



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**  
**ESCOLA POLITÉCNICA**  
*Curso de Engenharia Civil*  
*Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas*

**ANÁLISE DE FADIGA DE PLATAFORMAS METÁLICAS FIXAS**

**THAIS FERNANDES FERREIRA DA SILVA**

Projeto de Final de Curso apresentado ao corpo docente do Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Aprovado por:

**Gilberto Bruno Ellwanger**  
Prof. Associado, D.Sc., EP/UFRJ  
(Orientador)

**Nelson Szilard Galgoul**  
Prof. Associado, D.Sc., EP/UFRJ  
(Orientador)

**Maria Cascão Ferreira de Almeida**  
Profª. Adjunta, D.Sc., EP/UFRJ

Março/2010

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por iluminar toda minha trajetória de vida até aqui.

Agradeço muito à minha mãe, Bárbara e minha avó, Theresa, pelo amor ofertado e pelo sacrifício, ao longo da vida, para dar as condições necessárias que fizeram com que eu chegasse até aqui.

Ao meu namorado, Guilherme, pelo carinho, amor e compreensão.

Agradeço à SUPORTE, pela utilização do *software* SACS nas análises realizadas no presente trabalho, visto que este é um *software* comercial.

Aos amigos da SUPORTE, em especial ao Eng<sup>o</sup>, Leonardo Sant'anna, pela ajuda na execução do presente trabalho.

Aos professores Nelson Szilard Galgoul e Gilberto Bruno Ellwanger, pela orientação neste projeto.

Aos amigos da faculdade, pelo incentivo e apoio durante os anos de faculdade.

Em particular aos amigos Larisa, Lara, Tatiana e Rodrigo pela amizade e pelos ensinamentos compartilhados durante a faculdade.

## RESUMO

No presente trabalho, serão apresentados dois procedimentos para avaliação da vida à fadiga de uma estrutura do tipo fixa formada por jaqueta e convés, sujeita a carregamentos cíclicos de onda.

Será apresentada a conceituação do processo de fadiga juntamente com os principais fatores que influenciam na sua ocorrência. Uma comparação é feita entre os métodos de cálculo de carregamentos hidrodinâmicos. Dentre os métodos existentes de avaliação de fadiga em juntas soldadas de plataformas, serão aqui apresentados o método determinístico e o espectral. Para cada um dos métodos uma abordagem teórica será apresentada, juntamente com uma apresentação detalhada da estrutura e dos principais fatores que influenciam no processo de cálculo de dano devido à fadiga e conseqüentemente da vida útil.

O programa SACS, *software* de elementos finitos, foi utilizado para a realização das análises de fadiga espectral da plataforma. A partir dos resultados obtidos, foram obtidas as vidas úteis da estrutura através do método utilizado.

# ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	GERAL.....	1
1.2	OBJETIVO E ESCOPO .....	2
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....	3
<b>2.</b>	<b>TEORIA DE FADIGA .....</b>	<b>4</b>
2.1	VISÃO GERAL DA TEORIA DE FADIGA .....	4
2.1.1	<i>ANÁLISE DE FADIGA EM ESTRUTURAS OFFSHORE</i> .....	7
2.2	CONCEITOS BÁSICOS.....	9
2.2.1	<i>CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES</i> .....	9
2.2.2	<i>FADIGA COM CORROSÃO</i> .....	11
2.2.3	<i>CURVA S-N</i> .....	11
2.2.4	<i>DANOS CUMULATIVOS</i> .....	13
2.2.5	<i>CONSIDERAÇÃO DOS CARREGAMENTOS AMBIENTAIS</i> .....	14
2.3	PROCEDIMENTOS DE UMA ANÁLISE DE FADIGA .....	16
2.3.1	<i>GERAL</i> .....	16
2.3.2	<i>MÉTODOS DE ANÁLISE</i> .....	16
<b>3.</b>	<b>DESCRIÇÃO DO MODELO .....</b>	<b>27</b>
3.1	MODELO ESTRUTURAL .....	27
3.2	CONDIÇÕES DE CONTORNO .....	30
3.3	GEOMETRIA DO MODELO .....	31
3.4	AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DA ESTRUTURA.....	35
<b>4.</b>	<b>DADOS METEOCEANOGRÁFICOS DAS ANÁLISES.....</b>	<b>44</b>
4.1	DADOS METEOCEANOGRÁFICOS PARA ANÁLISE ESPECTRAL .....	44
<b>5.</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DA ANÁLISE .....</b>	<b>46</b>
5.1	CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA .....	46
5.2	PREMISSAS BÁSICAS .....	47
5.3	ANÁLISE ESPECTRAL .....	47
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>51</b>
6.1	RESULTADO DA ANÁLISE ESPECTRAL .....	51
6.1.1	<i>CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS</i> .....	54
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>58</b>
<b>8.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>60</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 GERAL

Diversos componentes de máquinas, veículos e estrutura são, freqüentemente, solicitados a carregamentos repetitivos ao longo do tempo. Esses carregamentos geram tensões cíclicas que, mesmo sendo de pequena intensidade, podem provocar danos físicos no material, levando-o à fratura. Esse processo de acumulação de danos seguido de eventual fratura é denominado fadiga. Nos últimos 150 anos a fadiga tem sido algo importante nos estudos e pesquisas de cientistas de diversas partes do mundo, e continua sendo um dos aspectos mais importantes no projeto e manutenção de elementos estruturais de diversas espécies.

Estruturas *offshore* estão submetidas a tipos repetitivos de carregamentos associados às severas condições ambientais, notadamente de ondas, que ocorrem juntamente com ventos e correntes marítimas. DOVER & MADHAVA [1], indicam que estruturas offshore podem estar sujeitas a mais de 100 milhões de ciclos de ondas durante sua vida útil com freqüências em torno de 0,17Hz.

Desta forma a vida útil à fadiga destas estruturas deve ser propriamente assegurada durante a fase de projeto. Este problema é muito severo em juntas tubulares soldadas, tais como as encontradas em jaquetas de plataformas, devido às concentrações de tensões.

O ambiente corrosivo representa problemas adicionais para avaliar corretamente a vida à fadiga de estruturas.

Entre as várias causas que conduzem à falha das estruturas *offshore*, falhas por fadiga têm sido identificadas como de natureza crítica. Em 1980, a plataforma semi-submersível Alexander Keilland colapsou devido a uma falha de fadiga, resultando na perda de 123 vidas e milhares de dólares em equipamentos.



**Figura 1.1** – Plataforma Alexander Keilland depois do acidente [2].

As principais causas de falhas por fadiga em plataformas *offshore* são os carregamentos de onda que possuem comportamento cíclico por natureza. As falhas por fadiga podem ocorrer até mesmo sob condições abaixo das condições de operação, sem qualquer aviso prévio, por acumulação de danos devido à ação de ondas de pequeno e médio porte.

Assim sendo, o desempenho à fadiga é de primordial importância para o funcionamento seguro e integridade das estruturas *offshore*.

## **1.2 OBJETIVO E ESCOPO**

Este projeto final tem como objetivo apresentar dois métodos de análise de fadiga, aplicado a uma estrutura do tipo fixa (jaqueta). Desenvolvimento de uma análise espectral completa.

A elaboração de conclusões obtidas através dos resultados do método espectral é realizada ao final do texto.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO**

Este item destina-se a descrever sucintamente os assuntos abordados em cada capítulo, de forma a facilitar a compreensão do leitor.

O Capítulo 2 apresenta os conceitos teóricos inerentes ao trabalho.

No Capítulo 3 o modelo computacional da plataforma desenvolvido com o auxílio do software SACS é minuciosamente apresentado.

O Capítulo 4 apresenta os dados meteoceanográficos adotado na análise.

O Capítulo 5 apresenta o procedimento para a execução da análise espectral.

O Capítulo 6 apresenta os resultados da análise para o método utilizado.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros.

O Capítulo 8 apresenta todas as referências utilizadas no projeto.

## 2. TEORIA DE FADIGA

### 2.1 VISÃO GERAL DA TEORIA DE FADIGA

Define-se como estudo de fadiga o estudo completo do comportamento dos elementos ou das estruturas submetidos a carregamentos repetidos. Desta forma denominam-se carregamentos de fadiga os carregamentos repetidos que podem levar à fadiga.

A fadiga, em geral, é um fenômeno complexo que é caracterizado pela redução gradual da capacidade de elementos estruturais de suportar cargas cíclicas. A determinação dos danos por fadiga é um processo cumulativo resultante da aplicação de um grande número de ciclos de tensões. A amplitude dos ciclos de tensão aplicada pode ser relativamente baixa em relação à tensão de escoamento do metal, mas o grande número de aplicações repetidas pode levar à fratura do material.

Sob a ação de cargas cíclica, as trincas iniciam como defeitos que estão presentes nas áreas de concentração de tensões. Estas trincas geralmente progridem e se juntam em uma trinca dominante e se propagam em toda a seção do elemento carregado até que a seção transversal remanescente seja insuficiente para transmitir a carga, resultando na fratura do metal. Tais fraturas são denominadas como falha devida à fadiga.

Conforme mencionado por ELLWANGER [3], os carregamentos de fadiga são repetitivos, consistindo na aplicação e remoção contínua de uma carga, ou pela alternância de sinal, podendo ser classificado de duas formas:

- Baixo ciclo: menos de  $10^4$  ou  $10^3$  ciclos, dependendo do caso;
- Alto ciclo: mais de  $10^4$  ciclos, em alguns casos podendo chegar à ordem de  $10^6$  a  $10^9$  ciclos.

O processo de fadiga em estruturas metálicas, conforme mencionado anteriormente, é um processo complexo e normalmente classificado em três estágios de desenvolvimento, o início da trinca, a propagação estável da trinca conduzindo à fratura final. No entanto, não existem demarcações distintivas entre as três fases. A fase de iniciação da trinca é uma fração da vida à fadiga total e depende de uma série de fatores. Estes incluem principalmente o estado da superfície do material, a presença de concentração de tensões elevadas, as propriedades dos materiais, do carregamento e das condições ambientais. A maioria dos componentes estruturais utilizados em aplicações de engenharia invariavelmente contém defeitos. No caso de componentes soldados, micro-trincas de 0,2 a 0,4 milímetros de profundidade são formados no cordão de solda durante o processo de resfriamento do metal de solda. No entanto, a fase de iniciação geral inclui a formação de fendas muito pequenas em micro escala, a solicitação destas pequenas fissuras leva à formação de regiões de crescimento de pequenas trincas. Nas juntas tubulares, a iniciação da trinca ocorre geralmente no membro principal, *chord*, no lado da solda, devido às maiores tensões no entalhe.

Durante a aplicação de um carregamento de fadiga, o ponto de tensão máxima, também conhecido com *Hot Spot*, é o local mais provável para iniciação de trincas. Conforme mencionado em ELLWANGER [3], a iniciação de uma trinca por fadiga pode ser verificada normalmente na superfície do corpo, visto que nesta localidade a concentração de tensões é máxima ou porque os cristais apresentam menos apoios entre si facilitando a ocorrência de deformações plásticas.

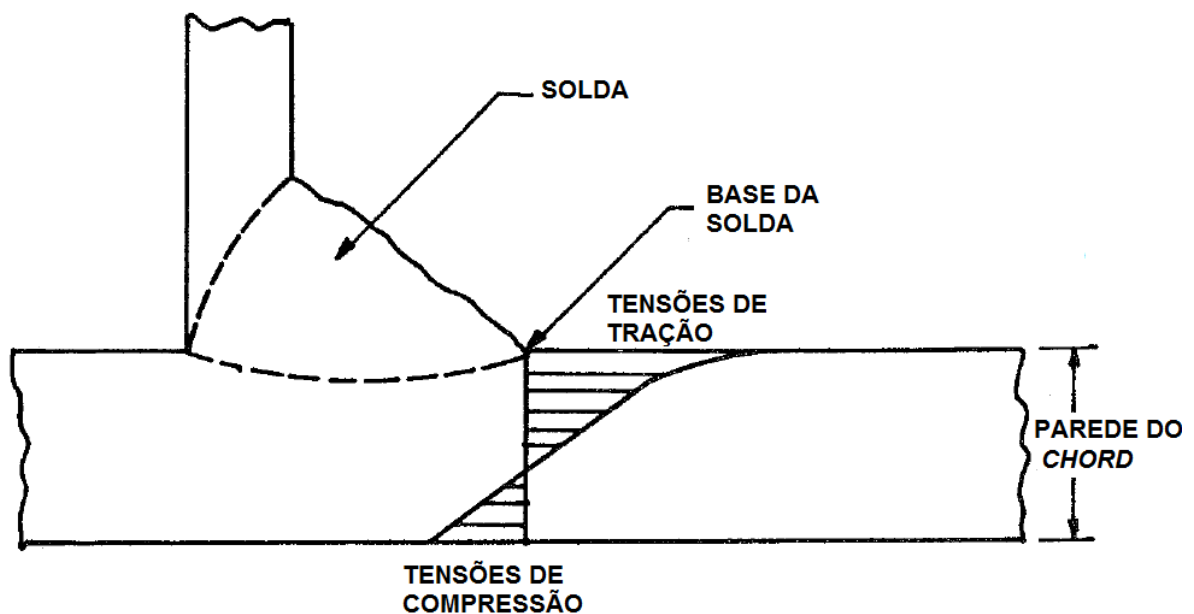
A fase de iniciação de trinca (N1) é estimada em cerca de 30% do total.

Trincas de fadiga que crescem a partir das falhas preexistentes como defeitos de solda ou na superfície constituem uma parte importante da vida à fadiga em geral. Portanto, a fase de propagação de trinca deve ser verificada principalmente no dimensionamento à fadiga



de componentes soldados. O crescimento da extensão da falha por ciclo de tensões depende principalmente da variação destas. A teoria da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) é válida para esta fase e prediz valores razoavelmente precisos para a vida de propagação.

Após a primeira fase, a trinca de fadiga cresce na direção da tensão principal máxima. Em muitas configurações de carregamento de juntas tubulares isto ocorre ao longo dos cordões de solda das conexões. Os principais componentes de tensões através da parede do tubo são de flexão juntamente com tensões de membrana representados na Figura 2.1. Devido aos valores de tensões em pontos mais distantes da superfície apresentarem valores menores, o crescimento das trincas no interior é muito mais contido, comparado ao crescimento na superfície. Ainda segundo DOVER & MADHAVA [1], trincas de fadiga se tornam claramente visíveis dentro de aproximadamente 10% da vida à fadiga total. A rigidez do conjunto é mantida durante todo o período de crescimento da trinca decaindo somente após a penetração na parede do tubo. Geralmente, a vida de propagação de trinca (correspondente a fase N2) é considerada como o número de ciclos de carga necessário para uma trinca crescer a partir de um defeito de tamanho típico ao ponto de penetrar na espessura da parede do *chord*. Esta fase ocupa 70% do total de vida à fadiga do conjunto.



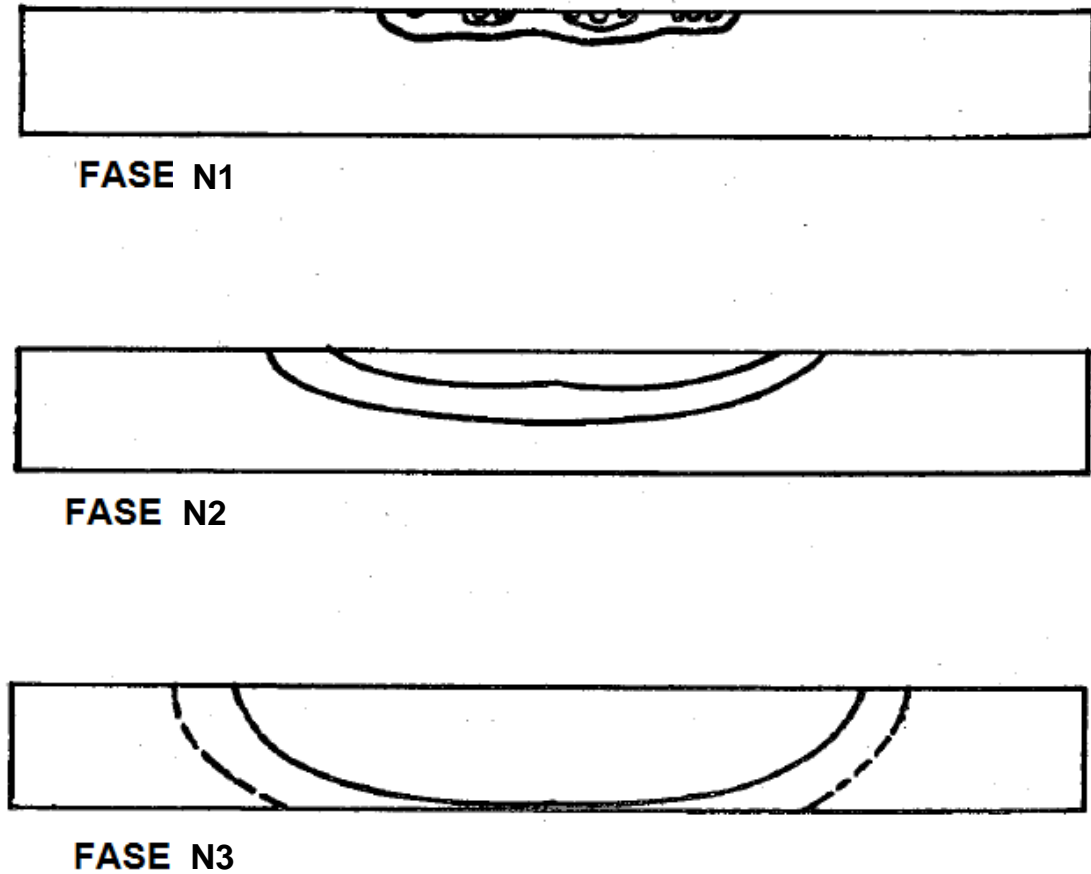
**Figura 2.1** – Distribuição de tensões típicas através da parede do *chord*, [1].

A terceira fase é de pouco interesse para aplicações de engenharia. É observado que em um membro tubular logo após a penetração total na parede do tubo do *chord*, a rigidez do conjunto reduz consideravelmente o que resulta na falha da articulação. A fratura final, último estágio (N3), depende principalmente do grau de redundância prevista no projeto e da ductilidade do material. Em estruturas não-redundantes e frágeis, a perda de rigidez resulta em falha e, conseqüentemente, a vida é limitada a N2. No caso de estruturas redundantes ou dúcteis, N3 é geralmente contabilizado. No entanto, devido à perda de rigidez e dificuldade no acompanhamento na análise de crescimento da falha na fase N3, a contagem de ciclos não é realizada para além de N2.

Somando os três termos, N1, N2 e N3 tem-se a vida total de fadiga. A Figura 2.2 ilustra as fases do processo de crescimento de uma trinca de fadiga

A qualidade de fabricação do componente estrutural exerce um papel importante no desempenho deste à fadiga. Neste contexto, a qualidade das soldagens, que são áreas potenciais onde as trincas são formadas e as altas concentrações de tensão são induzidas, é

muito importante. Devido à presença de altas tensões de tração, os pequenos defeitos de solda e a zona afetada pelo calor das soldagens agem em conjunto para fazer das soldas e da região em torno destas áreas altamente suscetíveis à trinca por fadiga.



**Figura 2.2** – Representação esquemática do processo de crescimento de uma trinca de fadiga, [1].

## 2.1.1 ANÁLISE DE FADIGA EM ESTRUTURAS *OFFSHORE*

Muitas falhas de estruturas *offshore* são atribuídas ao fenômeno de fadiga principalmente em juntas soldadas pelo fato destas poderem induzir por vezes altas tensões. Geralmente, estruturas *offshore* apresentam grandes dimensões e configurações complexas formadas por elementos tubulares soldados. Os membros secundários ou *braces* estão ligados aos membros principais, *chords*, por meio de conexões soldadas, que apresentam alguns defeitos iniciais na região do local soldado. Há, portanto, uma região de concentração de tensões muito elevadas criada nas proximidades das conexões soldadas entre os membros. Na zona termicamente afetada (HAZ - *Heat Affected Zone*), perto da ligação soldada, o membro muda seu comportamento estrutural de dúctil para frágil. As articulações dos membros tubulares são geralmente chamadas de nós (ilustradas na Figura 2.3), e estão sob a forma de letras do alfabeto como T, Y, K e TK. Segundo as normas [6 e 7], são possíveis formações de juntas mistas, como por exemplo T&Y ou 50%K, 50% T&Y. Estas classificações são fundamentais na avaliação do Fator de Concentração de Tensões de tais elementos.

As tensões transmitidas pelas articulações apresentam componentes axiais, no plano e fora do plano. A Figura 2.4 apresenta os esforços nas articulações.

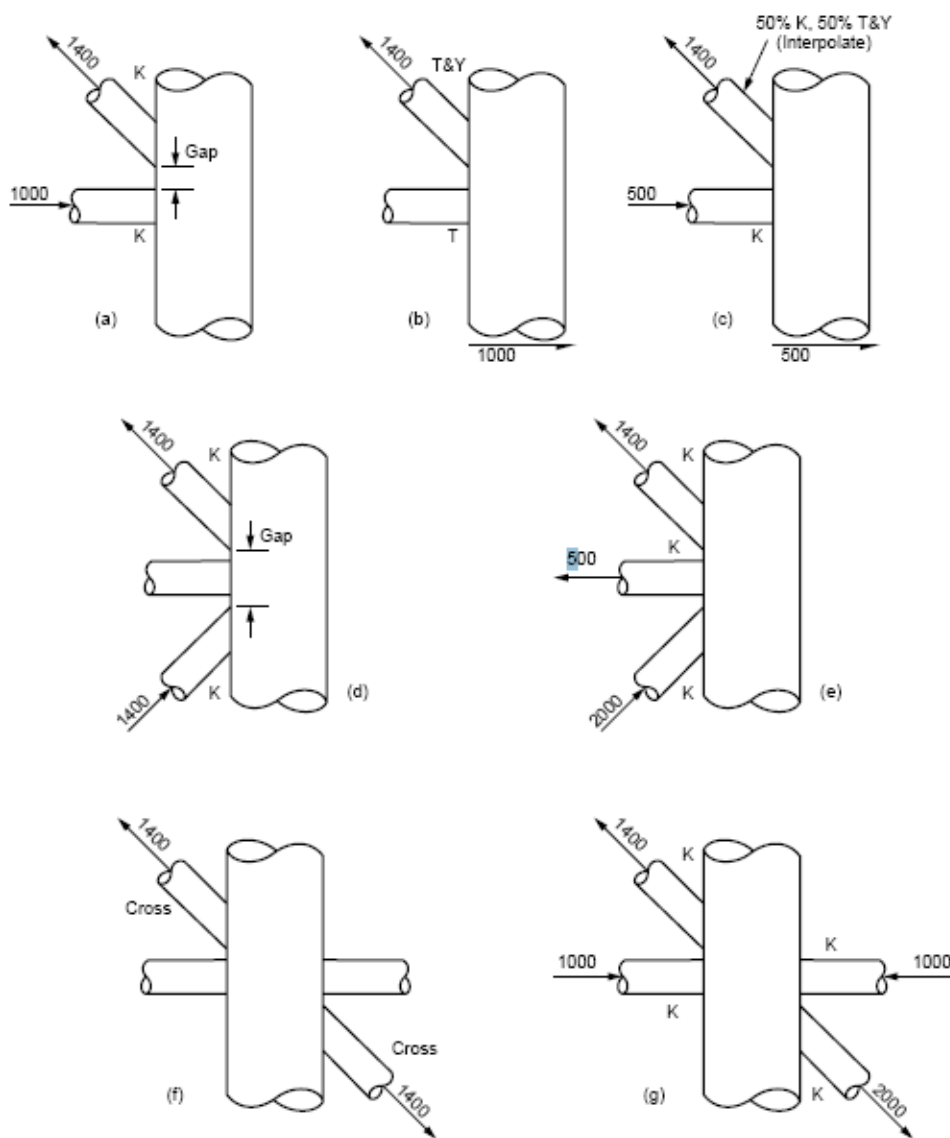


Figura 2.3 – Classificação dos nós segundo a norma API RP 2A WSD, [4][3].

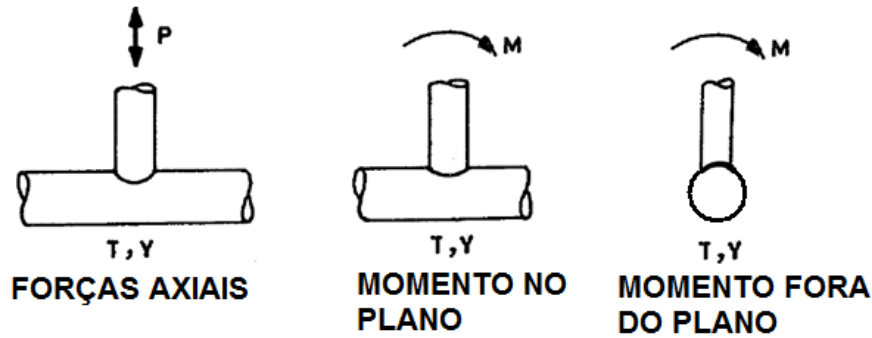


Figura 2.4 – Tipos de carregamentos, [1].

A análise de fadiga envolve a determinação das tensões nos elementos estruturais, os valores dos Fatores de Concentração de Tensão nas juntas tubulares críticas e o número seguro de ciclo de tensões que os nós podem suportar antes da falha.

Existem basicamente duas abordagens para a determinação da vida à fadiga de estruturas *offshore*. A abordagem convencional faz uso de Curvas S-N, que são obtidas através da realização de ensaios de fadiga, de preferência em exemplares do mesmo tamanho e configuração da articulação em questão ou modelos reduzido, sob carregamento de amplitude constante. Uma alternativa a esta abordagem para avaliação da vida à fadiga de juntas tubulares soldadas é a utilização da Teoria da Mecânica da Fratura.

O método da Mecânica da Fratura consiste essencialmente de uma análise do crescimento de trinca na interseção das articulações dos membros tubulares soldados. Essa análise está interessada no cálculo de ciclos de carregamentos até a falha do membro. Falha ou fratura, de acordo com DOVER & MADHAVA [1], é o início do crescimento trinca até o ponto em que o membro deixa de agir estruturalmente, ou seja, não é capaz de suportar as tensões aplicadas.

Na área *offshore* é utilizada a abordagem convencional de fadiga, ou seja, através de Curvas S-N e para as juntas críticas das estruturas, se necessário, um estudo de Mecânica da Fratura pode ser realizado. Ao longo deste trabalho não serão utilizados os conceitos de Mecânica da Fratura sendo exclusiva a aplicação dos métodos de acúmulo de dano de fadiga tradicionais.

É essencial que a análise de fadiga seja realizada durante a fase de projeto. Uma mudança de parâmetros de projeto devido a problemas durante a análise de fadiga é mais facilmente realizada no início do projeto. Isso também facilitará a verificação dos requisitos das normas em um estágio inicial.

## 2.2 CONCEITOS BÁSICOS

### 2.2.1 CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES

Os fatores que mais influenciam falhas por fadiga em juntas tubulares soldadas são geometria, carregamentos, fabricação, tratamentos pós-fabricação e comportamento em serviço. Falhas em juntas tubulares geralmente ocorrem nos nós das juntas das estruturas, pois estes são as áreas com maiores tensões e as tensões nominais das análises não refletem verdadeiramente as tensões nas juntas. Com isso é importante a consideração dos Fatores de Concentração de Tensões para análise de tensões nas juntas e formação de trincas.

A verificação do dano à fadiga em um elemento de barra uniforme submetido a uma variação de tensão axial é muito simples. Dano de fadiga se define como a relação entre o número de variações de tensões aplicado e o número de variação de tensões que leva à ruptura. Quando a forma estrutural é complexa, como é o caso de estruturas *offshore*, é muito mais difícil determinar a variação de tensão, porque há concentrações de tensões, principalmente quando o fluxo de tensões muda de sentidos abruptamente, conforme ilustrado na Figura 2.3 onde são apresentadas as classificações das articulações.

No cálculo dos Fatores de Concentração de Tensão, existem duas maneiras utilizadas na prática de engenharia para lidar com o problema:

- a) Modelagem em elementos finitos
- b) Usando Fatores de Concentração de Tensões

A Figura 2.5 apresenta uma conexão de difícil avaliação modelada em elementos finitos.

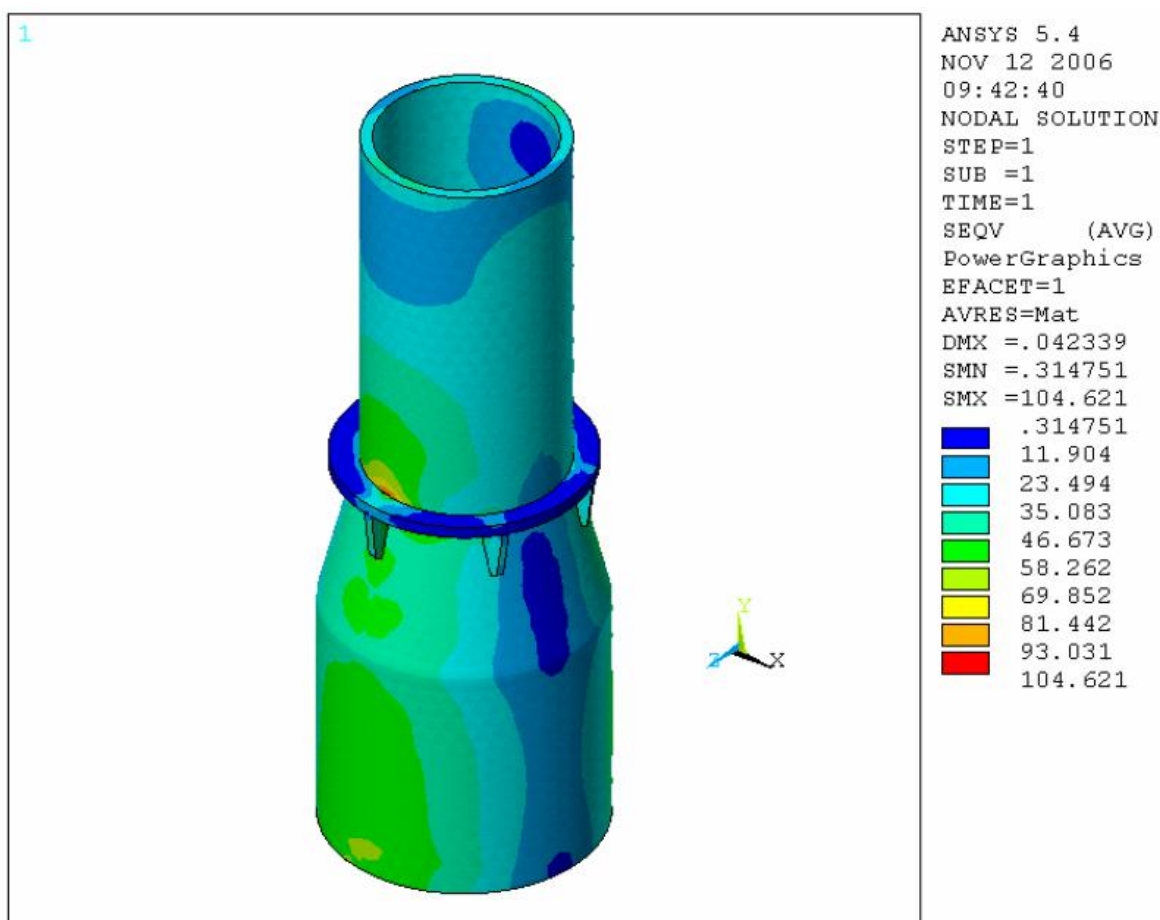


Figura 2.5 – Junta modelada em elementos finitos, [5].

De acordo com GALGOUL [5], a abordagem utilizando fórmulas semi-empíricas é mais comumente usada para juntas tubulares, onde equações paramétricas foram desenvolvidas por diversos autores, com base em análises de elementos finitos:

- Kuang, Smedley, Woodsworth;
- DNV;
- Efthymiou;
- Etc.

Estas equações variam não só com a geometria da junta, mas também dependem de como as cargas são aplicadas. Isto significa que o tipo de articulação só pode ser estabelecido de acordo com a Figura 2.3 após a distribuição da carga na estrutura já determinada.

O Fator de Concentração de Tensão é definido como a relação entre a máxima tensão na junta e a tensão nominal na seção transversal. Para algumas articulações o fator de concentração pode produzir uma tensão máxima na interseção tão elevada como 20 vezes o valor da tensão nominal nos membros. Resumindo, o fator de concentração de tensões (SCF – *Stress Concentration Factor* em inglês) é dado por:

$$SCF = \frac{\text{Tensão máxima na junta}}{\text{Tensão média ou nominal nessa seção transversal}} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Desta forma, a variação de tensão real é definida como a variação da tensão nominal multiplicada por um Fator de Concentração de Tensões.

$$S = SCF \times S_{nominal} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

É importante ressaltar que o SCF deve considerar além dos detalhes soldados quaisquer outras causas de concentração de tensões, tais como um furo (ver Figura 2.6), ou entalhes, devendo ser aplicado como um multiplicador para a variação de tensões.

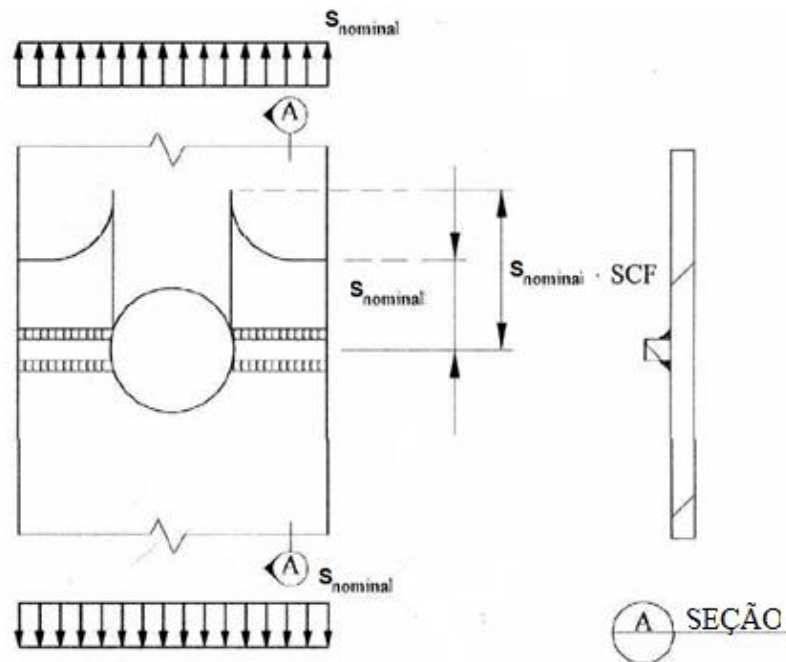


Figura 2.6 – Concentração de tensões,.

## 2.2.2 FADIGA COM CORROSÃO

Muitas vezes, a fadiga em estruturas metálicas é agravada pela ação simultânea do carregamento e das condições ambientais. Os fatores ambientais podem agravar o processo de fadiga consideravelmente levando à falha prematura da estrutura. De acordo com DOVER & MADHAVA [1], os efeitos sinérgicos de fadiga e corrosão, chamado de fadiga devido à corrosão são particularmente severos reduzindo a vida à fadiga por até um fator de dois. Observa-se também que o ambiente corrosivo é um fenômeno extremamente complexo que ainda não é claramente entendido. Foi estabelecido que, sob condições de fadiga de corrosão, aumento da temperatura resulta em aumento da corrosão, bem como das taxas de propagações de trinca.

Nas análises realizadas neste estudo a corrosão não a fadiga com corrosão não foi considerada.

## 2.2.3 CURVA S-N

O projeto de fadiga é baseado na utilização de curvas S-N, que são obtidas a partir de ensaios de fadiga. De acordo com as normas [4] e [6], as curvas S-N de projeto são obtidas com base na média de pelo menos duas curvas de desvio-padrão para dados experimentais pertinentes.

A maioria dos dados S-N são obtidos por meio de ensaios de fadiga em amostras pequenas, em laboratórios de ensaio. Para as amostras de testes simples, o teste é realizado até que os corpos de prova cheguem ao colapso. Nestes, não há a possibilidade de redistribuição das tensões durante o crescimento da trinca. Isto significa que a maior parte da vida à fadiga está associada ao crescimento de uma pequena trinca que se desenvolve mais rapidamente com o aumento do seu tamanho até o ponto da fratura.

Para valores do número de ciclos de ruptura superiores a  $10^4$  ou  $10^5$ , a representação gráfica da variação de tensão em função do número de ciclos de ruptura fornece, geralmente, uma curva, apresentada em um gráfico bi-logarítmico conhecido como Curva S-N. Curvas como esta são utilizadas para se estimar a vida em qualquer faixa de tensão.

É denominada zona de fadiga a baixo número de ciclos ou fadiga oligocíclica a região inferior a  $10^4$  ou  $10^5$ , onde as tensões e extensões na peça são predominantemente plásticas. De acordo com ELLWANGER [3] nestes casos, os ensaios são feitos com extensão plástica controlada em vez de carga ou tensão controlada. São observadas em reservatórios sob pressão, turbinas a vapor e reatores nucleares, além disso, tem-se também fadiga oligocíclica quando as tensões repetidas são de origem térmica.

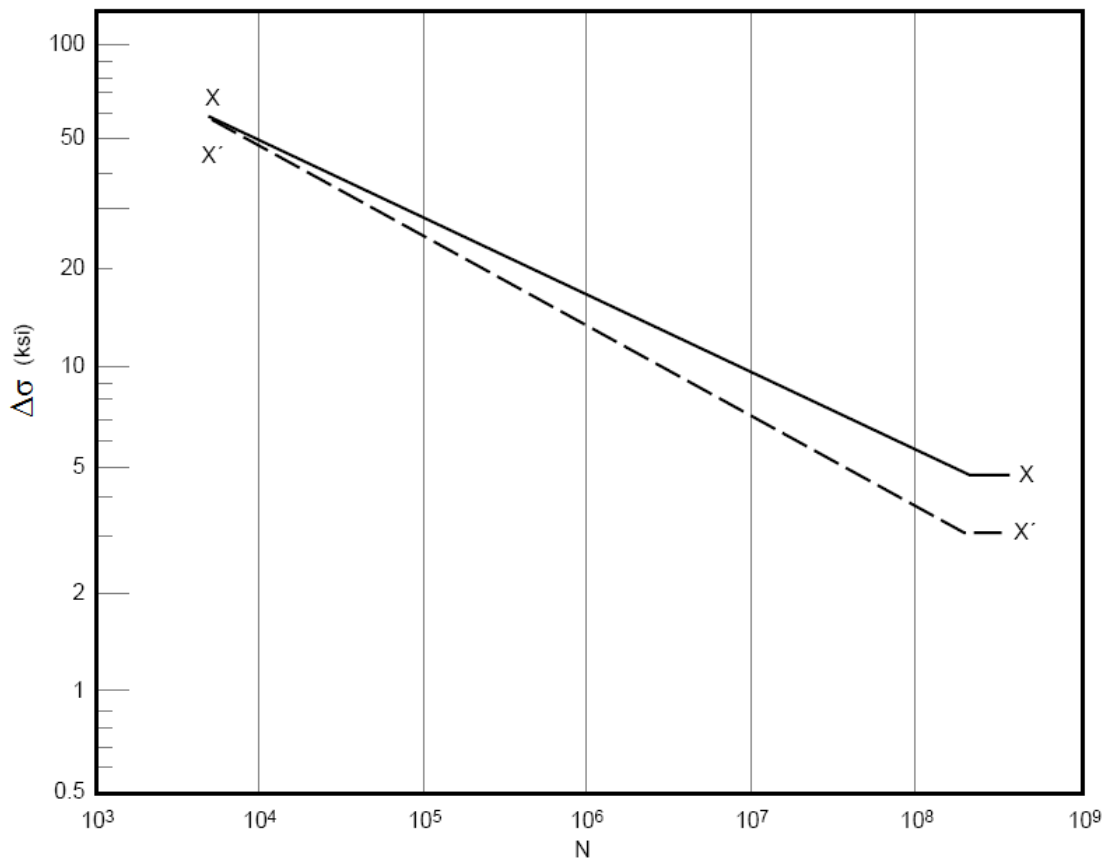
Para alguns materiais, existe uma faixa de tensão abaixo da qual a trinca não se inicia (como aço e titânio) definindo o limite de fadiga do material. Nestes casos, para variações de tensões abaixo desse limite, a fadiga não é considerada nem para um número de ciclos infinito. Este comportamento não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

Em estruturas *offshore*, a Norma API-RP 2A WSD [4] indica que para conexões tubulares expostas a variações de tensão devidas às cargas ambientais ou operacionais, as curvas S-N apresentadas na Figura 2.7 devem ser utilizadas. Essas curvas são aplicáveis aos carregamentos aleatórios sendo presumida proteção catódica efetiva. Para zona de respingo, expostas à corrosão, ou condições de corrosão excessiva, nenhum limite de resistência deve ser considerado. Conexões na zona de respingo devem ser evitadas.

Para conexões tubulares expostas, sujeitas a carregamentos cíclicos regulares em ambiente atmosférico, os limites de resistência para as curvas X e X' (curvas muito usadas definidas na API-RP 2A [4]) podem ser considerados como sendo  $10^7$  e  $2 \cdot 10^7$ , respectivamente.

Segundo a norma [4], para conexões soldadas sem controle no processo executivo, mas com cordões com um perfil côncavo (conforme ANSI/AWSD1.1-92 [6]), e que devem ter um raio próximo ao raio de um disco, cujo diâmetro não pode ser inferior a 0,625 polegadas (16 mm) ou a espessura do tubo principal inferior a 0,625 polegadas (16 mm) a curva X' é aplicável.

A curva X é aplicável para soldas com controle de perfil, tal como definido no 11.1.3d da referência [4][3] e que devem ter um raio próximo ao raio de um disco, cujo diâmetro não pode ser inferior a 1 polegada (25 mm) ou a espessura do tubo principal inferior a 1 polegada (25 mm).



Nota: Estas curvas são representadas matematicamente por:

$$N = 2 \times 10^6 \left( \frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_{ref}} \right)^{-m} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

onde N é o número admissível de ciclos de variação de tensão cíclica aplicada, com m conforme listado abaixo.

Curva	$\Delta\sigma_{ref}$ Variação de tensões em 2 milhões de ciclos	$m$ Declividade inversa do gráfico	Tensão limite em 2 milhões de ciclos
X	14.5 ksi (100 MPa)	4.38	5.07 ksi (35 MPa)
X'	11.4 ksi (79 MPa)	3.74	3.33 ksi (23 MPa)

**Figura 2.7** – Curvas S-N de fadiga, [4].



## 2.2.4 DANOS CUMULATIVOS

O dano de fadiga em estruturas *offshore* do tipo plataforma fixa é predominantemente resultado dos carregamentos oriundos da passagem de onda pela estrutura. Ondas induzem tensões que variam em magnitude e ocorrem em ordem aleatória. Assim, o projeto precisa encontrar uma maneira de avaliar os danos que se acumulam como resultado de uma ampla gama de condições reais de carga, que poderiam ser antecipados durante o tempo de vida útil da estrutura

A fadiga pode ser calculada com base nas curvas S-N utilizadas em conjunto com a hipótese de danos cumulativos lineares (Regra de Miner), para prever o comportamento dos elementos submetidos a condições de carregamentos variáveis.

A distribuição da variação de tensões encontra-se expressa através de um histograma de tensões constituído de um número conveniente de blocos com amplitude de tensão constante  $\Delta\sigma_i$  e cada bloco com um número de ciclos  $n_i$ . O total dos danos por ano é dado pela soma da fração de vida consumida. Quando o dano acumulado chega à unidade, o tempo de vida útil da estrutura é considerado completo. Matematicamente, esta regra pode ser expressa como:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Onde:

$D$ : Dano acumulado de fadiga;

$k$ : Número de bloco de tensões;

$n_i$ : Número de ciclos de tensões em um bloco de tensões;

$N_i$ : Número de ciclos até a falha com tensões constantes  $\Delta\sigma_i$  (S).

Para obter o número de ciclos até a falha,  $N_i$ , para um determinado intervalo de tensões, S, curvas S-N são normalmente utilizadas.

Conforme ELLWANGER [3], a Regra de Miner não leva em consideração aspectos que experimentalmente já se verificou terem bastante influência na duração à fadiga:

1. Considerar que as tensões inferiores à tensão limite de fadiga não provocam alteração do material;
2. Considerar a resistência à fadiga independente da história de carga.

A vida à fadiga é dada por:

$$L = \frac{1}{D} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

onde,

$D$ : Dano total acumulado de fadiga

Apesar das imprecisões, a Regra de Miner continua a ser largamente utilizada na prática devido à sua simplicidade matemática e ao fato de fornecer resultados com certa margem de segurança.

## 2.2.5 CONSIDERAÇÃO DOS CARREGAMENTOS AMBIENTAIS

Até o presente momento foi estabelecido como obter os danos de fadiga, em um determinado ponto da estrutura, causada pelos ciclos de tensões de amplitude constante e também como obter os danos acumulados, somando-se linearmente os danos individuais componentes, de acordo com a Regra de Miner.

A seguir será apresentado o outro lado do problema, que está relacionado com a determinação dos valores de variação de tensões.

As principais causas de falhas por fadiga em plataformas *offshore* do tipo fixa são os carregamentos de onda que possuem comportamento cíclico por natureza. Os carregamentos ambientais (onda e corrente) são aplicados diretamente na estrutura. A Figura 2.8 apresenta um elemento estrutural de uma plataforma fixa carregado por uma componente  $q$  oriunda da atuação da onda e das correntes.

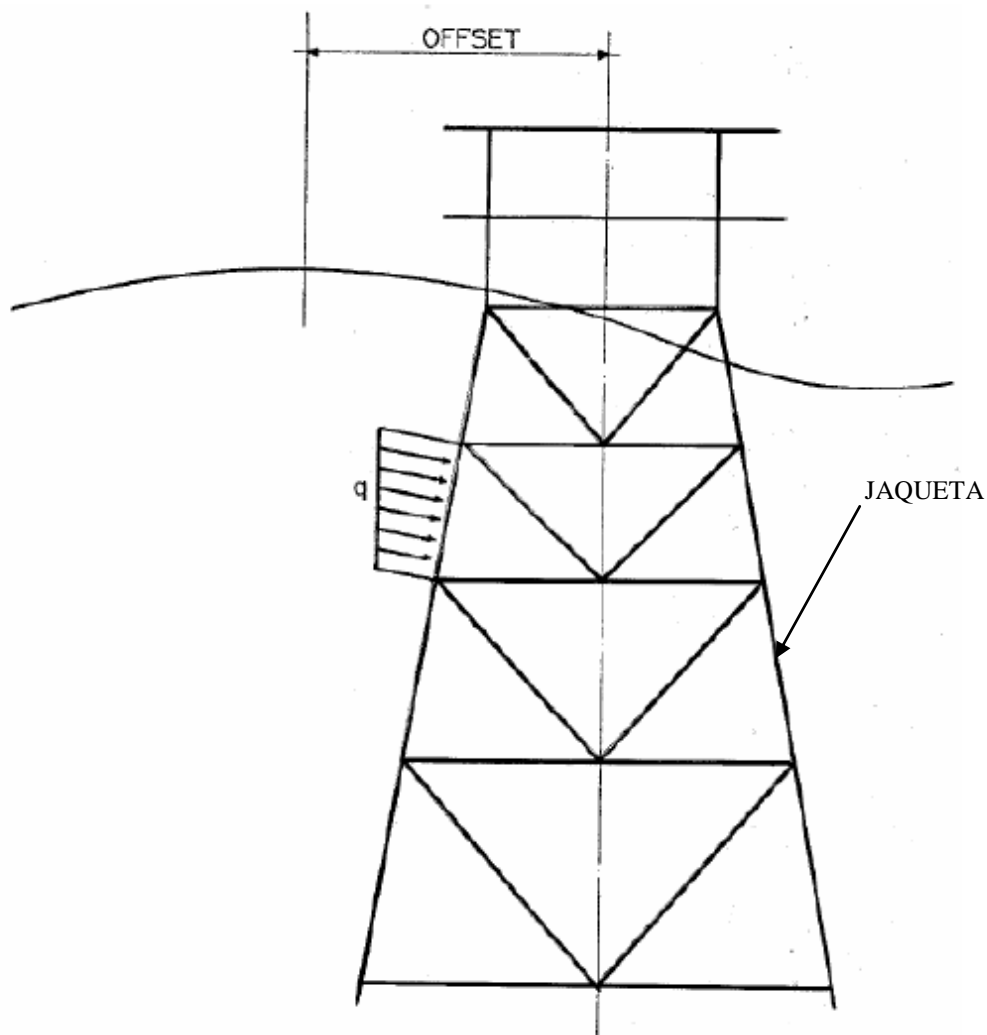


Figura 2.8 – Forças de onda atuando em um membro da jaqueta.

Normalmente, neste caso, as componentes de velocidade de ondas e corrente e aceleração de onda (horizontal e vertical) podem ser determinadas em qualquer ponto do semi-espaço abaixo da superfície da água, baseando-se em teorias de ondas tradicionais (Airy, Stokes, *Stream Function*, etc.). As forças em qualquer membro podem ser determinadas usando a Equação de Morison apresentada abaixo.

$$q = \frac{1}{2} \rho \cdot C_D \cdot V \cdot |V| \cdot D + \frac{1}{4} \pi \cdot \rho \cdot C_M \cdot A \cdot D^2 \quad (\text{Eq. 2.6})$$

Onde:

$V$ : Velocidade relativa entre a partícula do fluido e a estrutura;

$A$ : Aceleração relativa entre a partícula do fluido e a estrutura;

$D$ : Diâmetro do membro;

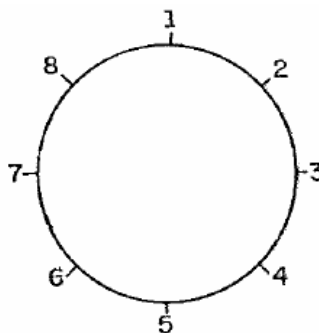
$\rho$ : Massa específica do fluido (1025kg/m<sup>3</sup>);

$C_D$ : Coeficiente de arrasto ~ 0,7;

$C_M$ : Coeficiente de inércia ~ 1,7.

Para calcular a variação de tensão em um nó da estrutura para uma onda específica, quando passa através da estrutura, é necessário calcular a resposta da estrutura quando toda onda passa por ela. Normalmente 18 posições de onda (deslocamento da crista com relação à origem do sistema de coordenadas) rendem bons resultados. Isto significa que a estrutura será analisada para 18 casos de carga, combinados para uma altura de onda, um período de onda e uma incidência de onda para determinar a variação de tensão em cada ponto do elemento em sua conexão à junta (por solda), esta variação é considerada então como a diferença que entre o máximo e o mínimo dos 18 valores.

A fadiga deve ser checada em todos os pontos da estrutura onde ocorre concentração de tensões. Isto gera uma enorme quantidade de dados. No caso de uma jaqueta, os nós são normalmente checados em oito pontos ao redor da circunferência da junta de conexão (ver Figura 2.9) tanto pelo lado do elemento principal ou passante (*chord*) quanto pelo lado do elemento que chega à conexão (*brace*). Esta verificação se faz necessária devido ao fato de se observar Fatores de Concentração de Tensões (SCF) diferentes na conexão tanto por um lado quanto por outro.



**Figura 2.9** – Número de pontos verificados ao redor do nó.

## **2.3 PROCEDIMENTOS DE UMA ANÁLISE DE FADIGA**

### **2.3.1 GERAL**

Os principais *inputs* para uma análise de fadiga são: o histórico de tensão nominal, o Fator de Concentração de Tensões no local do *Hot Spot* e a curva S-N do material. Todos os três elementos são igualmente importantes em uma análise de fadiga. A determinação do histórico de tensão nominal será induzida pelo método de análise, isto é, determinístico ou probabilístico. A formulação atual da prática para a análise de fadiga pode ser resumida da seguinte forma:

1. Descrição do ambiente (determinístico ou probabilístico) para obter as taxas de ocorrência e as amplitudes das cargas que a estrutura vai encontrar durante a sua vida;
2. Determinação da variação de tensão verificada pelos detalhes estruturais;
3. Determinação da variação de tensão local nos detalhes estruturais, com a ajuda dos Fatores de Concentração de Tensões;
4. Avaliação dos danos de fadiga em intervalos de tensões individuais para amplitudes de tensão constantes dos dados de vida, o número N de ciclos para falha, correspondente à aplicação de variação de tensão amplitude constante, conforme acima determinado;
5. Cálculo do dano total pela soma linear para o acúmulo de dano das variações individuais através da Regra de Miner.

### **2.3.2 MÉTODOS DE ANÁLISE**

O ambiente marinho ao longo do tempo de vida de uma plataforma é um processo complexo, composto por muitas variáveis no espaço e no tempo, dependente de várias condições meteorológicas e oceanográficas. As características físicas estão continuamente mudando, variando de acordo com as condições geológicas e são altamente específicas de um determinado local. Portanto, os dados de onda locais são de importância crítica para a avaliação dos danos de fadiga.

Geralmente, os modelos de onda determinística ou probabilística são utilizados para a descrição dos carregamentos hidrodinâmicos.

De acordo com DOVER & MADHAVA [1], os elementos básicos dos dados de onda são a variabilidade dos estados de mar dentro de um ano, as mudanças das direções de onda em relação à estrutura e energia das ondas espalhando em uma direção dominante.

Em termos gerais, as duas categorias de análise de fadiga que são discutidas com alguns detalhes são:

- Análise de fadiga discreta ou análise determinística;
- Análise de fadiga espectral.

#### **2.3.2.1 ANÁLISE DETERMINÍSTICA DE FADIGA**

A maneira mais simplificada e intuitiva de descrever os dados de onda é contando a altura das ondas e os períodos de cruzamento zero dos dados fornecidos. Cada onda, representada por sua altura H e um período T, é aplicada individualmente no modelo estrutural e os efeitos somados para prever a vida à fadiga esperada da estrutura. Esta abordagem é conhecida como determinística.

Na abordagem de onda discreta ou determinística, a avaliação de danos pode ser realizada por métodos numéricos que consideram o dano causado por cada onda individualmente.

O método determinístico apenas presume que os carregamentos hidrodinâmicos podem ser divididos em ondas discretas cada qual com um período determinado

Qualquer teoria de onda (linear ou de ordem superior) pode ser usada para calcular as velocidades e acelerações de partículas fluidas. Estas quantidades são usadas na equação de Morison para estimar as forças nos membros estruturais.

Um modelo estrutural é essencial para determinar a variação de tensão em cada junta. As tensões nominais em membros são determinadas a partir da resposta global da estrutura.

A análise de fadiga determinística de uma plataforma envolve os seguintes passos:

1. Estabelecer um diagrama de dispersão de ondas para o local do campo marítimo, incluindo variações de altura de onda, período da onda e ocorrências;
2. Simular com precisão a rigidez da estrutura da jaqueta e do convés e desenvolver um modelo simples o suficiente para entender o comportamento;
3. Simular a massa da jaqueta e do convés de forma precisa incluindo a posição do CG, para determinar as características dinâmicas da plataforma (períodos naturais e modos de vibração);
4. Estabelecer fatores de amplificação dinâmica (DAF) quer pelo método de aproximação discreta ou através da análise de resposta das ondas
5. Selecionar a teoria de onda adequada e gerar o carregamento de onda em todos os membros.
6. Computar as variações de tensão usando um método apropriado;
7. Determinar os Fatores de Concentração de Tensões para todas as juntas usando equações empíricas apropriadas;
8. Estabelecer as tensões nos *Hot Spots* para as articulações tubulares;
9. Escolher as curvas S-N apropriadas para a configuração do conjunto;
10. Determinar os danos de fadiga devido a todos os casos de carregamento de onda e somá-los a fim de se obter os danos totais por fadiga.

## **DIAGRAMA DE DISPERSÃO DE ONDAS**

Os dados de dispersão de onda contêm as informações de estado do mar, tais como altura de onda, período da onda e sua distribuição ao longo de um determinado período de tempo. Estas informações podem estar disponíveis para um período de 1 ano com base em medições no local ou podem ser baseadas em simulação numérica validadas com medições de um banco de dados. Esses dados dão uma indicação de como cada conjunto de ondas com (altura definida e período) irá ocorrer quantas vezes em um determinado período de tempo. Além disso, também vai definir a direção de aproximação da plataforma. Normalmente, pelo menos 8 setores de direção (45 graus cada) devem ser utilizados para a análise de fadiga.

Na análise espectral foi utilizado um diagrama de dispersão equivalente ao utilizado na costa do estado do Rio de Janeiro, com os dados de estados de mar para uma análise espectral. A tabela com o diagrama de dispersão de ondas para análise espectral de fadiga será apresentado no capítulo 4.

### 2.3.2.2 ANÁLISE ESPECTRAL DE FADIGA

A característica básica da análise espectral de fadiga consiste no fato de este método reconhecer a natureza aleatória dos estados de mar reais.

Um histórico no tempo da elevação da superfície do mar ao longo de três a cinco horas possui propriedades de distribuição Gaussiana. Neste intervalo as propriedades do estado de mar podem ser consideradas constantes, podendo ser bem representado como uma resposta de um processo aleatório estacionário (propriedades estatísticas constantes).

Quando se estuda um tipo de carregamento que não é constante e não pode ser determinado de forma precisa, não se prevendo com precisão o que irá ocorrer temos um carregamento estocástico. Em um sistema estocástico, a resposta também será estocástica e pode ser representada por seu espectro. A Figura 2.10 abaixo ilustra um histórico no tempo de um processo estocástico.

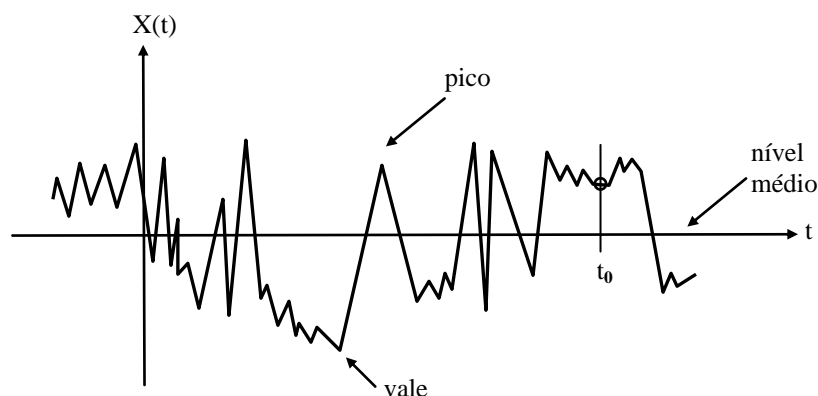


Figura 2.10 – Histórico no tempo da elevação da superfície do mar, [3].

De acordo com DOVER & MADHAVA [1], se uma variável possui uma distribuição de probabilidade conhecida, a probabilidade de ocorrência de eventos associados a esta variável podem ser obtidos. O principal elemento de uma análise de fadiga pelo método espectral é a determinação da variação de tensões em função da frequência (ou período) da excitação.

O espectro de energia das ondas descreve o conteúdo de energia de uma onda do mar e sua distribuição ao longo de um intervalo de frequência das ondas aleatórias. Portanto, o método de onda aleatória pode ser especialmente importante no projeto de estruturas *offshore*. A onda aleatória é geralmente descrita por seus parâmetros estatísticos.

Conforme apresentado em ELLWANGER [3], para uma variável  $x$ , a função densidade de probabilidades  $p(x)$  é definida como

$$p(x) \cdot dx = \text{prob} (x \leq x(t) \leq (x + dx)) \quad (\text{Eq. 2.7})$$

A função cumulativa de probabilidades é dada por:

$$P(x) = \int p(x) \cdot dx \quad (\text{Eq. 2.8})$$

O valor esperado de  $x$ , que é o valor médio do processo, é dado por:

$$E(x) = \int x \cdot p(x) \cdot dx \quad (\text{Eq. 2.9})$$

A função de auto-correlação é definida como:

$$R_x(\tau) = E [x(t) \cdot x(t+\tau)] \quad (\text{Eq. 2.10})$$

Onde  $\tau$  é um intervalo de tempo escolhido.

Quando o valor médio é igual a zero, a função de auto correlação para  $\tau = 0$  é igual à variância do processo:

$$R_x(0) = E [ ( x(t) )^2 ] = \sigma_x^2 \quad (\text{Eq. 2.11})$$

Onde  $\sigma_x^2$  é a variância do processo.

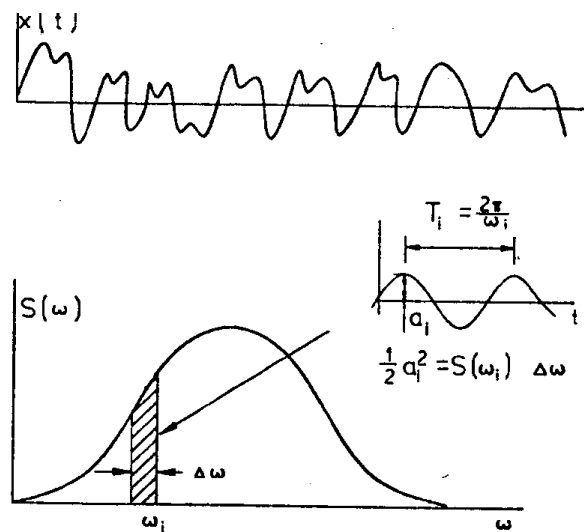
A densidade espectral ou espectro de energia pode ser escrito como:

$$S_x(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \cdot e^{-i\omega\tau} \cdot d\tau \quad (\text{Eq. 2.12})$$

Onde:

$\omega$ : Freqüência angular de excitação.

Um processo estocástico estacionário pode ser considerado como sendo composto de infinitos componentes harmônicos, com diferentes freqüências. A energia de uma onda harmônica é proporcional ao quadrado de sua amplitude. O espectro de energia da Figura 2.11 mostra como essa energia é distribuída sobre as várias bandas de freqüência.



**Figura 2.11** – Espectro de Energia  $S(\omega)$  de um Processo Estocástico  $x(t)$ , [3].

## MODELAGEM DA SUPERFÍCIE DO MAR

A superfície do mar pode ser modelada como um processo Gaussiano de banda relativamente estreita. Esta superfície pode ser descrita ao longo de um intervalo de frequências (ou períodos) pelo espectro. No Brasil, cada espectro está relacionado com um estado de mar de 3-h de duração. O estado de mar é frequentemente representado por  $H_s$ , altura de onda significativa e  $T_z$ , período de cruzamento de zero. A altura de onda significativa é definida como a média do terço mais alto das alturas de onda e o período de onda significativa a média dos valores dos períodos da onda ( $T_i$ ), exemplificados na Figura 2.12.

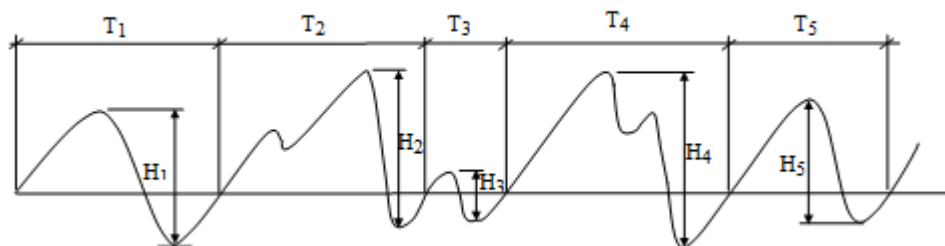


Figura 2.12 – Exemplo de onda com forma irregular [3].

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 é chamado de Espectro de Resposta.

Desde que um espectro de onda possa ser completamente definido por um par ( $H_s$ ,  $T_z$ ), um modelo de longo-prazo em um campo marítimo pode ser baseado na frequência de ocorrência desses dois parâmetros.

Estes parâmetros podem ser definidos por um diagrama de dispersão que dá a probabilidade de ocorrência da presença simultânea de um determinado par de  $H_s$  e  $T_z$ . Atualmente, não existe um modelo probabilístico mais aceitável dando a correlação entre esses dois parâmetros. Uma relação determinista entre  $H_s$  e  $T_z$  representada abaixo é muitas vezes utilizada:

$$H_s = 0,378 \cdot T_z^{1,788} \quad (\text{Eq. 2.13})$$

Onde:

$H_s$ : Altura significativa de onda em Pés;

$T_z$ : Período de cruzamento de zero em segundos.

No entanto, deve notar-se que uma relação realista ( $H_s$ ,  $T_z$ ) é extremamente importante porque o ambiente de fadiga é muito sensível ao conteúdo da frequência dos carregamentos de onda.

O estado de mar de longo prazo em um ponto no oceano pode ser considerado em termos de uma série de “blocos de onda” também conhecidos como estados de mar de curto prazo. Um estado de mar de curto prazo típico pode ser idealizado como um processo estocástico estacionário com distribuição Gaussiana. Um estado de mar de curto prazo pode



ser idealizado através de um espectro, este contendo poucos parâmetros. Uma expressão para o espectro de onda amplamente utilizada é o espectro Pierson-Moskowitz.

O espectro de Pierson-Moskowitz de 2 parâmetros (ISSC), definido por:

$$S(\omega) = H_s^2 \cdot T_z \cdot \frac{1}{8\pi^2} \cdot \frac{(\omega \cdot T_z)^{-5}}{2\pi} \cdot \exp\left(\frac{1}{\pi} \cdot \frac{(\omega \cdot T_z)^{-4}}{2\pi}\right) \quad (\text{Eq. 2.14})$$

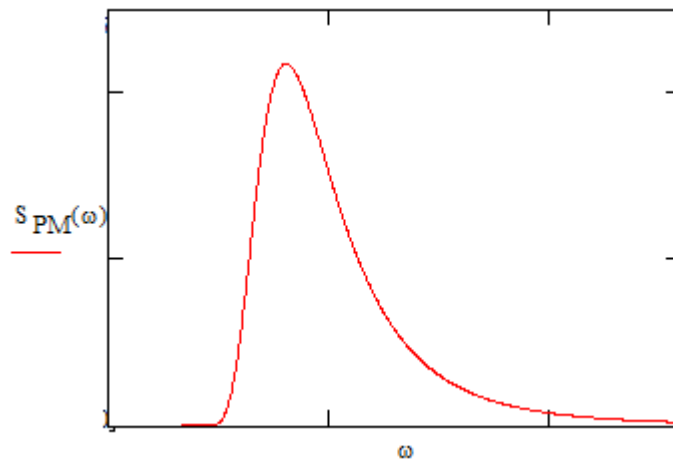
Onde:

$\omega$ : Frequência angular de onda;

$H_s$ : Altura significativa de onda;

$T_z$ : Período de cruzamento de zero.

Cuja forma é apresentada na Figura 2.13:



**Figura 2.13** – Espectro de Pierson-Moskowitz.

Outro espectro de onda amplamente utilizado é o espectro de JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*), que foi desenvolvido especificamente para o mar do Norte em estudos desenvolvidos em conjunto com as indústrias *offshore*.

De acordo com GALGOUL [5] durante muitos anos o espectro ISSC foi considerado válido em todo mundo, exceto no Mar do Norte, onde JONSWAP era utilizado. Mais recentemente, porém, variações no espectro JONSWAP têm sido encontradas a fim de se adequar esta curva para algumas outras partes do mundo melhor que a curva ISSC.

O espectro de JONSWAP é definido por:

$$S(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{5}{4} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \cdot \gamma \cdot \exp\left(-0.5 \cdot \left(\frac{\omega - \omega_p}{\varepsilon \cdot \omega_p}\right)^2\right) \quad (\text{Eq. 2.15})$$

Onde:

$\omega$ : Freqüência angular de onda;

$$\omega = \frac{2\pi}{T_w} \quad (\text{Eq. 2.16})$$

$T_w$ : Período da onda;

$T_p$ : Período de pico ou período de onda significativo;

$\omega_p$ : Freqüência angular espectral de pico;

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p} \quad (\text{Eq. 2.17})$$

$g$ : Aceleração da gravidade;

$\alpha$ : Constante de Philip;

$$\alpha = \frac{5}{16} \frac{H_s^2 \cdot \omega_p^4}{g^2} \cdot (1 - 0.287 \ln(\gamma)) \quad (\text{Eq. 2.18})$$

$\varepsilon$ : parâmetro de largura de banda;

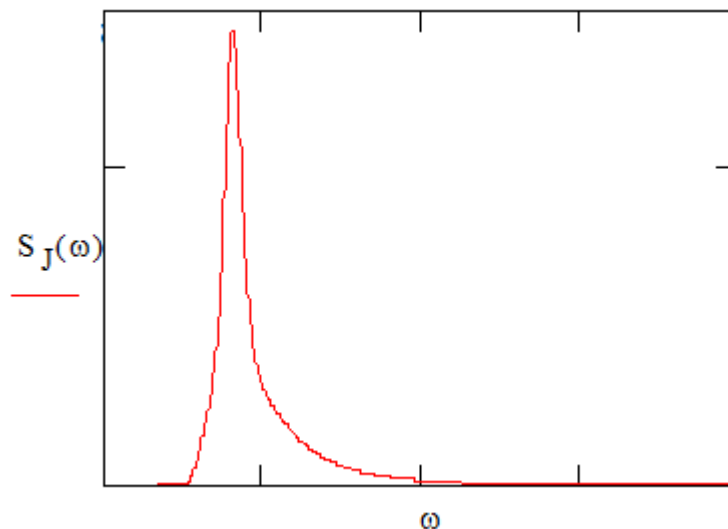
$$= 0,07 \text{ se } \omega < \omega_p;$$

$$= 0,09 \text{ se } \omega > \omega_p.$$

$\gamma$ : parâmetro *peakedness* ou fator de intensificação de pico.

Os parâmetros  $\alpha$ ,  $\omega_p$  e  $\gamma$  são tabelados em função de  $H_s$  e  $T_z$ . A freqüência angular de pico  $\omega_p$  corresponde à freqüência no valor máximo de  $S(\omega)$ .

A forma do espectro de JONSWAP é apresentada na Figura 2.14 abaixo:



**Figura 2.14** – Espectro de JONSWAP.

A área sob o espectro é igual à variação da quantidade de energia total do processo descritas pelo espectro, o quadrado da área é igual ao desvio-padrão da quantidade de energia.

## MÉTODO DE ANÁLISE ESPECTRAL

No procedimento da análise espectral, o processo de entrada é decomposto em componentes com muitas curvas e uma solução conhecida para as condições de estado estacionário é usada para obter a resposta. Os dados de entrada e os espectros de resposta estão relacionados por uma função de transferência que pode ser escrita como:

$$S_{xx}(\omega) = |H(\omega)|^2 \cdot S_{ff}(\omega) \quad (\text{Eq. 2.19})$$

Onde:

$H(\omega)$  representa a função de transferência de frequência;

$S_{xx}(\omega)$  é o espectro de resposta;

$S_{ff}(\omega)$  é o espectro de onda.

Função de transferência é uma função que descreve a relação entre a variação de tensão e frequência (período). Para as forças de ondas cíclicas, a função de transferência descreve a relação da resposta estrutural de altura de onda versus a frequência da onda.

Para um sistema linear estrutural, a função de transferência é única e dada pelo quadrado da resposta de uma resposta de amplitude unitária. Algumas das propriedades conhecidas de um espectro são:

$$m_k = \int_0^{\infty} \omega^k \cdot S(\omega) d\omega \quad (\text{Eq. 2.20})$$

Sendo  $m_k$  o k-ésimo momento do espectro de energia.

Então, o desvio padrão corresponde a:

$$\sigma_{sd} = \sqrt{m_0} \quad (\text{Eq. 2.21})$$

Onde:

$m_0$ : Área sob a curva espectral;

Período de cruzamento de zero:

$$T_z = 2\pi \cdot \left( \frac{m_0}{m_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq. 2.22})$$

Período de pico:

$$T_p = 2\pi \cdot \left( \frac{m_2}{m_4} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq. 2.23})$$

Fator de irregularidade:

$$\alpha = \frac{T_p}{T_0} \quad (\text{Eq. 2.24})$$

Parâmetro de largura de banda:

$$\varepsilon^2 = 1 - \alpha^2 \quad (\text{Eq. 2.25})$$

A largura de banda espectral é uma medida da irregularidade do mar. Para um processo de banda estreita,  $\varepsilon = 0$  ( $\alpha = 1$ ) e para um processo de banda larga  $\varepsilon = 1$  ( $\alpha = 0$ ).

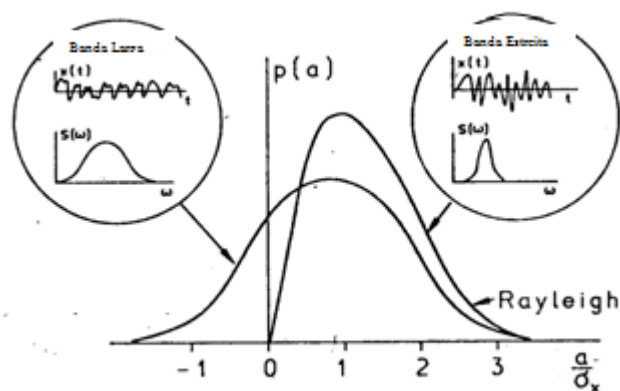
Se  $\varepsilon < 0,3$  o espectro de onda pode ser considerado de banda estreita, desta forma as alturas de onda no estado de mar seguem a distribuição de Rayleigh, e a altura significativa de onda pode ser aproximada por:

$$H_s = 4 \cdot \sqrt{m_0} \quad (\text{Eq. 2.26})$$

Onde:

$m_0$ : Área sob a curva espectral;

A Figura 2.15 abaixo apresenta as funções de densidade de probabilidade para os processos de banda larga e estreita.



**Figura 2.15** – Densidade de Probabilidade para processos de banda larga e estreita, [3].

## DECLIVIDADE DE ONDA

A declividade da onda é definida pela razão entre o comprimento e a altura da onda regular. Na formulação das teorias de onda, os parâmetros altura (H) e período (T) de uma determinada onda são constantes e definidos. O comprimento resultante é definido pelo tipo de teoria de onda utilizada pela denominada equação da dispersão característica da teoria de onda. Tem se então que:

$$\text{Declividade} = \frac{\lambda}{H} \quad (\text{Eq. 2.27})$$

Onde:

$\lambda$ : Comprimento da onda;

H: Altura da onda.

Em uma análise espectral, as forças são assumidas proporcionais às alturas de onda. Como essa hipótese não é verdadeira, procura-se estabelecer uma forma de contornar essa limitação, conforme visto adiante através da criação de uma função de transferência de declividade constante. Neste estudo procura-se mostrar que a seleção correta da declividade, para a geração das funções de transferência, pode trazer resultados substancialmente melhores quando comparado aos resultados onde a declividade é adotada constante para qualquer altura de onda. Maiores esclarecimento serão realizados em seguida.

Em ELLWANGER [3], são apresentados os passos envolvidos em uma análise espectral de fadiga:

1. Seleções das principais direções de incidência de onda (onde o número total de ondas vai ser distribuído entre essas direções principais). Nas direções principais de propagação de onda devem ser incluídas as direções que causam tensões elevadas nos principais elementos da estrutura;
2. Para cada direção, seleciona-se um número de estados de mar que descreve adequadamente a distribuição das ondas a longo prazo. Associa-se a duração a cada estado de mar;
3. Estabelecimento de uma função de transferência para cada variável de interesse;
4. Cálculo do espectro de resposta para cada estado de mar, combinando o espectro de ondas e as funções de transferência;
5. Cálculo das faixas de tensões para cada estado de mar;
6. Combinação dos resultados para todos os resultados de mar, para encontrar a distribuição de longo prazo dos valores de resposta;
7. Cálculo da vida à fadiga utilizando-se da Regra de Miner descrita no item anterior.

### 2.3.2.3 COMPARAÇÃO ENTRE A DETERMINÍSTICA E ESPECTRAL

As principais características do método determinístico são:

1. Não é usual a disponibilização da quantidade suficiente de dados para que uma análise determinística do tipo completo (de longo prazo) seja efetuada;
2. Assume que todas as ondas são regulares sem levar em conta a natureza estocástica do ambiente marinho.

Devido a estes dois aspectos, principalmente o segundo, adota-se o método estocástico como sendo o mais eficaz na avaliação da fadiga em elementos estruturais de plataformas fixas.

Diferentemente das ondas reais, a maioria das teorias de onda assumem que as ondas são periódicas e uniformes, possuindo um período  $T$  e uma altura  $H$ . Quando um grupo de ondas consiste em várias ondas em seqüência, umas idênticas às outras, estas são denominadas ondas periódicas ou ondas regulares.

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

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

Na execução deste trabalho foi utilizado o método espectral (estocástico) para o desenvolvimento da análise de fadiga.

### 3. DESCRIÇÃO DO MODELO

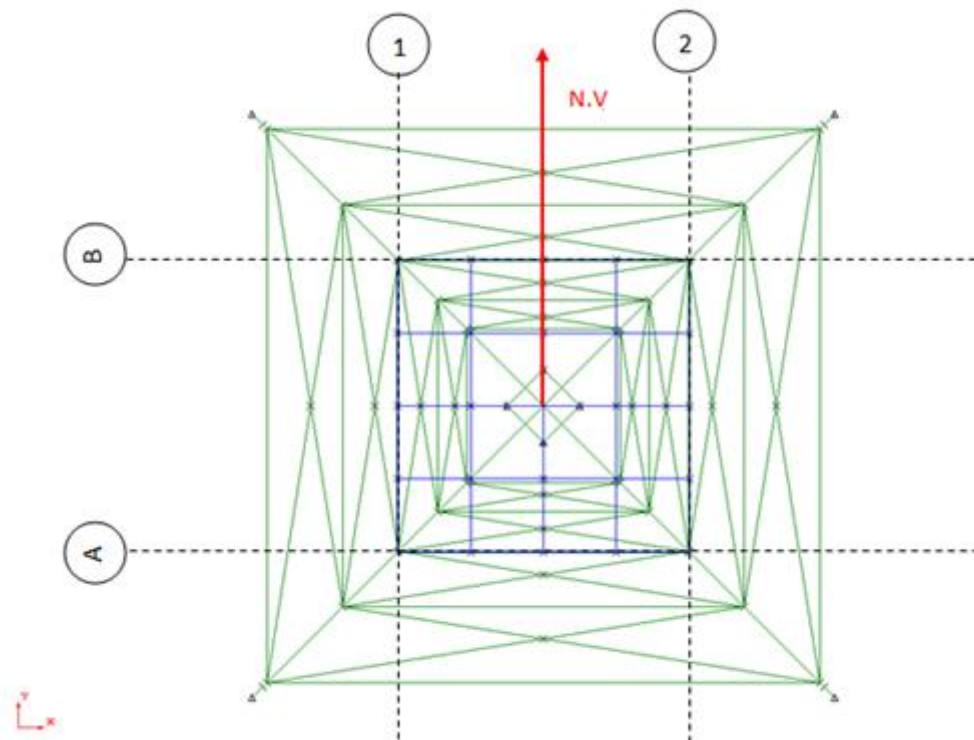
O modelo adotado na análise de fadiga foi elaborado com o auxílio do programa SACS.

O programa SACS (*Structural Analysis Computer System*) é desenvolvido pela *Engineering Dynamics, Inc.* \_ Kenner, Louisiana, U.S.A.

Para a realização da análise de fadiga, foi desenvolvido um modelo 3D de uma plataforma fixa fictícia composto por elementos de barras e placas.

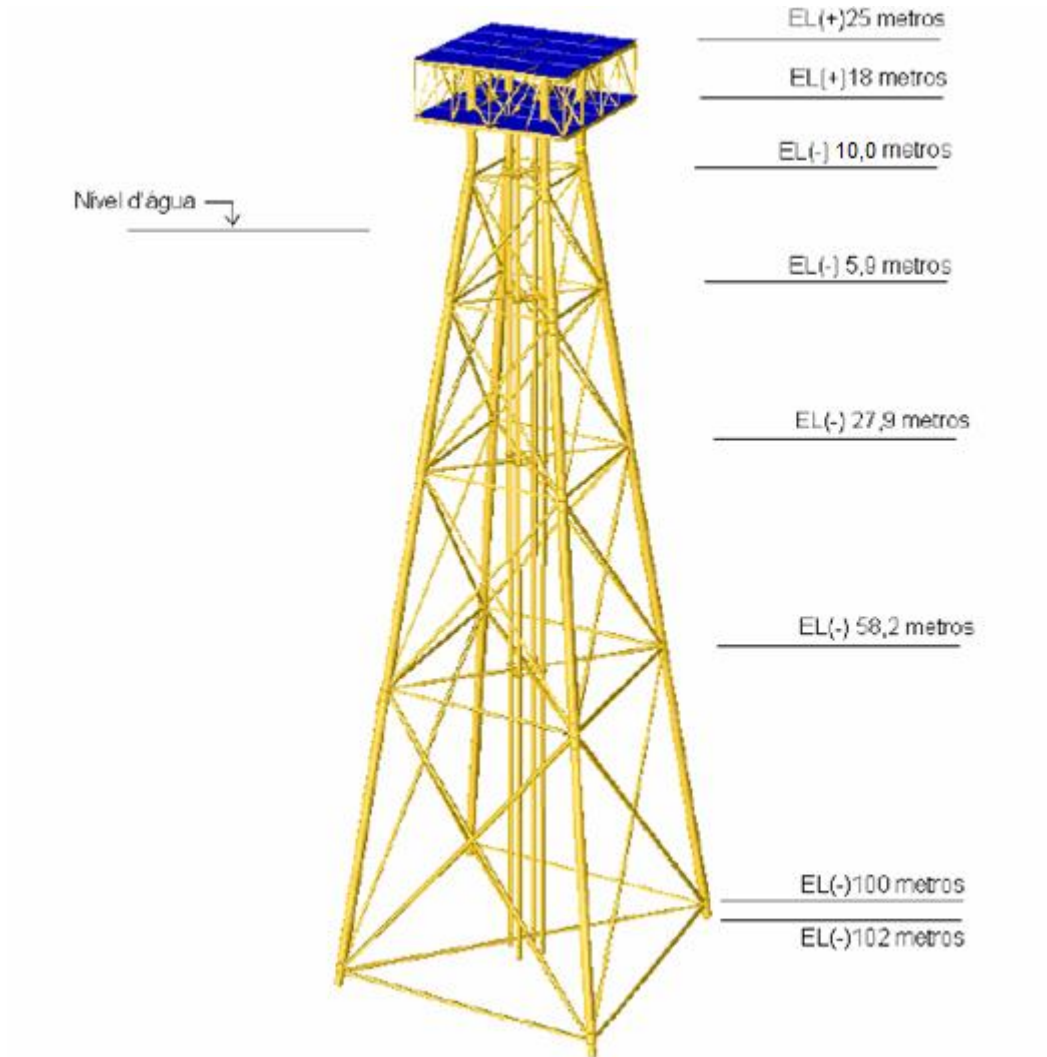
#### 3.1 MODELO ESTRUTURAL

Foi considerado que a plataforma fixa encontra-se localizada em uma região similar a do litoral do estado do Rio de Janeiro. Apresenta vida útil prevista de projeto de 30 anos.



**Figura 3.1** – Locação e orientação da plataforma.

Abaixo, uma visão do modelo sólido da plataforma:



**Figura 3.2** – Perspectiva sólida da plataforma em SACS.

As principais características da plataforma são:

Lâmina d'água: 100,0 metros

Números de pernas: 4

Inclinação das pernas: 1:8 nas direções globais X e Y

Elevação das mesas da jaqueta : EL(+) 10,00

EL(-) 5,90

EL(-) 27,90

EL(-) 58,20

EL(-) 100,00

EL(-) 102,00

Elevação das mesas do convés: EL(+) 18,00

EL(+) 25,00



Estacas: 4 principais

As faces da jaqueta são apresentadas da Figura 3.3 à 3.6.

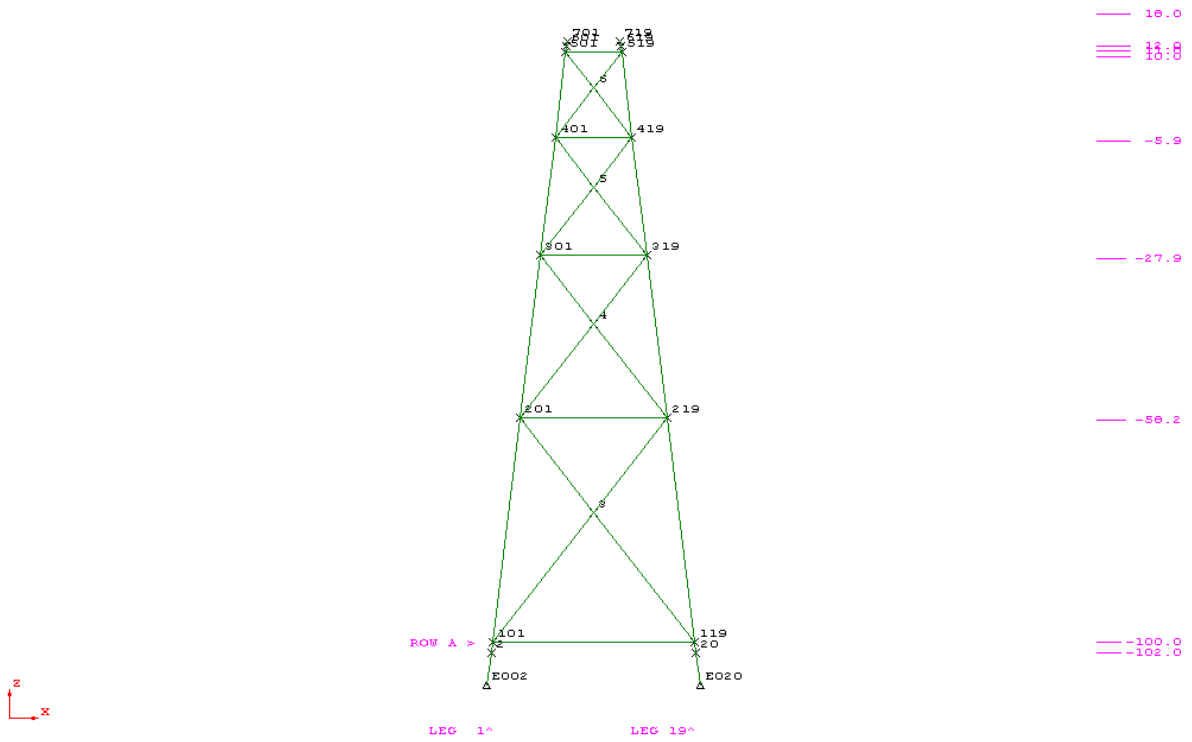


Figura 3.3 – Face A.

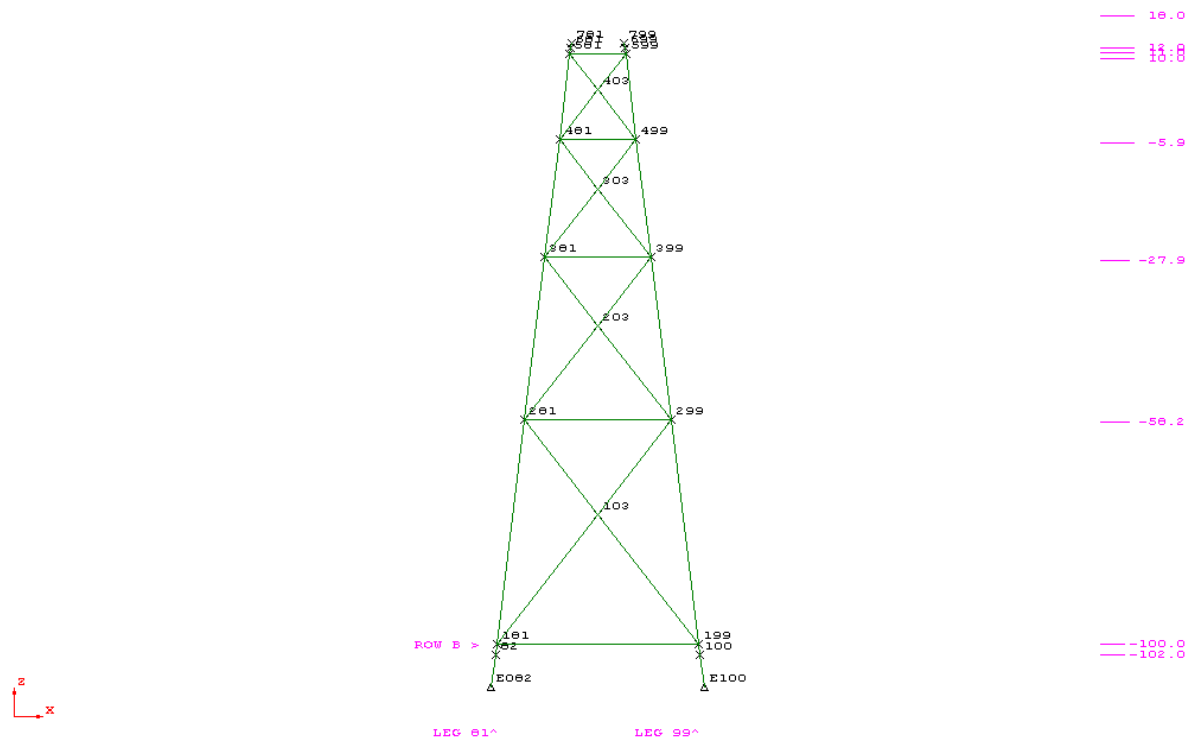


Figura 3.4 – Face B.

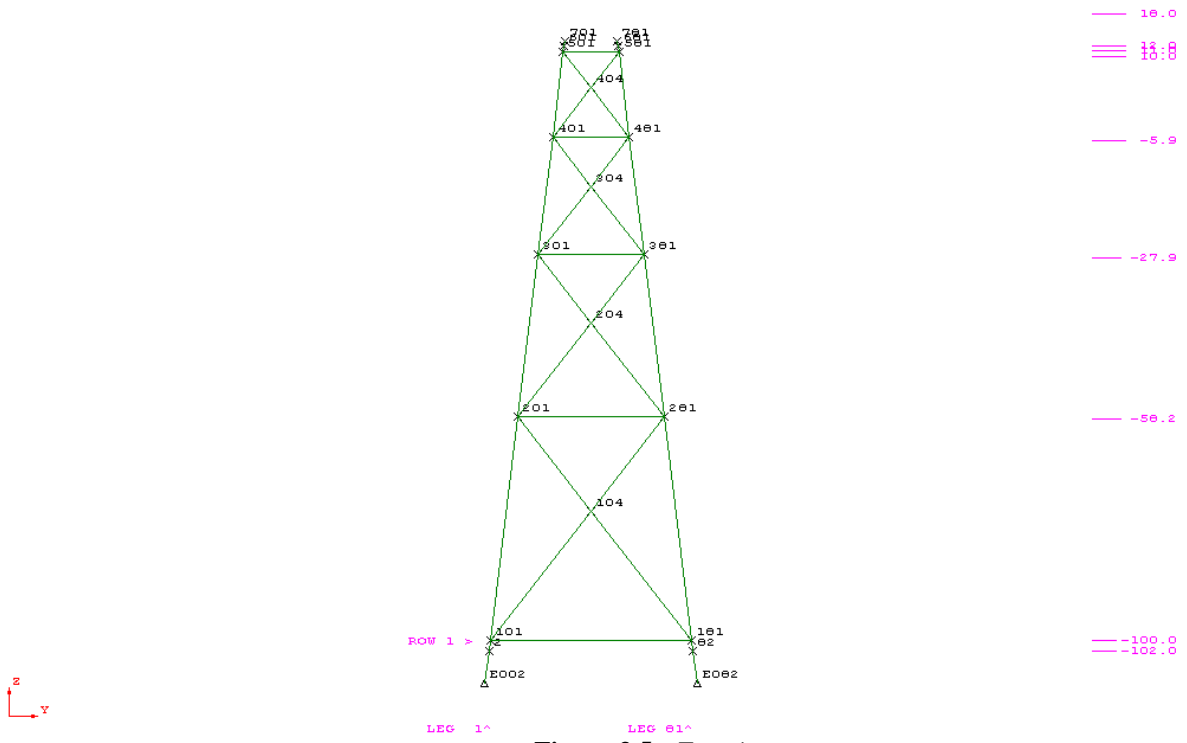


Figura 3.5 – Face 1.

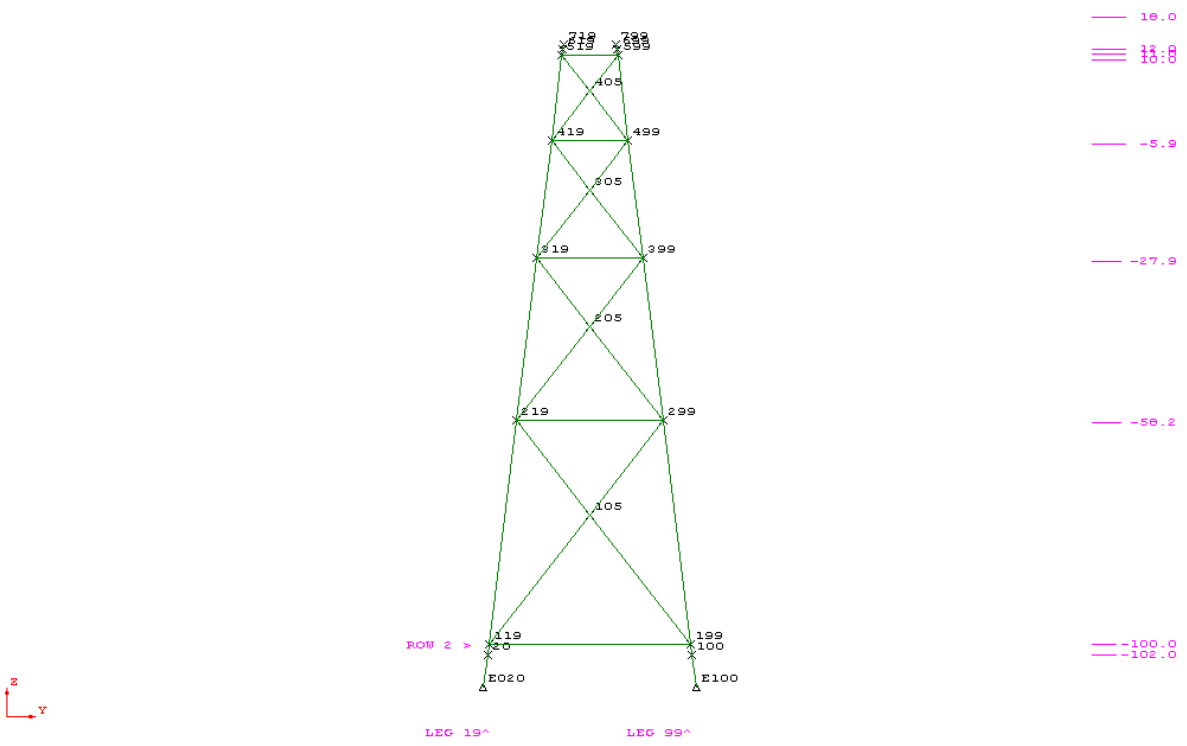


Figura 3.6 – Face 2.

### 3.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO

A fundação da plataforma é composta por 4 estacas principais inseridas nas pernas. As estacas são de 120 cm de diâmetro com 3,75 cm de espessura. As estacas foram simuladas

engastadas a uma profundidade calculada pela expressão proposta por M.T. Davidson e K.E. Robinson. Devido à ausência de dados geotécnicos foi admitido que o solo na região da plataforma consistisse em uma areia compacta. Sendo adotado como Taxa de crescimento do coeficiente de reação lateral para estacas ímersas em solos arenosos (Nh), o valor de 15000 kN/m<sup>3</sup>. Abaixo são apresentados os cálculos do comprimento de engastamento utilizado.

$$Leng = 1,8 \times (EI / Nh)^{1/5} \text{ (Comprimento elástico de Flambagem)}$$

$$Nh = 15000 \text{ kN/m}^3 \text{ (areia compacta)}$$

$$\text{Estacas Principais: } \phi 120 \times 3,75 \text{ cm}$$

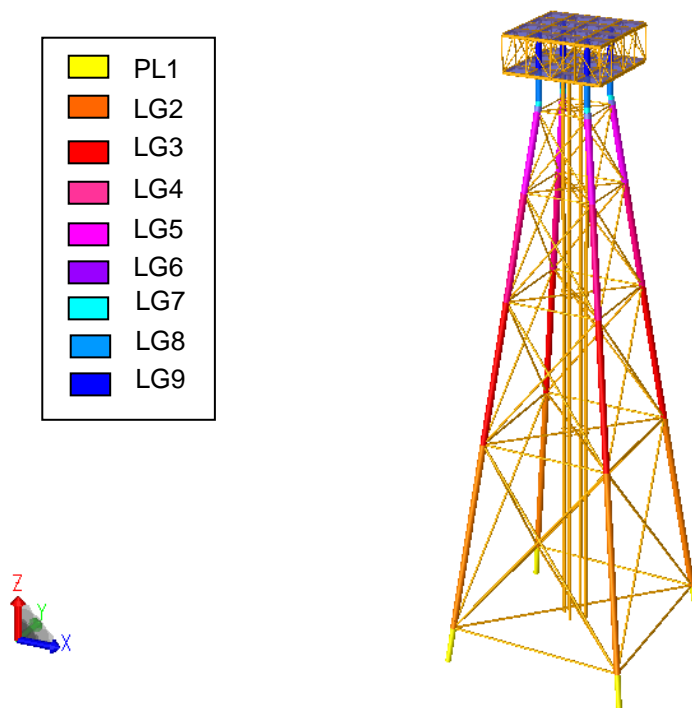
$$E = 2,1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$$

$$I = 26,596 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

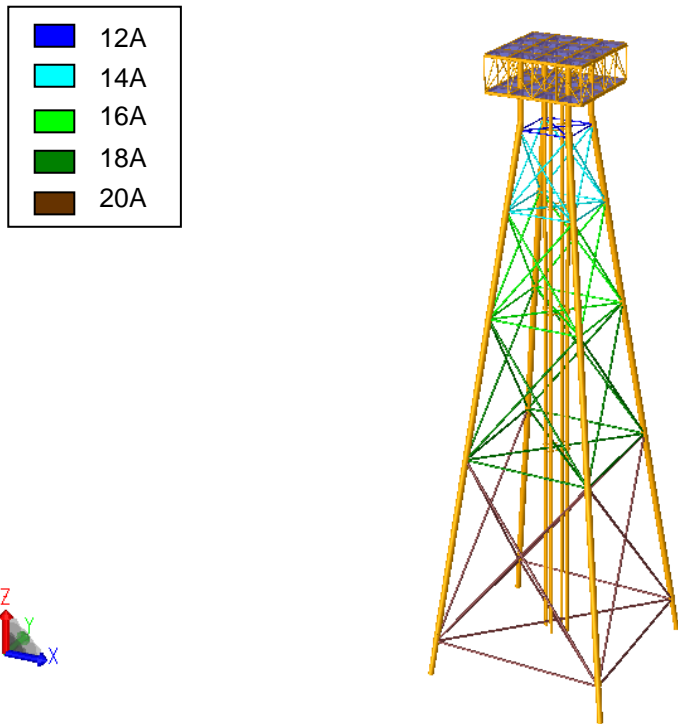
$$Leng = 6,00 \text{ m}$$

### 3.3 GEOMETRIA DO MODELO

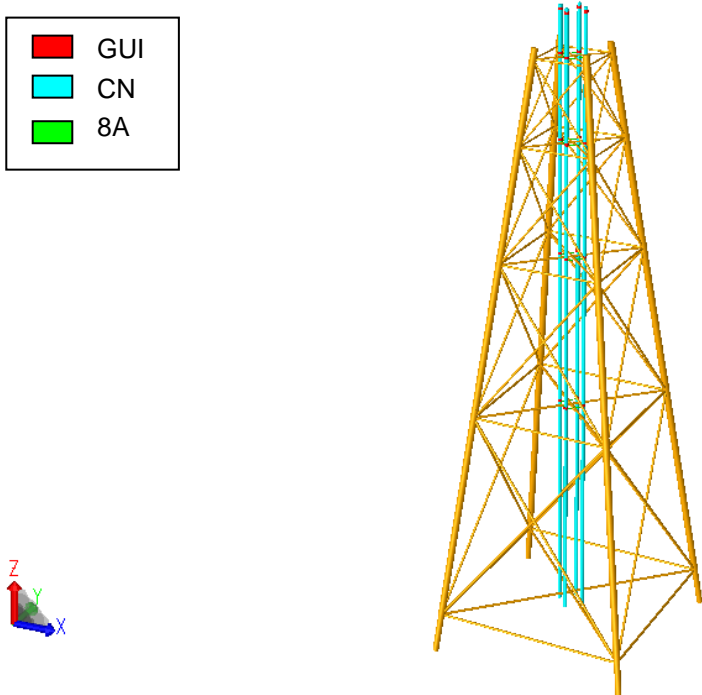
As figuras abaixo apresentam os membros estruturais da plataforma e suas características:



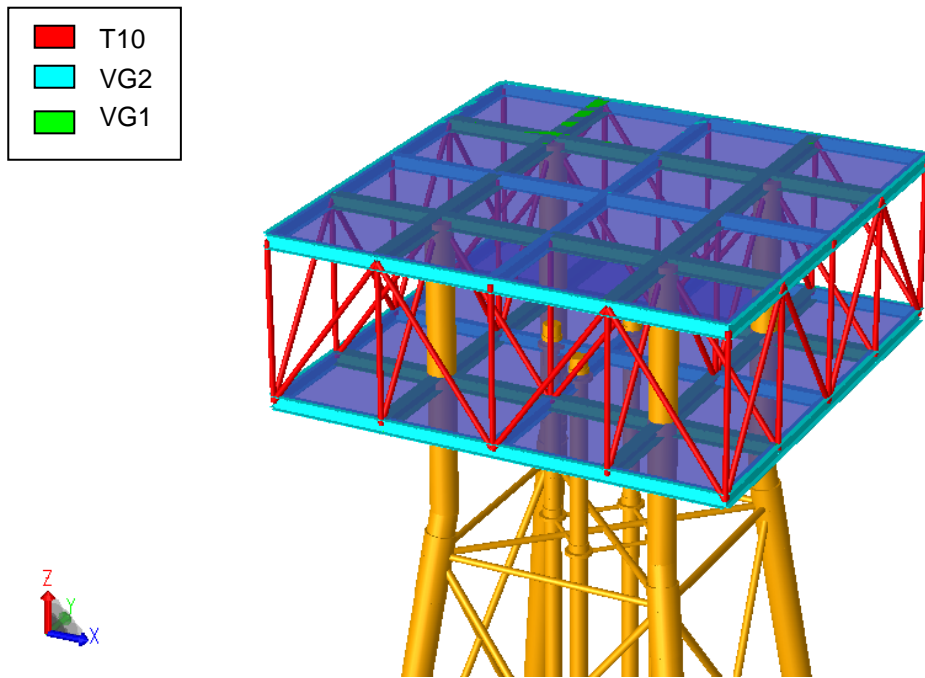
**Figura 3.7** – Membros tubulares das pernas da jaqueta da plataforma.



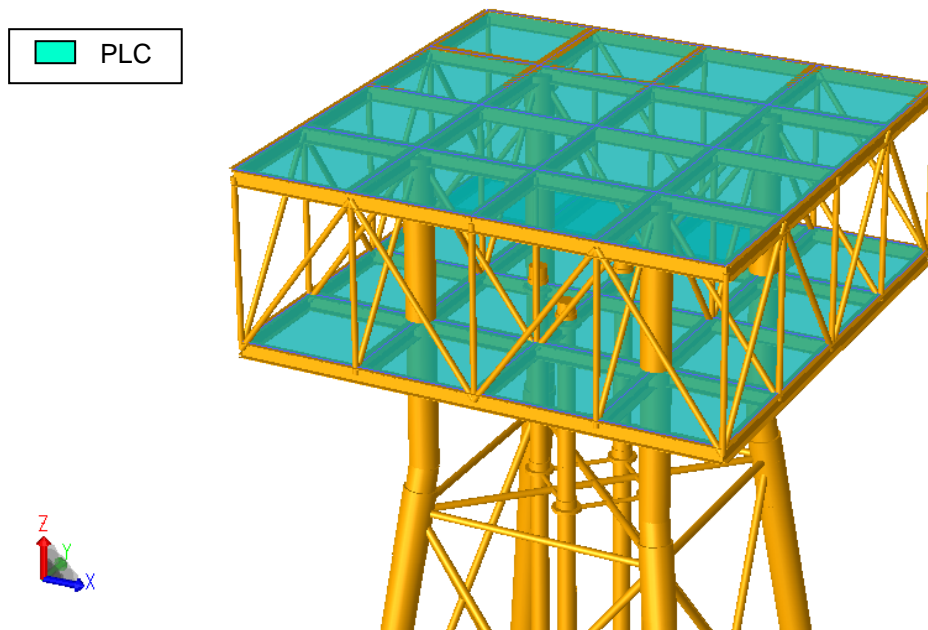
**Figura 3.8** – Membros tubulares das mesas e diagonais da jaqueta da plataforma.



**Figura 3.9**– Membros tubulares dos condutores das guias e das travessas da plataforma.



**Figura 3.10**– Membros tubulares e prismáticos do convés da plataforma.

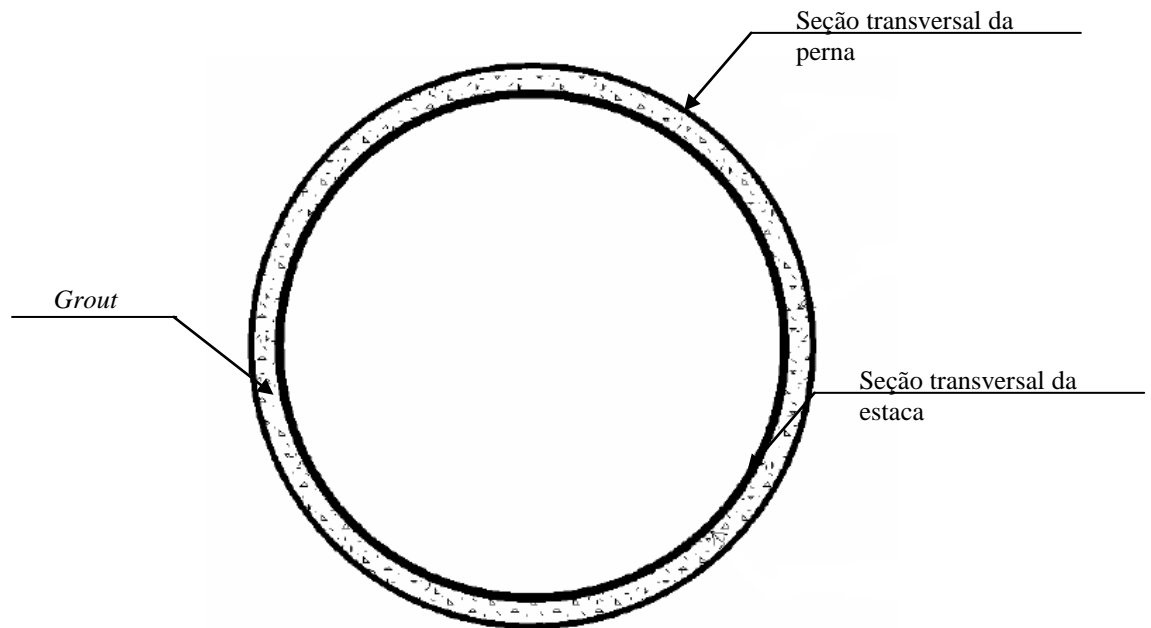


**Figura 3.11**– Elementos de placa do convés da plataforma.

As Tabelas 3.1 e 3.2 abaixo apresentam as propriedades dos membros tubulares acima ilustrados, a Tabela 3.3 apresenta dos membros prismáticos e a Tabela 3.4 apresenta das placas.

No modelo foi considerado que as estacas foram cravadas por dentro das pernas da jaqueta. Para que ocorra a união entre perna da jaqueta e estaca, é comum ser utilizado um preenchimento entre estes de concreto magro (*Grout*), sendo assim, temos uma seção composta para simular a seção transversal ao nível da perna da jaqueta.

Sua seção transversal se dará como apresentado abaixo.



**Figura 3.12**– Seção composta da perna da jaqueta.

**Tabela 3.1** – Propriedades dos elementos tubulares do convés e da jaqueta.

MEMBROS TUBULARES					
Grupo	E (GPa)	G (GPa)	Fy (MPa)	Diâmetro externo (cm)	Espessura (cm)
PL1	200	80	355	120,00	3,75
LG7	200	80	355	120,00	3,75
LG8	200	80	355	120,00	3,75
LG9	200	80	355	120,00	3,75
8A	200	80	355	20,00	1,25
12A	200	80	355	30,00	1,25
14A	200	80	355	35,00	1,25
16A	200	80	355	40,00	1,59
18A	200	80	355	45,00	1,98
20A	200	80	355	50,00	1,98
CN	200	80	355	75,00	2,50
GUI	200	80	355	85,00	2,50
T10	200	80	355	25,00	1,25

**Tabela 3.2** – Propriedades dos elementos tubulares do convés e da jaqueta.

MEMBROS TUBULARES - SEÇÃO COMPOSTA								
Grupo	E	G	Fy	SEÇÃO	Diâmetro externo	Espessura	Diâmetro externo	Espessura
	(GPa)	(GPa)	(MPa)		(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
LG2	200	80	355	PERNA	132,00	1,98	120,00	3,75
				JUNTA	136,25	3,75	120,00	3,75
LG3	200	80	355	PERNA	132,00	1,98	120,00	3,75
				JUNTA	136,25	3,75	120,00	3,75
LG4	200	80	355	PERNA	132,00	1,98	120,00	3,75
				JUNTA	136,25	3,75	120,00	3,75
LG5	200	80	355	PERNA	132,00	1,98	120,00	3,75
				JUNTA	136,25	3,75	120,00	3,75
LG6	200	80	355	PERNA	132,00	1,98	120,00	3,75
				JUNTA	136,25	3,75	120,00	3,75

**Tabela 3.3** – Propriedades dos elementos prismáticos do convés.

Membros Prismáticos							
Grupo	E (GPa)	G (GPa)	Fy (MPa)	h (cm)	bf (cm)	tf (cm)	tw (cm)
VG1	200	80	355	60	60	3.81	1.27
VG2	200	80	355	60	40	2.54	1.27

**Tabela 3.4** – Propriedades dos elementos de placa do convés.

Placas				
Grupo	E (GPa)	G (GPa)	Fy (MPa)	Espessura (cm)
PLC	200	80	355	1,0

### 3.4 AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DA ESTRUTURA

Com o objetivo de verificar se a frequência natural da estrutura apresenta período próximo ao período das ondas, o que poderia levar a ressonância, foi realizada uma extração modal da plataforma. Plataformas muito esbeltas apresentam períodos naturais elevados podendo ser ressonantes para períodos de onda da faixa de 3,0 a 14,0 segundos.

A extração modal consiste na obtenção das primeiras frequências (ou períodos) naturais da plataforma, juntamente com os seus respectivos modos. Estes elementos em conjunto darão uma noção do aspecto dinâmico do sistema estrutural e se o sistema se encontra dentro da faixa que pode ser excitável pelos carregamentos cíclicos de onda.

Por não fazer parte do escopo do trabalho serão apenas apresentados os resultados da extração modal, sem o aprofundamento na parte teórica.

O módulo DYNPAC do SACS gera as características dinâmicas da estrutura, incluindo auto-vetores (modos de vibração naturais) e os autovalores (períodos naturais).

As massas tanto devido à estrutura modelada quanto as cargas aplicadas (em relação aos elementos não-modelados), são levados em conta automaticamente pelo módulo de SACS DYNPAC, assim, nenhuma modelagem adicional foi necessária.

A Tabela 3.5 apresenta as massas modeladas na extração modal, e a Tabela 3.6 apresenta um resumo dos 15 primeiros modos de vibração da plataforma. Com o objetivo de ilustrar os modos de vibração apresentados na Tabela 3.6 são representados das Figuras 3.13 à 3.27.

**Tabela 3.5 – Resumo das massas modeladas na extração modal.**

```

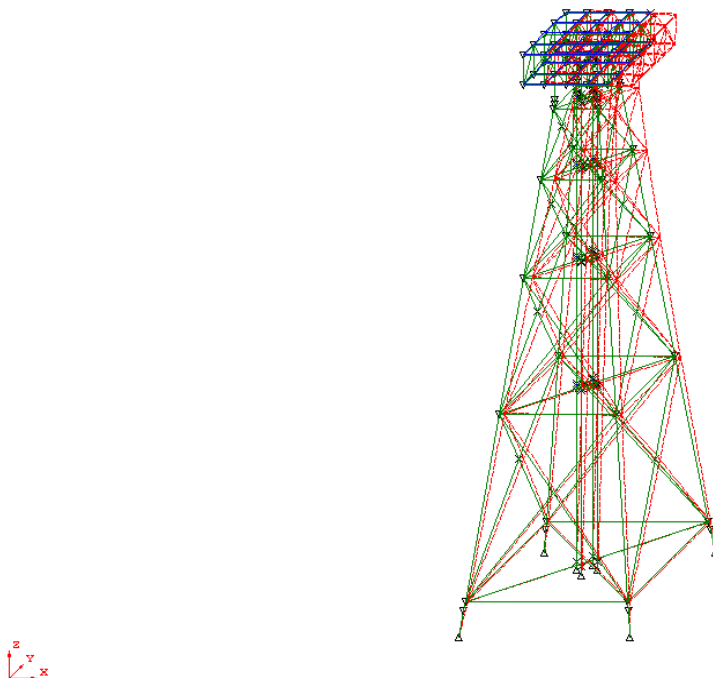
ANÁLISE DE EXTRACAO MODAL DA PLATAFORMA FIXA PROJETO FINAL
***** RESUMO DA MASSA E CENTRO DE GRAVIDADE *****
*****ITEM ***** MASSA ***** CENTRO DE GRAVIDADE *****
          X          Y          Z          X          Y          Z
          KN          KN          KN          M          M          M
ELEMENTOS DE PLACA          749.856          749.856          749.856          0.000          0.000          21.799
ELEMENTOS ESTRUTURAIS      17801.060          17801.060          17801.060          0.000          0.000          -39.898
MASSA ADICIONAL DO ELEMENTOS DE BARRA          9497.406          9497.406          1930.519          0.000          0.000          -62.222
CASOS DE CARGA CONVERTIDOS EM CARREGAMENTOS      11999.970          11999.970          11999.970          0.007          0.000          21.499
***** TOTAL *****
          40066.330          40066.330          32499.443          0.002          0.000          -17.125
    
```

**Tabela 3.6 – Resumo dos 15 primeiros modos de vibração**

MODE	FREQ. (CPS)	MASSA GERADA.	EIGENVALUE	PERÍODO (SECS)
1	0.655250	1.6882123E+03	5.8996435E-02	1.5261343
2	0.655327	1.6878618E+03	5.8982607E-02	1.5259555
3	0.850273	1.2009526E+03	3.5036732E-02	1.1760930
4	1.277057	2.7881172E+03	1.5531719E-02	0.7830503
5	1.277183	2.7862762E+03	1.5528657E-02	0.7829731
6	1.453549	4.8145983E+03	1.1988949E-02	0.6879715
7	2.308082	1.7296610E+03	4.7548616E-03	0.4332602
8	2.308308	1.7329086E+03	4.7539295E-03	0.4332178
9	2.895014	2.4449957E+03	3.0223088E-03	0.3454214
10	3.534979	5.0786981E+02	2.0270597E-03	0.2828871
11	3.538102	5.0921666E+02	2.0234831E-03	0.2826374
12	3.760614	1.0873406E+03	1.7911118E-03	0.2659140
13	3.873879	6.8093392E+03	1.6879058E-03	0.2581392
14	4.102824	1.0216099E+04	1.5047852E-03	0.2437346
15	4.167819	2.1272307E+04	1.4582186E-03	0.2399337

```

MODE 1 FREQ. 0.655 HZ PERIOD 1.526 SECS
MAX. VIEW DEFL. AT 915 WITH DX,DY,DZ= 2.536 0.002 -0.171
    
```



**Figura 3.13– Primeiro modo de vibração.**



MODE 2 FREQ. 0.655 HZ PERIOD 1.526 SECS  
MAX. VIEW DEFL. AT 906 WITH DX,DY,DZ= 0.000 2.536 0.177

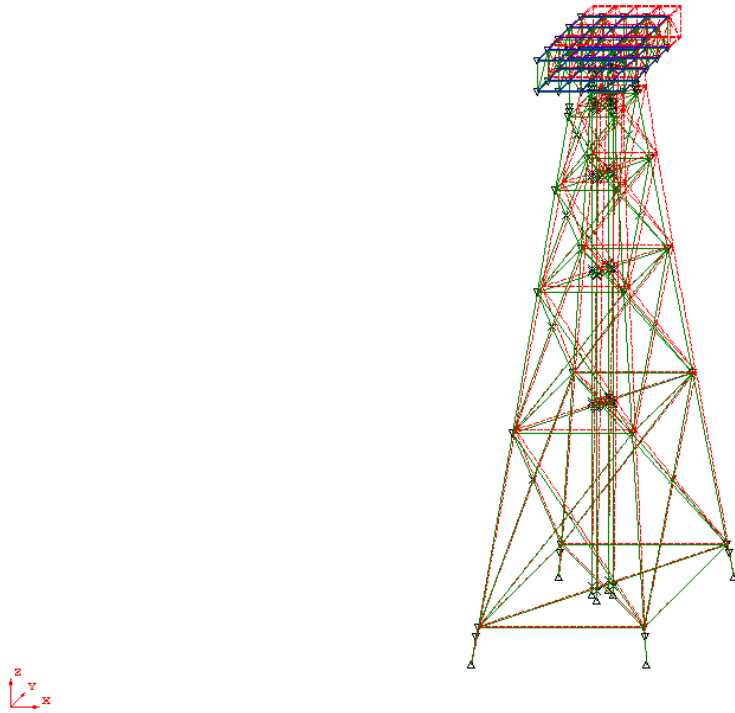


Figura 3.14– Segundo modo de vibração

MODE 3 FREQ. 0.850 HZ PERIOD 1.176 SECS  
MAX. VIEW DEFL. AT 921 WITH DX,DY,DZ= 2.536 2.536 0.000

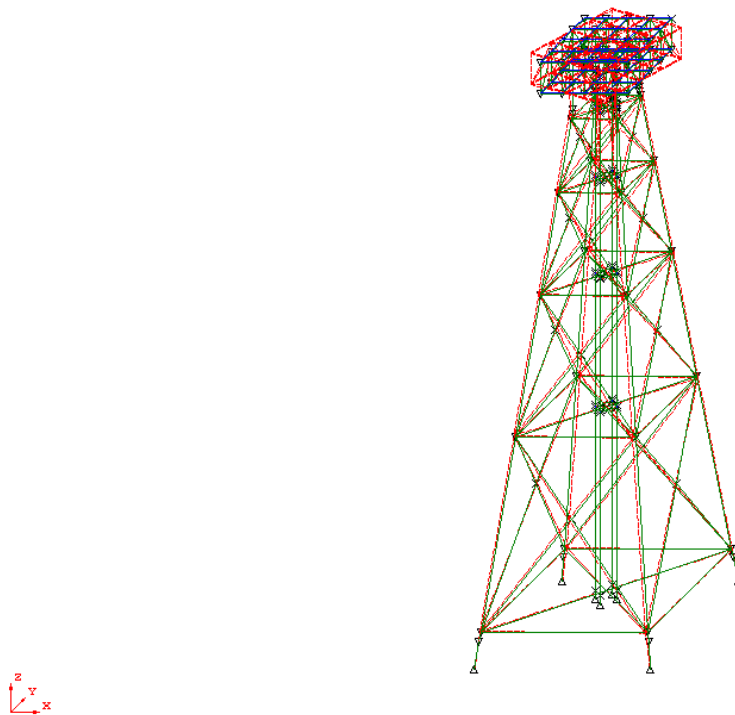


Figura 3.15– Terceiro modo de vibração

MODE 4 FREQ. 1.277 HZ PERIOD 0.789 SECS  
MAX. VIEW DEFL. AT 104 WITH DX,DY,DZ= 4.100 0.005 -0.511

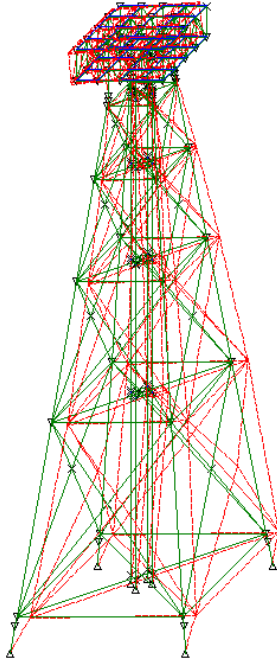


Figura 3.16– Quarto modo de vibração

MODE 5 FREQ. 1.277 HZ PERIOD 0.789 SECS  
MAX. VIEW DEFL. AT 3 WITH DX,DY,DZ= 0.099 4.099 -0.511

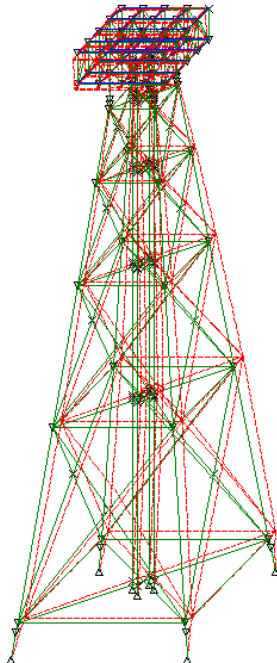
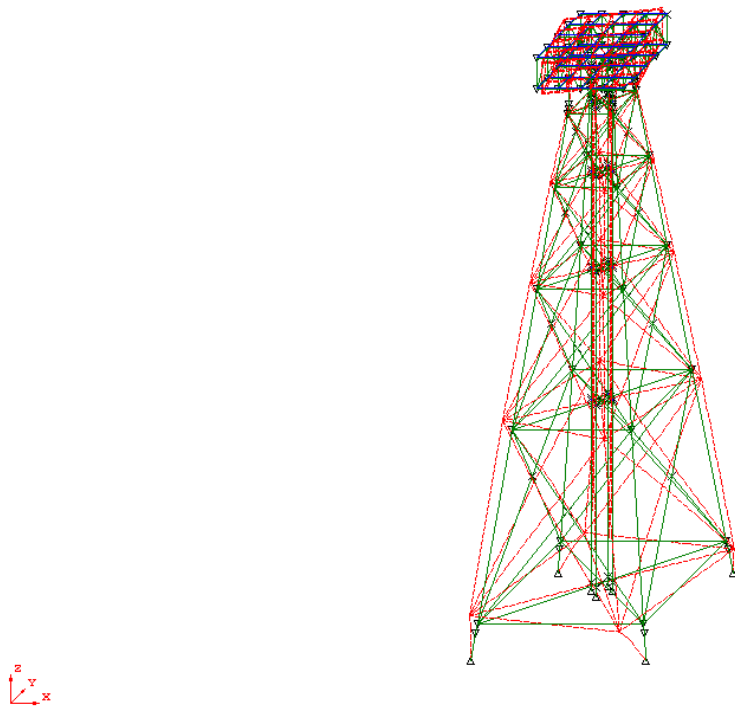


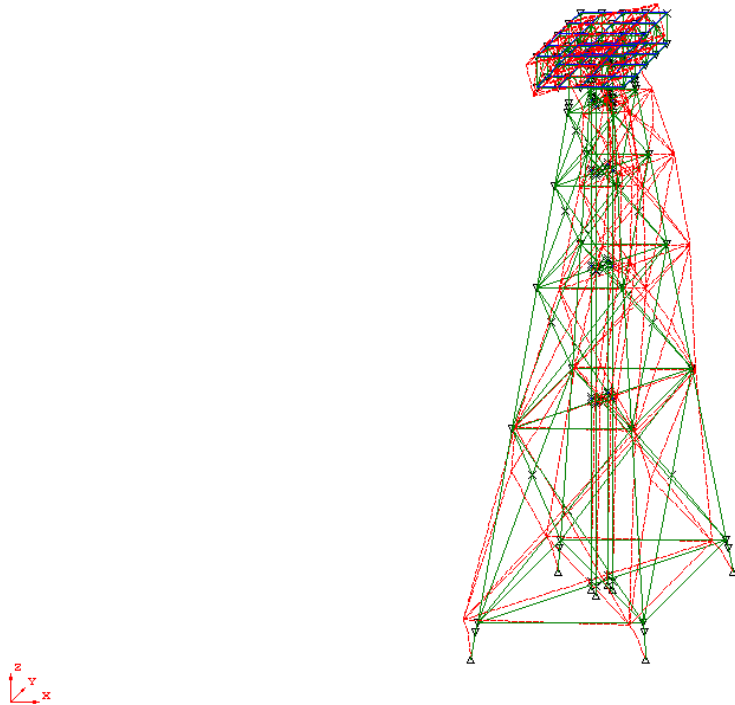
Figura 3.17– Quinto modo de vibração

MODE 6 FREQ. 1.454 HZ PERIOD 0.688 SECS  
MAX. VIEW DEFL. AT 261 WITH DX,DY,DZ= 2.539 2.540 0.000



**Figura 3.18**– Sexto modo de vibração

MODE 7 FREQ. 2.308 HZ PERIOD 0.433 SECS  
MAX. VIEW DEFL. AT 305 WITH DX,DY,DZ= 2.561 -0.154 0.144



**Figura 3.19**– Sétimo modo de vibração

MODE 8 FREQ. 2.308 HZ PERIOD 0.433 SECS  
MAX. VIEW DEFL. AT 5 WITH DX,DY,DZ= -0.103 2.582 -0.144

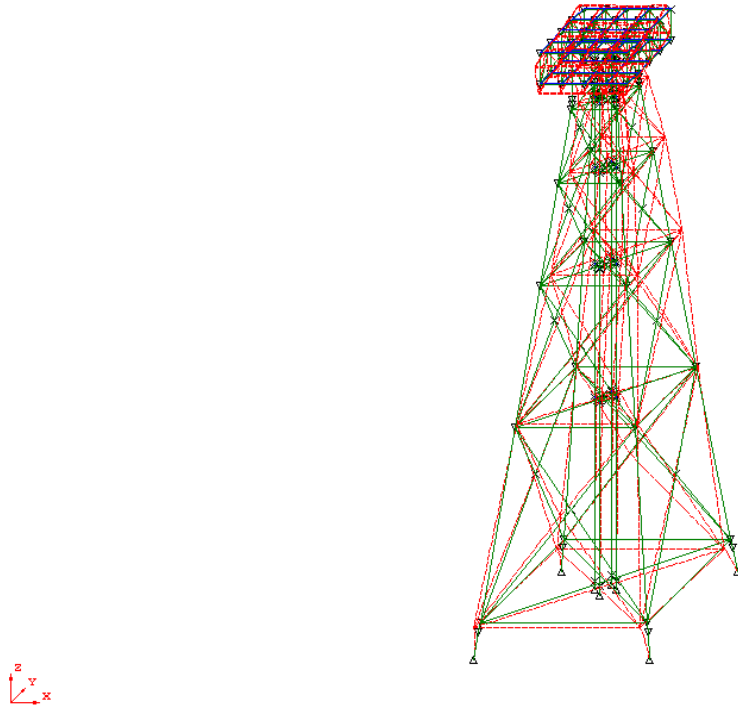


Figura 3.20– Oitavo modo de vibração

MODE 9 FREQ. 2.695 HZ PERIOD 0.345 SECS  
MAX. VIEW DEFL. AT 361 WITH DX,DY,DZ= 2.540 2.540 0.000

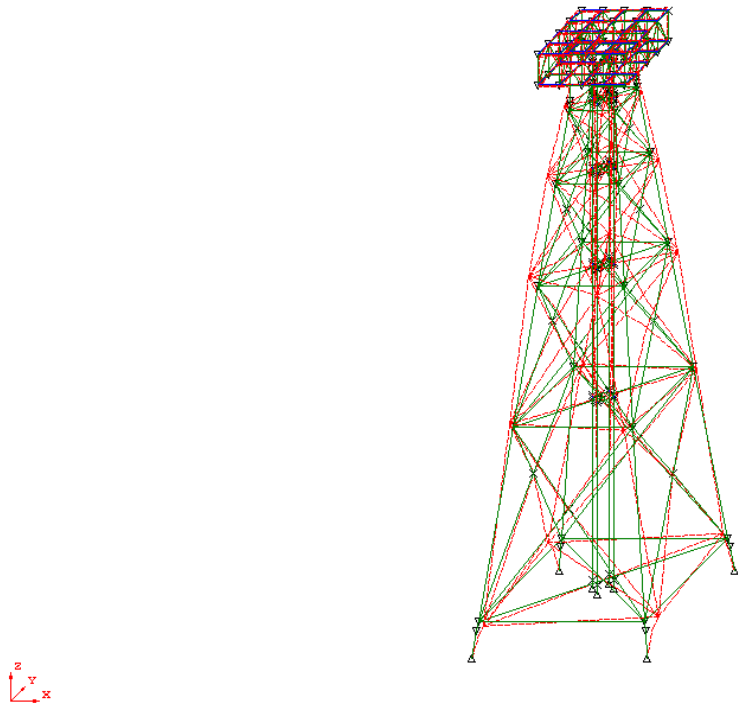
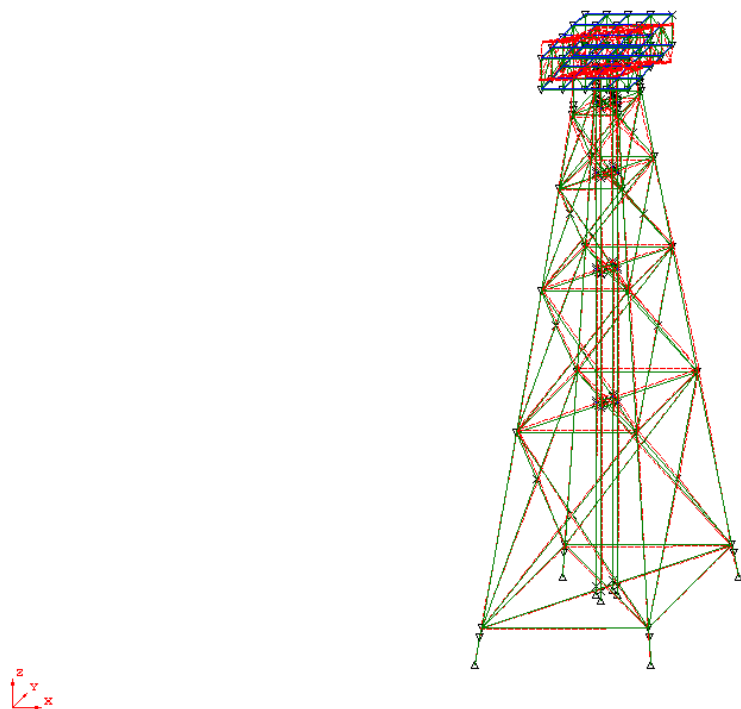


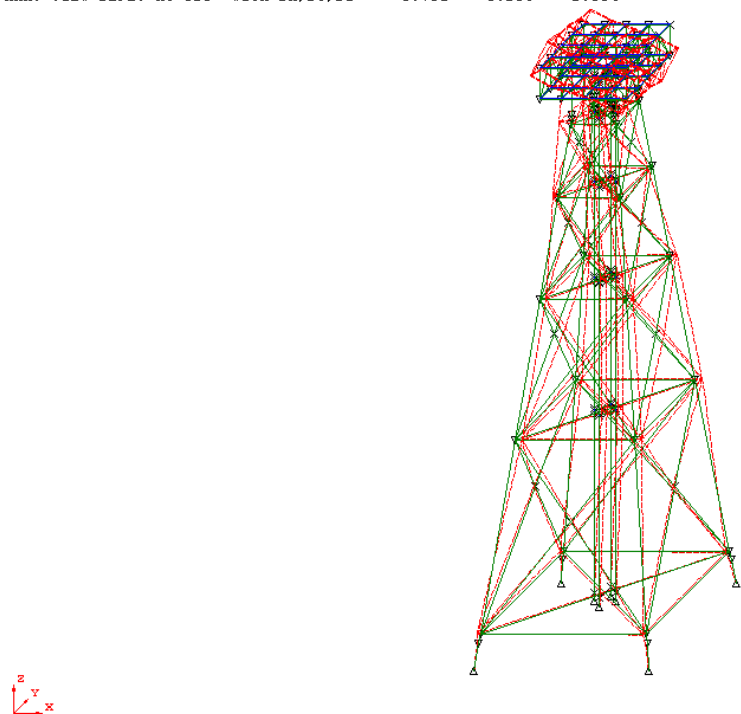
Figura 3.21– Nono modo de vibração

MODE 10 FREQ. 3.535 HZ PERIOD 0.283 SECS  
MAX. VIEW DEFL. AT 807 WITH DX,DY,DZ= 0.256 -0.781 2.502



**Figura 3.22**– Décimo modo de vibração

MODE 11 FREQ. 3.538 HZ PERIOD 0.283 SECS  
MAX. VIEW DEFL. AT 825 WITH DX,DY,DZ= -0.781 -0.256 -2.504



**Figura 3.23**– Décimo primeiro modo de vibração

MODE 12 FREQ. 3.761 HZ PERIOD 0.266 SECS  
MAX. VIEW DEFL. AT 919 WITH DX,DY,DZ= 0.001 -0.001 2.540

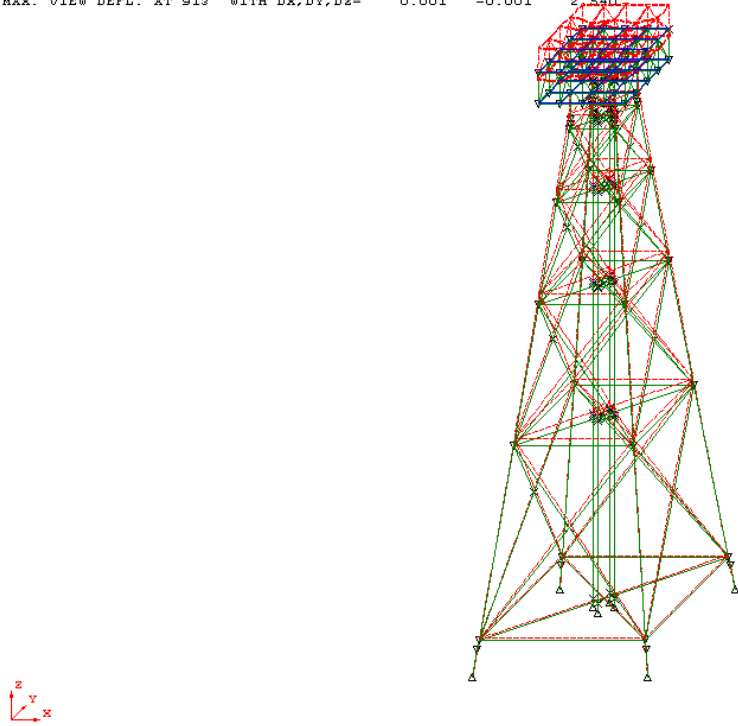


Figura 3.24– Décimo segundo modo de vibração

MODE 13 FREQ. 3.674 HZ PERIOD 0.256 SECS  
MAX. VIEW DEFL. AT 101 WITH DX,DY,DZ= -2.540 2.540 0.737

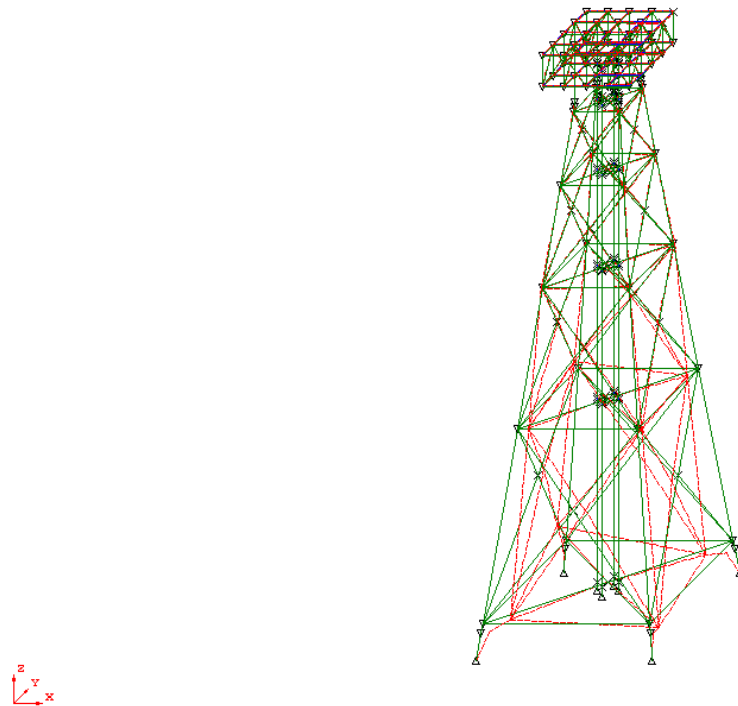


Figura 3.25– Décimo terceiro modo de vibração

MODE 14 FREQ. 4.102 HZ PERIOD 0.244 SECS  
MAX. VIEW DEFL. AT 104 WITH DX,DY,DZ= 6.906 0.000 -1.296

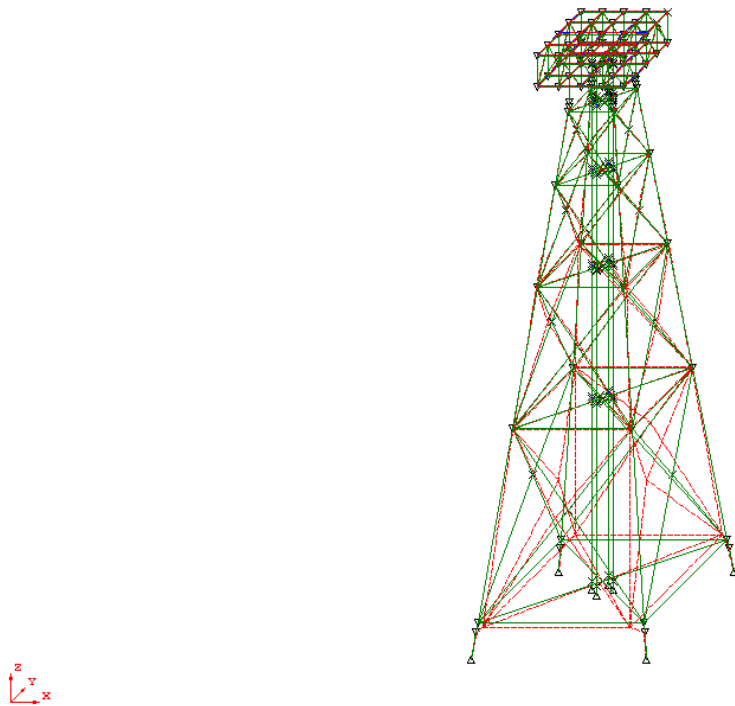


Figura 3.26– Décimo quarto modo de vibração

MODE 15 FREQ. 4.168 HZ PERIOD 0.240 SECS  
MAX. VIEW DEFL. AT 12 WITH DX,DY,DZ= 0.002 0.001 -27.191

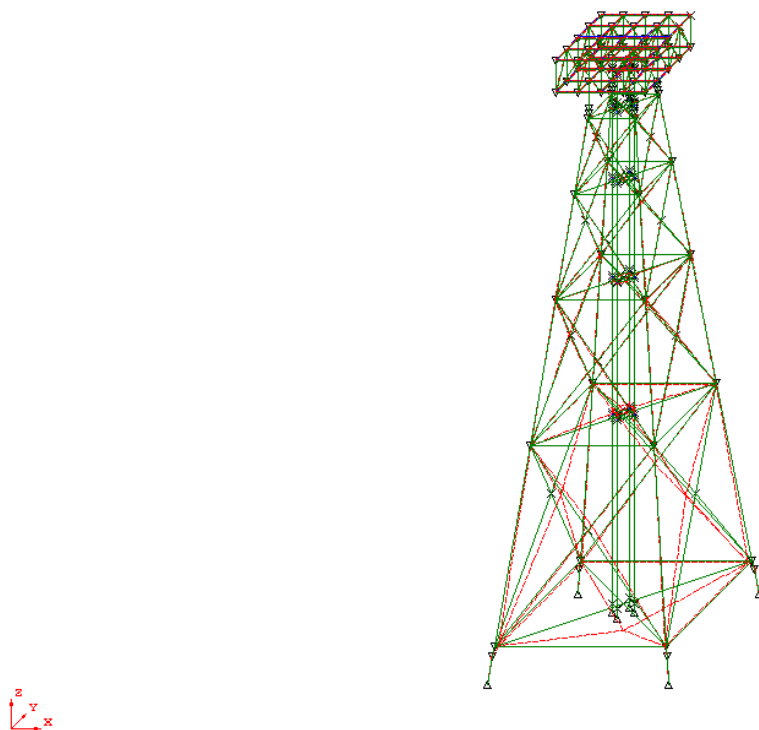


Figura 3.27– Décimo quinto modo de vibração

## 4. DADOS METEOCEANOGRÁFICOS DAS ANÁLISES

Os dados meteoceanográficos do presente estudo apresentam ordem de grandeza similar aos dados obtidos no, litoral do estado do Rio de Janeiro.

### 4.1 DADOS METEOCEANOGRÁFICOS PARA ANÁLISE ESPECTRAL

Conforme mencionado no item 2.3.2.2 o espectro teórico utilizado para a região da costa do estado do Rio de Janeiro é o espectro de JONSWAP com os parâmetros alterados com o intuito de adequá-lo às condições observadas no litoral do Rio de Janeiro. Os parâmetros que descrevem o estado de mar Hs, altura de onda significativa, e Tp, primeiro período de pico espectral que corresponde ao período de pico de todo o espectro. A relação entre o período de pico e o período de cruzamento de zero é apresentada abaixo:

$$T_z = T_p \cdot \sqrt{\frac{5 + \gamma}{10.89 + \gamma}} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Onde:

$T_p$ : Período de pico ou período de onda significativo;

$T_z$ : Período de cruzamento de zero;

$\gamma$ : parâmetro *peakedness* ou fator de intensificação de pico.

O parâmetro  $\gamma$  ajustado para a região da costa do estado do Rio de Janeiro:

$$\gamma = 6,4 \cdot (T_p)^{-0.491} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

A altura de onda significativa é calculada de acordo com a equação 2.26.

A Tabela 4.1 abaixo apresenta o diagrama de dispersão para análise espectral. A Tabela 4.2 apresenta as porcentagens dos estados de mar de acordo com direções.

**Tabela 4.1** – Distribuição de altura de onda significativa e o primeiro período de pico espectral.

Hs1	Tp1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Ocorr Hs1	% Hs1
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
0.00	0.50	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0.02
0.50	1.00	0	20	25	59	87	41	18	13	14	7	3	5	1	0	0	0	0	293	2.15
1.00	1.50	1	157	431	541	725	469	247	224	197	83	18	13	12	3	4	0	0	3125	22.96
1.50	2.00	0	62	681	964	811	678	460	377	317	189	83	36	16	8	14	0	0	4696	34.51
2.00	2.50	0	1	169	565	565	431	343	282	300	209	89	33	16	13	6	1	0	3023	22.21
2.50	3.00	0	0	12	167	293	201	165	180	186	148	73	32	14	6	8	0	0	1485	10.91
3.00	3.50	0	0	1	28	88	87	71	73	102	73	35	22	15	3	5	1	0	604	4.44
3.50	4.00	0	0	0	0	14	22	26	32	41	44	20	12	9	2	2	0	0	224	1.65
4.00	4.50	0	0	0	0	0	4	12	17	13	22	14	10	5	1	1	0	0	99	0.73
4.50	5.00	0	0	0	0	0	0	2	7	4	9	8	4	5	0	0	0	0	39	0.29
5.00	5.50	0	0	0	0	0	0	1	1	3	1	4	2	1	0	0	0	0	13	0.10
5.50	6.00	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0.01
6.00	6.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0.01
6.50	7.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
Ocorr. Tp1		1	240	1320	2324	2583	1934	1345	1206	1178	786	350	169	94	36	40	2	0	13608	
% Tp1		0.01	1.76	9.70	17.08	18.98	14.21	9.88	8.86	8.66	5.78	2.57	1.24	0.69	0.26	0.29	0.01	0.00		

Os dados foram tabelados em intervalos de onda de 3 horas, fornecendo informações equivalentes a 40824 horas (= 13608 x 3 horas).



**Tabela 4.2** – Distribuição dos estados de mar de acordo com as direções.

Direção	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Total (%)	10,13	24,49	17,31	14,71	22,02	10,78	0,41	0,15

## 5. DESENVOLVIMENTO DA ANÁLISE

### 5.1 CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA

A análise de fadiga é realizada por um pós-processamento do programa SACS que avalia o desempenho das estruturas no que diz respeito à falha por fadiga. Utiliza-se um arquivo CSF (*Common Solution File*) como sua base de dados fundamental, complementado por um arquivo de entrada onde o usuário determina características com relação à fadiga, tais como as combinações de carregamentos, a vida útil de projeto, fatores de segurança, entre outros. Sendo a estrutura não excitável dinamicamente, o arquivo CSF é resultado da análise estática da estrutura submetida a várias posições da onda passando pela estrutura.

As variações de tensão para a seção transversal tubular em torno da ligação soldada são avaliadas, em seguida multiplicadas por Fatores de Concentração de Tensões SCF, (manualmente fornecidos ou gerados automaticamente pelo programa através da formulação de Eftymiou) e são avaliados por um dos vários métodos disponíveis, selecionados pelo usuário. Posteriormente são utilizadas para encontrar a razão de dano em cada um dos oito pontos pelo cálculo da relação número de ocorrências desta variação de tensão ao que se produz a trinca como determinado a partir de uma curva S-N. O usuário pode fornecer sua própria curva S-N ou pode usar uma das curvas do programa. O processo é repetido para cada junta analisada. Algumas das principais características e capacidades da análise de fadiga no SACS são:

1. Análise pode ser baseada em considerações determinísticas ou estocásticas (espectrais);
2. Os Fatores de Concentração de Tensões (SCF) podem ser automaticamente avaliados com base em teorias já desenvolvidas ou através da entrada de um valor pelo usuário;
3. O programa calcula os Fatores de Concentração de Tensões também com base nas recomendações da DNV ou API;
4. O usuário pode especificar a realização de uma análise de fadiga para juntas críticas selecionadas, excluindo outras articulações da análise;
5. Podem ser especificados pelo usuário limites superiores e inferiores para os Fatores de Concentração de Tensões;
6. Membros não-tubulares, placas e cascas podem ser omitidos da análise de fadiga;
7. Os SCF podem ser substituídos para um nó, grupo, membro ou nível de nós;
8. As curvas S-N da API e AWS são incorporadas ao programa. Entretanto, o usuário pode, definir a sua própria curva S-N;
9. O programa determina automaticamente se a conexão é do tipo K, T, Y, KT ou X e calcula o SCF apropriado para cada tipo. O usuário pode, no entanto, forçar a utilização de um determinado SCF para qualquer tipo especificado junta. Por exemplo, uma junta do tipo K pode ser forçada a ter um SCF de uma do tipo X;
10. As variações de tensões podem ser utilizadas com base em análises estáticas e dinâmicas.
11. O programa pode calcular variações de tensões baseado na diferença entre as tensões máximas e mínimas de cortante na base, momento de tombamento, ou forças de elevação;
12. O programa pode calcular variações de tensão baseado na diferença entre tensão mínima e tensão máxima para as várias posições de uma onda passando pela estrutura;

13. Intervalos de variações de tensões podem ser calculados para ondas de altura arbitrária por interpolação automática entre os valores de algumas ondas de altura especificada pelo usuário;
14. A análise espectral de fadiga pode ser baseada nos espectros de Pierson-Moskowitz, JONSWAP, Lewis e Ochi Hubble ou ainda o usuário pode definir um espectro de onda próprio;
15. Permite que as curvas S-N sejam expandidas para inclusão de correção de espessura, pois placas espessas estão mais sujeitas a fadiga, e limite de resistência, pois algumas normas não recomendam um patamar horizontal nas curvas S-N.

## 5.2 PREMISSAS BÁSICAS

Para ambas as análises as seguintes premissas básicas de projeto foram admitidas:

- Vida útil de projeto: 30 anos;
- Fator de segurança: 2,0;
- Fatores de Concentração de Tensões foram considerados iguais a 2,5 para todos os tipos de juntas (convém lembrar aqui que a intenção nesse caso não é obter resultados precisos e sim comparar os danos obtidos pelos dois métodos);
- Curva de fadiga: Curva X' da API-RP 2A

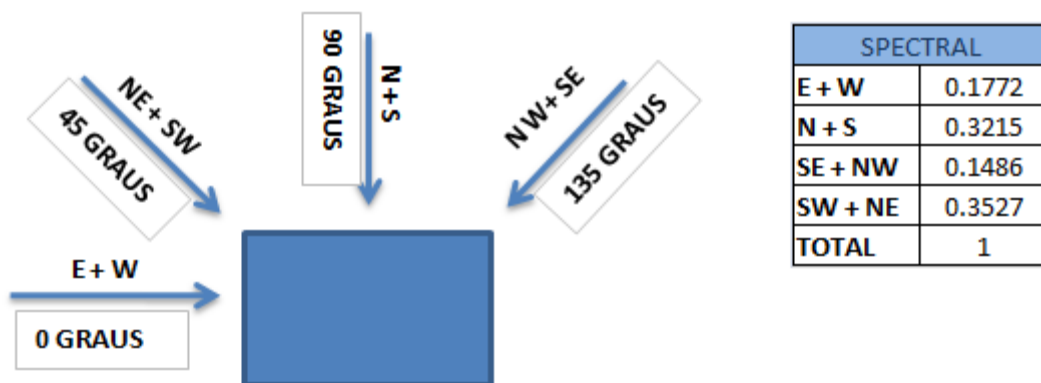
## 5.3 ANÁLISE ESPECTRAL

Para a elaboração desta análise utilizou-se o conceito de função de transferência, que correlaciona forças atuantes nas diversas juntas da plataforma com as frequências de onda atuantes nesta. Para a elaboração das funções de transferência é utilizada uma onda com o período correto e altura unitária.

Foi assumida a simplificação que ondas de direções opostas causariam a mesma variação de tensão, reduzindo as direções cardiais de 8 para 4.

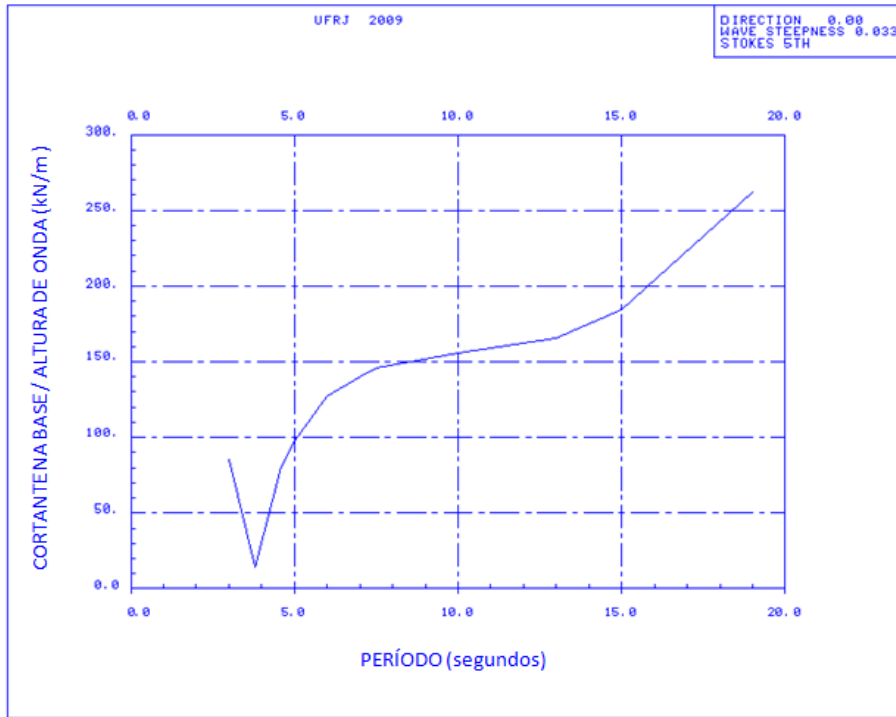
**Tabela 5.1** – Porcentagem das incidências de direções consideradas na espectral.

Direção	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Total (%)	10,13	24,49	17,31	14,71	22,02	10,78	0,41	0,15

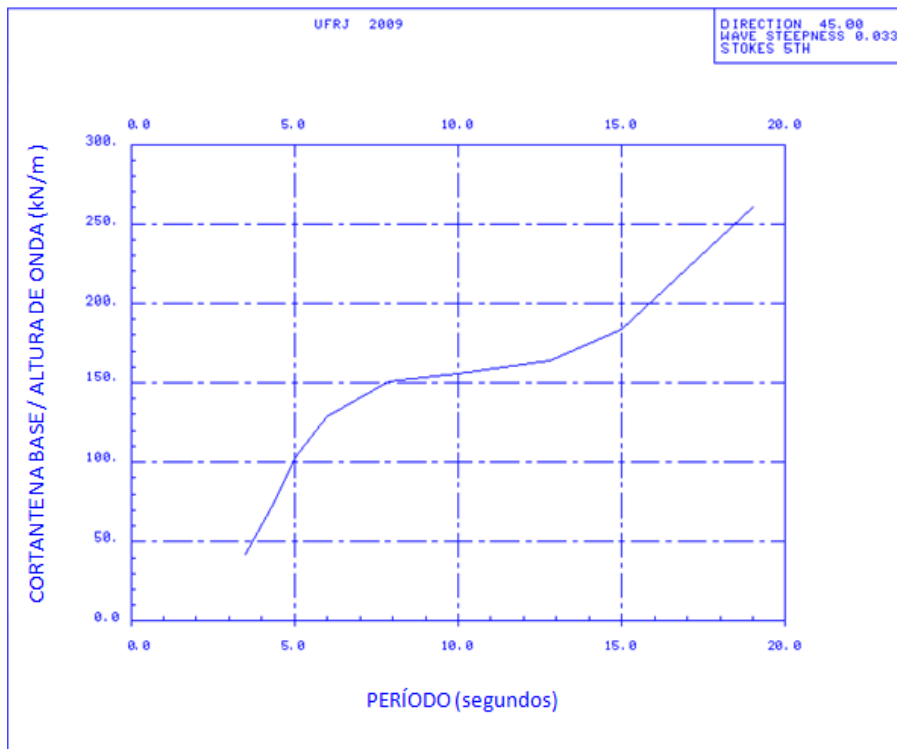


**Figura 5.1** – Percentuais das direções.

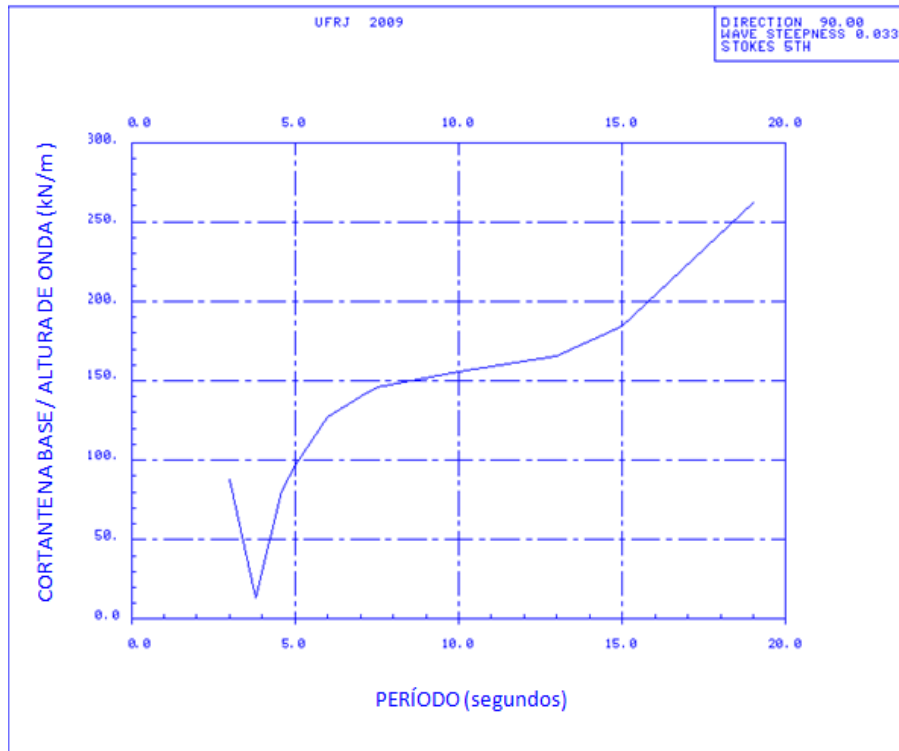
O espectro de tensões resultantes da passagem de um mar aleatório de parâmetros  $H_s$  e  $T_z$  pela estrutura da plataforma é calculado automaticamente pelo programa, fazendo-se uso das funções de transferência, dos parâmetros espectrais  $H_s$  e  $T_z$  (espectro de Jonswap) e das propriedades geométricas do *brace*, do *chord*, varrendo-se 4 direções distintas de incidência dos espectros em relação à estrutura. As figuras abaixo apresentam os gráficos das funções de transferência das 4 direções.



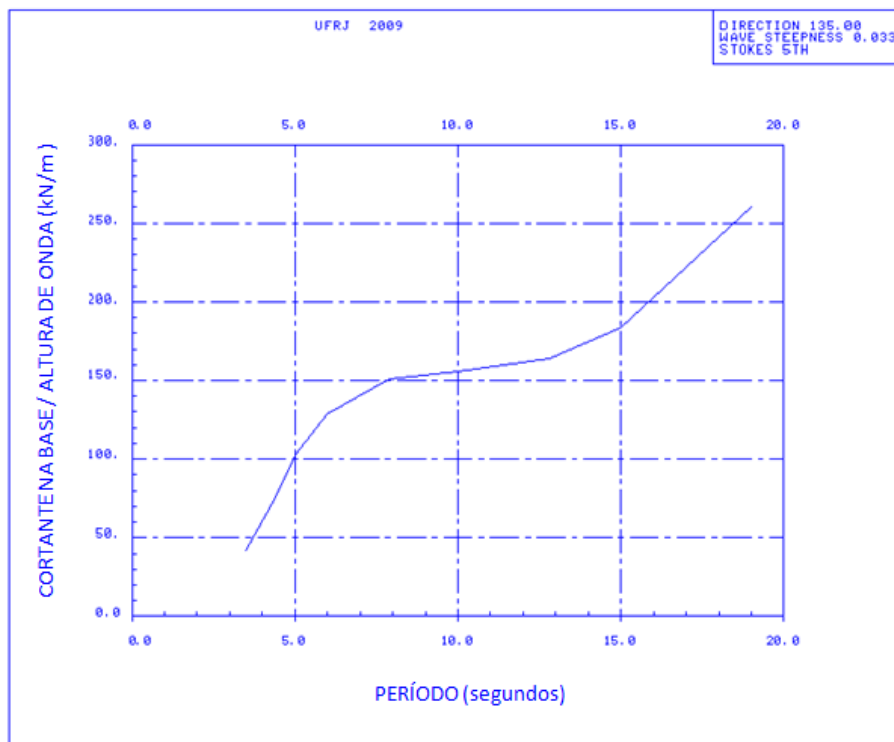
**Figura 5.2** – Função de transferência para a direção 0 graus.



**Figura 5.3** – Função de transferência para a direção 45 graus.



**Figura 5.4** – Função de transferência para a direção 90 graus.



**Figura 5.5** – Função de transferência para a direção 135 graus.

A quantidade de mares aleatórios (definidos pelos espectros de mar) atuando por direção, para um período de tempo padrão de 1 ano, é utilizado no cálculo do dano anual da plataforma, fazendo uso do diagrama de dispersão da bacia onde a plataforma se situa. O diagrama de dispersão utilizado no cálculo de fadiga corresponde ao diagrama apresentado na

Tabela 4.1. A Tabela 5.2 abaixo apresenta o diagrama de dispersão de estados de mar aleatório normalizado (dividido pelo total de estados de mar). Esta normalização é necessária na execução das análises pelo SACS

**Tabela 5.2 – Diagrama de dispersão da análise espectral normalizado.**

Hs1	Tp1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Ocorr Hs1	% Hs1
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
0.00	0.50	0.0E+00	0.0E+00	7.3E-05	0.0E+00	0.0E+00	7.3E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	7.3E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	2E-04	0.00
0.50	1.00	0.0E+00	1.5E-03	1.8E-03	4.3E-03	6.4E-03	3.0E-03	1.3E-03	9.6E-04	1.0E-03	5.1E-04	2.2E-04	3.7E-04	7.3E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.022	0.00
1.00	1.50	7.3E-05	1.2E-02	3.2E-02	4.0E-02	5.3E-02	3.4E-02	1.8E-02	1.6E-02	1.4E-02	6.1E-03	1.3E-03	9.6E-04	8.8E-04	2.2E-04	2.9E-04	0.0E+00	0.0E+00	0.23	0.00
1.50	2.00	0.0E+00	4.6E-03	5.0E-02	7.1E-02	6.0E-02	5.0E-02	3.4E-02	2.8E-02	2.3E-02	1.4E-02	6.1E-03	2.6E-03	1.2E-03	5.9E-04	1.0E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.345	0.00
2.00	2.50	0.0E+00	7.3E-05	1.2E-02	4.2E-02	4.2E-02	3.2E-02	2.5E-02	2.1E-02	2.2E-02	1.5E-02	6.5E-03	2.4E-03	1.2E-03	9.6E-04	4.4E-04	7.3E-05	0.0E+00	0.222	0.00
2.50	3.00	0.0E+00	0.0E+00	8.8E-04	1.2E-02	2.2E-02	1.5E-02	1.2E-02	1.3E-02	1.4E-02	1.1E-02	5.4E-03	2.4E-03	1.0E-03	4.4E-04	5.9E-04	0.0E+00	0.0E+00	0.109	0.00
3.00	3.50	0.0E+00	0.0E+00	7.3E-05	2.1E-03	6.5E-03	6.4E-03	5.2E-03	5.4E-03	7.5E-03	5.4E-03	2.6E-03	1.6E-03	1.1E-03	2.2E-04	3.7E-04	7.3E-05	0.0E+00	0.044	0.00
3.50	4.00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.0E-03	1.6E-03	1.9E-03	2.4E-03	3.0E-03	3.2E-03	1.5E-03	8.8E-04	6.6E-04	1.5E-04	1.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	0.016	0.00
4.00	4.50	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	2.9E-04	8.8E-04	1.2E-03	9.6E-04	1.6E-03	1.0E-03	7.3E-04	3.7E-04	7.3E-05	7.3E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.007	0.00
4.50	5.00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.5E-04	5.1E-04	2.9E-04	6.6E-04	5.9E-04	2.9E-04	3.7E-04	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.003	0.00
5.00	5.50	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	7.3E-05	7.3E-05	2.2E-04	7.3E-05	2.9E-04	1.5E-04	7.3E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1E-03	0.00
5.50	6.00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	7.3E-05	0.0E+00	7.3E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1E-04	0.00
6.00	6.50	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1E-04	0.00
6.50	7.00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0	0.00
Ocorr. Tp1		7E-05	0.018	0.097	0.171	0.19	0.142	0.099	0.089	0.087	0.058	0.026	0.012	0.007	0.003	0.003	1E-04	0	1	
% Tp1		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		

Para entrada do número de ocorrências de mares aleatórios foi criado mais um arquivo de entrada. A quantidade de estados de mar por cada direção foi obtida através da aplicação dos percentuais de cada uma das 4 direções apresentadas na Figura 5.2.

## 6. RESULTADOS

Conforme mencionado anteriormente no presente, estudo o objetivo final de uma análise de fadiga é a determinação da vida à fadiga da estrutura. Neste capítulo serão apresentados os resultados das análises de fadiga espectral para a plataforma fixa modelada.

### 6.1 RESULTADO DA ANÁLISE ESPECTRAL

As figuras abaixo apresentam as quatro faces da jaqueta. Acima de cada membro encontram-se suas respectivas vidas obtidas a partir da análise espectral.

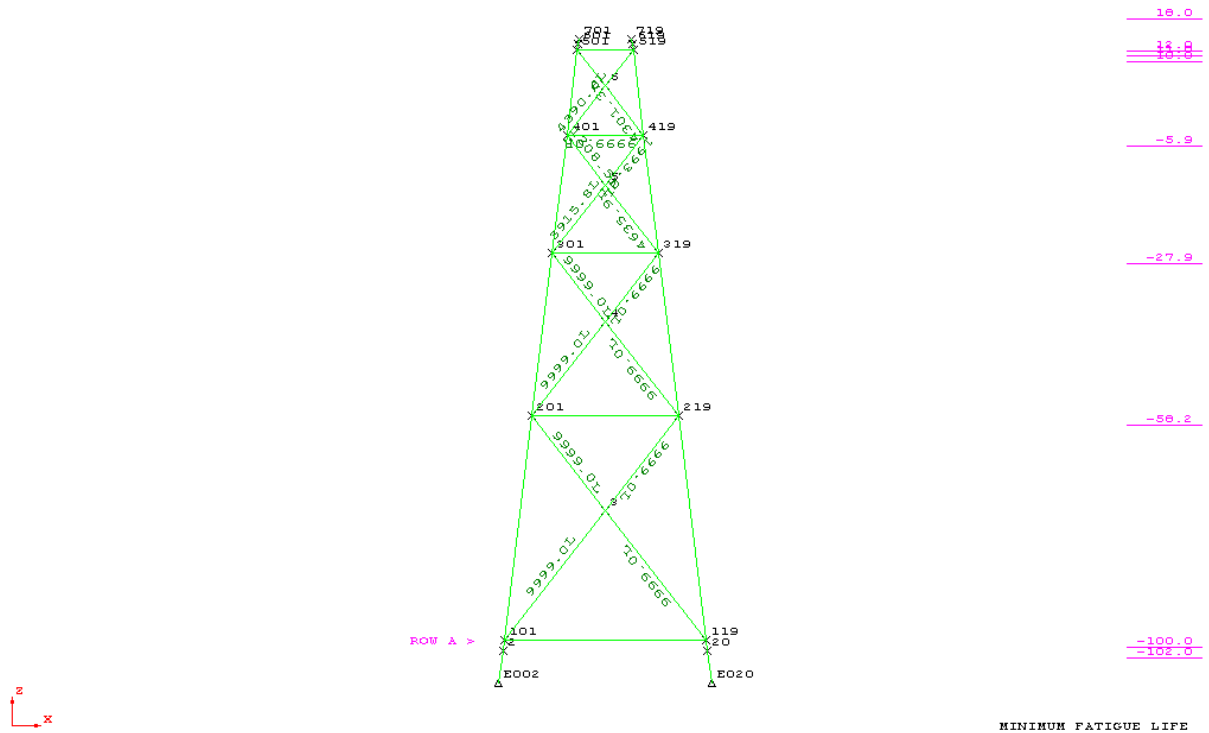


Figura 6.1 – Resultados das vidas à fadiga da análise espectral para os membros da Face A.

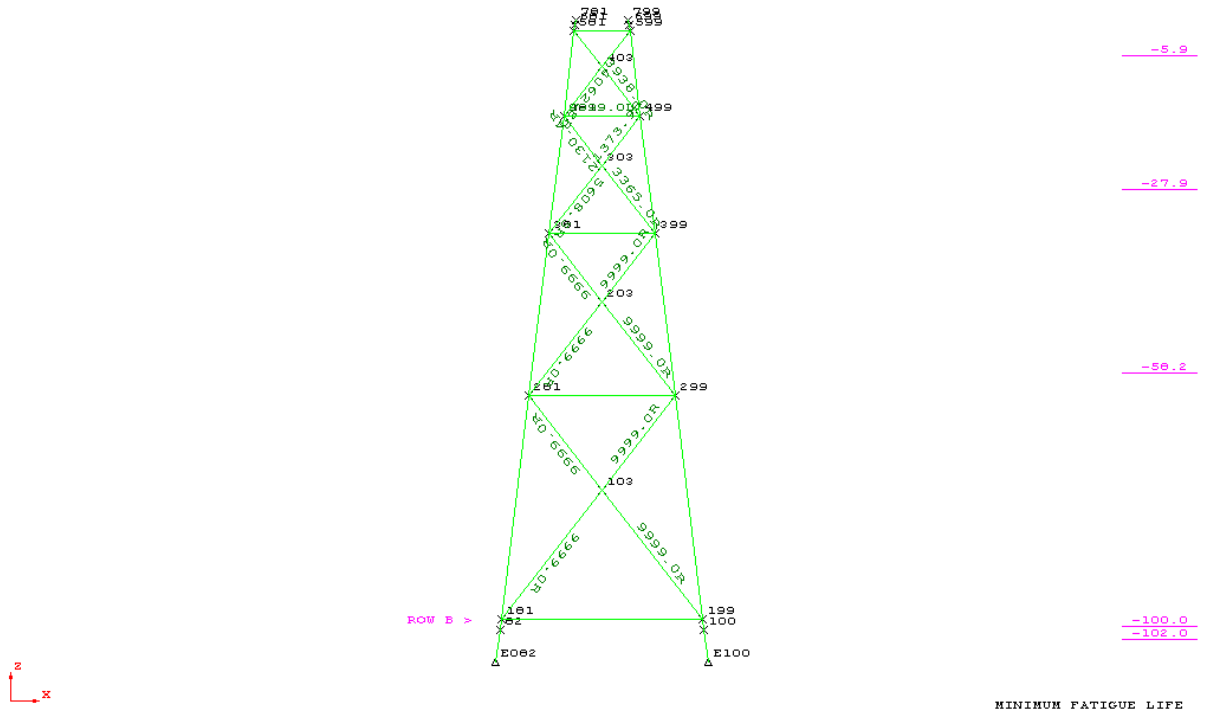


Figura 6.2 – Resultados das vidas à fadiga da análise espectral para os membros da Face B.

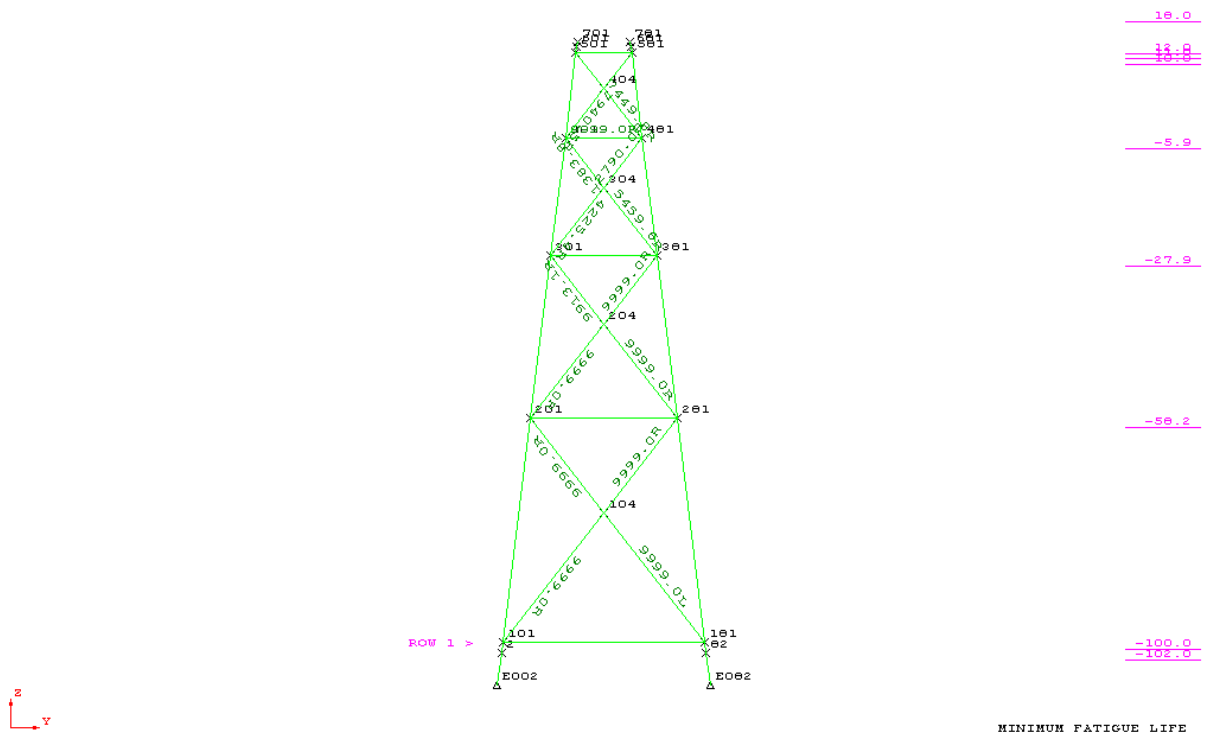
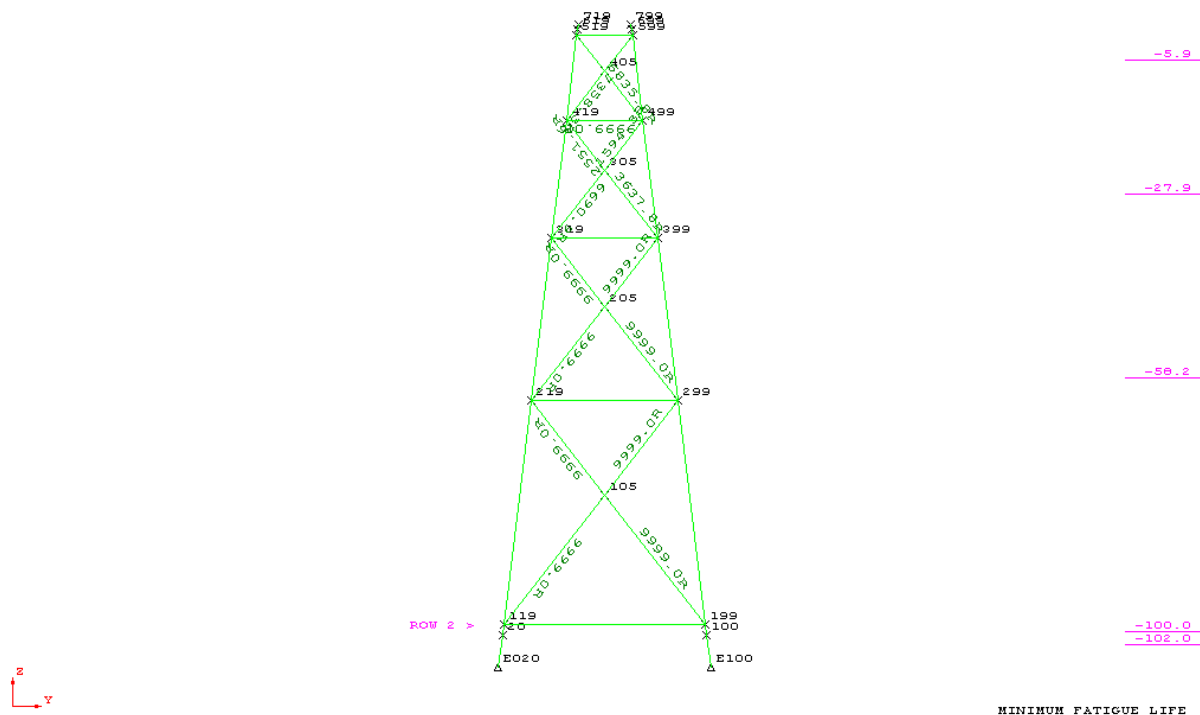


Figura 6.3 – Resultados das vidas à fadiga da análise espectral para os membros da Face 1.





**Figura 6.4** – Resultados das vidas à fadiga da análise espectral para os membros da Face 2.

Como as figuras anteriores são pouco visíveis os principais resultados são apresentados na tabela a seguir.

**Tabela 6.1** – Vidas á fadiga obtidas na análise espectral.

Articulação	Membro	Vida à Fadiga (ANOS)	Localização
		Espectral	
401	401-404	7940,527	FACE 1
481	481-404	7449,778	FACE 1
501	501-404	1,00E+05	FACE 1
581	581-404	1,00E+05	FACE 1
419	419-405	7358,308	FACE 2
499	499-405	6835,819	FACE 2
519	519-405	1,00E+05	FACE 2
599	599-405	1,00E+05	FACE 2
401	6-401	4390,648	FACE A
419	6-419	1,00E+05	FACE A
501	6-501	1,00E+05	FACE A
519	6-519	1,00E+05	FACE A
481	481-403	4062,812	FACE B
499	499-403	3937,987	FACE B
581	581-403	1,00E+05	FACE B
599	599-403	1,00E+05	FACE B

### 6.1.1 CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS

A análise espectral considera que todas as ondas possuem uma declividade constante no valor de 30, o que não é verdade. A declividade da onda é definida pela razão entre o comprimento e a altura da onda. O comprimento de onda é obtido a partir da teoria da onda adequada. Para determinação dos comprimentos de onda foi utilizada a equação da dispersão, apresentada abaixo.

$$\omega^2 = g.k.\tanh(k.z) \quad (\text{Eq. 6.1})$$

Onde:

- $\omega$ : Comprimento da onda;
- $g$ : Aceleração da gravidade;
- $z$ : Lâmina d'água;
- $k$ : Número de onda;

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{Eq. 6.2})$$

Onde:

- $\lambda$ : Comprimento da onda.

Sendo o parâmetro  $k$  obtido através de métodos iterativos de obtenção de zero de funções.

Para comprovar as diferenças entre as declividades verdadeiras e a que foi utilizada na análise foi desenvolvida a Tabela 6.2. Como pode ser verificado, a declividade varia muito, fazendo com que o erro relativo varie de valores próximos de zero (altura de onda de 5,75m e período de 10,50 segundos) a valores superiores a 60 (altura de onda de 0,25m e período de 19,50 segundos).

Em uma análise de fadiga espectral, a função de transferência, da qual saem todas as forças de onda, parte da premissa de que a força de onda varia linearmente com a altura da mesma. Ocorre, contudo, que isso não é verdade pelo que se calcula a função de transferência considerando a altura de onda mais provável para cada período, dividindo, posteriormente, o valor encontrado pela altura de onda de modo a reduzir o erro da ordenada desta função com a onda de altura unitária. Isso introduz na função de transferência boa parte da parcela não linear, mas ainda mantém o erro associado ao fato de todos os cálculos serem feitos com ondas de mesma declividade. Obviamente a integração desta função com espectros de ondas com outras declividades inclui um erro que precisa ser medido.



**Tabela 6.3** – Declividade utilizada no SACS para análise espectral gerado pela função de transferência.

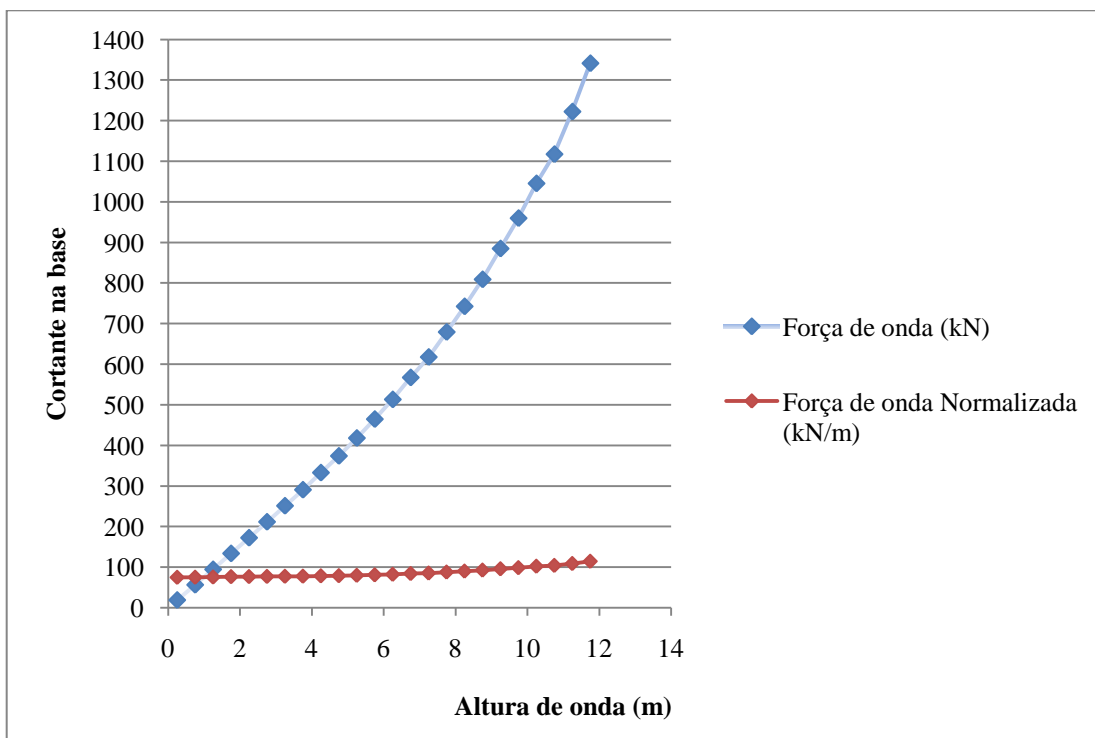
<b>Altura de onda (H) (m)</b>	<b>Comprimento de onda (<math>\lambda</math>) (m)</b>	<b>Declividade (<math>\lambda/H</math>)</b>
16.002	493.011	30.8
11.057	340.201	30.8
8.568	263.771	30.8
5.147	158.516	30.8
2.897	89.166	30.8
2.524	77.673	30.8
1.854	57.066	30.8
1.288	39.019	30.3
1.090	33.026	30.3
0.744	22.538	30.3
0.464	14.047	30.3

Com o intuito de verificar a influência de tais erros, procurou-se elaborar um gráfico de cortante estático na base versus altura de onda, para um determinado período de onda constante. Se a influência da altura de onda fosse pequena nas análises, este gráfico se aproximaria de uma reta e a abordagem utilizada, de declividade constante, não incorreria em erros. Como pode ser observado na Figura 6.5, o cortante na base apresenta uma tendência de crescimento exponencial de acordo com o aumento da altura da onda e estes elementos, quando são normalizados (divididos pela altura), continuam apresentando uma tendência de crescimento, o que não deveria ser observado para um resultado onde a influência da declividade fosse pequena.

Como pode ser verificado na Tabela 6.4 ondas de 0,25 m de altura geram um cortante na base de 18,67 kN e ondas de 11,75 m geram um cortante de 1341,28 kN. Quando o cortante na base é normalizado (dividido pela altura) temos uma diferença de 53% entre a primeira e última altura de onda.

**Tabela 6.4** – Variação de cortantes na base de acordo com a altura de onda utilizada na análise determinística.

ALTURA ONDA (m)	DECLIVIDADE $\lambda/H$ (m/m)	CORTANTE NA BASE (kN)	FORÇA DE ONDA NORMALIZADA (kN/m)
0,25	624,31	18,67	74,68
0,75	208,10	56,20	74,93
1,25	124,86	94,23	75,38
1,75	89,88	133,56	76,32
2,25	69,91	172,14	76,50
2,75	57,20	211,35	76,85
3,25	48,40	250,93	77,21
3,75	41,95	290,45	77,45
4,25	37,23	332,66	78,27
4,75	33,37	373,79	78,69
5,25	30,14	417,83	79,59
5,75	27,57	464,45	80,77
6,25	25,36	512,95	82,07
6,75	23,66	567,09	84,01
7,25	22,03	617,49	85,17
7,75	20,77	679,15	87,63
8,25	19,51	742,26	89,97
8,75	18,39	808,82	92,44
9,25	17,53	884,75	95,65
9,75	16,63	959,63	98,42
10,25	15,94	1045,25	101,98
10,75	15,20	1117,31	103,94
11,25	14,52	1222,21	108,64
11,75	13,99	1341,28	114,15



**Figura 6.5** – Cortante na base versus altura de onda.

## 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Muitas falhas de estruturas *offshore* são atribuídas ao fenômeno de fadiga principalmente em juntas soldadas devido a fatores que induzem altas tensões.

As principais causas de falhas por fadiga em plataformas *offshore* são os carregamentos de onda que possuem comportamento cíclico por natureza. As falhas por fadiga podem ocorrer até mesmo sob condições abaixo das condições de operação, sem qualquer aviso prévio, por acumulação de danos devido à ação de ondas de pequeno e médio porte. Sendo assim, o desempenho à fadiga é de primordial importância para o funcionamento seguro e integridade das estruturas *offshore*.

A análise de fadiga envolve a determinação das tensões nos elementos estruturais, os valores dos Fatores de Concentração de Tensão nas juntas tubulares críticas e o número seguro de ciclo de tensões que os nós podem suportar antes da falha.

Os dois métodos para realização da análise de fadiga que são discutidos ao longo deste trabalho são:

- Análise de onda discreta ou análise determinística;
- Análise espectral.

As análises de fadiga de uma plataforma do tipo fixa foram desenvolvidas com o auxílio do programa SACS (*Structural Analysis Computer System*).

O método determinístico é caracterizado pela avaliação dos danos considerando a ação de ondas discretas com períodos determinados incidindo na estrutura, enquanto o método espectral é caracterizado pela geração de espectro de respostas, fazendo uso de um espectro de energia dos estados de mar e funções de transferência da plataforma; após a obtenção destes espectros de resposta, tratamentos estatísticos são ministrados para a quantificação dos danos parciais e conseqüentemente, danos totais e vida a fadiga.

Para a execução da análise foi modelada uma plataforma fixa, com vida útil de projeto prevista de 30 anos. No modelo foi considerado que as estacas foram cravadas por dentro das pernas da jaqueta. Foi assumido que a plataforma encontra-se localizada em uma lâmina d'água de 100 m em uma região similar a costa do estado do Rio de Janeiro. Sendo assim foram utilizados dados meteoceanográficos similares aos dados encontrados nesta região. Foi desenvolvida uma análise de fadiga espectral.

A análise considerou a simplificação que ondas de direções opostas causariam a mesma variação de tensão, reduzindo as direções cardiais de 8 para 4.

O dano provocado pelas diversas ondas atuantes na plataforma é acumulado, seguindo a Regra de Miner e a vida útil da plataforma é obtida a partir da inversão do valor do dano observado.

No capítulo 6 foram apresentados os resultados de vida à fadiga para a plataforma para o método espectral, apresentados nas Figuras 6.1 a 6.4.

A principal conclusão observada ao longo deste estudo é que a abordagem adotada incorre em erros, pois a declividade real das ondas não é considerada no processo. Algumas sugestões são apresentadas abaixo para que fosse diminuído o erro na análise de fadiga deste grupo específico de estruturas *offshore*:

1. Um estudo que considere a declividade das ondas na geração das funções de transferência;
2. Análise de fadiga utilizando outras metodologias como o método de geração de ondas irregulares com posterior contagem de ciclos (ou *Rainflow*),

aplicado ao nosso estudo de caso. Entende-se, contudo, que a análise determinística e a análise tipo *Rainflow* são idênticas quando se considera o uso de ondas regulares. Neste caso está sendo advogada a realização de análises tipo *Time History* para os espectros Hs,Tz providos para a análise espectral, que receberiam então a seguir um tratamento do tipo *Rainflow*.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]DOVER, W.D. & MADHAVA RAO, A.G., “*Fatigue in offshore Structures* Vol. 1”. 1 ed. A.A Balkema Publisher, 1996;
- [2][http://members.tele2.nl/the\\_sims/rig/alk.htm](http://members.tele2.nl/the_sims/rig/alk.htm), 30 de Janeiro de 2010;
- [3]ELLWANGER, G.B., “Tecnologias de exploração de petróleo”, Apostila cursos de Mestrado e doutorado PEC – COPPE – UFRJ – 2009;
- [4] API RP 2A WSD – Recommended Practice for Planning, Designing and Construction Fixed Offshore Platforms, Dezembro 2000;
- [5]GALGOUL, N.S., “Fatigue Analysis of Offshore Fixed and Floating Structures”, 2007;
- [6]ANSI/AWSD1.1-92 – Structural welding Code – Steel, 1992;
- [7]DNV – RP – C203 - Fatigue design of offshore steel structures, Abril 2008;
- [8]CHAKRABARTI, S.K., “Handbook of Offshore Engineering Vol. 1”. 1 ed. Elsevier, 2005;
- [9]CHAKRABARTI, S.K., “Handbook of Offshore Engineering Vol. 2”. 1 ed. Elsevier, 2005;
- [10] SACS Fatigue Manual – Versão 5.2 – Service Pack 3 Engineering Dynamics, Inc. \_ Kenner, Louisiana, U.S.A, 2005 ;
- [11] RIVA, I.R., “Análise de fadiga em estruturas metálicas com ênfase em offshore”, Projeto final de conclusão de curso, UFRJ – 2004;
- [12] LEWIS, C., “UGM 2008 – Fatigue Analysis”, ORCINA, Dezembro 2008;