

AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ELOS DE AMARRA DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA SUBMETIDOS A ENSAIOS DE FADIGA

Jorge Carlos Ferreira Jorge, jorgecfjorge@gmail.com¹

Luís Felipe Guimarães de Souza, lfelipe@cefet-rj.br¹

Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco, calas@cefet-rj.br¹

Paulo Pedro Kenedi, pkenedi@cefet-rj.br¹

Jorge Luiz Coutinho Diniz, jorge.diniz@flukeengenharia.com.br²

Olavo Ribeiro dos Santos Filho, olavo.ribeiro@flukeengenharia.com.br²

¹CEFET/RJ - PPEMM - Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica e Tecnologia de Materiais - Av. Maracanã, 229, 20271-110 - Rio de Janeiro - RJ – Brasil

²Fluke Engenharia Ltda, Av. das Américas 3434, bloco 2, sala 201, 22640-102 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil

***Resumo:** A confiabilidade da operação offshore de plataformas semi-submersíveis depende fundamentalmente da segurança das linhas de ancoragem, as quais são compostas por vários elementos como amarras de aço, cabos de aço ou poliéster e âncoras. É de conhecimento geral que as amarras são críticas em relação à integridade da linha, devendo ter o seu comportamento monitorado, de modo a evitar falhas e suas conseqüências. O presente trabalho apresenta os resultados obtidos em ensaios de fadiga realizados em elos de amarra integrais, assim como a avaliação das propriedades mecânicas destas através da retirada de corpos de prova para a investigação da degradação das propriedades devido aos ciclos de fadiga. Os resultados obtidos em elos de amarras de 105 mm de diâmetro, que foram testados até 63.000 ciclos, mostraram que não ocorreram mudanças significativas das propriedades mecânicas devido aos ciclos de fadiga, o que caracteriza a necessidade da realização de ensaios de fadiga em elos integrais para uma avaliação confiável da vida residual.*

***Palavras-chave:** amarras de aço, fadiga, propriedades mecânicas*

1. INTRODUÇÃO

A confiabilidade da operação offshore de plataformas semi-submersíveis, depende fundamentalmente da segurança das linhas de ancoragem, as quais são compostas por vários elementos como amarras de aço, cabos de aço ou poliéster e âncoras. Sendo consideradas como o ponto crítico em relação à integridade da linha, as amarras devem ser monitoradas de modo a evitar falhas e suas conseqüências. Considerando esta questão, as sociedades classificadoras navais (DNV,1993; ABS,1999) exigem que, a cada 5 anos de operação, as amarras sejam removidas e inspecionadas de acordo com os requisitos da Norma API RP 2I (API RP 2I, 1997), para que o seguro das plataformas seja mantido. No entanto, embora de relevância, estas inspeções periódicas são incapazes de prever a vida útil remanescente das amarras, o que não impede uma possível ocorrência de acidente entre inspeções.

Existe um consenso geral de que a única forma de estimar a vida residual de amarras é através de ensaios de fadiga, realizados em elos integrais, retirados das amarras de forma periódica. Estes ensaios já foram executados em amarras novas.

Considerando o acima exposto, decidiu-se iniciar um programa de pesquisa envolvendo o estudo de amarras usadas, a partir da retirada de elos a cada parada de manutenção. Ainda neste caso, existe uma forte resistência para a realização destes ensaios, dado o número de elos necessários para obtenção de um resultado estatisticamente confiável e ao tempo relativamente longo destes ensaios. Assim, entende-se que a realização de ensaios de laboratório em corpos-de-prova extraídos de um único elo permitiria a preparação de um banco de dados adequado em um tempo razoável a um baixo custo, para estimativa de vida residual de todas as amarras em operação offshore, o que justificaria a presente proposta. O presente trabalho faz parte de um amplo projeto de pesquisa que dá continuidade e complementa os resultados apresentados em artigos anteriores, [Vogel *et al.*, 2000; Medeiros, 2003; Barbosa, 2004; Costa, 2006; Pacheco *et al.*, 2002, 2003a, 2003b, 2004; Jorge *et al.*, 2001; Jorge *et al.*, 2006; Soares, 2007], enfocando os resultados obtidos em ensaios de fadiga em elos de amarra integrais, realizados no CENPES/PETROBRAS, assim como a avaliação das propriedades mecânicas destes mesmos elos, para verificação da possível degradação das propriedades mecânicas devido aos ciclos de fadiga através de ensaios mecânicos periódicos de corpos de provas pequenos retirados de um único elo.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios foram realizados utilizando-se elos com malhete, cujo aspecto geométrico e regiões selecionadas para retirada de corpos-de-prova para ensaios mecânicos são apresentadas na Figura 1.

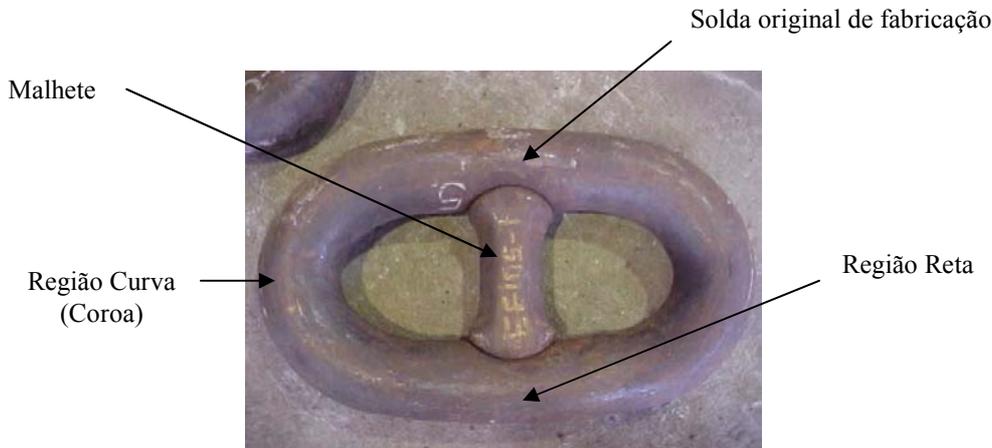


Figura 1. Indicação das regiões de um elo de amarra com malhete e as respectivas regiões de onde foram retirados corpos-de-prova para ensaios mecânicos.

2.1. Ensaios de Fadiga

Foram utilizados 5 elos de amarra com 105 mm de diâmetro grau R3, para ensaios de fadiga. Adicionalmente, os elos foram lixados por lixadeira manual para melhoria do acabamento superficial, de forma a equalizar as condições superficiais de teste. A Figura 2 mostra o detalhe dos elos.



Figura 2. Elos para ensaio de fadiga.

Os elos foram submetidos a ensaio de fadiga no Centro de Pesquisas da Petrobras – CENPES, em uma máquina com capacidade de 500 tonf., ciclados entre 80 e 360 tonf. O comportamento em fadiga foi analisado pelo método $T-N$, através da expressão (1) conforme a norma API 2SK (API 2SK, 1997), a qual é apresentada abaixo:

$$N \cdot R^m = K \quad (1)$$

onde, N é o número de ciclos, R é a razão da variação de carga atuante em relação à carga de ruptura nominal, m é a inclinação da curva $T-N$ e K é a interseção a curva $T-N$. Os fatores m e K , para elos comuns são: $m = 3,36$, $K = 370$. De acordo com (1) e considerando as condições experimentais utilizadas, pode-se fazer as seguintes observações: Para as condições experimentais, a carga de ruptura da amarra Grau R3 com 105mm de diâmetro seria de 892,56 tonf (NBR, 1996) e o valor de R nas condições de teste seriam $((360 - 80)/892,56) \times 100\% = 31,37\%$. A estimativa do número

mínimo de ciclos para elos comuns utilizando a expressão $N_0,3137^{3,36} = 370$ seria de $N = 18.193$ ciclos. O desempenho dos elos submetidos a ensaio de fadiga é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Resultado dos Ensaio de Fadiga

IDENTIFICAÇÃO	NÚMERO DE CICLOS	POSIÇÃO DA FRATURA
1	Sem fadiga	---
2	55.000	Início da curva
3	63.000	Não rompeu
4	63.000	Não rompeu
5	63.000	Não rompeu
6	63.000	Não rompeu

Dos 5 elos submetidos ao ensaio de fadiga apenas o elo 2 apresentou ruptura com 55.000 ciclos, valor bem superior ao estimado (18.193 ciclos). Os demais ensaios foram interrompidos após 63.000 ciclos. Mesmos nestes ensaios em que a ruptura não ocorreu foi observado a formação de trincas. A Figura 3 mostra o detalhe de um elo 2 rompido no ensaio.



Figura 3. Detalhe do elo 2 após ensaio de fadiga, rompido em 55.000 ciclos.

A Figura 4 mostra os elos que não romperam nos ensaios de fadiga antes e após a realização de inspeção com líquido penetrante (LP). A Figura 4b mostra a ocorrência de trincas na região da coroa do elo 3. A Figura 4d mostra a ocorrência de trincas no início do trecho reto do elo 4.

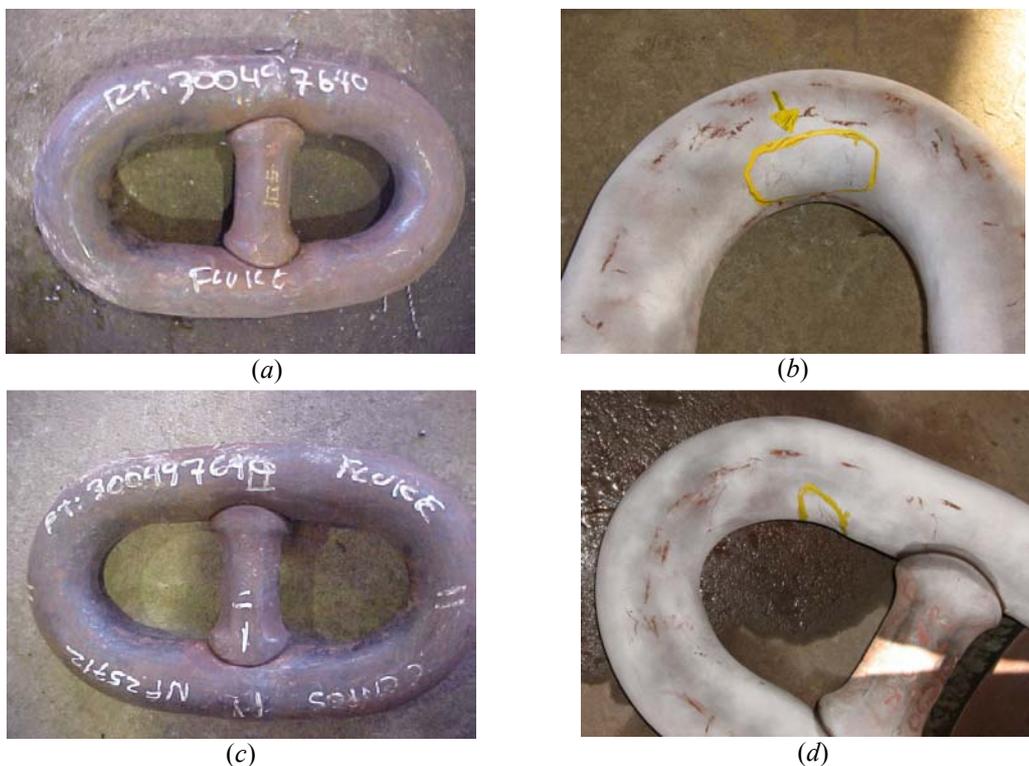


Figura 4. Detalhe após ensaio de fadiga interrompido após 63.000 ciclos (não rompido): (a) Elo 3; (b) Elo 3 após inspeção por LP com ocorrência de trincas na região da coroa; (c) Elo 4; e (d) Elo 4 após inspeção por LP com ocorrência de trincas no início do trecho reto.

A Figura 5 mostra os outros elos que não romperam nos ensaios de fadiga, e que foi observada a formação de trincas em regiões críticas.

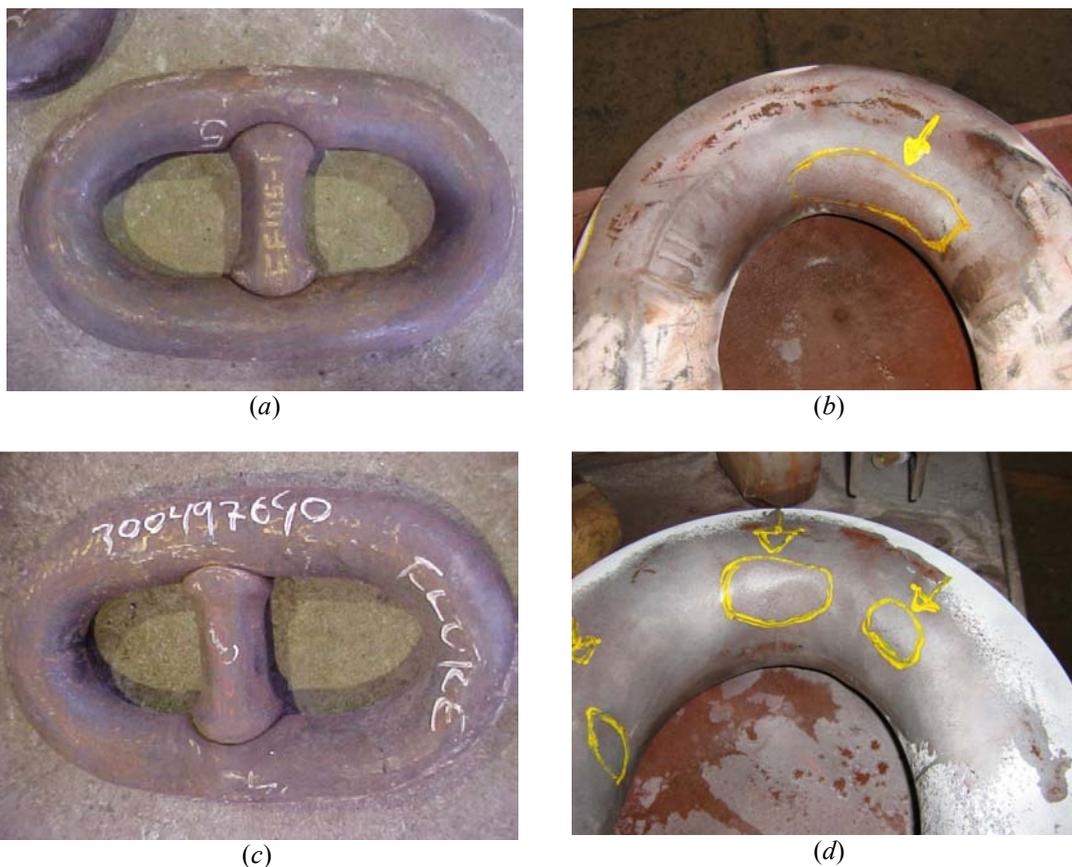


Figura 5. Detalhe após ensaio de fadiga interrompido após 63.000 ciclos (não rompido): (a) e (b) elo 5 ; (c) e (d) Elo 6 após inspeção por LP onde foi observado a ocorrência de trincas na região da coroa.

2.2. Ensaios Mecânicos

Foram removidos corpos-de-prova para ensaios de tração, de impacto Charpy-V e de dureza, considerando-se as regiões denominadas conforme a Figura 1: Reta, curva (coroa) e da solda original de fabricação.

2.2.1. Ensaios de Tração

Foram realizados ensaios de tração à temperatura ambiente, em corpos-de-prova padronizados em conformidade com o Livro de Regras da Sociedade Classificadora ABS (ABS, 1999).

A Tabela 2 mostra os resultados dos ensaios de tração realizados à temperatura ambiente, onde se observa que todos os resultados se encontram acima do mínimo requerido para o aço em estudo.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de tração.

CONDIÇÃO	POSIÇÃO	LE(MPa)	LR(MPa)	RA(%)
Sem fadiga	Solda original	597	723	55,65
	Coroa	647	721	65,47
	Metal Base	581	716	67,67
55.000 ciclos	Solda original	714	731	59,52
	Coroa	637	741	66,03
	Metal Base	534	720	69,00
63.000 ciclos	Solda original	554	697	59,75
	Coroa	630	719	66,89
	Metal Base	574	716	65,70
Mínimo exigido [2]		410	690	50,0

2.2.2. Ensaios de Impacto Charpy-V

Foram realizados ensaios de impacto Charpy-V à temperatura de 0°C, em corpos-de-prova normalizados (10 x 10 x 55 mm) de acordo com a norma ASTM A-370 e retirados longitudinalmente ao elo e transversalmente a região da solda, nas mesmas posições de retirada dos corpos-de-prova de tração.

A Tabela 3 mostra os resultados dos ensaios de impacto realizados à 0°C, onde se nota que todos os resultados apresentam valores superiores ao mínimo requerido para o aço em estudo. Nota-se ainda que os resultados da solda original, foram os menores em comparação as outras regiões do elo.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de impacto a 0°C

CONDIÇÃO	POSIÇÃO	1º ENSAIO	2º ENSAIO	3º ENSAIO	MÉDIA
Sem fadiga	Solda original	64,0	67,0	62,5	64,5
	Metal Base	95,5	77,5	87,0	86,7
	Coroa	72,5	91,0	108,0	90,5
55.000 ciclos	Solda original	54,0	67,0	90,5	70,5
	Metal Base	103,5	107,0	105,0	105,2
	Coroa	110,0	98,5	98,0	102,2
63.000 ciclos	Solda original	74,5	64,5	59,0	66,0
	Metal Base	86,5	111,5	108,0	102,0
	Coroa	86,5	103,0	76,0	88,5
Mínimo exigido [2]					60,0

2.2.3. Ensaios de Dureza

Foram realizados ensaios de dureza Vickers, com a aplicação de carga de 10 Kgf, em corpos-de-prova transversais, nas posições correspondentes aos entalhes dos corpos-de-prova de impacto Charpy-V.

A Tabela 4 mostra os resultados dos ensaios de dureza realizados, onde se nota uma homogeneidade dos resultados para cada região do elo.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de dureza (HV10).

CONDIÇÃO	POSIÇÃO	MÉDIA
Sem fadiga	Solda original	208
	Metal Base	249
	Coroa	254
55.000 ciclos	Solda original	206
	Metal Base	247
	Coroa	254
63.000 ciclos	Solda original	206
	Metal Base	248
	Coroa	254

3. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS

Um modelo simples baseado no método de elementos finitos foi utilizado para avaliar a solitação mecânica do elo através de uma análise de tensões. O modelo considera o comportamento linear-elástico do elo e foi desenvolvido utilizando o pacote comercial Ansys/Workbench v12 (Ansys, 2010). Foi aplicado um carregamento de 360 tonf nas duas extremidades do elo com malhete, através de uma distribuição de pressão na área correspondente ao contato entre os elos.

A Figura 6a mostra a malha utilizada nas simulações numéricas, obtida após a discretização do modelo que contém 158.111 nós e 45.872 elementos SOLID185 (elemento tridimensional com três graus de liberdade de deslocamento por nó). A Figura 6b apresenta as condições de contorno (aplicadas na região B - em cor verde) e o carregamento (aplicado nas regiões A e C - cor vermelha). O carregamento é aplicado através do comando "forças remotas", o qual transfere uma pressão equivalente para os elemento na região selecionada, alinhada com a direção do carregamento. As Figuras 6c-e apresentam os resultados numéricos da análise de tensões desenvolvida através do método de elementos finitos, mostrando a distribuição das tensões equivalentes de *von Mises* (Figs. 6c e 6d) e a tensão principal σ_1 (Fig. 6e).

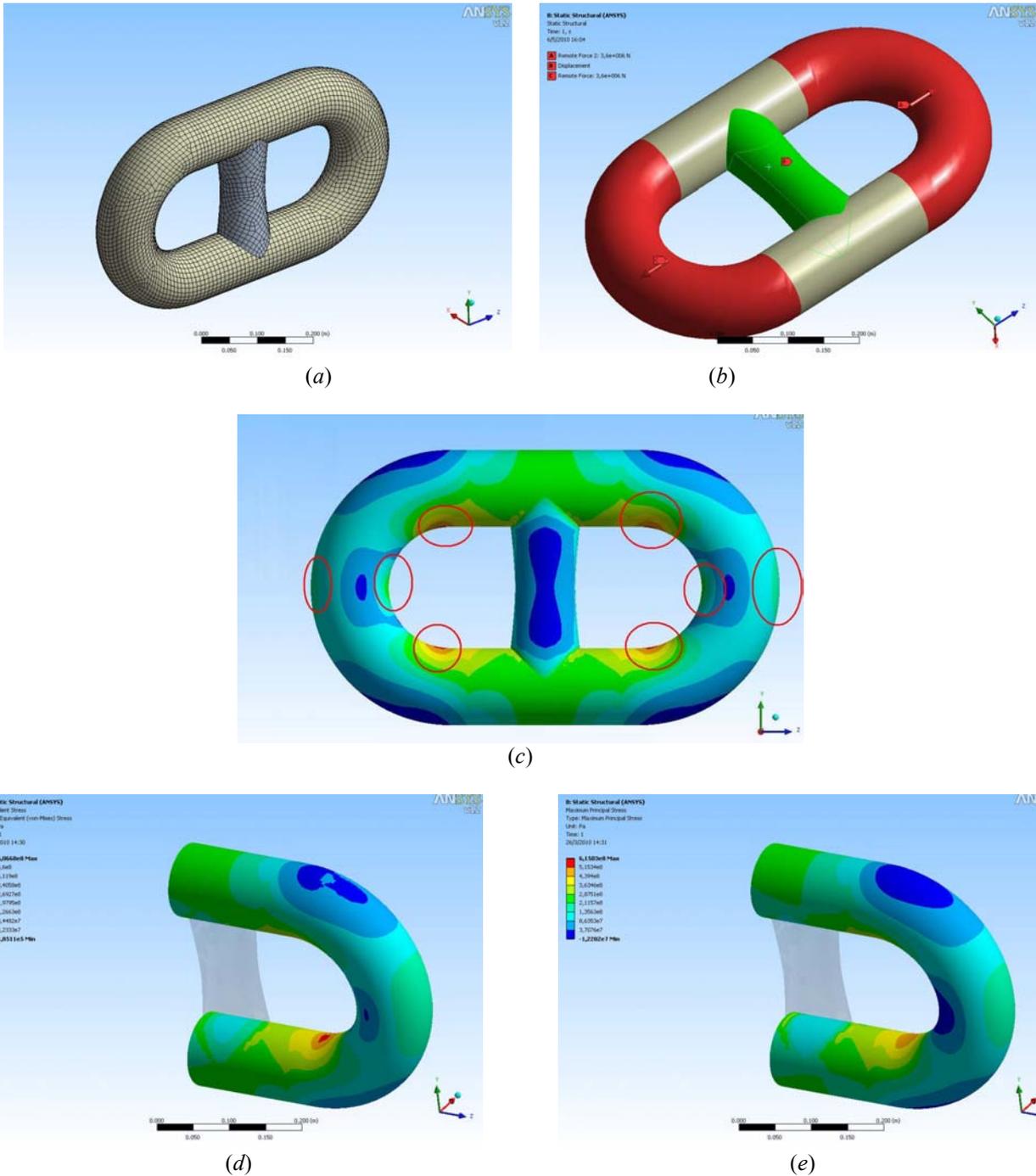


Figura 6. Malha do modelo (a). Condições de contorno e carregamento (b). Distribuição de tensões de *von Mises*: (c) vista lateral do elo e (d) detalhes da região da coroa. Distribuição da tensão principal σ_1 (e).

Pode-se observar a partir destes resultados que as regiões da coroa e de início do trecho reto são as que apresentam um aumento localizado dos valores de tensão. Isto encontra correspondência com os resultados da inspeção por LP que revelou a existência de trincas nestas regiões conforme mostrado nas Figuras 4 e 5.

Na análise por elementos finitos, verificou-se que a região que apresenta as maiores tensões corresponde à região interna do elo na zona de transição entre o trecho reto e a coroa. Adicionalmente podem ser verificados outras regiões com níveis de tensões relativamente altos, conforme mostrado na Figura 6. Notadamente, fazem-se necessárias análises complementares não lineares, considerando contato entre elos, tensões residuais dos processos e fabricação e possíveis amassamentos da operação (Pacheco *et al.*, 2002, 2003a, 2003b, 2004).

Outro fator importante que deve ser observado é que, embora a norma API 2I (API RP 2I, 1997), recomende a inspeção periódica dos elos de amarra por partículas magnéticas de forma a verificar a ocorrência de iniciação de defeitos como indicativos de prováveis problemas de fadiga nos elos, não são estabelecidas referências quanto à posição crítica para ocorrência destes defeitos, tratando apenas da inspeção na região da solda original do elo, onde o nível de tensões é bastante inferior aos verificados nas regiões de transição entre o trecho reto e a coroa bem como a região

central da coroa, regiões estas que não são verificadas rotineiramente nas inspeções periódicas. Pode-se então considerar, que a inspeção das áreas críticas poderá trazer uma contribuição importante para a avaliação da vida em fadiga.

As Figuras de 7 a 9, mostram a evolução das propriedades mecânicas com a vida consumida em fadiga dos corpos-de-prova retirados dos elos ensaiados, onde se verifica que não ocorreram variações importantes das propriedades que possam ser associadas ao dano em fadiga. A Figura 7 mostra a variação do limite de escoamento em função dos ciclos de carregamento impostos. A Figura 8 mostra a variação do limite de resistência em função dos ciclos de carregamento impostos. Finalmente a Figura 9 mostra a variação da energia absorvida em função dos ciclos de carregamento impostos.

Pode-se notar ainda que, os resultados obtidos apresentam valores superiores ao mínimo exigido para o aço em estudo, mesmo após os ensaios de fadiga. Em relação aos ensaios de impacto cumpre observar que, a região da solda original é a que apresenta os menores valores e energia absorvida quando comparada às outras regiões, mas atendendo ao valor mínimo exigido, sendo isto uma característica do processo de fabricação do elo. Considerando ainda que, dentre os efeitos na vida em fadiga a própria natureza do material possa ter a sua contribuição, sem necessariamente ser a mais importante e visto a influência do acabamento superficial é sabidamente determinante, para os resultados aqui obtidos, verifica-se que os ensaios mecânicos não revelam haver uma tendência efetiva de degradação de propriedades mecânicas do material com a vida consumida em fadiga. Dessa forma, os resultados indicam que o procedimento de se tentar avaliar o dano simplesmente através destes ensaios de corpos-de-prova retirados de elos parece não ser efetivo para a predição de vida em fadiga de elos de amarras de aço grau R3. Em outras palavras, continua sendo necessário a realização de ensaios de fadiga em elos integrais para que seja possível uma predição com confiabilidade da vida remanescente das amarras em operação.

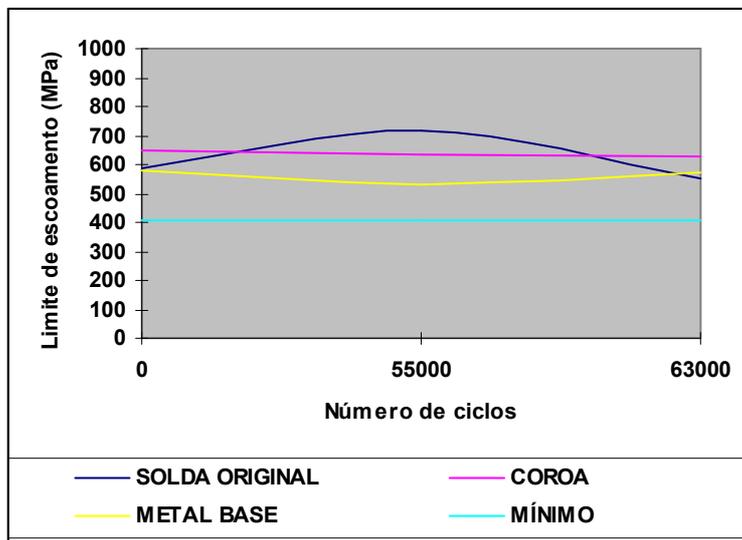


Figura 7. Variação do limite de escoamento com a vida em fadiga.

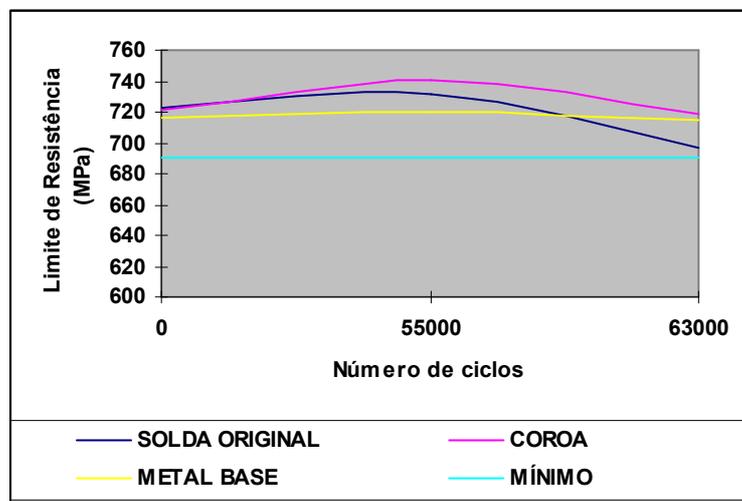


Figura 8. Variação do limite de resistência com a vida em fadiga.

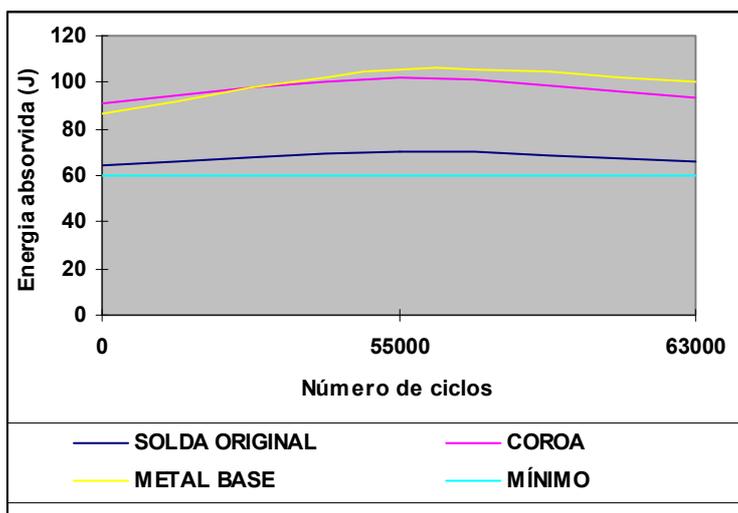


Figura 9. Variação da energia absorvida com a vida em fadiga.

Um último aspecto a considerar, de igual importância, diz respeito aos critérios de monitoramento da vida útil de elos de amarra, no qual, não se avalia através de ensaios não destrutivos as regiões de tensões críticas dos elos. Isto poderia levar a conclusões equivocadas, pois embora a região da solda original do elo seja a mais crítica em termos de material, existem regiões do elo mais críticas em termos de tensões. O acabamento superficial e efeito de contato entre elos deveriam ser igualmente levados em conta, aprimorando os códigos que regem estas inspeções.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta os resultados obtidos em ensaios de fadiga realizados em elos de amarra integrais de 105 mm de diâmetro, assim como a avaliação das propriedades mecânicas destas através da retirada de corpos de prova para a investigação da degradação das propriedades devido aos ciclos de fadiga. Os resultados obtidos mostraram que:

- Os elos testados apresentaram vida em fadiga superior à prevista pelo método $T-N$;
- As propriedades mecânicas de elos de aço grau R3 não sofrem alterações que permitam evidenciar uma correlação com a vida consumida em ensaios de fadiga;
- No caso de amarras de aço grau R3, faz-se necessária a realização de ensaios de fadiga em elos integrais para uma avaliação confiável da vida remanescente destas amarras e;
- Os critérios de inspeção periódica de elos de amarra devem ser complementados levando em consideração as regiões críticas em termos de tensão portanto mais susceptíveis a ocorrência de falhas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às seguintes Instituições pelo apoio prestado na execução do presente trabalho: CEFET/RJ, Fluke Engenharia Ltda., CENPES/PETROBRAS, CNPq e FINEP.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Bureau of Shipping, 1999, "Certification of offshore mooring chain", New York.
- ANSYS, 2010, "Ansys Manual", Release 12, Ansys Inc.
- API Recommended Practice 2I, 1997, "In-Service Inspection of mooring hardware for floating drilling units", February.
- API Recommended Practice 2SK, 1997, "Recommended practice for design and analysis of stationkeeping systems for floating structures", march.
- Barbosa, R.P., 2004, "Modelagem do efeito das tensões residuais na vida em fadiga de amarras de aço", Dissertação de Mestrado em Tecnologia., CEFET/RJ, agosto.
- Costa, L.V., 2006, "Análise de propriedades mecânicas de elos de amarras de aço API 2F submetidos a ensaio de fadiga", Dissertação de Mestrado em Tecnologia, CEFET/RJ, junho.
- Det Norske Veritas, 1993, "Certification of offshore mooring chain – Certification Notes 2.6".
- Jorge, J.C.F. *et al.*, 2001, "Influence of welding procedure on the microstructure and mechanical properties of an ASTM A 148 GR. 80 50 steel anchor schackle", In: Jornadas SAM-CONAMET, AAS, Set, Argentina, 2001.
- Jorge, J.C.F. *et al.*, 2006, "Desenvolvimento de procedimento de reparo por soldagem de amarras de aço para ancoragem de plataformas de petróleo - Parte III – Comportamento em fadiga", Anais do XXXII Congresso Nacional de Soldagem, Belo Horizonte.

- Medeiros, L.F.F., 2003, “Estudo da vida em fadiga de amarras de aço API-2F utilizando a técnica de flexão rotativa”, Dissertação de Mestrado em Tecnologia, CEFET/RJ, outubro.
- NBR, 1996, "NBR 13715:1996 - Estruturas Offshore – Amarras – Requisitos", Setembro 1996, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Pacheco, P.M.C.L.; Kenedi, P.P. and Jorge, J.C.F., 2002, “Elastoplastic Analysis of the Residual Stress in Chain Links”, OMAE'2002 - 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Oslo, Norway.
- Pacheco, P.M.C.L., Kenedi, P.P., Jorge, J.C.F., Gama, H.S., Savi, M.A. e Paiva, A.M.C., 2003a, “Modeling Residual Stresses in Offshore Chain Links using Finite Element Method”, COBEM-2003, 17th International Congress of Mechanical Engineering, São Paulo.
- Pacheco, P.M.C.L., Kenedi, P.P., Jorge, J.C.F. and Paiva, A.M.C., 2003b, “Analysis of the Influence of Mechanical Properties on the Residual Stress in Offshore Chain Links Using the Finite Element Method”, OMAE'2003 - 22st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Cancun, Mexico.
- Pacheco, P.M.C.L., Kenedi, P.P., Jorge, J.C.F., Savi, M.A. and Santos, H.G., “Finite Element Residual Stress Analysis Applied to Offshore Studless Chain Links”, 2004, OMAE'2004 - 23st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vancouver, Canada.
- Soares, F.S., 2007, “Efeito do ciclo de fadiga por flexão rotativa nas propriedades mecânicas de aço R4”, Dissertação de Mestrado em Tecnologia, CEFET/RJ, junho.
- Vogel, J.P., 2000, “Contribuição à metodologia de estudo de viabilidade técnica e econômica – EVTE. Uma aplicação para o setor petrolífero”, Dissertação de Mestrado em Tecnologia, CEFET/RJ, maio.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH STRENGTH STEEL CHAIN LINKS AFTER FATIGUE TESTS

Jorge Carlos Ferreira Jorge , jorgecfjorge@gmail.com¹
Luís Felipe Guimarães de Souza , lfelipe@cefet-rj.br¹
Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco, calas@cefet-rj.br¹
Paulo Pedro Kenedi, pkenedi@cefet-rj.br¹
Jorge Luiz Coutinho Diniz, jorge.diniz@flukeengenharia.com.br²
Olavo Ribeiro dos Santos Filho, olavo.ribeiro@flukeengenharia.com.br²

¹CEFET/RJ - PPEMM - Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica e Tecnologia de Materiais - Av. Maracanã, 229, 20271-110 - Rio de Janeiro - RJ – Brazil

²Fluke Engenharia Ltda, Av. das Américas 3434, bloco 2, sala 201, 22640-102 – Rio de Janeiro – RJ – Brazil

Abstract. *The reliability of the operation of offshore platforms is crucially dependent on the mooring lines, which are composed of different elements such as steel chains, steel cables, anchors and polyester ropes. It is well known that the steel chains are the critical part for the integrity of the mooring line, and, consequently, their behavior should be monitored in order to avoid a failure and the inevitable consequences of this fact. This paper presents the results of fatigue tests carried out in full chain links, as well as the evaluation of mechanical properties of these same links, to check the possibility of degradation of properties due to fatigue cycle. The results in chain links of 105 mm in diameter that were cycled to 63,000 cycles showed that there was no significant change in mechanical properties due to the cycle of fatigue, which characterizes the need to perform fatigue tests on links for full reliable assessment of residual life.*

Keywords: *steel chains, fatigue, mechanical properties*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.