

APLICAÇÃO DA DIFRAÇÃO DE RAIOS-X PARA INSPEÇÕES DE CAMPO – AVALIAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM TUBULAÇÕES

Cleiton Carvalho Silva^{1*} (UFC), Sergey Philippov¹ (UFC), Gerardo Jesus Aracena Pérez² (PETROBRAS), Hélio Cordeiro de Miranda¹ (UFC), Marcelo Ferreira Motta¹ (UFC), Jesualdo Pereira Farias (UFC)¹.

^{1*}Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Laboratório de Engenharia de Soldagem, Campus do Pici, Bloco 715, Fortaleza, Ceará, Brasil. cleitonufc@yahoo.com.br, hmiranda@ufc.br, jpf@secrel.com.br.

²Petróleo Brasileiro S/A, Refinaria Lubrificantes Nordeste – LUBNOR, Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos - SPIE, Av. Leito Barbosa, S/N – Mucuripe, Fortaleza, Ceará, Brasil. gerardoaracena@petrobras.com.br

A garantia da integridade estrutural dos equipamentos na indústria do petróleo (reatores, torres, fornos, permutadores, tanques, tubulações, etc.) passa necessariamente pela determinação das condições dos materiais e de suas propriedades mecânicas. Em juntas soldadas, a avaliação consiste, em geral, de ensaios não-destrutivos (líquido penetrante, ultra-som, partícula magnética), dureza e metalografia. Entretanto, uma importante alteração metalúrgica decorrente dos processos de soldagem é a formação de tensões residuais de soldagem, as quais não são avaliadas no dia-dia da indústria. As tensões residuais de soldagem são críticas, pois estão associadas a problemas como falha por fadiga, trincas a frio e corrosão sob-tensão. Em refinarias de petróleo, são utilizados quilômetros de tubulações, as quais são montadas e reparadas por soldagem e, cujos níveis das tensões residuais de soldagem não são avaliados. Desta forma, o objetivo deste trabalho é apresentar a possibilidade de avaliação das tensões residuais de soldagem em campo, utilizando a técnica de difração de raios-X. Para tanto, foi utilizado um minidifratômetro de raios-X portátil para medição de tensões residuais. As medições foram realizadas em tubulações aço ASTM A106 Gr. B para serviço em alta temperatura, com diâmetro de 4”, soldados manualmente pelo processo TIG. O metal de adição utilizado foi o AWS ER 70 S3. Os resultados mostraram que a medição de tensões residuais por difração de raios-X usando o minidifratômetro para aplicações em campo, mostrou-se bastante eficaz na determinação do perfil de tensões em tubulações de aço carbono soldadas em junta de topo, podendo ser uma técnica extremamente atrativa para os setores de inspeção de equipamentos na indústria do petróleo, contribuindo para aumento da confiabilidade operacional.

Tubulação; Aço ASTM A106 Gr.B; Soldagem; Tensões residuais.

1. INTRODUÇÃO

As tubulações industriais representam um sistema de transporte de fluidos no estado líquido, gasoso ou até mesmo uma combinação das duas fases. As suas aplicações podem ser para condução de fluidos, bem como em trocadores de calor de fornos, caldeiras e permutadores, tubos de instrumentação ou até mesmo como elemento estrutural.

Notadamente no transporte de fluidos, as tubulações possuem especial aplicação nas indústrias químicas e petroquímicas, termoelétricas, nucleares e do petróleo. Em unidades de refino de petróleo, estas tubulações são responsáveis pelo transporte de hidrocarbonetos, água, vapor e diversos subprodutos os quais possuem muitas vezes elevado grau de corrosividade, além de operarem em muitos casos, sob severas condições de serviço (a alta temperatura e elevadas pressões).

A soldagem é o principal processo de construção e reparo destas tubulações para o transporte de petróleo, gás e derivados. Em geral, as soldagens são realizadas de forma manual, utilizando soldadores qualificados, cujas soldas são inspecionadas por diversas técnicas. Dentre os principais processos empregados destacam-se o eletrodo revestido, o TIG, o MIG/MAG e o arame tubular, estes dois últimos, em geral, empregados na soldagem de tubulações de grandes diâmetros. Dentre as diversas alterações metalúrgicas sofridas pelos materiais quando submetidos a um ciclo térmico de soldagem, destaca-se o surgimento de tensões residuais (Rajad, 1992; Kou, 2002), as quais são geralmente indesejáveis, uma vez que podem acarretar em diversos problemas.

As tensões residuais de soldagem podem atuar decisivamente no comportamento mecânico de componentes e estruturas, podendo ser a principal responsável pela falha dos mesmos. Isto por que, em muitos casos os níveis de tensões observados nas estruturas soldadas são da magnitude do limite de escoamento do material (Harrison, 1981; Parlane 1981). A fissuração a frio é um tipo de falha que pode ocorrer na soldagem de aços temperáveis, os quais formam fases com elevada dureza (Figura 1). Em geral estas trincas são atribuídas à uma combinação de fatores, como a presença de martensita com alta dureza e bastante frágil, hidrogênio atômico dissolvido no metal, níveis de tensões residuais favorável e baixa temperatura.

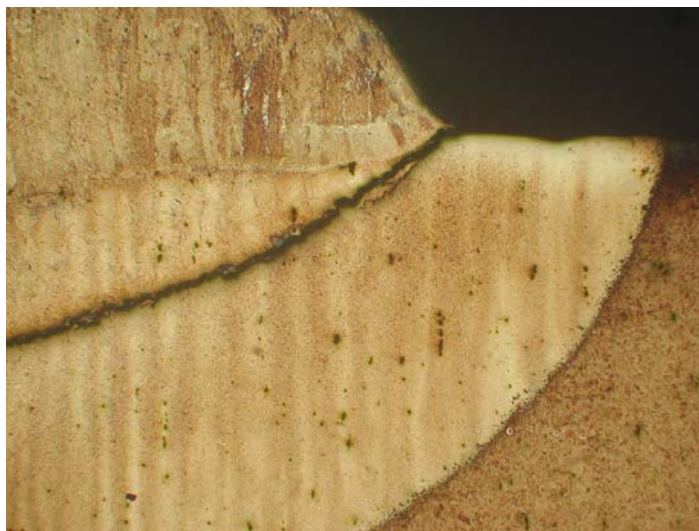


Figura 1. Fissuração à frio em aço baixa liga alta resistência AISI 4340 soldado com eletrodo revestido (Silva, Aguiar & Farias, 2006).

Outro tipo de problema associado ao com tensões são as falhas causada por fadiga. Embora estejam diretamente associadas a defeitos de caráter geométrico do cordão de solda, tais como: inclusão de escória, porosidade, mordedura, convexidade ou concavidade excessiva, dentre outros, que atuam como concentradores de tensões (Nguyen & Wahab, 1995), é possível que a resistência à fadiga de uma junta soldada sofra ainda os efeitos das tensões residuais presentes no material (Masubuchi, 1980; Masubuchi, 1983; Rajad, 1992).

As falhas por corrosão sob-tensão são uma das principais preocupações nas indústrias químicas, petroquímicas e nucleares. Este tipo de corrosão está associada à ação conjunta de tensões trativas e meio corrosivo (Linnert, 1994, Leis & Eiber, 1997). Um dos principais problemas deste tipo de falha é que em alguns casos ela pode ocorrer de forma completamente inesperada, uma vez que o mecanismo de falha não apresenta perda considerável de massa e sim a nucleação e crescimento de trincas. Os danos causados por corrosão sob-tensão em equipamentos e tubulações são bastante graves, podendo causar além da falha, incêndios e explosões (Chaburkin *et al.*, 2005).

Com base no exposto, observa-se quão importante é o conhecimento do comportamento das tensões residuais de soldagem. Embora diversas análises sejam realizadas para a avaliação da junta soldada, em nenhum dos ensaios convencionalmente utilizados, as tensões residuais são avaliadas, pois a sua determinação é bastante complicada e depende de técnicas sofisticadas. Além disso, os equipamentos, estruturas, tubulações e outros componentes encontrados nos mais diversos setores industriais necessitam, muitas vezes, de análises em campo, por inúmeras razões (grande dimensão, impossibilidade de remoção, etc) e, portanto, de técnicas que possam ser levadas ao dia-dia da indústria.

A técnica de medição de tensões residuais por difração de raio-X possui uma posição particular por ser um método não-destrutivo, permitindo a avaliação de tensões sem comprometer a integridade da peça ou componente (Lu *et al.*, 1994; Lu., 1996; Noyan & Cohen, 1987). Além disso, com os avanços tecnológicos das áreas de microeletrônica, permitindo o desenvolvimento de difratômetros de raios-X portáteis e detectores de raio-X, a utilização de computadores e pacotes de softwares, tornaram possível a redução dos tempos de medição em níveis similares aos obtidos pelo uso de extensômetros (Sprauel & Castex, 1991). Estes fatores têm tornado esta técnica bastante atrativa para aplicação em campo nos últimos anos (Assis *et al.*, 2003; Monin *et al.*, 2003; Monin *et al.*, 2004).

Em refinarias de petróleo, são utilizados quilômetros de tubulações, as quais são montadas e reparadas por soldagem e, cujos níveis das tensões residuais de soldagem não são avaliados. Desta forma, o objetivo deste trabalho é apresentar a possibilidade de avaliação das tensões residuais de soldagem em campo, utilizando a técnica de difração de raio-X.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O princípio da difração de raio-X é caracterizado de uma maneira básica pela incidência de um feixe monocromático sobre a superfície de um material, o qual será espalhado (difratado) e posteriormente detectado por algum dispositivo (Figura 2). A distribuição atômica regular dos materiais cristalinos é responsável pelo espalhamento das ondas de raio-X que incidem no material, desde que o espalhamento ocorra segundo a Lei de

Bragg (Equação I). Por esta equação é possível relacionar o ângulo 2θ medido experimentalmente com a distância interplanar d . λ é o comprimento de onda.

$$n\lambda = 2d^{hkl} \cdot \sin\theta^{hkl} \quad \text{Eq. I}$$

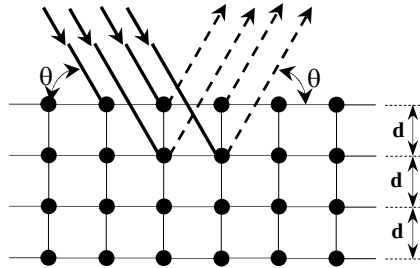


Figura 2. Desenho esquemático do espalhamento das ondas de raio-X segundo a Lei de Bragg.

Os materiais na sua imensa maioria são policristalinos e apresentam, em muitos casos, orientação cristalográfica aleatória. Assim, um feixe de raio-X incidindo com determinado ângulo θ sobre a superfície de uma material policristalino, será difratado somente por alguns grãos com orientação favorável. Para materiais livre de tensões a distância interplanar é padrão (d_0), mas para um material submetido a tensões (aplicadas ou residuais), a distância interplanar sofre variações de acordo com a orientação (ângulo ψ) da família de planos hkl e da tensão aplicada, conforme mostrado na Figura 3. Com base na posição do pico de difração θ é possível determinar o espaçamento dos planos cristalográficos (d), através da Lei de Bragg (Equação I). Com isso é possível encontrar o estado de deformação da estrutura cristalina (ε), calculada pela Equação II.

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} \quad \text{Eq. II}$$

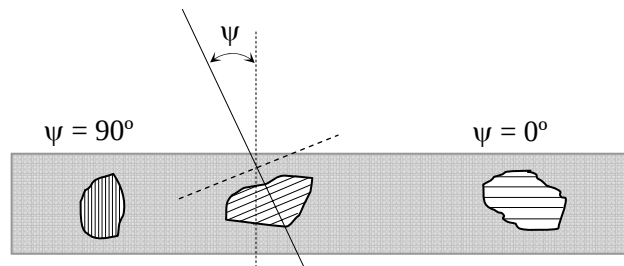


Figura 3. Tensão compressiva em um material policristalino e isotrópico (Eigenmann & Macherauck, 1996).

Atualmente o método mais empregado na determinação das tensões residuais é o “método do $\sin^2\psi$ ”, o qual é aplicado à materiais policristalinos (Sprauel & Castex, 1991). Para calcular a tensão por este método é necessário determinar a variação da distância interplanar em função da variação do ângulo ψ (Figura 3). A tensão é então calculada através da equação III (Philippov, 2006).

$$\sigma = -\frac{E}{1+\nu} \cdot \cot g\theta \cdot \frac{d\theta}{d(\sin^2\psi)} \quad \text{Eq. III}$$

Onde: E = módulo de elasticidade;
 ν = coeficiente de Poisson.

3. METODOLOGIA

Foram usados neste trabalho tubos de aço baixo carbono ASTM A106 Gr. B. para serviço em alta temperatura, com diâmetro nominal de 4" e Schedule 40, cuja composição química é apresentada na Tabela 1. O metal de adição empregado na soldagem TIG manual foi o AWS ER 70S3 com diâmetros de 2,5 e 3,25 mm, cuja composição química é apresentada na Tabela 1.

As soldagens foram realizadas pelo processo TIG, executadas manualmente por um soldador qualificado cedido pela Petrobras. As juntas foram confeccionadas por torneamento, seguindo a geometria apresentada na Figura 4, cujas dimensões são apresentadas na Tabela 2. Os parâmetros de soldagem são apresentados na Tabela 3.

Tabela 1. Composição química do metal base e do metal de adição. (% em massa)

Material	C	Mn	Si	P	S
Aço ASTM A106 Gr. B (Tubo)	0,19	0,96	0,20	0,016	0,006
Metal de adição AWS ER 70 S3	0,18	0,95	0,18	0,09	0,04

Tabela 2. Dimensões dos corpos de prova e da geometria da junta.

Dimensões	D (mm)	d (mm)	e (mm)	L (mm)	r (mm)
Corpo de prova 4"	114,3	128,2	6,6	818,8	6

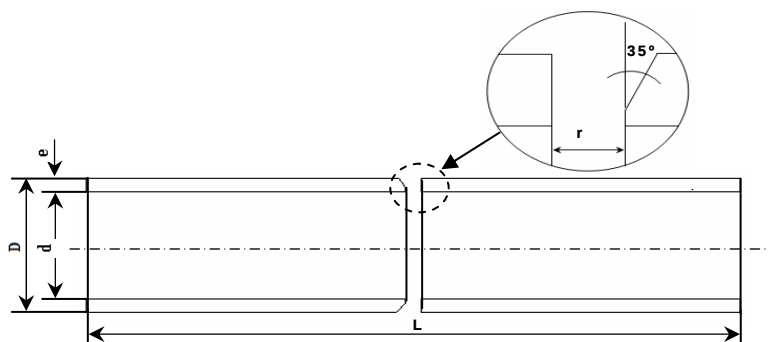


Figura 4. Desenho esquemático do corpo de prova.

A análise das tensões foi realizada na superfície externa dos tubos utilizando um minidifratômetro para medição de tensões em campo (Figura 5), desenvolvido pelo pessoal do Instituto Politécnico de Nova Friburgo UERJ/IPRJ (Assis *et al.*, 2003; Monin *et al.*, 2003; Monin *et al.* 2004). Uma pequena camada de material foi removida eletroliticamente antes da medição para eliminar possíveis tensões residuais devido a deformações superficiais. O valor de corrente usado foi de 1,75 A, o tempo de ataque foi de 10 minutos e o eletrólito foi uma solução com 20% de HCl diluída em água destilada. A tensão de operação do minidifratômetro foi de 20 kV e a corrente de 50 mA. O método de medição utilizado foi o do $\sin^2\psi$, com medidas realizadas para $\psi = 0^\circ, 20^\circ, 35^\circ$, e 50° .

A Localização do pico de difração é o primeiro passo para a determinação dos resultados, contudo a avaliação do difratograma apenas visualmente pode acarretar em erros na correta localização do pico e por sua vez no valor da tensão residual. Assim, é necessário ajustar o perfil do pico de difração utilizando funções analíticas, as quais descrevem sua forma e localização do pico. Foi utilizado o software Origin para construção dos difratogramas. As principais funções aplicadas ao ajuste de perfis de difração são Gauss, Lorentz e pseudo-Voigt (Noyan & Cohen, 1987). As funções de Gauss e Lorentz podem ser consideradas casos extremos da função Voigt (Equações IV e V).

A função pseudo-Voigt se trata de uma aproximação simples da função Voigt e tem sido amplamente usada para modelar o perfil de picos de difração (Young & Sakthivel, 1988; Paiva-Santos, 2003; Araújo *et al.*, 2005; Estevez-Rams, 2005). Uma quarta função (Pearson VII) foi escolhida (Equação VII), a qual tem sido freqüentemente empregada em difração de raio-X, difração de nêutrons e espectroscopia Mössbauer (Toraya, Yoshimura & Somiya, 1983; Oven, Ashworth & Bowyer, 1992; Wulfhekel & Cadogan, 1994).

$$y = y_0 + Ae^{-\frac{(x-x_c)^2}{2w^2}} \quad \text{Eq. IV}$$

$$y = y_0 + \frac{2A}{\pi} \frac{w}{4(x-x_c)^2 + w^2} \quad \text{Eq. V}$$

$$pV(r) = \eta G(r) + (1-\eta)L(r) \quad \text{Eq. VI}$$

$$y = A \frac{2\sqrt{mu} \cdot e(\Gamma(2^{1/mu} - 1))}{\pi \cdot e(\Gamma(mu - 0,5))} \left[1 + 4 \frac{2^{1/mu} - 1}{w^2} (x - x_c)^2 \right]^{-mu} \quad \text{Eq. VII}$$

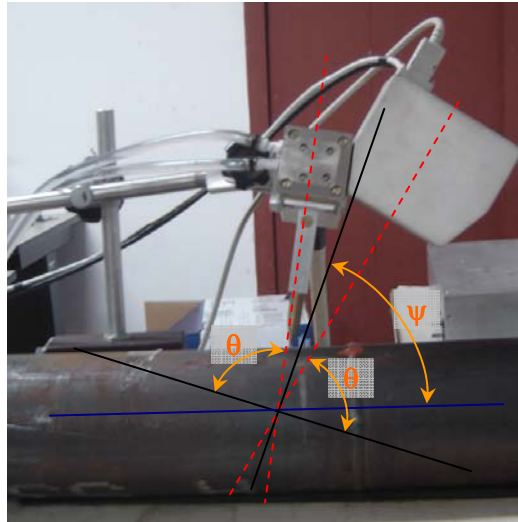


Figura 5. Geometria descrita pelo conjunto tubo/detector.

4. RESULTADOS

Foram realizadas as análises dos picos usando cada uma das funções (Gauss, Lorentz, pseudo-Voigt e Pearson VII). Para evitar um possível efeito do ruído de fundo de escala (*background*) sobre o perfil ajustado pelas funções, procedeu-se o ajuste apenas na região do pico, descartando as regiões antes e após o pico. A Figura 6 apresenta o ajuste das curvas do metal de solda da amostra A1 para $\psi = 33^\circ$. De uma forma geral, as curvas de ajuste de Gauss, Lorentz e pseudo-Voigt apresentaram pouca diferença. Nesta Figura, CPS corresponde a quantidade de raio-X captado e o canal do detector ao ângulo 2θ . A função Pearson VII apresenta uma maior diferença quando comparada às demais. Contudo, esta variação em termos de ângulo 2θ é na ordem de $0,018^\circ$. Os valores de R^2 mostrados na Figura 6 indicam o quão próximo o ajuste da curva está da condição real, assim, quanto mais próximo da unidade melhor é o resultado. Verifica-se então que as curvas pseudo-Voigt ($R^2 = 0,98099$) e de Gauss ($R^2 = 0,98062$) obtiveram melhores resultados de ajuste de curva, seguido por Lorentz ($R^2 = 0,97971$) e Pearson VII ($R^2 = 0,97617$). O mesmo procedimento foi realizado para os demais ângulos ψ .

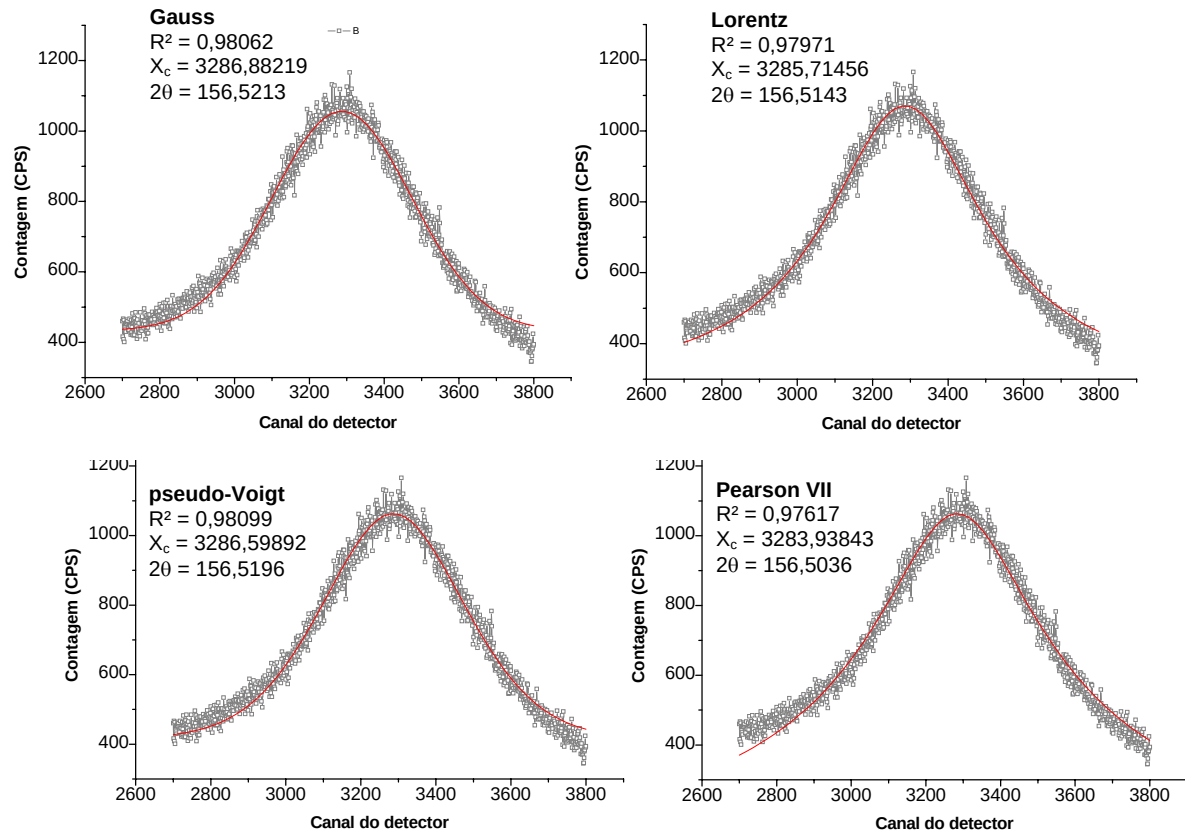


Figura 6. Ajuste do perfil dos picos de difração para o ângulo $\psi = 33^\circ$ usando as funções: (a) Gauss; (b) Lorentz; (c) pseudo-Voigt; (d) Pearson VII.

Para avaliar qual ajuste de curva apresenta o melhor resultado em termos de determinação da distância interplanar d , foram construídos os gráficos de “distância d ” versus $\sin^2 \psi$ para o ponto de medida no metal de solda da amostra A1, cujos resultados são apresentados na Figura 7. Além da comparação entre os valores obtidos com o ajuste dos picos, foi realizado também o cálculo para valores dos picos determinados visualmente sem ajuste.

A Figura 7a apresenta o resultado para determinação do pico realizada visualmente. Observa-se que a inclinação da reta foi negativa, indicando que a distância interplanar diminui com o aumento do ângulo ψ , o que corresponde a um estado de tensões compressivo. Houve uma grande dispersão dos resultados, inclusive com o ponto referente à medida para $\psi = 22^\circ$ sendo descartado para um melhor ajuste da reta. Embora tenha sido procedido o descarte deste ponto, o valor da tensão foi baixo (-95,9MPa) e o erro da medida foi considerado elevado ($\pm 70,2$ MPa).

Para o ajuste com a função Gaussianica observa-se que a distribuição dos pontos ao longo da reta foi bem mais regular (Figura 7b). O valor da tensão foi de -253,7 MPa e o erro foi menor ($\pm 43,0$ MPa), estando dentro dos valores normalmente observados para medidas de tensometria por raio-X (± 50 MPa). Para o ajuste com a função Lorentz (Figura 7c) verificou-se que o valor da tensão residual foi de -255,7 MPa e o erro para o ajuste com a função Lorentziana foi de $\pm 40,2$ MPa.

Analisando o ajuste dos picos pela função pseudo-Voigt (Figura 7d), verifica-se a presença de tensões residuais compressivas. O valor da tensão foi de -254,4 MPa, estando entre os valores obtidos para a função Gauss (-253,7 MPa) e Lorentz (-255,7 MPa). O erro foi de $\pm 41,9$ MPa, estando entre os valores obtidos para Gauss ($\pm 43,0$ MPa) e Lorentz ($\pm 40,2$ MPa).

Os resultados referentes ao ajuste dos picos com a função Pearson VII revelaram um comportamento um pouco diferente dos demais ajustes (Figura 7e). A tensão residual foi compressiva (-244,0 MPa), menor que os demais ajustes analisados, e o erro foi substancialmente menor ($\pm 29,7$ MPa).

Foi observado que a análise dos picos com as funções de Gauss e pseudo-Voigt apresentam melhores resultados de ajuste de curva, entretanto, os menores erros no cálculo das tensões residuais foram conseguidos para as correções por Lorentz e Pearson VII, justamente as que tiveram um ajuste de curva um pouco menor que as funções Gauss e pseudo-Voigt. Acredita-se que as funções de Gauss e pseudo-Voigt consigam ajustar a curva de uma forma mais regular e as funções Lorentz e Pearson VII conseguem determinar melhor a posição do pico. Maiores informações sobre estes resultados podem ser obtidos no trabalho de Silva *et al* (2007).

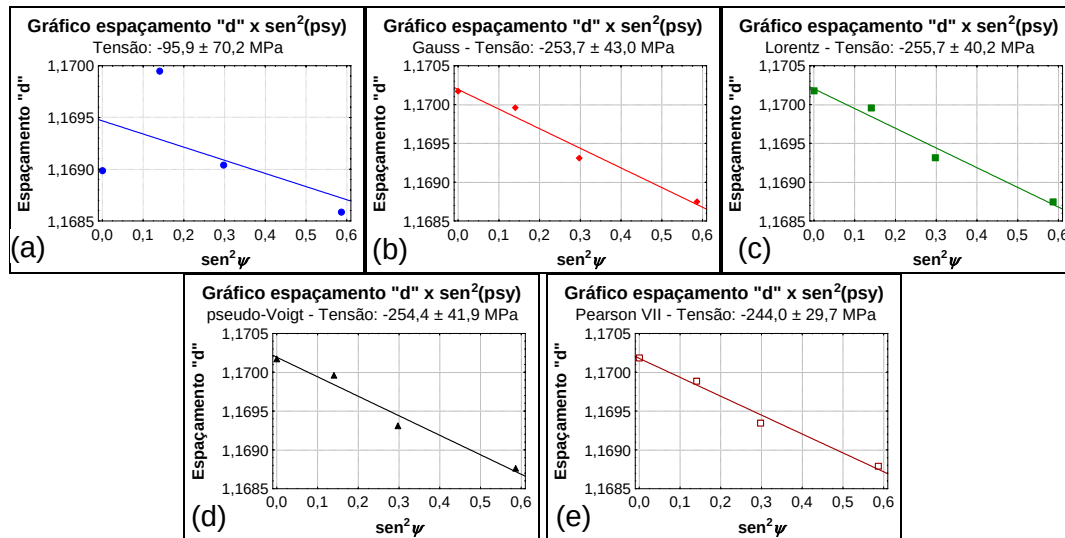


Figura 7. Gráfico “distância d ” versus $\sin^2 \psi$. (a) sem correção; (b) Gauss; (c) Lorentz; (d) pseudo-Voigt; (e) Pearson VII.

O perfil das tensões residuais produzidas pelo ciclo térmico de soldagem para o tubo com diâmetro de 4” e soldado pelo processo TIG manual com energia do último passe de 14,5 kJ/cm é apresentado na Figura 7. Verifica-se que o nível máximo de tensão residual não está localizado no centro da junta, ou seja, no cordão de solda, mas sim na região da ZAC pelo lado esquerdo, adjacente ao cordão de solda. No metal de solda o nível de tensão alcançado foi de -244 MPa para a correção por Pearson VII e -255 MPa para a correção por Lorentz, enquanto que no lado esquerdo da ZAC ($x = -5$ mm) o nível da tensão foi da ordem de -357 MPa para a correção por Pearson VII e -368 MPa para a correção por Lorentz. Ressalta-se ainda que o lado esquerdo da junta é o que possui o chanfro, conforme Figura 4.

No lado esquerdo da junta (lado chanfrado) observa-se ainda que o nível de tensão compressiva estende-se por pouco menos que 15 mm, passando a partir deste ponto, de tensão compressiva para trativa. O pico de tensão trativa é atingido em $x = -30$ mm, com um valor de tensão de 82 MPa (Pearson VII) e 115 MPa (Lorentz), caindo logo em seguida, até que em $x = -50$ mm verifica-se que o nível de tensão é praticamente zero.

Para o lado do chanfro reto (direito), verifica-se que na região da ZAC adjacente ao cordão de solda a tensão obtida foi de 20 MPa e 42 MPa, para as correções por Pearson VII e Lorentz respectivamente. Conforme visualizado na Figura 8 direito, a exceção do ponto $x = 5$ mm que apresentou tensão trativa, os demais foram constituídos por tensões compressivas, as quais tornam-se praticamente zero em $x = 20$, permanecendo assim até o fim dos pontos analisados.

Conforme os resultados apresentados para a junta de topo soldada circunferencialmente, observa-se que as tensões residuais medidas pela superfície externa apresentaram valores compressivos na região da solda e de tração na região mais afastada do cordão. Inicialmente estes resultados são considerados justamente o oposto do perfil normalmente observado em juntas soldadas, uma vez que na imensa maioria dos casos, a literatura apresenta resultados experimentais e simulações para aplicações em chapas planas (ASM Handbook, 1993; Parlane, 1981; Rodrigues et al., 2006).

Contudo, em se tratando da soldagem de tubulações e dutos, verifica-se que o campo de tensões residuais é bem mais complexo e o comportamento é, de certa forma, diferente da condição de chapa plana. No caso da geometria cilíndrica, ocorre a formação de elevados níveis de tensões residuais de tração na superfície interna ao longo da região do cordão de solda e na ZAC, enquanto que para as mesmas regiões na superfície externa são observadas tensões residuais compressiva (Law et al., 2006; Dike et al., 1998).

O comportamento do perfil das tensões residuais mostrado está de acordo com o reportado pela literatura (Josson & Josefson, 1988; Dong et al., 1997). Abid, Siddique e Mufti (2005) avaliaram as tensões residuais de soldagem em juntas tubo-flange com diâmetro de 4”, através de simulação usando o método dos elementos finitos e verificaram um comportamento bastante semelhante ao apresentado neste trabalho. Entretanto, os autores não apresentaram resultados experimentais.

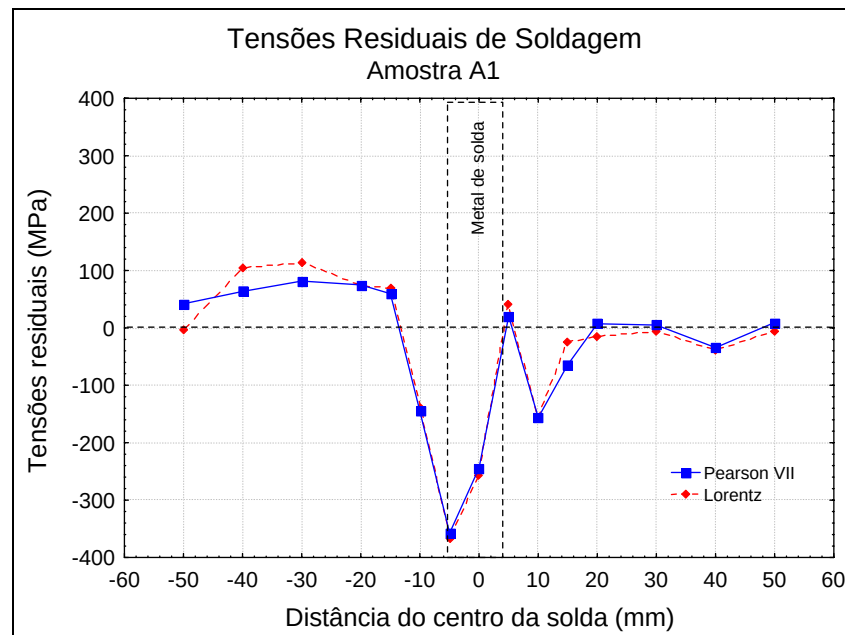


Figura 7. Perfil das tensões residuais na amostra A1 (diâmetro de 4”) soldada pelo processo TIG manual com energia de 14,5 kJ/cm no último passe.

Os resultados mostram que é possível obter resultados satisfatórios sobre o comportamento das tensões residuais de soldagem em tubos de pequeno diâmetro, utilizando o minidifratômetro de raio-X para inspeção de campo desenvolvido pelos pessoal do IPRJ de Nova Friburgo.

É importante ressaltar que o conhecimento do nível de tensões residuais em equipamentos que processam fluidos com alta corrosividade é importante, visto que nestas condições é possível a ocorrência falhas por corrosão sob-tensão (CST). A associação do meio corrosivo e a existência de elevados níveis de tensões residuais trativas no material podem ocasionar a formação de trincas e levar o equipamento ao colapso. Destaca-se que a técnica de difração de raio-X já tem sido utilizada com sucesso em algumas aplicações. Numa unidade de refino de petróleo (Refinaria Landulpho Alves RELAM) a técnica de difração de raio-X foi usada com sucesso para avaliar o comportamento das tensões residuais durante o reparo de equipamentos que operam em meio aquoso com presença de H_2S , e cujo reparos realiza-se por soldagem com a posterior realização de tratamentos térmicos localizados para alívio de tensões, os quais (soldagem e tratamento térmico) foram validados pela técnica de difração de raio-X.

Uma outra aplicação da técnica seria na validação de reparos com procedimentos especiais de soldagem que visam a eliminar a realização de tratamentos térmicos pós-soldagem ou na validação de modelos de elementos finitos, assim como na avaliação de equipamentos novos ou em operação onde exista a dúvida da existência ou não de níveis anormais de tensões residuais que possam comprometer a performance do equipamento em serviço.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados experimentais apresentados neste trabalho foi possível concluir que a medição de tensões residuais por difração de raio-X usando o minidifratômetro para aplicações em campo, mostrou-se bastante eficaz na determinação do perfil de tensões em tubulações de aço carbono soldadas em junta de topo, podendo ser uma técnica extremamente atrativa para os setores de inspeção de equipamentos na indústria do petróleo, contribuindo para aumento da confiabilidade operacional.

O ajuste de curva por funções analíticas para determinar a correta localização do pico de difração de raio-X mostrou-se um método bastante adequado, reduzindo o erro das medidas. Dentre as funções avaliadas as que apresentaram melhores resultados foram a Pearson VII e a Lorentz.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer aos professores Dr. Joaquim Teixeira de Assis e Vladimir Monin do IPRJ (Nova Friburgo) pelo suporte laboratorial. A ANP-PRH31 pela concessão da bolsa. Ao pessoal da PETROBRAS/LUBNOR/MI, especialmente ao Engo Danúbio I. S. de Souza e ao Tec. Manut. João César Matias da Silva. Aos órgãos de fomento FINEP e CNPq pelo suporte financeiro.

7. REFERÊNCIAS

- ABID, M.; SIDDIQUE, M.; MUFTI, R.A. 2005. Prediction of welding distortion and residual stress in a pipe-flange joint using the finite element technique. **Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering**. 13: 455-470.
- ARAÚJO, J. C., ASSIS, J. T., MONIN, V. I., BERTOLINO, L. C., 2005, Determinação dos Parâmetros Microestruturais de Amostras de Caulinitas Usando o Método de Refinamento do Perfil de Difração de Raios-X. **Revista da Escola de Minas de Ouro Preto**. n. 58, v. 4, p. 299-307.
- ASSIS, Joaquim T de ; MONIN, Vladimir ; PEREIRA, F. R. ; FILIPPOV, Serguey . difratômetro de raios x portátil para análise de tensões em condições de campo. In: **3rd Pan American Conference for Nondestructive Testing - PANNDT**, 2003, Rio de Janeiro. Anais dos Trabalhos Técnicos-PANNDT, 2003. v. 1. p. 1-5.
- AWS, Welding Handbook, Vol. 1, 8th ed., American Welding Society, Miami, FL, 1987, pp. 2–32.
- CHABURKIN, V. F., BAREMBOIM, I. I., VASILEV, G. G., IVANTSOVA, S. G., 2005, Diagnostics and repair of corrosion damages of pipelines. CD **Proceedings of the international conference “Pipeline rehabilitation and maintenance”**, Manama, Bahrain.
- DIKE, J. J., ORTEGA, A. R., CADDEN, C. H., RANGASWAMY, P., BROWN, D., 1998, Finite Element Modeling and Validation of Residual Stress in 304L Girth Welds. **Proceedings of 5th International Conference on Trends in Welding Research**, Pine Mountain.
- DONG, Y., HONG, J. K., TSAI, C. L., DONG, P., 1997. Finite element modeling of residual stress in austenitic stainless steel pipe girth welds. **Welding Journal**. v. 76, n. 10, pp. 443-449.
- EIGENMANN, B.; MACHERAUCH, E. Röntgenographische Untersuchung von Spannungszuständen in Werkstoffen. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, v. 27 pp. 426-437, 1996.
- ESTEVEZ-RAMS, E., PENTON, A., MARTINEZ-GARCIA, J., FUESS, H., 2005, The use of Analytical Peak Profile Functions to Fit Diffraction Data of Planar Faulted Layers Crystals. **Crystal Research Technology**. n. 1/2, 166-176.
- HARRISON, J. D., 1981. The effect of residual stresses on fatigue behaviour. Residual stresses and their effect. **The Welding Institute**, Cambridge.
- JONSSON, M., JOSEFSON, B. L., 1988, Experimentally Determined Transiente and Residual Stress in the Butt-welded Pipes. **ASME Journal of Pressure Vessels Technology**. v. 104, pp.204-209.
- KOU, S., 2002, **Welding metallurgy**, 2nd Ed., John Wiley & Sons.
- LAW, M.; PRASK, H.; LUZIN, V.; GNAEUPEL-HEROLD, T. 2006. Residual Stress Measurements in Coil, Linepipe and Girth Welded Pipe. **Materials Science and Engineering A**. 437: 60-63.
- LEIS, B. N. & EIBER, R. J., 1997, Stress corrosion cracking on gas-transmission pipelines: history, causes and mitigation. In: **Proceeding of First International Business Conference on Onshore Pipelines**, Berlin.
- LINNERT, G. E., 1994, **Welding Metallurgy**, Vol. 1, American Welding Society, Miami, Florida, USA.
- LU, J., BOUHELIER, C., LIEURADE, H. P., BARALLE, D., MIEGE, B., FLEVANOT, J. F. (1994). Study of Residual Welding Stress Using Step-by-step Hole Drilling and X-ray Diffraction Method. **Welding in the World**, v. 33, n. 2, pp. 118-128.
- LU, J., 1996. Handbook of Measurement of Residual Stress. Society of Experimental Mechanics.
- MASUBUCHI, K., 1980, Analysis of welded structures. Pergamon Press.
- MASUBUCHI, K., 1983, Residual stress and distortion, **Metals Handbook**, 9th ed., vol 6. Metals Park, OH, American Society for Metals - ASM, pp. 1094-1102.
- MONIN, V. I.; ASSIS, J. T.; PEREIRA, F. R.; GUROVA, T.; TEODOSIO, J. Portable X-ray apparatus for stress measurements. In: **International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials**, 2003, Madrid. THERMEC 2003. Zurich- Switzerland : Trans Tech Publications Ltd, Brandrain 6, CH-8707, 2003. v. 426. p. 4531-4534.
- MONIN, V. I.; ASSIS, J. T.; PEREIRA, F. R.; FILIPOV, S.; GUROVA, T.; TEODÓSIO, J. R.; ABREU, H. F. G. Portable X-ray Apparatus for Strees Measurements. In: **Seventh International Workshop on Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering**, 2004, São Petersburgo. Proceedings of SPIE. Bellingham, Washington : SPIE- The International Society for Optical Engineering, 2004. v. 5400. p. 192-195.
- NGUYEN, T. N., WAHAB, M. A., 1995a. A theoretical study of the effect of weld geometry parameters on fatigue crack propagation life. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 51, n. 1, pp 1-18.
- NOYAN I. C. & COHEN, J. B., 1987, **Residual Stress. Measurement by Diffraction and Interpretation**. New York: Springer.
- OVEN, R., ASHWORTH, D. G., BOWYER, M. D. J., 1992, Formulas for the Distribution of Ions Under an Ideal Mask. **Journal of Physics D: Applied Physics**. v. 25, p. 1235-1237.

- PAIVA-SANTOS, C. O., 2003, Caracterização de Materiais pelo Método de Rietveld com Dados de Difração por Policristais. **Apostila. Instituto de Química – UNESP**. Bauru.
- PARLANE, A.J.A., Origin and Nature of Residual Stresses in Welded Joints. The Welding Institute, Abington Hall, Cambridge, 1981.
- PHILIPPOV, S., 2006, Modelagem computacional para a interpretação de dados de medição de tensões. **Tese de Doutorado**. Universidade Estadual do Rio de Janeiro. Nova Friburgo, RJ, Brasil.
- RADAJ, D., 1992. Heat Effects of Welding - Temperature Field, Residual Stress, Distortion, Springer-Verlag.
- RODRIGUES, Y.G.; SOLA, J.B.; GIL, F.; RIVALTA, J. 2006. Obtención de Tensiones Residuales a lo Largo de um Cordón de Soldadura Mediante Métodos Analíticos y Experimentales. *Soldagem & Inspeção*. 11 (2): 93-101.
- SILVA, C. C., AGUIAR, W. M., FARIAS, J. P., 2006, Trinca na ZAC do aço ABNT 4340 utilizado para determinação das zonas duras e macias através do teste de Higuchi. *Condição temperado e não revenido. Soldagem & Inspeção*, v. 11, n. 2 - Capa.
- SILVA, F. D. A., FREITAS JR., F. E. S., SILVA, C. C., FARIAS, J. P. Uso de funções analíticas no ajuste de picos de difração de raio-X para medição de tensões residuais. In: **62º Congresso Anual da ABM – Internacional**. Vitória. Brasil, 2007.
- SPRAUEL, J. M., CASTEX, L., 1991, X-ray Stress Analysis. **Materials Science Forum**. v. 79-82, pp. 143-152.
- TORAYA, H., YOSHIMURA, M., SOMIYA, S., 1983. A Computer Program for the Deconvolution of X-ray Diffraction Profiles with the Composite of Pearson VII Function. **Journal Applied Crystallography**. v. 16, p. 653-657.
- YOUNG, R. A., SAKTHIVEL, A., 1988. Bimodal Distributions of Profile-broadening Effects in Rietveld Refinement. **Journal Applied Crystallography**. v. 21, p. 416-425.
- WULFHEKEL, W., CADOGAN, J. M., 1994. Mössbauer Line-sharpening – Application to Magnetically Split Spectra. **Hyperfine Interact.** v. 92, p. 1195-1202.

X-RAY DIFFRACTION APPLICATION FOR FIELD INSPECTION – EVALUATION OF RESIDUAL STRESS IN PIPES

The evaluation of structural integrity of industrial equipments in oil and gas industry (reactors, tower distillation, furnaces, boilers, heat exchanger, tank, pipelines) necessarily goes by the evaluation of the materials conditions and mechanical properties. In the weld joints, the evaluation consists, in general, of non-destructive tests (liquid penetrant, ultrasonic testing, magnetic particles), hardness and metallography. However, an important metallurgical alteration due to the welding process is the residual stress formation, which is not appraised in the day-to-day of the industry. The welding residual stress is critical and can cause some problems as fatigue, cold cracking and stress corrosion cracking. In refineries settings, kilometers of pipelines are used, mounted and repaired by welding, whose levels of the residual stress is not appraised. The objective of this work is to present the possibility of residual stress evaluation in field, using the X-ray diffraction technique. In this work a portable X-ray minidiffractometer was used for residual stress measurement. The measurements were carried out in ASTM A106 Gr. B steel pipe, with 4" diameter, welded manually by GTAW process. The filler metal used it was AWS ER 70 S3. The results showed that the measurement of residual stress by X-ray diffraction using the portable minidiffractometer for field applications, it was shown quite effective in the determination of the stress profile in low carbon steel pipe butt-welded joint, could be an extremely attractive technique for the inspection and maintenance sectors in the petroleum industry, contributing to increase of the operational reliability.

ASTM A106 Gr. B steel, welding, residual stress

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.