spot Stresses são os picos de tensões obtidos em regiões de concentração de tensões em uma determinada junta. (BATALHA, 2009)

Para análise estrutural de uma estrutura reticulada, através de um modelo de barras, as tensões atuantes são sempre as tensões nominais e para cálculo de fadiga as tensões Hot Spot são sempre obtidas pela aplicação de fatores de concentração de tensões. (BATALHA, 2009)

5.2 CURVAS S-N

As curvas S-N são curvas que relacionam variações de tensão ao número de ciclos que leva à ruptura de um dado material com uma determinada configuração geométrica. O objetivo da utilização destas curvas é prever a resistência final à fadiga de elementos e juntas de conexões típicas em estruturas metálicas.

Estas curvas são obtidas por ensaios de laboratório, onde os corpos de prova são submetidos a inúmeros ciclos da mesma variação de tensão, até o surgimento de trincas e, finalmente, a ruptura por fadiga. Os resultados destes ensaios são as curvas compostas pela relação entre variação de tensão e ciclos que geram a ruptura.

A curva S-N é pode ser apresentada pela seguinte equação:

$$N = \bar{a} \cdot \Delta\sigma^{-m}$$

Graficamente, é usual representar a curva S-N como uma curva do tipo *log-log*, que pode ser expressa pela equação:

$$\log N = \log \bar{a} - m \cdot \log \Delta\sigma$$

Onde:

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

a e m são constantes do material e das condições do ensaio. Sendo, m o inverso da inclinação negativa da curva S-N e $\log a$ o ponto que intercepta o eixo das abscissas.

A Figura 5-3 apresenta um desenho esquemático da curva S-N e seus parâmetros.

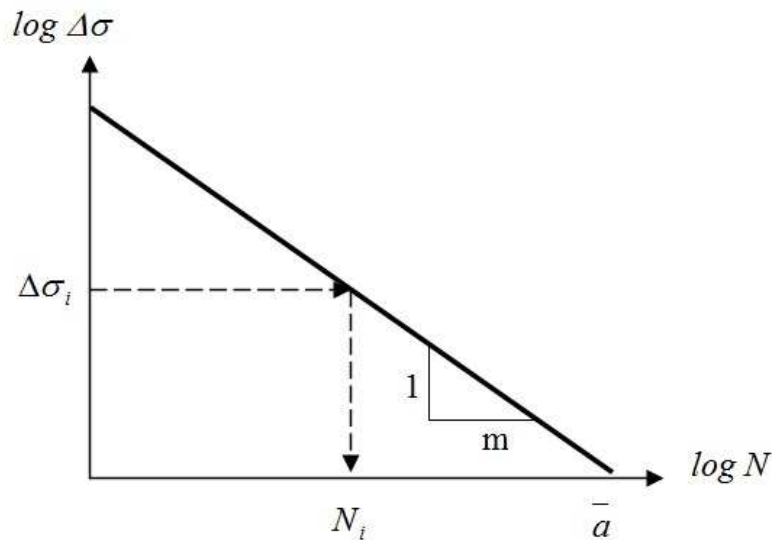


Figura 5-3 – Desenho esquemático de uma curva S-N (BATALHA, 2009)

5.2.1 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:

- A geometria do detalhe ou junta de conexão;
- Direção de aplicação da variação de tensões;
- Método de execução e nível de inspeção do detalhe;
- Ambiente onde estará a estrutura (no ar, na água);
- Presença ou ausência de proteção anti-corrosão (proteção catódica);
- Tipo de solda e outros.

As curvas S-N de interesse neste trabalho estão apresentada na tabela 5.1. Esta tabela foi retirada da DNV-RP-C203 (2008) para detalhes estruturais no ar, pois o foco deste trabalho é análise de fadiga em estruturas Topsides, estruturas acima do nível d'água, em um FPSO. A Figura 5-4, retirada da mesma norma ilustra as curvas S-N cujos parâmetros foram definidos na Tabela 5-1.

Table 2-1 S-N curves in air						
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 *)	Thickness exponent k	Structural stress concentration embedded in the detail (S-N class), ref. 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	0.15	
C1	3.0	12.449	16.081	65.50	0.15	
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
T	3.0	12.164	15.606	52.63	0.25 for SCF ≤ 10.0 0.30 for SCF > 10.0	1.00

*) see also section 2.10

Tabela 5-1 – Parâmetros das curvas S-N para detalhes no ar. (DNV-RP-C203, 2008)

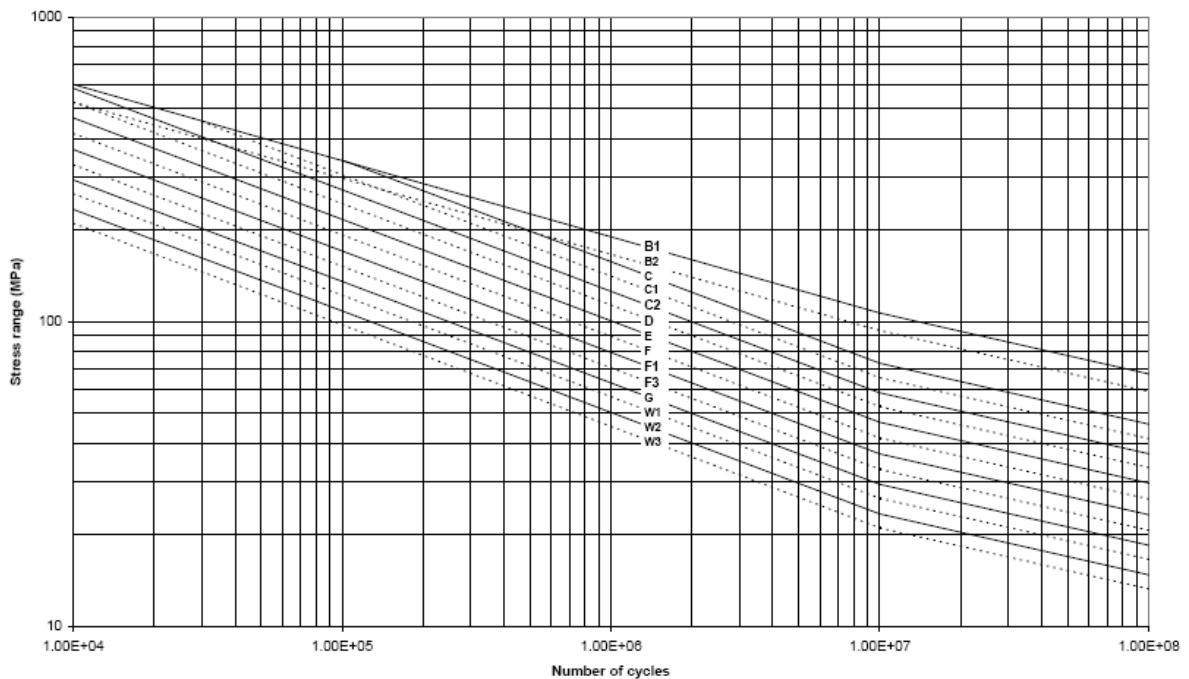


Figura 5-4 – Curvas S-N para detalhes construtivos no ar. (DNV-RP-C203, 2008)

Pode-se notar que dependendo da amplitude da tensão atuante e dos ciclos admissíveis, as curvas S-N apresentam dois comportamentos distintos. A norma DNV-RP-C203 (2008) define para cada tipo de curva S-N um ponto de inflexão para ciclos de tensões admissíveis iguais a 10^7 para o caso de detalhes fora de ambientes marinhos, no ar. Para detalhes submersos e com proteção catódica, este ponto de inflexão ocorre para 10^6 ciclos. No caso da Tabela 5.1, para resposta com $N < 10^7$, a norma define uma inclinação m_1 para a curva e para a resposta com ciclos mais altos, a norma define uma inclinação m_2 . Estes tipos de curvas S-N são definidos na literatura como “*curvas bilineares*”. (BATALHA, 2009)

Os detalhes soldados são divididos em grupos, cada um correspondente a uma curva S-N específica. Observando a Tabela 5-1, todas as juntas tubulares têm curva classe T e os outros tipos de juntas, se enquadram em um das 14 classes especificadas na norma de acordo com o detalhe construtivo e o tipo de solda. Podemos notar pela Figura 5-4, que os elementos classificados de acordo com a curva B1 apresentam resistência superior aos demais, e a resistência decresce de forma gradativa para as curvas inferiores.

5.2.2 Efeitos da Espessura

De acordo com a DNV-RP-C203 (2008), a resistência à fadiga de juntas soldadas depende da espessura das chapas. As curvas S-N, obtidas por ensaios experimentais, estão associadas a uma máxima espessura de chapa. Para chapas com espessura superiores a referência, a variação de tensões deve ser corrigida de acordo com:

$$\Delta\sigma_{\text{corrigida}} = \Delta\sigma \left(\frac{t}{t_{\text{ref}}} \right)^k$$

Onde:

$\Delta\sigma$ – variação de tensão calculada;

t – espessura real no detalhe;

t_{ref} – espessura de referência (32mm para juntas tubulares e 25mm para juntas soldadas de forma geral);

k – fator de correção de espessura (de acordo com a curva – ver tabela 5.1)

A resistência à fadiga é menor quanto maior for a espessura de chapa de um dado detalhe estrutural, porque elementos com espessuras maiores possuem maior probabilidade de sofrerem com surgimento de trincas, pois quanto maior a área exposta, maior a possibilidade de ocorrência de defeitos ou de danos devidos à intempéries ou processos de fabricação inadequados. Adicionalmente, é sabido que para uma espessura maior da solda, são exigidos procedimentos mais complexos de execução e que eventualmente acarretam níveis mais elevados de tensões residuais. (BATALHA, 2009)

5.2.3 Cálculo do Dano e Vida à Fadiga

Os conceitos apresentados neste item estão de acordo com BATALHA (2009).

Durante a vida útil da estrutura, para cada ciclo de carga, a estrutura absorve efeitos de fadiga que se acumulam ao longo do tempo e geram o que se convencionou chamar “Dano à fadiga” (em inglês *Fatigue Damage*). O dano devido à fadiga é dado pela razão entre o número de ciclos de carga aplicado à estrutura e o número de ciclos que causa a falha da estrutura.

O dano à fadiga pode ser obtido da seguinte maneira:

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_i \cdot \Delta\sigma_i^m}{a}$$

Onde:

$\Delta\sigma_i$ – variação de tensões final, já afetada de todos os fatores de correção e concentração de tensões;

n_i – número de ciclos (ou ocorrências) associado à variação de tensão $\Delta\sigma_i$;

N_i – número de ciclos que leva à falha estrutural da junta submetida à variação de tensão $\Delta\sigma_i$.

O dano total (ou dano acumulado) devido à fadiga é a soma algébrica do dano gerado por cada um dos intervalos de ciclos de carga. Pela Regra de Palmgren-Miner, um ciclo de carga é representado através da variação de tensão causada em um dado ponto da estrutura e o dano total é definido por:

$$D = \sum_{i=1}^J D_i = \sum_{i=1}^J \frac{n_i}{N_i}$$

Onde:

D_i – dano associado a variação de tensão $\Delta\sigma_i$;

J – número de intervalos de variação de tensão.

A regra de Palmgren-Miner assume que não há efeito de seqüência de aplicação de cargas, pois é praticamente impossível prever para uma estrutura real qual será a seqüência de cargas que ela será submetida. (ELLWANGER, 2010).

A vida fadiga é dada por:

$$L = \frac{L_o}{D}$$

Onde:

L_o – tempo total do número total de ciclos ($n_o = \sum_{i=1}^J n_i$), ou ainda, vida útil da estrutura.

O parâmetro L_o , pode ser definido também como período de referência e o número de ciclos n_o deve ser sempre definido em função deste período de referência. É usual assumir $L_o = 1$ ano.

Para cargas com amplitudes variáveis, como é o caso das cargas geradas pelos movimentos de unidades flutuantes (ação de ondas), 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.

5.3 DANO À FADIGA – ANÁLISE ESPECTRAL

Este item apresenta uma metodologia para se calcular o dano à fadiga considerando a natureza aleatória das cargas provenientes das ações ambientais das ondas nas unidades *offshore*. Ou seja, para a obtenção do dano à fadiga com base em análises espectrais.

O cálculo do dano à fadiga é baseado no espectro de resposta, ou espectro de tensões que varia para cada calado, estado de mar, direção de incidência de ondas e junta da estrutura.

Os conceitos apresentados neste item foram baseados em BATALHA (2009).

A seguir será apresentada a seqüência de cálculo realizado pelo programa *FATDAM 2.0*, de propriedade da Exactum Consultoria e Projetos Ltda. para a análise de fadiga estocástica:

1. Para uma determinada junta, para um calado, para um estado de mar e para uma direção de incidência de onda, o programa calcula os momentos espectrais m_0 , m_2 e m_4 pela seguinte expressão:

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n \cdot S(\omega) d\omega = \sum_{i=1}^{\infty} \omega_i^n \cdot S(\omega_i) \Delta\omega$$

Onde:

m_n - n-ésimo momento do espectro de tensões $S(\omega)$;

m_0 - corresponde à área do espectro;

$\Delta\omega$ - incremento de freqüência angular (em rad/s) – de acordo com a discretização do problema.

2. Cálculo da largura de banda pela expressão:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{(m_0 \cdot m_4 - m_2^2)}{(m_0 \cdot m_4)}}; \quad 0 \leq \varepsilon \leq 1$$

Se $\varepsilon \rightarrow 0$, o espectro é considerado de banda estreita.

3. Cálculo da freqüência de cruzamento zero (em Hz) da seguinte maneira:

$$v_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}}$$

4. O programa determina o número de ciclos de tensão, que ocorre no período de um ano, para o espectro de tensões em análise, pela seguinte expressão:

$$N_{ciclos} = (v_0 \cdot T \cdot N_{ocorrências}) \cdot P_{calado}$$

Onde:

$T = 60 \times 60 \times 3 = 10800$ segundos (duração de cada estado de mar - 3h);

$N_{ocorrências}$ – número de ocorrências do estado de mar, para uma direção de incidência específica definida pelo diagrama de dispersão de ondas;

P_{calado} – percentual de ocorrências do calado de operação em questão.

5. O dano à fadiga da junta ji é calculada pela expressão:

$$D = \frac{N_{ciclos}}{4 \cdot m_0} \int_0^{S1} \left[\frac{\sigma_r^{(1+m_2)}}{a_2} \right] \cdot \exp\left(-\frac{\sigma_r^2}{8m_0}\right) \delta\sigma_r + \int_{S1}^{\infty} \left[\frac{\sigma_r^{(1+m_1)}}{a_1} \right] \cdot \exp\left(-\frac{\sigma_r^2}{8m_0}\right) \delta\sigma_r$$

Onde:

σ_r – variação de tensões;

\bar{a}_1 – parâmetro da curva S-N definido para primeiro trecho;

\bar{a}_2 – parâmetro da curva S-N definido para primeiro trecho;

m_1 – inclinação da curva S-N definida para primeiro trecho;

m_2 – inclinação da curva S-N definida para primeiro trecho;

S_1 – ponto de inflexão da curva S-N *bi-linear*. Para curvas S-N com mudança de inclinação em 10^7 ciclos, o valor de S_1 é calculado da seguinte forma:

$$S_1 = \left(\frac{\bar{a}_1}{10^7} \right)^{\frac{1}{m_1}}$$

6. Para espectros de banda larga, a correção do dano à fadiga deve ser realizada, pois o cálculo do dano pela equação acima é para espectros de banda estreita. O usuário do programa pode definir quando o programa fará a correção de banda.

A correção de banda é feita da seguinte maneira:

$$D_{BL} = (D_1 + D_2) \cdot \lambda(m_1, \varepsilon)$$

Onde:

D_{BL} – dano obtido para espectros de banda larga;

$(D_1 + D_2)$ – dano total, para os dois trechos da curva S-N.

$\lambda(m_1, \varepsilon)$ – fator de correção de banda, calculado para a inclinação m_1 da curva S-N. Este é definido pela expressão:

$$\lambda(m_1, \varepsilon) = a(m_1) + [1 - a(m_1)] \cdot (1 - \varepsilon)^{c(m_1)}$$

Onde:

$$a(m_1) = 0,926 - 0,033m_1$$

$$c(m_1) = 1,587m_1 - 2,323$$

Como nesta formulação, o fator de correção é calculado apenas para o primeiro trecho da curva, se a curva tiver só um trecho, a mesma formulação pode ser utilizada.

7. O programa armazena este valor de dano e varia o ângulo de incidência de ondas e repete os seis passos acima. Depois soma os danos pela regra de Palmgreen-Miner. Depois repete este procedimento até que os danos parciais de todas as incidências de onda estejam somados.
8. O programa varia o estado de mar e calcula todos os sete passos descritos acima. Repete este procedimento para todos os estados de mar e soma os danos parciais pela regra de Palmgreen-Miner.
9. Após o cálculo do dano de todos os estados de mar deste calado, o programa varia o calado e repete os oito passos acima. Isto é repetido até todos os calados tenham sido analisados. Os danos parciais também são somados pela regra de Palmgreen-Miner.
10. A soma de todos os danos parciais, conforme mencionado nos passos 7, 8 e 9, dará o dano total acumulado que a junta em análise sofrerá ao longo de sua vida útil. A vida à fadiga (vida útil) é calculada seguinte expressão:

$$L = \frac{1}{D}$$

Onde:

D – dano total acumulado para o período de um ano (ver passo 4).

Além destas formulações, existem outras opções para o programa efetuar os cálculos de dano e correção de banda; estas podem ser definidas pelo usuário. Se for do interesse do leitor obter mais informações, consultar BATALHA (2009).

5.4 CRITÉRIOS DE PROJETO

Os conceitos e exemplos apresentados neste item estão de acordo com BATALHA (2009).

As normas e regulamentos determinam fatores de segurança a serem empregados nos cálculos de fadiga. Eles variam de acordo com a disponibilidade de acessos para inspeção durante a vida útil da estrutura e de acordo com a relevância das conseqüências que resultam de uma possível falha estrutural, no que diz respeito a:

- Perigo de perdas em vidas humanas;
- Risco de poluição e danos ambientais;
- Conseqüências econômicas de alto risco.

A Tabela 5-2 apresenta alguns valores adotados em regras e normas vigentes.

Área	Fator de Segurança
Região acessível sem soldas abaixo da linha d'água não contendo elementos estruturais principais (estruturas secundárias)	1,0
Região acessível sem soldas abaixo da linha d'água contendo elementos estruturais principais.	2,0
Região acessível com possíveis soldas abaixo da linha d'água / contendo elementos estruturais principais de grande responsabilidade.	4,0
Região principal inacessível à inspeção e reparo durante a vida útil da estrutura.	10,0

Tabela 5-2 – Fatores de segurança para cálculo de fadiga

Estes fatores de segurança devem ser aplicados ao dano acumulado total calculado ou limitando a vida à fadiga. Por exemplo:

- Aplicando o fator de segurança ao dano: Se a estrutura estiver sendo projetada para 30 anos, um detalhe de uma junta principal deve ser projetado para uma vida fadiga de 60 anos e uma junta inacessível, para 300 anos;
- Aplicando o fator de segurança ao dano acumulado total (ou reduzindo a vida): Se o dano acumulado para um período de referência de 1 ano foi de 0,02, aplicando-se o fator de segurança para juntas principais temos um dano à fadiga de projeto de 0,04, e a vida a fadiga resultante é de 25 anos (em vez de 50 anos).

Estes critérios de projeto variam de norma para norma. Deve-se ter atenção para manter a coerência entre as premissas utilizadas de acordo com a norma.

6 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo, será apresentada a análise de fadiga estocástica de uma junta de apoio de um *Pipe-Rack* localizado no convés de um FPSO devido à incidência das ondas sobre esta unidade flutuante.

A estrutura do Pipe-Rack e a unidade flutuante são fictícias, porém baseadas em estruturas reais adaptadas para o caso acadêmico.

O cálculo do dano à fadiga foi baseado em espectros de resposta de tensões para um calado, uma direção de incidência de onda e vários estados de mar para uma junta da estrutura.

A análise de fadiga estocástica foi realizada com auxílio do programa *FATDAM 2.0* seguindo os passos descritos neste capítulo.

6.1 *FATDAM 2.0*

Neste item, será apresentado o programa para a análise de fadiga, o *FATDAM 2.0*, propriedade da Exactum Consultoria e Projetos Ltda. utilizado neste estudo de caso.

O programa funciona através uma interface gráfica em VISUAL BASIC (2005) que se comunica com um banco de dados em MySQL *Server* (MySQL, 2009) que armazenará e manipulará todas as informações fornecidas, aumentando o banco de dados do programa para análises futuras. (BATALHA, 2009)

A tela inicial é a tela do gerenciador dos bancos de dados. O banco de dados do projeto precisa de três dados principais (bancos de dados) de entrada:

- Diagrama de dispersão de ondas;
- Comportamento dinâmico da unidade (RAO) e características gerais da unidade;
- Modelo estrutural e dados de fadiga.

A Figura 6-1 apresenta a tela inicial do programa com os dados deste estudo de caso.

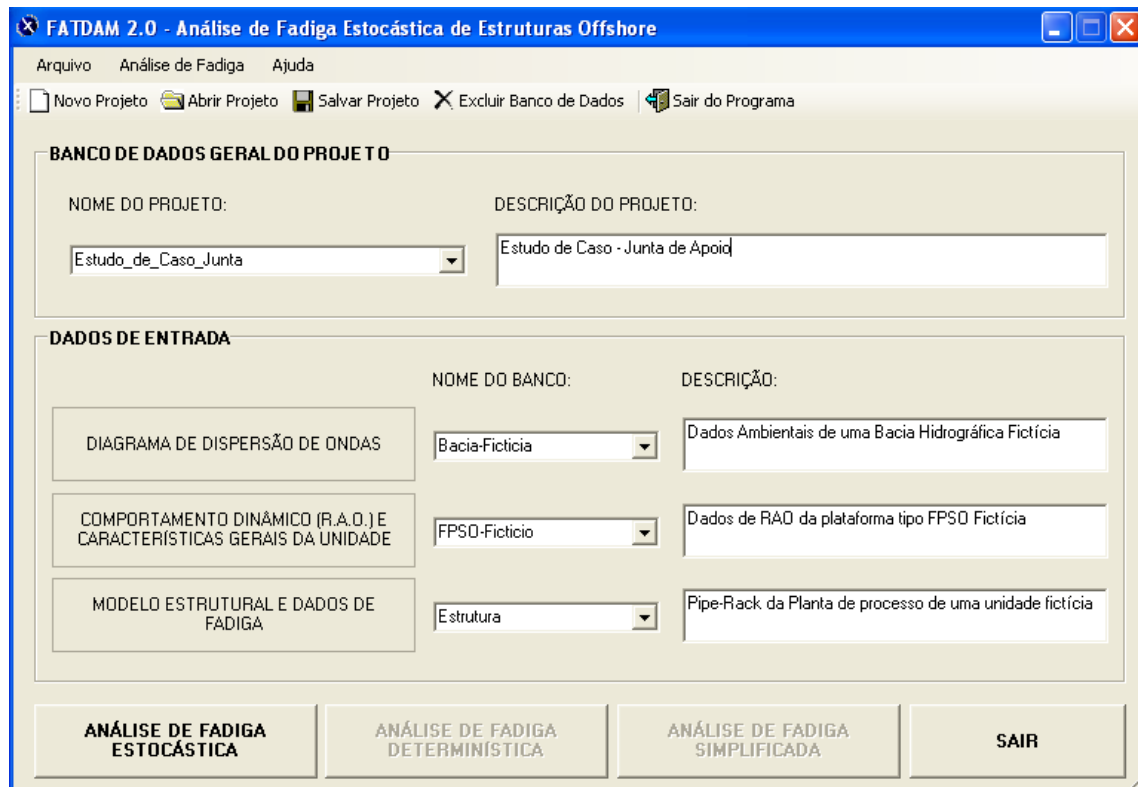


Figura 6-1 – Tela Inicial do *FATDAM 2.0*

6.2 CARACTERÍSTICAS DA UNIDADE FLUTUANTE

A unidade flutuante neste estudo é do tipo FPSO e o aproamento é de 225 graus em relação ao Norte (ver Figura 4-3). Para simplificação do problema, será considerado que o FPSO opera em um único calado, o calado intermediário. A Tabela 6-1 apresenta a posição do Pipe-Rack com relação ao centro de movimentos da unidade para este calado.

Calado Intermediário		
Distância longitudinal: ΔX (m)	80,382	Positivo no sentido popa-proa
Distância transversal: ΔY (m)	4,937	Positivo no sentido boreste - bombordo
Distância vertical: ΔZ (m)	26,42	Positivo para cima

Tabela 6-1 – Posição do Pipe-Rack com relação ao centro de movimentos do FPSO

Estas características do FPSO em estudo foram inseridas no *FATDAM 2.0* pela opção “DADOS DE RAO E CARACTERÍSTICAS DA UNIDADE FLUTUANTES” na tela inicial. Na aba “Características Principais da Unidade”, foram preenchidas as opções de calado intermediário (100% de ocorrência) e aproamento da unidade 225 graus. A Figura 6-2 ilustra o que foi dito neste parágrafo.

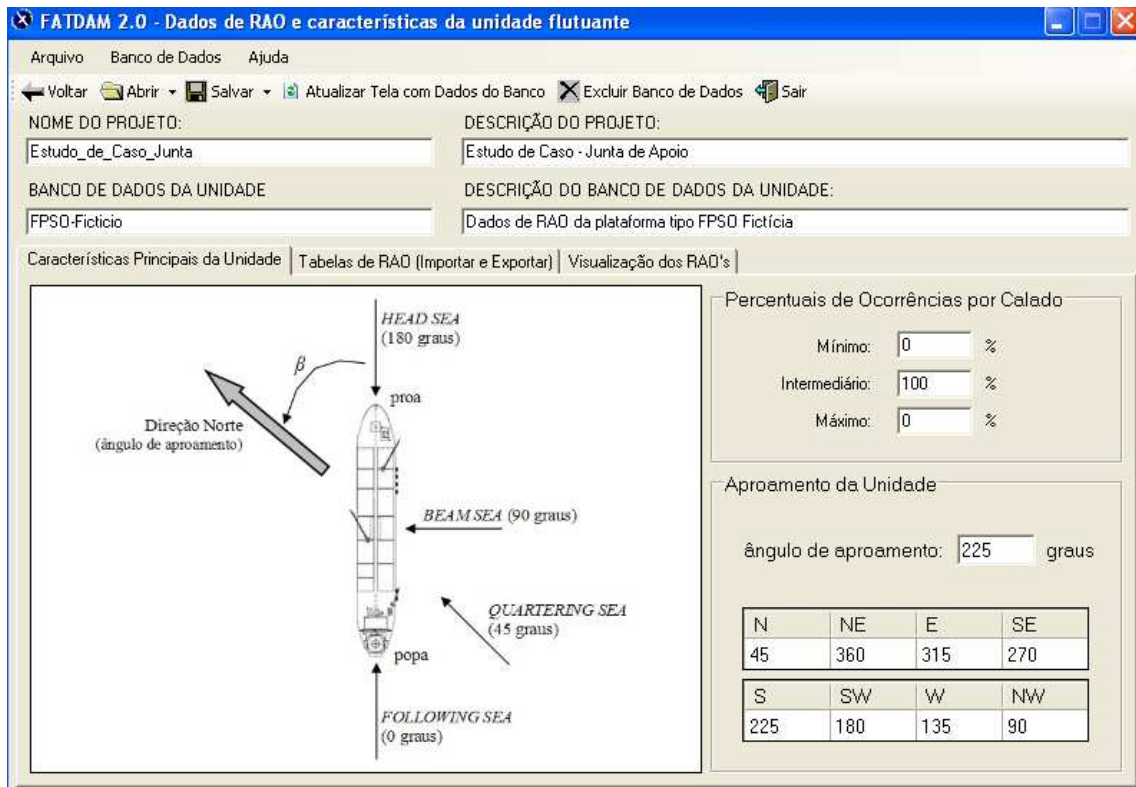


Figura 6-2 – *FATDAM 2.0* – Características principais da unidade

6.3 MODELO ESTRUTURAL E FORÇAS INERCIAIS

A estrutura do *Pipe-Rack* foi modelada no programa de elementos finitos *GTSTRUDL* (2007). Este modelo foi elaborado com uso de elementos de barras simulando as colunas e as vigas. A Figura 6-3 ilustra uma vista geral do modelo estrutural.

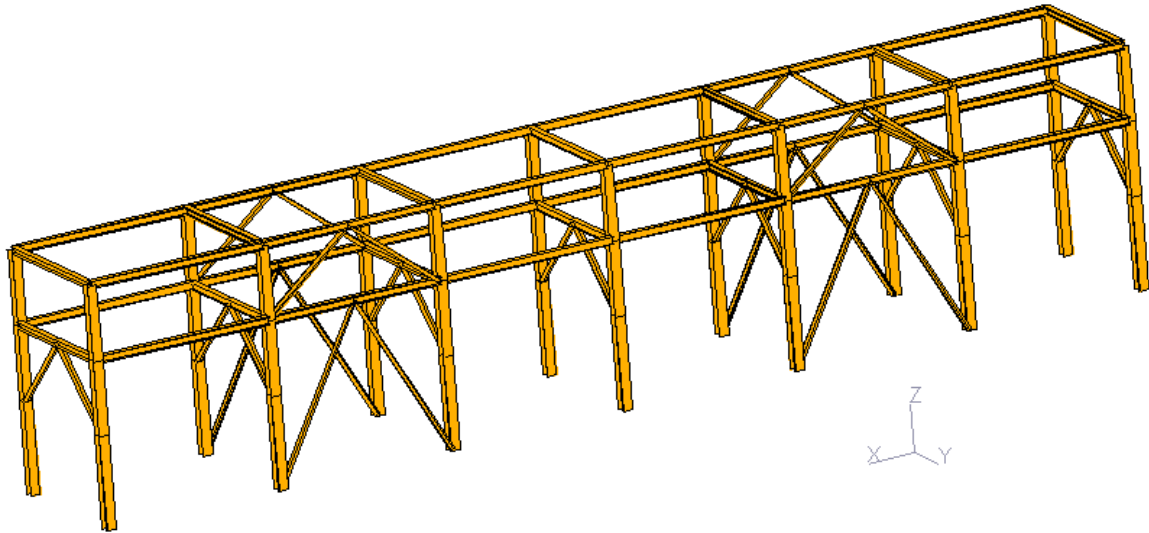


Figura 6-3 – Modelo estrutural – Vista geral

A geometria do modelo está apresentada nas seguintes figuras: Figura 6-4 e Figura 6-5.

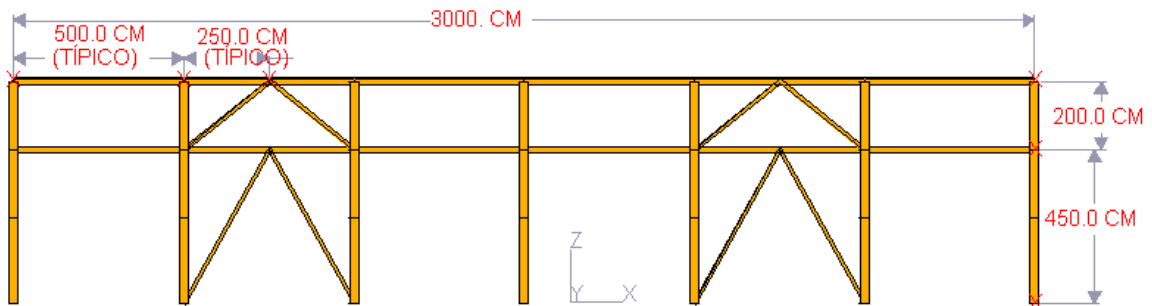


Figura 6-4 – Modelo estrutural – Seção longitudinal típica

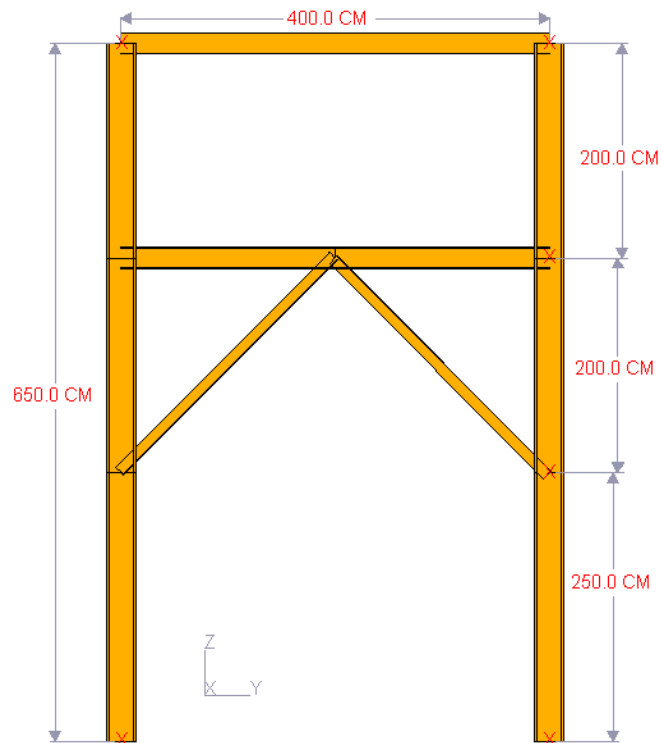


Figura 6-5 – Modelo estrutural – Seção transversal típica

6.3.1 Condições de Contorno e Ligações do Modelo

As juntas de apoio (de conexão do *Pipe-Rack* com o convés do FPSO) foram consideradas engastadas. A Figura 6-6 apresenta as posições destas juntas e as condições de contorno.

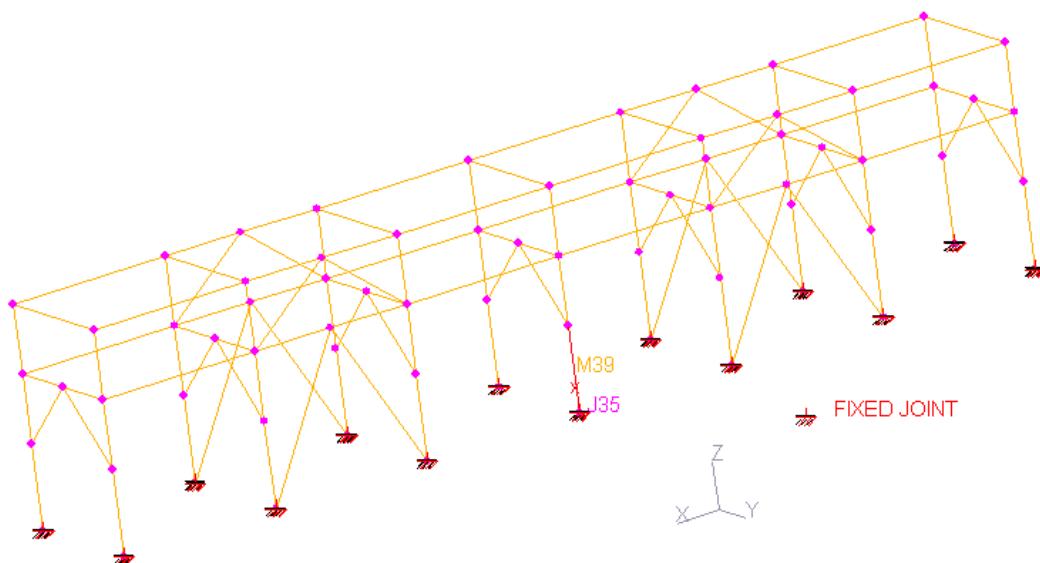


Figura 6-6 – Modelo estrutural – Condições de Contorno

As ligações das vigas nas colunas dos pórticos (seções transversais) serão soldadas. Já as ligações das vigas entre pórticos aos mesmos e dos contraventamentos as vigas e/ou colunas serão parafusadas.

6.3.2 Propriedades dos Membros

A Figura 6-7 apresenta os perfis dos membros no modelo estrutural. Os perfis das vigas e colunas serão utilizados perfis laminados de acordo com as especificações do catálogo GERDAU-AÇOMINAS (2008).

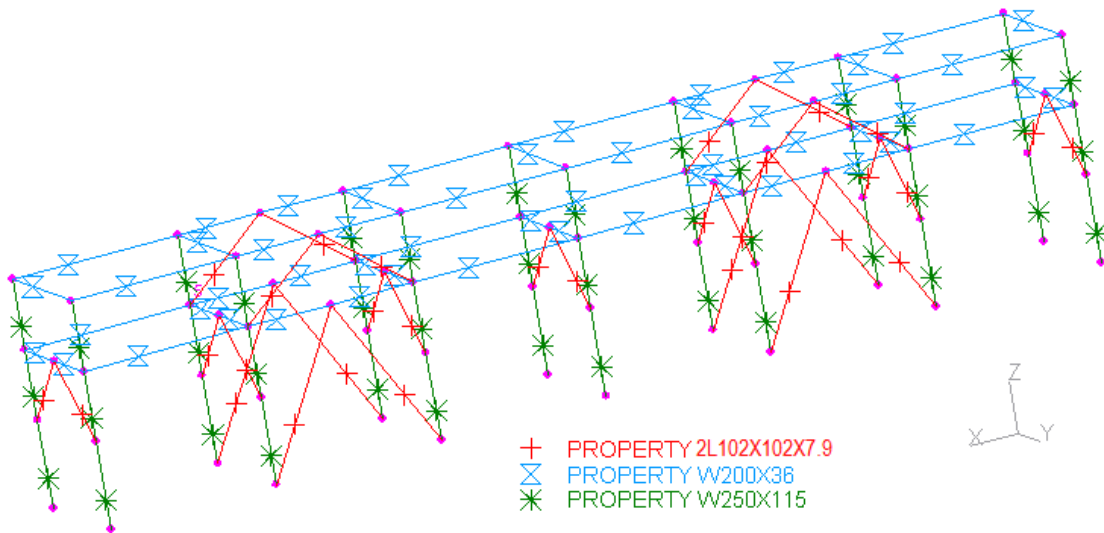


Figura 6-7 – Propriedades dos membros

Será realizada a análise de fadiga para a junta 35 (ver Figura 6-6) que é uma junta de apoio do *Pipe-Rack* ao convés da unidade flutuante. Esta junta é a junta de início do membro 39. A seção transversal deste membro, de perfil W250x115, está ilustrada na Figura 6-8 e suas propriedades estão na Tabela 6-2 Tabela 6-2 – Propriedades do membro de acordo com GERDAU-AÇOMINAS (2008).

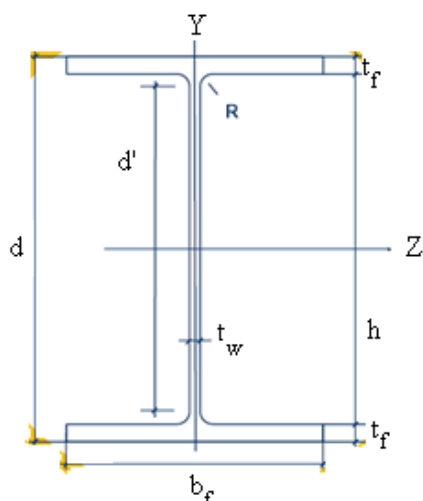


Figura 6-8 – Geometria da seção transversal do membro 39 (GERDAU-AÇOMINAS, 2008)

W 250 x 115		
d	269	mm
b _f	259	mm
t _w	13,5	mm
t _f	22,1	mm
h	225	mm
d'	201	mm
Área _x	146,1	cm ²
W _y	1406,7	cm ³
W _z	494,6	cm ³

Tabela 6-2 – Propriedades do membro 39 (GERDAU-AÇOMINAS, 2008)

6.3.3 Carregamento e Forças de Inércia

Serão consideradas neste estudo apenas as cargas inerciais provenientes do movimento da unidade flutuante devido à incidência de ondas sobre a mesma.

As cargas provenientes das correntes, do vento, de variações de temperatura, de vibrações de equipamentos, entre outras não serão consideradas neste trabalho, pois este é um problema acadêmico cujo objetivo é o estudo da fadiga devido à incidência de ondas sobre a unidade flutuante.

As cargas inerciais provenientes do movimento da unidade flutuante são oriundas das cargas permanentes sobre a estrutura *Topside*. (BATALHA, 2009)

A Tabela 6-3 contém um resumo destas cargas estáticas sobre o *Pipe-Rack*. A Figura 6-9 ilustra a carga de tubulação e dos suportes de tubulação que, por simplificação, foi considerada constante ao longo de todo o *Pipe-Rack*.

	Carregamento Estático	Peso (KN)
10	Peso Próprio do <i>Pipe-Rack</i> : Direção - Z	208,1
20	Tubulação e suportes de tubulação: Direção -Z	560,0
100	Peso -Z (Cargas Permanentes = Load 10+20)	768,1

Tabela 6-3 – Resumo das cargas estáticas sobre o *Pipe-Rack* na direção -Z

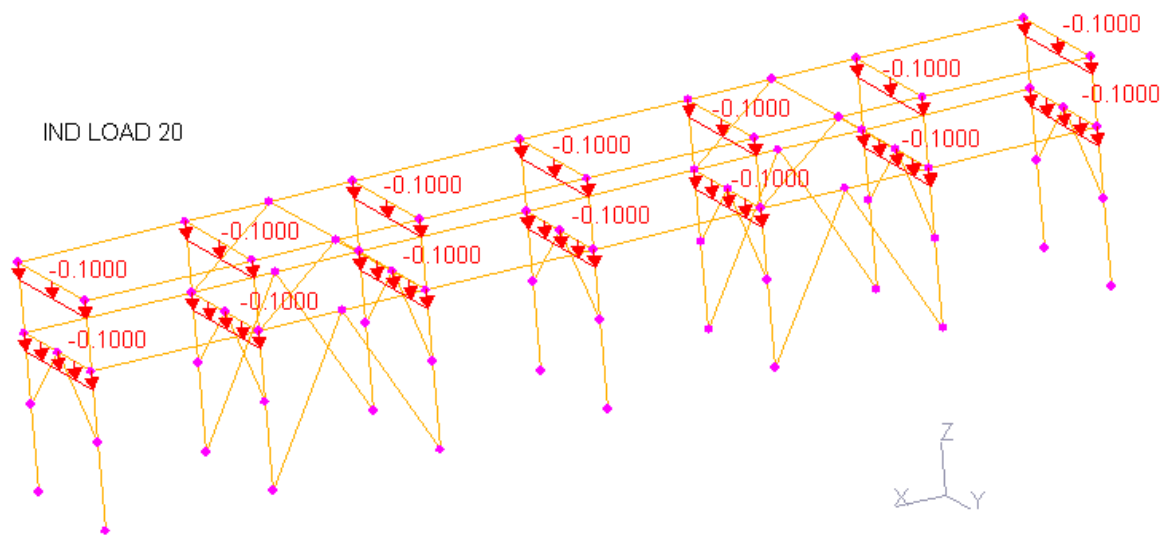


Figura 6-9 – Carga da Tubulação (kN/cm)

A estrutura do *Pipe-Rack* foi modelada com o objetivo de determinar as tensões na junta em estudo devido às acelerações unitárias impostas no centro de movimentos da embarcação – para montar o RAO de tensão da estrutura.

O carregamento devido a estas acelerações foi calculado baseado nos conceitos apresentados no item 4.1 e em BATALHA (2009), segundo a metodologia descrita a seguir.

Os carregamentos estáticos foram gerados nas direções +X e +Y iguais aos da direção -Z. Estes carregamentos estáticos, Peso -Z, Peso +X e Peso +Y, são auxiliares para gerar os carregamentos de HEAVE, SURGE, SWAY, medROLL, medPITCH e medYAW gerados pelos seis movimentos da embarcação. As rotações possuem o prefixo “med” no nome, pois equivalem à posição de calado intermediário.

A Tabela 6-4 apresenta um resumo destes carregamentos auxiliares. A Tabela 6-5 apresenta as combinações para gerar as cargas inerciais no modelo. Os fatores utilizados nestas combinações foram detalhados a seguir.

Nome	Descrição
Peso (-Z)	Peso total estático (PP + Tubulação) - direção -Z
Peso (+X)	Peso total estático (PP + Tubulação) - direção +X
Peso (+Y)	Peso total estático (PP + Tubulação) - direção +Y

Tabela 6-4 – Carregamentos auxiliares

Carregamento	Combinações		
	Peso (-Z)	Peso (+X)	Peso (+Y)
HEAVE	-0,102	-	-
SURGE	-	0,102	-
SWAY	-	-	0,102
medROLL	0,009	-	0,047
medPITCH	0,143	0,047	-
medYAW	-	0,009	0,143

Tabela 6-5 – Combinações para obter as forças inerciais

- Forças Inerciais devido aos movimentos de translações da unidade flutuante:

O objetivo é calcular as forças devido às acelerações unitárias, ou seja, $\omega^2 z_a = 1.m/s^2$. Considerando a aceleração da gravidade $g = 9,81.m/s^2$, temos:

$$F_{Z,heave} = \frac{P(kN) \times 1m/s^2}{9,81.m/s^2} = -0,102 \times (Peso - Z)$$

$$F_{X,surge} = \frac{P(kN) \times 1m/s^2}{9,81.m/s^2} = 0,102 \times (Peso + X)$$

$$F_{Y,sway} = \frac{P(kN) \times 1m/s^2}{9,81.m/s^2} = 0,102 \times (Peso + Y)$$

- Forças Inerciais devido aos movimentos de rotação da unidade flutuante:

O objetivo é calcular as forças devido às acelerações rotacionais unitárias, ou

seja, $\left(\frac{4\pi^2\phi_a}{T^2}\right) = 1\text{grau}/s^2 = \left(\frac{\pi}{180}\right)$. Considerando a aceleração da gravidade

$g = 9,81.m/s^2$, temos:

$$Ty_{roll} = \frac{P}{g} \times \left(\frac{\pi}{180}\right) \times z_0 = 0,047 \times (Peso + Y)$$

$$Tz_{roll} = \frac{P}{g} \times \left(\frac{\pi}{180}\right) \times y_0 = 0,009 \times (Peso - Z)$$

$$Tx_{pitch} = \frac{P}{g} \times \left(\frac{\pi}{180}\right) \times z_0 = 0,047 \times (Peso + X)$$

$$Tz_{pitch} = \frac{P}{g} \times \left(\frac{\pi}{180}\right) \times x_0 = 0,143 \times (Peso - Z)$$

$$Tx_{yaw} = \frac{P}{g} \times \left(\frac{\pi}{180}\right) \times y_0 = 0,009 \times (Peso + X)$$

$$Ty_{yaw} = -\frac{P}{g} \times \left(\frac{\pi}{180}\right) \times x_0 = 0,143 \times (Peso + Y)$$

Por aproximação, consideramos as distâncias ao centro de movimentos da embarcação (x_0, y_0, z_0) constantes para todos os pontos da estrutura. Com o objetivo de obter de forma simples as forças inerciais. Esta posição, (x_0, y_0, z_0) foi definida na Tabela 6-1.

6.3.4 Tensões Nominais

De acordo com BATALHA (2009), ao importar tensões nominais do programa *GTSTRUDL* (2007), temos apenas as máximas amplitudes de tensão nas várias direções, conforme definido a seguir:

- F_a – Tensão normal no sentido axial (tração positiva e compressão negativa);
- F_{by} – Tensão normal devido a esforços de flexão em torno do eixo Y;
- F_{bz} – Tensão normal devido a esforços de flexão em torno do eixo Z;
- F_{vy} – Tensão de cisalhamento média na direção do eixo Y;
- F_{vz} – Tensão de cisalhamento média na direção do eixo Z.

A Figura 6-10 apresenta os componentes de tensão e convenções de eixos locais.

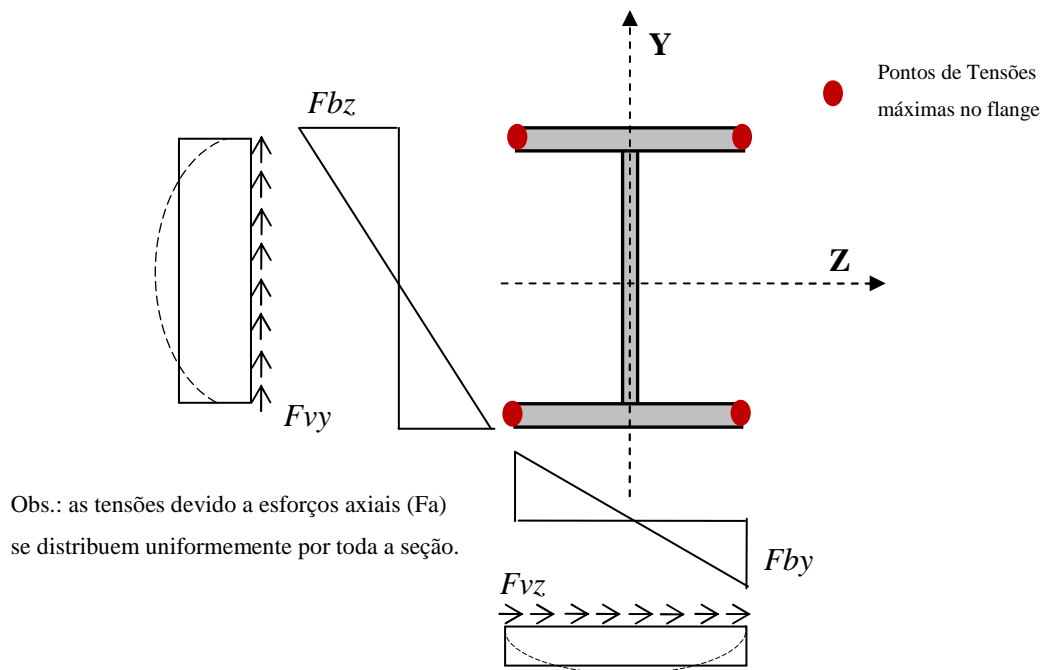


Figura 6-10 – Componentes de tensão e convenções de eixos locais

A partir das forças inerciais, são obtidas as componentes de tensões para atuar como RAO, transformando acelerações em tensões e somando as componentes de tensões através do princípio de superposição de efeitos para cada direção e amplitude de movimentos. (BATALHA, 2009)

A Tabela 6-6 apresenta as tensões no membro 39 do modelo estrutural devido às acelerações unitárias no centro de movimentos da embarcação. É importante ressaltar que a junta de apoio analisada é a junta de início deste membro, ou seja, a junta de seção 0 na Tabela 6-6.

Seção	Carregamento	Fa	Fvy	Fvz	Fby	Fbz
0 (início)	HEAVE	3,79E-02	-1,36E-02	-1,34E-10	5,75E-09	-4,42E-02
0 (início)	SURGE	-1,27E-09	2,30E-09	-8,53E-03	2,38E-01	7,56E-09
0 (início)	SWAY	-6,76E-02	1,52E-01	-2,84E-11	1,13E-09	6,17E-01
0 (início)	medROLL	-3,45E-02	7,14E-02	-1,49E-12	2,23E-11	2,88E-01
0 (início)	medPITCH	-5,31E-02	1,90E-02	-3,93E-03	1,10E-01	6,20E-02
0 (início)	medYAW	-9,48E-02	2,14E-01	-7,52E-04	2,10E-02	8,65E-01
1 (fim)	HEAVE	3,57E-02	-1,36E-02	-1,34E-10	5,83E-10	4,31E-02
1 (fim)	SURGE	-1,27E-09	2,30E-09	-4,40E-03	-1,20E-02	-7,25E-09
1 (fim)	SWAY	-6,76E-02	1,44E-01	-2,84E-11	3,59E-11	-3,36E-01
1 (fim)	medROLL	-3,43E-02	6,74E-02	-1,49E-12	-3,53E-11	-1,59E-01
1 (fim)	medPITCH	-5,01E-02	1,90E-02	-2,03E-03	-5,55E-03	-6,05E-02
1 (fim)	medYAW	-9,48E-02	2,02E-01	-3,88E-04	-1,06E-03	-4,72E-01

Tabela 6-6 – Tensões no membro 39 (kN/cm²)

6.4 DADOS DE FADIGA

Será analisado o flange da junta de apoio definida anteriormente. Devido às características desta junta, perfil “I” – com dimensão h (ou l) = 225mm – soldado a uma chapa, foi adotada a curva S-N de Categoria F na classificação da DNV-RP-C203 (2008). A Figura 6-11 apresenta o detalhe do item A.7 da DNV-RP-C203 (2008) que define a junta estudada na Categoria F.

As características desta curva estão definidas na Tabela 5-1.

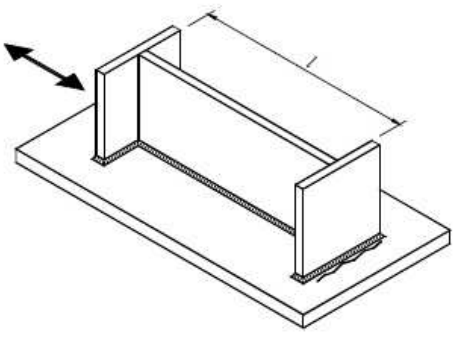
	3.	3. Longitudinal attachment welded to transverse stiffener.
		
E	$l \leq 120 \text{ mm}$	
F	$120 < l \leq 300 \text{ mm}$	
F1	$l > 300 \text{ mm}$	

Figura 6-11 – Classificação da Junta (da DNV-RP-C203, 2008)

O programa *FATDAM 2.0* utiliza o método de tensões combinadas para obter a tensão de *Hot-Spot*. Este método permite que todas as componentes de tensões sejam usadas livremente, fatorando cada uma segundo os SCFs para cada direção e o fator de correção da variação de tensões. (BATALHA, 2009)

Não foi necessário fazer correção devido à espessura, pois $t_f = 22,1\text{mm} < t_{ref} = 25\text{mm}$. Por isso, o fator de correção de tensão (C.F.) é igual a 1,0.

Os fatores de concentração de tensões para este flange são $SCF_a = SCF_{by} = SCF_{bz} = 1,0$.

A equação de tensão combinada para o ponto de tensões máximas no flange de seção “I” (ver Figura 6-10), de acordo com BATALHA (2009), é definida por:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{comb}(\omega, t) &= C.F. \times [SCF_a \cdot Fa(\omega, t) + SCF_{by} \cdot Fby(\omega, t) + SCF_{bz} \cdot Fbz(\omega, t)] \\ &= Fa(\omega, t) + Fby(\omega, t) + Fbz(\omega, t) \end{aligned}$$

6.4.1 Dados de Fadiga e o *FATDAM 2.0*

Para inserir as características da junta e as tensões devidas às acelerações unitárias no centro de movimento da embarcação foi selecionada a opção “MODELO ESTRUTURAL E DADOS DE FADIGA” na tela inicial do programa *FATDAM 2.0*.

Na aba “Características dos Detalhes Estruturais e Dados de Fadiga”, foram definidos as características da junta de apoio e os dados de fadiga da mesma. A Tabela 6-7 apresenta os dados desta junta de apoio.

Joint Description	Member	Joint	Section	Joint Type	S-N curve	SCFa	SCFsy	SCFsz	SCFby	SCFbz	CF	DFP
JUNTA_ DE_ APOIO	39	35	0	0 Geral (fa + by + bz)	DnV- F	1	0	0	1	1	1	4

Tabela 6-7 – Características da junta de apoio e dados de fadiga

Na aba “Dados de Tensões para Acelerações unitárias”, foi selecionada a opção “Tensões para acelerações unitárias”. A seguir, foi definido o calado: calado intermediário. A Tabela 6-6 de tensões do membro 39 devido às acelerações unitárias no centro de movimentos da unidade neste calado foi inserida no programa, conforme ilustrado na Figura 6-12.

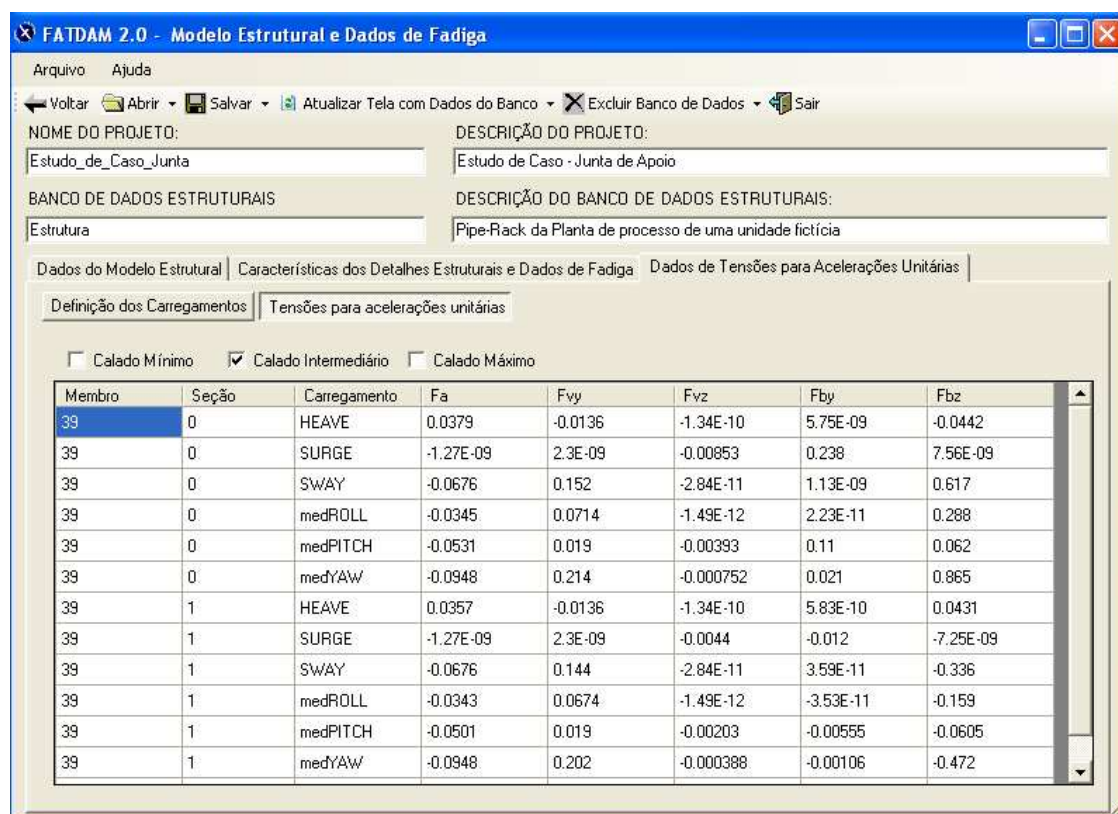


Figura 6-12 – Tela de Tensões para acelerações unitárias

6.5 DADOS AMBIENTAIS

Neste item, serão apresentados os detalhes dos dados ambientais utilizados.

Para unidade com aproamento de 225 graus, considerando a unidade simétrica, o problema deveria ser avaliado com RAOs de movimentos para as direções 0, 45, 90 e 135 graus, no mínimo. Porém, por se tratar de um problema acadêmico cujo objetivo é a apresentação dos passos para a análise de fadiga de uma estrutura *offshore*, considerou-se neste estudo que todas as ondas incidem na direção de 90 graus.

É importante ressaltar que as simplificações de calado único e direção de incidência de ondas única feitas só são justificadas para um problema acadêmico. Em um projeto real, deve-se considerar a análise para os três calados diferentes e para várias direções de incidência de onda (tantas quanto necessárias).

6.5.1 Diagrama de Dispersão de Ondas

O diagrama de dispersão de ondas de entrada no programa deve ser o referente a um ano. Ou seja, para registros em intervalos de 3 horas, o total de ocorrências deve ser o de 2920 (365d x 24h / 3h). O diagrama de dispersão de ondas da unidade fictícia tinha um total de 13608 ocorrências (ver Tabela 6-8). Por isso, este foi “transformado” em probabilidade de ocorrência e então obtivemos o diagrama de dispersão de ondas anual. Este está apresentado na Tabela 6-9 e foi elaborado a partir das distribuições da altura de onda significativa (H_s) e do período de pico (T_p). Como só há incidência de ondas na unidade fictícia na direção NW, só apresentamos esta direção na Tabela 6-9 e todas as outras colunas seriam zeradas.

Hs (m)	Tp (seg)	DIREÇÃO DE INCIDÊNCIA								TOTAL
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
0,25	7,5	0	0	0	0	0	0	0	3	3
0,75	7,85	0	0	0	0	0	0	0	293	293
1,25	7,93	0	0	0	0	0	0	0	3125	3125
1,75	8,26	0	0	0	0	0	0	0	4696	4696
2,25	8,95	0	0	0	0	0	0	0	3023	3023
2,75	9,69	0	0	0	0	0	0	0	1485	1485
3,25	10,4	0	0	0	0	0	0	0	604	604
3,75	11,3	0	0	0	0	0	0	0	224	224
4,25	12,1	0	0	0	0	0	0	0	99	99
4,75	12,6	0	0	0	0	0	0	0	39	39
5,25	12,7	0	0	0	0	0	0	0	13	13
5,75	12,5	0	0	0	0	0	0	0	2	2
6,25	13,5	0	0	0	0	0	0	0	2	2
									SOMA	13608

Tabela 6-8 – Diagrama de dispersão de ondas – Dado de “Projeto”

Hs (m)	Tp (seg)	Direção NW		TOTAL
		% de Ocorrência	Número de Incidências Anual	
0,25	7,5	0.02	0.6	0.6
0,75	7,85	2.15	62.9	62.9
1,25	7,93	22.96	670.6	670.6
1,75	8,26	34.51	1007.7	1007.7
2,25	8,95	22.21	648.7	648.7
2,75	9,69	10.91	318.7	318.7
3,25	10,4	4.44	129.6	129.6
3,75	11,3	1.65	48.1	48.1
4,25	12,1	0.73	21.2	21.2
4,75	12,6	0.29	8.4	8.4
5,25	12,7	0.10	2.8	2.8
5,75	12,5	0.01	0.4	0.4
6,25	13,5	0.01	0.4	0.4
			SOMA	2920

Tabela 6-9 – Diagrama de dispersão de ondas – Anual

Considerando os 13 estados de mar, uma única direção de incidência de ondas e um único calado, a análise de fadiga terá 13 condições de fadiga (espectros de resposta).

6.5.2 Espectros de Mar

A formulação adotada foi a *JONSWAP* ajustada para a Bacia de Campos apresentada no item 3.2.1 com os parâmetros do diagrama de dispersão de ondas.

6.5.3 Dados Ambientais e o *FATDAM 2.0*

Para inserir os dados ambientais no programa foi selecionada a opção “DIAGRAMA DE DISPERSÃO DE ONDAS”. Nesta tela, foi inserido o diagrama de dispersão de ondas apresentado na Tabela 6-8, e, foi selecionada a opção para a formulação do espectro, ou seja, foi selecionado o Espectro de *JONSWAP* ajustado para a Bacia de Campos.

A Figura 6-13 e a Figura 6-14 ilustram os espectros de ondas dos treze estados de mar.

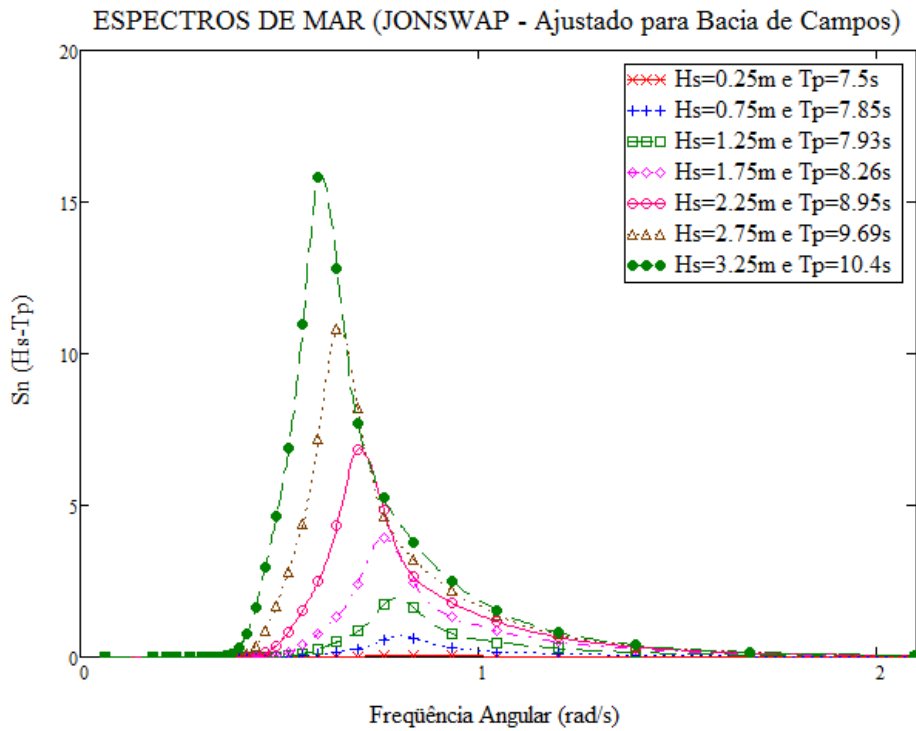


Figura 6-13 – Espectros de ondas dos estados de mar de $H_s = 0.25\text{m}$ à $H_s = 3.25\text{m}$

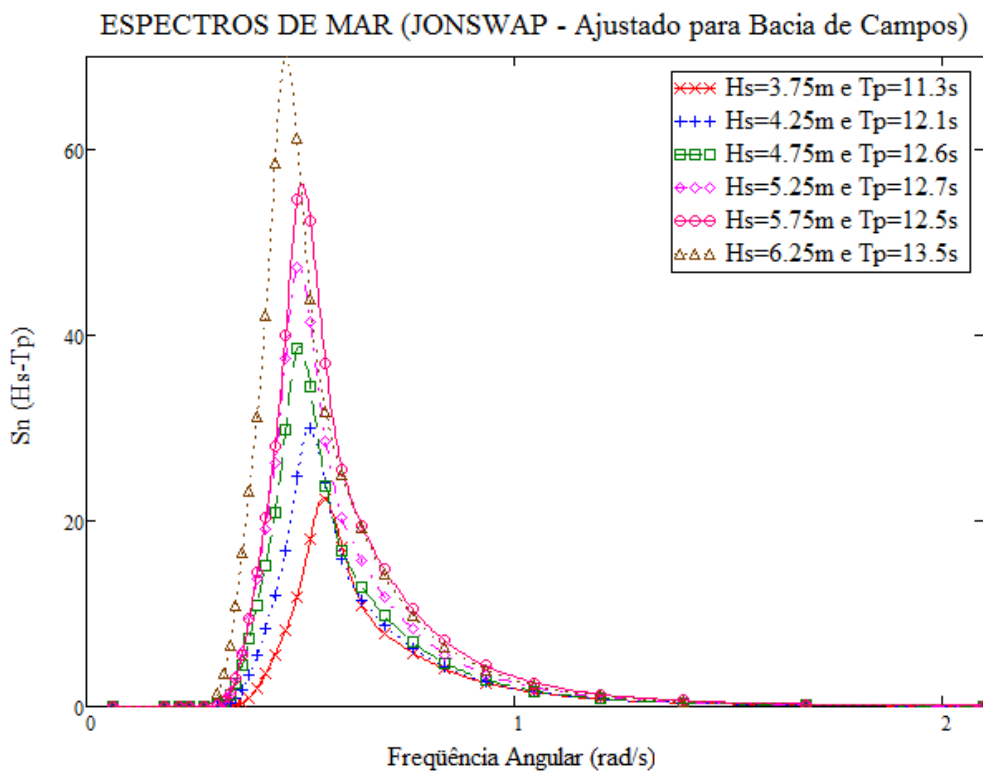


Figura 6-14 – Espectros de ondas de estados de mar de $H_s = 3.75\text{m}$ à $H_s = 6.25\text{m}$

6.6 RAO DE DESLOCAMENTOS DO FPSO

Os RAOs de deslocamentos do FPSO fictício foram retirados de BATALHA (2009). A Figura 6-15 apresenta a tela do *FATDAM 2.0* com os dados dos RAOs da unidade para a direção de incidência de 90 e calado intermediário.

Para cada movimento (*heave, surge, sway, roll, pitch e yaw*) existe um RAO diferente. Como neste estudo de caso, o calado e a direção de incidência de onda são únicos, a unidade flutuante fictícia apresenta seis RAOs de deslocamentos. A Figura 6-16 ilustra todos os RAOs de deslocamentos deste estudo.

PER.	SURGE		SWAY		HEAVE		ROLL		PITCH		YAW	
	AMPL	FASE	AMPL	FASE	AMPL	FASE	AMPL	FASE	AMPL	FASE	AMPL	FASE
3	0	-113.9	0.009	-131.6	0	-126.4	0.001	-123.5	0	-143.1	0.001	-155
3.5	0	-41.8	0.005	49.2	0.001	-51.2	0.002	86.6	0.001	-84.3	0.002	50
4	0.001	-81.5	0.025	-119.6	0.001	-165.1	0.003	-46.8	0.001	179	0.002	-69.9
4.5	0	10.5	0.04	139.5	0.003	118.4	0.006	-120	0.001	33	0.006	150.5
5	0.003	-176.7	0.065	83.4	0.006	33.3	0.013	-155.2	0.003	-26.3	0.012	117.5
5.5	0.003	90.3	0.056	35.4	0.016	10.5	0.049	-155.7	0.006	-38.4	0.021	-158.8
6	0.001	10.6	0.123	1.9	0.031	-16.1	0.049	-177.1	0.01	-57.1	0.01	103.1
6.5	0.003	-14.7	0.168	-17	0.053	-36.7	0.076	163.6	0.016	-63.9	0.012	82.5
7	0.005	-28.9	0.215	-32.5	0.088	-51.2	0.114	149.9	0.021	-74.5	0.013	74.1
7.5	0.006	-15	0.263	-44.1	0.134	-64	0.165	139.2	0.032	-72.4	0.012	70.3

Figura 6-15 – *FATDAM 2.0* – Tabelas de RAO de deslocamentos

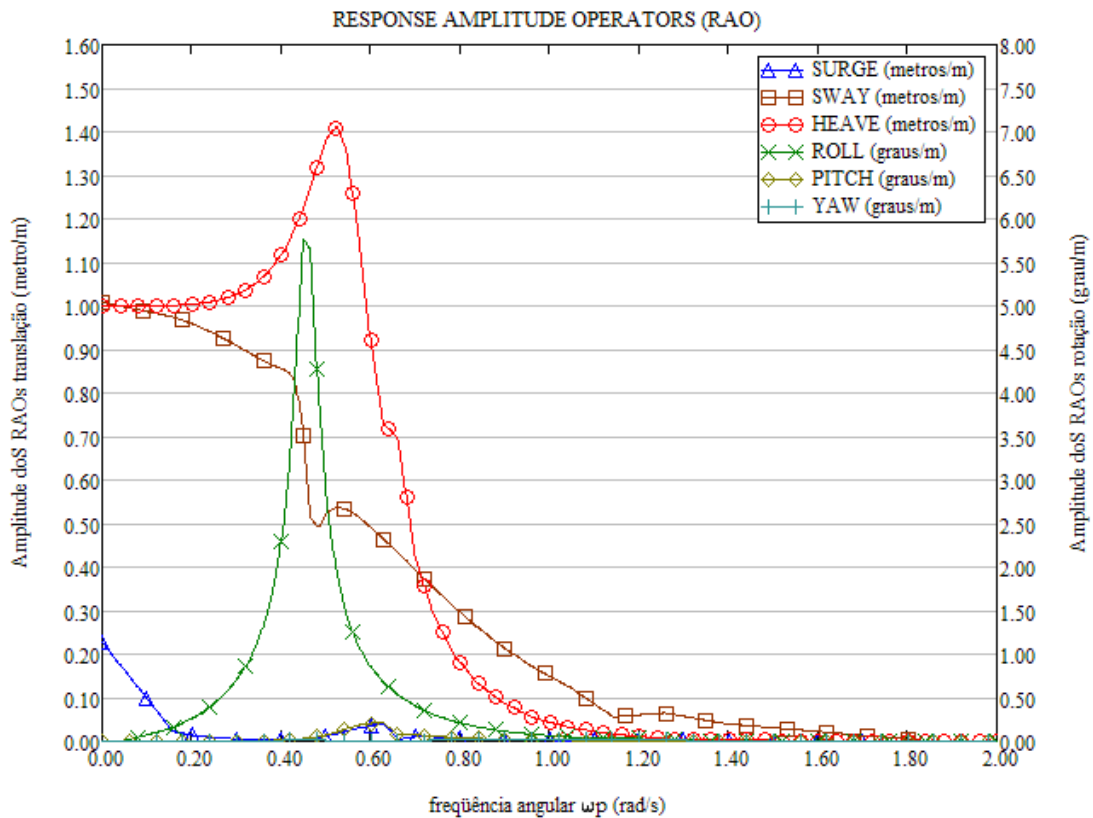


Figura 6-16 – RAOs de deslocamentos da unidade fictícia para calado intermediário com direção de incidência de ondas de 90° (BATALHA, 2009)

6.7 ANÁLISE DE FADIGA ESTOCÁSTICA

Para realizar a análise, na tela inicial, escolher a opção “Análise de Fadiga Estocástica”.

Na aba “Selecionar Dado de Entrada, as opções de calado, direções de incidência de ondas e estados de mar devem ser preenchidas. Para este o caso deste estudo, os dados de entrada ficaram preenchidos de acordo com a Figura 6-17.

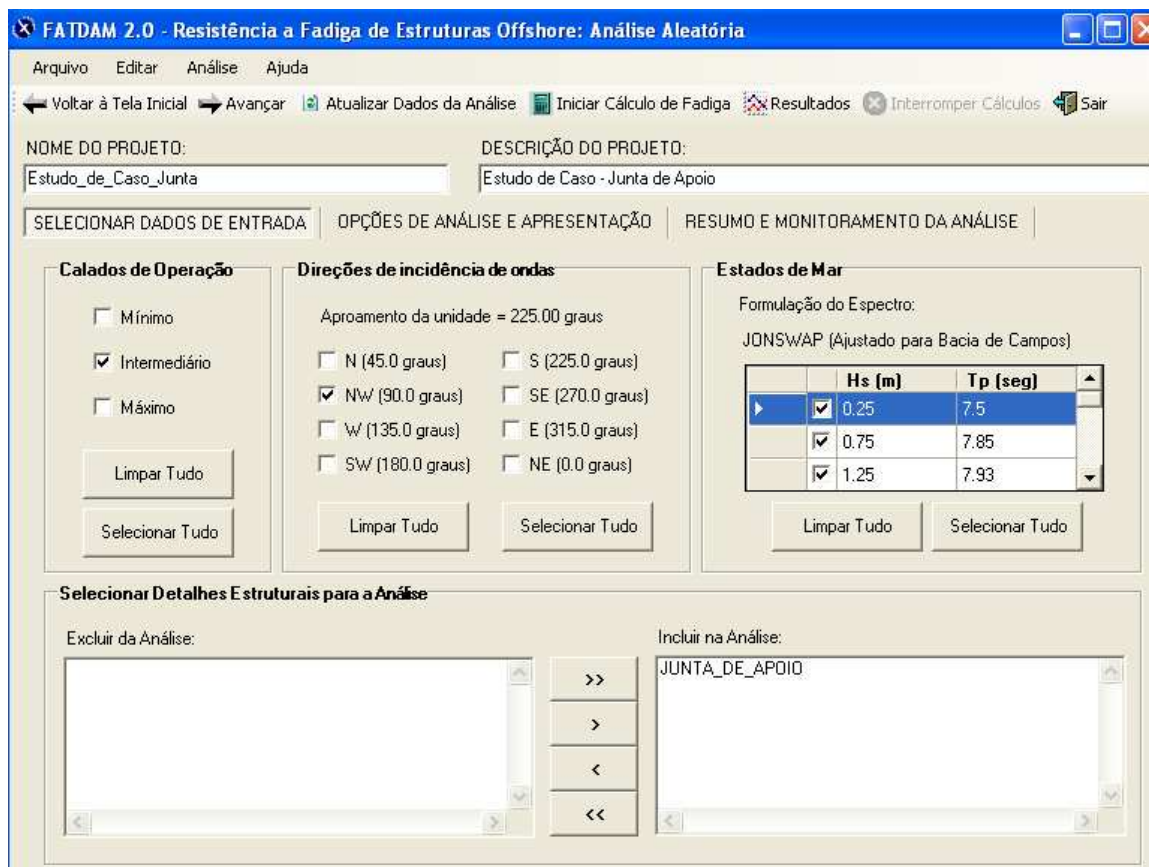


Figura 6-17 – FATDAM 2.0 – Análise estocástica – Dados de entrada

A aba “Opções de Análise e Apresentação” ficou preenchida de acordo com a Figura 6-18. O intervalo de ω ($=2\pi/T$) utilizado foi de 0,0628 a 2,094rad/s, pois, foi considerado o mesmo intervalo dos RAOs de deslocamentos cujo período variou de 3 a 100 seg.

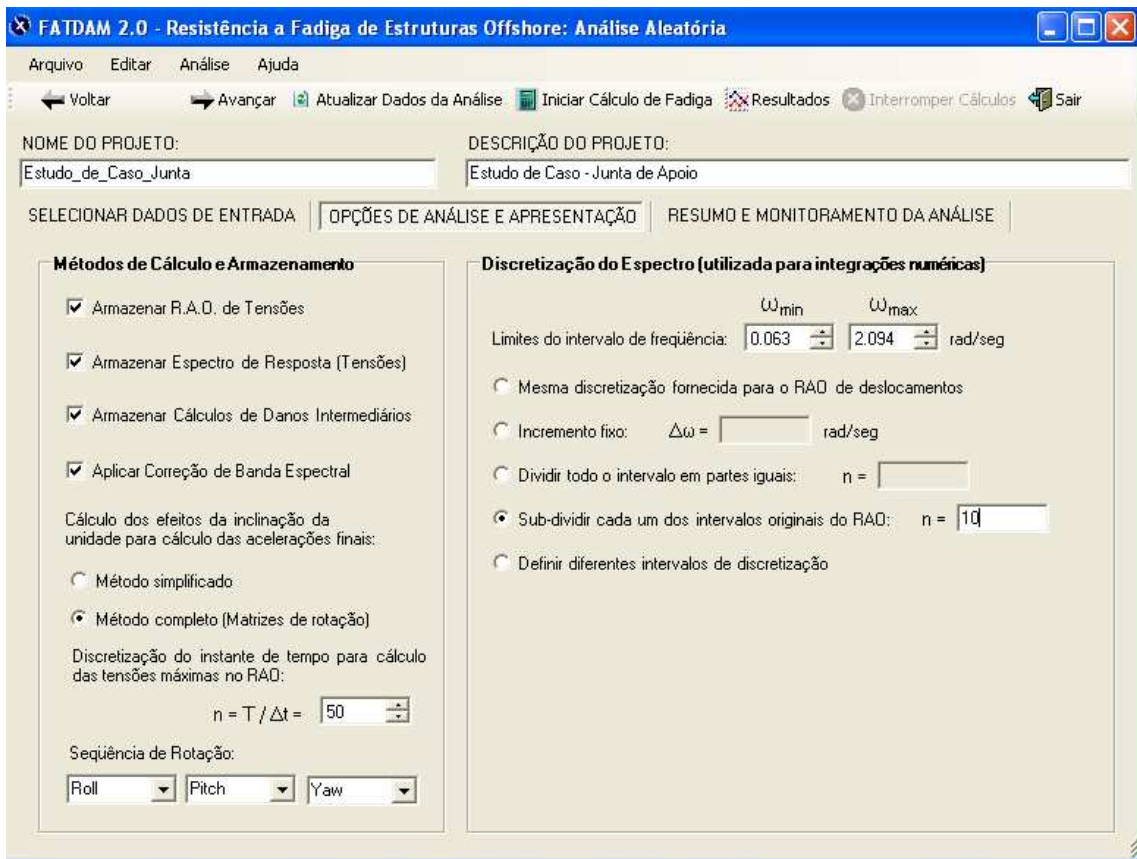


Figura 6-18 – FATDAM 2.0 – Opções de análise e apresentação

Selecionar a aba “Resumo e Monitoramento da Análise” e clicar no botão “Atualizar dados de Análise”, que está abaixo da barra de ferramentas do programa. Verificar se as condições de carregamentos a ser analisados estão corretas. Neste estudo, as condições de carregamento nesta aba estão apresentadas na Figura 6-19.

Para o programa realizar a análise de fadiga deve-se clicar no botão “Iniciar Cálculo de Fadiga”.

Nos próximos itens, serão apresentados os resultados da análise.

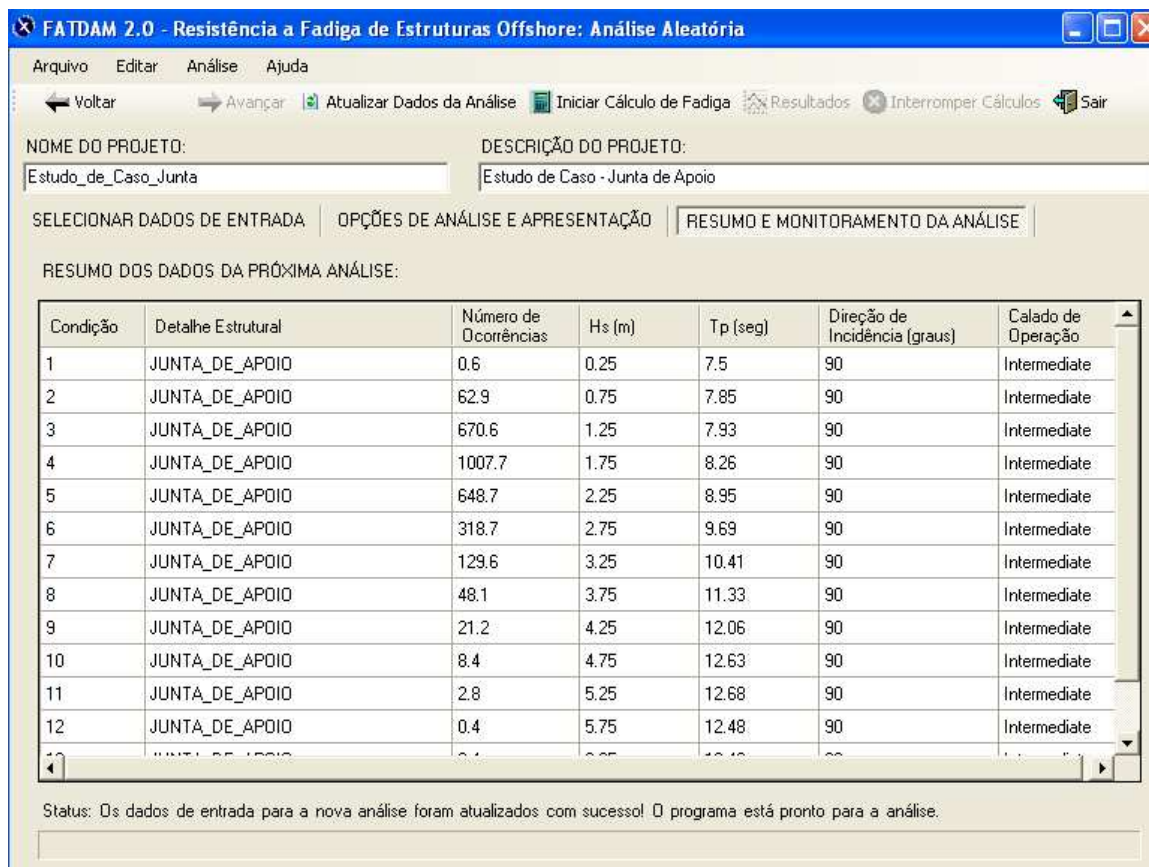


Figura 6-19 – FATDAM 2.0 – Resumo e monitoramento da análise

6.8 RAO DE TENSÕES DA ESTRUTURA

O RAO de tensões final da junta de apoio em estudo foi montado para cada valor de ω sempre para o valor de t que retornará a maior amplitude de tensões. (BATALHA, 2009)

Este caso apresenta somente um RAO de tensões, pois só analisa uma junta, com uma direção de incidência de ondas e um único calado. Este RAO está apresentado na Figura 6-20.

Detalhes sobre a determinação dos RAOs pelo programa *FATDAM 2.0* consultar BATALHA (2009).

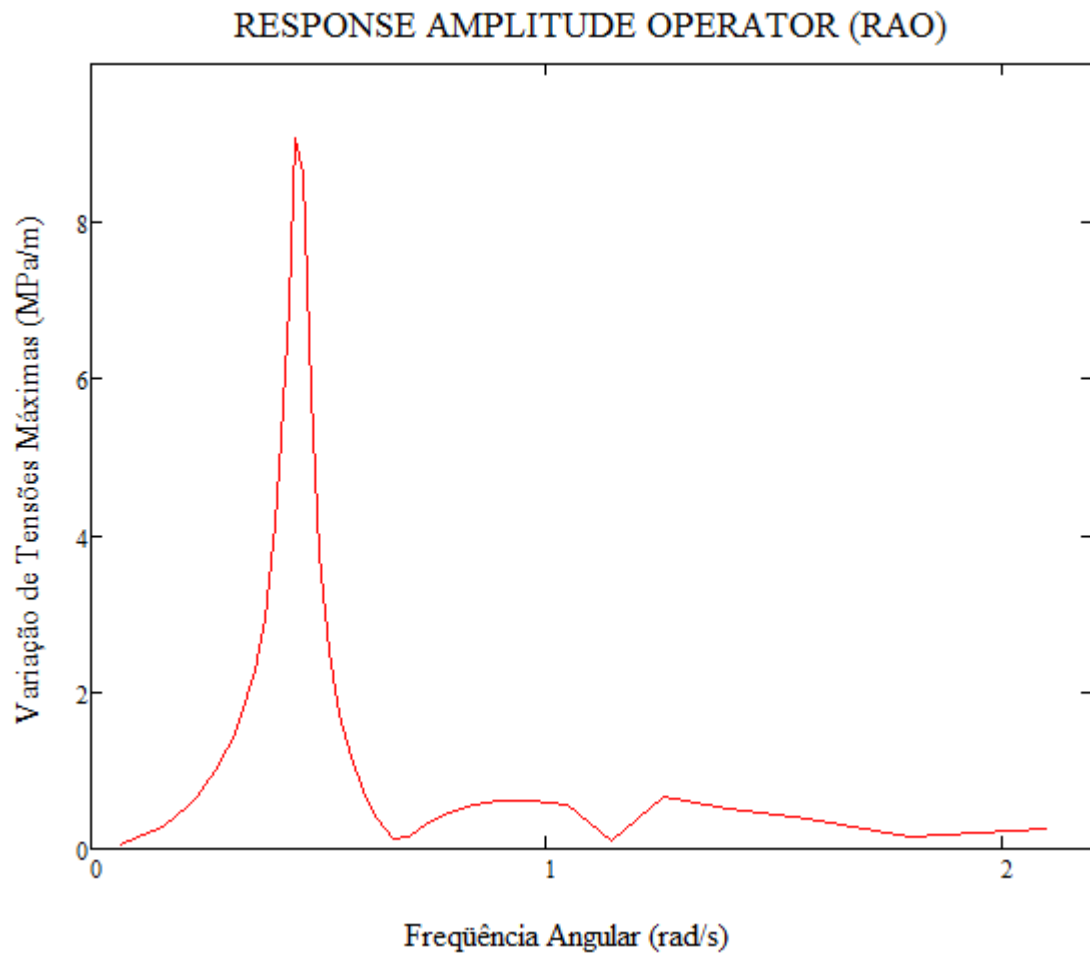


Figura 6-20 – RAO de Tensões

6.9 ESPECTROS DE RESPOSTA

O espectro de resposta é obtido através do cruzamento de um RAO de tensões com o espectro de mar, de acordo com a expressão definida no item 4.4 e re-apresentada a seguir:

$$S_R(\omega) = [RAO(\omega)]^2 S_\eta(\omega)$$

A Figura 6-21, a Figura 6-22 e a Figura 6-23 ilustram os treze espectros de resposta.

ESPECTROS DE RESPOSTA (DE TENSÕES)

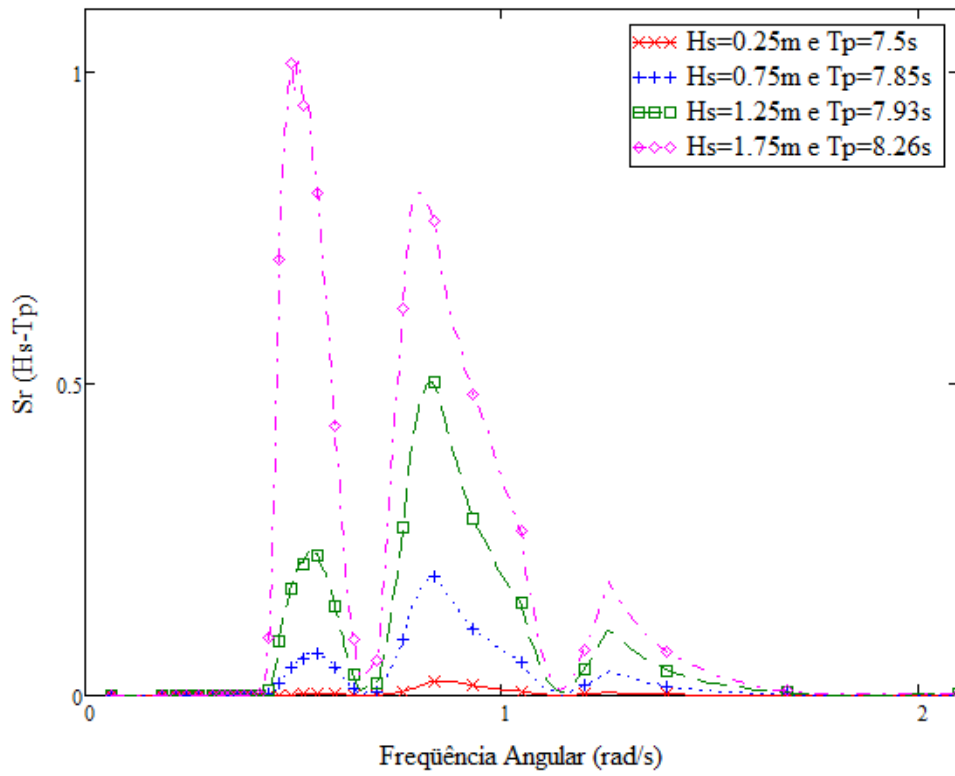


Figura 6-21 – Espectro de resposta Hs = 0.25m à Hs = 1.75m

ESPECTROS DE RESPOSTA (DE TENSÕES)

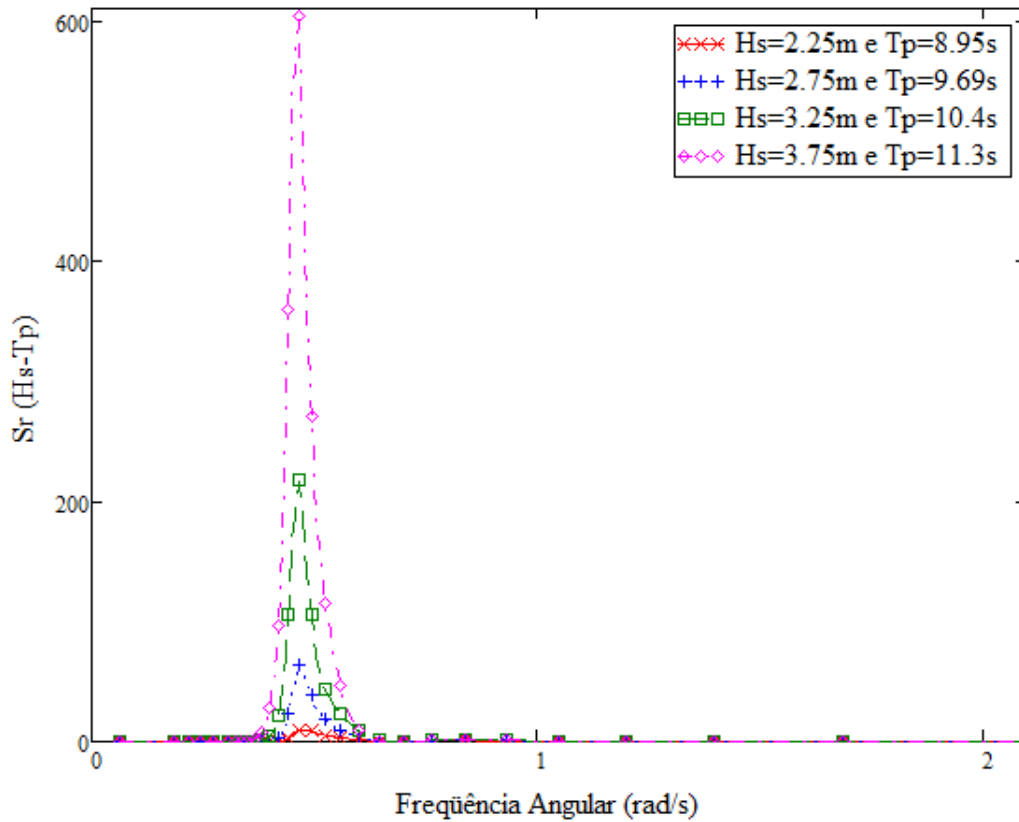


Figura 6-22 – Espectro de resposta Hs = 2.25m à Hs = 3.75m

ESPECTROS DE RESPOSTA (DE TENSÕES)

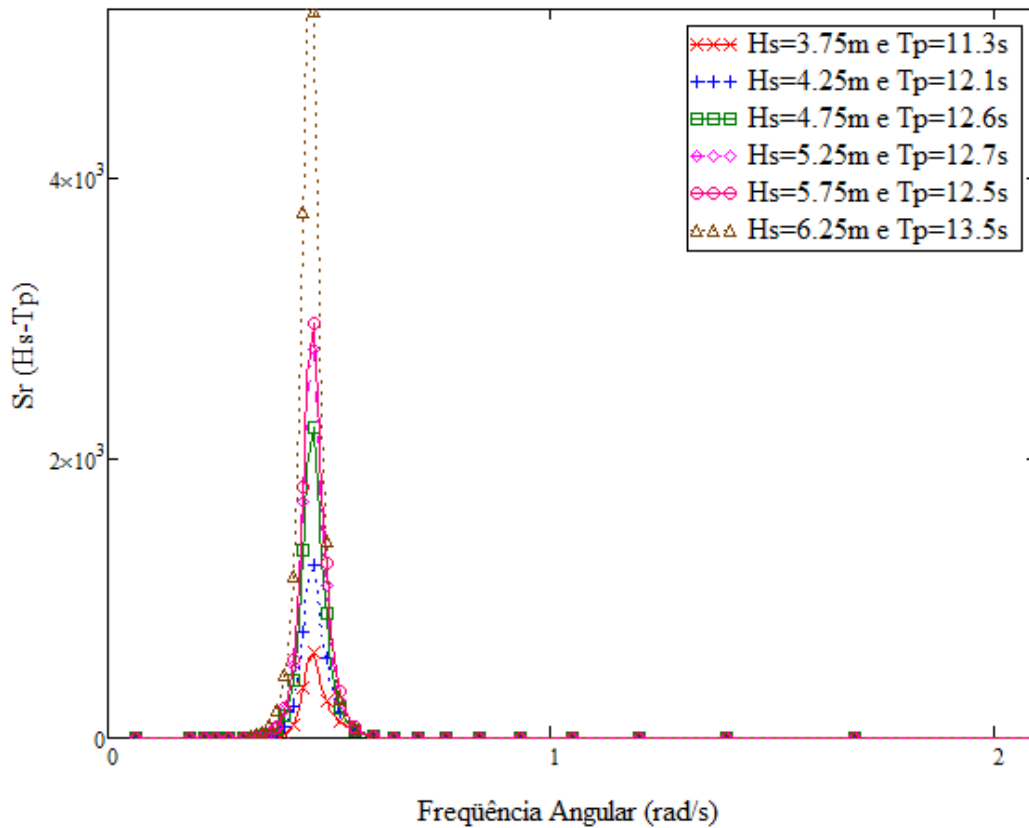


Figura 6-23 – Espectro de resposta $H_s = 4.25\text{m}$ à $H_s = 6.25\text{m}$

6.10 CÁLCULO DO DANO E VIDA ÚTIL

O cálculo do dano final acumulado e da vida útil (vida fadiga) foi determinado segundo a metodologia apresentada no item 5.3.

Neste item, serão apresentadas as listagens detalhadas dos resultados obtidos da análise de fadiga estocástica de uma da junta de apoio do *Pipe-Rack* no convés da unidade. A Figura 6-24 ilustra o resumo da análise gerado pelo programa.

NOME DO PROJETO:			DESCRIÇÃO DO PROJETO:					
Estudo_de_Caso_Junta			Estudo de Caso - Junta de Apoio					
VIDA FADIGA E RESUMO DA ANÁLISE		DANOS PARCIAIS POR CARREGAMENTO			GRÁFICOS DE VISUALIZAÇÃO DE ESPECTROS E RAO'S			
Detalhe Estrutural	Membro	Seção	Curva S-N	v0_médio (Hz)	Dano Total Acumulado	Vida a Fadiga (anos)	DFF	Status
JUNTA_DE_APOIO	39	0.000	DnV-F	0.12	1.18534E-03	843.642	4	PASSOU

Figura 6-24 – FATDAM 2.0 – Resumo da análise

6.10.1 Danos Parciais

A listagem a seguir detalha os danos parciais à fadiga para cada condição de carregamento:

```

*****
* PROGRAMA FATDAM 2.0 (JULHO DE 2009) *
* ANÁLISE DE FADIGA ESTOCÁSTICA EM ESTRUTURAS OFFSHORE *
* COPPE / UFRJ - PROGRAMA DE ENGENHARIA CIVIL *
* DESENVOLVIDO POR: Alessandro Ferreira Batalha *
* ORIENTADO POR: Gilberto Bruno Ellwanger *
* Marcos Queija de Siqueira *
*****

TRABALHO: Estudo_de_Caso_Junta Estudo de Caso - Junta de Apoio
CRIADO EM: terça-feira, 22 fev 2011 - 08:51:27

-----
- LISTAGEM DETALHADA DE DANO A FADIGA -
  DETALHE ESTRUTURAL: JUNTA_DE_APOIO
-----
MEMBRO: 39 SEÇÃO: 0.0000

CURVA S-N: DnV-F

FATORES DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES
CF SCFa SCFsy SCFsz SCFby SCFbz
1.000 1.000 0.000 0.000 1.000 1.000

MÉTODO DE CÁLCULO DAS TENSÕES COMBINADAS: TIPO 0
FORMULAÇÃO DO ESPECTRO DE MAR: JONSWAP (Ajustado para Bacia de Campos)

-----
| CALADO-DIR. | ----- ESTADOS DE MAR ----- | ----- MOMENTOS ESPECTRAIS ----- | Freq. | Número | DANO A |
| | Hs(m) Tp(seg) Ocorrências | m0 m2 m4 | v0(Hz) | de Ciclos | FADIGA |
-----
med-90 0.25 7.5 6.0000E-01 6.11773E-03 5.74602E-03 6.81852E-03 0.1542 9.99502E+02 1.23688E-15
med-90 0.75 7.85 6.29000E+01 5.60430E-02 4.78913E-02 5.40243E-02 0.1471 9.99452E+04 3.11836E-11
med-90 1.25 7.93 6.70600E+02 1.58179E-01 1.31037E-01 1.45920E-01 0.1449 1.04913E+06 4.37009E-09
med-90 1.75 8.26 1.00770E+03 3.56870E-01 2.48783E-01 2.57060E-01 0.1329 1.44621E+06 4.55767E-08
med-90 2.25 8.95 6.48700E+02 1.20432E+00 5.05317E-01 3.75306E-01 0.1031 7.22269E+05 4.70844E-07
med-90 2.75 9.69 3.18700E+02 4.75211E+00 1.38076E+00 6.27159E-01 0.0858 2.95286E+05 5.99617E-06
med-90 3.25 10.41 1.29600E+02 1.45134E+01 3.64022E+00 1.18779E+00 0.0797 1.11565E+05 3.76441E-05
med-90 3.75 11.33 4.81000E+01 4.02340E+01 9.32863E+00 2.47268E+00 0.0766 3.98108E+04 1.71538E-04
med-90 4.25 12.06 2.12000E+01 8.07965E+01 1.80814E+01 4.40108E+00 0.0753 1.72385E+04 3.48626E-04
med-90 4.75 12.63 8.40000E+00 1.34442E+02 2.93903E+01 6.83356E+00 0.0744 6.75084E+03 3.55066E-04
med-90 5.25 12.68 2.80000E+00 1.67888E+02 3.66284E+01 8.48705E+00 0.0743 2.24803E+03 1.72651E-04
med-90 5.75 12.48 4.00000E-01 1.83804E+02 4.04250E+01 9.50194E+00 0.0746 3.22442E+02 2.86587E-05
med-90 6.25 13.48 4.00000E-01 3.07670E+02 6.50493E+01 1.43898E+01 0.0732 3.16142E+02 6.46360E-05

*****
* FIM DOS RESULTADOS *
*****

```


6.10.2 Dano Final Acumulado e Vida à Fadiga

A listagem a seguir detalha o dano acumulado e a vida à fadiga:

```

*****
* PROGRAMA FATDAM 2.0 (JULHO DE 2009) *
* ANÁLISE DE FADIGA ESTOCÁSTICA EM ESTRUTURAS OFFSHORE *
* COPPE / UFRJ - PROGRAMA DE ENGENHARIA CIVIL *
* DESENVOLVIDO POR: Alessandro Ferreira Batalha *
* ORIENTADO POR: Gilberto Bruno Ellwanger *
* Marcos Queija de Siqueira *
*****

TRABALHO: Estudo_de_Caso_Junta Estudo de Caso - Junta de Apoio
CRIADO EM: terça-feira, 22 fev 2011 - 08:51:36

-----
- RELATÓRIO DE DANO ACUMULADO E VIDA A FADIGA -
-----

MEMBROS QUE NÃO PASSARAM NA VERIFICAÇÃO
DE VIDA A FADIGA SÃO MARCADOS COM **

-----
| DETALHE ESTRUTURAL | MEMBRO | SEÇÃO | CURVA | Freq. v0 | DANO | VIDA | DFF | STATUS |
| (Descrição) | | | S-N | média (Hz) | ACUMULADO | (anos) | | |
-----
| JUNTA_DE_APOIO | 39 | 0.000 | DnV-F | 0.1200 | 1.18534E-03 | 843.642 | 4 | PASSOU |
-----

TOTAL DE VERIFICAÇÕES: 1
FALHAS REGISTRADAS: 0

*****
* FIM DOS RESULTADOS *
*****

```

O número de ciclos de entrada no programa deve ser o anual. O dano encontrado é o anual. Assim, a vida à fadiga é o inverso do dano ($Vida = 1/Dano$). Considerando que a estrutura foi projetada para 25 anos de operação, o dano foi limitado a 0.04 (1/25).

Como a junta em questão é uma junta de apoio do *Pipe-Rack* no convés da unidade, o fator de segurança, critério de projeto, é igual a 4 (ver Tabela 5-2 - elementos estruturais principais de grande responsabilidade).

Este fator de segurança limita o dano a 0.01, ou seja, 100 anos. Como a vida útil, calculada pelo programa *FATDAM 2.0*, foi de 843 anos e a estrutura deve ser projetada para 100 anos de operação, a junta passou para nesta análise de fadiga.

Apesar de passar, este componente estrutural não está econômico com relação à análise de fadiga para esta direção de incidência de ondas. Está com vida útil estimada em 8,43 vezes mais do que precisaria na prática.

Porém, em um projeto real, é necessário analisar outras direções de onda e diferentes calados, para concluir se a estrutura passa e está econômica.

7 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi à análise de fadiga estocástica em estruturas *Topsides* devido às incidências das ondas sobre a unidade flutuante.

O método estocástico descreve de forma mais realista o comportamento do mar do que o método determinístico, pois, considera a natureza aleatória das ondas do mar. Este método utiliza espectros, o que gera uma análise complexa e com muitas variáveis, contendo assim uma grande quantidade de dados, o que torna cálculo manual inviável.

O método aleatório pode apresentar danos à fadiga maiores ou menores do que os danos para o método determinístico, dependendo do intervalo de frequências utilizado. Como o método determinístico utiliza uma única onda para descrever todo o processo, se o período desta onda for muito próximo do período de ressonância da estrutura, os resultados são muito desfavoráveis, e por outro lado, se o período da onda for muito distante do período ressonante, de forma análoga, os resultados serão extremamente favoráveis. Ou seja, estes resultados seriam não conservadores, ou ainda, contra a segurança da estrutura. Portanto, afirmar que os resultados de uma análise determinística são conservadores ou não, dependeria das ondas regulares utilizadas para descrição dos estados de mar registrados para uma dada localidade. (BATALHA, 2009)

Atualmente, o método determinístico é o método de análise de fadiga utilizado no mercado. O programa *FATDAM 2.0*, de propriedade da Exactum Consultoria e Projetos Ltda., foi desenvolvido para tornar viável a análise espectral.

Esta é uma ferramenta computacional gera resultados de forma rápida e prática para a análise de fadiga espectral. Porém, é necessário que o usuário compreenda todas as variáveis envolvidas na análise para evitar erros graves. E, como em outras ferramentas computacionais, é fundamental que o usuário saiba interpretar os resultados da análise feita pelo programa.

Sugestões para trabalhos futuros:

Realizar a análise de fadiga estocástica considerando os três tipos de calado e mais direções de incidência de ondas sobre a unidade flutuante;

Realizar análise de fadiga estocástica e determinística de um mesmo componente estrutural, a fim de se fazer comparações entre os métodos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BATALHA, A. F., 2009. Análise de Fadiga de Estruturas Offshore Tipo Topside. Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- BHATTACHARYYA, R., 1978, *Dynamics of Marine Vehicles*. John Wiley & Sons, 1st edition. New York, USA.
- BRANDÃO, L. A., 2008. Análise Acoplada dos Movimentos de uma Unidade Flutuante e da Dinâmica dos Sistemas de Ancoragens e Risers.
- CHAKRABARTI, S. K., 1987, *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Computational Mechanics Publications. Southampton, UK.
- DNV, 2008, Recommended Practice RP-C203: Fatigue Strength Analysis of Offshore Steel Structures. Det Norske Veritas. Høvik, Norway.
- ELLWANGER, G. B., 2010. Tecnologias de Exploração de Petróleo. Apostila da Graduação e do Mestrado Profissional da Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- GERDAU-AÇOMINAS, 2008, Tabela de Bitolas – Perfis GERDAU AÇOMINAS. Disponível em: <<http://www.gerdau.com.br/perfisgerdauacominas>>. Acesso em: 16 dez. 2008, 15:12:00.
- GTSTRUDL, 2007, *User Reference Manual – versão 29.1*. Georgia Institute of Technology, Georgia, USA.
- LOUREIRO FILHO, F. S., 2008, Metodologia para Análise de Fadiga de Dutos Flexíveis Baseada em Confiabilidade Estrutural. Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- MYSQL, 2009, *Manual de Referência do MySQL 4.1*. Sun Microsystems, Inc. Disponível em: <<http://dev.mysql.com/doc/refman/4.1/pt/index.html>>. Acesso em: 8 ago. 2009, 18:09:00.

- NASCIMENTO, L. S., 2006, *Análise de Ondas e Correntes em Sistemas Estruturais Submersos ou Semi-submersos*. Projeto de Final de Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- NASCIMENTO, L. S., 2009, *Análise de Valores Extremos de Parâmetros de Resposta Dinâmica de Plataformas Auto-Elevatórias*. Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- PAZ, M., 1997, *Structural Dynamics – Theory and Computation*. Chapman & Hall, 4th edition. University of Louisville, Kentucky, USA.
- RIBEIRO, E. J. B., 1999. *Análise de “Risers de Plataformas Marítimas Tipo “Spar Buoy”*. Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- SBM, 2011, Portal de internet da Companhia SBM Offshore. Disponível em: <<http://www.sbmoffshore.com/PAGES/?id=20E8158A-FCD9-4415-86C4-78CF0AD0FD42>>. Acesso em: 14 fev. 2011, 07:48:00.
- VISUAL BASIC, 2005, *Microsoft Visual Basic 2005 Express Edition*. Microsoft Corporation. Washington, USA.
- WAMIT, 1995, *Wave Analysis MIT – WAMIT Theory Manual*. Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA.