

# ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS EM TUBULAÇÕES SOLDADAS<sup>1</sup>

*Antonia Daniele Souza Bruno<sup>2</sup>*

*Leandro Teixeira Pereira<sup>3</sup>*

*Rodrigo Carvalho Souza Costa<sup>2</sup>*

*Cleiton Carvalho Silva<sup>2</sup>*

*Sergey Philipov<sup>3</sup>*

*Hamilton Ferreira Gomes de Abreu<sup>4</sup>*

## Resumo

De modo geral na indústria, tem-se procurado de forma freqüente e contínua, a qualidade, a economia e a segurança nos processos produtivos. Uma forma de conseguir isso é evitando falhas de equipamentos e componentes. Tensões que permanecem num material, após ter cessado o esforço externo que lhe deu origem, são denominadas de tensões residuais. Ambientes corrosivos somados às tensões residuais nos materiais podem levar o material a falhas mecânicas por corrosão sob tensão ou outros processos que diminuam a vida útil do material. O objetivo deste trabalho é avaliar os níveis de tensões residuais induzidas por processos de soldagem nas tubulações utilizadas em refinarias de petróleo. Foram analisados os níveis de tensões em tubulações ASTM A106 Gr B de 2" de diâmetro soldados com TIG Orbital sem tratamento térmico e com tratamento térmico pós-soldagem. A soldagem foi feita com corrente contínua e pulsada, para dois níveis de energia distintos. Para cada condição de soldagem foi aplicado tratamento térmico para alívio de tensões (630°C, durante 96 min) com variadas formas de resfriamentos. Utilizou-se a técnica de difração de Raios-X como instrumento para estabelecer critérios de aceitação para as tensões residuais em tubulações soldadas. O material como recebido apresentou tensões trativas ao longo de sua superfície externa. O material soldado com diversos parâmetros apresentaram tensões compressivas no metal de solda e trativas no metal de base. Os tratamentos térmicos pós-soldagem permitiram o alívio das tensões residuais.

**Palavras-chave:** Tensões residuais; TIG orbital; Difração de raio X; Alívio de tensões.

## RESIDUAL STRESS ANALYSIS IN WELDED TUBULATIONS

### Abstract

Actually in the industrial field, quality, economy and security were searched in production processes. Avoiding equipment failure is a good way to get better quality in the production. Stresses, which are kept in the material without external loading, are called residual stresses. Corrosion environments together with residual stresses can induce mechanical failure caused by stress corrosion and reduce material useful life. The main goal of this work is to evaluate the level of residual stresses induced by welding process used in petroleum refinery. Tubes ASTM A106 Gr B with 2" of diameter were welded with automatic GTAW process without heat treatment and with post-welding heat treating. Welding was done with continuous and pulse energy. Two levels of energy were used for each type of energy. Heat treatment (630°C, during 96 min) with different rates of cooling. X-ray diffraction was used to analyze residual stresses in welded tubes. The material as received showed trative tensions in the external surface. The material welded showed compressive tensions in the welding metal and trative in the base metal. Post-welding heat treatments reduce residual stresses and microhardness.

**Key words:** Residual stresses; Automatic GTAW; X-ray diffraction; Stress relief.

<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> *Mestrado, Universidade Federal do Ceará*

<sup>3</sup> *Graduação, Universidade Federal do Ceará*

<sup>4</sup> *Bolsista, Universidade Federal do Ceará*

<sup>5</sup> *Professor Doutor, Universidade Federal do Ceará*

## 1 INTRODUÇÃO

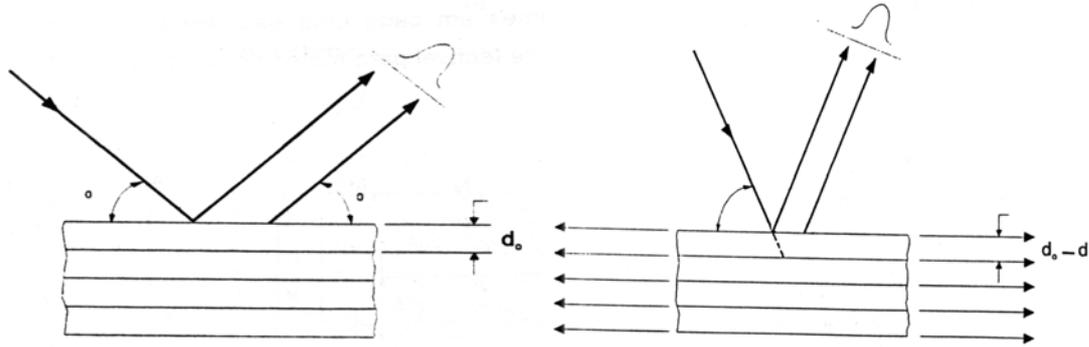
Muitas falhas estruturais ou de componentes de máquina resultam não de cargas aplicadas, mas de tensões residuais. O custo associado com a substituição e perda de produção são proibitivos. As tensões residuais influenciam nas características da resistência e do funcionamento dos elementos de uma estrutura. As tensões residuais contribuem para o surgimento de trincas, principalmente, se associadas a ambientes agressivos; caracterizando a corrosão sob tensão.<sup>(1)</sup>

A corrosão sob tensão (CST) é um processo destrutivo dos materiais resultante da ação simultânea de um meio corrosivo e de tensões mecânicas, aplicadas ou residuais (provenientes de operações de soldagem, tratamentos térmicos e ou conformação mecânica). A CST acarreta um impacto técnico e econômico de amplitude considerável, em função do aumento da demanda de materiais para reposição, da redução na eficiência dos processos e do comprometimento da integridade física dos equipamentos e de seus operadores.<sup>(2)</sup>

As tubulações do setor petróleo e gás contêm compostos sulfurosos, ácidos naftênicos e outros que comprometem a integridade dos materiais e equipamentos. Associado a este fator, as tubulações são submetidas a processos de soldagem, que geram um aquecimento extremamente localizado, pelo qual o material fica sujeito a variações volumétricas nesta localização, além de transformações microestruturais e mudança de propriedades.<sup>(3)</sup> Como resultado, um intenso processo de deformações desenvolve-se na ZF (zona fundida) e ZAC (zona termicamente afetada pelo calor). Estas deformações são muito localizadas e são acomodadas pelo desenvolvimento de tensões elásticas e por alterações no formato de toda a estrutura sendo soldada.<sup>(4)</sup>

Para evitar falhas é de essencial importância o monitoramento do nível de tensões presentes nas tubulações e outros equipamentos da indústria do petróleo. O método de medição de tensões por difração de raios x é um método conclusivo e de alta precisão. A aplicação da tensometria por raios X tem aumentado recentemente por causa do desenvolvimento de aparelhos portáteis para medidas de tensões, permitindo que sejam realizadas tanto em condições de laboratório e como em condições de campo. O campo de aplicações dessa técnica de medida de tensão é muito amplo com acentuada utilização em medidas de campo, principalmente no controle de tubulações de petróleo e gás, em tubulações de refinarias, estruturas metálicas e outras.<sup>(5)</sup>

O método por difração de Raios-X depende da regularidade do espaçamento entre os planos atômicos. Quando um feixe de Raios-X monocromáticos incide sobre um material, ocorre o espalhamento do mesmo pelos átomos que compõem o material. Como nos materiais cristalinos os átomos são organizados de maneira tridimensional em uma rede periódica, a distância entre os planos cristalográficos é uma característica do material. Desta forma, quando um feixe de Raios-X de comprimento de onda  $\lambda$  incide na superfície de um material segundo um ângulo de incidência  $\theta$ , ocorre a difração, obedecendo à lei de Bragg. A deformação elástica de uma rede cristalina resulta, desta maneira, em uma variação da distância interplanar  $\Delta d$ , e conseqüentemente uma variação  $\Delta\theta = \theta - \theta_0$  do ângulo de difração, como ilustrado na Figura 1. Com isso, é possível utilizar a técnica da tensimetria por Raios-X, pois a tensão pode ser calculada pelas medidas de deformação e pela constante elástica do material.<sup>(6)</sup>



**Figura 1** – a) Difração de Raios-X em um cristal não deformado. b) Difração de Raios-X em um cristal deformado.

A deformação pode ser definida pela equação:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

Onde  $l_0$  é um tamanho inicial,  $l$  é o tamanho real após a deformação. Para um material cristalino a equação pode anterior pode ser escrita na forma:

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = \frac{\Delta d}{d_0}$$

Onde  $d$ ,  $d_0$  são distâncias interplanares inicial e atual e  $\Delta d$  é variação da distância interplanar. Logo, pode-se medir uma deformação elástica em um material cristalino pela medição do deslocamento do pico difrativo.<sup>(7-8)</sup> Sabendo-se o valor da deformação, pode-se calcular o valor da tensão de acordo com a lei de Hook:

$$\sigma = E\varepsilon$$

Onde  $\sigma$  é a tensão e  $E$  é o módulo de Young.<sup>(9)</sup>

Pretende-se neste trabalho avaliar o nível de tensões residuais em tubulações de aço soldados não tratados e tratados termicamente através da técnica de difração de raio x. Para tanto serão utilizados um difratômetro tradicional e um portátil. O objetivo deste trabalho é avaliar os níveis de tensões residuais induzidas por processos de soldagem nas tubulações utilizadas em refinarias de petróleo. Foi analisado o nível de tensões em tubulações (ASTM A106 Gr B de 2") soldados com TIG Orbital sem tratamento térmico e com tratamento térmico pós-soldagem. Utilizou-se a técnica de difração de raios-X como instrumento para medir as tubulações soldadas.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O material usado para o presente estudo foi o aço ASTM 106 Gr B de 2" de diâmetro. Os tubos foram de aço, sem costura e laminado a quente, comprados da industrial V & M Tubes do Brasil S.A. A composição química dos aços está mostrada na Tabela 1:

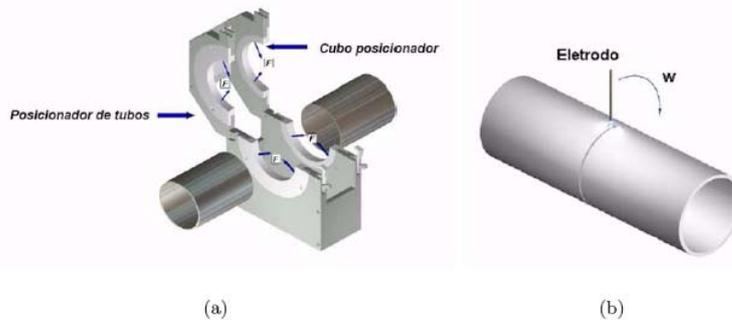
**Tabela 1** – Composição Química dos Tubos

%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cu	%Ni
0,18	0,45	0,0090	0,004	0,18	0,005	0,001

Fonte: Dados do fabricante.

Os tubos de 2" de diâmetro, com comprimentos iguais ao seu diâmetro, cujas as dimensões são apresentadas na Tabela 1, foram soldados circunferencialmente. Os tubos foram faceados para possibilitar a soldagem de topo e para garantir que não houvesse imperfeições na superfície na hora da soldagem.

A soldagem foi feita usando o equipamento de soldagem automática TIG orbital no laboratório de Engenharia de Soldagem (ENGESOLDA) da UFC. O eletrodo utilizado foi o não consumível de tungstênio, como ilustrado na Figura 2. O gás utilizado para proteção foi o gás Argônio.



**Figura 2** - TIG Orbital. a) Posicionador do tubo. b) Eletrodo de tungstênio num movimento de translação ao redor de um tubo, com velocidade angular  $w$ .

Foram utilizadas duas formas de corrente contínua e pulsada, sendo estabelecidos dois níveis de energia para cada tipo de corrente. A soldagem foi feita em um único passe, com parâmetros de soldagem apresentados na Tabela 2. A energia de soldagem foi calculada segundo a equação 3.1. O rendimento térmico da fonte de energia adotado para o processo TIG foi de 0,65.

$$E = \frac{I \times V \times 60}{v \times 1000} \eta (kJ/cm)$$

Onde:  $E$  = energia de soldagem (kJ/cm);  $I$  = corrente média (A);  $V$  = tensão média (V);  $v$  = velocidade de soldagem (cm/min);  $\eta$  = rendimento térmico

**Tabela 2**– Parâmetros da Soldagem TIG Orbital

Processo	Tipo de Corrente	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (cm/min)	Energia (J/cm)
C1	No Pulse	130	13,2	11,76	5,7
C2	No Pulse	87,8	13,2	13,26	3,4
P1	Low Pulse	94,5	11,9	7,02	6,3
P2	Low Pulse	94,5	11,9	13,26	3,3

Fonte: Parâmetros utilizados no equipamento.

O sistema de soldagem automática do TIG orbital é composto basicamente por uma fonte eletrônica CobraTIG-150 com cabeçote para soldagem orbital e sistema de refrigeração do cabeçote, como ilustra a Figura 2. O equipamento permite soldagem de tubos de até 3" de diâmetro externo e espessura da parede de até 0,12". Diversos testes foram realizados de forma a conduzir as características desejadas.

Os tubos soldados foram submetidos a tratamentos térmicos posteriores para alívio de tensões de acordo com a norma Petrobrás<sup>(10)</sup>. A temperatura selecionada foi de 630°C durante o intervalo de tempo de 96 min. As formas de resfriamento foram em água, ao ar, com taxa de resfriamento de 150°C/h e de 25°C/h.

Os tubos passaram por um processo de desbaste eletrolítico para remoção de uma camada delgada de material, na ordem de décimos de milímetros, a fim de eliminar possíveis tensões residuais superficiais induzidas por processos prévios de fabricação. O polimento mecânico não foi empregado uma vez que pode desenvolver tensões residuais de compressão na camada superficial analisada. O equipamento utilizado para a medição das tensões residuais foi o difratômetro modelo X'Pert Philips; juntamente com o auxílio dos Softwares X'Pert Data Collector e X'Pert Stress.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 mostra o esquema de medição dos tubos ASTM 106 Grau B. O ataque eletroquímico correspondeu a uma extensão de 48 mm, medidos a partir do centro do cordão de solda até o metal de base, correspondendo 24 mm à direita e 24 mm à esquerda do cordão. O ataque eletroquímico foi usado com intuito de preparar a superfície para medição, evitando a remoção mecânica que gerariam indução de tensões externas na região de interesse, o que acarretaria erros na avaliação das tensões residuais pela soldagem. Os resultados de medição de tensões residuais são mostrados em gráficos exibem os níveis de tensões com relação à localização do ponto analisado.

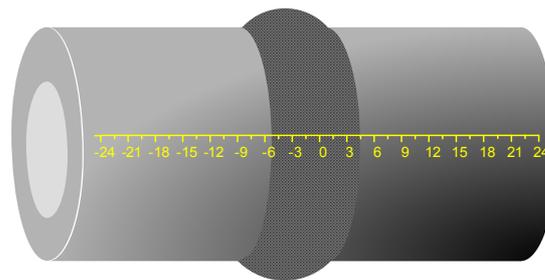


Figura 3 – Esquema de medição nos tubos ASTM 106 Gr B.

#### 3.1 Efeitos da Energia de Soldagem

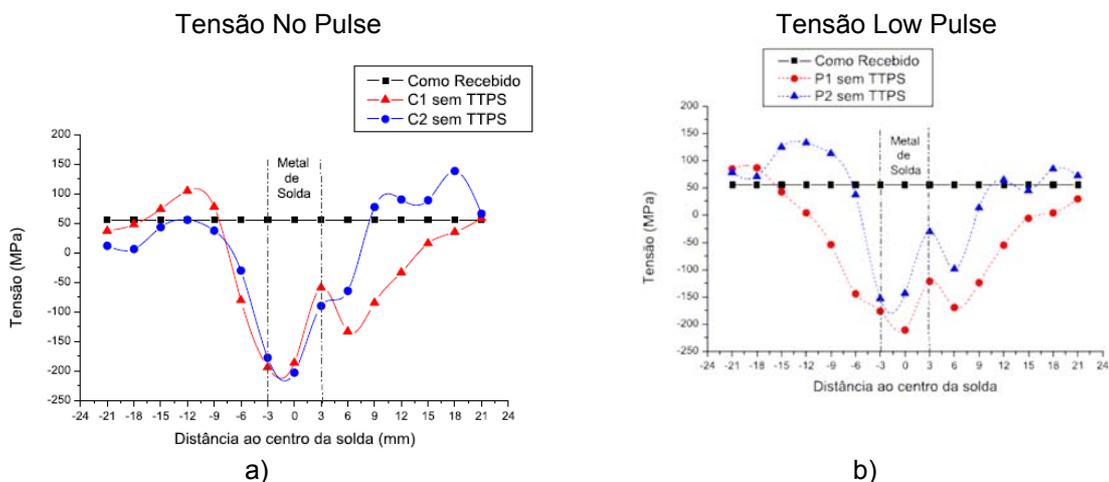


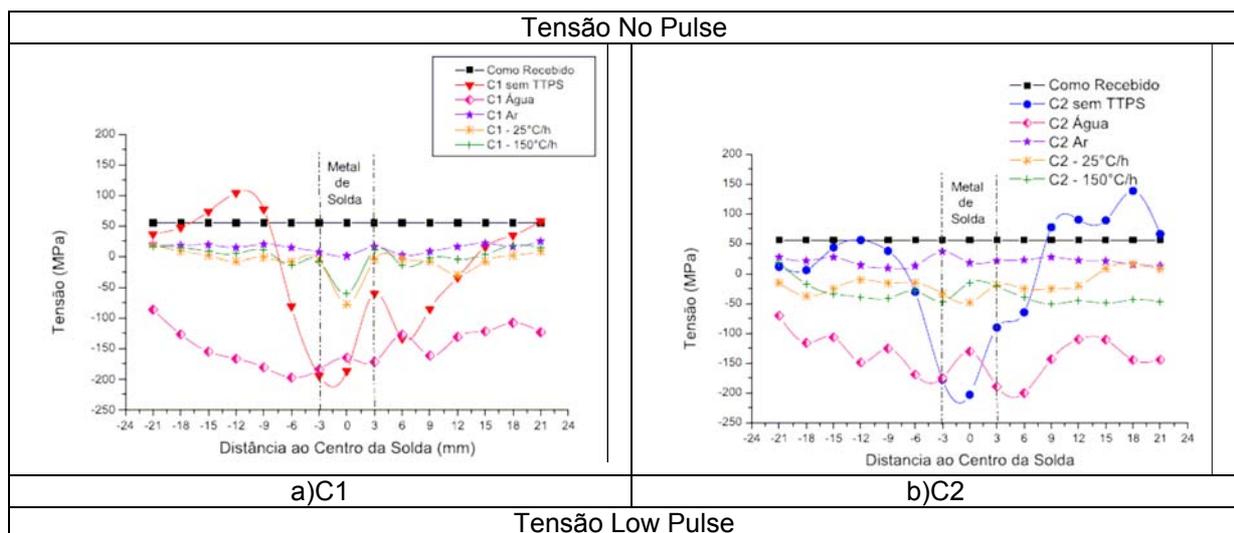
Figura 4 – Distribuição das tensões residuais nos tubos ASTM 106 Grau B para o material como recebido (CR) e com diferentes formas de soldagem. a) Tubos soldados com tensão contínua convencional para os níveis de energias  $E_1$  (5,7 kJ/cm) e  $E_2$  (3,4 kJ/cm). b) Tubos soldados com Tensão pulsada para os níveis de energia  $E_1$  (6,3 kJ/cm) e  $E_2$  (3,3 kJ/cm).

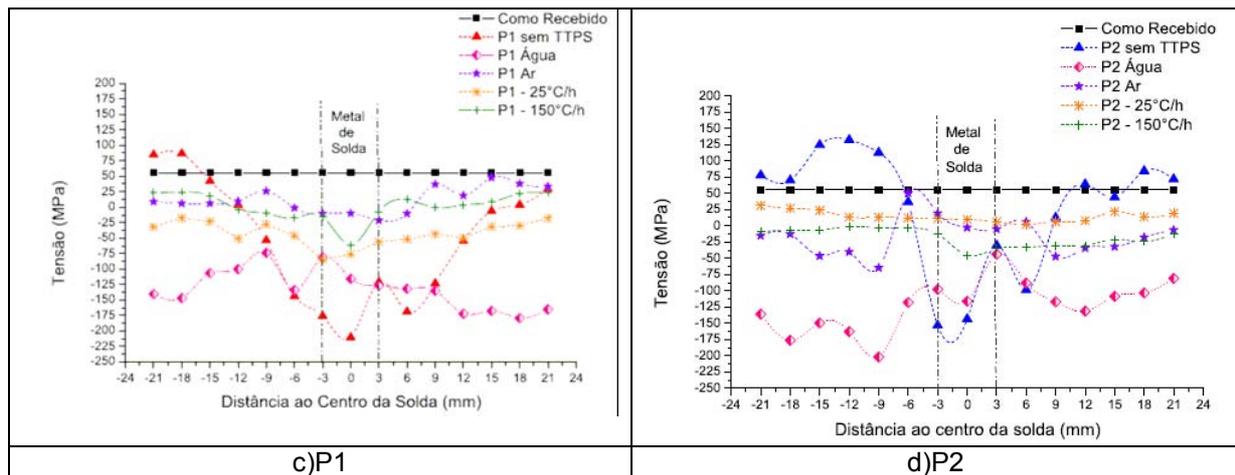
A Figura 4 (a) ilustra a comparação entre os dois níveis de tensões para tubos soldados com tensões contínuas. A curva de tensões do material como recebido também é apresentado a fim de estabelecer uma base de comparação entre os dois níveis de energia. As linhas tracejadas na cor cinza indicam a margem do metal de solda. O material como recebido apresentou tensões tratativas com valor de 50 MPa.

Na Figura 4 (a), observa-se que o perfil das tensões foi similar para ambos aportes térmicos ( $C_1$  e  $C_2$ ). Na região da solda, os valores máximos de tensões praticamente se sobrepõem. À esquerda da curva, há uma tendência de redução das tensões compressivas, tornando-se trativa em  $x = -9$  mm para ambos níveis de energia. Todavia, observa-se à direita do cordão de solda que a curva  $C_1$  diminui de forma mais lenta os níveis de tensões compressivas, passando a trativa somente em  $x = 15$  mm; ao passo que para  $C_2$  a redução das tensões compressivas é mais brusca, tornando-se trativa em  $x = 9$  mm.

Na Figura 4 (b), observa-se os níveis de tensões para materiais soldados nas condições  $P_1$  ( $E_{P1} = 6,3$  kJ/cm) e  $P_2$  ( $E_{P2} = 3,3$  kJ/cm). As linhas tracejadas delimitam o cordão de solda. Observa-se para ambas as curvas analisadas na Figura 4 que o perfil das tensões residuais foi similar. Todavia, para a condição de soldagem  $P_2$  com menor aporte térmico, os níveis foram sutilmente menores que os soldados com maior aporte térmico ( $E_{P1}$ ). Comparando-se os picos de tensões no centro do cordão de solda, observa-se que a diferença entre eles foi superior a 40MPa; sendo o valor para  $P_2$  de  $-143,4 \pm 13,5$ MPa e para  $P_1$  de  $-210,7 \pm 17$ MPa. Por ter menores níveis de tensões, a curva  $P_2$  apresentou transição do perfil compressivo para o trativo de forma mais rápida. Esta transição para  $P_2$  ocorreu em  $x = 9$  mm à direita do cordão de solda e  $x = -6$  mm à esquerda do cordão. Para  $P_1$ , a transição do perfil compressivo para o trativo ocorreu em  $x = 18$  mm à direita do cordão e  $x = -12$  mm à esquerda.

### 3.2 Efeito do Tratamento Térmico Pós-soldagem





Fonte: Dados obtidos por medição de raios-X e coletados com programa XPERT-STRESS.

**Figura 5** – Distribuição das tensões residuais nos tubos ASTM 106 Grau B para o material como recebido e com diferentes de soldagem. a) Tubos soldados com corrente *No Pulse* ( $E_{C1} = 5,7$  kJ/cm) e tratados termicamente para alívio de tensões. b) Tubos soldados com corrente *No pulse* ( $E_{C2} = 3,4$  kJ/cm) e tratados termicamente para alívio de tensões. c) Tubos soldados com corrente *Low Pulse* ( $E_{P1} = 6,7$  kJ/cm) e tratados termicamente para aliviar tensões. d) Tubos soldados com corrente *Low Pulse* ( $E_{P2} = 3,3$  kJ/cm) e tratados termicamente para aliviar tensões.

A Figura 5 (a) ilustra o perfil de distribuição das tensões residuais na superfície externa dos tubos ASTM 106 Grau B para material como recebido, soldado na condição  $C_1$  e seus respectivos tratamentos térmicos para alívio das tensões ( $630^\circ\text{C}$ , durante 96 min e resfriados em água, ar ou em forno). As linhas tracejadas indicam a margem do metal de solda, abrangendo uma extensão de aproximadamente 6mm. O material como recebido está representado por uma linha contínua preta, com o valor de tensão residual de 50MPa.

Comparando-se os perfis de tensões das amostras soldadas com e sem tratamento térmico posterior, percebe-se que os tratamentos térmicos ao ar e em forno para ambas as taxas de resfriamento mostraram-se satisfatórias no intuito da redução dos níveis de tensões. O tratamento térmico com resfriamento em água gerou mais tensões residuais ao longo de toda a tubulação, sendo portanto não indicado para minimizar os efeitos das tensões em tubos soldados com os parâmetros  $C_1$ . Nenhum dos procedimentos para redução de tensões proporcionou o alívio total dos níveis de tensões. Dentre os tratamentos térmicos, o resfriamento ao ar foi o que mais se aproximou do perfil do material como recebido. Este tratamento possibilitou uma maior redução dos níveis de tensões no metal de solda. Os tratamentos com resfriamento em forno, com taxas de  $150^\circ\text{C/h}$  e  $25^\circ\text{C/h}$  apresentaram comportamento praticamente linear e com valores próximos ao do material sem nenhum processo de soldagem. Contudo, percebe-se que ambas as curvas formaram picos de tensões compressivas no metal de solda, os quais foram menores do que para o material soldado sem TTPS.

A Figura 5 (b) ilustra o perfil de distribuição das tensões residuais na superfície externa dos tubos ASTM 106 Grau B para material como recebido, soldado na condição  $C_2$  e seus respectivos tratamentos térmicos para alívio das tensões ( $630^\circ\text{C}$ , durante 96 min e resfriados em água, ar ou em forno).

Os tratamentos térmicos ao ar e em forno para ambas as taxas de resfriamento mostraram-se satisfatórias na temática de redução dos níveis de tensões. O tratamento térmico com resfriamento em água gerou mais tensões residuais ao longo de toda a tubulação, sendo portanto não indicado para minimizar os efeitos das tensões em tubos soldados com os parâmetros  $C_2$ . Apenas no cordão de solda,

o pico de tensão observado foi ligeiramente inferior ao do material soldado sem TTPS. Entretanto, a ZAC não apresentou diferenças significativas, o que já é suficiente para reprovar este procedimento para o alívio das tensões.

De fato, nenhum dos procedimentos para redução de tensões proporcionou o alívio total dos níveis de tensões em toda a extensão. Todavia, o material resfriado ao ar apresentou ao longo de todo material um perfil próximo ao do material como recebido e a anulação quase completa dos níveis de tensões no metal de base. Os tratamentos com resfriamento em forno, com taxas de 150°C/h e 25°C/h apresentaram um bom nível de redução dos valores de tensões em toda a extensão do tubo. O seu comportamento, porém, não foram tão lineares como os perfis dos tubos soldados com C<sub>1</sub>. Outra diferença relevante, foi a não formação de pico de tensões compressivas no metal de base.

A Figura 5(c) ilustra o perfil de distribuição das tensões residuais na superfície externa dos tubos ASTM 106 Grau B para material como recebido, soldado na condição *P*<sub>1</sub> e seus respectivos tratamentos térmicos para alívio das tensões (630°C, durante 96 min e resfriados em água, ar ou em forno).

De forma análoga aos gráficos das Figuras 5 (a) e 5(b), os tratamentos térmicos ao ar e em forno (com taxa de 150°C/h) para ambas as taxas de resfriamento mostraram-se satisfatórias na temática de redução dos níveis de tensões. O tratamento térmico com resfriamento em água gerou mais tensões residuais. Apenas no cordão de solda e na ZAC adjacente à direita do cordão apresentaram tensões um pouco menores que as tensões observadas no material soldado sem TTPS. A ZAC à esquerda não mostrou diminuição dos níveis de tensões, o que já é suficiente para reprovar o tratamento; uma vez que esta região é uma região crítica e pode formar trincas ou sofrer CST. De fato, nenhum dos procedimentos para redução de tensões proporcionou o alívio total dos níveis de tensões em toda a extensão.

O material resfriado ao ar apresentou ao longo de todo material um perfil não linear, com uma pequena bifurcação no metal de solda e na ZAC próxima ao metal de solda. Os valores para estas regiões foram próximos a zero, estando o metal de base com valores compressivos próximo ao do material como recebido. Os tratamentos com resfriamento em forno com taxas de 150°C/h e 25°C/h apresentaram perfis dissimilares. Para resfriamentos com taxa de 150°C/h observou-se a formação de pico compressivo no centro do cordão, estando os demais pontos oscilando de 20MPa entre tensões compressivas e trativas. Ao passo que, para os corpos de prova soldados *P*<sub>2</sub> e resfriados a taxa de 25°C/h, observou-se um perfil compressivo em toda a extensão do tubo e os menores índices de redução. Embora tenha apresentado redução nos níveis de tensões, este tratamento resultou num pico de tensão na ZAC com valor próximo ao do material resfriado em água. Portanto, este tratamento não é indicado para alívio de tensões para o processo de soldagem *P*<sub>2</sub>.

A Figura 5 (d) ilustra o perfil de distribuição das tensões residuais na superfície externa dos tubos ASTM 106 Grau B para material como recebido, soldado na condição *P*<sub>2</sub> e seus respectivos tratamentos térmicos para alívio das tensões (630°C, durante 96 min resfriados em água, ar ou em forno). As linhas tracejadas indicam a margem do metal de solda, abrangendo uma extensão de aproximadamente 6mm.

Os tratamentos térmicos ao ar e em forno para ambas as taxas de resfriamento (150°C/h e 25°C/h) mostraram-se eficazes no ensejo de reduzir os níveis de tensões. Entretanto, nenhum dos procedimentos para redução de tensões proporcionou o alívio total dos níveis de tensões em toda a extensão. O tratamento térmico com resfriamento em água não propiciou o alívio das tensões tanto no metal

de solda como na ZAC. Este tratamento propiciou a mudança do perfil compressivo para trativo ao longo de todo o metal de base. Portanto, pode-se concluir que este tratamento não é indicado para alívio das tensões em processos de soldagem com parâmetros  $P_2$ .

O material resfriado ao ar apresentou característica similar ao perfil ilustrado na Figura 5 (c). O perfil das tensões foi não linear, com uma bifurcação no metal de solda e na ZAC próxima ao metal de solda mais acentuado que em  $P_1$ . Os valores das tensões no metal de base foram todos compressivos. O alívio das tensões no metal de base foi similar ao da curva resfriada a uma taxa de  $25^\circ\text{C/h}$  e superior a taxa de  $150^\circ\text{C/h}$ . Este mesmo comportamento pode ser observado na ZAC adjacente ao cordão de solda. No metal de base, os perfis de tensões ficaram mais próximos ao resfriamento em forno a uma taxa de  $150^\circ\text{C/h}$ .

O tratamento com resfriamento em forno com taxas de  $150^\circ\text{C/h}$  apresentou comportamento praticamente linear na região do metal de base e na ZAC adjacente ao cordão. Entretanto, no centro do cordão de solda constatou-se um pequeno pico de tensão compressivo. Os níveis de tensões foram praticamente nulos à esquerda do cordão de solda, ao passo que à direita os valores foram compressivos e próximos ao pico de tensão observado no centro do cordão. A curva para os tratamentos resfriados a uma taxa de  $25^\circ\text{C/h}$  apresentaram perfil praticamente linear e com aspecto similar ao perfil exibido pelo material como recebido. Este tratamento foi o que apresentou os menores índices de tensões ao longo de toda a extensão do material.

#### 4 DISCUSSÕES

Os tratamentos térmicos pós-soldagem visam eliminar ou aliviar os níveis de tensões residuais oriundas de processos de soldagem. Espera-se com estes tratamentos, reduzir a valores bem baixos, próximos a zero; visto que a eliminação total das tensões seria impraticável. Outra forma de avaliar a melhoria das condições do material seria obter níveis de tensões próximos ao do material como recebido. O material como recebido apresentou um perfil linear de tensões trativas ao longo de toda sua extensão, tendo um valor médio de 50MPa. De acordo com Campos, Machado e Hirsh,<sup>(11)</sup> o valor de 50MPa (em módulo) é um valor bastante baixo para tensões residuais em aços.

Observa-se através da análise do níveis de tensões empregados que a mudança de aporte térmico influencia a variação dos níveis de tensões ao longo de todo o tubo, principalmente na região da solda.

Pode-se constatar, observando os perfis de tensões para material soldado nas condições de soldagem apresentadas neste trabalho ( $P_1$  e  $P_2$ ), que um maior aporte térmico resulta em níveis de tensões maiores. Comparando todas as condições de soldagem utilizadas neste trabalho ( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ), observa-se que as curvas de nível  $P_2$  apresentaram níveis de tensões compressivas inferiores aos demais, conforme ilustra a Figura 4 (b). De acordo com Modenesi<sup>(3)</sup> o nível de tensões residuais em uma junta soldada pode ser diminuído reduzindo-se a quantidade de calor fornecido à junta ou o peso de metal depositado. Neste caso, a menor quantidade de calor fornecida a junta ocorre em  $P_2$  que possui menor aporte térmico. Os tratamentos térmicos ao ar e em forno para ambas as taxas de resfriamento ( $150^\circ\text{C/h}$  e  $25^\circ\text{C/h}$ ) mostraram-se eficazes no ensejo de reduzir os níveis de tensões. O tratamento térmico com resfriamento em água não propiciou o alívio das tensões tanto no metal de solda como na ZAC. Portanto, pode-se concluir que este

tratamento não é indicado para alívio das tensões em processos de soldagem com parâmetros  $P_2$ .

Os resultados apresentados para os tubos soldados nas condições  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $P_1$  e  $P_2$  (sem TTPS) apresentaram valores de tensões compressivas no metal de solda e trativos na região mais afastada do cordão. A literatura apresenta o perfil oposto ao encontrado neste trabalho.<sup>(4,7,12)</sup> Segundo Silva,<sup>(13)</sup> este comportamento é devido a soldagem ser feita em tubulações e dutos, a qual possui um campo de tensões residuais bem mais complexos e com comportamento adverso do perfil de tensões residuais para soldagens feitas em chapas planas. O autor assume que a geometria cilíndrica promove 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 compressivas.

Rodeiro<sup>(14)</sup> fez análise de tensões residuais em soldas do tipo *ring-weld* de aços AISI 301L para o metal de base e AISI 308L para metal de adição por elementos finitos. Ele obteve em seus resultados que as regiões próximas ao cordão de solda valores de tensões residuais de tração no centro do furo, invertendo o perfil para compressivo na extremidade externa do furo. Masubuchi<sup>(15)</sup> trabalhando com o mesmo tipo de solda também observou uma distribuição de tensões trativas no centro do anel e compressivas na região mais externa do cordão.

Rogge, Root e Donaberger<sup>(16)</sup> analisaram o perfil das tensões residuais por difração de neutrons nas superfícies internas, externa e o centro da parede de um tubo trocador de calor. Foi observado que as tensões nas paredes externas do tubo eram trativas, tornavam-se praticamente nulas no centro do cordão e passavam a compressivas na superfície interna do tubo torcido. O autor também verificou o comportamento do material com um tratamento de recozimento para aliviar as tensões. Para os materiais tratados, observou-se que os mesmos perfis de tensões para o material não tratado. Contudo os níveis de tensões foram bastante reduzidos com o tratamento, chegando a níveis próximos a zero.

Com base nestas observações, pode-se estimar que os níveis de tensões compressivas medidas na superfície externa passam a tensões trativas na superfície interna. Este resultado é preocupante, pois as tensões residuais na tração têm um efeito negativo na resistência à fadiga ou iniciação de trincas. Outro aspecto importante é que a parede interna do tubo está em contato com fluidos corrosivos. Sabe-se que na presença de um ambiente agressivo, trincas de corrosão podem desenvolver-se de forma acelerada devido a presença de tensões. No caso de aços estruturais ao carbono ou de baixa liga, esse fenômeno é desencadeado pelo contato com hidróxidos ou com sulfeto de hidrogênio. Em estruturas soldadas, esta situação é mais crítica.<sup>(4)</sup>

Para materiais soldados nas condições ( $C_1$  e  $C_2$ ) com TTPS ao ar, observa-se tensões trativas com valores inferiores ao material como recebido. Considerando a simetria das tensões ao longo da espessura do tubo, pode-se esperar que existam tensões compressivas com valores relativamente baixos na superfície interna. A presença de tensões residuais de compressão na superfície de um componente é um fator para redução da chance de iniciação de trincas de fadiga<sup>(3)</sup>. No caso das soldagem  $P_1$  e  $P_2$  com TTPS ao ar observa-se a existência de tensões trativas no metal de solda e na ZAC, que são as zonas mais críticas e compressivas na região mais distante do cordão. Logo, na região interna tem-se tensões compressivas no metal de solda e na ZAC, que favorecem o fechamento de eventuais trincas de fadiga.

## 5 CONCLUSÕES

A difração de raios-x mostrou-se ser um método eficiente para medições de tensões residuais, apresentando erro nas medidas relativamente pequenas, na ordem de 10MPa.

Os tubos soldados de forma automática com corrente sem pulsação contínua ( $C_1$  e  $C_2$ ) apresentaram perfis de tensões compressivas na região de solda e trativas no metal de base.

Comparando-se os processo de soldagem  $C_1$  e  $C_2$ , pode-se concluir que para uma maior corrente de soldagem e, portanto, uma maior energia de soldagem tem-se valores de tensões residuais são sutilmente mais elevados.

Pode-se concluir observando as tensões pulsadas, nas condições de soldagem apresentadas neste trabalho ( $P_1$  e  $P_2$ ), que um maior aporte térmico resulta em níveis de tensões maiores.

Dentre todas as condições de soldagem ( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $P_1$  e  $P_2$ ), o processo de soldagem  $P_2$  ( $E_2=3,31$  kJ/cm) sem aplicação de nenhum tratamento térmico pós-soldagem o que apresenta menor nível de tensões residuais.

Os tratamentos térmicos ao ar e em forno para ambas as taxas de resfriamento (150°C/h e 25°C/h) mostraram-se eficazes no ensejo de reduzir os níveis de tensões induzidas pelos processos de soldagem  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $P_1$  e  $P_2$ .

Nenhum dos procedimentos para redução de tensões proporcionou o alívio total dos níveis de tensões geradas nos processos  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $P_1$  e  $P_2$ .

Para todos os procedimentos de soldagem ( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $P_1$  e  $P_2$ ) tratados termicamente e resfriados em água, constatou-se que não houve alívio nos níveis de tensões e, ainda, induziu tensões compressivas no metal de base. Este tratamento não é, portanto, indicado para alívio de tensões induzidas pelos processos de soldagem analisados neste trabalho.

Os tratamentos térmicos à temperatura de 630°C, com intervalo de tempo igual a 96 min, com resfriamento ao ar são os mais indicados para processos de soldagem com corrente sem pulsação contínua ( $C_1$  e  $C_2$ ), visto que seu comportamento é o que mais se aproxima do perfil do material como recebido e a sua redução dos níveis de tensões foi a mais significativa.

## Agradecimentos

Ao PRH-31 ANP pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 ASSIS, J. T. et al. Tensometria por difração de raio x aplicada à engenharia e à indústria. Anais do VIII Seminário Latino Americano de Análises por Técnicas de Raios X, XII, n. 1515–1565, p. 122–127, 2002 (1).
- 2 CAMPOS, C. V. F. Suscetibilidade à Corrosão sob Tensão dos Aços AISI 321 e 347 em Meio de Ácidos Politiônicos. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, Maio 2002 (2).
- 3 MODENESI, P. J. Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico. [S.l.], 2001.(3)
- 4 MODENESI, P. J.; SANTOS, M. Metalurgia da Soldagem. [S.l.], 2001. (4)

- 5 ASSIS, J. T.; MONIN, V. I.; FILIPPOV, S. Modelagem de tensões na superfície de metais pelo método de difração de raios x. Anais do VIII Seminário Latino Americano de Análises por Técnicas de Raios X, XII, n. 1515–1565, p. 135–140, 2002 (5).
- 6 JUNIOR, C. M. de S. Evolução do estado de tensões residuais introduzidas por shot peening durante tração uniaxial e ciclos de fadiga em aço inoxidável austenítico. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Julho 2003. (6)
- 7 GUROVA, T. et al. Study of the residual stress state during plastic deformation under uniaxial tension in a 5.0 cr and 0.5 mo steel. Scripta Materialia, v. 36, p. 1031–1035, May 1997. (7)
- 8 GUROVA, T. et al. Model for the variation of residual stress during plastic deformation under uniaxial tension. Journal of Strain Analysis, v. 33, n. 5, p. 367–372, 1998. (8)
- 9 GUROVA, T. Variação do Estado de Tensões Residuais Introduzidas por Shot-Peening, durante deformação plástica por tração uniaxial, em aços. Dissertação (Tese Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Agosto 1997.
- 10 PETROBRÁS. Especificação de Procedimento de Soldagem. E-ac-230-0002. [S.I.], 1999.(9)
- 11 CAMPOS, M. F. de; MACHADO, R.; HIRSH, T. Tensões residuais em aços avaliadas por difração de raios-x: Diferença entre micro e macro tensões residuais. 3º Workshop de Textura, 2006.
- 12 ANDRINO, M. H. Avaliação de Tensões Residuais em Soldas de Dutos Utilizando o Efeito Acustoelástico. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Abril 2003.
- 13 SILVA, C. C. Avaliação das Tensões Residuais de Soldagem em Tubulações de Pequeno Diâmetro Usadas em Refinaria de Petróleo. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, Janeiro 2007.
- 14 RODEIRO, P. F. Análise de Distribuição de Temperaturas e Tensões Residuais em Soldas do Tipo Ring-Weld. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.
- 15 MASUBUCHI, K. *Residual Stresses, Distortion, and their Consequences*. First. [S.I.]: Pergamon Press Ltd., 1980.
- 16 ROGGE, R. B.; ROOT, J. H.; DONABERGER, R. Applied neutron diffraction for industry (ANDI). *Physica B: Condensed Matter*, v. 385–386 part 2, p. 883–889, Nov 2006.