



## 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

### RESISTÊNCIA À FADIGA DE JUNTAS SOLDADAS DE TUBULAÇÕES DE AÇO UTILIZADAS EM EXPLORAÇÃO E TRANSPORTE DE PETRÓLEO

Albuquerque, M.C.S.<sup>1</sup>, Maciel, T.M.<sup>2</sup>, Santos, M.A.<sup>3</sup>, Lima, C.Z.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> UFCG/CCT/DEM, Aprígio Velloso, 882, CEP: 58109-970, cleaalbuquerque@uol.com.br

<sup>2,3</sup> UFCG/CCT/DEM, Aprígio Velloso, 882, CEP: 58109-970, theo@dem.ufpb.br,  
santos@dem.ufpb.br

<sup>4</sup> UFCG/CCT/DEM, Aprígio Velloso, 882, CEP: 58109-970, czl@bol.com.br

**Resumo** – Componentes soldados como risers, utilizados em exploração e transporte de petróleo, estão sempre sujeitos ao risco de fraturarem por fadiga. Muitos fatores influenciam o seu comportamento à fadiga, entre os quais, a presença de descontinuidades geométricas e os níveis das tensões residuais remanescentes do processo de soldagem. Este trabalho tem como objetivo avaliar a resistência à fadiga de juntas soldadas de tubulações de aço API 5L-X60 utilizadas em exploração e transporte de petróleo, através do levantamento da curva SN, analisando-se os resultados em função da presença de defeitos e do perfil de tensões residuais na raiz da solda, local de mais intensa concentração de tensões.

Palavras-Chave: resistência à fadiga, curva SN, juntas soldadas, risers de aço API 5L-X60

**Abstract** – Structures as risers used to petroleum exploration and transport are always submitted to fracture by fatigue, mainly in the welded joints, due to cyclical loading. Many factors influence their fatigue performance, among which can be mentioned the presence of geometric discontinuities and the levels of residual stresses produced during the welding process. This work aims at evaluating the fatigue resistance of API 5L-X60 steel risers welded joints used to petroleum exploration and transport, through the rising of the SN curve. The results will be analyzed in function of presence of defects and of residual stresses profile in the weld root, place of higher stress concentration.

Keywords: fatigue resistance; SN curve; welded joints; steel risers API 5L-X60;

## 1. Introdução

Fadiga constitui um evento indesejável em qualquer tipo de estrutura, entretanto a sua ocorrência em risers, trechos verticais de tubulações compreendidos entre o solo marinho e a plataforma, é ainda pior devido às suas condições de operação. A ocorrência de falhas advinda deste mecanismo de acúmulo de danos pode danificar grandes áreas ambientais e comunidades, além de causar sérios prejuízos econômicos à empresa produtora.

Estes componentes apresentam, ao longo de seu comprimento, depósitos de soldas circunferenciais que, em função da geometria, uma vez que é impossível garantir a sua uniformidade em todos os pontos, podem dispor de locais em potencial para a existência ou iniciação de trincas, como porosidades, mordeduras, inclusões não metálicas, e desalinhamentos (Cheng et al., 1996, Reemsnyder et al., 1992, Branco, 1986, Berge, 1985, Booth & Wylde, 1978, Gurney & Johnston, 1978).

Nas juntas soldadas, os fatores que mais influenciam a vida em fadiga são as tensões residuais, remanescentes do processo de soldagem, os efeitos geométricos dos perfis de solda e a inevitável presença de defeitos, que se tornam muito mais críticos quando são superficiais e lineares, ao invés de volumétricos (Zeemann, 1998).

O objetivo deste trabalho é avaliar a resistência à fadiga de juntas soldadas de risers de aço API 5L-X60 utilizados em exploração e transporte de petróleo, através do levantamento da curva SN. Os resultados serão analisados em função da presença de defeitos e do perfil das tensões residuais.

## 2. Material e Procedimento Experimental

### 2.1. Material

O material utilizado para o desenvolvimento deste trabalho consistiu de risers de aço API 5L-X60 utilizados em exploração e transporte de petróleo, com 16 mm de espessura. Estas estruturas foram cedidas pelo Centro de Pesquisa da PETROBRAS sob a forma de meias canas previamente soldadas transversalmente em um chanfro em V pelo processo de soldagem ao arco elétrico com eletrodo revestido. A soldagem foi feita com um número mínimo de 16 passes, na posição 5G (vertical descendente), usando dois tipos de eletrodos: AWS E8010-G na raiz e no passe quente e AWS E9018-G nos passes de enchimento e de acabamento, ambos com 4 mm de diâmetro.

Na Tabela 1 é apresentada a composição química do metal de solda e do metal de base. Estão inclusas, na mesma tabela, as propriedades mecânicas do metal de base.

Tabela 2 – Composição química do metal de solda (MS) e do metal de base (MB) e propriedades mecânicas do MB

Amostra	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%	V%	Al%	Nb%	Ti%	Cu%
MS	0,10	0,48	1,32	0,013	0,009	-	1,44	0,016	0,004	0,004	-	0,020	0,040
MB	0,12	0,27	1,48	0,012	0,008	-	0	0,032	0,048	0,039	0,041	0,009	0,006
Tensão limite de escoamento = 459,59 MPa    Tensão limite de resistência = 604,46 MPa    Alongamento = 37,33%													

### 2.2 Procedimento Experimental

Na Figura 1 é exibida a foto do corpo de prova utilizado nos ensaios de fadiga, segundo as normas da ASTM E-468 – 90 (1998) e E-468-96 (1996).



Figura 1 – Corpo de prova para ensaio de fadiga.

A convexidade, definida como a medida do ângulo formado entre o metal de solda e o metal de base foi feita com auxílio de um projetor de perfil e também através de um goniômetro de precisão na raiz da solda, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 2 (a). As tensões residuais internas longitudinais (y) e transversais (x) à raiz da solda foram determinadas por Raios-X, na Fundação COPPETEC-UFRJ, utilizando-se o equipamento portátil Raystress, conforme ilustração exibida na Figura 2 (b).



Figura 2 – Ilustrações esquemáticas (a) ângulo de convexidade medido na raiz da solda; (b) locais da raiz da junta soldada onde as medidas de raios-X foram conduzidas.

Os ensaios de fadiga foram realizados de acordo com a norma da ASTM E 468-90 (1998) à temperatura ambiente em uma máquina de ensaios servo-hidráulica, modelo MTS 810, com capacidade de carga de 100 kN, utilizando-se onda senoidal, amplitude de carga constante, frequência variando de 10 a 12 Hz e razão de tensão  $R = 0.1$ . A curva SN foi levantada com base no tratamento estatístico da norma da ASTM E739-91 (1998).

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Medidas de Convexidade

Foram identificadas amostras com discontinuidades geométricas na raiz da solda e com um perfil de raiz mais uniforme. A Figura 3 apresenta fotos dos perfis das amostras com as descrições acima citadas.



Figura 3 – Fotos das amostras com (a) discontinuidade geométrica na raiz da solda; (b) perfil de raiz uniforme.

A discontinuidade geométrica mostrada na Figura 3 (a) é um defeito de forma causado por excesso de penetração do eletrodo (Branco et al., 1986). Este tipo de defeito não preocuparia tanto se não apresentasse um baixo ângulo de convexidade.

O baixo ângulo de convexidade intensifica a concentração de tensões na raiz da solda tornando este local um sítio propício para a nucleação da trinca de fadiga durante o carregamento cíclico. Estudos mostraram que a resistência à fadiga aumenta com a convexidade, ou seja, quando a concentração de tensões no pé do cordão diminui (Rudolph et al., 2002, Nguyen et al., 1998, Horn, 1998, Meyers, 1995, Gurney, 1979).

Na Tabela 2 são apresentadas as medidas de convexidade para os dois tipos de amostras exibidos na Figura 3.

Tabela 2 – Convexidade da amostra com (a) discontinuidade geométrica; (b) perfil de raiz uniforme.

Amostras	Convexidade
a	80°40'
b	162°22'

De acordo com estes resultados, a menor convexidade corresponde a da amostra (a), que contém a discontinuidade geométrica e, portanto, uma maior concentração de tensões.

#### 3.2 Análise de Raios-X

A Tabela 3 e os gráficos da Figura 4 apresentam as medidas das tensões residuais transversais e longitudinais obtidas por posição, conforme Figura 2 (b), nas amostras exibidas na Figura 3.

Tabela 3 – Tensões residuais nas amostras com (a) descontinuidade geométrica na raiz da solda; (b) perfil de raiz uniforme. (-) Tensões compressivas; (+) Tensões trativas.

Amostra	Tensões Residuais (MPa)							
	Longitudinais				Transversais			
	A2	A1	B1	B2	A2	A1	B1	B2
a	-10	10	130	100	-70	-80	60	-50
b	-20	-140	0	-70	-60	10	-90	-180

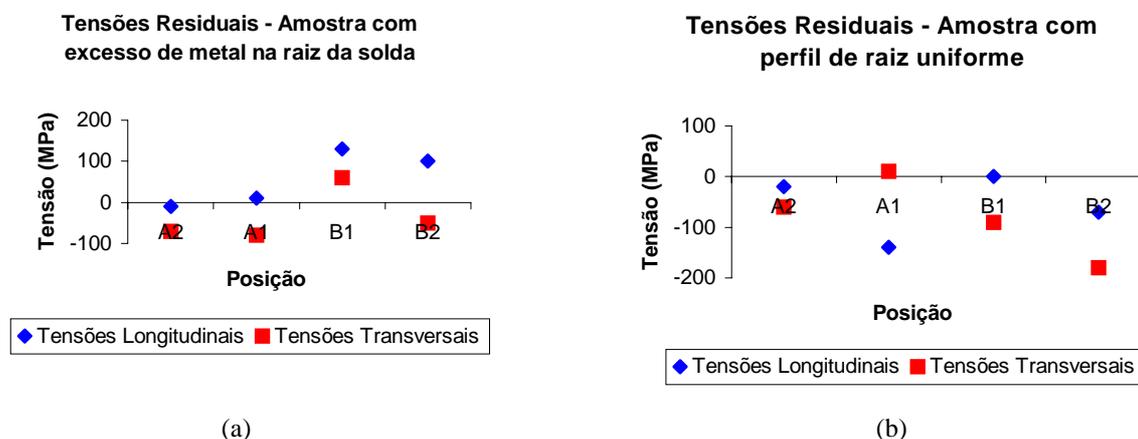


Figura 4 – Gráfico das tensões residuais medidas por posição nas amostras com (a) descontinuidade geométrica na raiz da solda; (b) perfil de raiz uniforme.

Defeitos de forma não são responsáveis pela formação das tensões residuais, mas é provável que a presença destas heterogeneidades dimensionais altere o campo das tensões residuais próximo do local onde elas ocorrem, intensificando as tensões trativas (Nguyen et al., 1998, Antunes, 1995, Kou, 1987). No caso das tensões longitudinais, medidas na amostra (a), o valor máximo de tensão trativa foi cerca de 28% da tensão de escoamento do material. As tensões transversais foram em geral compressivas.

Na amostra com perfil de raiz uniforme (b) as tensões longitudinais e transversais foram em sua maioria compressivas.

### 3.3 Ensaios de Fadiga

A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de fadiga realizados em cinco níveis de tensão: 337,95, 265,53, 217,25, 173,79 e 144,83 MPa e a Figura 5, a curva SN levantada através de análise de regressão linear dos dados, com intervalos de confiança de 95%.

Tabela 4 – Resultados do Ensaio de Fadiga

Seqüência dos Testes	Ângulos de Convexidade	Tensões Cíclicas		Vida em Fadiga (ciclos)	Origem da Fratura*
		Máxima (MPa)	Mínima (MPa)		
1	126°8'	337,95	33,795	6,04x10 <sup>4</sup>	raiz
2	147°28'	265,53	26,553	1,17x10 <sup>5</sup>	raiz
3	137°40'	265,53	26,553	2,37x10 <sup>5</sup>	raiz
4	151°30'	265,53	26,553	5,31x10 <sup>5</sup>	raiz
5	127°10'	217,25	21,725	1,13x10 <sup>5</sup>	raiz
6	151°54'	217,25	21,725	2,68x10 <sup>5</sup>	raiz
7	150°22'	217,25	21,725	3,34x10 <sup>6</sup>	raiz
8	144°14'	173,79	17,379	5,17x10 <sup>5</sup>	raiz
9	136°36'	173,79	17,379	1,1x10 <sup>6</sup>	raiz
10	160°12'	173,79	17,379	1x10 <sup>7</sup>	raiz
11	127°2'	144,83	14,483	3,85x10 <sup>5</sup>	raiz
12	133°26'	144,83	14,483	6,83x10 <sup>5</sup>	raiz
13	129°24'	144,83	14,483	8,14x10 <sup>5</sup>	raiz

\*Todas as fraturas foram iniciadas nos locais de menor ângulo de convexidade

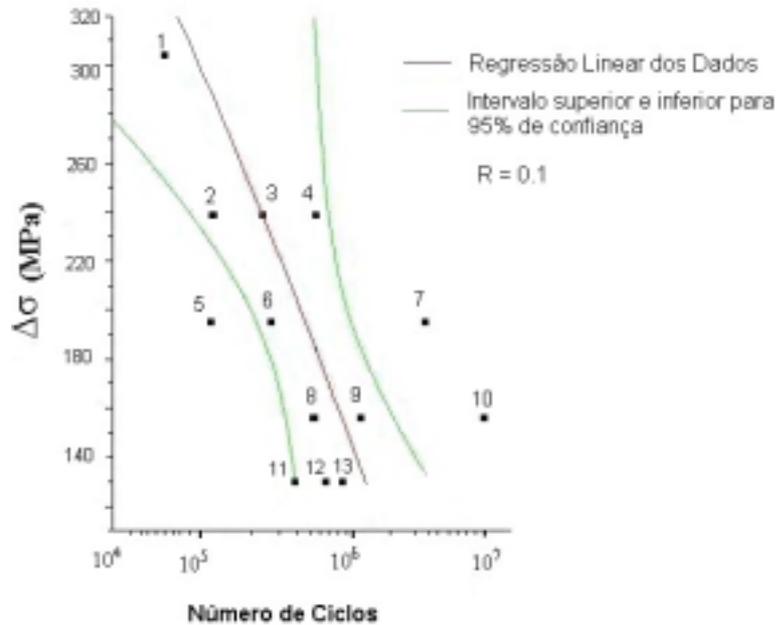


Figura 5 – Curva SN.

A grande dispersão observada no gráfico acima está relacionada principalmente com a heterogeneidade de ângulos observada ao longo da raiz da solda de todas as amostras. Apesar disto pode ser verificado uma tendência de aumento da resistência à fadiga com o aumento do ângulo de convexidade.

Verificou-se que a amostra 6 ( $151^{\circ}54'$ ) com ângulo de convexidade muito próximo da amostra 7 ( $150^{\circ}22'$ ) apresentou uma vida em fadiga inferior cerca de 3.300.000 ciclos.

Pela análise do perfil destas amostras não foi possível esclarecer estes resultados, que pode ser atribuído a algum tipo de defeito interno, tais como inclusões de escória, porosidades ou alguma fase frágil, que pode ter atuado como sítios nucleadores de trinca, comprometendo a vida em fadiga das mesmas durante os ensaios.

Era esperado, em função do aumento do ângulo, que a vida em fadiga da amostra 8 ( $144^{\circ}14'$ ) fosse maior que aquela obtida pela amostra 9 ( $136^{\circ}36'$ ), o que não ocorreu.

As fotos, exibidas na Figura 6, evidenciaram que a amostra 9 realmente apresentou um menor ângulo de perfil quando comparada com a amostra 8, entretanto ao longo da raiz da solda, verificou-se que a amostra 8 apresentou uma diferença de nível entre o metal de solda e o metal de base muito mais pronunciada que aquela verificada na amostra 9. Esta variação de ângulo interno, não verificada através do projetor de perfil pode ser atribuída como causa da menor vida em fadiga apresentada pela amostra 8.



Figura 6 – Perfil e raiz da solda das amostras: (a) 9 e (b) 8.

Novas medidas de convexidade foram realizadas, utilizando-se desta vez um goniômetro de precisão, em replicas obtidas da raiz da solda para as demais amostras.

De acordo com a literatura, maiores aumentos da vida em fadiga para amostras com perfil de raiz uniforme são verificados em regime de baixa tensão/longa vida (Gurney, 1979). Apesar da amostra 10 ter quebrado com  $10^7$  ciclos, este resultado demonstrou que valores de convexidade em torno de  $160^{\circ}$  e tensões residuais compressivas constituem garantia de bons resultados durante o carregamento em fadiga, principalmente quando o carregamento é tratativo e que, provavelmente o limite de fadiga de amostras semelhantes e com o mesmo perfil está muito próximo da tensão utilizada neste ensaio. Este resultado também mostrou a necessidade de um bom controle dos parâmetros de soldagem durante a deposição dos cordões, principalmente em processos manuais, onde um balanço ineficiente entre a corrente e a

velocidade de soldagem pode ter resultado nos perfis de solda com grande variação geométrica (Kirkhope et al., 1999, Mantegui, 1998, Horn, 1998).

As amostras 11, 12 e 13, com ângulos de convexidade de 127°2', 133°26'e 129°24' respectivamente, foram ensaiadas a 144,83 MPa. Os resultados mostraram que sob tensões muito baixas, o efeito da concentração de tensões, evidenciado pelos baixos ângulos de convexidade das amostras é predominante, não existindo, portanto, possibilidade de obtenção de um patamar nesta curva que caracterize a tensão limite de fadiga para estas amostras ou para quaisquer outras com variação de perfil semelhante.

#### 4. Conclusões

As amostras sem descontinuidades geométricas apresentaram uma maior vida em fadiga, resultado de um perfil de raiz mais uniforme e de uma menor concentração de tensões.

Sob tensões mais baixas, o efeito da concentração de tensões das amostras, com menor ângulo de convexidade, na vida em fadiga mostrou-se mais predominante do que as condições de carregamento.

#### 5. Agradecimentos

ANP, FINEP, CNPq-CTPETRO, Centro de Pesquisa da PETROBRÁS.

#### 6. Referencias

- Cheng, Guang-Xu, Kuang, Z.B., Lou, Z. W., Li, H. Experimental investigation of fatigue behavior for welded joint with mechanical heterogeneity. International Journal Pres. Ves. & Piping, 67, p. 229-242, 1996.
- Reemsnyder, H. S., Pisarski, H. G., Dawes, M. G. Residual stresses and fatigue precracking techniques for weldment fracture toughness specimens. American Society for Testing and Materials, p. 416-423, 1992.
- Branco, C. M., Fernandes, A. A., Tavares de Castro, P. M. 5. Fadiga de Estruturas Soldadas. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1986, 902p.
- Berge, S. On the effect of plate thickness on fatigue of welds. Engineering Fracture Mechanics, v.21, n.2, p. 423-435, 1985.
- Booth, G. S., Wylde, J. G. Fatigue considerations in offshore steel structures in the north sea - the need to design against the possibility of fatigue failure. The Welding Institute Research Bulletin. v.19, p. 101-104, Mar., 1978.
- Gurney, T. R. Johnston, G. O. A revised analysis of the influence of toe defects on the fatigue strength of transverse non-load-carrying fillet welds. The Welding Institute, p. 1-36, 1978.
- Zeemann, A. Fadiga em juntas soldadas. Soldagem & Inspeção, n. 10, p.21-23, 1998.
- ASTM E 468-90. Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials, p.495-500, 1998.
- ASTM E 466-96. Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials, p.480-484, 1996.
- ASTM E 739-91. Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life ( $\epsilon$ -N) Fatigue Data, p.636-642, 1998.
- Rudolph, J., Schmitt, C., Weib, E. Fatigue lifetime assessment procedures for welded pressure vessel components. International Journal of Pressure Vessels and Piping, v.79, p. 103-112, 2002.
- Nguyen, T. N.; Wahab, M. A. The effect of weld geometry and residual stresses on the fatigue of welded joints under combined loading. Journal of Materials Processing Technology, n.77, 201-208, 1998.
- Horn, A. M., Huther, I., Lieurade, H. P. Fatigue behaviour of T-joints improved by TIG dressing. Welding in the World, v.41, p.273-280, 1998.
- Meyers, J. C. Problematic weld discontinuities and their prevention. Welding Journal, 45-47, jun, 1995.
- Gurney, T. R. Fatigue of welded structures. Cambridge University Press, 2ª ed., 1979.
- Antunes, A. E. B. Tensões residuais na soldagem – aspectos básicos. Revista Brasileira de Ciências Mecânicas., 17, p.394- 403, 1995.
- Kou, S.; Welding Metallurgy, Ed. John Wiley & Sons, USA, 1987.
- Kirkhope, K. J., Bell, R., Caron, L., Basu, R. I., Ma, K. T. Weld detail fatigue life improvement techniques. Part 2: application to ship structures. Marine Structures, n.12, p. 477-496, 1999.
- Manteghi, S. Methods of fatigue life improvement for welded joints in medium and high strength steels; TWI, Abington Hall, Cambridge, UK, p 2, 1998.