

Determinação das Tensões Residuais de Soldagem em Juntas Multipasses do Aço API 5L X80

B. A. Araújo¹, T. M. Maciel², A. A. Silva³, E. P. Soares⁴, M. M. Silva⁵

¹Campus Esperança – IFPB, rua Joaquim Virgolino, S/N, CEP 58.135-000, Esperança –PB

^{2,3}Engenharia Mecânica – UFCG – Av. Aprígio Veloso, 882, CEP 58.429-900, Campina Grande-PB

⁴Engenharia de Materiais – UFCG – Av. Aprígio Veloso, 882, CEP 58.429-900, Campina Grande-PB

⁵Petróleo e Gás – IFPB, Av. Tranquilino Coelho Lemos, 671, CEP 58.432-300, Campina Grande-PB

(Recebido em 05/07/2016; revisado em 06/04/2017; aceito em 13/03/2018)
(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

O presente trabalho avaliou as tensões residuais em juntas soldadas do aço API 5L X80. Empregaram-se três tipos de processos de soldagem diferentes para a execução das soldas (Arco Elétrico com Eletrodo Revestido – SMAW, com Eletrodo de Tungstênio e Proteção Gasosa – GTAW e com Arame Tubular – FCAW-Autoprotetido). Quatro juntas soldadas foram obtidas variando-se consumíveis e parâmetros de soldagem. As tensões residuais foram avaliadas por difração de raios-x nas regiões superiores e inferiores das chapas. Nas regiões superiores foi verificado que, com o emprego de aportes térmicos similares, mas com intensidades de corrente e velocidades de soldagem maiores, as tensões residuais foram mais compressivas. Foi verificado que o emprego de altas correntes implica em tensões residuais mais compressivas ao longo do Metal de Solda (MS) na superfície superior. No caso da região inferior, com a aplicação de maiores aportes térmicos mais trativas foram as tensões residuais no MS.

Palavras-chave: Aço API 5L X80; Juntas soldadas; Difração por Raios-X; Tensões Residuais.

Abstract:

This study evaluated the residual stresses in welded joints of API 5L X80 steel. They were used three different welding processes for the execution of welding (SMAW, GTAW and FCAW-self-protecting). Four welded joints were obtained by varying consumable and welding parameters. The Residual stresses were assessed by x-ray diffraction in the upper and bottom regions of the plates. In the upper regions was found that, by employing similar heat input, but with higher current and welding speed, the residual stresses are more compressive. It was found that the use of higher currents implies more compressive residual stresses along the Weld Metal (WM) on the upper surface. In the case of the bottom region, the residual stresses were more trative in WM with the use of higher heat input.

Palavras-chave: API 5L X80 Steel; Welded Joints; X-ray Diffraction; Residual Stresses.

1. Introdução

Diante da evolução tecnológica dos vários segmentos industriais, principalmente nas últimas décadas, ocorreu um aumento da demanda de transporte de gás natural e petróleo por tubulações. Assim, elevados investimentos tem sido realizados na montagem de novas redes de transporte e distribuição de hidrocarbonetos. Além disso, a necessidade de canalizar insumos provenientes de locais de extração recém descobertos e de abastecer centros consumidores com

demanda em ascensão, também tem contribuído para o crescimento da rede dutoviária [1].

Dentre os aços empregados para as novas linhas de distribuição utilizadas no Brasil destaca-se o aço API 5L X80. Esses são aços ARBL (Alta Resistência e Baixa Liga) foram desenvolvidos para atender os requisitos de alta resistência mecânica associado com alta tenacidade para a fabricação de tubulações para o transporte de petróleo e gás. É um aço bastante empregado na Europa e Japão. No Brasil, este aço está sendo empregado para as novas linhas de distribuição,

* E-mail: bruno.araujo@ifpb.edu.br (B. A. Araújo)

embora ainda seja alvo de pesquisa, principalmente, para a avaliação da sua soldabilidade [2].

Durante os processos de soldagem, muitas são as alterações metalúrgicas sofridas pelos materiais quando submetidos a um ciclo térmico de soldagem, destacando-se o surgimento de tensões residuais [3]. O surgimento de tensões residuais após o processo de soldagem exerce uma considerável influência sobre as propriedades mecânicas das juntas soldadas e seu controle permite evitar possíveis falhas da estrutura soldada [4].

Muitos mecanismos relevantes de degradação podem ser acelerados pela presença de tensões residuais. Tensões residuais trativas, por exemplo, podem contribuir para o desenvolvimento de trincas de fadiga. Similarmente, a corrosão sob tensão pode ocorrer em soldas se a soma da tensão aplicada e a tensão residual excederem um valor limite [5]. Nesse sentido, o grande desafio é, portanto, manter a alta resistência sem prejuízo da tenacidade, principalmente considerando-se o processo de corrosão e demais processos de fragilização que são dependentes, também, dos níveis de tensões residuais oriundas dos processos de soldagem [6].

Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar os níveis de tensões residuais, através da difração de raios-x, em juntas soldadas do aço API 5L X80 decorrentes de diferentes processos de soldagem.

2. Materiais e Métodos

Neste trabalho utilizou-se uma chapa de aço API 5L X80 de 1 m x 1 m de 17 mm de espessura, cedido pela USIMINAS, conforme Figura 1. A respectiva chapa foi obtida via TMCR. A Tabela 1 apresenta a composição química do aço API 5L X80, onde se pode perceber o seu baixo teor de carbono, que é uma das principais características desta classe de aço. Na Tabela 2 são apresentadas as propriedades mecânicas do aço fornecidas pelo fabricante.



Figura 1. Chapa de aço API 5L X80 utilizada no presente trabalho.

Tabela 1. Composição química do aço API 5L X80 fornecida pelo fabricante.

Porcentagem (%) em peso										
C	Mn	Si	P	S	Ni	Mo	Al	Cr	V	Cu
0,084	1,61	0,23	0,011	0,011	0,011	0,17	0,035	0,135	0,015	0,029

Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço API 5L X80 fornecida pelo fabricante.

Propriedades mecânicas do aço API 5L X80	
Limite de escoamento (σ_{LE}) (MPa)	561
Limite de resistência à tração (σ_{RT}) (MPa)	683
Alongamento (%)	34
Dureza (HV-10)	206
Tenacidade -20°C (J)	143

Pedaços de 120 mm x 360 mm foram retirados da chapa para a execução das juntas soldadas. Um ângulo de 60° foi utilizado para a execução dos chanfros. A Figura 2 ilustra a geometria dos chanfros empregados. Para o presente caso, o espaçamento “e” entre as juntas soldadas correspondeu aproximadamente ao diâmetro do consumível empregado na execução dos passes de raiz das juntas soldadas.

Na execução das soldagens foram empregados 3 diferentes processos de soldagem (Arco Elétrico com Eletrodo

Revestido – SMAW, com Eletrodo de Tungstênio e Proteção Gasosa – GTAW e com Arame Tubular– FCAW-Autoprottegido).

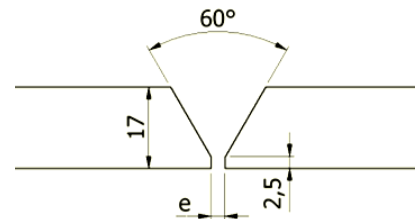


Figura 2. Geometria dos chanfros empregados na execução das soldagens.

Foram realizadas 4 juntas soldadas com diferentes combinações de consumíveis e processos. As 4 combinações de consumíveis e processos de soldagem empregados estão apresentados na Tabela 3. Os passes de raiz das juntas T1.0, T2.0 e E1.0 foram executados utilizando-se uma temperatura de pré-aquecimento de aproximadamente 100°C. O passe de

raiz da junta T3.0 foi executado à temperatura ambiente, de modo a se poder verificar a influência do pré-aquecimento no perfil de tensões residuais ao longo do respectivo passe de raiz. As juntas T1.0, T2.0 e E1.0 foram executadas com 8

passos de soldagem e a junta T3.0 com 7. As Tabelas 4 a 7 mostram os parâmetros de soldagem empregados.

Tabela 3. Consumíveis empregados nas diferentes condições de soldagem.

Sequência	Passe de Raiz	Passe Quente	Passe de Enchimento	Passe de Acabamento	Processos
T1.0	AWS ER70S – 3 GTAW	AWS E8010	AWS E8018-G	AWS E8018-G	GTAW+SMAW
T2.0	AWS ER70S – 3 GTAW	AWS E9010	AWS E9018-G	AWS E9018-G	GTAW+SMAW
T3.0	AWS ER70S – 3 GTAW	AWS E9010	AWS E91T8-K8	AWS E91T8-K8	GTAW+SMAW+FC AW autoprotégido
E1.0	AWS E6010 – SMAW	AWS E8010	AWS E8018-G	AWS E8018-G	SMAW

Tabela 4. Parâmetros de soldagem para a condição de soldagem T1.0.

Passes	I(A)	U(V)	v _s (mm/s)	H (kJ/mm)
1 Raiz	152	12	1,2	1,52
2 Quente	69	33	1,5	1,52
3 Enchimento	111	21	1,1	2,12
4 Enchimento	137	20	2,3	1,19
5 Enchimento	131	21	1,7	1,62
6 Acabamento	131	21	2,1	1,31
7 Acabamento	131	20	2,4	1,09
8 Acabamento	131	20	2,1	1,25

Tabela 5. Parâmetros de soldagem para a condição de soldagem T2.0.

Passes	I(A)	U(V)	v _s (mm/s)	H (kJ/mm)
1 Raiz	157	13	1,0	2,04
2 Quente	86	35	1,6	1,88
3 Enchimento	113	23	1,2	2,16
4 Enchimento	117	22	1,9	1,35
5 Enchimento	116	22	2,1	1,21
6 Acabamento	116	21	1,8	1,35
7 Acabamento	117	22	2,4	1,07
8 Acabamento	118	22	2,6	1,00

Antes de serem realizadas as análises de tensão residual por difração de raios-x as juntas soldadas foram submetidas a um ataque eletrolítico para a remoção de camada de óxidos de modo a não interferir nas análises posteriores. A solução empregada para a realização do ataque foi ácido clorídrico (HCl) com 10% de concentração numa densidade de corrente de 0,25A/cm² por um tempo de 20 minutos. Foi empregado um aço inoxidável ferrítico como cátodo. Utilizou-se uma fonte retificadora AC-CC (TECTROL - Modelo TCA-30V, 30A OBR1A) para fornecimento da corrente desejada de modo a se obter a densidade de corrente citada acima.

Tabela 6. Parâmetros de soldagem para a condição de soldagem T3.0.

Passes	I(A)	U(V)	v _s (mm/s)	H (kJ/mm)
1 Raiz	160	12	1,1	1,74
2 Quente	85	33	1,8	1,56
3 Enchimento	221	20	1,6	2,76
4 Enchimento	234	20	2,6	1,80
5 Enchimento	228	20	4,1	1,11
6 Acabamento	240	20	2,1	2,28
7 Acabamento	222	20	3,0	1,48

Tabela 7. Parâmetros de soldagem para a condição de soldagem E1.0.

Passes	I(A)	U(V)	v _s (mm/s)	H (kJ/mm)
1 Raiz	54	38	1,0	1,94
2 Quente	82	33	1,5	1,81
3 Enchimento	160	22	1,8	1,94
4 Enchimento	165	21	2,7	1,30
5 Enchimento	165	22	2,7	1,36
6 Acabamento	165	22	2,5	1,48
7 Acabamento	165	22	2,9	1,26
8 Acabamento	165	23	3,1	1,20

Como se sabe, O método de difração de raios-x é uma técnica bem estabelecida para medição de tensões residuais [7]. As medidas de tensões residuais são determinadas de acordo com a Equação 1.

$$\sigma_{\phi} = \frac{E}{(1+\nu)\sin^2\psi} \left(\frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} \right) \quad [1]$$

Onde σ_{ϕ} é a tensão residual superficial, $d_{\phi\psi}$ é o espaçamento interplanar definido pelos ângulos Φ e ψ , obtida

a partir da posição do pico de difração para um dado plano do retículo cristalino (hkl); d_0 é o espaçamento interplanar livre de tensão do plano (hkl) do retículo cristalino, e E e ν são o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, respectivamente.

A relação linear na Equação 1 para tensão residual implica que a plotagem da deformação do retículo cristalino versus $\text{sen}^2\psi$ será uma reta, a qual o gradiente é função de σ_ϕ , E e ν . O valor de σ_ϕ pode ser calculado a partir do gradiente da linha reta para vários ângulos de inclinação ψ . Usando a Lei de Bragg, a Equação 1 pode ser reescrita como:

$$\sigma_\phi = \frac{E}{(1+\nu)} \frac{\cot g\theta\Delta\theta}{\text{sen}^2\psi} \quad [2]$$

Para análise das tensões residuais foi utilizado um difratômetro portátil - *Portable Stress Analyser STRESSRAD* (RADICON Ltd. Scientific Instruments), juntamente com o software de análise do equipamento - *Stress*. Uma vez que o material utilizado neste trabalho possui uma estrutura principalmente ferrítica, a análise foi feita nos planos (211) com o emprego de um comprimento de onda de $\lambda = 2,2911\text{Å}$. Este comprimento de onda é produzido por um tubo anódico de Cromo [8]. O método empregado foi o $\text{sen}^2\psi$, com medidas realizadas para $\psi = 0^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 45^\circ$.

Foram realizadas análises em três regiões distintas (A, B e C) de todas as juntas, tanto na parte superior como na parte inferior. A Figura 3 ilustra a disposição dos pontos analisados nas juntas. Ao longo de cada região foram analisados 31 pontos espaçados de 2 mm. A origem das medidas foi colocada como sendo o centro do cordão de solda, sendo analisados 15 pontos à sua direita e 15 pontos à sua esquerda.

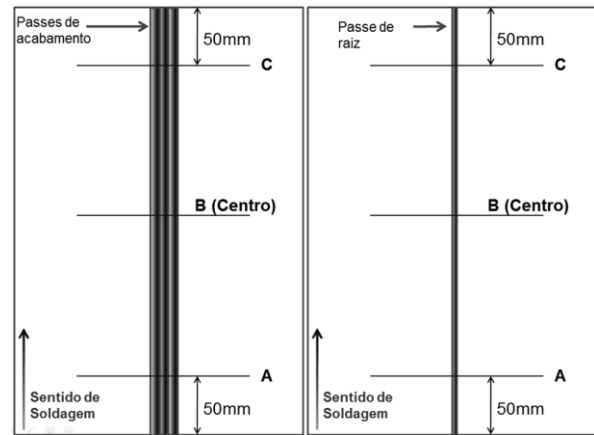


Figura 3. Regiões onde foram analisados os perfis de tensões residuais obtidos.

3. Resultados e Discussões

A partir dos dados obtidos por difração de raios-x foi possível plotar os resultados de tensões residuais longitudinais e transversais para as juntas analisadas. As análises foram realizadas inicialmente na parte superior da junta e posteriormente na parte inferior da junta. Inicialmente, nas Figuras 4 a 7, serão apresentados os resultados da região superior das juntas. Posteriormente, nas Figuras 8 a 11, são apresentados os resultados da região inferior das juntas. As linhas verticais plotadas com o mesmo tipo de linha das curvas de tensões residuais indicam os limites da região correspondente ao MS, tendo em vista que devido à solda ter sido realizado de forma manual, a sua largura ao longo da junta pode variar.

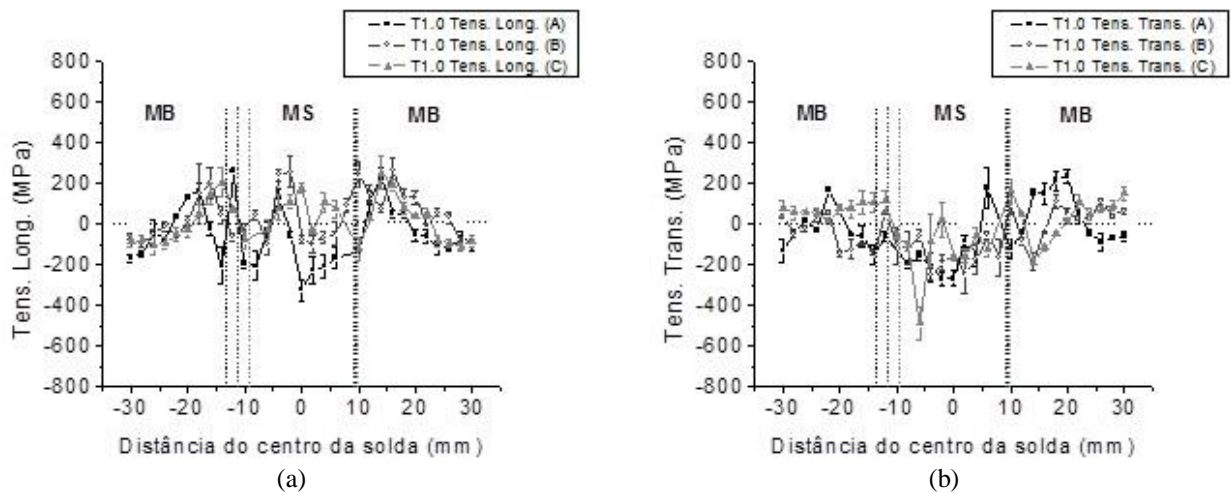


Figura 4. Tensões residuais na região superior da junta T1.0; (a) Tensões residuais longitudinais e (b) Tensões residuais transversais.

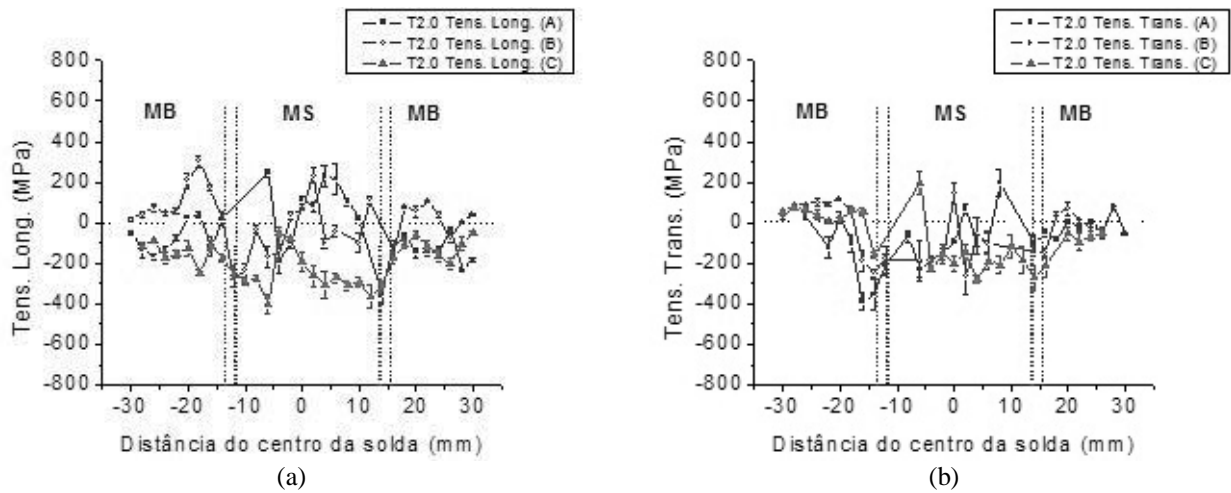


Figura 5. Tensões residuais na região superior da junta T2.0; (a) Tensões residuais longitudinais e (b) Tensões residuais transversais.

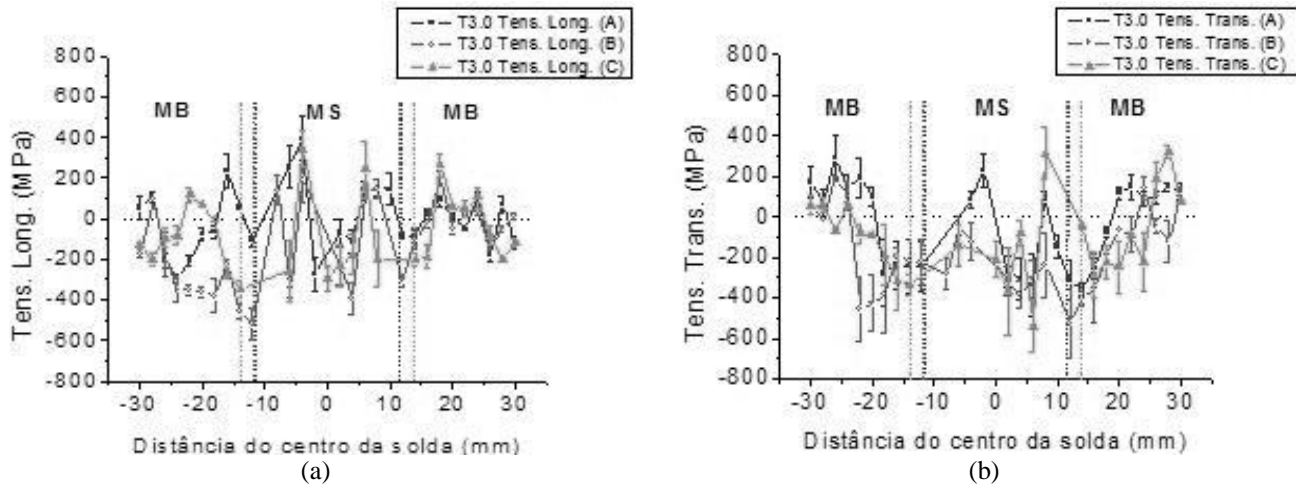


Figura 6. Tensões residuais na região superior da junta T3.0; (a) Tensões residuais longitudinais e (b) Tensões residuais transversais.

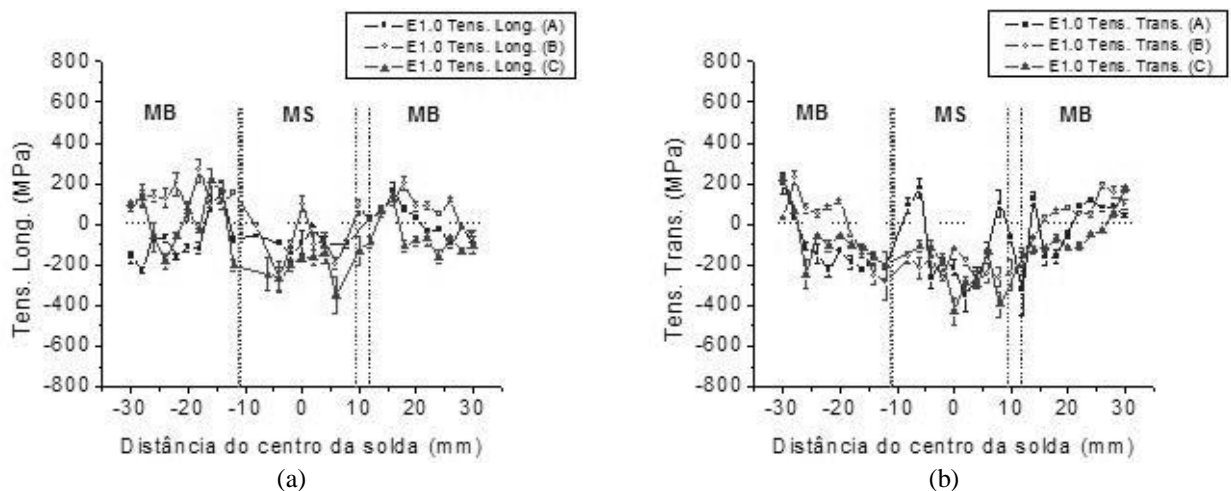


Figura 7. Tensões residuais na região superior da junta E1.0; (a) Tensões residuais longitudinais e (b) Tensões residuais transversais.

Conforme pode ser observado, as tensões residuais longitudinais apresentam maiores magnitudes do que as tensões residuais transversais. Um melhor comportamento da distribuição de tensões residuais, tanto as transversais quanto as longitudinais, é identificado na região do Metal de Base (MB). A ZF, devido a sua maior heterogeneidade, com a presença de grãos colunares, apresenta uma maior dispersão

dos resultados, não apontando para um comportamento tão bem definido quanto o MB.

Considerando-se a importância do nível de tensões residuais trativas em juntas soldadas são apresentados na Tabela 7 os valores médios de tensões residuais longitudinais e transversais no MS e nos 3 primeiros pontos analisados que corresponde a toda a ZTA e início do MB, respectivamente.

Tabela 7. Valores médios das tensões residuais longitudinais e transversais no MS e ZTA/MB na região superior da junta.

Junta	MS (MPa)		ZTA/MB (MPa)		H _{médio} nos passes de acabamento (kJ/mm)
	Long.	Transv.	Long.	Transv.	
T1.0	-2,3	-112,8	63,6	-23,2	1,22
T2.0	-70,5	-115,2	-105,2	-144,8	1,14
T3.0	-45,5	-196,8	-130,1	-277,6	1,88
E1.0	-129,1	-188,0	70,0	-167,1	1,31

As regiões superiores das juntas que foram submetidas à análise de tensões residuais são compostas dos passes de acabamento e do MB. Logo, as energias que foram consideradas para análise dos resultados foram correspondentes àqueles passes. As juntas T1.0, T2.0, T3.0 e E1.0 apresentaram aporte térmico médio nos passes de acabamento de aproximadamente 1,22 kJ/mm, 1,14 kJ/mm, 1,88 kJ/mm e 1,31 kJ/mm, utilizando correntes com valores médios de 131 A, 117 A, 231 A e 165 A. As juntas T1.0 e E1.0 foram soldadas, nos passes de acabamento, com o mesmo consumível (E8018-G). Logo, pode ser verificado que, embora os aportes térmicos tenham sido próximos, a utilização de uma corrente mais elevada acarretou em uma intensidade ligeiramente maior de tensões residuais compressivas. Tal fato também foi constatado na literatura, quando ao se analisar juntas soldadas com o eletrodo E8018-G verificou-se que quando os aportes térmicos eram similares, mas as intensidades de correntes eram maiores, mais compressivas foram as tensões residuais ao longo do MS [9]. Mesmo com o emprego de diferentes processos e consumíveis de soldagem, é verificado, também, que o emprego de maiores intensidades de corrente implica em níveis de tensões residuais transversais mais compressivos ao longo do MS.

A junta T2.0 foi soldada nos passes de acabamento com o eletrodo E9018-G. Tal consumível diferencia-se do E8018-G principalmente pelo teor de Mo de 0,20%. Comparando-se com a junta T1.0, soldada com aporte térmico idêntico ligeiramente maior, percebe-se que houve mudanças significativas entre os níveis de tensões residuais obtidos para as duas juntas. A diferença entre as intensidades de corrente foram significativas para se alterar os níveis de tensões residuais obtidos tanto no MS quanto na ZTA. Porém, no caso das tensões residuais transversais no MS os níveis de tensões residuais transversais foram bastante similares.

A junta T3.0 foi soldada nos passes de acabamento com o processo FCAW-autoprottegido utilizando uma energia de soldagem superior às outras juntas. Conforme verificado, os perfis de tensões residuais apresentaram picos em regiões

específicas da junta, ou seja, nos centros dos cordões de solda, principalmente no caso das tensões residuais longitudinais. Além disso, esta foi a junta que apresentou no MS e na ZTA um estado de tensões residuais bem mais compressivos do que as demais juntas. O emprego do maior aporte térmico deslocou os picos de tensões residuais do MB para regiões mais afastadas em relação à ZTA. Deve ser lembrado que o número de passes da respectiva junta é inferior em relação às demais e que o processo de soldagem é outro (FCAW-autoprottegido), o que pode ter ocasionado as diferenças nos resultados obtidos.

Sabe-se que o emprego de um maior aporte térmico gera um maior nível de tensões residuais trativas [5,10,11], entretanto, deve-se salientar que os casos apresentados na literatura são muitas vezes decorrentes de diferentes processos de soldagem, juntamente com diferentes condições e geometrias de juntas soldadas. Para o presente caso, por exemplo, embora a junta T3.0 tenha sido soldada com maior aporte térmico que as demais juntas, o fato de apresentar picos tensões residuais trativas ao longo do MS mais pronunciados do que às outras juntas pode estar ligado, também, ao processo de soldagem empregado, bem como ao diferente número de passes.

Mesmo apresentando dois picos de tensões residuais trativas ao longo do MS, a junta T3.0, assim como todas as juntas soldadas no presente trabalho, apresentaram na região superior um estado de tensão residual transversal predominantemente compressivo. Tal fenômeno já foi verificado também em soldas de aço HSLA-100, onde as tensões residuais eram sempre compressivas sobre a superfície da solda, e nas suas proximidades, tornando-se gradualmente trativas à medida que a distância a partir da linha de fusão aumentava, sendo esse fenômeno atribuído ao efeito de transformações de fase no aço, uma vez que a expansão volumétrica associada à transformação da austenita para martensita/bainita podem aumentar o nível de tensões compressivas [12]. Além disso, esse estado compressivo na superfície da solda pode estar relacionado também a Ferrita

Acicular que apresenta mecanismo de transformação similar à Bainita, cujo estado de tensões residuais compressivos é devido à componente de deformação cisalhante de sua transformação [8]. Além disso, se mudanças estruturais durante o resfriamento ocorrem em baixas temperaturas, como os casos apresentados acima, então a contração gradual que ocorreria passa para um estado de expansão rápida. Consequentemente, as tensões residuais trativas são diminuídas ou até mesmo mudadas para um estado de tensão compressivo [13].

Mais uma vez, considerando-se a importância do nível de tensões residuais trativas em juntas soldadas são apresentados na Tabela 8 os valores médios de tensões residuais

longitudinais e transversais no MS e nos 3 primeiros pontos analisados que corresponde a toda a ZTA e início do MB, respectivamente.

Conforme já mencionado anteriormente, a análise da região inferior das juntas engloba o passe de raiz e o MB, este sendo em maior extensão devido à geometria das juntas, o que por sua vez acarreta em perfis mais regulares de tensões residuais nas análises. A análise da região do passe de raiz em juntas soldadas é de grande importância tendo em vista que este deve absorver grande parte das tensões residuais decorrentes das deformações proporcionadas pelos passes subsequentes [14].

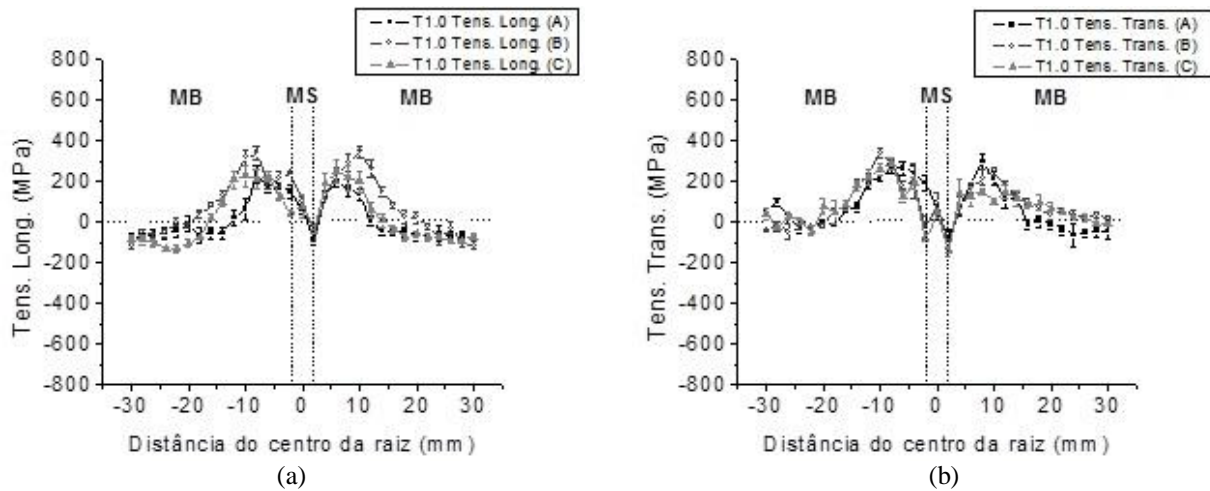


Figura 8. Tensões residuais na região inferior da junta T1.0; (a) Tensões residuais longitudinais e (b) Tensões residuais transversais.

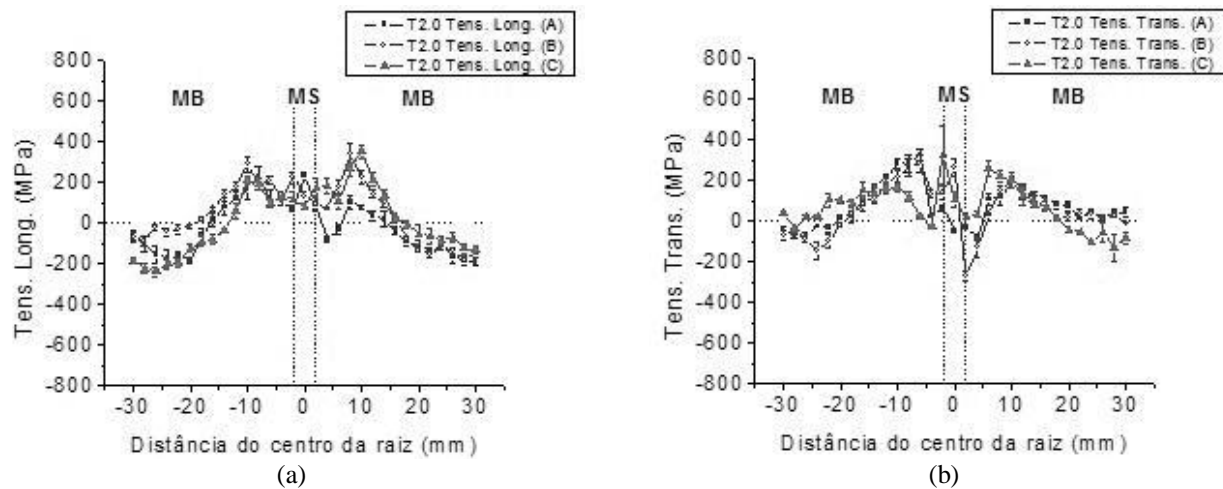


Figura 9. Tensões residuais na região inferior da junta T2.0; (a) Tensões residuais longitudinais e (b) Tensões residuais transversais.

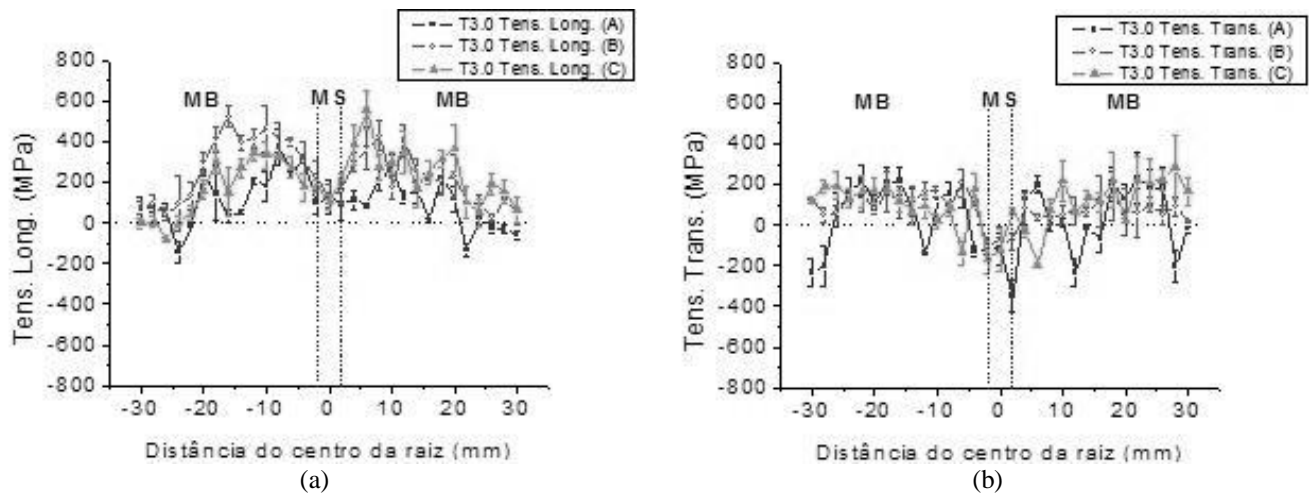


Figura 10. Tensões residuais na região inferior da junta T3.0; (a) Tensões residuais longitudinais e (b) Tensões residuais transversais.

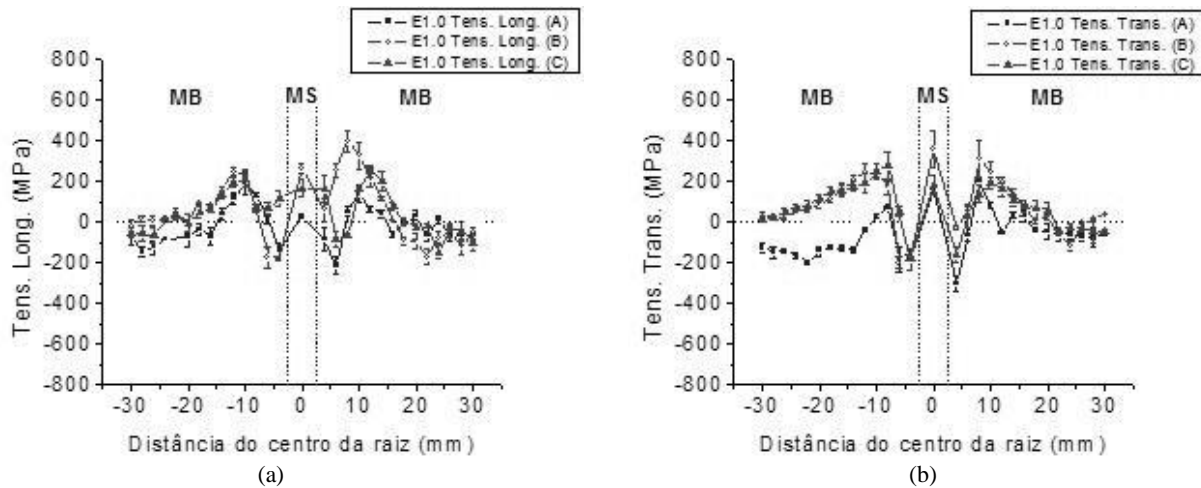


Figura 11. Tensões residuais na região inferior da junta E1.0; (a) Tensões residuais longitudinais e (b) Tensões residuais transversais.

Tabela 8. Valores médios das tensões residuais longitudinais e transversais no MS e ZTA/MB na região inferior da junta.

Junta	MS (MPa)		ZTA/MB (MPa)		H _{médio nos passes de raiz e quente (kJ/mm)}
	Long.	Transv.	Long.	Transv.	
T1.0	80,3	64,6	136,7	94,9	1,52
T2.0	138,7	108,3	110,0	68,3	1,95
T3.0	122,3	-103,6	259,8	-6,8	1,65
E1.0	153,0	235	-16,6	-109,5	1,87

Os passes de raiz das juntas T1.0, T2.0, T3.0 foram executadas pelos processos GTAW enquanto que o passe de raiz da junta E1.0 foi executado pelo processo SMAW. Na execução dos passes subsequentes as juntas T1.0, T2.0 e E1.0 foram executados pelo processo SMAW, enquanto que a junta T3.0 foi pelo processo FCAW-autoprottegido. Os aportes térmicos médios entre os passes de raiz e passes quente para as respectivas juntas T1.0, T2.0, T3.0 e E1.0 foram 1,52 kJ/mm, 1,95 kJ/mm, 1,65 kJ/mm e 1,87 kJ/mm. No caso das tensões residuais longitudinais é verificado que tanto para as

juntas soldadas com o passe de raiz pelo processo GTAW quanto para a junta soldada pelo processo SMAW, foi verificado que o emprego de um maior aporte térmico proporcionou um maior nível de tensões residuais trativas ao longo do MS, pois as juntas T1.0 e T3.0, que foram soldadas com o emprego de menor aporte térmico em relação as juntas T2.0 e E1.0, apresentaram um estado de tensões residuais menos trativo no MS.

Para a junta T3.0, o fato de não ter sido empregado pré-aquecimento, não teve influência significativa sobre os níveis

de tensões residuais longitudinais ao longo do MS, mas teve influência marcante na ZTA, conforme dados apresentados na Tabela 8.

Conforme já mencionado, as tensões residuais transversais são consideradas mais importantes em fenômenos de fragilização por hidrogênio e corrosão sob tensão [15], principalmente se considerarmos o passe de raiz que está em contato direto com o hidrocarboneto transportado, sendo este rico em H₂S, por exemplo.

No caso das tensões residuais transversais, houve variação significativa entre os níveis de tensões residuais para as juntas analisadas. O aporte térmico para a junta T2.0 e E1.0 foram similares o que por sua vez gerou níveis próximos de tensões residuais longitudinais ao longo do MS. Os aportes das juntas T2.0 e E1.0 foram maiores que o da junta T1.0, logo, foi verificado para a região do passe de raiz que maiores aportes térmicos acarretarão em níveis de tensões residuais transversais trativas ao longo do MS.

Uma observação importante é que apesar da junta E1.0 ter proporcionado valores mais elevados de tensões residuais transversais trativas ao longo do MS, esta apresentou um estado compressivo na transição do MS para a ZTA. Entre as juntas soldadas com a vareta ER70S-3, as tensões residuais transversais foram maiores com o emprego de maiores aportes térmicos. A junta T3.0 apresentou menor intensidade de tensões residuais transversais no MS em relação às demais juntas, e não apresentou picos bem definidos como as demais juntas estudadas. O fato de a junta ter sido soldada sem pré-aquecimento pode ter sido o fator para estes resultados encontrados, ou seja, o pré-aquecimento implica em mais energia aplicada nas juntas e maiores serão os níveis de tensões residuais trativas na região inferior da chapa.

Conclusões

No presente trabalho foi realizada a determinação experimental das tensões residuais decorrentes de processos de soldagem em juntas de aço API 5LX80. As regiões superiores e inferiores das juntas foram avaliadas. Diante dos resultados obtidos, foi possível concluir que:

- Na região superior das juntas soldadas, as tensões residuais transversais foram mais compressivas com aportes térmicos ligeiramente maiores, associados a maiores intensidades de correntes e maiores velocidades de soldagem;
- O emprego de maiores correntes de soldagem gerou níveis de tensões residuais mais compressivos independente do processo e consumível de soldagem empregado;
- Na região inferior das juntas soldadas, quanto maiores os aportes térmicos mais trativas foram as tensões residuais no MS e menores foram os níveis ao longo da ZTA;
- O emprego do processo GTAW nos passes de raiz gerou níveis menores de tensões residuais no MS, embora o uso do processo SMAW tenha produzido tensões residuais compressiva na ZTA.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos Laboratórios de Soldagem (LABSOL-UFCG), Laboratório de Engenharia Eletroquímica (LEEq-UFCG) e a CAPES.

Referências

- [1] Gorni, A.A.; Silveira, J.H.D.; Reis, J.S. Metalurgia dos aços microligados usados na fabricação de tubos soldados com grande diâmetro. *Tube & Companhia*, v.5:26, p.52-63, 2009.
- [2] Caloi, G. Análise da soldabilidade do aço API 5L X-80 por meio dos testes Tekken e de implante. 2008. 145p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [3] Kou, S. *Welding metallurgy*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, 2003.
- [4] Assis, J.T., Monin, V.; Teodosio, J.R.L.; Gurova, T. X-ray analysis of residual stress distribution in weld region. *International Centre for Diffraction Data, Advances in X-ray Analysis, Volume 45*, 2002.
- [5] Francis, J.A.; Stone, H.J.; Kundu, S.; Rogge, R.B.; Bhadeshia, H.K.D.H.; Withers, P.J.; Karlsson, L. Transformation Temperatures and Welding Residual Stresses in Ferritic Steels. In: *Proceedings of PVP2007 2007 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, July 22-26, 2007, San Antonio, Texas.
- [6] Ballesteros, A.F. Avaliação da resistência de juntas soldadas circunferências de aço API 5L X-80 à corrosão sob tensão na presença de sulfetos e susceptibilidade à fragilização por hidrogênio. 2010. 290p. Tese (Doutorado) – Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [7] Cullity, B.D. *Elements of X-ray Diffraction*, second ed., Addison-Wesley Publishing Company, 1978.
- [8] Lu, J.; James, M.; Roy, G. (Ed.). *Handbook of measurement of residual stresses*. [S.l.]: Inc. The Fairmont Press, 1996.
- [9] Oliveira, G.L.G.; Silva, T.F.; Miranda, H.C.; Motta, M.F. Avaliação do Efeito da Energia de Soldagem sobre as Tensões Residuais Resultantes em Juntas Soldadas com Multipasse. *Soldagem & Inspeção*, v.15, n.3, p.218-224, 2010.
- [10] Modenesi, P.J. *Efeitos mecânicos do ciclo térmico*. Apostila. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 2001.
- [11] Marques, P.V., Modenesi, P.J., Bracarense, A.Q. *Soldagem – Fundamentos e Tecnologia*. 3ed. Belo Horizonte, editor UFMG, 2009.
- [12] Gao, H.; Guo, H.; Blackburn, J.M.; Hendricks, R.W. Determination of residual stress by x-ray diffraction in HSLA-100 steel weldments. *Proceedings of the*

International Conference on Residual Stress, Linköping, Sweden, June 1997.

- [13] Pilipenko, A. Computer simulation of residual stress and distortion of thick plates in multi-electrode submerged arc welding. Their mitigation techniques. 2001. 222p. Thesis [Doktor Ingeniør], Department of Machine Design and Materials Technology Norwegian University of Science and Technology N-7491 Trondheim, Norway.
- [14] Pinto, P. M. A. S. Soldagem circunferencial de tubo API 5L X80 empregando processos manual/semi-automático. 2006. 113p. Dissertação [Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais], Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [15] Hayashi, M., Ishiwata, M., Morii, Y. Residual stress distribution in carbon steel pipe welded joint measured by neutron diffraction. Materials science research international, Vol. 6, No. 4, p. 287-294, 2000.