

# **INFLUÊNCIA DA REFUSÃO DO PASSE DE RAIZ SOBRE A RESISTÊNCIA À FADIGA DE JUNTAS SOLDADAS DE TUBULAÇÕES UTILIZADAS EM CAMPOS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO**

**Maria Cléa Soares de Albuquerque**

UFCG/CCT/CPGEP – Rua Aprígio Velloso, 882, CEP: 58109-970, C. Grande, PB – Email: cleaalbuquerque@uol.com.br

**Theophilo Moura Maciel**

UFCG/CCT/DEM – Rua Aprígio Velloso, 882, CEP: 58109-970, C. Grande, PB – Email: theo@dem.ufpb.br

**Marco Antonio dos Santos**

UFCG/CCT/DEM – Rua Aprígio Velloso, 882, CEP: 58109-970, C. Grande, PB – Email: santos@dem.ufpb.br

**Emydio C. Sousa Neto**

UFCG/CCT/DEM – Rua Aprígio Velloso, 882, CEP: 58109-970, C. Grande, PB – Email: emydioneto@yahoo.com.br

**Resumo.** Neste trabalho a resistência à fadiga de juntas soldadas de tubulações de aço API 5L-X60 utilizadas em campos marítimos de produção de petróleo foi determinada nas condições como soldado e tratadas na raiz pela técnica TIG dressing, um tratamento que consiste em um passe de refusão realizado sem o emprego de metal de adição, com objetivo de remover descontinuidades geométricas e defeitos superficiais, melhorando o acabamento e tornando a transição metal de solda e metal de base mais suave. Para tanto, corpos de prova usinados das juntas soldadas em ambas condições foram testados por fadiga e a curva SN foi levantada, com os resultados analisados em termos do excesso de metal na raiz, medido através do ângulo de convexidade, e das tensões residuais, medidas por Raios-X. Uma grande variabilidade dos resultados levou a dispersões na curva SN para as amostras na condição como soldado, relacionadas à heterogeneidade do perfil de raiz, ao contrário das amostras tratadas, cuja modificação do perfil levou a aumentos consideráveis da vida em fadiga, demonstrando a importância do tratamento de refusão não apenas em relação à modificação da geometria do cordão, mas também na mudança do perfil de tensões residuais, que se mostrou em sua maioria com tensões compressivas.

**Palavras-chave:** junta soldada, TIG dressing, curva SN.

## **1. INTRODUÇÃO**

Juntas soldadas de estruturas submetidas a carregamentos cíclicos são sítios preferenciais para o início de trincas de fadiga (Booth & Wilde, 1978, Gurney & Johnston, 1978). Neste sentido, critérios rigorosos de segurança devem ser adotados durante o projeto de risers de aço em catenária, trechos de dutos utilizados para conectar as tubulações de produção e exportação à plataforma (Hatton & Willis, 1998, Howells, 1995). As condições severas de

operação desses componentes, que transportam fluidos de alta pressão sob carregamento dinâmico por muitos anos, exigem das soldas um alto nível de resistência à fadiga (Willis, 2000).

Os efeitos geométricos dos perfis de solda, os níveis das tensões residuais, geradas durante a soldagem, a presença de defeitos internos, principalmente superficiais, associados às condições cíclicas de carregamento aceleram o processo de dano nessas tubulações. Nesse contexto, uma preocupação com a resistência à fadiga tem acompanhado o seu desenvolvimento, através da possibilidade de utilização de técnicas que ajudam a melhorar a performance à fadiga de juntas soldadas, como é o caso da técnica TIG dressing. Os benefícios alcançados estão relacionados à melhora do perfil do cordão de solda, uma vez que por meio de um passe de refusão, realizado sem metal de adição, normalmente sobre o pé do cordão, consegue-se remover as descontinuidades superficiais e melhorar o acabamento, tornando mais suave a transição entre o metal de base e o metal de solda. Deste modo, a técnica do passe de refusão proporciona um acréscimo no período de iniciação de trincas, e, por outro lado, aumenta a vida e o limite de fadiga da junta (Manteghi, 1998, Kirkhope et al., 1999a, Maddox, 1991, Gurney, 1979).

Sob estes aspectos, este trabalho teve por objetivo avaliar o efeito de um passe de refusão na raiz da solda, através da técnica TIG dressing, sobre o comportamento à fadiga de juntas soldadas de tubulações de aço API 5L-X60 utilizadas em campos marítimos de produção de petróleo.

## 2. MATERIAL E MÉTODOLOGIA

### 2.1. Material

O material utilizado para o desenvolvimento deste trabalho consistiu de tubulações de aço API 5L-X60 utilizadas em campos marítimos de produção de petróleo, com 0,204 m de diâmetro e 0,016 m de espessura. Estas estruturas foram cedidas pelo Centro de Pesquisa da PETROBRAS, previamente soldadas transversalmente em um chanfro em V, pelo processo de soldagem ao arco elétrico com eletrodo revestido, com e sem o passe de refusão TIG na raiz da solda. Para possibilitar a realização desse tratamento, em virtude do pequeno diâmetro da estrutura, as tubulações foram seccionadas longitudinalmente.

A soldagem prévia da junta 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 0,004 m de diâmetro. Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros de soldagem do processo e na Tab. (2), a composição química do metal de solda e do metal de base, bem como as propriedades mecânicas do metal de base utilizadas como referência para o levantamento da curva SN (Comunicação Técnica Nº 111, 1995).

Tabela 1 – Parâmetros de Soldagem

Parâmetros de Soldagem	Passe de Raiz	Passe Quente	Passes de Enchimento	Passes de Acabamento
<b>Corrente - I (A)</b>	130-170	135-176	185-240	185-235
<b>Voltagem - V(V)</b>	24-31	26-35	20-26	20-26
<b>Aporte Térmico H(kJ/m)</b>	630-770	1000-1300	550-1300	600-1100

Tabela 1 – Composição química do metal de solda (MS) e do metal de base (MB) e propriedades mecânicas do MB.

	<b>C%</b>	<b>Si%</b>	<b>Mn%</b>	<b>P%</b>	<b>S%</b>	<b>Ni%</b>	<b>Mo%</b>	<b>V%</b>	<b>Al%</b>	<b>Nb%</b>	<b>Ti%</b>	<b>Cu%</b>
<b>MS</b>	0,10	0,48	1,32	0,013	0,009	1,44	0,016	0,004	0,004	-	0,020	0,040
<b>MB</b>	0,12	0,27	1,48	0,012	0,008	-	0,032	0,048	0,039	0,041	0,009	0,006

Tensão limite de escoamento = 459 MPa; Tensão limite de resistência = 604 MPa;  
Alongamento = 37,33%

## 2.2. Metodologia

### 2.2.1. Usinagem dos Corpos de Prova

Os corpos de prova para os ensaios de fadiga foram usinados longitudinalmente das tubulações de acordo com as normas da ASTM E-468 – 90 (1998) e E-466-96 (1996), preservando-se a geometria do cordão de solda, conforme ilustração esquemática exibida na Fig.(1).

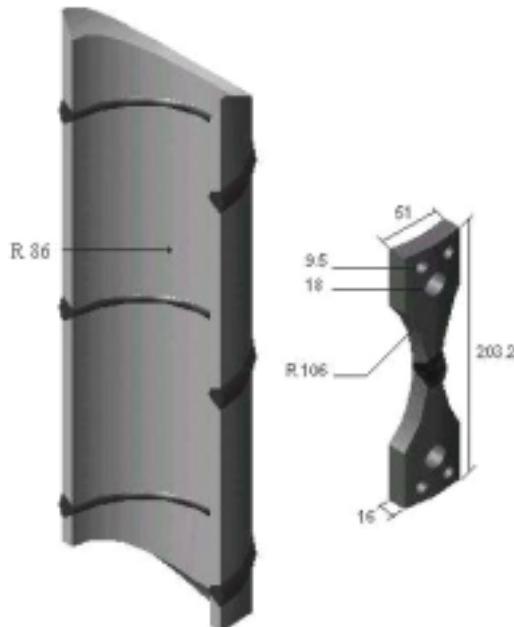


Figura 1 – Ilustração esquemática do posicionamento de usinagem dos corpos de prova para ensaios de fadiga (dimensões devem ser multiplicadas por  $10^{-3}$  m).

### 2.2.2. Medidas de Convexidade

A convexidade, definida como a medida do ângulo de tangência formado entre o metal de solda e o metal de base foi feita com auxílio de um projetor de perfil na raiz da solda dos corpos de prova, conforme ilustrado esquematicamente na Fig.(2).

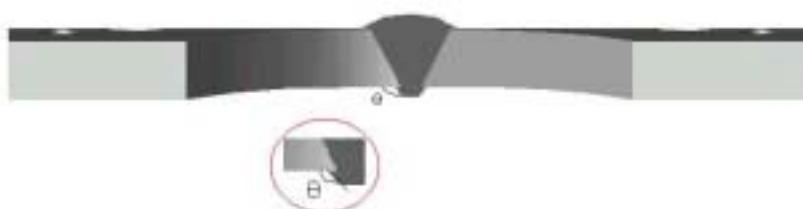


Figura 2 - Ilustração esquemática do ângulo de convexidade medido na raiz da solda.

### **2.2.3. Análise de Raios-X**

As tensões residuais internas longitudinais (z) e transversais (x) à raiz da solda foram determinadas por Raios-X nas vizinhanças da raiz da solda de duas amostras nas condições como soldado e tratada por TIG dressing, conforme ilustração esquemática exibida na Fig.(3), utilizando-se o equipamento portátil Raystress. A Figura 4 abaixo exibe os perfis das amostras analisadas.

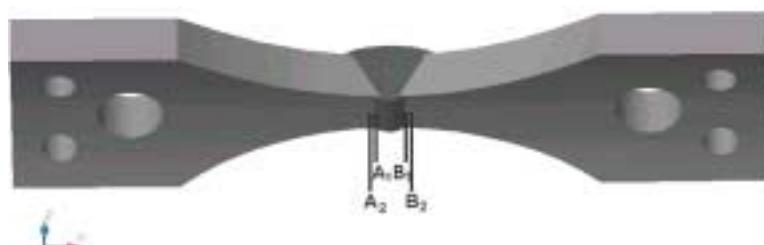


Figura 3 – Ilustração esquemática do local onde foram feitas as medidas por Raios-X.

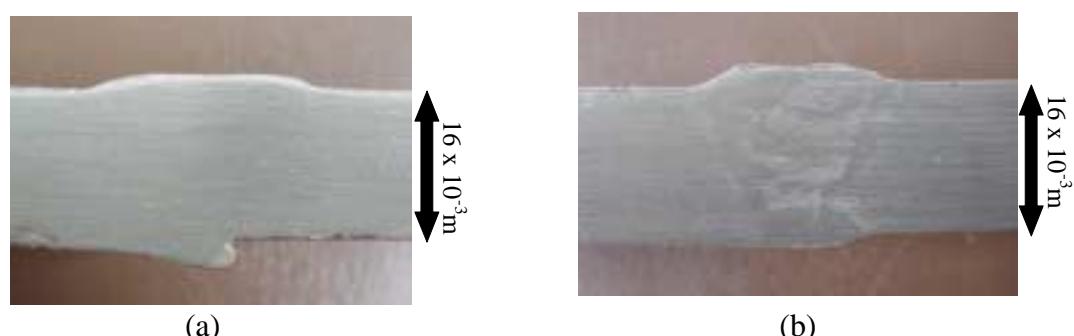


Figura 4 – Perfil de raiz das amostras analisadas por Raios-x: (a) amostra com excesso de metal na raiz e (b) amostra tratada por TIG dressing.

#### **2.2.4. Ensaios de Fadiga**

Os ensaios de fadiga foram realizados em uma máquina de ensaios servo-hidráulica, modelo MTS 810, com capacidade de carga de 100 kN à temperatura ambiente, utilizando-se onda senoidal, amplitude de carga constante, freqüência variando de 10 a 12 Hz e razão de tensão  $R = 0,1$ .

### 2.2.5 Análise da Superfície de Fratura

Para avaliar com maior precisão os locais de início da trinca de fadiga, as superfícies fraturadas foram submetidas à análise estereoscópica, com auxílio de uma lupa e em seguida, por Microscopia Eletrônica de Varredura.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os gráficos da Fig.(5) apresentam as medidas das tensões residuais transversais e longitudinais obtidas para as duas amostras exibidas na Fig. (4).

As tensões longitudinais nas amostras a e b foram em geral trativas, com valores bastante heterogêneos, não apresentando diferenças significativas nos seus valores, em função da realização do passe de refusão. Entretanto, com relação às medidas transversais, verificou-se que na amostra (b), beneficiada pela refusão, as tensões foram todas compressivas com

valores em geral superiores aos medidos na amostra (a). Este resultado está provavelmente relacionado à microestrutura martensítica formada na zona termicamente afetada, adjacente ao metal refundido, que é responsável por colocar sob tensão de compressão toda essa superfície do material (Welding Handbook, 1981).

Como a natureza das medidas tomadas pelo método utilizado é de caráter superficial ( $\pm 5 \mu\text{m}$ ) e o início da trinca de fadiga se dá na superfície, além da redução da concentração de tensão, conseguida pela refusão, alie-se um outro benefício que é a existência de tensões compressivas que, ao contrário das tensões traítivas, retardam o processo de iniciação da trinca de fadiga (Nguyen & Wahab, 1998).

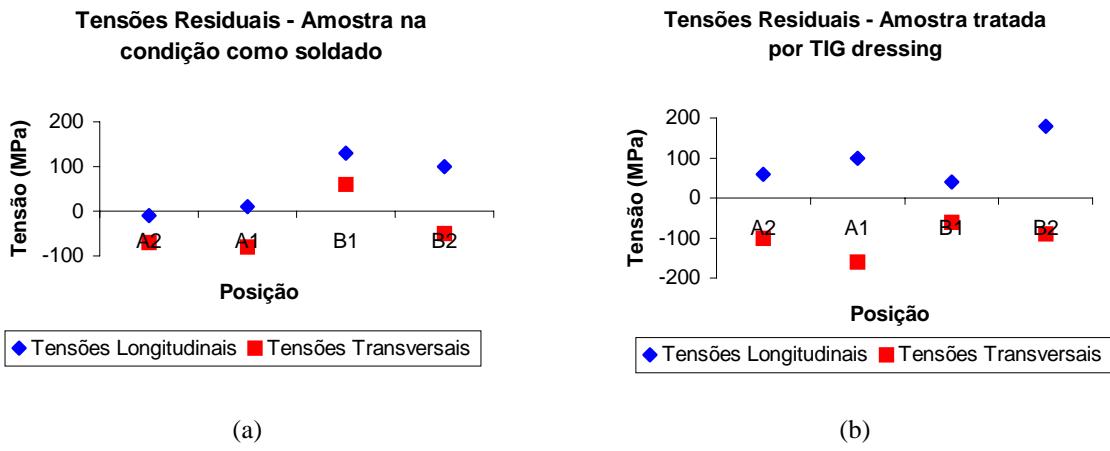


Figura 5 – Tensões residuais para as amostras (a) como soldado; (b) tratada pela refusão.

As Figuras 6 e 7 apresentam os gráficos da curva SN, levantadas através de análise de regressão linear, para os corpos de prova nas condições como soldado e tratados pelo passe de refusão TIG respectivamente. Foram ensaiados, no total, 27 corpos de prova, sendo 17 na condição como soldado e 10 na condição tratado. Em ambos os gráficos são indicados os números dos mesmos, na sequência em que foram ensaiados, assim como, os seus respectivos ângulos de convexidade, medidos na raiz da solda.

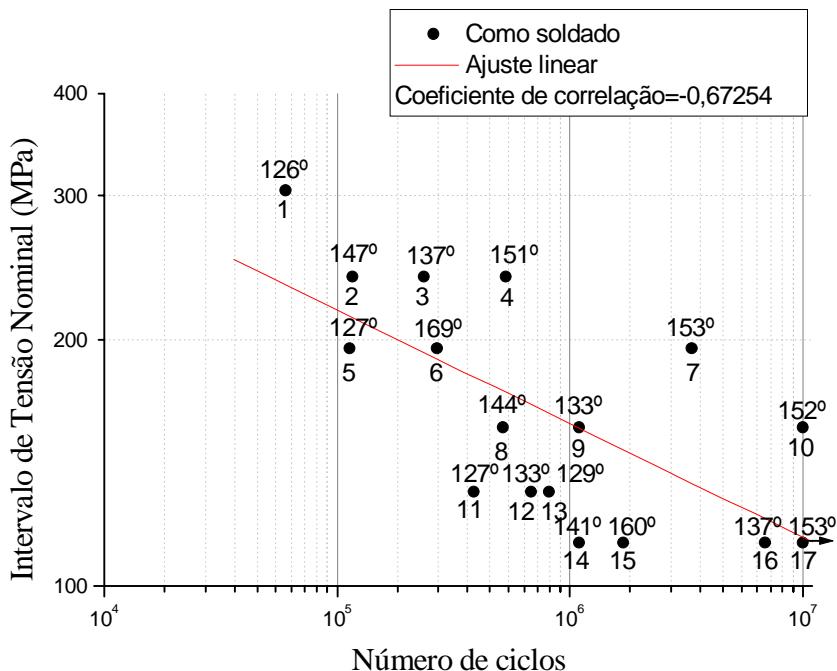


Figura 6 – Curva SN para as amostras na condição como soldado.

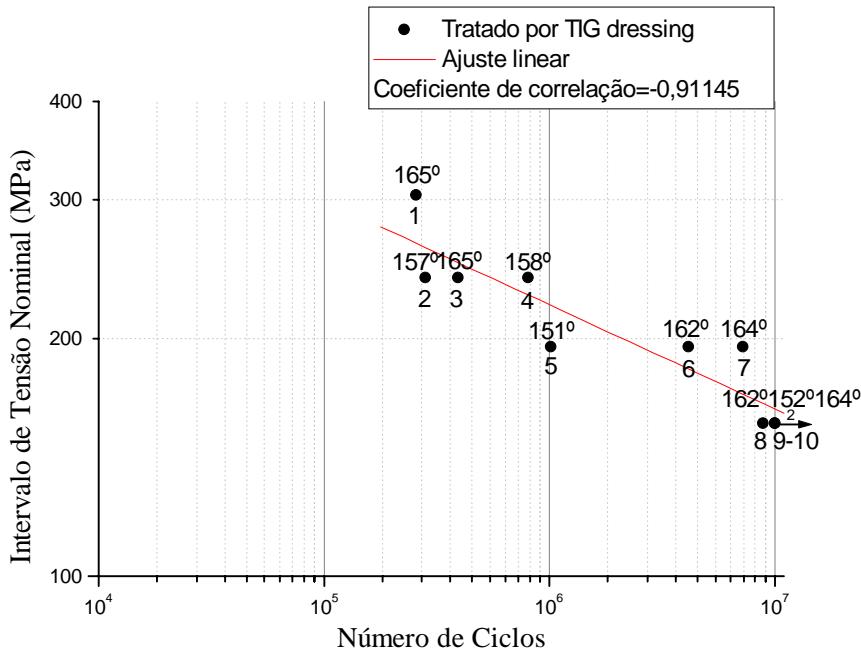


Figura 7 – Curva SN para as amostras tratadas por TIG dressing.

As dispersões verificadas no gráfico da Fig.(6) podem ser atribuídas à heterogeneidade do perfil de raiz da solda das amostras que, no levantamento da curva SN, levou a um coeficiente de correlação muito baixo (0,67). Apesar disso, pode ser verificado que houve uma tendência de aumento da vida em fadiga com o ângulo de tangência. O maior ângulo de tangência faz desaparecer a descontinuidade geométrica, reduzindo o nível de concentração de tensões da junta soldada (Nguyen & Wahab, 1998, Horn et al., 1998, Gurney, 1979).

Porém, conforme pode ser observado no mesmo gráfico, verificou-se que para o mesmo nível de tensão, algumas amostras com maiores ângulos de tangência apresentaram vidas em fadiga menores que outras, em que foram medidos ângulos inferiores. É o caso, por exemplo, da amostra 6 (169°), que com ângulo de convexidade muito maior que a amostra 7 (153°), apresentou uma vida em fadiga cerca de 3.000.000 de ciclos inferior. Na Fig.(8), que mostra fotos do perfil e da raiz da solda das amostras 6 e 7 e suas respectivas superfícies de fratura, fotografadas por lupa e analisadas por MEV, pode-se verificar que a amostra 6 apresentou mais pontos de nucleação de trincas de fadiga, os quais se mostraram distribuídos ao longo de toda a raiz da solda, ao contrário da amostra 7, onde a iniciação se deu, principalmente de um único lado, resultado de uma maior convexidade neste local da amostra. Esse resultado tornou evidente que o ângulo de tangência, medido na amostra 6, não era representativo de todo o comprimento da raiz, que apresentava uma grande heterogeneidade de perfil, ou seja, uma excessiva falta de concordância entre o metal de solda e o metal de base, que contribuiu, deste modo, para aumentar ainda mais a concentração de tensões da junta.

Este fato também se repetiu com os ensaios das amostras 8 (144°) e 9 (133°) e 15 (160°) e 16 (137°). A amostra 8 (144°), embora possuindo um maior ângulo de convexidade, apresentou uma vida em fadiga inferior à da amostra 9 (133°), cerca de 583000 ciclos. Variações do ângulo de perfil, ao longo do comprimento da raiz da solda da amostra 8, favoreceram à existência de um maior número de pontos de iniciação de trincas e com isso uma maior concentração de tensões, que lhe proporcionou um menor tempo de vida, ao contrário da amostra 9, cuja trinca de fadiga iniciou no lado de maior convexidade.

De maneira análoga, a ausência de uniformidade ao longo de todo o comprimento da raiz da amostra 15 (160°), proporcionou uma vida em fadiga de cerca de 5.200.000 ciclos inferior à obtida pela amostra 16 (137°).

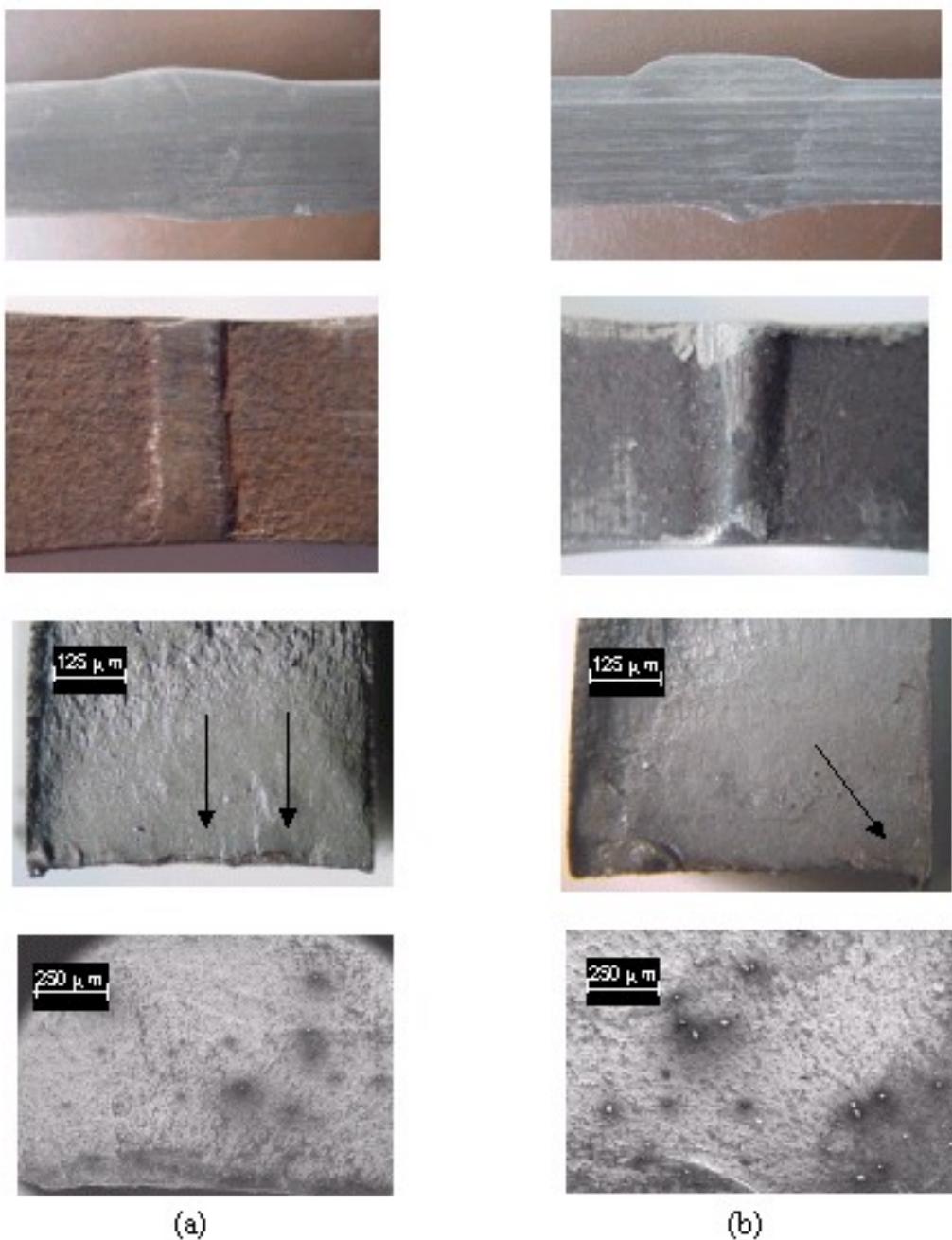


Figura 8 – Perfil e raiz da solda e superfícies de fratura das amostras (a) 6 e (b) 7.

De todas as amostras testadas apenas as de número 10 e 17 conseguiram alcançar  $10^7$  de ciclos. Embora a amostra 10 tenha sofrido ruptura, os ângulos medidos do perfil dessa amostra e da amostra 17 aliado a uma uniforme transição entre o cordão de solda e o metal de base, ao longo do comprimento da raiz, constituíram garantiam de bons resultados quanto a vida em fadiga.

A vida em fadiga das demais amostras na condição como soldado mostrou que o efeito da concentração de tensões, através dos baixos ângulos de tangência, foi predominante sobre os níveis de tensão do ensaio, tendo em vista, que a maioria sofreu ruptura muito antes de alcançar  $10^7$  ciclos, não sendo possível, portanto, a obtenção da tensão limite de fadiga.

A heterogeneidade do perfil de raiz da solda das amostras na condição como soldado demonstra a necessidade de atenção a dois fatores essenciais, principalmente quando a estrutura esta submetida a carregamentos cíclicos. Primeiramente, o controle dos parâmetros de soldagem, principalmente em se tratando de processos de execução manual, onde um

balanço ineficiente entre a velocidade de soldagem e a corrente pode resultar em perfis de solda com intensas descontinuidades geométricas, como as apresentadas neste trabalho (Manteghi, 1998, Horn et al., 1998, Kirkhope et al., 1999b). Além disso, a necessidade de um controle no alinhamento das partes do tubo a serem unidas, que também pode contribuir à excessiva convexidade de metal, concentrando tensões e favorecendo ao subsequente surgimento de trincas.

Com relação ao gráfico da Figura 7, os resultados indicaram um aumento significativo da vida em fadiga para as amostras tratadas por TIG dressing quando comparados com aqueles obtidos pelas amostras na condição como soldado. A maior homogeneidade de perfil de raiz das amostras tratadas pelo passe de refusão favoreceu a obtenção de um bom coeficiente de correlação no traçado da curva SN, acima de 0,9. O aumento médio de vida verificado para os quatro níveis de tensão, em que foram ensaiadas, variou de 67%, na região de alto ciclo, a 325%, na região de baixo ciclo, podendo ser atribuído principalmente à redução da concentração de tensão no pé do cordão, reduzida com suavização da seção (Manteghi, 1998).

Alguns resultados, entretanto, merecem ser analisados. É o caso, por exemplo, das amostras 3 ( $165^\circ$ ) e 4 ( $158^\circ$ ). A amostra 3, com ângulo de tangência maior que a amostra 4 apresentou um tempo de vida ligeiramente inferior. Uma análise da região da raiz da solda da amostra 3 evidencia a existência de descontinuidades do tipo cavidades, no pé do cordão, que coincidem com o local de início da trinca de fadiga, conforme pode ser observado através da análise da superfície de fratura apresentada na Fig. (9).

Outro caso similar é o da amostra 8, que não conseguiu alcançar  $10^7$  ciclos, fraturando com um tempo de vida um pouco maior que  $8,9 \times 10^6$  ciclos. Uma análise da região da raiz e da superfície de fratura também mostrou que o ponto de iniciação da trinca de fadiga coincidiu com a presença de uma cavidade no pé do cordão de solda, como pode ser observado nas fotos exibidas na Fig. (10).

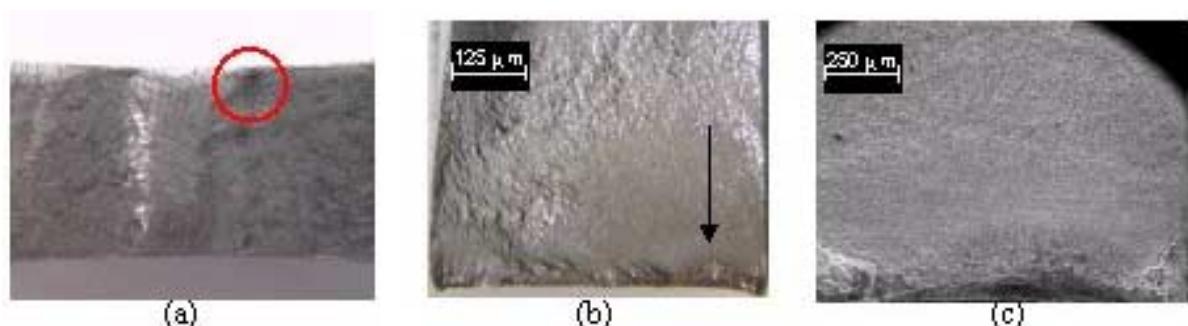


Figura 9 – Raiz da solda e superfícies de fratura da amostra 3, tratada por TIG dressing

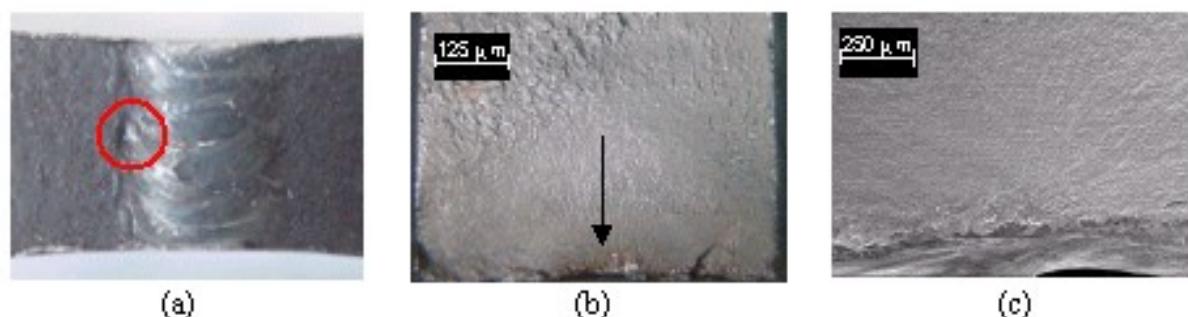


Figura 10 - Raiz da solda e superfícies de fratura da amostra 8, tratada por TIG dressing.

Há, portanto, duas possibilidades para justificar os resultados acima apresentados. A primeira é que a refusão não conseguiu eliminar completamente as descontinuidades do passe de raiz, deixando reentrâncias no pé do cordão, antes originadas pela soldagem prévia da junta. A segunda, é que uma instabilidade do arco TIG pode ter gerado as cavidades, muito embora a literatura atribua como causa de menores aumentos da vida em fadiga de juntas tratadas pelo passe TIG de refusão à qualidade dos depósitos prévios de solda, ou seja, que a técnica TIG dressing somente é garantia de bons resultados quando não houver riscos de início de trincas na junta tratada. Portanto, quanto melhor a qualidade da soldagem prévia, mais efetiva a técnica utilizada (Kirkhope, 1999a, Lieurade et al., 1993).

De qualquer modo, o perfil de raiz não uniforme, contribuiu para que as amostras 3 e 8 apresentassem uma maior concentração de tensões, favorecendo a nucleação da trinca de fadiga onde se encontrava a descontinuidade.

Por outro lado, os resultados obtidos e recentes revisões bibliográficas mostraram a vantagem da utilização da técnica TIG dressing no aumento do período de iniciação de trincas de fadiga quando realizado internamente na raiz da solda de juntas soldadas de tubulações marítimas, além também do aumento no limite de fadiga (Manteghi, 1998, Kirkhope, 1999a, 199b, Horn et al., 1998). Enquanto o limite de fadiga das amostras na condição como soldado não conseguiu ser determinado a 125 MPa, menor nível de tensão utilizado nos ensaios, as amostras tratadas por TIG dressing alcançaram  $10^7$  ciclos sem qualquer tipo de dano a um nível de tensão 38,5% superior.

## 4. CONCLUSÕES

A técnica TIG dressing proporcionou um melhor acabamento na raiz da solda das amostras tratadas, levando a aumentos médios na vida em fadiga que variaram de 67 a 325% em relação às amostras na condição como soldado.

Amostras tratadas por TIG dressing alcançaram  $10^7$  ciclos a um nível de tensão 38,5% superior que as amostras na condição como soldado.

Além da contribuição do perfil, o maior nível de tensões residuais transversais compressivas apresentado pelas amostras tratadas, constitui um fator possível para aumento da resistência à fadiga das mesmas.

As heterogeneidades dimensionais na raiz da solda impossibilitaram a determinação do limite de fadiga para as amostras na condição como soldado.

## 5. AGRADECIMENTOS

ANP, FINEP, CNPq-CTPETRO, Centro de Pesquisa da PETROBRAS, DEM/UFCG, DEMP/UFC.

## 6. REFERÊNCIAS

- 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.
- Booth, G. S., Wylyde, 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.
- Comunicação Técnica nº 111, Serviço Técnico nº 130/95 –CENPES, 1995.
- Gurney, T. R., Fatigue of welded structures, Cambridge University Press, 2<sup>a</sup> ed., 1979.
- 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.

- Hatton, S. A., Willis, N. Steel Catenary Risers for Deepwater Environments. In: Offshore Technology Conference 8607, Houston, Texas, 4-7 May, 1998.
- Horn, A. M., Huther, I., Lieurade, H. P, Fatigue behavior of T-joints improved by TIG dressing, Welding in the World, v.41, p.273-280, 1998.
- Howells, H. Advances in Steel Catenary Riser Design. DEEPTEC, Aberdeen, February, 1995.
- Kirkhope, K. J., Bell, R., Caron, L., Basu, R. I., Ma, K. T. Weld detail fatigue life improvement techniques. Part 1: review, Marine Structures, n.12, p. 447-474, 1999a.
- Kirkhope, K. J., Bell, R., Caron, L., Basu, R. I., Ma, K. T, Weld detail fatigue life improvement techniques. Part 2. Marine Structures, n.12, p. 477-496, 1999b.
- Lieurade, H.P., et al, Efficiency of improvement techniques on the fatigue strength as a function of the type of welded joint, Welding in the World, v. 31, n.4, p. 268-271, 1993.
- Maddox, S.J. Fatigue strength of welded structures. Abington Publishing, 1991.
- Manteghi, S., Methods of fatigue life improvement for welded joints in medium and high strength steels; TWI, Abington Hall, Cambridge, UK, p 1-39, 1998.
- 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.
- Willis, N. Steel Catenary Risers for Deepwater Environments. In: 2H Offshore Engineering Ltd, OPT, 2000.

## **INFLUENCE OF ROOT PASS REMELTING ON THE FATIGUE STRENGTH OF WELDED JOINTS OF PIPELINES USED IN PETROLEUM PRODUCTION FIELDS**

**Maria Cléa Soares de Albuquerque** - E:mail: cleaalbuquerque@uol.com.br

**Theophilo Moura Maciel** - E:mail: theo@dem.ufcg.edu.br

**Marco Antonio dos Santos** - E:mail: santos@dem.ufcg.edu.br

**Emydio Clemente de Sousa Neto** - E:mail: emydioneto@yahoo.com.br

UFCG/CCT/DEM – Aprígio Veloso Avenue, 882 – ZIPCODE: 58109-970 – Campina Grande, PB – Brazil

**ABSTRACT.** *In this work, the fatigue strength of welded joints of API 5L-X60 steel pipelines used in petroleum production maritime fields was determined in as-welded condition and treated in the weld root by TIG dressing improvement technique. This treatment consists of remelting the weld toe without the addition of filler material and removing small crack-like weld defects and reducing the notch stress concentration at the weld toe. To this, specimens cut from the welded joint in both conditions were tested by fatigue and the SN curves were plotted, with the results analysed in terms of metal excess, measured by convexity angle and of residual stress, measured by X-Ray. Great scatter was observed in the SN curve of specimens in as-welded condition because of the root profile heterogeneity, on the contrary of remelted specimens, where the results indicated a consistent increase in fatigue life, demonstrating the importance of remelting treatment not only in relation with the bead geometry change, but also on the change of residual stress profile, which showed in great part with compressive stress.*

**Key-words:** Welded joint, TIG dressing, SN curve.