

ANÁLISE DE EVOLUÇÃO DO ESTADO DAS TENSÕES RESIDUAIS DE SOLDAGEM

Segen Estefen¹, Tatiana Gurova^{1&2}, Xavier Castello¹, Anatoli Leontiev³

¹Laboratório de Tecnologia Submarina–COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, segen@lts.coppe.ufrj.br

²GURTEQ – Ensaios Não Destrutivos Ltda, Rio de Janeiro, Brasil, tatiana@gurteq.com

³IM/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, anatoli@im.ufrj.br

Resumo - A análise do estado das tensões de soldagem de peças livres é apresentada. Foram avaliados dois diferentes tipos de soldagem, com arame simples e com arame duplo. A evolução do estado das tensões residuais foi monitorada em cada passo operacional: posicionamento das chapas, colocação das restrições, soldagem, retirada parcial das restrições, retirada total das restrições. As medições foram realizadas no metal depositado, zona termicamente afetada (ZTA) e metal de base próximo ao cordão de solda e ao longo da chapa, por método de difração de raios-X, utilizando equipamento portátil RAYSTRESS®. Foram observadas as diferenças no processo de formação da distribuição do campo das tensões residuais, dependendo do tipo da soldagem utilizado, assim como identificados os perfis típicos da distribuição das tensões residuais para soldagem com arame simples e arame duplo.

Palavras-chave - Tensões residuais de soldagem, difração de raios-X

Abstract - The stress state analysis of welded plates is presented. Two different methods of welding with single and double wire were applied. The evolution of the stress state was monitored in each operational step: plates positioning, implementing of boundary and inner restrictions, welding, partial and full restrictions removal. The measurements were performed at the deposited metal, heat affected zone (HAZ), base metal next to the weld joint and along the plate. The X-ray diffraction method with the RAYSTRESS® portable equipment was used for stress measurements. Differences were observed in the residual stress distribution as well as established typical residual stress distribution profile for both single and double wire welding.

Key-words – Welding residual stress, X-Ray diffraction

1. Introdução

A tensão residual pode ser definida como qualquer tensão que existe no volume de um material sem aplicação de carga externa. O estado das tensões residuais representa fator importante que determina a capacidade de carga e vida útil da construção. Esta informação, obtida durante a fabricação, permite corrigir possíveis imperfeições na execução do projeto, facilitando o posterior controle da integridade e contribuindo para o planejamento da manutenção. Tensões residuais influenciam substancialmente nas características de resistência mecânica e do funcionamento dos elementos de uma estrutura. Como resultado das operações tecnológicas, para produção de estruturas e, posteriormente, na sua montagem e funcionamento, freqüentemente ocorrem tensões residuais que contribuem para o surgimento de trincas. Para a prevenção da segurança e da capacidade de trabalho dos diversos elementos de estruturas, o conhecimento da magnitude e das direções da atuação dessas tensões residuais é de grande importância. Surgindo após vários processos tecnológicos como soldagem, tratamento mecânico superficial e/ou tratamentos termoquímicos, as tensões residuais podem ser causadas por deformação plástica heterogênea, ação térmica e/ou transformações de fase.

Tensões de soldagem, estudadas neste trabalho, são tensões residuais internas em equilíbrio, que permanecem na estrutura após a execução da operação de soldagem. Entre as fontes de tensões residuais em soldagem distinguem: diferença de volumes do metal fundido e cristalizado, deformações heterogêneas causadas por resfriamento superficial mais intenso e transformações de fase [1, 2]. Sendo assim, o estado das tensões residuais provenientes desta operação é de natureza complexa.

Primeiros trabalhos teóricos sobre análise do estado de tensões das peças soldadas apareceram na primeira metade do século passado [3]. Em seguida, as melhorias das técnicas e equipamentos de medição e os avanços dos métodos computacionais estimularam diversos estudos baseados em análises experimental e numérica de tensões residuais após a soldagem tanto entre as peças livres [4 –10], como para o caso da solda de reparo [11].

2. Tensões de Soldagem

As fontes de tensões residuais consideradas na soldagem são: contração no resfriamento de regiões diferentemente aquecidas (*shrinkage residual stresses*), surgimento de deformações plásticas, resfriamento superficial mais intenso (*quenching residual stresses*) e transformação de fase (*transformation residual stresses*). A contração no resfriamento de regiões diferentemente aquecidas e plastificadas durante a operação de soldagem normalmente representa a principal fonte de tensão residual. O nível de tensões também depende do grau de restrição da estrutura, na direção considerada. Na maioria dos casos, a restrição é total na direção longitudinal do cordão de solda. Não dispondo de rigidez suficiente, as peças se deformam, tendendo a aliviar as tensões residuais. Estas deformações são proporcionais à extensão da zona plastificada. A distribuição das tensões, considerando apenas as tensões de contração, é mostrada na Figura 1. Na prática, as tensões residuais e deformações de contração, resultantes da soldagem, apresentam-se em condições muito mais complexas que na Figura 1. Nesta figura, não são considerados o movimento da fonte de calor, a variação do grau de restrição à medida que a solda é depositada e a soldagem em vários passes, entre outros fatores.

Tensões residuais surgem também devido ao resfriamento mais rápido da superfície, pois o processo de resfriamento não é homogêneo ao longo da espessura. A superfície resfria-se mais rapidamente do que o interior. Desta forma, além do gradiente de temperatura nas

direções longitudinal e transversal ao cordão de solda, será também estabelecido um gradiente de temperatura ao longo da espessura da peça. Este gradiente de temperatura poderá ocasionar deformação plástica localizada e, conseqüentemente, tensões residuais ao longo da espessura. Ocorrerá um nível elevado de tensões residuais deste tipo quando a junta soldada apresentar elevado gradiente de temperatura ao longo da espessura (no caso de chapas espessas), e baixo limite de escoamento nesta faixa de temperaturas. Se o resfriamento mais rápido da superfície fosse a única fonte de tensões residuais, tensões compressivas seriam obtidas na superfície e, em equilíbrio, tensões trativas seriam obtidas no interior. A distribuição de tensões residuais transversais, devido somente ao efeito de resfriamento mais rápido da superfície, ao longo do eixo, é apresentada na Figura 2-b.

Tensões residuais, devido à transformação de fase na solda, ocorrem porque a transformação de fase da austenita para ferrita, bainita, perlita ou martensita, ocorre com aumento de volume. Desta forma, numa junta soldada, o material da zona fundida e da zona termicamente afetada que sofre transformação de fase tenderá a se expandir, o que será impedido (pelo menos na direção longitudinal da solda) pelo restante do material frio e não transformado. Explica-se então a geração de tensões residuais de compressão na região transformada. A distribuição de tensões residuais transversais na superfície, devido somente à transformação de fase, é mostrada na Figura 2-c. A superposição das tensões residuais transversais, devido à contração, resfriamento mais rápido da superfície, e transformação de fase, é mostrada na Figura 2-d.

Além disso, o estado de tensões na área do cordão de solda também depende muito da espessura das chapas soldadas e das condições de resfriamento, como visto na Figura 3.

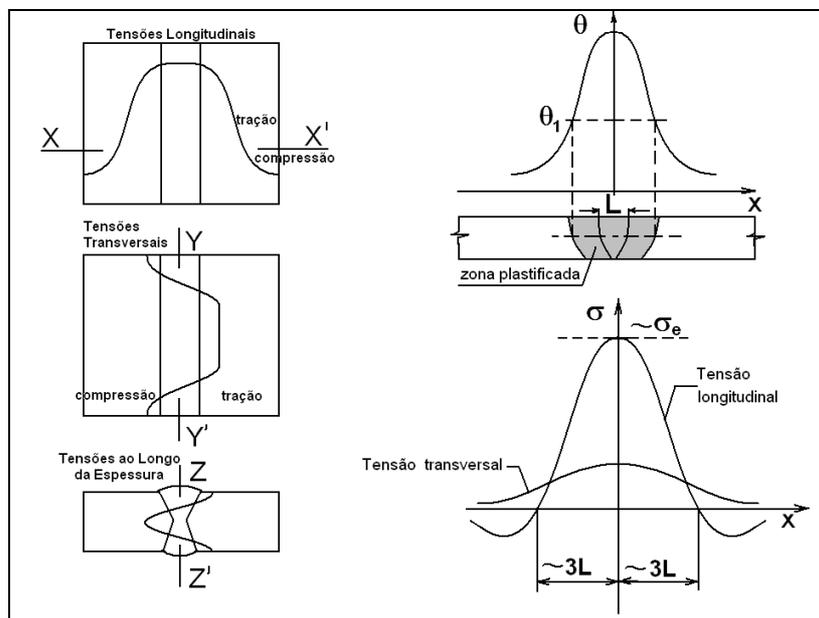


Fig. 1: Distribuição de tensões residuais de uma solda entre peças livres, [1]

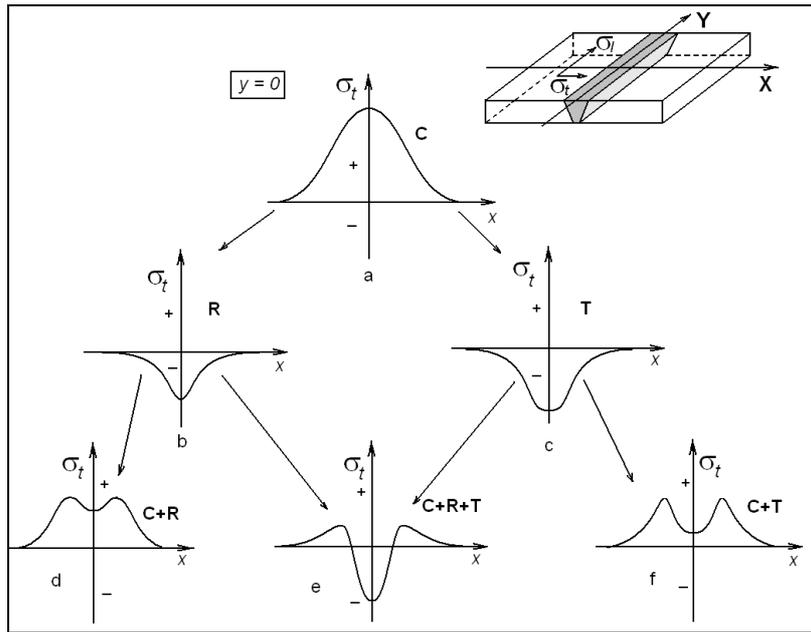


Fig. 2: Representação esquemática da variação de tensões residuais transversais (σ_t) mostrando a superposição linear dos efeitos: a) contração (C); b) resfriamento superficial mais intenso (R); c) transformação de fase (T); d) C+R; e) C+R+T; f) C+T, [1]

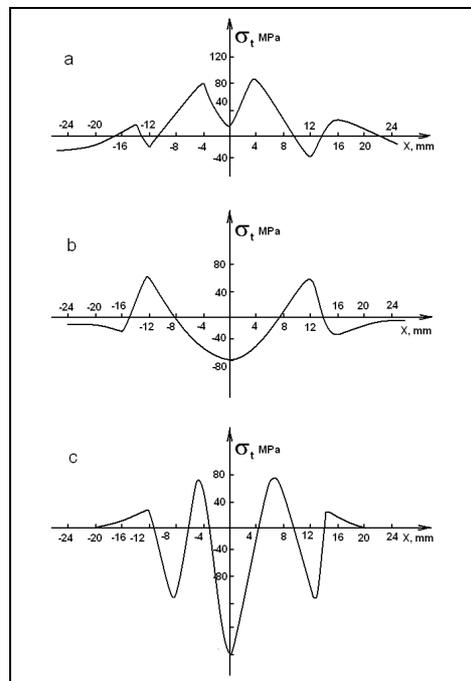


Fig. 3: Tensões de solda em aço: a) espessura das placas = 2,5 mm (resfriamento no ar); b) espessura das placas = 10 mm (resfriamento no ar); c) espessura das placas = 2,5 mm (resfriamento na água), [2]

3. Metodologia de Medição de Tensões

Medições de tensão foram realizadas pelo equipamento portátil de difração de raios-X RAYSTRESS® mostrado na Figura 4.

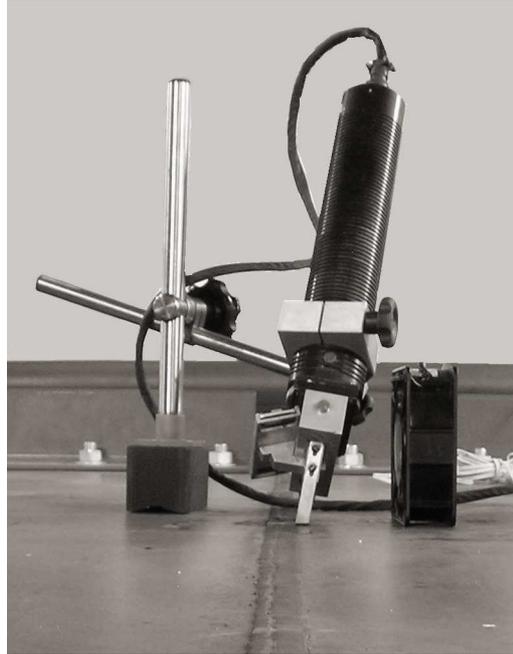


Fig. 4: Equipamento portátil RAYSTRESS® em posição de trabalho

Os princípios da tensometria por raios-X se baseiam, por um lado, na teoria de difração de raios-X para materiais cristalinos, e por outro na mecânica dos sólidos, em particular, na teoria da elasticidade [12, 13]. Os valores das tensões são definidos a partir da deformação da estrutura cristalina causada pela ação destas tensões. As deformações são medidas em sua vez, conforme lei de Bragg: $2d \sin \theta = \lambda$, através do deslocamento da linha de difração. Os princípios de técnica de dupla exposição, usada para medição de tensões utilizando o equipamento portátil descrito acima, baseiam-se na determinação de duas componentes de deformação: $\varepsilon_{\varphi, \psi_1}$ e $\varepsilon_{\varphi, \psi_2}$. Sendo a deformação é determinada através da formula:

$$\varepsilon_{\varphi, \psi} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\varphi} \cdot \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2), \quad (1)$$

então a diferença entre duas componentes da deformação é:

$$\varepsilon_{\varphi, \psi_2} - \varepsilon_{\varphi, \psi_1} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\varphi} (\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1), \quad (2)$$

onde E e ν são constantes elásticas do material, ψ e φ os ângulos polar e azimutal, σ_{φ} a componente medida da tensão, σ_1 e σ_2 as tensões principais. Da equação (2), a componente σ_{φ} é igual a:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{1+\nu} \frac{\varepsilon_{\varphi, \psi_2} - \varepsilon_{\varphi, \psi_1}}{\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1}. \quad (3)$$

Derivando a lei de Bragg:

$$\varepsilon_{\varphi, \psi} = \frac{d_{\varphi, \psi} - d_0}{d_0} = -ctg \theta_0 (\theta_{\varphi, \psi} - \theta_0), \quad (4)$$

onde $d_{\psi, \varphi}$, d_0 e $\theta_{\psi, \varphi}$, θ_0 são distâncias interplanares e os ângulos de difração para materiais com e sem tensão, respectivamente. Usando as formulas (3) e (4), temos:

$$\sigma_{\varphi} = -\frac{E}{1+\nu} \frac{ctg \theta_0 (\theta_{\varphi, \psi_2} - \theta_{\varphi, \psi_1})}{\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1}.$$

Desta maneira, para determinar qualquer componente da tensão é necessário medir os ângulos de difração correspondentes às reflexões dos planos cristalinos com normais caracterizadas por ângulos ψ_1 e ψ_2 . Os ângulos usados no equipamento são $\psi_1=0^\circ$ e $\psi_2=50^\circ$ e para se medir as tensões é usada geometria de “ ψ -goniômetro”, Figura 5. A precisão da medição do valor absoluto da tensão por RAYSTRESS® é de ± 10 MPa.

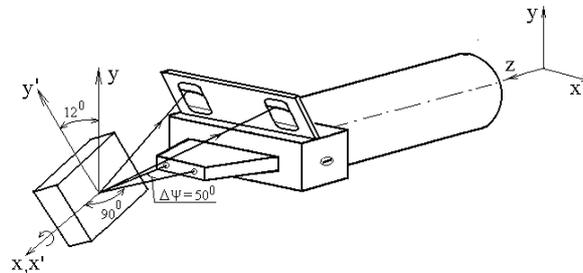


Fig. 5: Esquema de medição de tensões com o equipamento RAYSTRESS®

4. Resultados Experimentais

Para os testes foram utilizadas chapas de aço ASTM 131 grau A de tamanho 2200mmx800mmx19mm, com limite de escoamento mínimo especificado do material de 235MPa. Os pontos das medições no metal base foram escolhidos na linha perpendicular ao cordão de solda no meio de uma das chapas. As medições foram feitas na direção longitudinal (paralelo ao cordão de solda) e na direção transversal (perpendicular ao cordão de solda), ver Figura 6. Além disso, foram medidas tensões residuais no metal depositado (ponto MS), na zona termicamente afetada (ponto ZTA) e no metal base próximo ao cordão de solda (ponto MB). Polimento eletrolítico foi aplicado para remoção da camada superficial

oxidada causada pela laminação a quente, remoção da camada superficial no metal depositado do cordão de solda e identificação da localização da ZTA.

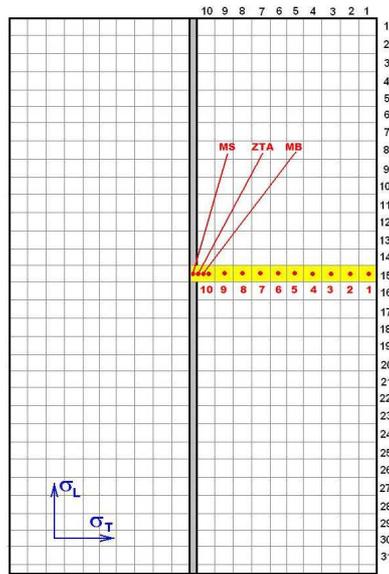


Fig. 6: Localização dos pontos das medições 1-10, MB, ZTA e MS e direções de medições das tensões

Durante a soldagem, as chapas foram restringidas ao movimento normal ao plano da chapa ao longo do perímetro e ao longo da junta de soldagem, com auxílio de vigas tipo I presentes no gabarito na parte inferior, e com auxílio de apoio superior e atuador hidráulico na parte superior. Para avaliar a distribuição inicial das tensões residuais nas chapas, foram realizadas as medições antes da soldagem com e sem restrições impostas. Os resultados podem ser vistos nas Figuras 7 e 8. Gráficos de cor preta representam distribuição das tensões nas chapas somente apoiadas e sem restrições impostas. As tensões neste caso são resultantes do tratamento mecânico da superfície da chapa durante processo da fabricação e estão distribuídas de maneira uniforme. Gráficos de cor verde representam os resultados da medição das tensões residuais na chapas com restrições laterais e internas impostas.

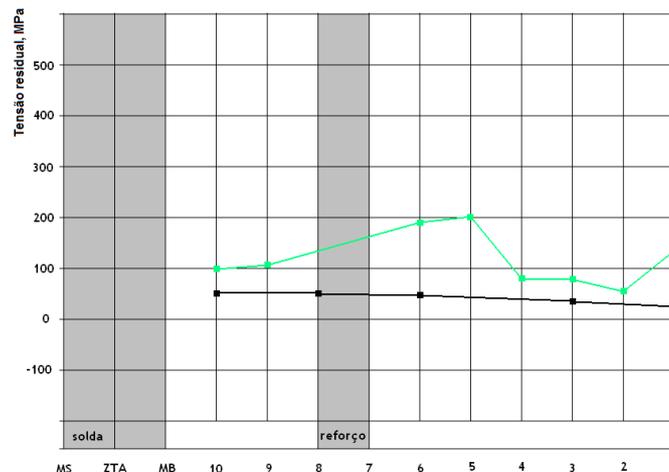


Fig. 7: Tensões residuais longitudinais: cor preta - sem restrições; cor verde - todas as restrições impostas

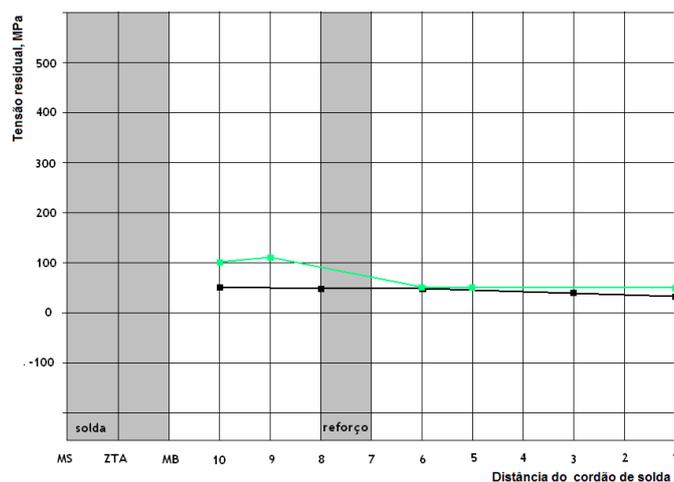


Fig. 8: Tensões residuais transversais: cor preta - sem restrições; cor verde - todas as restrições impostas

No caso do arame simples, a soldagem foi realizada com quatro camadas de preenchimento em 11 passes. Ângulo de chanfro é de 20°, junta de topo com backing de cerâmica de cerâmica. Soldagem é manual com processo MIG. Velocidade média de soldagem 3,74mm/seg. Valor médio de corrente e de voltagem 203A e 27V, respectivamente. O limite de escoamento do metal depositado é de 545MPa.

Soldagem com arame duplo foi realizada com 3 passes de espessura 7mm, 12mm e 19mm. Ângulo de chanfro é de 20°, junta de topo com backing de cerâmica de cerâmica. Soldagem é automatizada, com um carro magnético. Valor médio de corrente e de voltagem 324A e 29V para primeiro arame e 231A e 25V para segundo arame.

Após a retirada das restrições foram observadas as distorções de empenamento e de embicamento das chapas soldadas, Figura 9, maiores no caso da soldagem com arame simples e menores no caso da soldagem com arame duplo.

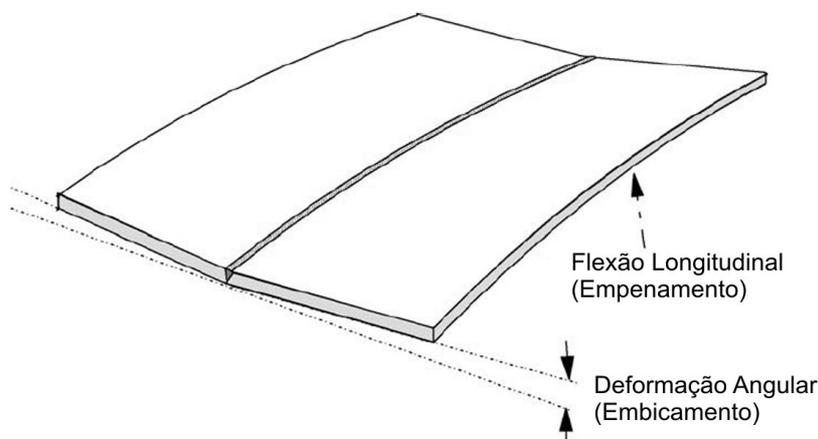


Fig. 9: Tipo das distorções das chapas observadas após a retirada das restrições, [10]

O ponto de distorção com maior amplitude está localizado na borda da seção de meio comprimento de chapa. Neste local, ocorre a combinação amplificada dos efeitos de flexão longitudinal e distorção angular, Figura 10.

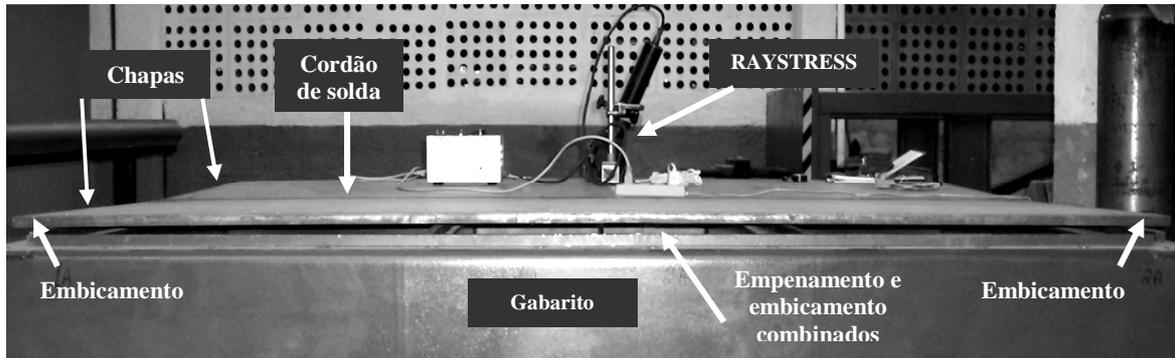


Fig. 10: Vista do gabarito e das distorções de embicamento (distorção angular) e de empenamento (distorção longitudinal) nas chapas soldadas com arame simples

Figuras 11 e 12 e Tabela 1 apresentam os resultados das medições das tensões residuais nas direções longitudinal e transversal, respectivamente, para chapas soldadas com arame simples com todas as restrições impostas (Etapa 1), somente com restrições internas retiradas (Etapa 2) e para chapa livre das restrições (Etapa 3). Sinal “-” significa tensão de compressão, sinal “+” significa tensão de tração. Observa-se o processo uniforme do alívio (diminuição) das tensões residuais com retirada (primeiro parcial e depois total) das restrições. Tanto tensões longitudinais, como transversais, ficaram próximas ao valor zero a partir da metade da chapa (pontos 7-6) para o lado livre (ponto 1) após da retirada das restrições.

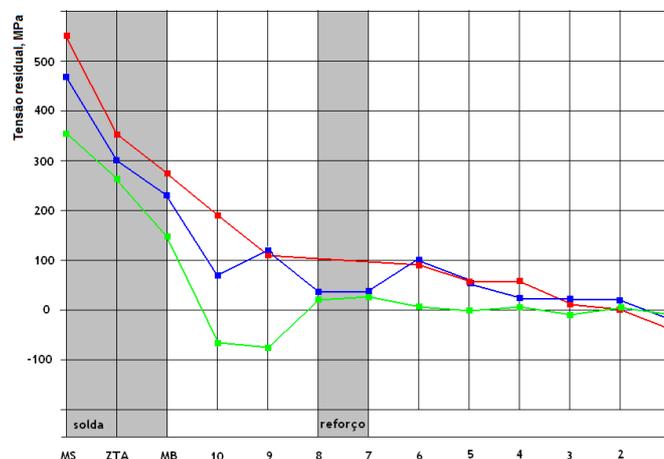


Fig. 11: Arame simples. Tensões residuais longitudinais: cor vermelha – todas as restrições impostas; cor azul – somente restrições laterais impostas; cor verde – livre das restrições

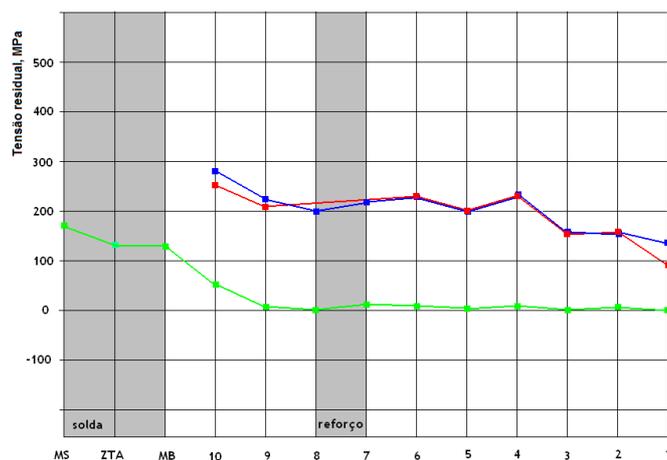


Fig. 12: Arame simples. Tensões residuais transversais: cor vermelha – todas as restrições impostas; cor azul – somente restrições laterais impostas; cor verde – livre das restrições

Tabela 1: Distribuição das tensões residuais da chapa soldada com arame simples, em MPa

N	Direção longitudinal			Direção transversal		
	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
01	-30	-20	-10	+90	+130	0
02	0	+20	+5	+160	+160	+10
03	+10	+20	-10	+150	+150	0
04	+60	+20	+5	+220	+220	+10
05	+60	+60	0	+200	+200	+5
06	+90	+100	+10	+220	+220	+10
07	---	+40	+30	---	+210	+10
08	---	+40	+20	--	+200	0
09	+110	+120	-80	+210	+220	+10
10	+190	+70	-70	+250	+280	+50
MB	+270	+230	+140	---	---	+120
ZTA	+350	+300	+270	---	---	+120
MS	+550	+470	+350	---	---	+180

Figuras 13 e 14 e Tabela 2 apresentam os resultados das medições das tensões residuais nas direções longitudinal e transversal, respectivamente, para chapas soldadas com arame duplo com todas as restrições impostas (Etapa 1), somente com restrições internas retiradas (Etapa 2) e para chapa livre das restrições (Etapa 3). Sinal “-” significa tensão de compressão, sinal “+” significa tensão de tração. Observa-se que ao contrário da distribuição no caso do arame simples, com todas as restrições impostas, o valor máximo das tensões residuais está no metal de base próximo ao cordão de solda, enquanto no próprio cordão de solda tanto tensões longitudinais, como transversais, são próximas de zero. O relaxamento da tensão longitudinal no metal de base próximo ao cordão de solda resulta no crescimento das tensões no metal de solda.

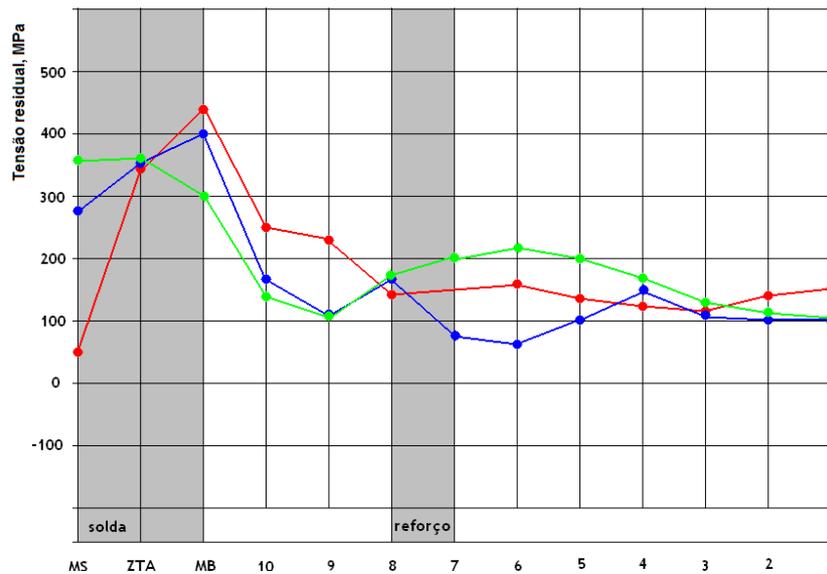


Fig. 13: Arame duplo. Tensões residuais longitudinais: cor vermelha – todas as restrições impostas, cor azul – somente restrições laterais impostas, cor verde – livre das restrições

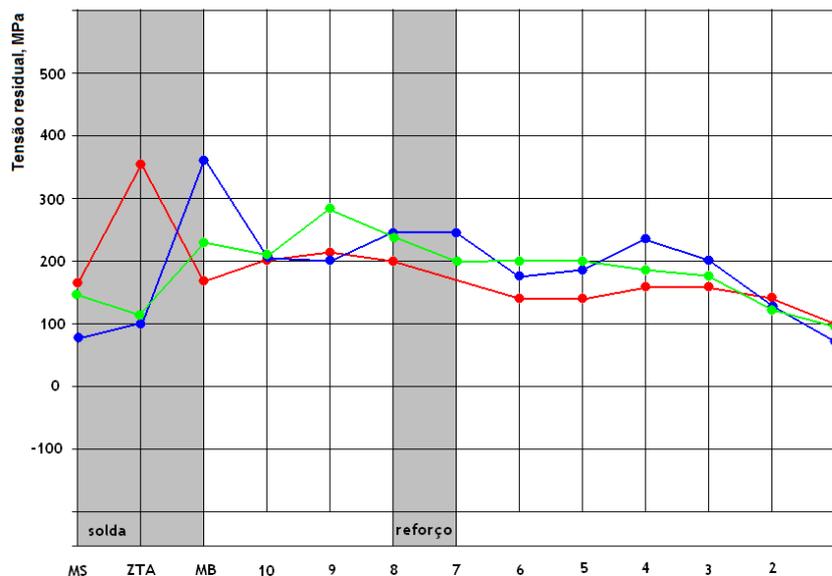


Fig. 14: Arame duplo. Tensões residuais transversais: cor vermelha – todas as restrições impostas, cor azul – somente restrições laterais impostas, cor verde – livre das restrições

Tabela 2: Distribuição das tensões residuais da chapa soldada com arame duplo, em MPa

N	Direção longitudinal			Direção transversal		
	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
01	+150	+100	+100	+100	+70	+100
02	+140	+100	+110	+140	+130	+130
03	+115	+110	+130	+160	+200	+180
04	+120	+150	+170	+160	+230	+190
05	+140	+100	+200	+130	+190	+200
06	+160	+70	+210	+130	+180	+200
07	---	+80	+200	---	+250	+200
08	+140	+170	+170	+200	+250	+240
09	+230	+110	+110	+210	+200	+280
10	+250	+170	+140	+200	+200	+200
MB	+430	+400	+300	+170	+360	+230
ZTA	+340	+350	+360	+350	+100	+110
MS	+50	+280	+360	+170	+80	+150

Observa-se que no caso das tensões residuais longitudinais, os perfis da distribuição, sendo inicialmente bem diferentes, Figura 15, após a retirada das restrições ficam parecidos, Figura 16. Porém, a maneira como as tensões chegam até esta distribuição não é a mesma. No caso do arame simples os valores das tensões longitudinais diminuem de maneira monótona, enquanto no caso do arame duplo a diminuição das tensões no metal de base provoca redistribuição das tensões e seu crescimento no metal de solda.

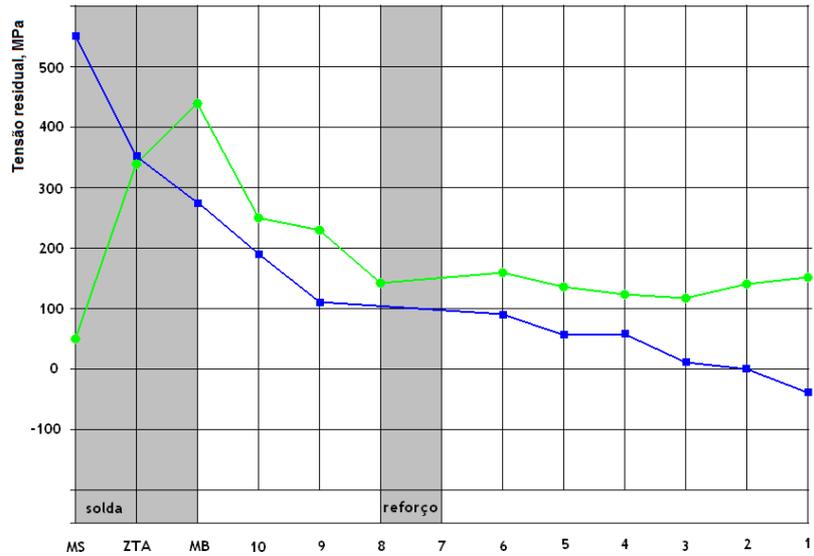


Fig. 15: Tensões residuais longitudinais depois da soldagem com todas as restrições impostas: arame simples (cor azul) e arame duplo (cor verde)

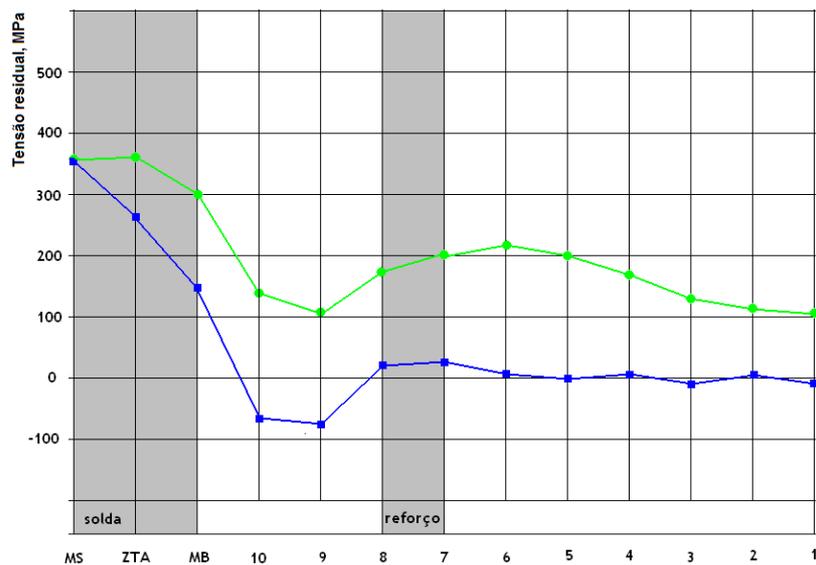


Fig. 16: Tensões residuais longitudinais depois da soldagem livre das restrições: arame simples (cor azul) e arame duplo (cor verde)

A amplitude (variação) das tensões residuais após a retirada das restrições é significativamente mais elevada no caso do arame simples, ficando em torno de 430MPa para tensões longitudinais e 250MPa para arame duplo, embora os valores das tensões residuais no segundo caso sejam mais elevados em comparação com o primeiro.

Este resultado explica o fato das distorções das chapas soldadas com arame duplo serem menores do que no caso do arame simples, pois com uma distribuição não-uniforme de tensões e de menor amplitude as forças internas não foram transformadas em distorções como na solda de arame simples, onde as distorções são maiores e as tensões são mais uniformes e menores.

O mesmo comportamento pode ser observado para os resultados das tensões transversais vistos nas Figuras 17 e 18, onde após a liberação das restrições somente as tensões do caso simples são aliviadas com conseqüente aumento das distorções.

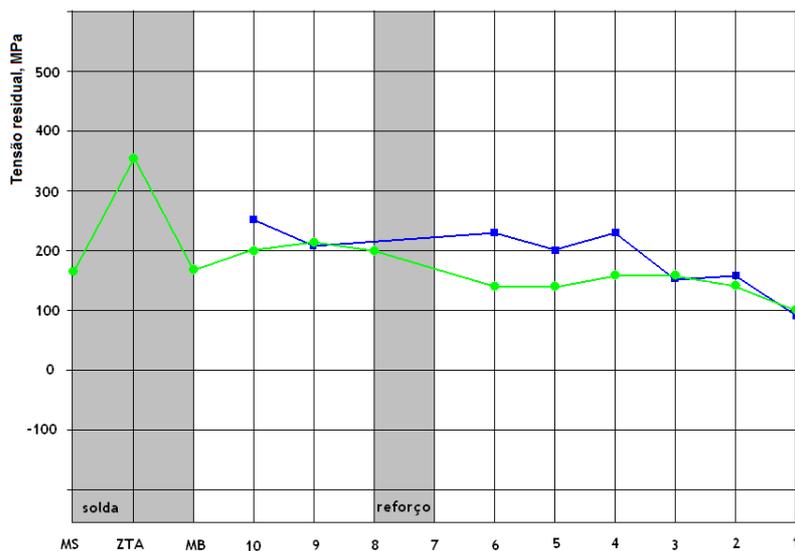


Fig. 17: Tensões residuais transversais depois da soldagem com todas as restrições impostas: arame simples (cor azul) e arame duplo (cor verde)

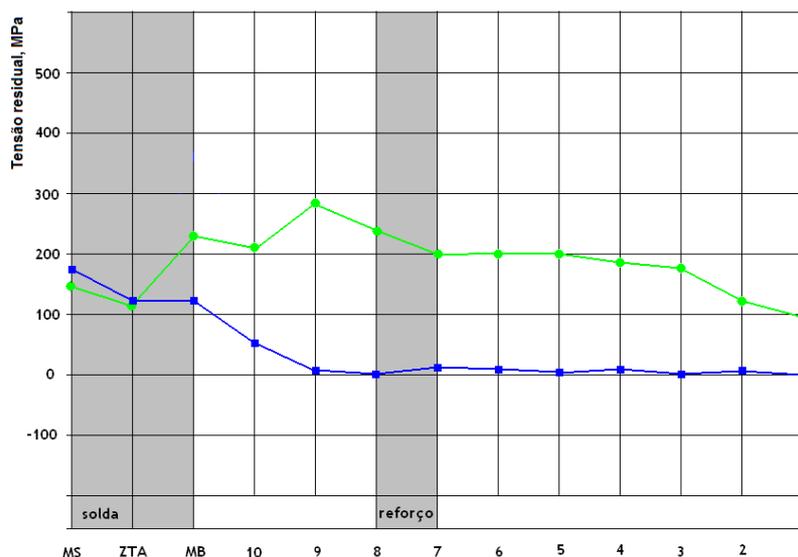


Fig. 18: Tensões residuais transversais depois da soldagem livre das restrições: arame simples (cor azul) e arame duplo (cor verde)

5. Conclusão

O conhecimento das tensões residuais no metal de solda, ZTA e no metal de base próximo ao cordão de solda é fundamental para caracterizar o estado das tensões típico para diferentes processos de soldagem. Uso do método de difração de raios-X com equipamento portátil RAYSTRESS® permite realizar este tipo de medições, de maneira não destrutiva tanto no laboratório quanto em condições de campo. Acompanhamento da evolução do estado das tensões residuais durante o processo de soldagem permite observar as tendências na redistribuição das tensões com relaxamento das restrições, indicando as áreas críticas de concentração das tensões.

Observa-se que a tensão pós-solda na direção longitudinal do metal depositado (cordão de solda), no caso da soldagem com arame duplo, é próxima a zero para a chapa completamente restrita, enquanto este valor é bem mais elevado no caso do método da soldagem com arame simples.

Os valores finais das tensões transversais e longitudinais no metal depositado (cordão de solda), para a chapa livre de restrições, são praticamente iguais para ambos os casos de soldagem examinados. O fato das tensões no metal de solda, no caso do arame duplo, chegar ao nível das tensões do arame simples, explica-se pela redistribuição das tensões na ZTA e no metal de base próximo ao cordão de solda.

A distribuição final das tensões longitudinais, após da retirada de todas as restrições, é similar para ambos os casos. Os valores das tensões para as chapas soldadas com arame duplo são maiores do que no caso da solda com arame simples. A diferença entre os dois casos é de no mínimo 50MPa e no máximo 200MPa. Esta diferença está associada às distorções finais das chapas, sendo maiores para o caso de arame simples em que ocorreu significativa relaxação das tensões após liberação das restrições. As altas tensões transversais e longitudinais finais das chapas soldadas por arame duplo estão associadas à menores distorções medidas nas chapas.

6. Referências

1. MACHERAUCH, E., WOHLFAHRT, H., "Different sources of residual stress as a result of welding". In: **Proceedings of the International Conference on Residual Stress in Welded Construction and their Effects**, pp. 267-282, London, 15-17 Nov. 1977.
2. MACHERAUCH, E., KLOOS, K.H., Origin, measurement and evaluation of residual stresses. In: **Proceedings of the International Conference on Residual Stress**, pp. 3-26, Germany, 1986.
3. OKERBLOM, N.O. **Welding Strains and Stresses. Theory and its Application**. MTM-USSR, State Scientific-Technical Publishing of Engineering Literature, Moscow, Leningrad, 1948, 252 P.
4. CHO, J.R. et al., "Investigation of residual stress and post weld heat treatment of multi-pass welds by finite element method and experiments", **Journal of Materials Processing Technology**, (2004), 155-156, pp. 1690-1693.
5. LAW, M., PRASK, H. LUZIN, V. and GNAEUPEL-HEROLD, T. "Residual Stress Measurements in Coil, Linepipe and Girth Welded Pipe", **Material Science and Engineering**, A 437, (2006), 60-63.
6. MOCHIZUKI, M. "Control of welding residual stress for ensuring integrity against fatigue and stress-corrosion cracking", **Nuclear Engineering and Design**, (2007), 237, pp. 107-123.

7. PARADOWSKA, A. et al., "Investigation of reference sample for residual strain measurements in a welded specimen by neutron and synchrotron X-ray diffraction", **Physica B**, (2006), 385-386, pp. 904-907.
8. PFEIFFER, W. "Residual stress in heavy wall weldments", **Intn. Symp. "Safety in Application of High Strength Steel"**, Trondheim, 1-2 July, 1997.
9. LINDGREN, Lars-Erik "Finite element modeling and simulation of welding", **Journal of Thermal Stresses**, Volume 24, Issue 4, (2001), pp. 305-334.
10. MOLLICONE, P., CAMILLERI, D., GRAY, T.G.F. and COMLEKCI, T. "Simple thermo-elastic-plastic models for welding distortion simulation", **Journal of Materials Processing Technology**. 176 (2006), pp. 77-86.
11. VIEIRA, D.L., SILVA, B.M, MONIN, V., GUROVA, T., LEONTIEV, A. "Nova técnica de avaliação do estado das tensões de soldagem". **CONAEND&IEV2008 – Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivo e Inspeção & Conferência Internacional sobre Evaluación de Integridad y Extensión de Vida de Equipos Industriales**, São Paulo, junho de 2008.
12. MONIN, V.I., TEODOSIO, J.R. and GUROVA, T. "A portable X-ray apparatus for both stress measurements and phase analysis under field conditions", **Advances in X-ray Analysis**, 43 (2000), pp. 66-71.
13. NOYAN, I.S. and COHEN, J.B., **Residual Stress Measurement by Diffraction and Interpretation**, Springer Verlag, New York, Berlin. 1987.