



VERIFICAÇÃO À FADIGA POR ANÁLISE ESTÁTICA E DINÂMICA DE UMA ESTRUTURA OFFSHORE

Alexandra Silva Franz

alexandrasfranz@yahoo.com.br

Paulo Batista Gonçalves

paulo@puc-rio.br

Deane Roehl

droehl@puc-rio.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio

Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea, 22451-900, RJ, Rio de Janeiro, Brasil

Resumo. *Este trabalho tem por finalidade estudar o comportamento de torres metálicas usadas em estruturas offshore na presença de cargas dinâmicas. Para isto considera-se uma torre de flare, presente em estruturas offshore e indústrias petroquímicas e refinarias. O estudo de caso analisa uma estrutura topside, componente de uma unidade flutuante de produção. Este estudo é realizado através de uma análise pseudo-estática e através de uma análise dinâmica, considerando as excitações na base da torre advindas do movimento da embarcação. Estes movimentos são gerados por ondas que incidem sobre a embarcação, sendo os mais importantes os movimentos de heave, roll e pitch do navio. Com base nos resultados, verifica-se a fadiga para sistemas reticulados offshore submetidos à incidência de carregamentos de natureza cíclica. Para este estudo, um modelo numérico em elementos finitos é desenvolvido considerando-se os principais carregamentos relevantes ao projeto do sistema estrutural. Por fim, apresenta-se uma metodologia que possibilita a avaliação da vida útil à fadiga de juntas críticas da torre, através de duas metodologias de avaliação: pseudo-estática e dinâmica, ambas considerando os mesmos parâmetros, porém com diferentes considerações de modelagem. Os resultados encontrados com base nas duas metodologias mostram uma grande diferença na estimativa da vida útil da estrutura.*

Palavras-chave: Fadiga, Análise pseudo-estática, Dinâmica, Vibrações de torres, Offshore.

1 INTRODUÇÃO

As estruturas *offshore* são submetidas a efeitos ambientais aleatórios de natureza dinâmica e cíclica, que podem levá-las a grandes oscilações, elevadas concentrações de esforços e tensões com possível aparecimento de trincas em seus componentes.

Diante deste cenário, o efeito da fadiga se faz presente e é uma das principais causas de colapso estrutural. Uma correta inspeção e avaliação do dano são importantes para garantir a integridade da instalação ao longo do tempo.

Este trabalho tem como objetivo apresentar o comportamento de uma estrutura *offshore* submetida a condições de operação da plataforma sob a influência de carregamentos permanentes estáticos e carregamentos ambientais de natureza cíclica. A estrutura escolhida é a torre de um *flare*, responsável pela queima de gases não produtivos ou em excesso na planta de processo da unidade, tornando-se um item de segurança indispensável nestas instalações.

Por sua complexidade, a fadiga em elementos estruturais ainda é um tema sob investigação no meio acadêmico. Em termos do projeto de estruturas metálicas o assunto ainda é de pouco domínio para parte dos engenheiros calculistas. Um grande volume de informação sobre a aplicação de métodos de análise para avaliação e verificação estrutural resistente à fadiga é disponibilizado em diferentes publicações e bibliografia, porém alguns conceitos por estarem dispersos, ainda geram dúvidas durante a execução da análise.

Uma metodologia de avaliação pseudo-estática e outra dinâmica são desenvolvidas neste trabalho para avaliação da fadiga de juntas de estruturas reticuladas sujeitas a carregamentos estáticos permanentes e a carregamentos dinâmicos. Os carregamentos variáveis no tempo são simulados nas duas metodologias de acordo com os movimentos da embarcação. Considera-se somente a ação dinâmica das ondas do mar, não sendo avaliada a influência da ação do vento sobre a estrutura.

Um estudo de caso é apresentado no qual são identificadas algumas regiões críticas em termos de ciclos de tensão na estrutura. Para essas regiões apresenta-se a avaliação tanto do dano acumulado como de sua vida útil.

2 FADIGA EM ESTRUTURAS OFFSHORE

A fadiga representa uma falha gerada pelos efeitos de carregamentos cíclicos atuantes, que se não avaliados criteriosamente podem levar um elemento estrutural à fratura e por vezes ao colapso global do sistema estrutural.

Uma estrutura submetida a cargas variáveis no tempo, de natureza cíclica, tende a apresentar um comportamento diferenciado do seu comportamento quando submetida a cargas estáticas. Essa diferença é caracterizada pela perda de resistência e de ductilidade, introduzindo incertezas quanto à sua eficiência e vida útil de serviço. Estes efeitos, mesmo que de baixa intensidade, geram tensões cíclicas que ao longo do tempo acumulam danos que podem causar a fratura por fadiga do material.

O processo físico da fadiga é baseado em duas fases principais: iniciação da trinca e propagação da trinca.

Sob a ação das cargas cíclicas, as microtrincas são formadas como defeitos que estão presentes nas áreas de concentração de tensões. As fissuras geralmente progridem e juntam-se a uma fissura dominante e propagam-se por toda a seção do elemento carregado até que a seção transversal remanescente seja insuficiente para transmitir a carga, resultando na fratura do componente.

Plataformas *offshore*, e em especial as plataformas flutuantes (FPSO), por estarem submetidas a carregamentos cíclicos são diretamente sujeitas a falhas pelo efeito da fadiga. Como na maior parte das plataformas *offshore* estão presentes elementos estruturais constituídos por perfis tubulares dando origem a conexões soldadas complexas, consideradas regiões com altas concentrações de tensões, uma avaliação criteriosa deve ser realizada para a determinação do dano gerado.

Neste trabalho é abordada a análise baseada no método S-N, através das curvas de Wöhler, que trabalham com uma avaliação de tensões no regime linear elástico. Esse método só deve ser aplicado quando as máximas tensões atuantes nos pontos críticos da estrutura forem menores que os valores das tensões de escoamento do material utilizado.

O objetivo da análise à fadiga é, inicialmente, calcular o dano gerado pelos efeitos cíclicos causados nos pontos críticos das estruturas e com esse valor encontrado garantir que todos os elementos estruturais que a compõem tenham uma vida útil adequada.

A DNV-RP-C203, publicada pela classificadora Det Norske Veritas, é atualmente bastante utilizada nos projetos nacionais. Essa norma aborda o dimensionamento à fadiga pelo método determinístico com emprego das curvas de Wöhler (curvas S-N).

A avaliação da fadiga pelo método determinístico, de uma estrutura *offshore*, envolve os seguintes passos:

1. Definição de um modelo global com a geometria, rigidez e seus elementos estruturais devidamente avaliados e aptos a resistir à condição de operação da plataforma;
2. Definição das conexões a serem estudadas;
3. Classificação das conexões, pelas suas características geométricas e pelas tensões dominantes atuantes, para obter os seguintes parâmetros de entrada: curva S-N, fatores de concentração de tensões (SCF), parâmetros de Weibull, fatores de segurança;

Caso a conexão não se enquadre nos casos padrão apresentados pela norma, um modelo em elementos finitos da conexão deve ser elaborado.

4. Obtenção das tensões nominais críticas atuantes em cada grupo de conexões;
5. Estabelecer as tensões de *hot spot* para as juntas avaliadas;
6. Comparação dos valores atuantes obtidos do modelo estrutural com os valores considerados admissíveis pela classificação da conexão pelos critérios definidos pela norma;
7. Verificação do dano total à fadiga acumulado na conexão;
8. Definição da vida útil da estrutura.

3 ESTUDO DE CASO

As características físicas e geométricas, assim como as informações dos carregamentos adotados e os demais parâmetros utilizados nas análises realizadas neste trabalho para uma estrutura metálica hipotética da torre de um *flare*, são apresentadas a seguir.

As características geométricas consideradas para a plataforma flutuante são:

- Comprimento longitudinal total $\Delta X = 320$ metros
- Largura transversal $\Delta Y = 55$ metros
- Profundidade $\Delta Z = 35$ metros

A posição da torre com relação ao centro de movimento da embarcação é ilustrada na fig. 3.1, sendo dada neste plano pelas coordenadas y_0 e z_0 . A distância x_0 é definida do eixo de rotação da embarcação até o C.G da estrutura, ao longo da distância longitudinal do navio. Neste estudo adotam-se os seguintes valores:

- Distância Longitudinal (x_0) = 130.0 metros
- Distância Transversal (y_0) = 9.50 metros
- Distância Vertical (z_0) = 24.50 metros

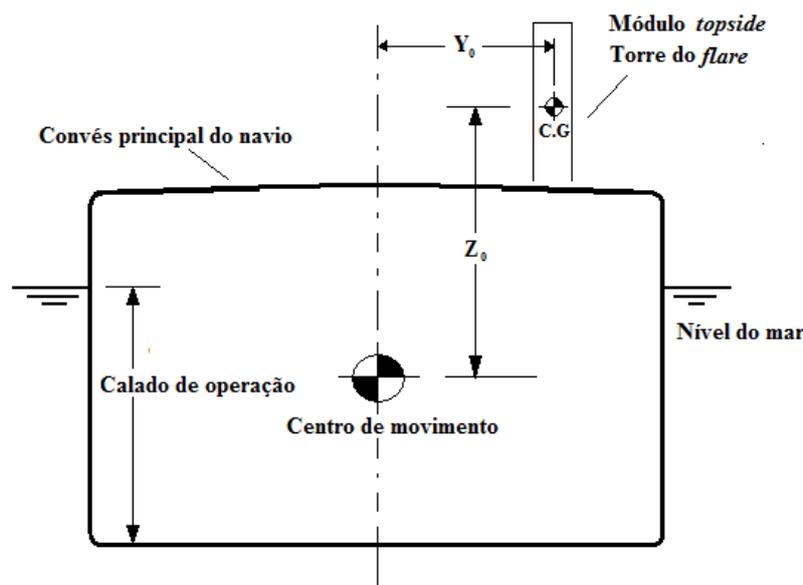


Figura 3.1 – Croqui da locação do centro de movimento da embarcação e da torre do flare

Para a análise global da estrutura um modelo tridimensional é desenvolvido em elementos finitos usando-se elementos de barras. Adotam-se na modelagem elementos de pórtico espacial (*space frame*), onde essas ligações são tratadas como engastadas. Elementos auxiliares também classificados como *dummy members*, são adotados com a finalidade de auxiliar no lançamento de alguns carregamentos. Para esta simulação é utilizado o programa *GTStrudl* (*Georgia Technology Research Corporation*). Nas figuras 3.2 e 3.3 são apresentadas as vistas da torre com suas características geométricas e os perfis adotados na modelagem.

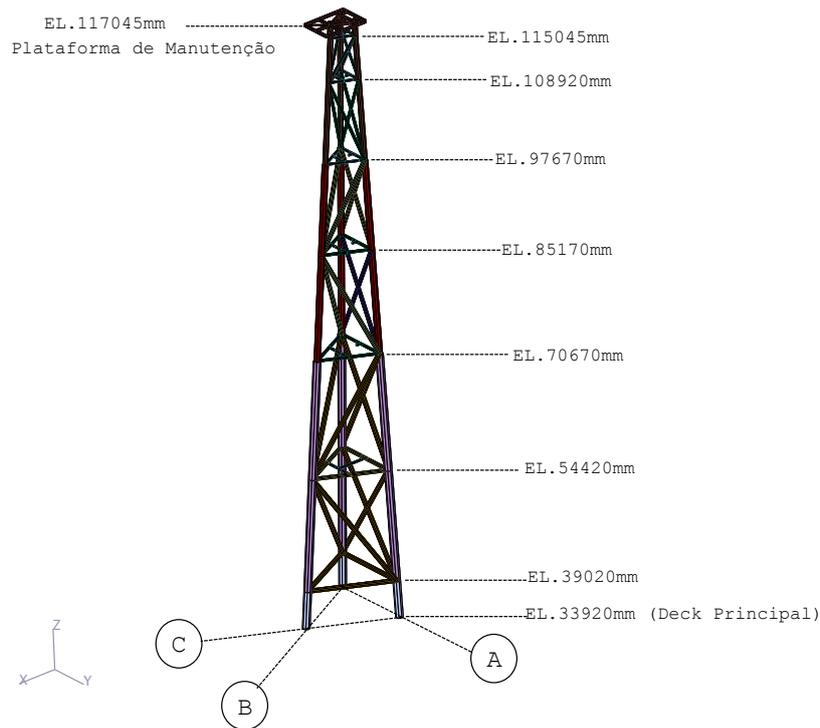


Figura 3.2 – Estrutura da torre – isométrico

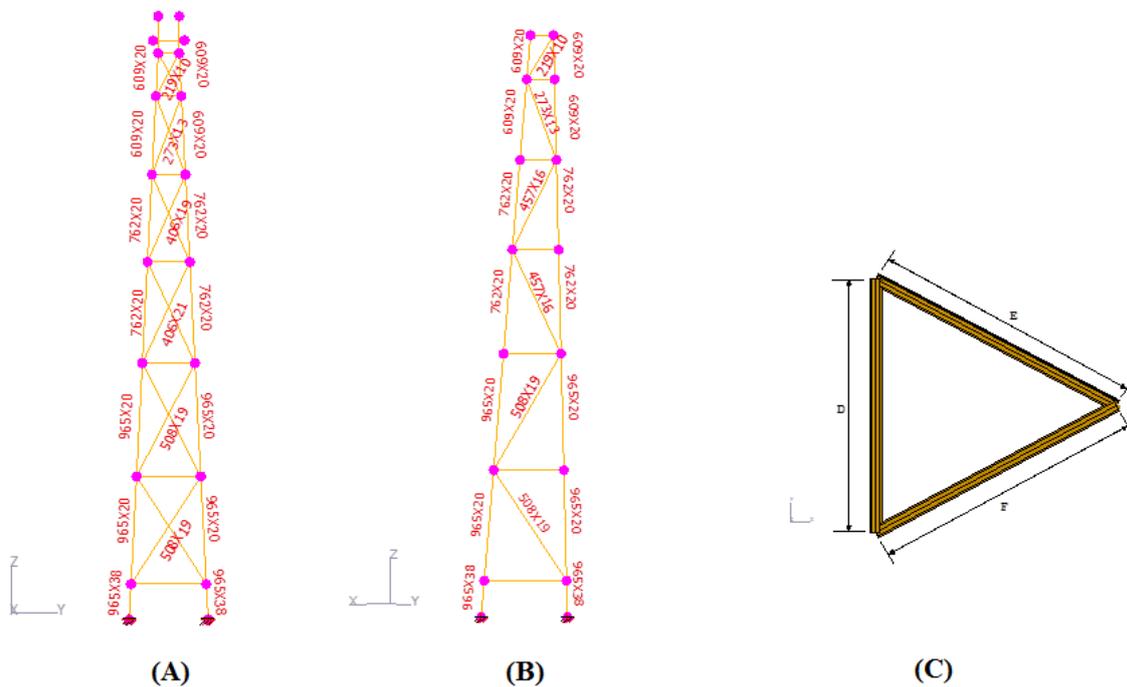


Figura 3.3 – (A) Eixo A – Perfis; (B) Eixos B e C – Perfis; (C) Elevações da torre – Geometria

O material considerado para os elementos estruturais da torre do *flare* é o aço carbono, enquanto os elementos acima da elevação EL.116045mm são em aço inoxidável. As considerações referentes à fluência devido as elevadas temperaturas também são incorporadas como alteração nas propriedades dos materiais sujeitos a estes efeitos. A tabela 3.3 apresenta as características dos materiais adotados.

Tabela 3.1 – Valores das dimensões e perfis por elevação da torre

Elevação (mm)	D (mm)	E (mm)	F (mm)	Perfil
39020	10752	11450	11450	TUB 508x19
54420	9182	9779	9779	TUB 406x19
70670	7525	8014	8014	TUB 273x13
85170	6046	6440	6440	TUB 273x13
97670	4772	5082	5082	TUB 219x10
108920	3625	3860	3860	TUB 219x10
115045	3000	3195	3195	TUB 219x10

Tabela 3.2 – Materiais considerados no modelo numérico

MATERIAL	Descrição	E (kN/cm ²)	Densidade (kN/cm ³)
STEEL	Aço Carbono	20000	7.69 x 10 ⁻⁵
MAT2	Efeito da Temperatura	17500	7.69 x 10 ⁻⁵
MAT3	Aço Inoxidável	18800	8.00 x 10 ⁻⁵
MAT4	Dummy Members	20000	Zero

A fig. 3.4 mostra através de uma escala de cores os diversos materiais usados na modelagem numérica.

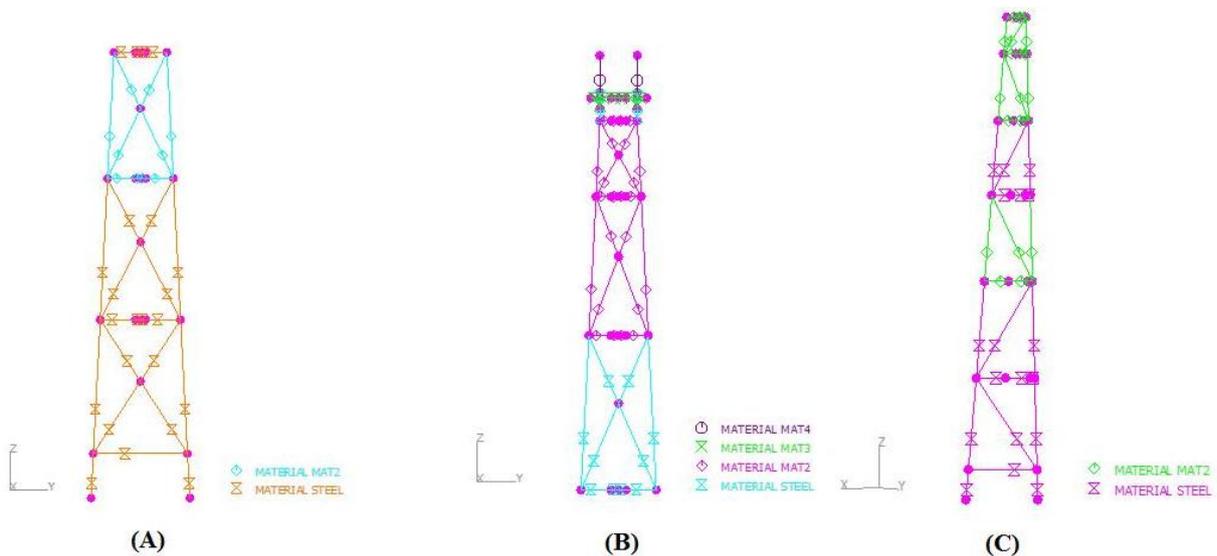


Figura 3.4 – (A) Eixo A – EL.39020mm a EL.85170mm; (B) Eixo A – EL.85170mm a EL.117045mm; (C) Eixos B e C

4 ANÁLISE DE MOVIMENTOS

Na engenharia *offshore*, os movimentos da embarcação ocorrem quando as estruturas estão submetidas à ação de carregamentos dinâmicos como ondas e correntes. O estudo das vibrações é importante, visto que, seus efeitos apresentam uma série de impactos sobre a embarcação, afetando desde o conforto da tripulação até a ocorrência de possíveis avarias estruturais, prejudicando significativamente sua operacionalidade.

O navio FPSO apresenta um comportamento de corpo rígido ao ser excitado pelas ondas do mar. Sendo assim, a unidade flutuante pode apresentar seis tipos de movimentos oscilatórios diferentes. Esses efeitos são divididos em três movimentos translacionais e três rotacionais, definidos em função dos eixos locais da embarcação na fig. 4.1.

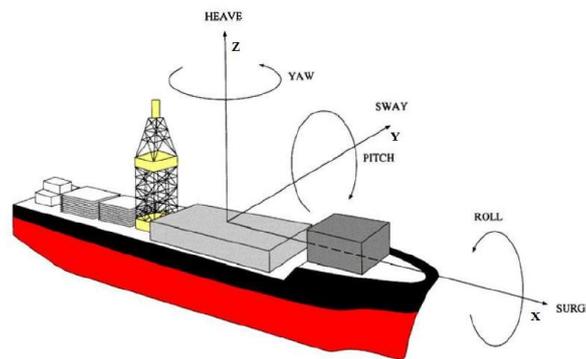


Figura 4.1 – Movimentos de uma embarcação FPSO (Filho, 2008, p.21)

Segundo Bhattacharyya (1978), para navios e unidades flutuantes em geral, apenas três tipos de movimento, *heave*, *roll* e *pitch*, são considerados puramente oscilatórios, uma vez que estes atuam sob uma força de restauração quando o navio é perturbado a partir de sua posição de equilíbrio. Nos casos dos movimentos de *surge*, *sway* e *yaw*, o navio retorna à sua posição de equilíbrio desde que forças ou momentos de excitação contrária aos efeitos da perturbação inicial ocorram.

Apesar da unidade flutuante ser submetida à atuação simultânea dos efeitos referentes aos seis movimentos mencionados, nesta simulação, para melhor compreensão do efeito do movimento do navio (magnitude e frequência) na estrutura da torre do *flare* consideram-se os movimentos desacoplados. Para rotações com ângulos de pequena amplitude (análise linear) pode-se usar a superposição de efeitos.

4.1 Coeficientes de aceleração

Para entender o efeito dos deslocamentos de base sobre a torre, considera-se, de forma simplificada, uma massa concentrada na extremidade do sistema estrutural, de forma a tornar mais simples o cálculo das cargas inerciais. As acelerações e forças obtidas destas análises são utilizadas junto aos carregamentos aplicados no modelo global da estrutura, para a análise estática e como dados de entrada dos carregamentos para a análise dinâmica.

Para um sistema estrutural simplificado, apresentado na fig. 4.2 (A), considera-se um deslocamento translacional arbitrário, onde:

- X_g – Representa o deslocamento de corpo rígido do sistema estrutural (deslocamento de base);

- X_E – Representa o deslocamento elástico do sistema estrutural responsável pelas forças elásticas e de amortecimento.

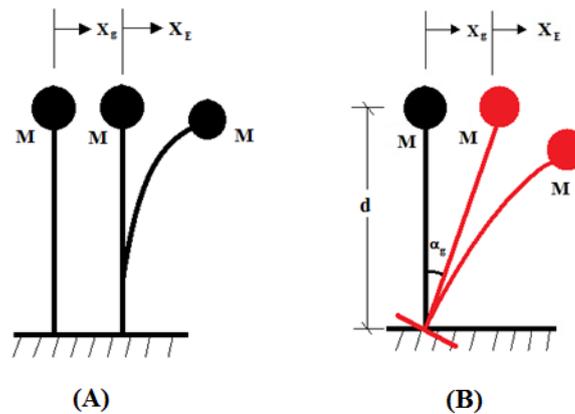


Figura 4.2 – Esquema estrutural simplificado – (A) Efeitos translacionais; (B) Efeitos rotacionais

Pelas equações de movimentos, tem-se:

$$M \ddot{X}_E + C \dot{X}_E + K X_E = -M \ddot{X}_g \quad (4.1)$$

Considerando-se um movimento de base harmônico:

$$X_g(t) = X_g \text{ sen } \omega t \quad (4.2)$$

onde X_g é a magnitude do deslocamento e ω , a frequência angular.

Derivando a eq. (4.2) duas vezes no tempo:

$$\ddot{X}_g = -\omega^2 X_g \text{ sen } \omega t \quad (4.3)$$

Com isto, tem-se que a magnitude da força inercial devida ao deslocamento de base é igual a:

$$F = M \omega^2 X_g \quad (4.4)$$

Os valores dos deslocamentos adotados para a base da torre são função da posição do centro de movimentos da embarcação e do ângulo de incidência das ondas, de sua altura e de sua frequência.

Correspondente a essa mesma condição, é obtido um coeficiente de aceleração translacional, para a análise estática, em função da gravidade, igual a:

$$a_T(g) = \frac{F}{M g} \quad (4.5)$$

As considerações apresentadas neste item são aplicáveis às condições de movimentos translacionais, *heave*, *surge* e *sway* da unidade flutuante.

Para o mesmo sistema estrutural simplificado, considera-se um deslocamento rotacional arbitrário α_g , em torno do eixo longitudinal da embarcação, onde d é a distância do centro de movimento ao centro de gravidade do sistema.

Pela fig. 4.2 (B), para pequenos ângulos $tg \alpha_g \cong \alpha_g$, tem-se:

$$X_g = \alpha_g d \quad (4.6)$$

De uma forma análoga ao movimento translacional tem-se para o movimento rotacional, em função do tempo, que:

$$X_g(t) = X_g \text{ sen } \omega t \quad (4.7)$$

Derivando a eq. (4.7) duas vezes no tempo, chega-se à aceleração e à equação de movimento:

$$\ddot{X}_g = -\omega^2 (\alpha_g d) \text{ sen } \omega t \quad (4.8)$$

$$M \ddot{X}_E + C \dot{X}_E + K X_E = -M (-\omega^2 \alpha_g d) \text{ sen } \omega t \quad (4.9)$$

O carregamento dinâmico aplicado no modelo numérico, para a simulação do efeito de rotação na estrutura, é representado por uma força nodal, denominada *joint load*. Este carregamento é da forma:

$$F(t) = A_R \text{ sen } (\omega t + \phi) \quad (4.10)$$

onde A_R é a magnitude do carregamento dada por:

$$A_R = M \omega^2 \alpha_g d \quad (4.11)$$

Segundo Bhattacharyya (1978), a força tangencial para um movimento de *roll* pode ser decomposta em uma parcela horizontal e outra vertical, chamadas de T_{RH} e T_{RV} , respectivamente, conforme mostrado na fig. 4.3.

Na fig. 4.3 as distâncias y_0 e z_0 são as distâncias horizontais e verticais, respectivamente, do posicionamento da massa M até o centro de rotação. Com isso, tem-se que:

$$T_{RV} = M \omega^2 \alpha_g y_0 = M \omega^2 \alpha_g (r \cos \beta) \quad (4.12)$$

$$T_{RH} = M \omega^2 \alpha_g z_0 = M \omega^2 \alpha_g (r \text{ sen } \beta) \quad (4.13)$$

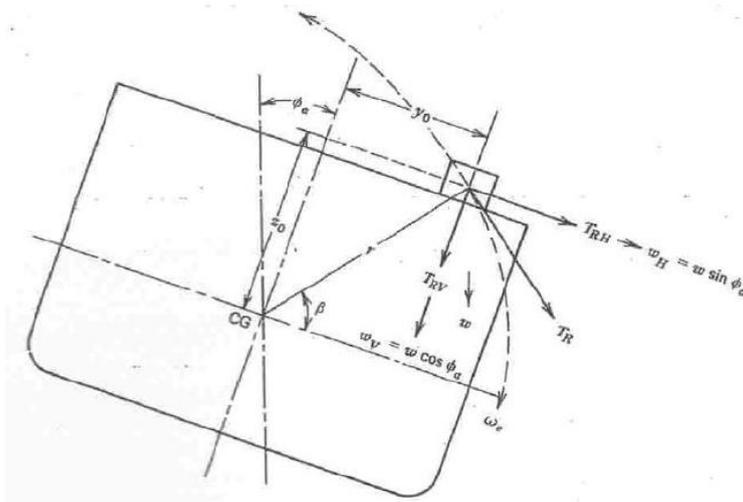


Figura 4.3 – Movimento de rotação *roll* – Forças tangenciais (Bhattacharyya, 1978, p.242)

Sendo assim, correspondente à condição apresentada anteriormente, são obtidos os coeficientes de aceleração rotacional vertical e horizontal em função da gravidade, iguais a:

$$a_{RV}(g) = \frac{T_{RV}}{Mg} \quad (4.14)$$

$$a_{RH}(g) = \frac{T_{RH}}{Mg} \quad (4.15)$$

As considerações apresentadas neste item são aplicáveis às condições de movimentos rotacionais, *pitch* e *yaw*, da unidade flutuante.

5 SIMULAÇÃO ESTÁTICA EQUIVALENTE

Nesta análise todos os carregamentos são considerados constantes, ou seja, não variam com o tempo. Por ser uma análise que considera o efeito dos carregamentos dinâmicos sobre a estrutura é denominada como uma análise estática equivalente ou pseudo-estática. Sendo assim, para fins de simulação desses efeitos dinâmicos, todos os carregamentos assumidos como permanentes na estrutura são lançados no modelo nas duas direções horizontais, além da direção vertical usualmente adotada nas análises estáticas convencionais. Esta hipótese é feita para simular que, ao ocorrerem os movimentos oscilatórios da embarcação devido à incidência das ondas, as cargas inerciais referentes aos componentes da estrutura sejam indiretamente avaliadas. Os efeitos das ondas do mar são simulados através de coeficientes de aceleração resultantes de uma avaliação prévia, da ação do mar sobre o navio FPSO em que a estrutura está localizada. Esses coeficientes são devidamente combinados com os carregamentos lançados no modelo, simulando os efeitos dinâmicos. Os efeitos relacionados às incidências das ondas são referentes aos movimentos de *heave*, *roll* e *pitch* do navio.

A tabela 5.1 apresenta as informações dos carregamentos estáticos permanentes aplicados na estrutura.

Algumas considerações realizadas para este exemplo são práticas usuais, comuns em projetos *offshore*. Sendo assim os valores dos carregamentos, hipoteticamente utilizados, são adotados baseados nessa experiência.

Tabela 5.1 – Identificação dos carregamentos permanentes adotados

LOAD	Carregamento	LOAD	Carregamento
10	Peso próprio da estrutura - Direção -Z	32	Equipamento - Direção +Y
11	Peso próprio da estrutura - Direção +X	40	Tubulação - Direção -Z
12	Peso próprio da estrutura - Direção +Y	41	Tubulação - Direção +X
20	Peso próprio não modelado - Direção -Z	42	Tubulação - Direção +Y
21	Peso próprio não modelado - Direção +X	50	Heat Shield - Direção -Z
22	Peso próprio não modelado - Direção +Y	51	Heat Shield - Direção +X
30	Equipamento - Direção -Z	52	Heat Shield - Direção +Y
31	Equipamento - Direção +X	-	-

- Peso próprio da estrutura: gerado automaticamente pelo programa. Totaliza uma carga de 1819 kN;
- Peso próprio não modelado: é considerada uma carga de 1.0 kN aplicada a cada metro quadrado, posteriormente distribuída linearmente nos membros das elevações da torre, calculado para a elevação EL.39020mm e replicado, conservadoramente, para as demais elevações. Este carregamento totaliza 291.6kN;
- Equipamento: totaliza 55.42kN;
- Tubulação: carregamento de 0.019kN/cm distribuído nas elevações da torre a partir da EL.54420mm, totalizando 220.9kN;
- Temperatura: representação do efeito da fluência pela alteração do módulo de elasticidade, reduzido para 175GPa, nos elementos submetidos a variações térmicas acima de 250°;
- *Heat shield*: carregamento de 0.0164kN/cm distribuído nas colunas da torre, entre as elevações EL.85170mm e EL.116045mm, representando todos os elementos constituintes do sistema de proteção *heat shield*, não modelados, totalizando 172kN.

As acelerações dos efeitos dinâmicos são inicialmente definidas por valores unitários, impostos no centro de movimentos da embarcação. Os coeficientes de aceleração unitários resultantes, adotados para representar os efeitos dinâmicos da embarcação, são apresentados na tabela 5.2

Tabela 5.2 – Coeficientes de aceleração unitária

Condição de projeto	Movimento FPSO	C.G. da torre do <i>flare</i>		
		a_x (g)	a_y (g)	a_z (g)
OPERAÇÃO	<i>Heave</i>	-	-	0.102
	<i>Roll</i>	-	0.044	0.017
	<i>Pitch</i>	0.044	-	0.231

Para obtenção das tensões críticas na estrutura da torre do *flare*, são executadas 10 diferentes simulações, apresentadas na tabela 5.4, combinando os carregamentos estáticos atuantes e considerando os coeficientes de aceleração.

Os esforços máximos ocorrem nas ligações entre a base da estrutura da torre e o *deck* da embarcação sendo então verificadas as juntas referentes às conexões da base da torre do *flare*. Os resultados apresentados são para acelerações unitárias adotadas. Por se tratar de um exemplo linear, para outras condições adotadas, os resultados podem ser obtidos através de uma relação linear.

Tabela 5.3 – Descrição das combinações

COMB.	DESCRIÇÃO	COMB.	DESCRIÇÃO
H01	Movimento de HEAVE - Direção -Z	R04	Movimento de ROLL -Y - Direção +Z
H02	Movimento de HEAVE - Direção +Z	P01	Movimento de PITCH +X - Direção -Z
R01	Movimento de ROLL +Y - Direção -Z	P02	Movimento de PITCH -X - Direção -Z
R02	Movimento de ROLL -Y - Direção -Z	P03	Movimento de PITCH +X - Direção +Z
R03	Movimento de ROLL +Y - Direção +Z	P04	Movimento de PITCH -X - Direção +Z

Tabela 5.4 – Combinações dos carregamentos básicos

CARREG. ESTÁTICO	COMBINAÇÕES									
	H01	H02	R01	R02	R03	R04	P01	P02	P03	P04
10	0.102	-0.102	0.044	0.044	-0.044	-0.044	0,044	0.044	-0.044	-0.044
11	-	-	-	-	-	-	0.231	-0.231	0.231	-0.231
12	-	-	0.017	-0.017	0.017	-0.017	-	-	-	-
20	0.102	-0.102	0.044	0.044	-0.044	-0.044	0.044	0.044	-0.044	-0.044
21	-	-	-	-	-	-	0.231	-0.231	0.231	-0.231
22	-	-	0.017	-0.017	0.017	-0.017	-	-	-	-
30	0.102	-0.102	0.044	0.044	-0.044	-0.044	0.044	0.044	-0.044	-0.044
31	-	-	-	-	-	-	0.231	-0.231	0.231	-0.231
32	-	-	0.017	-0.017	0.017	-0.017	-	-	-	-
40	0.102	-0.102	0.044	0.044	-0.044	-0.044	0.044	0.044	-0.044	-0.044
41	-	-	-	-	-	-	0.231	-0.231	0.231	-0.231
42	-	-	0.017	-0.017	0.017	-0.017	-	-	-	-
50	0.102	-0.102	0.044	0.044	-0.044	-0.044	0.044	0.044	-0.044	-0.044
51	-	-	-	-	-	-	0.231	-0.231	0.231	-0.231
52	-	-	0.017	-0.017	0.017	-0.017	-	-	-	-

6 SIMULAÇÃO DINÂMICA

A avaliação dinâmica dos movimentos da embarcação é realizada considerando os efeitos desacoplados. Como se trata de uma análise linear pode-se usar superposição de efeitos. Os 20 primeiros modos de vibração são considerados para avaliação do comportamento da estrutura na região de ressonância. Por se tratar de uma verificação predominante à flexo-compressão dos elementos, os esforços avaliados são os momentos fletores e o esforço axial. São considerados dois tipos de simulações dos efeitos dinâmicos na estrutura. A primeira considera a magnitude do carregamento dinâmico referente ao efeito do movimento translacional da embarcação, onde a magnitude da força é dada por $F = m \omega^2 X_g$, com a altura de onda $X_g=7.0\text{m}$. A segunda considera a simulação dos movimentos de rotação da embarcação, 4° para *pitch* e 10° para *roll*, aplicando a metodologia com as considerações da calibração da mola, utilizada no modelo numérico, abordada a seguir. Todos os carregamentos aplicados foram considerados com um ângulo de fase igual à zero.

Estruturas *offshore* flutuantes estão sujeitas a efeitos ambientais no local em que estão instaladas e operando. As informações ambientais, consideradas no estudo desta dissertação são obtidas através de uma especificação técnica denominada “METOCEAN”, referente ao campo de Jubarte, na Bacia de Campos, no litoral sul do Espírito Santo. Para elaboração do carregamento ambiental, um diagrama de dispersão de ondas foi elaborado a partir das distribuições de altura de onda (H) e período (T_p), sendo obtidos a partir do processamento de informações técnicas presentes na especificação técnica ET – METOCEAN (2005).

A incidência das ondas do mar geram deslocamentos e deformações no casco do navio que podem se refletir nas estruturas dos módulos *topside*, posicionadas na plataforma. A torre do *flare* deste exemplo é totalmente fixa no deck principal da embarcação logo, é considerado que a estrutura sofre todos os efeitos impostos à embarcação *offshore*.

Os carregamentos dinâmicos, referentes às ondas do mar incidentes no navio FPSO, têm sua atuação representada no modelo numérico em elementos finitos da torre do *flare* através de duas maneiras distintas: pela aplicação de uma excitação através de uma aceleração de base e por uma força.

O programa utilizado permite apenas a simulação de acelerações de base translacionais, referentes aos movimentos de *heave*, *surge* e *sway*. Para a aplicação do carregamento é necessário que sejam definidas a direção, magnitude, frequência e fase de excitação externa, sendo prescritas nos nós de apoio da torre. Para representar os movimentos de rotação, *roll* e *pitch*, é aplicado um carregamento dinâmico em um nó livre de tal modo que gere a rotação desejada na base.

A seguir são apresentados os três primeiros modos de vibração livre com suas respectivas frequências naturais. A configuração na cor preta representa a estrutura em repouso, enquanto a configuração laranja representa a vibração.

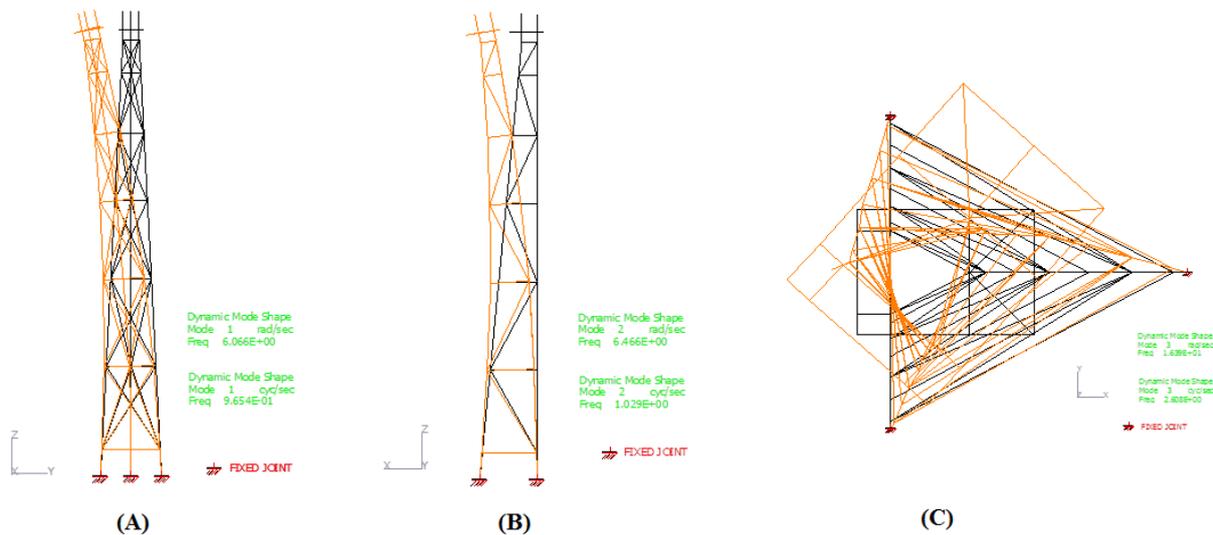


Figura 6.1 – Configuração estrutural – (A) 1º modo de vibração (Plano YZ) – 0.965 Hz; (B) 2º modo de vibração (Plano XZ) – 1.029 Hz; (C) 3º modo de vibração (Plano XY) - 2.608 Hz.

Membros auxiliares rígidos são acrescentados na base da torre, conectados a molas lineares, criando um mecanismo que proporciona modelar os efeitos de rotação desejados, sem que a estrutura se torne instável. Na fig. 6.2 (A) é apresentada a estrutura com os membros auxiliares considerados. Devido à inclusão destes membros na estrutura, novas condições de contorno são impostas com a finalidade de obter os efeitos de rotação desejados. Molas, com rigidez vertical, são acrescentadas nos quatro nós das extremidades das barras rígidas para dar estabilidade ao modelo numérico e permitir a rotação do sistema estrutural. A constante de rigidez adotada para a mola é $K_{FZ}=1.0\text{kN/cm}$. As condições de apoios são ilustradas na fig. 6.2 (B).

Com a metodologia da modelagem definida é feita a calibração da rigidez das molas. Considera-se inicialmente um carregamento de amplitude unitária e obtém-se a rotação da barra rígida (nó central 235). Por se tratar de uma análise linear, pode-se determinar o carregamento que gera a rotação de base desejada. A tabela 6.1 mostra as rotações obtidas

para uma carga unitária em diferentes frequências de excitação. Com base nestes valores, a tabela 6.2 mostra os fatores de correção a serem multiplicados pela amplitude unitária para obter as rotações de base, hipotéticas, de 10 e 4 graus.

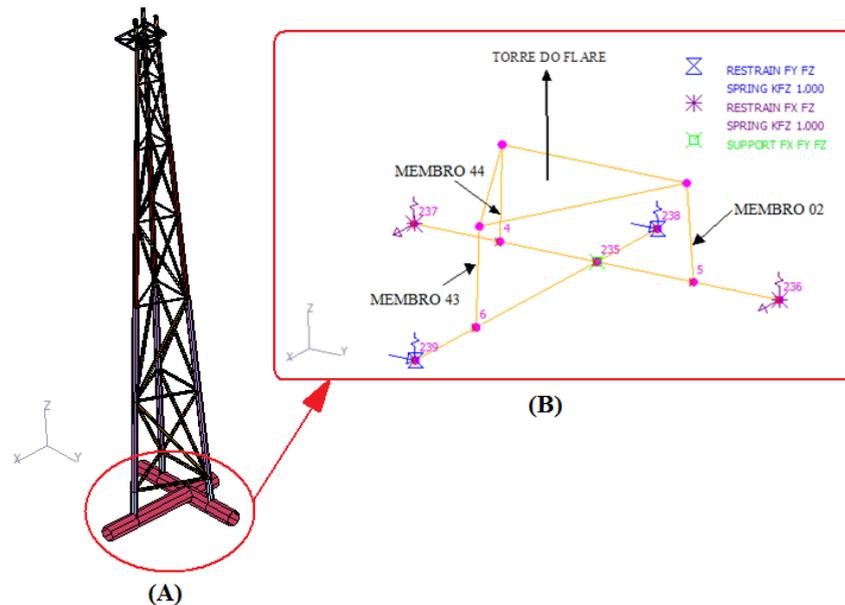


Figura 6.2 – (A) Sistema estrutural incorporado com barras rígidas auxiliares destacadas em vermelho; (B) Condições de apoio das barras rígidas auxiliares.

Tabela 6.1 – Rotações no nó 235 – Amplitude de força unitária e $K_{FZ}=1.0$ kN/cm

Frequência (Hz)	Rotação	
	Roll (graus)	Pitch (graus)
0.05	0.0432	0.072
0.10	0.01188	0.01692
0.15	0.00684	0.00972
0.20	0.00468	0.00684
0.25	0.00396	0.00504
0.30	0.00306	0.00396

Tabela 6.2 – Coeficientes de correção da amplitude

Movimento da embarcação	Ângulo de rotação desejado (graus)	FATOR DE CORREÇÃO					
		Frequência (Hz)					
		0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
Roll	10	231.48	841.75	1461.99	2136.75	2525.25	3267.97
Pitch	4	55.56	236.41	411.52	584.80	793.65	1010.10

7 ANÁLISE DE FADIGA

A seguir são apresentadas as análises de fadiga para as conexões da base da torre do *flare*. As ondas incidentes na embarcação utilizadas nas análises foram definidas pelo diagrama de dispersão mencionado anteriormente. São adotados cinco blocos de onda, separados e nomeados conforme mostrado na tabela 7.1. A escolha dos blocos de onda é realizada da maneira mais abrangente de modo a representar as diferentes frequências atuantes.

A verificação à fadiga é realizada com base no tempo de operação da unidade *offshore*, sendo considerado, para este exemplo, 25 anos.

Tabela 7.1 – Identificação das simulações pelos blocos de onda adotados

Condições	Bloco de onda	Frequência (Hz)	Frequência (rad/s)
CASO 1	15	0.08	0.503
CASO 2	13	0.09	0.565
CASO 3	9	0.1	0.628
CASO 4	2	0.2	1.257
CASO 5	1	0.3	1.885

7.1 Método determinístico pela análise estática equivalente

A partir dos esforços obtidos pelas acelerações unitárias são definidos os esforços máximos resultantes para as diferentes simulações consideradas.

A numeração dos membros e nós da base, utilizados no modelo numérico, são ilustrados na fig. 6.2 (B).

Os resultados são avaliados para um deslocamento translacional arbitrário de 7.0 metros para o movimento de *heave* e rotações também arbitrárias de 10° e 4° para os movimentos de *roll* e *pitch*, respectivamente. Para rotações de pequenas amplitudes, a soma dos esforços obtidos para cada movimento desacoplado é aproximadamente igual à obtida em uma análise acoplada. Por se tratar de uma análise linear o princípio da superposição dos efeitos é válido.

A partir dos esforços encontrados são calculadas as tensões atuantes em cada junta avaliada. Para avaliação da fadiga deve ser utilizada uma variação de tensão, também classificada como range de tensão. Para ondas incidentes regulares, que possuem uma característica harmônica, o range das tensões utilizado é duas vezes o valor da tensão.

7.1.1 Parâmetros de entrada

- **Parâmetros de Weibull**

Pelo item 4.3 da DNV-CN-30.7, tem-se:

$$h_0 = 2.21 - 0.54 \log(320) = 0.86 \quad (7.1)$$

onde h_0 é o parâmetro básico de forma e L é comprimento entre perpendiculares do navio.

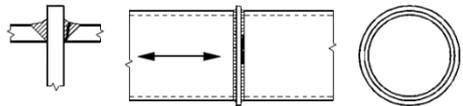
- **Fatores de segurança**

De acordo com a ABS (2003), como a torre do *flare* é definida como uma estrutura primária e as conexões da base da torre são consideradas como inspecionáveis, um fator de segurança igual a 2.0 é adotado.

- **Curvas S-N**

Pelo anexo A da DNV-RP-C203, a curva é obtida por similaridade com os padrões pré-definidos pela norma. São avaliadas a similaridade geométrica da conexão, classificação do tipo solda e inspeção e a direção da tensão dominante atuante na conexão. A tabela 7.2 apresenta a classificação da conexão quanto à curva S-N.

Tabela 7.2 – Curvas S-N para juntas da base da torre (DNV-RP-C203)

CATEGORIA DO DETALHE (Curva S-N)	DETALHES CONSTRUTIVOS	DESCRIÇÃO
G / F3		Seção circular oca com solda de topo em todo o contorno com uma chapa intermediária. Para espessuras acima de 8.0mm, classificar o detalhe na categoria F3.

- **Fator de concentração de tensões**

O fator de concentração de tensões, adotado para a conexão da base da torre, é baseado nas formulações apresentadas no item 3 da DNV-RP-C203 e no capítulo 2 da DNV-OS-C401. A conexão avaliada é classificada como junta cruciforme.

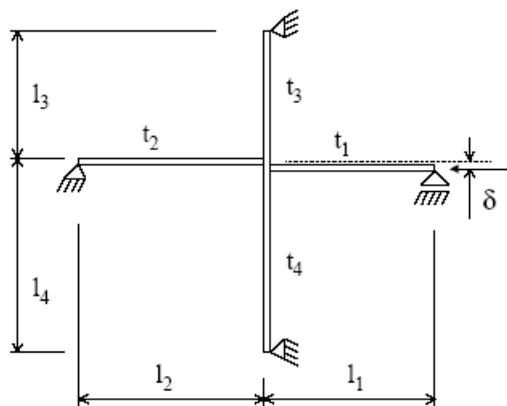


Figura 7.1 – Representação da junta cruciforme (DNV-RP-C203)

Como a conexão não apresenta desalinhamento nem desigualdade entre os perfis tubulares (acima e abaixo da chapa do *deck* principal da FPSO) os fatores na fórmula relacionados ao desalinhamento são considerados nulos. Com isso o fator de concentração de tensão da junta cruciforme em estudo é adotado igual a um.

• Cálculo do Dano

Para a análise de fadiga simplificada, as distribuições de longo prazo são aproximadas pela distribuição de Weibull, onde dois parâmetros (forma e escala) são calibrados e utilizados. Nesse caso a expressão para o dano a fadiga, de acordo com a DNV-RP-C203, é dada por:

$$D = \nu_0 T_d [A] \quad (7.2)$$

Sendo,

$$A = \left[\frac{q(\Delta\sigma_0, h)^{m_1}}{\bar{a}_1} \Gamma \left[1 + \frac{m_1}{h}, \left(\frac{S_1}{q(\Delta\sigma_0, h)} \right)^h \right] + \frac{q(\Delta\sigma_0, h)^{m_2}}{\bar{a}_2} \gamma \left[1 + \frac{m_2}{h}, \left(\frac{S_1}{q(\Delta\sigma_0, h)} \right)^h \right] \right] \quad (7.3)$$

Onde: ν_0 é a frequência de cruzamento zero, T_d a vida útil da estrutura, $h(\)$ e $q(\)$ são os parâmetros de forma e escala, respectivamente, de Weibull, S_1 o range de tensão no ponto da alteração na inclinação da curva S-N, a_1 / m_1 são parâmetros de fadiga (S-N) para $N < 10^7$ ciclos, a_2 / m_2 são parâmetros de fadiga (S-N) para $N > 10^7$ ciclos, $\gamma(\)$ a função gamma incompleta e $\Gamma(\)$ a Função gamma.

Os parâmetros usados nas equações acima são obtidos da tabela 2-1 no item 2.4.4 da DNV-RP-C203.

• Cálculo da vida útil

Pelos conceitos abordados pela DNV sobre a consideração dos fatores de segurança na avaliação à fadiga, para o cálculo da vida útil a partir do dano acumulado devido aos efeitos cíclicos tem-se o valor em anos definido através da seguinte equação:

$$Vida \acute{U}til = \left(\frac{\text{Tempo de operação da FPSO (em anos)}}{\text{Dano Acumulado}} \right) \frac{1}{DFF} \quad (7.4)$$

$$Vida \acute{U}til \geq \text{Tempo de operação da FPSO (em anos)} \quad (7.5)$$

A tabela 7.3 apresenta a vida útil das conexões avaliadas para o dano acumulado apresentado no item anterior.

Tabela 7.3 – Vida útil para as bases das colunas da torre

CASOS	MEMBRO 02 - JUNTA 05		MEMBRO 43 - JUNTA 06		MEMBRO 44 - JUNTA 04	
	Vida útil (Anos)	Status	Vida útil (Anos)	Status	Vida útil (Anos)	Status
CASO 1	456.22	OK	427.34	OK	456.22	OK
CASO 2	151.38	OK	142.31	OK	151.38	OK
CASO 3	60.15	OK	56.79	OK	60.15	OK
CASO 4	0.342	Não OK	0.327	Não OK	0.342	Não OK
CASO 5	0.021	Não OK	0.020	Não OK	0.021	Não OK

Os resultados da vida útil para as três conexões da base da torre apresentam falha por fadiga em dois dos cinco casos simulados. Conforme indicado nas tabelas a vida útil das três conexões avaliadas apresentam para os casos 4 e 5 valores muito menores que o tempo de operação de projeto da unidade *offshore*, considerado em 25 anos, enquanto para os casos 1 a 3 apresentam valores satisfatórios. O dano acumulado e a vida útil resultante referem-se a uma verificação simplificada considerando a incidência das ondas para apenas um determinado estado de mar hipotético. Essa consideração apresenta certo conservadorismo, visto que, considera que as ondas críticas atuam em 100% da vida útil de operação da FPSO.

7.2 Método determinístico pela análise dinâmica

A avaliação da fadiga pela análise dinâmica segue os mesmos conceitos abordados anteriormente, porém utilizando os resultados provenientes da análise dinâmica. A partir dos esforços obtidos pelas acelerações unitárias são definidos os esforços máximos resultantes para os movimentos rotacionais de *roll* e *pitch* e translacional de *heave*, para cada um dos casos simulados. Seguindo a mesma metodologia adotada anteriormente para a análise estática pela superposição dos efeitos, são obtidos os esforços resultantes para cada membro e as tensões normais para cada uma das conexões das bases da torre, para cada um dos casos avaliados.

7.2.1 Parâmetros de entrada

As considerações referentes à curva S-N, ao fator de concentração de tensões, coeficientes de segurança e Weibull adotados, são as mesmas apresentadas anteriormente.

A tabela 7.4 apresenta a vida útil das juntas avaliadas para o dano acumulado pelos resultados da avaliação dinâmica.

Os resultados da vida útil para duas das três conexões da base da torre, juntas 4 e 5, apresentam falha por fadiga em apenas um dos cinco casos simulados. Conforme indicado na tabela 7.4, a vida útil dessas juntas apresenta para o quinto caso simulado valores inferiores ao tempo de operação da unidade, enquanto a junta 6 está apta a resistir aos efeitos causados pelo dano ocasionado por fadiga durante todo o período de operação da FPSO. Esse cenário aponta uma diferença significativa em relação aos resultados encontrados pelos métodos simplificados apresentados anteriormente.

Tabela 7.4 – Vida útil para as bases das colunas da torre

CASOS	MEMBRO 02 - JUNTA 05		MEMBRO 43 - JUNTA 06		MEMBRO 44 - JUNTA 04	
	Vida útil (Anos)	Status	Vida útil (Anos)	Status	Vida útil (Anos)	Status
CASO 1	10438.68	OK	271754.53	OK	46234.87	OK
CASO 2	5530.01	OK	133888.61	OK	28682.35	OK
CASO 3	2554.55	OK	69171.67	OK	10362.00	OK
CASO 4	37.01	OK	457.54	OK	95.65	OK
CASO 5	4.51	Não OK	35.77	OK	9.77	Não OK

8 CONCLUSÕES

O principal objetivo deste estudo é a verificação da atuação dos efeitos ambientais de natureza cíclica, provenientes das ações das ondas do mar, na vida útil à fadiga em conexões críticas da torre de um *flare* em um ambiente *offshore*.

A verificação pseudo-estática representa os efeitos dinâmicos através da aplicação de coeficientes de aceleração, obtidos proporcionais à gravidade, combinados aos carregamentos permanentes estáticos presentes na estrutura. Já a verificação dinâmica leva em conta a variação no tempo dos carregamentos em conjunto com a massa estrutural, representando os efeitos dinâmicos em função da frequência e do movimento oscilatório atuante.

Os valores encontrados pelas duas metodologias de análise para a vida útil das conexões da base da torre apontam certo conservadorismo dos resultados obtidos pela análise pseudo-estática em relação aos resultados obtidos pela avaliação dinâmica.

A simulação estática equivalente é uma simplificação, adaptando a atuação dos efeitos dinâmicos através dos coeficientes de aceleração desenvolvidos neste estudo. O carregamento aplicado não é uma variável no tempo logo, essa simulação é representada através de uma combinação destes efeitos para a definição dos picos máximos dos esforços simulando uma analogia aos picos máximos obtidos por um carregamento harmônico, enquanto a análise dinâmica constitui um método mais abrangente, visto que simula de um modo mais realista a incidência de uma solicitação de natureza oscilatória.

Na maioria dos casos as simplificações propostas pela análise estática equivalente são mais atrativas por conta da rapidez e da praticidade na obtenção de resultados. A metodologia pseudo-estática é normalmente desenvolvida quando os valores das frequências das excitações externas atuantes encontram-se bem distante dos valores das frequências naturais do sistema. Nos casos onde estas frequências são bem próximas, uma análise dinâmica deve ser executada para a verificação do impacto de amplificação que os efeitos externos virão a gerar na estrutura.

Uma avaliação dinâmica exige um conhecimento mais avançado por parte do calculista e o uso de métodos numéricos para simulação dinâmica. Trata-se ainda de uma análise mais extensa e conseqüentemente mais dispendiosa para o projeto.

No estudo de caso apresentado, os valores das frequências das excitações das ondas do mar são bem inferiores aos das frequências naturais dos primeiros modos de vibração da estrutura da torre do *flare*, tornando então aceitável a prática da avaliação à fadiga por uma análise estática equivalente ao invés da realização de uma análise dinâmica. Porém os resultados encontrados para as juntas da base para o método pseudo-estático são considerados desfavoráveis para a vida útil à fadiga em dois dos cinco casos estudados. Para esses casos, vale ressaltar que dados hipotéticos foram adotados, baseados em experiências de outros projetos executados. Os movimentos translacionais e rotacionais da unidade foram tratados como únicos para todos os blocos de ondas, estudados pelo diagrama de dispersão, e também considerados em fase, gerando uma amplificação destes efeitos que para um cenário *offshore*, onde condições aleatórias predominam, é uma hipótese bem conservadora. Além disso, a simplificação realizada na distribuição de massa em apenas um ponto no centro de gravidade da torre, para a definição dos coeficientes de aceleração utilizados, também contribui para certo conservadorismo nos resultados encontrados.

9 REFERÊNCIAS

- ABS, Fatigue Assessment of Offshore Structures. American Bureau of Shipping, Houston, USA, 2003.
- AISC, Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction, Inc. Chicago, USA, 2005.
- ALMAR-NAESS, A. Fatigue Handbook - Offshore Steel Structures. Noruega, Tapir, 1985.
- BATALHA, A. F. Análise de Fadiga de Estruturas Offshore Tipo Topside. Rio de Janeiro, 2009. Dissertação de Mestrado – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- BHATTACHARYYA, R. Dynamics of Marine Vehicles. John Wiley & Sons, 1st edition. New York, USA, 1978.
- CENPES, P-57 - Flare Boom - Temperature gradiente, Revisão B, Rio de Janeiro, 2006.
- DNV, Recommended Practice RP-C203: Fatigue Design of Offshore Steel Structures. Det Norske Veritas. Høvik, Norway, 2012.
- DNV, Classification Note CN-30.7: Fatigue Assessment of Ship Structures. Det Norske Veritas. Høvik, Norway, 2014.
- DNV, Offshore Standard OS-C401: Fabrication and Testing of Offshore Structures. Det Norske Veritas. Høvik, Norway, 2010.
- ELLWANGER, G. B.; SAGRILO, L. V. S.; SIQUEIRA, M. Q. Análise e Projeto de Estruturas Offshore I. Apostila do Programa de Engenharia Civil – Área de Estruturas, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.
- FILHO, F. S. L. Metodologia para Análise de Fadiga de Dutos Flexíveis Baseada em Confiabilidade Estrutural. Rio de Janeiro, 2008. Dissertação de Mestrado – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- GERDAU-AÇOMINAS. Tabela de Bitolas – Perfis estruturais Gerdau, disponível em: <<http://www.gerdau.com.br/perfisgerdauacominas>>. Acesso em: 24 nov. 2015, 14:12:00.
- GTSTRUDL, 2009, User Reference Manual – Finite Element Analysis, Non Linear Analysis, Dynamic analysis. Volume 3, Version 30. Georgia Institute of Technology, Georgia, USA.
- PETROBRAS, Petroleo Brasileiro SA, Metocean Data for Jubarte Field Development - Phase 2. Especificação técnica de dados meteo-oceanográficos, 2005. I-ET-3010.72-1000-941-PPC-001, Revisão 0.
- RAO, S. S. Vibrações Mecânicas. Revisor técnico José Juliano de Lima Júnior; Tradução Arlete Simille. São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2008.
- ROEHL, J. L. P. Dinâmica das Estruturas, Vol. I. Apostila do programa Dinâmica – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2000.
- TAIER, R. Análise da fadiga em juntas tubulares de plataformas offshore fixas através de modelos em elementos finitos. Ouro Preto, 2002. Dissertação de Mestrado – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.