

# AVALIAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS DE SOLDAGEM EM TUBULAÇÕES DE PEQUENO DIÂMETRO UTILIZANDO DIFRAÇÃO DE RAIOS-X<sup>1</sup>

Cleiton Carvalho Silva<sup>2</sup>  
Serguey Philippov<sup>3</sup>  
Gerardo Jesus Aracena Pérez<sup>4</sup>  
Hélio Cordeiro de Miranda<sup>5</sup>  
Jesualdo Pereira Farias<sup>6</sup>

## Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar as tensões residuais de soldagem em tubulações de pequeno diâmetro usadas em refinaria de petróleo. A metodologia consistiu da soldagem de tubulações com diâmetro de 4", usando o processo TIG manual. Empregou-se metal de adição do tipo AWS ER 70 S3 com diâmetros de 2,5 mm e 3,25 mm. Utilizou-se uma fonte eletrônica de soldagem e sistema de aquisição de dados para controle dos parâmetros de soldagem. As medições das tensões na superfície externa do tubo foram realizadas através de um minidifratômetro de raios-X para medição em campo. O comportamento do perfil de tensões residuais na superfície externa foi caracterizado por tensões compressivas na região da solda e trativas na região mais afastada do cordão. Para a superfície interna as evidências sugerem que o perfil de tensões é o oposto do observado para a superfície externa, com tensões trativas na região da solda e compressivas na região mais distante. O ponto de máxima tensão nos tubos foi localizado na ZAC adjacente ao cordão de solda.

**Palavras-chave:** Tensões residuais; Soldagem; Tubos; Difração de raios-X.

## WELDING RESIDUAL STRESS MEASUREMENT ON SMALL SIZE PIPES BY X-RAY DIFFRACTION

### Abstract

The objective of this work was evaluated the welding residual stress in small size pipes used in refining settings. Pipes with 4" (diameter) were welded using manual GTAW process. Was employee the AWS ER 70 S3 filler metal with 2,5 mm and 3,25 mm (diameter). Were used an electronic power supply and data acquisition system to control of welding parameters. The stress analysis were carried out by X-ray diffraction. The axial residual stress measurement were accomplished in the outer surface of the pipes, showed that the profiles is formed by compressive stress in the welds region (fusion zone – FZ and heat affected zone – HAZ) and for tension stress in the areas more distant of weld bead. For inner surface the evidences suggest that the stress profile is opposite of the observed for outer surface, with tension stress in welding zone and compressive stress in the region more distance of weld bead. The maximum stress point was located in HAZ adjacent to the weld bead.

**Key words:** Residual stress; Welding; Pipes; X-ray diffraction.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

<sup>2</sup> Engº, M.Sc., Doutorando em Engenharia e Ciência dos Materiais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFC.

<sup>3</sup> Dr., Bolsista DCR, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFC.

<sup>4</sup> M.Sc., Engº de Inspeção de Equipamentos, PETROBRAS/LUBNOR/IE.

<sup>5</sup> Dr., Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFC.

<sup>6</sup> Dr., Professor Titular, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFC.

## 1 INTRODUÇÃO

A soldagem é o principal processo de construção e reparo de tubulações e dutos para transporte de petróleo, gás e derivados. Em unidades de refino de petróleo, boa parte destas tubulações é de pequeno diâmetro e as soldagens são realizadas de forma manual. Os principais processos empregados na construção e no reparo de tubulações industriais são o eletrodo revestido e o TIG.

Dentre as diversas alterações mecânico/metalúrgicas sofridas pelos materiais quando submetidos a um ciclo térmico de soldagem, destaca-se o surgimento de tensões residuais, as quais são definidas como tensões auto-equilibradas presentes em um corpo, sem a ação de qualquer força externa.<sup>(1,2)</sup> As tensões residuais de soldagem são formadas por escoamentos localizados devido ao aquecimento e resfriamento não-uniforme, durante o ciclo térmico. As principais fontes de tensões residuais durante a soldagem são: tensões residuais devido à contração no resfriamento; tensões residuais devido o resfriamento superficial intenso e tensões residuais devido a transformações de fases.<sup>(3)</sup>

As tensões residuais são geralmente indesejáveis, pois em muitos casos a sua magnitude é de mesma ordem do limite de escoamento do material,<sup>(4)</sup> estando assim associadas a diversos problemas, tais como trincas a frio,<sup>(5)</sup> fratura por fadiga,<sup>(6)</sup> corrosão sob-tensão,<sup>(7)</sup> dentre outros.

Visto que as tensões residuais constituem um problema inerente ao processo de soldagem e não podem ser eliminadas, torna-se necessário conhecer e buscar formas de minimizá-las. A insuficiente quantidade de informações sobre o comportamento das tensões residuais em tubulações de pequeno diâmetro motivou o desenvolvimento deste trabalho, o qual pretende explorar o comportamento das tensões residuais de soldagem, em tubulações de pequeno diâmetro de aços baixo carbono, usados em refinarias de petróleo.

## 2 TENSOMETRIA POR RAIOS-X

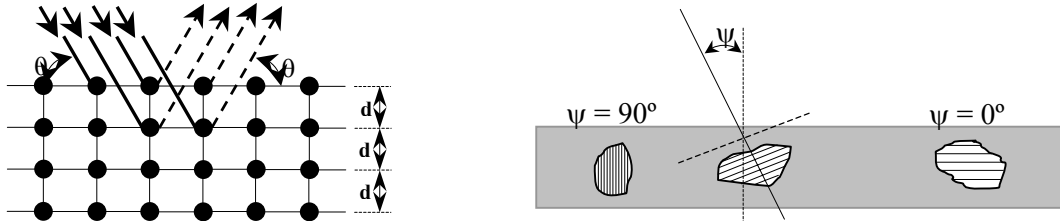
Dentre as técnicas de medição de tensões residuais, a difração de raios-X possui posição particular por ser um método não-destrutivo.<sup>(8)</sup> O princípio da difração de raios-X é caracterizado de uma maneira básica pela incidência de um feixe monocromático sobre a superfície de um material, o qual será espalhado (difratado) e posteriormente detectado por algum dispositivo (Figura 1a). A distribuição atômica regular dos materiais cristalinos é responsável pelo espalhamento das ondas de raios-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  $2\theta$  medido experimentalmente com a distância interplanar  $d$ .  $\lambda$  é o comprimento de onda.

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

Os materiais na sua imensa maioria são policristalinos, e apresentam em muitos casos orientação cristalográfica aleatória. Assim, um feixe de raios-X incidindo com determinado ângulo  $\theta$  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  $\psi$ ) da família de planos  $hkl$  e da tensão aplicada, conforme mostrado na Figura 1b. Com base na posição do pico de difração  $\theta$  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 ( $\varepsilon$ ), calculada pela equação II.

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



**Figura 1.** Desenho esquemático do espalhamento das ondas de raio-X segundo a Lei de Bragg. (b) Tensão compressiva em um material policristalino e isotrópico.<sup>(9)</sup>

Atualmente o método mais empregado na determinação das tensões residuais é o “método do  $\text{sen}^2\psi$ ”, o qual é aplicado à materiais policristalinos.<sup>(10)</sup> Para calcular a tensão por este método é necessário determinar a variação da distância interplanar em função da variação do ângulo  $\psi$  (Figura 1b). A tensão é então calculada através da equação III (7).

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

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

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 70S 3 com diâmetros de 2,5 e 3,25 mm, cuja composição química é apresentada na Tabela 1.

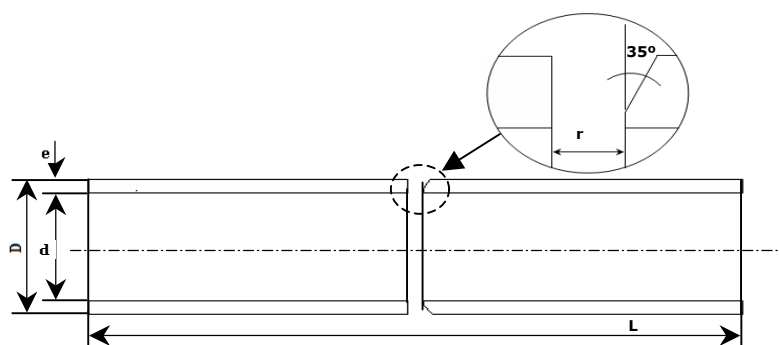
As soldagens foram realizadas pelo processo TIG, executadas manualmente por um soldador qualificado cedido pela Petrobras. As juntas foram confeccionadas por torneamento, seguindo a geometria recomendada no RQPS E-AC-260-012 (Figura 2), cujas dimensões são apresentadas na Tabela 2. Foram confeccionados quatro corpos de prova sob as mesmas condições. 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 2.** Desenho esquemático do corpo de prova.

**Tabela 3.** Parâmetros de soldagem.

Corpo de prova	Passe	Corrente eficaz (A)	Tensão eficaz (V)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Energia de soldagem* (kJ/cm)
A1	Raiz	98,2	10,9	3,9	10,6
	Ench.	102,3	11,2	3,2	13,8
	Acab.	101,9	11,1	3,1	14,5
A2	Raiz	103,1	11,0	3,4	12,9
	Ench.	105,5	11,3	3,2	14,7
	Acab.	104,2	11,2	3,1	14,8
A3	Raiz	102,1	10,9	3,6	12,2
	Ench.	105,3	11,3	3,2	14,3
	Acab.	104,9	11,6	3,2	15,0
A4	Raiz	98,3	10,5	3,9	10,3
	Ench.	105,1	11,3	3,3	14,2
	Acab.	105	11,5	3,2	14,7

\* Rendimento térmico considerado  $\eta = 0,65$ .

A análise das tensões foi realizada na superfície externa dos tubos utilizando um minidifratômetro para medição de tensões em campo (Figura 3). 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  $\text{sen}^2\psi$ , com medidas realizadas para  $\psi = 0^\circ, 20^\circ, 35^\circ$ , e  $50^\circ$ . Foi utilizado o software Origin para construção dos difratogramas, ajustes das curvas usando as funções Lorentz e Pearson VII, e localização dos picos. O software Phillips X`pert Stress foi usado para calcular as tensões residuais.

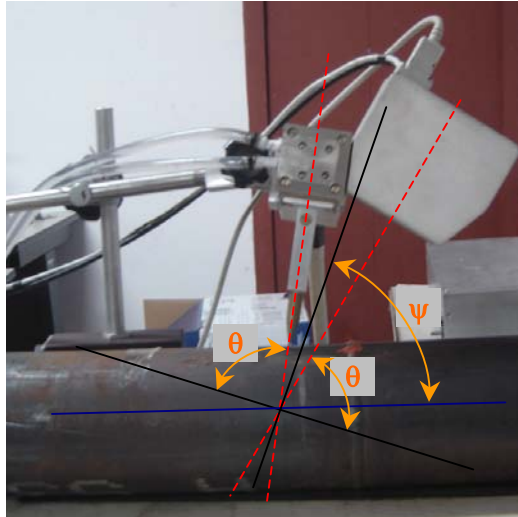


Figura 3. Geometria descrita pelo conjunto tubo/detector.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O comportamento do perfil das tensões residuais medidas na superfície externa foi o mesmo em todas as amostras, constituído por tensões residuais compressivas na região da solda e de tração na região mais afastada. Na amostra A1 (Figura 4a) o nível de tensão alcançado no metal de solda 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 2.

No lado esquerdo da junta (lado chanfrado) observa-se ainda que o nível de tensão compressiva estende-se por 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 4a, 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.

O perfil das tensões residuais para a amostra A2 é apresentado na Figura 4b. Verifica-se que embora o nível de energia de soldagem aplicado tenha sido, a princípio, o mesmo dos demais corpos de prova (variando entre 14 e 15 kJ/cm), o comportamento das tensões foi diferente. No centro do cordão de solda verifica-se novamente a presença de tensões residuais compressivas, com aproximadamente -89 MPa (Pearson VII) e -93 MPa (Lorentz) em módulo.

Assim como observado no corpo de prova A1, a máxima tensão foi observada na ZAC do lado chanfrado, com uma tensão de -119 MPa e -134 MPa, para as correções por Pearson VII e Lorentz, respectivamente. Posteriormente, o lado esquerdo da ZAC apresentou tensão trativa em praticamente toda a sua extensão, exceto no ponto  $x = -30$ , cuja tensão observada foi ligeiramente trativa (4,8 MPa) para a correção por Pearson VII e compressiva (-14 MPa) para a correção por Lorentz. Para a ZAC do lado direito, verificou-se novamente na adjacência do cordão de solda a presença de tensões compressivas, com -82 MPa e -84 MPa de módulo para Pearson VII e Lorentz, respectivamente. Observa-se que para o

restante da ZAC as tensões residuais permanecem trativas para ambos tipos de correção de pico (Pearson VII ou Lorentz).

O perfil das tensões do corpo de prova A3 é apresentado na Figura 4c. Conforme observado, as tensões residuais na região da solda foram compressivas. No centro do cordão obteve-se uma tensão de -192 MPa, tanto para o ajuste pela função Pearson VII quanto para Lorentz. A máxima tensão foi observada novamente no lado esquerdo da ZAC (chanfrado) adjacente ao cordão de solda, com valor de -313 MPa (Pearson VII) e -310 MPa (Lorentz). A extensão da região sob tensões residuais compressivas foi de aproximadamente 15 mm para ambos os lados, passando posteriormente para tensões de tração.

A Figura 4d apresenta o perfil das tensões residuais produzidas pelo ciclo térmico de soldagem para o tubo A4. Nesta amostra é possível observar um comportamento bem diferente das demais amostras analisadas, nas quais observaram-se significativas diferenças entre os níveis de tensões do lado direito e esquerdo da ZAC adjacente ao cordão de solda. A tensão no metal de solda foi menor quando comparada às tensões na ZAC. As tensões nas adjacências do cordão de solda, para ambos os lados, apresentaram valores na ordem de -200 MPa, entre os pontos + 10 mm e -10 mm. A partir de 10 mm de distância do centro da solda para os dois lados, verifica-se uma contínua redução nos valores das tensões residuais, as quais tendem a zero.

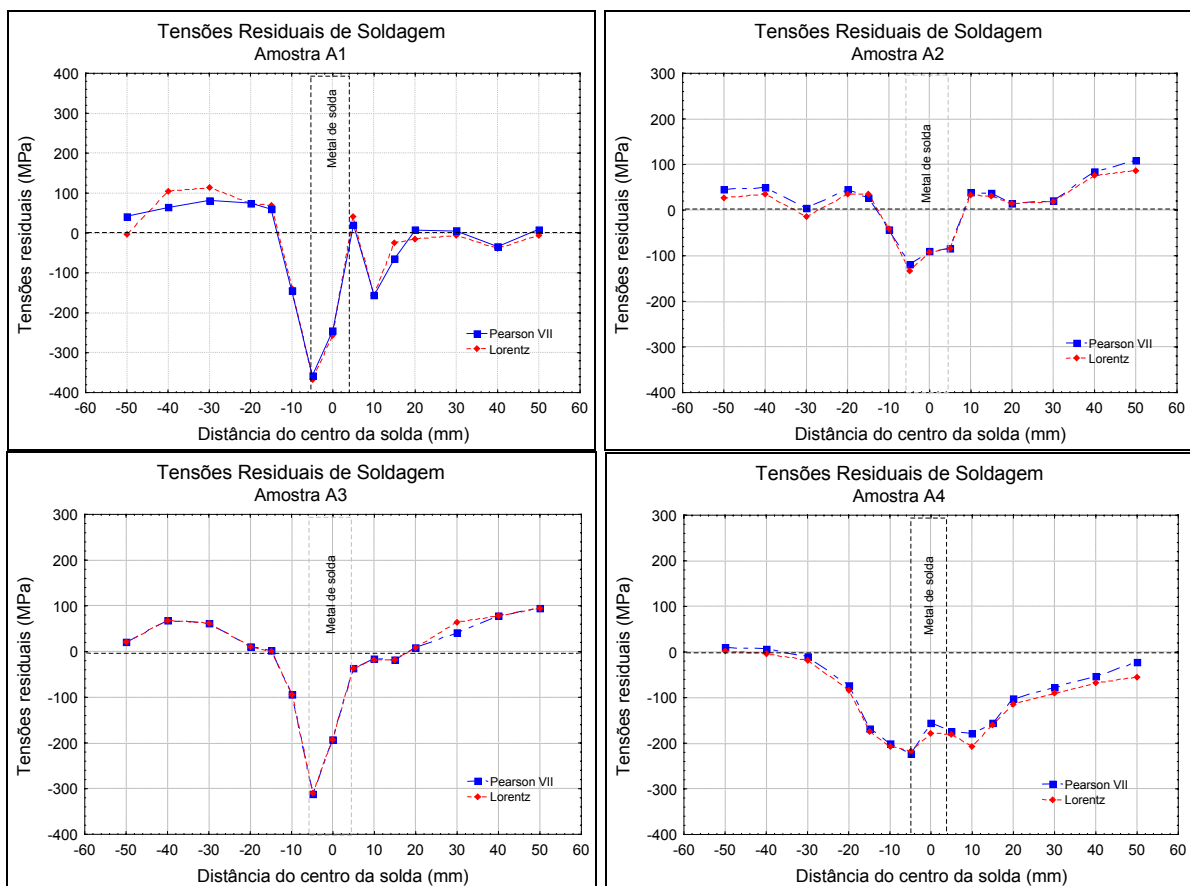


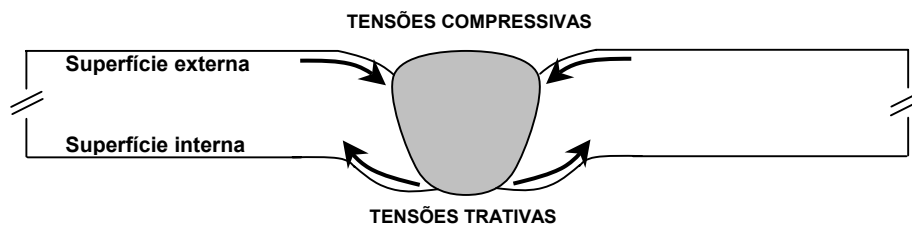
Figura 4. Perfil das tensões residuais das amostras: (a) A1. (b) A2. (c) A3. (d) A4

Conforme os resultados apresentados para as juntas de topo soldadas circunferencialmente, observa-se que em todos os casos, as tensões residuais medidas pela superfície externa apresentaram valores compressivos na região da solda e de tração na região mais afastada do cordão. Estes resultados são diferentes dos convencionalmente

apresentados pela literatura, que apresenta resultados experimentais e simulações para aplicações em chapas planas.<sup>(4,10,11)</sup>

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.<sup>(12)</sup>

A explicação para esta variação de tensões entre a superfície externa e interna de tubos de parede fina é de que o resfriamento do cordão de solda ocasiona uma contração ao redor do tubo, gerando forças na direção circunferencial, cujo efeito é similar ao de um torniquete ao redor do tubo, conforme ilustrado na Figura 5<sup>(12)</sup>. Brickstad & Josefson<sup>(13)</sup> também atribuem a formação das tensões residuais em tubulações ao “efeito torniquete”, o qual é definido como uma deformação local para o interior do tubo causada por uma contração circunferencial.



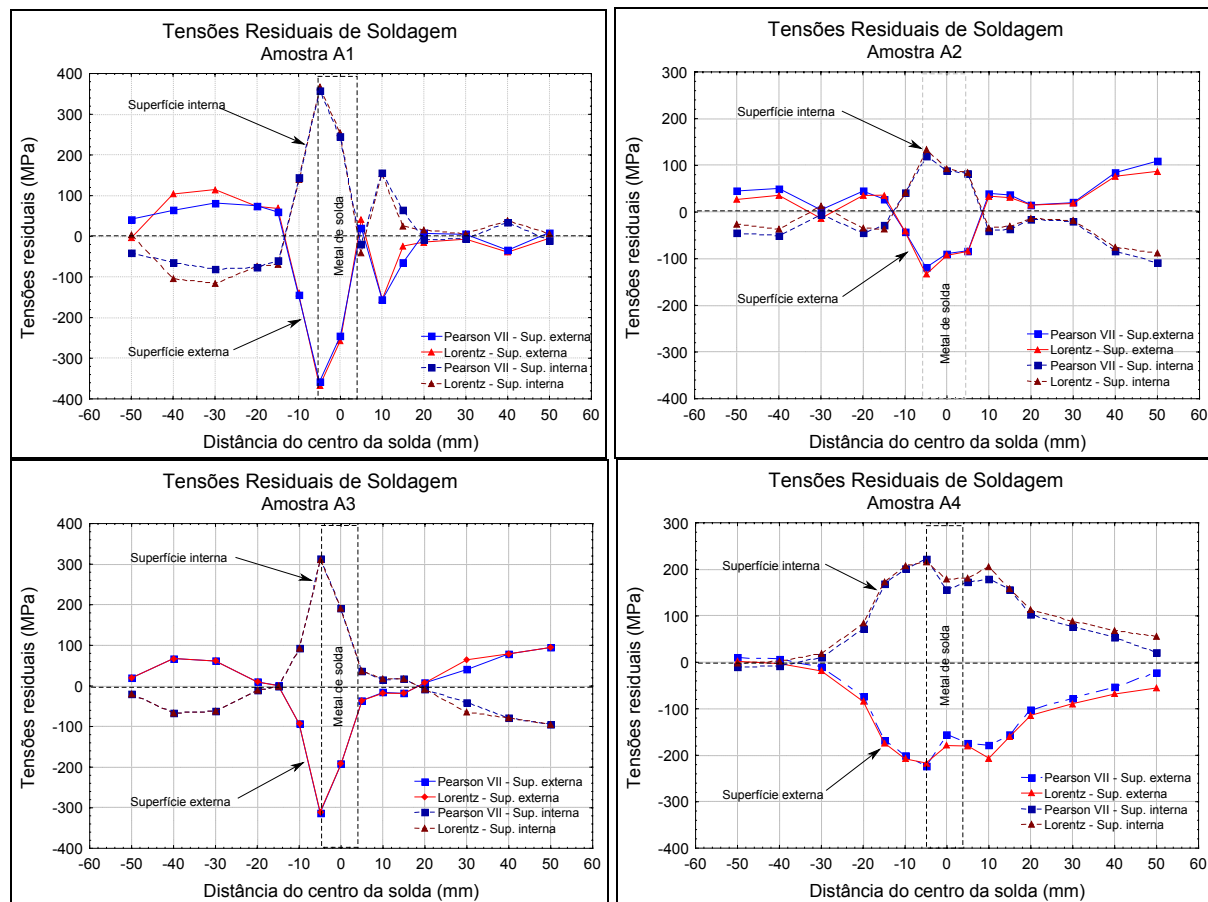
**Figura 5.** Tensões residuais axiais devido ao efeito torniquete. Baseado em Law *et al.*<sup>12</sup>

De forma a simplificar a determinação das tensões residuais de soldagem na superfície interna de tubos de parede fina, o código ASME XI<sup>(14)</sup> assume a presença de tensões residuais axiais de tração na superfície interna do tubo com mesma magnitude do limite de escoamento, e uma zona bastante extensa de tensões axiais trativas próximas à superfície interna. Contudo, diversos autores<sup>(13)</sup> têm demonstrado na prática que as tensões residuais axiais podem ser muito menores do que o limite de escoamento, dependendo das condições.

Desta forma, para avaliar os níveis de tensões residuais na superfície interna dos tubos de aço ASTM A106 Gr. B usados neste trabalho, considera-se que a distribuição das tensões residuais axiais ao longo da espessura apresenta um comportamento linear, semelhante ao observado por Brickstad & Josefson<sup>(13)</sup>, e que o módulo das tensões residuais na superfície interna será de mesmo valor das tensões medidas na superfície externa. Embora os resultados das tensões residuais ao longo da espessura para o centro do cordão (metal de solda) verificadas no trabalho de Brickstad & Josefson<sup>(13)</sup> tenham apresentado diferenças entre as superfícies externa e interna, essa variação não será considerada de forma a tornar os resultados mais conservativos, visto que os autores verificaram um menor valor de tensões trativas.

Na Figura 6 são apresentados os perfis das tensões residuais na superfície interna e externa das amostras A. Verifica-se então que as tensões na superfície interna são trativas na solda e compressivas na região mais afastada do cordão. Conforme observado na Figura 6a, verifica-se um elevado nível de tensão residual trativa na superfície interna, na região da ZAC e zona fundida, da amostra A1. O perfil das tensões residuais para a amostra A2 (Figura 6b) mostra que neste caso as tensões residuais são menores quando comparada a anterior, entretanto, o mesmo comportamento de máxima tensão na ZAC adjacente ao cordão de solda é observado. Na Figura 6c (amostra A3) observa-se novamente um elevado nível de tensões residuais trativas na superfície interna, cujo

máximo valor foi observado na ZAC adjacente ao cordão de solda. A Figura 6d mostra o perfil das tensões da amostra A4. É possível observar que o máximo valor da tensão é menor, cerca de 200 MPa, mas a região onde foi localizado foi a mesma das anteriores.



**Figura 6.** Perfil das tensões residuais nas superfícies externa e interna.

O comportamento do perfil das tensões residuais mostrado está de acordo com o reportado pela literatura.<sup>(12)</sup> Abid, Siddique e Mufti<sup>(15)</sup> 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. Contudo, não são apresentados resultados experimentais.

Visando comparar os resultados das tensões residuais com a tensão limite de escoamento, foram construídos perfis normalizados através da razão  $\sigma/\sigma_y$  ( $\sigma_y = 357$  MPa) conforme apresentado na Figura 7. Verifica-se que a máxima tensão residual é praticamente igual ao limite de escoamento do material (Figura 7a), correspondendo a uma condição extremamente crítica. Destaca-se ainda que a tensão residual no centro do cordão de solda corresponde a aproximadamente 70% da tensão de escoamento do material. Na Figura 7b é apresentado o perfil normalizado das tensões residuais para a amostra A2. Observa-se que as tensões residuais correspondem a no máximo 40% do limite de escoamento do material. O perfil normalizado das tensões para a amostra A3 apresentado na Figura 7c mostra que a tensão máxima é da magnitude da tensão de escoamento, correspondendo a quase 90% de  $\sigma_y$ . Assim como no caso da amostra A1 esta condição é crítica. Já a amostra A4, cujo perfil normalizado é mostrado na Figura 7d, apresentou uma razão  $\sigma/\sigma_y$  de aproximadamente 0,6 no ponto de máxima tensão.



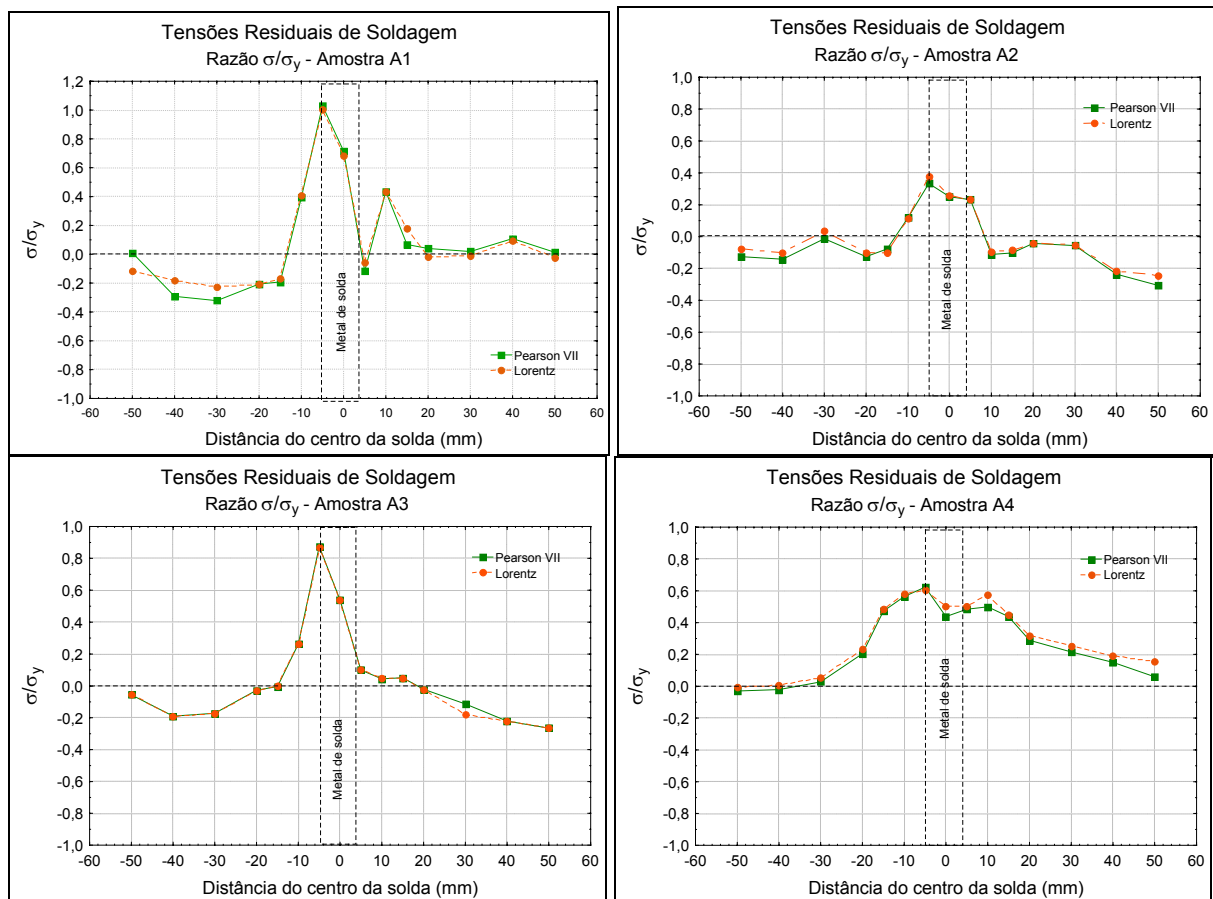


Figura 7. Perfil normalizado em função da tensão de escoamento ( $\sigma/\sigma_y$ ).

## 5 CONCLUSÕES

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.

As medições das tensões residuais axiais realizadas na superfície externa do tubo mostraram que o comportamento do perfil de tensões é diferente do normalmente encontrado na literatura para chapas, sendo formado por tensões compressivas na região da solda (zona fundida e zona afetada pelo calor) e por tensões trativas nas regiões mais afastadas.

Elevados níveis de tensões residuais axiais compressivas na superfície externa de tubos de parede fina, localizadas na região da solda, podem representar uma situação crítica, visto que o comportamento linear das tensões ao longo da espessura devido ao efeito torniquete é consensual e, portanto, isso indica a presença de elevados níveis de tensões residuais de tração no metal de solda e na zona afetada pelo calor na superfície interna dos tubos.

A geometria da junta pode causar uma assimetria no perfil das tensões ao longo da solda, fazendo com que as amostras com 4" de diâmetro, independente do ciclo térmico usado, apresentem o ponto de máxima tensão residual localizado na ZAC adjacente ao cordão de solda, o qual corresponde ao lado chanfrado da junta.

## 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 Eng<sup>o</sup> Danúbio I. S. de Souza e ao Tec. Manut. João César Matias da Silva. Aos órgãos de fomento FINEP e CNPq pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 RADAJ, D., 1992. Heat Effects of Welding - Temperature Field, Residual Stress, Distortion, Springer-Verlag.
- 2 KOU, S., 2002, Welding metallurgy, 2nd Ed., John Wiley & Sons.
- 3 PARLANE, A.J.A., Origin and Nature of Residual Stresses in Welded Joints. The Welding Institute, Abington Hall, Cambridge, 1981.
- 4 BAILEY, N.; COE, F.R.; GOOCH, T.G.; HART, R.H.M.; JENKINS, N.; PARGETER, R.J. Welding Steels Without Hydrogen Cracking, Abington Publishing for TWI, Cambridge. 1993.
- 5 NGUYEN, T.N.; WAHAB, M.A. The effect of weld geometry and residual stress on the fatigue of welded joints under combined loading. Journal of Materials Processing Technology, v. 77, pp 201-208, 1998.
- 6 LINNERT, G.E. Welding Metallurgy, American Welding Society, Miami, 1994.
- 7 NOYAN, I.C.; COHEN, J.B. Residual Stress. Measurement by Diffraction and Interpretation. New York: Springer, 1987.
- 8 EIGENMANN, B.; MACHERAUCH, E. Röntgenographische Untersuchung von Spannungszuständen in Werkstoffen. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, v. 27 pp. 426-437, 1996.
- 9 SPRAUEL, J.M.; CASTEX, L. X-ray Stress Analysis. Materials Science Forum. v. 79, pp. 143-152, 1991.
- 10 WEBSTER, P.J.; ANANTHAVIRAVAKUMAR, N.; HUGHES, D.J.; MILLS, G.; PRESTON, R.V.; SHERCLIFF, H.R.; WITHERS, P.J. Measurement and Modeling of Residual Stress in a TIG Weld. Applied Physics A. v. 74, pp. 1421-1423, 2002.
- 11 RODRIGUES, Y.G.; SOLA, J.B.; GIL, F.; RIVALTA, J. Obtención de Tensiones Residuales a lo Largo de um Cordón de Soldadura Mediante Métodos Analíticos y Experimentales. Soldagem & Inspeção. v. 11, n. 2, pp. 93-101, 2006.
- 12 LAW, M.; PRASK, H.; LUZIN, V.; GNAEUPEL-HEROLD, T. Residual Stress Measurements in Coil, Linepipe and Girth Welded Pipe. Materials Science and Engineering A. v. 437, p. 60-63, 2006.
- 13 BRICKSTAD, B.; JOSEFSON, B. L. A Parametric Study of Residual Stresses in Multi-pass Butt-welded Stainless Steel Pipes. International Journal of Pressure Vessels and Piping. v. 75, p. 11-25, 1998.
- 14 ASME Section XI. Task Group for Piping Flaw Evaluation Pressure Vessel and Piping Codes. ASME Journal of Pressure Vessel Technology, v. 108, p. 352-366, 1986.
- 15 ABID, M.; SIDDIQUE, M.; MUFTI, R.A. 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. v. 13, pp. 455-470, 2005.