

COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÕES RESIDUAIS PARA DIFERENTES PARÂMETROS UTILIZADOS NO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG AUTOMÁTICO EM AÇOS DE TUBOS ASTM A106 GR. B.

Antonia Daniele Souza Bruno Costa¹ (Universidade Federal do Ceará- UFC), Hamilton Ferreira Gomes de Abreu² (Universidade Federal do Ceará), Hélio Cordeiro de Miranda (UFC)³, Leandro Teixeira (UFC)⁴, Rodrigo Carvalho de Souza Costa (UFC)⁵, Cleiton Carvalho Silva (UFC)⁶.

¹Campus do Pici s/n – Pici – bloco 702 – Fortaleza - CE, antonia_daniele@yahoo.com.br

Em unidades de refino de petróleo, as tubulações são responsáveis pelo transporte de hidrocarbonetos, água, vapor de diversos subprodutos, os quais possuem elevado grau de corrosividade; além de operarem em muitos casos sob severas condições de serviço. Além dos problemas de corrosão, 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. Para estas aplicações são normalmente empregados tubos de aço ASTM A106 Gr. B, os quais são destinados ao uso em temperatura elevada. Para a construção e reparo destas tubulações são utilizados processos de soldagem. Dentre as diversas alterações metalúrgicas sofridas pelo material quando submetidos a um ciclo térmico de soldagem, destaca-se o surgimento de tensões residuais, os quais são indesejáveis, uma vez que podem acarretar fratura por fadiga, corrosão sob-tensão, dentre outros. O objetivo deste trabalho é avaliar os níveis de tensões residuais em tubos de aço ASTM A106 Gr. B induzidas por processos de soldagem nas tubulações utilizadas em refinarias de petróleo. A soldagem utilizado foi TIG automática e autôgena com corrente contínua e pulsada, para dois níveis de energia distintos. Utilizou-se a técnica de difração de Raios-X como instrumento para estabelecer critérios de aceitação para as tensões residuais em tubulações soldadas. Dentre os resultados destaca-se que o material como recebido apresentou baixos níveis de tensões residuais ao longo de sua superfície externa. Todavia, o material soldado com diversos parâmetros apresentou elevados níveis de tensões no metal de solda e trativas e na ZAC adjacente.

Tensões residuais, TIG orbital, difração de raios-X, aços carbono e soldagem autôgena.

1. INTRODUÇÃO

Tubulações de aços ASTM A106 Gr. B são normalmente empregados no transporte de fluidos, em especial em indústrias do setor petróleo e gás. 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 sob elevadas condições de serviço (altas temperaturas e elevadas pressões) (Silva, 2007).

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. A soldagem manual apresenta o inconveniente de depender da habilidade do soldador. Atualmente os sistemas de soldagem oferecem o controle computadorizado, onde os parâmetros de soldagem para uma diversidade de aplicações podem ser salvos na memória da fonte e posteriormente recuperados para uma aplicação específica (Oliveira, 2007). Dentre os diversos processos de soldagem os mais empregados temos o eletrodo revestido, o TIG, MIG/MAG e o arame tubular. Os dois últimos processos são, em geral, empregados na soldagem de tubulações de grandes diâmetros.

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 (Modenesi e Santos, 2001). Dentre as diversas alterações metalúrgicas sofridas pelos materiais quando submetidos a um ciclo térmico de soldagem, destaca-se o surgimento de tensões residuais, as quais são geralmente indesejáveis, uma vez que podem acarretar em diversos problemas tais como trincas a quente, trincas a frio, fratura por fadiga, corrosão sob tensão, dentre outros (Silva, 2007).

Outra preocupação relevante concerne em relação à fadiga. Segundo Modenesi e Santos (2001) a presença de tensões residuais compressivas na superfície de um componente é um fator que reduz a chance de iniciação de trincas de fadiga. Em um componente soldado, as tensões residuais trativas devem ter um efeito negativo no seu desempenho à fadiga.

As tubulações dos setores de petróleo e gás trabalham com petróleo e seus derivados e contém 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 às variações volumétricas nesta localização, além de transformações microestruturais e mudança de propriedades (Modenesi e Santos, 2001).

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, sendo acomodadas pelo desenvolvimento de tensões elásticas e por alterações no formato de toda a estrutura soldada. O aparecimento de tensões residuais e distorções em uma estrutura soldada podem gerar diversos problemas como: a formação de trincas, uma maior tendência da estrutura a apresentar fratura frágil, a falta de estabilidade dimensional e a dificuldade no ajuste de peças ou componentes devido à sua mudança de forma (Modenesi e Santos, 2001).

Para evitar falha é de essencial importância o conhecimento do nível e dos tipos de tensões, tratativas ou compressivas, presentes nas tubulações soldadas. O método de medição de tensões por difração de Raios-X é um método conclusivo, de alta precisão e não destrutivo. 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, quanto 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 estruturas metálicas e outras (Assis *et al*, 2002).

Uma forma de mitigar o efeito das tensões residuais seria aplicação de tratamentos térmicos pós-soldagem, visando o alívio das mesmas. (Assis *et al*, 2002). Uma alternativa seria a aplicação de soldagem automática ao invés da manual, quer para seja na montagem ou em reparos. A soldagem automática permite maior reprodutibilidade, rapidez e baixo custo. O processo TIG orbital procura reunir todas estas características, especialmente no que diz respeito à qualidade do cordão de solda, evitando defeitos e a necessidade de refazer ou corrigir a solda.

O objetivo deste trabalho foi avaliar os níveis de tensões residuais em tubulações soldadas de aço ASTM 106 Grau B com 2" de diâmetro. Os tubos foram soldados com soldagem autógena TIG automática, com corrente contínua e pulsada. Para cada corrente empregado foram utilizadas dois níveis de energia. Os efeitos das energias de soldagem, do tipo de corrente e das velocidades de soldagem utilizada em cada processo foram avaliadas neste trabalho.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Tensões Residuais

As tensões que permanecem em um material, após ter cessado o esforço externo que lhe deu origem, são denominadas de tensões residuais. Os materiais, amostras ou peças que contenham estas tensões, não possuem nenhuma indicação externa de suas existências e, desta maneira, não se diferenciam das amostras onde elas não existem. Entretanto, as tensões residuais podem influenciar nas características físicas e mecânicas. No regime elástico, as tensões aplicadas e residuais se somam linearmente. Porém, no regime plástico, a influência do estado de tensões residuais é bem mais complexa (Kraus e Trofimov, 1988). De acordo com Modenesi (2001), uma vez que as tensões residuais existem na ausência de solicitação externa, o sistema é auto-equilibrado e a força e o momento resultantes devido a essas tensões, em uma dada seção da peça, devem ser nulos.

Em todo corpo livre, o equilíbrio de tensões deve ser mantido, o que significa que a presença de tensões residuais tratativas no componente estará certamente balanceada por uma tensão compressiva em outra parte no corpo. As tensões residuais de tração na superfície de um componente são geralmente indesejáveis, já que podem contribuir para a falha por fadiga e para o aparecimento de trincas superficiais. As tensões residuais de compressão nas camadas da superfície são geralmente benéficas, já que aumentam a resistência à fadiga e a resistência à corrosão sob tensão (Andrino, 2003; Gurova, 1997).

Qualquer processo de conformação ou tratamento térmico que crie deformações localizadas acima do escoamento do material deixará tensões residuais no mesmo quando for cessada a deformação (Lu *et al*, 1996). Um bom projeto requer a tentativa de controlar o nível destas tensões, de modo a não criar efeitos negativos nas resistências e preferencialmente gerar efeitos positivos, como por exemplo, a melhora da resistência à fadiga do material. Além disso, a presença de tensões afeta a propagação de trincas, corrosão sob tensão e a resistência à fadiga, mesmo não sendo atingido o limite de escoamento do material (Junior, 2003).

A existência de tensões residuais diminui a vida útil do material. Elas são difíceis de serem medidas e se adicionam às cargas aplicadas, sendo, portanto indesejáveis.

Todavia, em algumas situações é favorável a introdução de tensões compressivas na superfície, sendo introduzidas de forma intencional através de processos tais como shot-peening, têmpera, revenimento de vidros e muitos outros (Kobayashi, 1993). 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 quanto em condições de campo. O campo de aplicações dessa técnica de medida de

tensão é muito amplo om acentuada utilização em medidas de campo, principalmente no controle de tubulações de petróleo e gás, estruturas metálicas e outras (Assis *et al.*, 2002).

As tensões internas em estruturas metálicas podem ser consideradas como sendo de dois tipos: tensões internas atuantes, devido a esforços aplicados, e tensões internas residuais que permanecem no material, após ter cessado o esforço externo que lhe deu origem. As tensões residuais podem ter origem em diversas causas, como por exemplo: Deformação plástica heterogênea; tensões de origem térmica; transformações de fase; processo de fabricação como soldagem, brasagem, cladding, eletrodeposição, usinagem; tratamento mecânico, tais como laminação, corte, extrusão, dobramento, forjamento, shot-peening, dentre outros; tratamentos termoquímicos, incluindo tratamentos térmicos como a têmpera, o laser e o plasma, além da carburetação, nitretação, endurecimento ou a combinação destes tratamentos.

As tensões de soldagem são tensões residuais internas em equilíbrio, que permanecem na estrutura após a execução da operação de soldagem. As tensões residuais são geradas por escoamentos parciais localizados que ocorrem durante o ciclo térmico de soldagem (Gurova, 1997).

A operação de soldagem é caracterizada por um aquecimento extremamente localizado, pelo qual o material fica sujeito a variações volumétricas localizadas, além de transformações microestruturais e mudança de propriedades. Como resultado, um intenso processo de deformações desenvolve-se na ZF (zona fundida) e ZAC (zona termicamente afetada pelo calor) (Modenesi e Santos, 2001). Alguns autores afirmam que as tensões residuais de soldagem, devido às altas velocidades.

2.2 Soldagem TIG

O processo de soldagem Gás Tungsten Arc Welding (GTAW) ou TIG é um processo de soldagem que utiliza um arco elétrico entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a poça de soldagem, a proteção e a ionização são feitas por um gás inertes Argônio ou Hélio, ou uma mistura destes gases. O GTAW funciona através do eletrodo de tungstênio preso a uma tocha. Por esta mesma tocha é alimentado o gás que irá proteger a soldagem contra a contaminação da atmosfera. As variáveis que determinam basicamente o processo são a tensão do arco, a corrente de soldagem, velocidade de avanço e o gás de proteção.

Utilizando-se a corrente contínua em eletrodo no pólo negativo oferecem elevada penetração e maiores velocidades de soldagem, enquanto que a corrente alternada é especialmente eficaz na soldagem de materiais com óxidos refratários, como alumínio e magnésio. A corrente contínua pulsada envolve a variação repetitiva da corrente do arco entre um valor mínimo e um valor máximo, controlando-se o tempo do pulso, o tempo no valor mínimo, nível de corrente máximo e nível de corrente mínimo. A principal vantagem da corrente pulsada é permitir uma combinação da força, boa penetração e fusão do pulso, enquanto mantém a área de soldagem relativamente fria. Assim é possível obter maiores penetrações do que em corrente contínua constante e trabalhar com materiais mais sensíveis à aposição de calor com minimização das distorções.

A soldagem orbital é uma versão mecanizada do processo TIG manual, onde o eletrodo de tungstênio é instalado em um cabeçote que se desloca ao redor da junta a ser soldada. As fontes de soldagem orbital normalmente controlam os seguintes parâmetros de soldagem: tensão, corrente (pico e base), rotação no cabeçote, tempo de pulso, tem de pré e pós-vazão, corrente e rampa de início e final de cordão (Oliveira, 2007).

2.3 Análise de Tensões Residuais

O método de tensometria 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 aos planos cristalográficos é uma característica do material. Desta forma, quando um feixe de Raios-X de comprimento de onda, incide na superfície de um material segundo um ângulo de incidência θ , ocorre a difração, obedecendo a lei de Bragg. A deformação elástica de uma rede cristalina resulta desta maneira em uma variação da distância interplanar Δd , e conseqüentemente uma variação $\Delta\theta = \theta - \theta_0$ do ângulo de difração. Com isso, é possível utilizar a técnica da tensiometria por Raios-X, pois a tensão pode ser calculada pelas medidas de deformação e pela constante elástica do material (Junior, 2003).

Para se obter uma melhor sensibilidade do método, por exemplo, conseguir picos mais largos ($\Delta\theta$) para uma dada deformação da rede ($\Delta d/d$), deve-se escolher o pico de difração para o maior ângulo ψ possível. Para cada tipo de material, um comprimento de onda, e um parâmetro de rede é selecionado para preencher esta condição. Por exemplo, para a análise de um aço ferrítico (ou martensítico) pode-se usar os planos 211 com um comprimento de onda de $\lambda = 2,2911\text{\AA}$ for usado. Este comprimento de onda é produzido por um tubo anódico de cromo (Lu *et al.*, 1996).

3. METODOLOGIA

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

3.1 Equações Governantes

A energia para cada processo de soldagem empregado foi calculado segunda a Equação 3.1. O rendimento térmico da fonte de energia adotado para o processo TIG foi de 0,65 (Silva, 2007).

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

Onde E é a energia de soldagem (kJ/cm), I é a corrente média (A), V é a tensão média (V), v é a velocidade de soldagem (cm/min) e η =rendimento térmico.

A lei de Bragg pode ser expressa pela equação:

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

Onde n é o índice de refração, λ é o comprimento de onda, d é a distância interplanar e θ é o ângulo de incidência (Cullity, 2001).

As tensões e as distâncias interplanares estão relacionadas pela equação:

$$\Delta\theta = -\frac{\sigma}{E} \tan\theta \left[(1+\nu) \sin^2\psi - \nu \right]$$

Onde $\Delta\theta = \theta - \theta_0$ é a mudança do pico difrativo, σ é a tensão residual presente no material, ν é o coeficiente de Poisson, E é o módulo de elasticidade e ψ é o ângulo entre a normal à superfície do material e a normal aos planos cristalinos (hkl) e correspondente a um certo grupo de cristalitos que estão na posição de difração (Philipov, 2006).

3.2 Soldagem dos Tubos

Os tubos de 2" de diâmetro, com comprimentos iguais ao seu diâmetro, cujas as dimensões são apresentadas na Tabela 3.3, foram soldados circunferencialmente. Os tubos foram faceados para possibilitar a soldagem de topo e para garantir que não houvessem imperfeições na superfície na hora da soldagem. A soldagem foi feita usando o equipamento de soldagem automática TIG orbital. O eletrodo utilizado foi um não consumível de tungstênio, como ilustra a Figura 1.

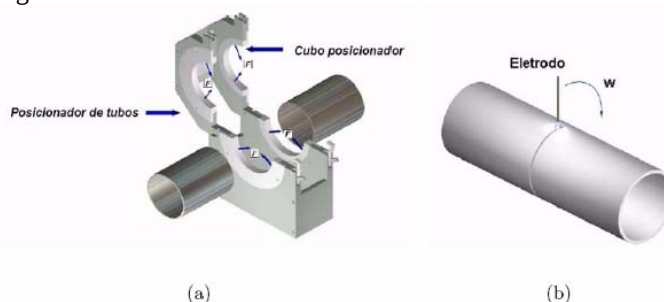


Figura 1. TIG Orbital. a) Posicionador do tubo. b) Eletrodo de tungstênio num movimento de translação ao redor de um tubo, com velocidade angular w.

A soldagem foi feita em um único passe. O gás utilizado para proteção foi o Argônio. Foram utilizadas duas formas de corrente contínua e pulsada, sendo estabelecido dois níveis de energia para cada tipo de corrente; conforme ilustram as Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2. Parâmetros de soldagem usando corrente *no pulse*.

Processo	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (cm/min)	Energia (kJ/cm)
C ₁	130	13,2	11,76	5,7
C ₂	87,8	13,2	13,26	3,4

Tabela 3. Parâmetros de soldagem usando corrente *low pulse*.

Processo	Corrente de	Corrente de	Tensão (V)	Velocidade	Energia
----------	-------------	-------------	------------	------------	---------

	Pico (A)	Base (A)		(cm/min)	(kJ/cm)
P ₁	141,8	47,2	11,9	7,02	6,3
P ₂	141,8	47,2	11,9	13,26	3,3

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. O equipamento permite soldagem de tubos de até 3" de diâmetro externo. Diversos testes foram realizados de forma a conduzir às características desejadas.

3.2 Ataque Eletrolítico

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 camadas de óxidos que interfeririam na medição das tensões. O polimento mecânico não foi empregado, uma vez que pode desenvolver tensões residuais de compressão na camada superficial analisada. A célula eletrolítica usada nesta preparação, conforme ilustra a Figura 2 foi composta de uma cuba com ácido, tendo a área correspondente ao ataque limitado por uma fita isolante. A solução eletrolítica foi à base de HCl com 10% de concentração, sendo diluído em água destilada. Os parâmetros do ataque corrosivo estão ilustrados na Tabela 4. Os mesmos parâmetros e a célula para o ataque foram usados por Cruz (2006).

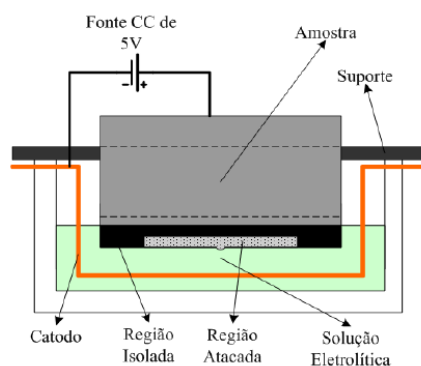


Figura 2. Ataque eletrolítico acelerado. a) Detalhe da célula eletrolítica. b) Vista de um ataque executado em duas amostras simultaneamente.

Tabela 4. Parâmetros utilizados no ataque eletrolítico.

Tensão (V)	Corrente (A)	Densidade de Corrente (A/cm ²)	Tempo (min)	Cátodo	Espessura Retirada (mm)
5,0	6,0	0,25	20	Aço inox	0,4

3.3 Medição das Tensões Residuais

O procedimento para análise de tensões residuais no tubo de 2" foi feito utilizando o difratômetro convencional modelo X'Pert Philips, juntamente com o auxílio dos programas X'Pert Data e X'Pert Stress. Para a medição de tensões nos aços ASTM 106 Grau B foi utilizada a linha de difração (211) com ângulo de difração $\theta = 78^\circ$, com comprimento de onda (λ) igual a 2,2911 Å. A radiação utilizada foi CrK α . Utilizou-se ângulos ψ na faixa de 0 a 60°, sendo medidas as tensões residuais com 6 ângulos distintos pertencentes a esta faixa. Foram medidos tubos na condição como recebido e tubos soldados com as condições C₁, C₂, P₁ e P₂. As intensidades difratadas com varredura θ para cada ψ são coletadas. Posteriormente, são plotadas cada $\sin^2\psi$ com sua distância interplanar correspondente. Com os dados deste gráfico são calculados os valores de tensões.

A Figura 4.1 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 das tensões residuais são mostrados em gráficos que exibem os níveis de tensões com relação à localização do ponto analisado. Foram medidas as tensões mantendo-se a orientação de incidência do feixe paralela ao eixo longitudinal. Quando o componente soldado apresenta uma grande espessura (superior a cerca de 25 mm), as tensões residuais em outras direções podem se tornar significativas. (Modenesi, 2001). As medições de tensões residuais para cada tubo foi feita no centro do cordão de solda, tomado como marco zero e cada 3 mm do ponto anterior; totalizando 21 mm medidos à direita e 21 mm medidos à esquerda, conforme

ilustra a Figura 3. Foram analisados tubos no estado como recebido, soldados com e sem tratamento térmico para alívio das tensões.

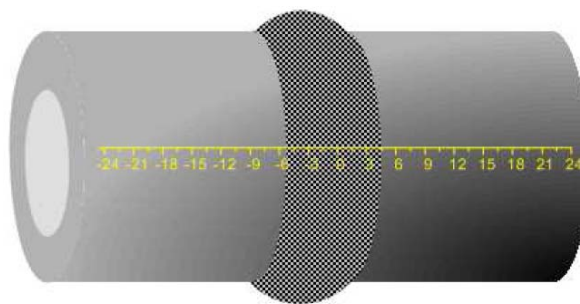


Figura 3. Esquema de medição das tensões residuais nos tubos.

4. RESULTADOS

Na Figura 4 é mostrado o perfil de distribuição das tensões residuais na superfície externa dos tubos para o material como recebido e soldado com diferentes condições. As linhas tracejadas indicam a margem do metal de solda, cobrindo uma faixa de 3mm à direita e 3 mm à esquerda do centro do cordão de solda.

Os perfis de tensões para as condições de soldagem C_1 ($E_{C1}=5,7$ kJ/cm) é ilustrado na Figura 4(a). O material como recebido apresentou um perfil das tensões trativo e linear ao longo de toda sua extensão, tendo um valor médio de 50MPa. De acordo com Campos *et al* (2006), o valor de 50MPa (em módulo) é um valor bastante baixo para as tensões residuais em aço.

Para o material soldado na condição C_1 constata-se que as tensões são compressivas ao longo do metal de solda, diminuindo gradativamente ao se afastarem do centro do cordão até atingirem valores trativos no metal de base. O metal de base foi caracterizado por valores trativos próximos ao do material no estado como recebido. A máxima tensão medida para este condição foi de -186 MPa, com erro de ± 25 MPa, no centro do cordão de solda. Outro ponto com valor de tensão elevado foi identificado no lado esquerdo da ZAC, fornecendo uma tensão no valor de -194 MPa, como erro na ordem de ± 11 MPa.

A Figura 4 (b) ilustra o perfil de distribuição das tensões residuais na superfície externa dos tubos ASTM 106 Grau B para o material como recebido e soldado com corrente sem pulsação C_2 , com energia $E_{C2} = 3, 4$ kJ/cm. Para o material soldado na condição C_2 , o comportamento observado foi similar ao apresentado em C_1 . As tensões são compressivas ao longo do metal de solda, diminuindo gradativamente ao se afastarem do centro do cordão até atingirem valores trativos em $x = 9$ mm e $x = -9$ mm no metal de base. O metal de base foi caracterizado por valores trativos próximos ao material como recebido. Os valores máximos de tensões foram observados no centro do cordão de solda (-203 ± 12 MPa) e na ZAC adjacente ao cordão ($-177, 5 \pm 12$ MPa).

A Figura 4(c) mostra a distribuição de tensões para o caso do material soldado com corrente pulsada, condição de soldagem P_1 ($E_{P1} = 6,3$ kJ/cm). Para o material soldado nesta condição, o comportamento observado foi similar ao tubos soldados com corrente sem pulsação (C_1 e C_2). As tensões apresentaram-se compressivas ao longo do metal de solda, diminuindo gradativamente ao se afastarem do centro do cordão até atingirem valores trativos no metal de base. O metal de base foi caracterizado por valores trativos com valores próximos ao material como recebido. Os valores máximos de tensões foram observados no centro do cordão de solda ($-210, 7 \pm 17$ MPa) e na ZAC, em $x = -3$ mm e na em $x = 6$ mm, com valores de -176 ± 17 MPa e -169 ± 3 MPa, respectivamente adjacente ao cordão ($-177, 5 \pm 12$ MPa).

A Figura 4(d) ilustra o perfil de distribuição das tensões residuais para tubos soldados com a condição P_2 , com energia $E_{P2} = 3,3$ kJ/cm. Para o material soldado na condição P_2 , o comportamento observado foi similar ao tubos soldados com corrente pulsada (P_1). As tensões apresentaram-se compressivas ao longo do metal de solda, passando a tensões trativas em $x = 9$ mm. O metal de base foi caracterizado por valores trativos com valores próximos ao material como recebido. Os picos de tensões foram observados no centro do cordão de solda ($-143; 4 \pm 13,5$ MPa) e na ZAC, em $x = -3$ mm e na ZAC em $x = 6$ mm, com valores de $-153, 3 \pm 10$ MPa e $-98, 7 \pm 13$ MPa, respectivamente.

4.1 Análise dos efeitos da energia de soldagem:

A Figura 5 ilustra a comparação entre as curvas C_1 e C_2 que foram soldados com corrente sem pulsação com valores de 130 e 87,8 A, respectivamente. 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. Na Figura 5, observa-se que o perfil das tensões foi similar para ambos aportes térmicos (C_1 e C_2). O valor de tensão para o centro do cordão de solda para a curva C_1 foi de -159,8 MPa e -144,9 MPa para C_2 . Percebe-se que a região da solda e da ZAC adjacente a região da solda apresentaram pouca diferença nos níveis de tensões. À esquerda da curva, há uma

tendência de redução das tensões compressivas, tornando-se trativa em $x = -9$ mm para ambos os 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.

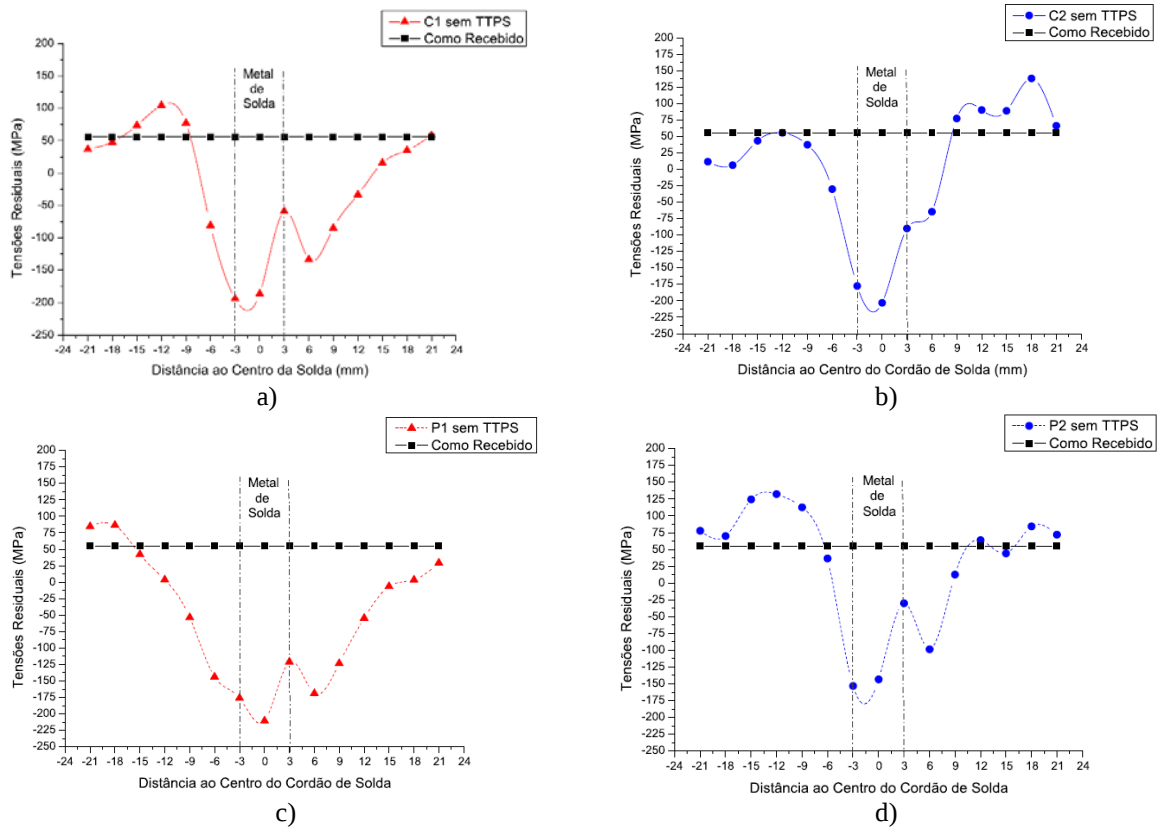


Figura 4. Perfil das tensões residuais para o tubo na condição como recebido e soldados nas condições C_1 , C_2 , P_1 e P_2 .

Segundo Modenesi (2001) os níveis de tensões residuais em uma junta soldada podem ser diminuídos reduzindo-se a quantidade de calor fornecido à junta. Para uma maior corrente de soldagem e, portanto, uma maior energia de soldagem poderia se esperar valores de tensões residuais mais elevados. Todavia, observa-se o efeito da corrente não foi tão significativo nas variações dos níveis de tensões residuais.

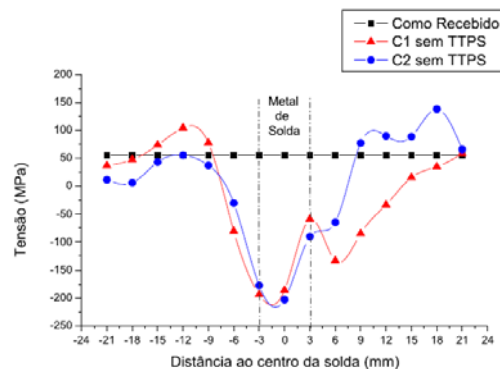


Figura 5. Distribuição das tensões residuais para o material como recebido (CR) e tubos soldados com corrente sem pulsação para os níveis de energias $E_{C1} = 5, 7$ kJ/cm e $E_{C2} = 3, 4$ kJ/cm.

4.2 Análise dos efeitos do tipo de pulso:

Na Figura 6 são plotados os perfis de distribuição de tensões para tubos soldados com corrente sem pulsação C_2 ($E_{C2} = 3,4$ kJ/cm) e corrente pulsada P_2 ($E_{P2} = 3,3$ kJ/cm). Compara-se na Figura 4.7 os perfis de tensões para o nível de tensão 2. Observa-se que as curvas C_2 e P_2 apresentaram o mesmo comportamento. Contudo, os níveis de tensões para a curva P_2 na região da solda apresentaram-se menos compressivos que C_2 . A transição do perfil

compressivo para o trativo ocorre em $x = 9$ mm (à direita do cordão) para ambas as curvas. À esquerda, a transição ocorre mais rápida para P_2 ($x = -6$ mm). Pode-se concluir que a soldagem com corrente pulsada gera menores níveis de tensões residuais. O efeito da pulsação na corrente gera um menor aquecimento da junta soldada e, portanto, menores níveis de tensões residuais.

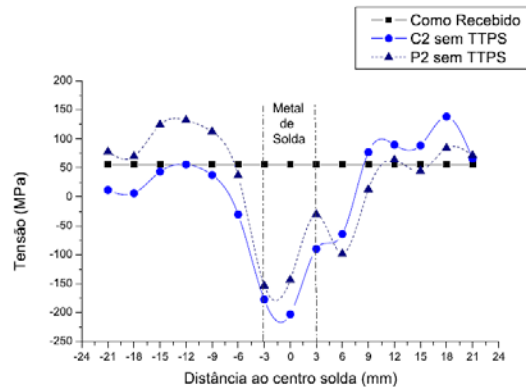


Figura 6. Distribuição das tensões residuais para o material como recebido (CR) e tubos soldados com corrente sem pulsação C_2 ($E_{C2} = 3,4$ kJ/cm) e pulsada P_2 ($E_{P2} = 3,3$ kJ/cm).

4.3 Análise dos efeitos da velocidade de soldagem

Na Figura 7 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). Neste item são comparadas os efeitos das velocidades de soldagem para P_1 (7,02 cm/min) e P_2 (13,26 cm/min). Observa-se para ambas as curvas analisadas na Figura 4.8 que o perfil das tensões residuais foi similar. Todavia, para a condição de soldagem P_2 com menor aporte térmico, os níveis foram menores que os soldados com maior aporte térmico (E_{P1}).

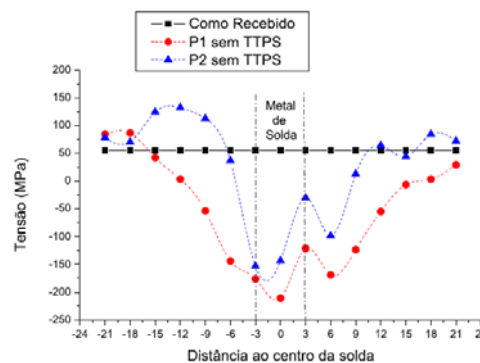


Figura 7. Distribuição das tensões residuais para o material como recebido (CR) e tubos soldados com corrente pulsada para os níveis de energia $E_{P1} = 6,3$ kJ/cm e $E_{P2} = 3,3$ kJ/cm.

Comparando-se os picos de tensões no centro do cordão de solda, observa-se que a diferença entre eles foi superior a 60 MPa; 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 menor nível de energia, a curva P_2 possui menor extensão dos efeitos térmicos; de forma que a região mais afetada (metal de solda e ZAC adjacente) é menor. O restante (metal de base) tende a ser semelhante ao material como recebido. Logo esta curva apresenta uma 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. Observa-se que a velocidade influi de maneira significativa nos níveis de tensões residuais. Então, pode-se concluir, observando os perfis de tensões para material soldado nas condições apresentadas neste trabalho (P_1 e P_2), que uma maior velocidade (P_2) resulta em uma menor energia e menor quantidade de calor fornecida a junta. Logo os níveis de tensões residuais são menores para esta condição.

4.4 Considerações finais:

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 (Modenesi, 2001; Andrino, 2003; Gurova, 1997). Outros autores observaram o mesmo perfil de tensões residuais em tubos e chapas soldadas. Cruz (2006) constatou a existência de tensões compressivas com valores de 260 MPa no metal de solda. Silva (2007), por sua vez,

analisando os tubos ASTM 10.6 Grau B de 2 e 4” com soldagem manual e automática também observou tensões compressivas no metal de solda.

Segundo Silva (2007), 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 (2002) 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 (1980) 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 *et al.* (2006) 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, observaram-se 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 concluir 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.

A distribuição negativa das tensões (compressivas) é explicada pelo efeito torniquete, o qual ocorre durante o resfriamento da poça de fusão. Toda a circunferência do metal de solda contrai de forma a flexionar o tubo, o que comprime a parede externa e traciona a parede interna do mesmo (Law *et al.*, 2006). Mochizuki *et al.* (2000) observaram por difração de nêutrons o mesmo perfil de tensões nas paredes externas do tubo, ao passo na parte interna em torno da linha neutra este perfil era refletido. Oliveira (2007) mediu na parte interna através do seccionamento de uma seção do tubo. Os efeitos do relaxamento foram restringidos pela fixação do tubo, de forma a permitir a medida externa e interna. O autor observou na parte externa tensões compressivas no metal de solda e trativa na região interna do tubo.

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 (Modenesi, 2001).

5. CONCLUSÃO

A difração de raios-x mostrou-se ser um método eficiente para medições de tensões residuais, apresentando erro nas medidas relativamente pequeno, da 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. I Dentre todas as condições de soldagem (C_1 , C_2 , P_1 e P_2), o processo de soldagem P_2 ($E_2=3,31$ J/cm) sem aplicação de nenhum tratamento térmico pós-soldagem o que apresenta menor nível de tensões residuais. Comparando-se os processos de soldagem C_2 e P_2 , pode-se concluir que a soldagem com corrente pulsada gera menores níveis de tensões residuais. O efeito da pulsação na corrente gera um menor aquecimento da junta soldada e, portanto, menores níveis de tensões residuais. Observa-se que a velocidade influi de maneira significativa nos níveis de tensões residuais. Então se pode concluir, observando os perfis de tensões para material soldado nas condições apresentadas neste trabalho (P_1 e P_2), que uma maior velocidade (P_2) resulta em uma menor energia e menor quantidade de calor fornecida a junta. Logo os níveis de tensões residuais são menores para esta condição.

6. AGRADECIMENTOS

PRH-31/ANP pelo apoio financeiro, à Funcap e ao CNPQ.

7. REFERÊNCIAS

- ANDRINO, M. H. **Avaliação de tensões residuais em soldas de dutos utilizando o efeito acustoelástico**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Abril 2003.
- 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.
- 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.
- CRUZ, R. L. da S. **Avaliação dos efeitos da técnica da dupla camada na soldagem do Aço ASTM A516 Grau 60**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, Novembro 2006.
- GUROVA, T. **Variação do estado de tensões residuais introduzidas por shot-peening, durante deformação plástica por tração uniaxial, em aços**. Referências Bibliográficas 160 Dissertação (Tese Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Agosto 1997.
- 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.
- KOBAYASHI, A. S. (Ed.). **Handbook on Experimental Mechanics**. 2nd. ed. [S.l.]: Society for experimental mechanics, 1993.
- KRAUS, I.; TROFIMOV, V. V. Proceeding of the international conference on residual stress in welded Construction and their effects. 1st. ed. [S.l.]: Academia Praha, 1988.
- LU, J.; JAMES, M.; ROY, G. (Ed.). **Handbook of measurement of residual stresses**. [S.l.]: Inc. The Fairmont Press, 1996.
- LAW, M.; PRASK, H.; LUZIN, V.; GNAEUPEL-HEROLD, T. Residual stress measurements in coil, linepipe and girth welded pipe. **Materials Science and Engineering A 437**, pp 60-63, 2006.
- MASUBUCHI, K. **Residual Stresses, Distortion, and their Consequences**. First. [S.l.]: Pergamon Press Ltd., 1980.
- MOCHIZUKI, M.; HAYASHI, M.; HATORI, T. Finite element modeling and validation of residual stresses in 304L girth welds. **5th International Conference on Trends in Welding Research**, June 1-5, 1998, Pine Mountain, GA.
- MODENESI, P. J. **Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico**. [S.l.], 2001.
- MODENESI, P. J.; SANTOS, M. **Metalurgia da Soldagem**. [S.l.], 2001.
- OLIVEIRA, G. L. G. **Avaliação das tensões residuais em tubos de pequeno diâmetro soldados pelo processo TIG orbital**. Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Ceará, Abril, 2007.
- 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.
- 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.

COMPARING OF RESIDUAL STRESSES LEVELS WITH DIFFERENT PARAMETERS USED IN AUTOMATIC GTAW WELDING PROCESS OF TUBES ASTM A106 GR. B

In petrochemical industries, tubulations are responsible to transport hydrocarbons, water, gases, and others. All these products have high corrosivity level. Beside of corrosion problems, these tubes are submitted to welding processes, originating a local heating and microstructural transformations, and changing properties. For these applications ASTM A106 Gr. B steel are generally used, especially to work at high temperature. Welding process is in general used to repair and construct these tubes. Residual stresses are one of the most important metallurgical changes caused by thermal cycle of welding. Residual stresses generate fatigue fracture, stress corrosion and many others. The main goal of this work was to evaluate residual stresses levels induced by welding in ASTM A106 Gr. B tubes used in petroleum refineries. Welding process used was autogen and automatic TIG welding, with continuous and pulse current and two levels of energies. X-rays diffraction was used to analyze residual stresses levels. Material as received showed low and trative stresses levels in all external surface. However, welded material with various parameters showed high and compressive stresses levels in welding metal. The HAZ (heating affected zone) showed trative stresses.

Residual stresses, Orbital GTAW, X-ray diffraction, carbon steel, and autogen welding

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.