

Fadiga em plataformas *offshore* fixas com modelos em elementos finitos

Roberto Taier

Engenheiro Aeronáutico, M.Sc. - Figueiredo Ferraz - Rio, RJ, Brasil.
E-mail: rtaier@ig.com.br

Ernani Carlos de Araújo

Professor, D.Sc., Escola de Minas - UFOP - Ouro Preto, MG, Brasil
E-mail: ecar@em.ufop.br

Leonardo Barbosa Godefroid

Professor, D.Sc., Escola de Minas - UFOP - Ouro Preto, MG, Brasil
E-mail: leonardo@em.ufop.br

Resumo

Quatro juntas tubulares de uma plataforma offshore fixa foram modeladas em elementos finitos para o cálculo das vidas à fadiga e comparação com os resultados obtidos através de modelos convencionais em elementos de barras. Foram também cotejados os fatores de concentração de tensões (SCF's), obtidos com base nas formulações paramétricas, com os calculados através dos modelos em elementos finitos.

Os objetivos foram averiguar a validade do refinamento do cálculo da fadiga em juntas críticas da plataforma e avaliar as suas conseqüências na elaboração do plano de inspeção.

Os resultados permitiram concluir que a análise por elementos finitos torna-se recomendada para juntas que não apresentam tipo e/ou comportamento compatíveis com as configurações padronizadas, normalmente utilizadas pelos programas. Das quatro juntas analisadas, duas delas não necessitariam fazer parte do plano de inspeção da plataforma.

Palavras-chave: Plataforma offshore, junta tubular, SCF, fadiga, elementos finitos.

Abstract

Four tubular joints of a fixed offshore platform were modelled using finite elements to evaluate respective fatigue lives and comparison with the results obtained from conventional models in frame elements. Stress concentration factors (SCF's) calculated from parametric formulas were also compared with those obtained from finite elements models.

The results of this work have the intention of verifying the validity of the refinement of fatigue analysis on critical joints of the platform and the evaluation of its consequences in the inspection plan.

Obtained results show that finite elements analysis is recommended for joints whose type and/or behaviour is not consistent with standard models, used by computational programs. From four analysed joints, two of them would not need to be part of inspection plan.

Keywords: *Offshore platform, tubular joint, SCF, fatigue, finite elements.*

Artigo recebido em 04/07/2002 e aprovado em 22/08/2002.

1. Introdução

1.1 Aspectos gerais da fadiga

Diversos componentes de máquinas, veículos e estruturas são, frequentemente, solicitados a carregamentos repetitivos ao longo do tempo. Esses carregamentos geram tensões cíclicas, que, mesmo sendo de pequenas intensidades, podem provocar danos físicos no material, levando-o à fratura. Esse processo de acumulação de danos seguido de eventual fratura é denominado fadiga.

O fenômeno da fadiga tem sido, há mais de 175 anos, objeto de estudo e pesquisa por cientistas de diversas partes do mundo e continua sendo um dos aspectos mais importantes no projeto e manutenção de elementos estruturais de diversas espécies.

Em plataformas *offshore*, estima-se que 50% dos custos de monitoramento das condições em serviço referem-se a inspeções para averiguar trincas por fadiga. O aprimoramento dos procedimen-

tos para elaboração desse programa de inspeção deve englobar análises estruturais de confiabilidade, avaliações de conseqüências de falhas e cálculos refinados à fadiga para identificar as áreas críticas na estrutura.

1.2 Tipos de estruturas offshore

As plataformas marítimas para a produção de petróleo dividem-se em dois tipos: fixas e com liberdade de movimento (Figura 1).

1.3 Juntas em estruturas offshore

Estruturas *offshore* em aço são comumente compostas de elementos tubulares de paredes finas, porque as seções fechadas proporcionam empuxo e grande rigidez torcional, superfície mínima para pintura e ataque corrosivo, simplicidade de forma e aparência agradável. Em partes submersas dessas estruturas,

são projetados tubos circulares porque resultam em menores forças hidrodinâmicas em relação aos membros tubulares de seção quadrada ou retangular. (Figura 2).

2. Fadiga em plataformas offshore fixas

A análise das condições que podem produzir ruptura à fadiga em estruturas *offshore* é um processo complexo, que envolve o conhecimento de áreas de oceanografia, hidrodinâmica, análise mais avançada de tensões, mecânica de fratura e tecnologia do material.

Para efetuar uma análise à fadiga de uma estrutura marítima tipo *offshore* é necessário:

- Selecionar uma representação conveniente dos estados de mar durante a vida à fadiga.
- Definir um modelo estrutural apropriado.

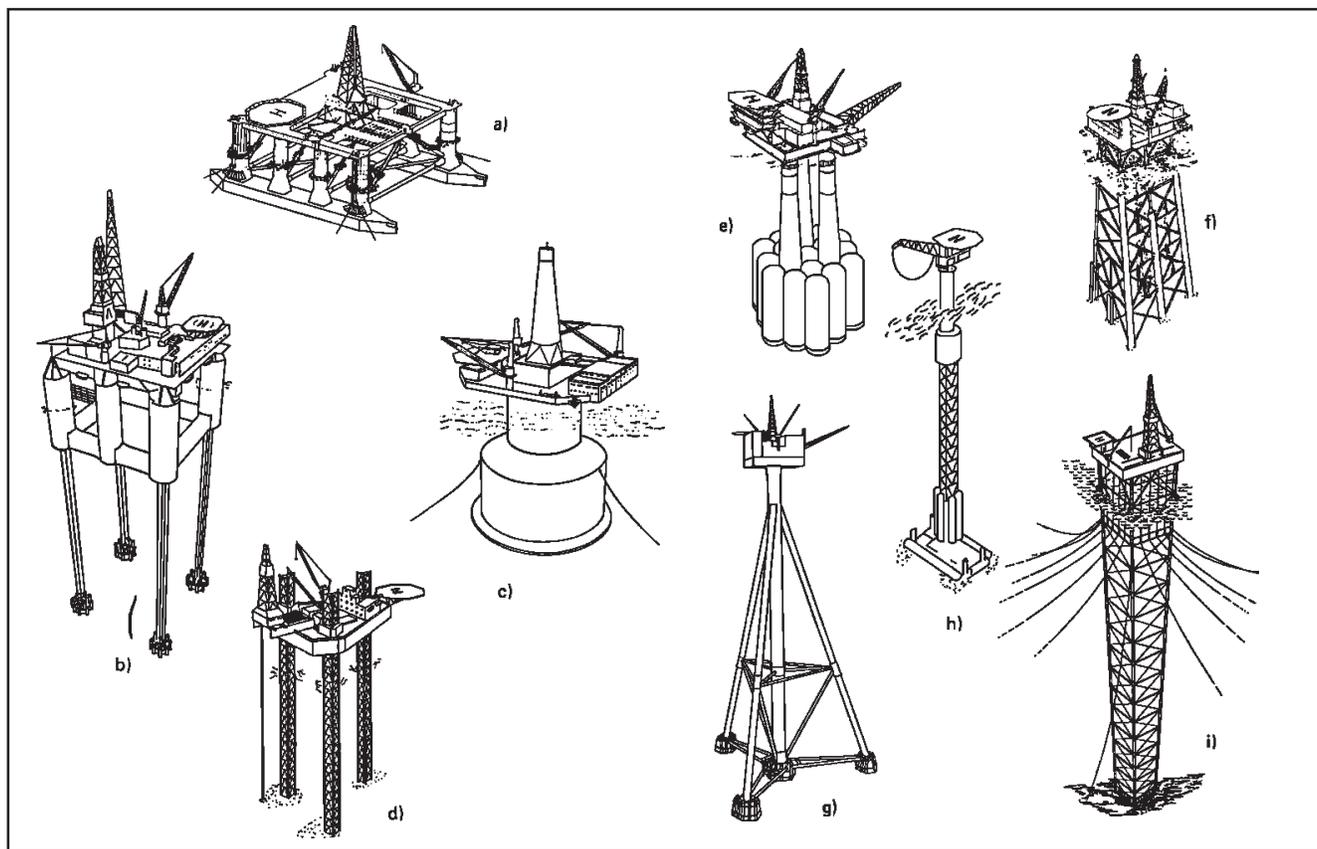


Figura 1 - Tipos de plataformas *offshore*. Ref./1/modificada. a) semissubmersível; b) de perna tracionada; c) tipo bóia; d) auto-elevatória; e) fixa por gravidade; f) tipo jaqueta; g) tripódea de aço; h) torre articulada; i) torre estaiada.

- Aplicar um método adequado de análise estrutural.
- Determinar os SCF's por análise local ou através de fórmulas paramétricas.
- Predizer a vida usando as curvas S-N associadas à regra de MINER para dano acumulado.

Os objetivos da análise são:

- Evitar que ocorra fratura por fadiga.
- Calcular a vida útil de cada elemento ou junta da estrutura.
- Estabelecer parâmetro comparativo (vida ou dano acumulado) para plano de inspeção.

Na avaliação da fadiga devem ser consideradas todas as ações que causam variação de tensões, ou seja: ondas, vento, correntes, pressão hidrostática variável, guindaste, etc.

Em uma plataforma *offshore* as cargas de ondas são as maiores fontes causadoras da fadiga.

3. Plataforma selecionada para análise

3.1 Descrição geral da plataforma

A Plataforma de Cherne 2 - PCH-2 pertence ao campo de Cherne, localizado na baía de Campos, no litoral do Es-

tado do Rio de Janeiro e sua instalação ocorreu em 1982. Trata-se de uma plataforma tipo fixa, com função básica de produção de petróleo.

As estruturas da plataforma e de sua fundação são em aço, sendo compostas de jaqueta, conveses e estacas. A configuração da jaqueta é a de um pórtico espacial de oito pernas, com membros de seção tubular circular, para vencer uma lâmina d'água de 142m.

3.2 Resultados da análise da fadiga

A análise foi do tipo determinística, para uma vida útil de 30 anos, com fator de segurança 2. Foram feitas 3 análises distintas:

- Análise pelo ADEP.
- Análise pelo ADEP com SCF's de Wordsworth.
- Análise pelo SACS com SCF's de Efthymiou.

Os resultados apresentaram as vidas sem o fator de segurança, Tabela 1. Em todos os casos, foi adotado um valor mínimo de 2,50 para os SCF's. Foi adotada a curva X' da API-RP2A que não requer atendimento de requisitos relativos à forma e ao acabamento da solda.

Para o nosso estudo, foram selecionadas 4 juntas que apresentaram vidas inferiores a 60 anos e, por isso, consta-

vam do plano de inspeção da plataforma. As juntas selecionadas estão localizadas nos seguintes níveis:

5600 : (-) 5,25m; 121 : (-) 142,00m;

429 : (-) 46,50m; 555 : (-) 19,00m.

4. Tensão de pico através de modelo em elementos finitos

4.1 Método do ponto de pico

Sabe-se que é difícil calcular a tensão no entalhe da solda em decorrência da dispersão significativa da geometria no local, aliada a diferentes tipos de imperfeições. Essa dispersão é normalmente abordada com mais eficiência através do uso de uma curva S-N apropriada. Então, para análise de projeto, é usado um procedimento numérico simplificado, de modo a dispensar a necessidade de modelos muito grandes, com malhas muito refinadas, onde a concentração de tensão, ou o fator de entalhe, devido propriamente à solda, fica incluída na curva S-N. Esse processo é denominado de método do ponto de pico.

4.2 Tensões de pico em juntas tubulares

Segundo a DNV RP-C203, Ref./2/, a análise através de elementos de casca pode ser utilizada e, então, a modelagem

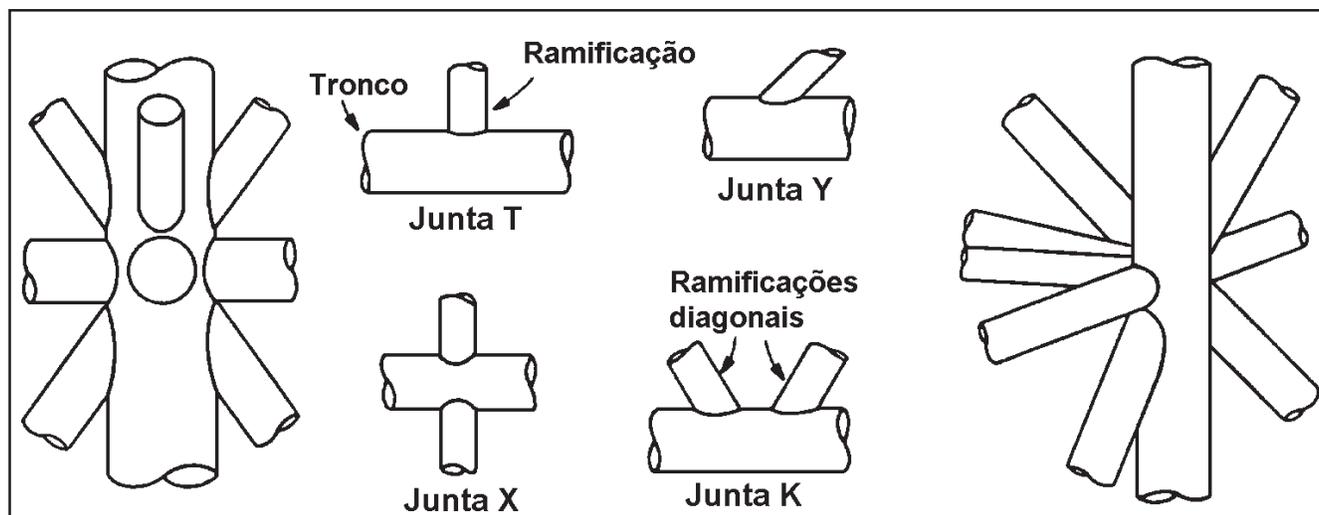


Figura 2 - Juntas tubulares simples soldadas planares e multiplanares.

da solda não é incluída no modelo. Nesse caso, a questão recai em como e onde devem ser calculadas as tensões de pico. Existem várias técnicas de extrapolações para a obtenção destas tensões e, neste trabalho serão adotadas as recomendações da DNV RP-C203.

De modo a captar adequadamente o crescimento das tensões geométricas, é importante que as tensões nos pontos de referência localizados a $t/2$ e $3t/2$ da linha de intersecção dos membros não estejam dentro do mesmo elemento. Isso implica que os elementos devem ter tamanho aproximadamente igual à espessura da parede do tubo, nas áreas de concentração de tensões.

As tensões devem ser calculadas nas superfícies das cascas de modo a levar em consideração o efeito de flexão nos elementos.

De maneira a preservar a informação da direção das tensões principais na região de pico, devem ser usadas as componentes das tensões para a extrapolação. Quando não é incluída a geometria da solda no modelo, a extrapolação deve ser feita até a linha de intersecção das superfícies médias dos membros. Esse critério define a tensão de pico, constituindo-se num método de cálculo que consiste em extrapolar as tensões nos pontos de integração gaussiana até a superfície média da chapa. Além disso, é conduzida uma extrapolação ao longo da linha de crescimento das tensões. A extrapolação final das componentes das

tensões é efetuada linearmente a partir dos pontos situados às distâncias de $t/2$ e $3t/2$ da linha de intersecção dos membros (onde t é espessura da chapa); Figura 3. Tendo sido extrapoladas as componentes das tensões no ponto de pico, devem ser calculadas as tensões principais para avaliar a fadiga.

As variações de tensões de pico de juntas tubulares devem ser combinadas com a curva T, que leva em consideração a espessura do membro.

5. Modelagem em elementos finitos

5.1 Tipos de modelagem e extrapolação

Os modelos foram constituídos inteiramente de elementos de casca localizados nas superfícies médias dos membros tubulares, de modo que as conexões são representadas pelas intersecções dessas superfícies. O critério de extrapolação recomendado determina que as componentes individuais das tensões sejam extrapoladas para, então, serem calculados os valores das tensões principais, sendo definida como tensão de pico a tensão principal máxima obtida das várias trajetórias de extrapolação. Uma variante desse critério é extrapolar as tensões principais em vez das componentes individuais das tensões, o que seria incorreto, porque as direções principais mudam ao longo das trajetórias

de extrapolação. Em geral, o uso da tensão principal máxima acarreta uma estimativa conservadora do valor de SCF e da vida à fadiga e foi, então, adotada nesse trabalho.

5.2 Programa e características dos modelos

O programa computacional ANSYS, implantado na UFOP, foi utilizado na elaboração e análise dos modelos em elementos finitos. Na geração das malhas foi utilizado o elemento de casca SHELL63, definido por 4 nós, com 6 graus de liberdade por nó. Para fins de comparações dos valores dos SCF's, as malhas foram também geradas com o elemento SHELL93, isoparamétrico, definido por 8 nós por elemento e com o mesmo número de graus de liberdade por nó.

Em todos os modelos, o comprimento de cada trecho dos membros além da intersecção foi de 3 a 3,5 vezes o seu diâmetro, de modo que as condições de contorno, a presença das chapas nas extremidades e os carregamentos aplicados nas extremidades dos membros não influíssem na distribuição das tensões nas regiões de concentrações de tensões das intersecções.

Para a determinação das variações das tensões de pico, para o cálculo da fadiga, as extremidades do tronco foram apoiadas simplesmente por apoios elásticos. As cargas foram aplicadas nas extremidades centrais de todos os membros - tronco e ramificações -, de modo que, estando a junta em equilíbrio, as reações nos apoios resultassem nulas.

5.3 Modelos em elementos finitos

Figura 4

6. Resultados

Tabela 1

7. Conclusões

- As divergências entre os resultados obtidos para as vidas à fadiga pelos

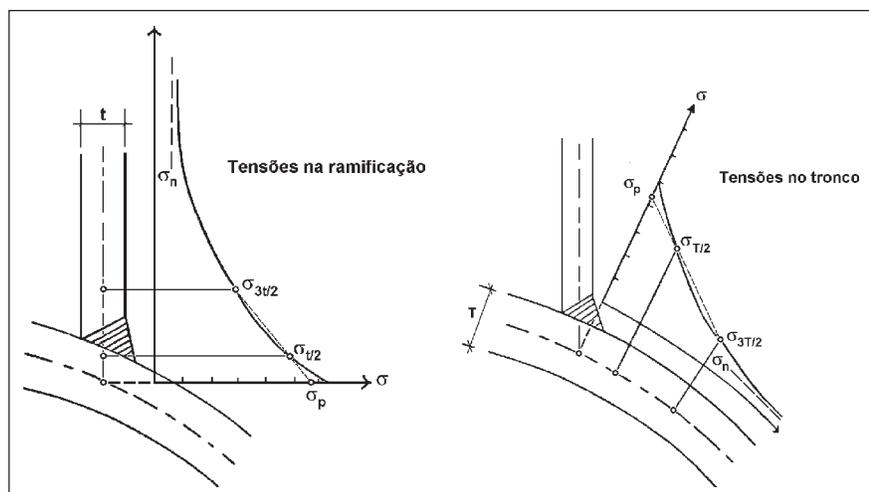


Figura 3 - Esquemas de extrapolação para tensões de pico.

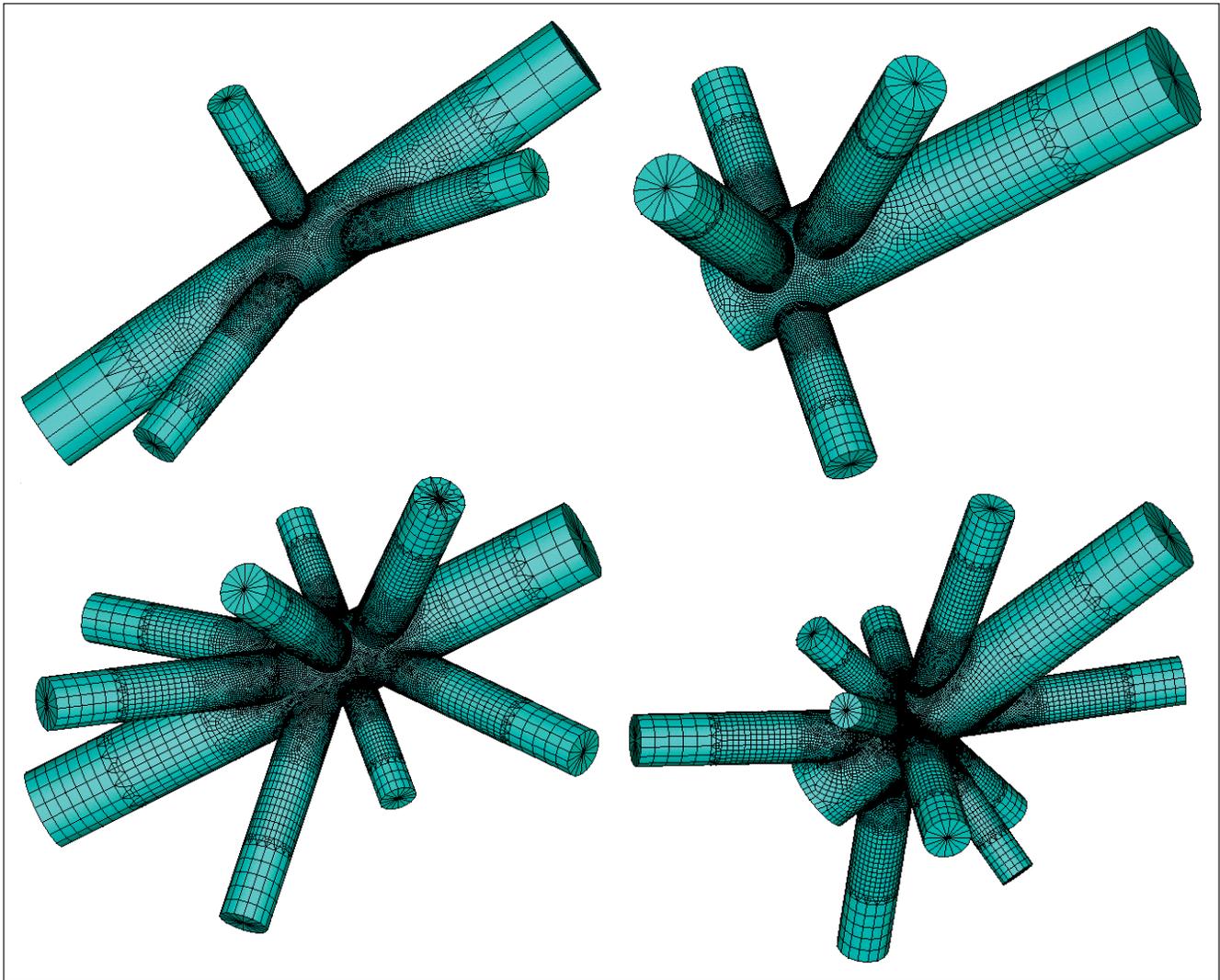


Figura 4 - MEF's das juntas 5600,121, 429 e 555.

programas ADEP e SACS e pelas análises dos MEF acontecem, não apenas pelas diferenças entre os SCF's, mas, também, pelo comportamento das juntas, que, em geral, não se enquadram integralmente nos tipos padrões em que foram classificadas pelos programas.

- A utilização dos SCF's para o cálculo da vida à fadiga envolve hipóteses simplificadoras bastante discutíveis, com conseqüências imprevisíveis nos resultados finais. Além da classificação do tipo da junta ser feita automaticamente pelos programas, fica caracterizada uma junta simples, restrita aos tipos planares existentes, sem consideração da real distribuição dos esforços em cada carregamento de onda.
- Uma significativa vantagem da avaliação da fadiga através de MEF's em relação aos processos utilizados pelos programas computacionais é que o modelo da junta engloba todos os seus membros e, para cada carregamento de onda, é considerada a real distribuição dos esforços nos membros.
- A questão crítica na avaliação da fadiga por MEF é o critério de extrapolação das tensões para obtenção das tensões de pico. Tudo indica que pesquisas são necessárias para se estabelecerem técnicas de extrapolação mais confiáveis, calibradas por resultados de ensaios, aplicáveis a modelos em superfícies médias constituídos por elementos de casca.
- A análise por elementos finitos torna-se recomendada para juntas que não apresentam tipo e/ou comportamento compatíveis com os modelos abordados pelos programas. Das 4 juntas analisadas, duas delas indicam que poderiam ser retiradas do plano de inspeção.
- A disponibilização de programas específicos e de equipamentos computacionais de maior capacidade e alta velocidade tende a tornar prática a análise através de elementos finitos, a custos acessíveis e muito inferiores ao que se estima para uma inspeção submarina.

Tabela 1 - Resultados da fadiga nas juntas 121-1 e 429-1

JUNTA	PROGRAMA	TIPO JUNTA	CURVA SN	FATORES DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES - SCF's								LOC	VIDA ÚTIL (ANOS)
				RAMIFICAÇÃO (BR)				TRONCO (CH)					
				AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL		
121-1	ADEP (1)	X	X'	(-)	(5,34)	(1,78)	(2,90)	(-)	7,30 (7,21)	2,50 (1,56)	3,30 (3,34)	-	15
	ADEP (WORD) (2)	X	X'	(-)	(6,72)	(2,24)	(3,65)	(-)	9,20 (9,08)	2,50 (1,97)	4,22 (4,21)	-	7
	SACS (EFT) (3)	X	X'	2,50 (2,24)	6,17 (6,62)	2,55 (2,52)	4,32 (4,28)	2,50 (1,12)	6,22 (668)	2,50 (1,82)	3,60 (3,58)	BR-L	25
	MEF (4)	-	X' (T)	[2,83]	[7,04]	[2,83]	[5,93]	[1,97]	[4,22]	[1,75]	[3,91]	BR-L	26 (23)
429-1	ADEP (1)	K	X'	(-)	(2,50)	(2,50)	(2,55)	(-)	2,70 (1,97)	2,50 (1,76)	3,33 (3,18)	-	999
	ADEP (WORD) (2)	K	X'	(-)	(2,75)	(2,23)	(4,06)	(-)	3,50 (1,94)	2,50 (1,76)	6,64 (4,85)	-	560
	SACS (EFT) (3)	X	X'	2,50 (2,27)	5,04 (5,00)	2,59 (2,59)	3,38 (3,38)	2,50 (1,34)	6,52 (6,62)	2,50 (1,73)	3,40 (3,40)	CH-L	31
	MEF (4)	-	X' (T)	[2,67]	[4,22]	[2,41]	[2,59]	[1,31]	[4,23]	[1,58]	[2,73]	CH-L	3267 (1955)

Notas: 1- SCF's fora do parêntese foram calculados pelos programas com comprimento do tronco L=4,81m (121) e L=10,04m (429). SCFmin=2,50.

2- SCF's dentro do parêntese calculados pelas fórmulas paramétricas com L=4,81m (121) e L=10,04m (429) e, dentro do colchete, obtidos do MEF.

(1) Fórmulas recomendadas de fatores de concentração de tensões contidas em Naess (1985), Ref./1/.

(2) Fórmulas de Wordsworth / Smedley para junta X e Kuang / Wordsworth para junta K.

(3) Fórmulas de Efthymiou, Ref./3/, com correção de tronco curto ($\alpha < 12$).

(4) Valores obtidos a partir do MEF onde L=9,15m (121) e L=14,27m (429).

Referências bibliográficas

- /1/. ALMAR-NAESS, A. *Fatigue handbook*. Offshore Steel Structure, Tapir, Trondheim, Norge: 1985. 520p.
 /2/. DET NORSKE VERITAS - RECOMMENDED PRACTICE RP-C203.

Fatigue strenght analysis of Offshore Stell Structures, Norway: 2000. 100p.

- /3/. EFTHYMIU, M. *Development of SCF formulae and generalised influence functions for use in fatigue analysis*. Recent Developments in Tubular Joint Technology, OTJ'88, 34p, London. 1988.
 /4/. HEALY, B.E., BUITRAGO, J. *Extrapolation*

procedures for determining SCF's in mid surface tubular joint models. Tubular Structures VI. In: GRUNDY, HOLLGATE & WONG (Ed.), Rotterdam: 1994. v. 6, p. 651-659.

- /5/. PETROBRAS. *Sistema de reanálise estrutural da plataforma de Cherne 2*, Memórias de Cálculo e Relatórios. Rio de Janeiro: 1995.



Fale conosco
www.rem.com.br
remjorio@ouropreto.com.br