Instituto Panamericano de Ingeniería Naval
XII COPINAVAL - Setiembre /Octubre 1991

ANALISE DE FADIGA EM RISERS RIGIDOS

por Gilberto Francisco Martha De Souza, M. Sc,
Edison Gonçalves, Ph. D,

SUMMARY

This papers presents a proposal of procedure for fatigue analysis of rigid marine risers used in prospection and production of oil in marine environment. Specifically for Brazil, the analysis of fatigue life of this component has great importance, due to the fact that semi-submersible drilling rigs are used as production units in the Antecipated Production System (APS). After a brief description of the characteristics and functions of each equipment of an oil production system, the system equilibrium equation is presented and analysed, including a discussion about the hypothesis applied to this equation. The static and dynamic loading acting in the "riser" are presented. The main strategies applied on the solution of this equilibrium equation are described, which are: static and dynamic analysis, on time and frequency domain. The fatigue life analysis of a rigid marine riser are discussed, taking in view the aleatory tension flotation and the dynamic equilibrium equation solution strategies. It is also proposed a methodology for the fatigue life analysis of marine risers, based on the structural dynamic response, on time or frequency domain.

NOMENCLATURA

- Δ área seccional do cilindro (geral)
- Δ_i área interna do "riser"
- Δ_e área externa do "riser"
- Δ_s área da parede do "riser"
- D_i diâmetro interno do "riser"
- D_e diâmetro externo do "riser"
- dM variação diferencial do momento fletor
- dT variação diferencial do esforço de tração
- dV variação diferencial do esforço de cisalhamento
- dz comprimento diferencial do "riser" (projeção vertical)
- $d\theta$ variação diferencial do ângulo de inclinação do "riser"
- E módulo de elasticidade do material do "riser"
- F_{y_i} resultante de força na direção y devido a pressão interna
- F_{y_e} resultante de força na direção y devido a pressão externa
- F_{z_i} resultante de força na direção z devido a pressão interna.
- F_{z_e} resultante de força na direção z devido a pressão externa
- I momento de inércia do "riser"
- M momento fletor atuando no "riser"
- m_y massa do "riser" na direção y
- $\bar{p}_i$ pressão interna no nível z, no fundo do elemento diferencial do "riser"
- $\bar{p}_e$ pressão externa no nível, no fundo do elemento diferencial do "riser"
- q_y carregamento lateral no "riser"
- T carga de tração na linha
- T_e tensão efetiva
- V carga de cisalhamento atuando na linha
- W_R peso do elemento diferencial de "riser" ($y_s A_s d_z$)

y deslocamento lateral e coordenada de direção
z coordenada ao longo do comprimento do "riser"
γ_i peso específico do fluido no interior da linha
γ_e peso específico do fluido no exterior da linha (água do mar)
γ_s peso específico do aço
θ inclinação do "riser"

1. INTRODUÇÃO

A operação de prospecção de petróleo em ambiente marítimo exige a utilização de um tubo condutor que faz a ligação da plataforma aos equipamentos no fundo do mar. No interior deste tubo passam a broca de perfuração e a lama utilizada para equalização da pressão e resfriamento.

No caso específico do Brasil, estes tubo condutores, denominados "risers" rígidos, têm sido utilizados na prospecção de petróleo, servindo como linha de fluxo nos denominados Sistemas de Produção Antecipados.

Devido à características próprias dos campos petrolíferos na Bacia de Campos, litoral do Brasil, existe a necessidade de operação desses "risers" em águas cada vez mais profundas, implicando que o tubo condutor seja solicitado em condições de carregamento mais seve-ras. A falha deste equipamento resulta em conseqüências desastrosas sob o ponto de vista econômico, devido à para- lização de uma produção ou perfuração, bem como sob o ponto de vista ambiental, pois o vazamento de óleo na região da Bacia de Campos pode causar um grande desastre ecológico, caso a mancha de óleo atinja o litoral norte do Estado do Rio de Janeiro.

As tensões agentes em um "riser" são tanto estáticas como dinâmicas. As tensões estáticas são causadas, basicamente, pelo deslocamento da unidade flutuante em relação ao poço, pelo peso próprio, pela ação da correnteza e tração do "riser". Quanto às tensões dinâmicas, estas advém do movimento da plataforma e da ação das ondas sobre a linha. As tensões dinâmicas podem causar a falha da linha através do fenômeno de fadiga.

A análise de fadiga de "riser" rígido passa a ser importante no caso do Brasil, uma vez que este é utilizado para a produção de óleo, ficando, durante um longo período de tempo, exposto aos mais severos carregamentos ambientais.

Tendo em vista esta particularidade da utilização do "riser" rígido no Brasil, este trabalho apresenta uma possível metodología de análise de fadiga destes tubos condutores flexíveis.

2. GEOMETRIA DE UM SISTEMA DE EXPLOTAÇÃO DE PETROLEO COM USO DE "RISER" RIGIDO

O "riser" rígido é um tubo condutor utilizado para união dos sistemas de explotação instalados na plataforma com os equipamentos instalados no fundo do mar.

A produção e/ou perfuração de petróleo em ambiente marítimo exige a passagem de fluido da plataforma para o fundo do mar, ou vice-versa, sendo que este fluido pode ser lama, utilizada durante a perfuração para controle da pressão no poço, fluido para controle das válvulas no fundo do mar, (através das linhas de "choke" e "kill"), ou mesmo petróleo, no caso de um sistema de produçaão antecipado.

Os componentes básicos de um sistema de "riser" rígido são: [1]

- Blow-out Preventer (BOP)
- Lower Flexible Joint (ball joint)
- Linhas de Choke and Kill
- Riser Rígido e Conexões
- Junta Telescópica
- Sistema Tensionador de Riser

Na Figura 1 é indicado o "lay-out" de um sistema de "riser" rígido, utilizado na explotação de óleo em ambiente marítimo.

O BOP é um conjunto de válvulas que controlam o fluxo de fluido do fundo do mar (poço) para a plataforma ou vice-versa, fazendo o fechamento do poço quando necessário.

Acima do BOP, na extremidade inferior do "Riser", é montado o "Lower Marine Riser", que nada mais é do que um pivô ("ball joint") que permite rotações de até 10°, em relação à vertical, da coluna do "riser", em sua base. Este pivô é lubrificado de forma a garantir a movimentação livre do "pino bola". Através do "Lower Marine Riser" é feita a conexão do "riser" ao BOP, sendo que este equipamento permite a desconexão e a

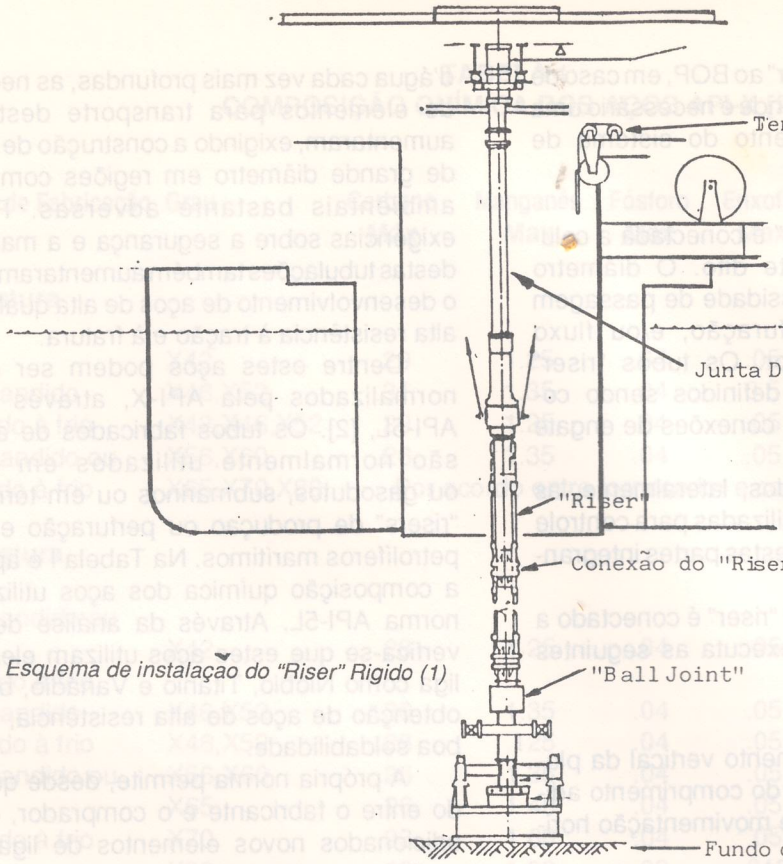

Figura 1: Esquema de instalação do "Riser" Rigido (1)

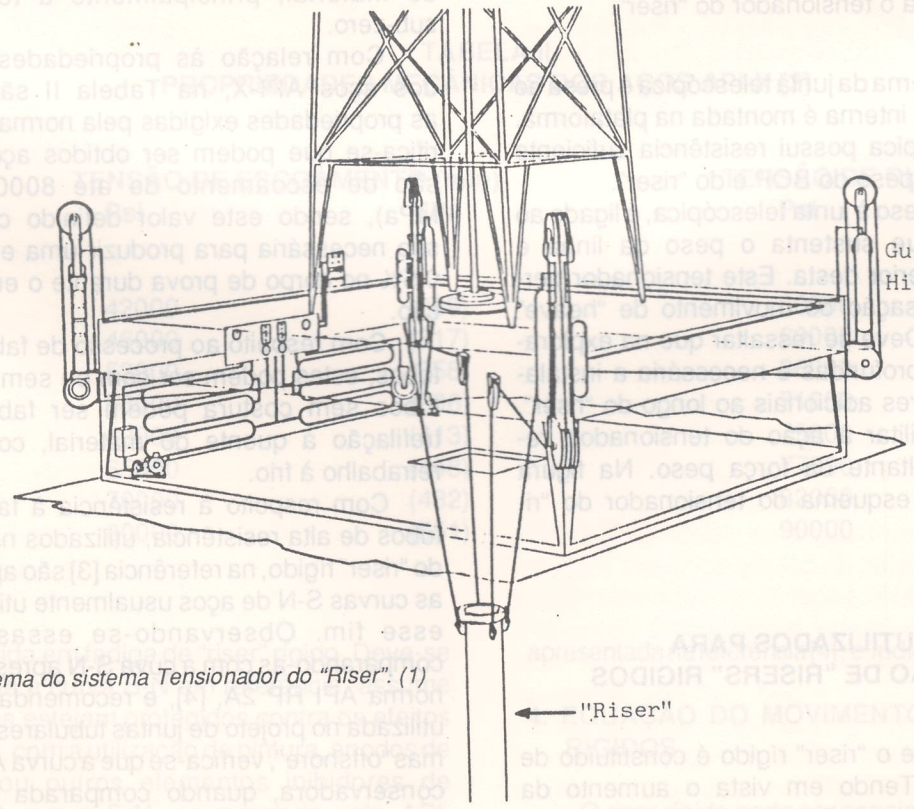

Figura 2: Esquema do sistema Tensionador do "Riser". (1)

reconexão da coluna do "riser" ao BOP, em caso de más condições ambientais, onde é necessário uma interrupção no funcionamento do sistema de produção ou perfuração, [1]

Ao "Lower Marine Riser" é conectada a coluna, ou "riser" propriamente dito. O diâmetro do "riser" é função da necessidade de passagem de equipamentos de perfuração, e/ou fluxo de petróleo no seu interior. Os tubos "riser" apresentam comprimentos definidos sendo conectados entre si através de conexões de engate rápido.

Ao "riser" são conectados, lateralmente, as linhas de "choke" and "kill", utilizadas para controle das válvulas do BOP, sendo estas partes integrantes da coluna de "riser".

Na sua parte superior, o "riser" é conectado a uma junta deslizante, que executa as seguintes funçoẽs:

- compensação do movimento vertical da plataforma, e fornecimento do comprimento adicional à linha no caso de movimentação horizontal da plataforma;
- ligação para as linhas de "choke" e "kill";
- ligação para o tensionador do "riser".

A parte externa da junta telescópica é presa ao "riser"' e a parte interna é montada na plataforma. A junta telescópica possui resistência suficiente para suportar o peso do BOP e do "riser".

O "riser", preso à junta telescópica, é ligado ao tensionador, que sustenta o peso da linha e do fluido no interior desta. Este tensionador permite a compensação do movimento de "heave" da plataforma. Deve-se ressaltar que na exploração em águas profundas é necessária a instalação de flutuadores adicionais ao longo do "riser", de forma à facilitar a ação do tensionador; reduzindo a resultante da força peso. Na figura 2 é indicado o esquema do tensionador do "riser".

3. MATERIAIS UTILIZADOS PARA FABRICAÇÃO DE "RISERS" RIGIDOS

Basicamente o "riser" rígido é constituido de tubos de aço. Tendo em vista o aumento da exploração de óleo e gás em regiões em láminas d'água cada vez mais profundas, as necessidades de elementos para transporte deste material aumentaram, exigindo a construção de tubulações de grande diâmetro em regiões com condiçoes ambientais bastante adversas. Porém, as exigências sobre a segurança e a maior vida útil destas tubulações também aumentaram, obrigando o desenvolvimento de aços de alta qualidade, com alta resistência à tração e à fratura.

Dentre estes aços podem ser citados os normalizados pela API-X, através da norma API-5L, [2]. Os tubos fabricados de aços API-X são normalmente utilizados em oleodutos ou gasodutos, submarinos ou em terra, e como "risers" de produçao ou perfuração em campos petrolíferos marítimos. Na Tabela I é apresentada a composição química dos aços utilizados pela norma API-5L. Através da análise desta última verfica-se que estes aços utilizam elementos de liga como Nióbio, Titânio e Vanádio, buscando a obtenção de aços de alta resistência, mas como boa soldabilidade.

A própria norma permite, desde que acordado entre o fabricante e o comprador, que sejam adicionados novos elementos de liga a fim de melhorar a soldabilidade do material. Verifca-se também que o teor de Enxofre nas especificações é bastante baixo, visando a redução da fragilização do material, principalmente a temperaturas sub-zero.

Com relação às propriedades mecânicas dos aços API-X, na Tabela II são indicadas as propriedades exigidas pela norma API-5L. Verifica-se que podem ser obtidos aços com tensão de escoamento de até 80000 psi (551 MPa), sendo este valor definido como a tensão necessária para produzir uma elongação de 0,5% no corpo de prova durante o ensaio de tração.

Com respeito ao processo de fabricação dos tubos, estes podem ser com ou sem costura. Os tubos sem costura podem ser fabricados por trefilação à quente do material, com posterior retrabalho à frio.

Com respeito à resistência à fadiga destes tubos de alta resistência, utilizados na fabricação do "riser" rígido, na referência [3] são apresentadas as curvas S-N de aços usualmente utilizados para esse fim. Observando-se essas curvas e comparando-as com a cuva S-N apresentada pela norma API RP 2A, [4], e recomendada para ser utilizada no projeto de juntas tubulares de plataformas "offshore", verfica-se que a curva API-X é mais conservadora, quando comparada com dados experimentais, sendo seu uso recomendado para a

TABELA 1.
COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS API-X [2]

Processo de Fabricação	Grau	Carbono Máx	Manganês Max	Fósforo Max	Enxofre Max	Nióbio Min	Vanádio MiN	Titânio Min
Sem costura								
	X42	.29	1.25	.04	.05	-	-	-
Não expandido	X46,X52	.31	1.35	.04	0.5	-	-	-
Expandido à frio	X42,X46,X52	.29	1.25	.04	.05	-	-	-
Não expandido ou	X56,X60	.26	1.35	.04	.05	.005	.02	.03
Expandido à frio	X65,X70,X80	Por acordo entre fornecedor e consumidor						
Com costura								
Não expandido ou								
	X42	.28	1.25	.04	.05	-	-	-
Expandido à frio								
Não expandido	X46,X52	.30	1.35	.04	.05	-	-	-
Expandido à frio	X46,X52	.28	.125	.04	.05	-	-	-
Não expandido ou	X56,X60	.26	1.35	.04	.05	.005	.02	.03
	X65	.26	1.40	.04	.05	.005	.02	-
Expandido à frio	X70	.23	1.60	.04	.05	-	-	-
	X80	.18	1.80	.03	.018			

TABELA II
PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS API-X [2]

GRAU	TENSÃO DE ESCOAMENTO (min) Psi	MPa	TENSÃO DE RUPTURA (min) Psi	MPa
X42	42000	(289)	60000	(413)
X46	46000	(317)	63000	(434)
X52	52000	(358)	66000	(455)
X56	56000	(386)	71000	(489)
X60	60000	(413)	75000	(517)
X65	65000	(448)	77000	(530)
X70	70000	(482)	82000	(565)
X80	80000	(551)	90000	(620)

análise da vida em fadiga de "riser" rígido. Deve-se ressaltar que a curva S-N em referência, assume que os tubos estejam protegidos contra os efeitos da corrosão, com a utilização de pintura, anodos de sacrifício, ou outros elementos inibidores de corrosão. A curva S-N recomendada pela API, apresentada na referência [4], é indicada na Figura 3.

4. EQUAÇÃO DO MOVIMENTO DE "RISERS" RIGIDOS

O riser rígido pode ser considerado como uma

"viga-coluna" sujeita à ação de pressão externa e interna, além de cargas de tração e carregamento lateral. A pressão interna, pode ter origem hidrostática (coluna de lama), no caso da perfuração, ou ser igual à pressão do óleo, ao longo do comprimento da linha, quando o "riser" estiver sendo usado para produção. A pressão externa é hidrostática, devido à ação da água do mar.

Para a dedução da equação do movimento apresentada neste trabalho será suposto que a pressão atuando no interior da linha terá variação similar à pressão hidrostática, ou seja, diminuirá em função da aproximação da linha d'água, sendo maior próxima ao fundo do mar.

Além disso serão assumidas as seguintes hipóteses simplificadoras:

1. Os deslocamentos e rotações são suficientemente pequenos para considerar os senos dos ângulos iguais ao próprio ângulo, os cossenos iguais à unidade, e os termos diferenciais ao quadrado serão negligenciados;
2. As seções planas permanecem planas após a flexão da linha. Esta hipotese é comum na teoría simples de viga;
3. Material é linear elástico;
4. A tensão atuante na linha será constante ao longo do tempo;
5. Não ocorre torção na linha, sendo que os deslocamentos, rotações e carregamentos são considerados como ocorrendo no plano (modelo bi-dimensional)

A hipótese simplificadora 5, acima apresentada, é bastante conservadora, sob o ponto de vista de projeto da linha pois sabe-se que o sistema "riser" mais unidade flutuante normalmente movimenta-se no plano horizontal em duas direções (para a embarcação, movimentos de sway e surge), em funçao das ações ambientais não atuarem em uma única direção. Porém, sob o ponto de vista de projeto, ou da verificaçao da adequabilidade de uma dada geometria da coluna do "riser", para um campo petrolífero específico, adota-se como carregamento ambiental as condições de onda e corrente que são consideradas as mais severas a serem encontradas na região, ao longo da vida do sistema. Nesse caso a consideração de alinhamento de onda, corrente e movimento da embarcação, induzindo o "riser" a se movimentar em uma única direção horizontal é conservadora, refletindo a pior situação de carregamento atuante sobre a linha. Caso a linha seja considerada adequada para esta situação, esta certamente apresentará desempenho satisfatório ao longo de sua vida útil.

Na Figura 4 são indicadas as forças e as pressões atuantes em um seguimento da linha. Através do equilíbrio de forças na direção z (conforme sistema de coordenadas indicado na figura em referência), tem-se:

$$\sum F_z = O$$

$$\therefore V\text{sen}\theta - (V + dV)\text{sen}\theta - T\cos\theta + (T + dT)\cos(\theta + d\theta)$$

$$+ F_{z_e} + F_{z_i} - W_R = O \qquad (1)$$

A referência [5] apresenta relações para o peso próprio (W_R), a pressão externa [F_{z_e}], e a pressão interna [F_{z_i}] sendo estas últimas consideradas como pressão hidrostática. As relações são:

$$F_{z_e} + F_{z_i} = (\gamma_e D^2_e - \gamma_i D^2_i)\left[\left(\frac{dy}{dz}\right)^2 dz + \frac{dy}{dz}\frac{d^2y}{dz^2}(dz)^2\right] +$$

$$+ (\bar{p}_i D^2_i - \bar{p}_e D^2_e)\frac{dy}{dz}\frac{d^2y}{dz^2}dz$$

$$W_r = \gamma_s A_s d_z \qquad (2)$$

Para pequenos ângulos de inclinação tem-se:

$$\text{sen}\theta = \theta = \frac{dy}{dz}$$

$$\cos\theta = 1$$

$$d\theta = dz\frac{d^2y}{dz^2} \qquad (3)$$

Substituindo-se as equações (2) e (3) em (1), tem-se:

$$-dV\frac{dy}{dz}+dT+(\gamma_e D^2_e-\gamma_i D^2_i)\left[\left(\frac{dy}{dz}\right)^2 dz+\frac{dy}{dz}\frac{d^2y}{dz^2}(dz)^2\right]+$$

$$+(\bar{p}_i D^2_i-\bar{p}_e D^2_e)\frac{dy}{dz}\frac{d^2y}{dz^2}dz-\gamma_s A_s dz=O \qquad (4)$$

Dividindo-se a equação (4) por dz e desprezando os produtos de diferenciais, tem-se:

$$\frac{dT}{dz}=\gamma_s A_s+\frac{dV}{dz}\frac{dy}{dz}-(\gamma_e D^2_e-\gamma_i D^2_i)\left(\frac{dy}{dz}\right)^2-(\bar{p}_i D^2_i-\bar{p}_e D^2_e)\frac{dyd^2y}{dz\,dz^2} \qquad (5)$$

Na equação (5) tem-se a formulação que define a variação da carga de tração axial com respêto ao eixo z (variação em relação ao comprimento da linha):

Através do equilibrio de forças na direção y (direção lateral), tem-se:

$$\Sigma F_y-m_y\ddot{y}dz=O$$

ou seja:

$$-m_y y\,dz+(T+dT)\,sen(\theta+d\theta)-T\,sen\theta+(V+dV)\cos(\theta+d\theta)$$

$$-V\cos\theta+q_y dz+Fy_e+Fy_i=O \qquad (6)$$

Da referência [5] obtém-se:

$$Fy_e+Fy_i=(\bar{p}_e\Delta_e-\bar{p}_i\Delta_i)\frac{d^2y}{dz^2}dz+(\gamma_i\Delta_i-\gamma_e\Delta_e)\frac{dy}{dz}dz+$$

$$+(\gamma_i\Delta_i-\gamma_e\Delta_e)dz\frac{d^2y}{dz^2}dz \qquad (7)$$

Substituindo as equações (3) e (7) em (6) tem-se:

$$-m_y\ddot{y}dz+(T+dT)\left(\frac{dy}{dz}+\frac{d^2y}{dz^2}dz\right)-T\frac{dy}{dz}+dV+q_y dz+$$

$$+(\bar{p}_e\Delta_e-\bar{p}_i\Delta_i)\frac{d^2y}{dz^2}dz+(\gamma_i\Delta_i-\gamma_e\Delta_e)\frac{dy}{dz}dz+$$

$$+(\gamma_i\Delta_i-\gamma_e\Delta_e)dz\frac{d^2y}{dz^2}dz=O \qquad (8)$$

Divindo-se a equação (8) por dz e desprezando-se o produto de diferenciais, tem-se:

$$-m_y\ddot{y}+T\frac{d^2y}{dz^2}+\frac{dT}{dz}\frac{dy}{dz}+\frac{dV}{dz}+q_y+(\bar{p}_e\Delta_e-\bar{p}_i\Delta_i)+\frac{d^2y}{dz^2}$$

$$+(\gamma_i\Delta_i-\gamma_e\Delta_e)\frac{dy}{dz}=O \qquad (9)$$

Substituindo a equação (5) na equação (9), obtém-se:

$$m_y\ddot{y}+q_y+\frac{dV}{dz}\left[1+\left(\frac{dy}{dz}\right)^2\right]+$$

$$+[\gamma_s\Delta_s+(\gamma_i D^2_i-\gamma_e D^2_e)\left(\frac{dy}{dz}\right)^2+(\gamma_i\Delta_i-\gamma_e\Delta_e)[+\frac{dy}{dz}$$

$$+[T+(\bar{p}_e D^2_e-\bar{p}_i D^2_i)\left(\frac{dy}{dz}\right)^2+(\bar{p}_e\Delta_e-\bar{p}_i\Delta_i)]\frac{d^2y}{dz^2}=O \qquad (10)$$

Na equação (10) pode-se observar que:

i) os termos $(\gamma_i D^2_i-\gamma_e D^2_e)\left(\frac{dy}{dz}\right)^2$ e $(\bar{p}_e D_e-\bar{p}_i D^2_i)\left(\frac{dy}{dz}\right)^2$

representam os efeitos das pressões interna e externa na declividade e na curvatura do "riser". O termo acima definido, relacionado com a pressão, representa a mudança de tensão devido à ação da pressão externa (flutuação) e devido à pressão interna.

ii) Os termos acima podem ser negligenciados na equação (10) devido ao pequeno erro que implica, em termos práticos, na solução da equação do movimento da linha, conforme indicado na referência (5).

Assim sendo a equação (10) passa a ser escrita da forma:

$$m_y \ddot{y} + q_y + \frac{dv}{dz} + [\gamma_i \Delta_i - \gamma_e \Delta_e)] \frac{dy}{dz} + [T + (\bar{p}_e \Delta_e - \bar{p}_i \Delta_i)] \frac{d^2y}{dz^2} = O \qquad (11)$$

Assumindo que o "riser" seja uma viga, tem-se, da Teoría Simples de Viga, que:

$$V = \frac{dM}{dz}$$

e para pequenas rotações:

$$M = -EI \frac{d^2y}{dz^2}$$

e

$$V = -\frac{d}{dz}\left(EI \frac{d^2y}{dz^2}\right) \quad (12.a)$$

$$\frac{dV}{dz} = -\frac{d^2}{dz^2}\left(EI \frac{d^2y}{dz^2}\right) \quad (12.b) \qquad (12)$$

Substituindo as equações (12.a) e (12.b) na equação (11) obtém-se a equação diferencial que governa o movimento da linha:

$$q_y = m_y \ddot{y} + \frac{d^2}{dz^2}\left(EI \frac{d^2y}{dz^2} - [\gamma_s A_s + \gamma_i \Delta_i - \gamma_e \Delta_e\right) \frac{dy}{dz} - (T + \bar{p}_e \Delta_e - \bar{p}_i \Delta_i) \frac{d^2y}{dz^2} \qquad (13)$$

O termo tração efetiva (T_e) é calculado por:

$$T_e = T + \bar{p}_e \Delta_e - \bar{p}_i \Delta_i \qquad (14)$$

Derivando-se a tensão efetiva em relação a z, tem-se:

$$\frac{dT_e}{dz} = \gamma_s \Delta_s + \gamma_i \Delta_i - \gamma_e \Delta_e \qquad (15)$$

e a equação (13) toma a forma:

$$q_y = m_y y + \frac{d^2}{dz^2}\left(EI \frac{d^2y}{dz^2}\right) - \frac{dTe}{dz} \frac{dy}{dz} - T_e \frac{d^2y}{dz^2} \qquad (16)$$

A equação (16) é, em sua forma final, a equação que governa o movimento do "riser".

Deve-se ressaltar que para cálculo das tensões na parede do "riser" rígido, a tensão de tração é calculada a partir da carga de tração no ponto estudado e não com a tração efetiva. Esta última atua como se ocorresse um aumento da rigidez à flexão, sendo considerada apenas matematicamente e não um carregamento físico. A tensão de Flexão é calculada à partir do momento fletor atuando no ponto em estudo. A composição final de tensões no ponto é executada através da formulação

da Resistência dos Materiais, somente, aí, surgindo a influência das pressões interna e externa [6].

5. CARREGAMENTO ATUANDO SOBRE O "RISER" RIGIDO

Sobre o "riser" rígido atuam os carregamentos ambientais e o carregamento proveniente da movimentação da plataforma à qual o "riser" está preso.

Inicialmente, abordando o problema de movimentação da plataforma, verifica-se que caso a linha esteja presa a uma unida de flutuante (semi-submersivel, TLP, navio-sonda) ou a uma plataforma complacente, este estará submetido a uma movimentação lateral, devido aos movimentos da plataforma.

Esta movimentação lateral, no ponto superior da linha, é idêntica à movimentação da estrutura oceânica, e esse valor do movimento é utilizado como uma condição de contorno para a solução da equação de movimento da linha. A solução do movimento da plataforma devido à ação das ondas é obtida em separado, pois até o momento, é impossível obter a solução, acoplada, da movimentação dinâmica da unidade flutuante e do "riser" rígido. Em função das hipóteses adotadas neste estudo, de considerar apenas a movimentação lateral da linha, torna-se importante, como condição de contorno, a solução do movimento do "riser", para os movimentos de "roll", "sway", "surge" e "pitch". O movi mento de "heave" da plataforma não é importante na condição normal de operação da linha, pois a junta deslizante, ao qual é preso o "riser", compensa o movimento de "heave".

Quanto a ação de correnteza e ondas, os esforços causados por estes fenômenos ambientais, ocorrem devido à ação da velocidade e aceleração da partícula fluida sobre a estrutura do riser.

A correnteza é representada por um campo de velocidades constante no tempo, mas variável ao longo da profundidade. Neste modelo de cálculo não é considerada a tridimensionalidade do campo de velocidades, fato que ocorre na Bacia de Campos.

As ondas, em mar aberto, são representadas, devido a sua irregularidade (não apresentam altura constante no tempo), por um espectro de energía, este sim, constante no tempo. Este espectro relaciona a densidade de energia de uma onda, com a sua freqüência. Além disso, um mar irregular pode ser representado por uma somatória de ondas regulares de altura e período bem definidos, mas defasadas, entre sí, de um ângulo de fase conhecido.

Uma onda regular apresenta o perfil de velocidade representado abaixo, tomado-se como base a formulação de Airy (Teoría de Primeira Ordem), [7].

$$V_o = \frac{a\,g\,h}{w} \frac{\cosh k\,(h+z')}{\cosh k\,h} \operatorname{sen}(ky - wt) \qquad (17)$$

$$\text{sendo: } k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$w = \frac{2\pi}{T_o}$$

onde:

T_o período da onda

λ comprimento de onda

h profundidade (conforme indicado na Figura 5)

a amplitude da onda

Para águas profundas podem ser adotadas as seguintes relações, [7]:

$$k = w^2 g$$

$$\frac{\cosh k\,(h+z')}{\cosh k\,h} = e^{kz'} \qquad (18)$$

é importante observar que para águas rasas estas formulações conduzem a resultados imprecisos.

Utilizando as relações (18), e aplicando-as na equação (17), tem-se:

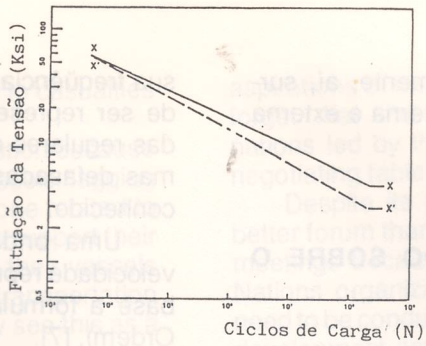

Figura 3: Curva S-N recomendada pela Norma API RP 2A(4)

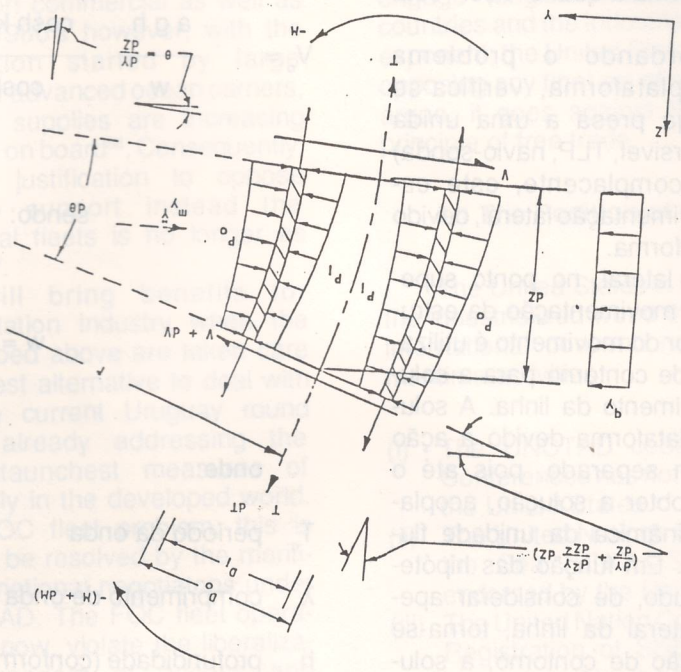

Figura 4: Diagrama de Corpo Livre de un Elemento de "Riser" (5)

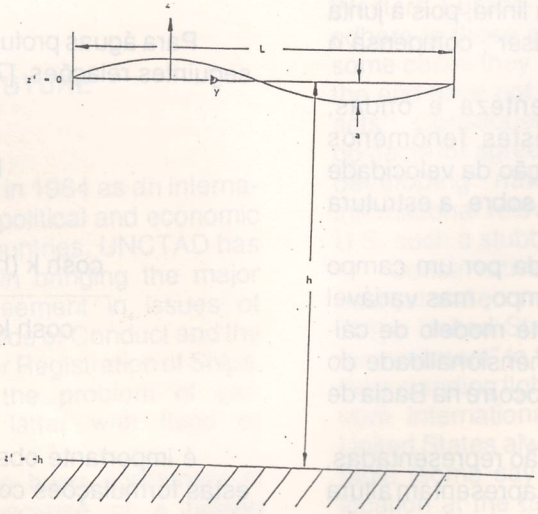

Figura 5: Sistema de coordenadas de referéncia para representaçao da Onda (7)

$$V_o = \frac{\pi H}{T_o} e^{\frac{-(h-z)\,w^2}{g}} \cos(wt + \phi)$$

sendo H = 2a (altura da onda)

$z^1 = -(h-z)$, onde z é a coordenada da altura de onda em relação ao fundo do mar.

ϕ = fase da onda

A velocidade V_o representa a velocidade de uma partícula fluida devida a uma onda regular.

No caso do mar irregular, sendo este uma superposição de ondas regulares, o perfil de velocidade da partícula fluida será uma superposição do perfil de velocidade de diversas ondas regulares.

A equação Morison é utilizada para cálculo do carregamento devido à ação de ondas e correnteza, que neste caso é representada na seguinte forma:

$$q_y = q_{DRAG} + q_{INERCIA} \qquad (20)$$

onde:

q_{DRAG} esforço de arrasto
$q_{INERCIA}$ esforço de inércia

sendo estas componentes escritas da forma:

$$q_{DRAG} = \frac{1}{2} \rho D_e C_d \{V_y - \dot{y}\} [V_y - \dot{y}]$$

$$q_{INERCIA} = \rho \frac{\pi D^2_e}{4} [C_m \dot{V}_y - (C_m - 1)\ddot{y}]$$

O coeficiente C_d, denominado coeficiente de DRAG, é função do número de Reynolds (Re), sendo seu valor obtido de resultados experimentais controlados em laboratório, conforme apresentado na referência (7).

O termo da força de inércia leva em consideração a massa adicional, que representa a massa fluida que se moverá junto com o "riser". Tal massa é representada pelo coeficiente de massa adicional, que também apresenta variação com a freqüência de vibração do corpo. Segun-do a referência (7), usualmente utiliza-se o valor C_m = 2,0.

Através do produto das diferenças de velocidade da partícula fluida e da linha, verifica-se que o comportamento do esforço de DRAG não é linear.

6. SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE MOVIMENTO DO RISER

Tomando-se as equações (3.16) e (4.4), tem-se a equação de equilibrio do riser, que é:

$$m_y \ddot{y} + \frac{d^2}{dz^2}\left(EI \frac{d^2y}{dz^2}\right) - \frac{dT_e}{dz}\frac{dy}{dz} - T_e \frac{d^2y}{dz^2} =$$

$$= \frac{1}{2} \rho D_e C_d \{V_y - \dot{y}\}|V_y - \dot{y}| + \rho \frac{\pi D^2_e}{4} [C_m V_y - (C_m - 1)\ddot{y}] \qquad (22)$$

A equação de movimento da linha poder ser resolvida para as seguintes situações: [8]

i) Análise Estática
Considera-se um perfil constante de velocidade de corrente (não varia no tempo), e um "off-set" constante da plataforma. Quanto a ação das ondas, esta é desconsiderada, ou o esforço causado pelas ondas é modelado como uma força constante. Neste método não é possível prever a vida em fadiga da linha, pois não é considerada a variação dinâmica nas tensões. Nesta situação não é necessário linearizar o termo do "DRAG" da equação de movimento, pois não existe a variação da velocidade da linha no tempo. Como vantagem desta análise podem ser citadas a facilidade da análise do efeito das condições ambientais, em uma dada configuração de linha, com baixo custo computacional. E muito utilizada para estudos paramétricos.

ii) Análise Dinâmica no Domínio do Tempo

A solução da equação do movimento do "riser" no domínio do tempo, exige a integração numérica, da equação (22), considerando a não linearidade do carregamento de "DRAG", obtendo-se portanto a variação temporal da configuração da linha e dos esforços solicitantes (no caso o momento fletor, pois considera-se a tensão normal constante). Este método de solução permite a análise de fadiga do "riser", em função da obtencão da variação temporal dos esforços solicitantes da linha.

Esta estratégia de solução pode ser usada para excitação de ondas regulares ou irregulares (consideradas como uma composição de ondas regulares), movimentação da unidade flutuante variável no tempo e variação do perfil de corrente no tempo, utilizando-se assim a variação do carregamento externo no tempo.

Este é o método mais preciso para avaliação do comportamento dinámico de "risers" rígidos, exigindo um grande esforço computacional para a solução do problema tendo em vista a necessidade da integração da equação de equilibrio no tempo. E pouco usado para análises paramétricas, sendo utilizado para uma verificação final do projeto.

iii) Análise Dinâmica no Dominio da Freqüência

A solução da equação do movimento do "riser" no dominio da freqüência, conduz à obtenção da movimentação e dos esforços solicitantes na linha, em função da excitação externa, em uma dada freqüência. Supõe-se que a linha irá se movimentar na mesma freqüência da excitação. A excitação externa é considerada senoidal.

Para solucionar o problema no dominio da freqüência é necessário linearizar o termo de DRAG, referente ao carregamento externo. Esta linearização é muito importante no sentido de obter resultados da análise no dominio da freqüência, mais próximos daqueles obtidos em uma análise no dominio do tempo. Na referência (8) é apresentada uma formulação da linearização utilizada pelo programa DERP (7), sendo que esta apresenta excelente resultados para a análise no dominio da freqüência, quando comparados com resultados obtidos da análises no dominio do tempo.

Para a análise no dominio da freqüência, utiliza-se a seguinte formulação para o perfil de velocidade da partícula fluida:

$$V_y = V_o(z)\, e^{iwt} = V_c(z)$$

onde:

$$V_o(z) = \frac{\pi H}{T_o}\, e^{-(h-z)\frac{w2}{g}} \qquad (23)$$

$V_c(z)$ = velocidade de corrente (constante no tempo)

A resposta da estrutura é escrita da forma:

$$y = y_o(z)\, e^{iwt} + y_c(z) \qquad (24)$$

y_o: devido à ação das ondas e movimentação da plataforma

y_c: devido à ação da correnteza

Substituindo as equações acima, na equação de movimento da linha, tem-se:

—Una equaçao dependente do tempo

$$\left[\frac{d^2}{dz^2}\left(EI\frac{d^2y_o}{dz^2}\right) - \frac{d}{dz}\left(T_e\frac{dy_o}{dz}\right) - w^2\, m_y\, y_o\right] e^{iwt} =$$

$$= \left[\frac{\pi}{4}\rho C_m D_e^2\, iw V_o + \frac{\pi}{4}\rho (C_m - 1) D_e^2 w^2 y_o + \frac{1}{2}\rho D_e C_D B_1 (V_o - iwy_o)\right] e^{iwt} \qquad (25)$$

— uma equação independente do tempo (função da correnteza)

$$\frac{d^2}{dz^2}\left(EI\frac{d^2y_c}{dz^2}\right) - \frac{d}{dz}\left(T_e\frac{dy_c}{dz}\right) = \frac{1}{2}\rho D_e C_d B_2 V_c \qquad (26)$$

sendo: B_i e B_2.... coeficientes provenientes da linearização do esforço de DRAG da equação de Morison.

Para um mar irregular, a resposta da estrutura é obtida através da superposição modal das respostas obtidas para diversas ondas regulares provenientes da decomposição do espectro de energia.

Como solução do problema, obtém-se a resposta da estrutura, em termos de freqüência, obtendo-se uma função de transferência linear que passa a expressar características dinâmicas da geometria do "riser".

De posse da variação dos esforços solicitantes em função da freqüência, faz-se o cruzamento com o espectro de mar que excita a estrutura, obtendo-se o espectro de variação dos esforços solicitantes em função da freqüência, que será utilizado na análise de fadiga da linha.

7. ANALISE DE FADIGA DE "RISERS" RIGIDOS

De posse da variação dinâmica das tensões atuantes na linha, tendo em vista o carregamento externo atuante sobre esta, deve ser executada uma análise de fadiga do "riser", verificando a possibilidade de ocorrência de falha por fadiga, e caso se confirme esta possibilidade, verificar qual seria a vida da linha.

Devido ao carregamento atuante sobre a linha ser irregular (aleatório), a análise de fadiga será baseada em um processo estatístico. Além disso, em função do estudo da linha poder executado no dominio do tempo ou da freqüência, a análise de fadiga deverá ser executada, para estas duas situações de cálculo, com metodologias diferentes.

As metodologias de análise de fadiga são expostas na seqüência deste trabalho.

7.1 Análise de Fadiga para Flutuações Aleatórias

Tendo em vista a curva S-N API-X, apresentada pela norma API-RP2A [4], utilizada para a previsão da vida em fadiga de estruturas tubulares em ambiente marítimo, como efetiva proteção contra corrosão, a mesma pode ser matematicamente representada através da seguinte formulação:

$$\log N + L \log S = \log C$$

sendo reescrita da forma:

$$N S^L = C \qquad (27)$$

onde:

N número de ciclos até a fadiga para uma fluctuação de tensão igual a S;

L, C parâmetros obtidos através da regressão linear;

S amplitude da flutuação de tensão (constante no tempo).

O método a ser usado para tratar da falha por fadiga utiliza a hipótese de acúmulo linear do dano (Palmgren - Miner) (9), que é escrita da forma:

$$\eta = \sum_{i=1}^{n} \frac{n_i}{N_i} \qquad (28)$$

sendo:

η dano em fadiga (falha quando $\eta = 1$);

N_i número de ciclos até a falha para uma flutuação de tensão S_{Ai};

n_i número de ciclos ocorrendo com a flutuação S_{Ai}.

Sendo N_A o número total de flutuações de tensão durante a vida em fadiga, pode-se estimar o número de ciclos n_i que ocorrem com a flutuação em torno do valor S_{Ai}, da forma [10]:

$$\frac{n_i}{N_A} = [P_{SA}\ (S_{Ai})\ \Delta S_{Ai}] \qquad (29)$$

onde:

$P_{SA}\ (S_{Ai})$ é a função da densidade de probabilidade de flutuação da tensão;

ΔS_{Ai} é a variação da tensão.

O termo entre colchetes da expressão (29) representa a seguinte probabilidade:

$$P_{SA}(S_{Ai})\,\Delta S_{Ai} = \text{PROB}\left[S_A - \frac{\Delta S_{Ai}}{2} \le S_A \le S_A + \frac{\Delta S_{Ai}}{2}\right]$$

Aplicando (29) e (27) em (28), e tomando-se $\Delta S_{Ai} \to 0$, tem-se:

$$\eta = \frac{N_A}{C} \int_0^\infty S^L{}_A\, P_{SA}(S_A)\, dS_A$$

Fazendo o dano igual a unidade (η=1), na equação (30) pode-se determinar o número total de flutuações N_A que vão ocorrer durante a vida da linha.

7.2 Análise no Domínio do Tempo

De posse do histórico das tensões dinâmicas no "riser" rígido, devem ser contadas as flutuações destas tensões durante o tempo de simulação. Este tempo de simulação deve ser suficiente para caracterizar de forma adequada as condições ambientais.

Adota-se que a amostra de flutuações permite que se possa estimar os parâmetros da função de densidade de probabilidade da distribuição gama-generalizada (10).

$$p(x) = \frac{C}{r^{(m)}}\, \lambda^{cm}\, x^{cm-1}\, e^{(-\lambda x)^c},\quad 0 \le x < \infty \qquad (31)$$

Tal distribuição admite que a estatística é feita para um processo aleatório que tenha média zero, que não e o caso das tensões no "riser" rígido. Mas, o fato da força média não ser zero não altera a distribuição das flutuações da tensão , que poderia ser a mesma para qualquer nivel de tensão média.

Verifica se que a equação (31) possui três parâmetros que são estimados a partir dos dados observados, conforme apresentados na referência (10).

A função densidade de probabilidade de flutuações passa a ser escrita da forma:

$$P_{S_{A_i}}(S_A) = \frac{c_{A_i}\, \lambda_{A_i}^{c_{A_i} m_{A_i}}\, S_{A_i}^{c_{A_i} m_{A_i} - 1}}{r(m_{A_i})}\, e^{-(\lambda_{A_i} S_{A_i})^{c_{A_i}}} \qquad (32)$$

para i = 1,2 ..., n_a, onde n_a é o número de condições ambientais analisadas.

A vida em fadiga, para um dano unitário (η=1), pode ser calculada a partir da formulação (30), devendo ser observado que:

$$\int_0^\infty S^L{}_a\, P_{S_A}(S_A)\, dS_A = \frac{1}{\lambda_{A_i}^{L}}\, \frac{r\left[m_{A_i} + \frac{L}{C_{A_i}}\right]}{r(m_{A_i})} \qquad (33)$$

O número de ciclos, que causará fadiga, para uma dada condição ambiental é:

$$N_A = \frac{C}{\int_0^\infty S^L_A\, P_{S_A}(S_A)\, dS_A} \qquad (34)$$

7.3 Análise no Domínio da Freqüência

Quando o cálculo da resposta dinâmica do "riser" é feito no domínio da freqüência, obtém-se como resposta uma distribuição de flutuação de tensões, em função da freqüência.

Este cálculo deve ser executado com um carregamento composto por ondas de altura unitária, e movimentação no extremo da linha igual aos movimentos da embarcação quando sobre esta atua a mesma onda de altura unitária.

De posse da distribuição de flutuação de tensões, deve-se calcular o espectro destas, através da seguinte relação:

$$S_{tt}(w) = |H(w)|^2\, S_{dd}(w) \qquad (35)$$

onde:

$S_{tt}(w)$ espectro de energia da flutuação de tensões;

$H(w)$ distribuição de flutuação de tensões (função de transferência);

$S_{dd}(w)$ espectro de mar.

De posse do espectro de energia de flutuação de tensões, e sendo este de banda estreita, a função densidade de probabilidade de flutuação das tensões pode ser escrita na forma de uma distribuição de Rayleigh [9]:

$$P_{S_A}(S_A) = \frac{S_A}{\alpha^2} e^{\left[\frac{-S_A^2}{2\alpha^2}\right]} \qquad (36)$$

onde:

$$\alpha^2 = \int_0^\infty S_{tt}(w)\, dw$$

Para casos em que o espectro de flutuação de tensões não for de banda estreita, outras funçoes de densidade de probabilidade devem ser usadas, como por exemplo a distribuição de Weibull (9).

De posse da equação (36), determina-se o número de ciclos em que ocorrerá fadiga da linha através da aplicação da equação (34).

7.4 Cálculo da Vida em Fadiga

No caso de um estudo no domínio do tempo, a vida em fadiga, t_i, para uma dada condição ambiental é calculada da forma:

$$t_i = \frac{N_{A_i}}{\left[\frac{n_{a_i}}{T_i}\right]}$$

onde:

n_A número de flutuações observadas no tempo T_i;

T_i tempo de simulação.

No caso de um estudo no domínio da freqüência, de posse do valor N_{A_i}, calcula-se a vida à fadiga V_i, para uma dada condição de mar, da forma:

$$t_i = \frac{N_{A_i}}{f_e} \qquad (38)$$

onde:

f_e . freqüência efetiva, sendo calculada da forma:

$$f_e = \left[\sqrt{\frac{m_o}{m_2}}\right]^{-1} \qquad (39)$$

onde:

m_o e m_2 . são, respectivamente, os momentos de ordem zero e dois do espectro de energia da flutuação de tensões.

8. CONCLUSÕES

A análise de fadiga de "risers" rígidos parece ser um problema recente, pois o Brasil, através de sistemas antecipados de produção tem utilizado estes equipamentos acoplados a sistemas de produção flutuantes, aumentando assim a excitação dinâmica atuando sobre as linhas. Além disso, a utilização destas linhas em águas profundas, aumenta tremendamente o carregamento dinâmico atuando sobre o equipamento.

Nesse ambiente particular, a definição da vida em fadiga tem grande importância, pois a falha da linha causa grandes prejuízos econômicos e ecológicos.

Neste trabalho apresentou-se uma proposta de metodologia para cálculo de fadiga em "risers" rígidos, a partir de análises de flutuações de tensões no domínio do tempo ou no domínio da freqüência. Pode-se observar que a análise no domínio do tempo é mais precisa do que a análise no domínio da freqüência, pois nesta última é necessário a linearização do termo correspondente ao arrastro na equação do carregamento externo atuando na linha. Porém seu custo é extremamente alto devido

ao grande esforço computacional necessário para resolver a equação de equilíbrio dinâmico da linha. Dessa forma a análise no domínio da freqüencia é mais usual, embora menos precisa.

A falha por fadiga da linha ocorrerá em um número de ciclos determinado, fundamentalmente, pela excitação externa (carregamento ambiental: onda, corrente, etc.) atuando sobre o sistema "riser"/ plataforma, sendo que a falha ocorrerá em função das características de resistência à fadiga do material do "riser", sendo estas determinadas a partir da utilização da curva S-N API-X, apresentada na norma API-RP2A[4].

Deve-se ressaltar que apesar da norma API-RP2Q [11] recomendar limites de tensões admissíveis durante o projeto do "riser", para o caso de águas profundas tais limites devem ser melhor estudados pois a amplificação dinâmica das tensões torna-se de vital importância, influenciando diretamente o fenômeno de falha por fadiga de "risers".

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] - "A Primer of Offshore Operations", Petroleum Extension Service, The University of Texas Austin, Austin, Texas, EUA. (1976).

[2] - API-5L, "Specification for Line Pipe", 36th Edition, American Petroleum Institute, Dallas, Texas, USA, 1987.

[3] - Rengan, K., Sablok, A. K., Hartt, W. H., "Fatigue Properties of Exemplary High-Strengh Steels in Seawater", paper nº 5663, Proceedings of Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1987.

[4] - API RP 2A, "Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, 6th Edition, American Petroleum Institute, Dallas, Texas, USA, 1985.

[5] - Young, R. D., Fowler, J. R., "Mathematics of The Marine Riser", Energy Technology Conference and Exhibition, Houston, Texas, Novembro 1978.

[6] - Molver, D. B., Olson, R. J., "Riser Effective Tension - Now You See it, Now You Don't", Battelle Houston Operations, Houston, Texas.

[7] - "Theoretical Basis for DERP and DERP P-C", Stress Engineering Services, Inc., Houston, Texas.

[8] - "Krolikowski, L. P., Gay, T. A., "An Improved Linearization Technique for Frequency Domain Riser Analysis", Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1980. (Paper OTC 3777).

[9] - Sanders, D. R., Dominguez, R. F., Lai, N. W., Ho, K. C., "Predicting Mooring System Fatigue Life by Probabilistic Methods", Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1983. (Paper OTC 4637).

[10]- Petreche, J. R. D., "Introdução à Análise Dinâmica de Cabos de Amarração", Relatório de Atividades encaminhado à FAPESP em Setembro/1990.

[11] - API RP 2Q, "Recommended Practice for Design and Operation of Marine Drilling Riser System", 2nd Edition, American Petroleum Institute, Dallas, Texas, 1984.