

# Redistribuição das Tensões Residuais de Soldagem

Tetyana Gurova, Segen F. Estefen  
Laboratório de Tecnologia Submarina,  
COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
Rio de Janeiro, Brasil  
e  
Anatoli Leontiev  
Instituto de Matemática,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
Rio de Janeiro, Brasil

**Resumo** – Neste trabalho foi estudada a evolução das tensões residuais nas chapas navais após o procedimento de soldagem de topo. Foram avaliados dois tipos diferentes de soldagem, com eletrodo simples e com eletrodo duplo. Distribuições das tensões residuais foram monitoradas durante duas semanas após soldagem. As tensões residuais foram medidas no metal depositado, na área ZTA e no metal base próximo ao cordão de solda, ao longo das chapas soldadas utilizando o método de difração de raios-X. Os resultados experimentais mostram processo contínuo de redistribuição das tensões residuais de soldagem durante relativamente curto intervalo de tempo, com diferença significativa entre a distribuição inicial após a remoção dos gabaritos de soldagem e sua distribuição final, duas semanas depois, para ambos os processos de soldagem. Redistribuição das tensões residuais é caracterizada pela redução e uniformidade dos valores da tensão cisalhante máxima e diminuição do seu fator de concentração. Análise microestrutural descarta a possibilidade desta redistribuição das tensões residuais ser resultado de falha do material, o que indica um novo efeito sobre o comportamento das tensões residuais de soldagem ainda não relatado na literatura.

## I. INTRODUÇÃO

Entre as fontes de tensões residuais de soldagem distinguem contração no resfriamento de regiões diferentemente aquecidas e plastificadas durante a operação de soldagem, resfriamento superficial mais intenso e transformação de fase, sendo assim, o estado das tensões residuais provenientes da soldagem é de natureza complexa, [1]. Mesmo se tratando de uma estrutura soldada relativamente simples, existem várias fatores que influem na distribuição das tensões residuais de soldagem. Entre eles estão tensões residuais presentes antes da soldagem, propriedades do material de base e do material depositado, geometria dos elementos soldados, restrições aplicadas durante a soldagem, o próprio processo de soldagem, incluindo preparação das partes a serem

soldadas, condições e seqüência dos passos de soldagem, tensões residuais provenientes das operações de pós-soldagem ou do processo de resfriamento. Os recentes estudos mostram, por exemplo, que tensões residuais de soldagem dependem fortemente do procedimento de aplicação das restrições durante operação de soldagem, especialmente do tempo de fixação, momento da sua remoção e da sua geometria, [2].

Além dos métodos experimentais tradicionalmente utilizados para análise das tensões através das diferentes técnicas destrutivas e não destrutivas, com avanço computacional das últimas décadas, surgiu um grande número das simulações numéricas nesta área, [3]–[5]. Porém, vários autores reconhecem que sempre existe certa discordância quando os resultados da simulação numérica são confrontados com resultados experimentais [3], [6]. Observamos que os autores dos trabalhos experimentais sobre medição das tensões de soldagem não especificam período de tempo desde o término do processo de soldagem e resfriamento da peça até o momento de realização das medições. Por outro lado, os resultados da simulação numérica das tensões de soldagem sempre são relacionados ao momento do resfriamento da peça e remoção das restrições de soldagem. Desta maneira os autores que compararam os resultados da simulação numérica com resultados das medições experimentais provavelmente suponham que a distribuição das tensões de soldagem não sofre nenhuma variação desde o término do processo da soldagem.

Neste trabalho através do método de difração de raios-X foi analisada a evolução das tensões residuais induzidos por dois tipos de soldagem de topo, especificamente GMAW semi-automático com eletrodo simples e GMAW automático com eletrodo duplo. Os resultados mostram que dentro de duas semanas após a soldagem, num período de tempo considerado relativamente curto do ponto de

vista da fabricação industrial, observa-se uma variação significativa na distribuição das tensões residuais de soldagem.

## II. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS

Nos testes foram utilizadas as chapas de aço carbono ASTM A131 grade A. Limite de escoamento do material das chapas é de 235 MPa. Em cada teste duas chapas do tamanho 1200 x 500 x 19 mm e chanfro com ângulo 20°, foram unidas com solda de topo. Durante procedimento de soldagem as chapas foram posicionadas numa mesa de gabarito e fixadas ao longo do perímetro. Em todos os testes as restrições impostas durante soldagem foram retiradas no dia seguinte da soldagem. O primeiro par de chapas foi unido utilizando processo de soldagem MIG com eletrodo simples. Para soldar o segundo par de chapas foi aplicado o processo MIG automatizado com eletrodo duplo. Em ambos os casos foi utilizado eletrodo com diâmetro 1.2 mm da marca Supercored 70NS, cujas características correspondem à especificação AWS A5.18/ASME SFA 5.18 E70C-6M. O limite de escoamento do material depositado é de 440 MPa.

Os valores absolutos das tensões residuais foram medidas com equipamento portátil de raios-X RAYSTRESS que utiliza o método de dupla exposição e radiação  $K\alpha$  do Cr, [7]. Esta técnica de medição foi amplamente testada e utilizada com sucesso durante vários anos em diferentes aplicações industriais [8–11].



Fig. 1. RAYSTRESS:  
Equipamento portátil de raios-X para medição de tensões mecânicas.

As seguintes partes são incluídas como componentes deste equipamento, Fig. 1: 1 – Unidade de controle com fonte de alta tensão, que permite monitoramento e o ajuste do nível de potência de alimentação do tubo de raios-X; 2 – Fonte de alta tensão e tubo de raios-X. Uma das qualidades do equipamento é que o tubo de raios-X é acoplado à fonte de alta tensão. A tensão e a corrente de trabalho da fonte de raios-X é de 25 kV e 1,5 mA, respectivamente. O tubo de raios-X possui dois anodos de cromo com resfriamento ao ar, e produz dois feixes convergentes de raios-X para realizar a técnica de duas

exposições de medição de tensões por raios-X. O ângulo de convergência dos feixes de raios-X é de 50°; 3 – O suporte magnético permite instalar o equipamento diretamente na peça analisada e ajustar o equipamento na posição de exposição; 4 – O colimador com cassete para filme de raios-X. Duas janelas no cassete permitem captar partes das linhas difratadas no intervalo angular de  $2\theta$  de 148° a 164°.

## III. RESULTADOS DE MEDIÇÃO DAS TENSÕES

Para cada par das chapas soldadas as medições das tensões residuais por método de raios-X foram feitas nos pontos localizados no meio de uma das chapas, numa linha perpendicular ao cordão de solda na superfície frontal. A distância entre os quatro pontos (1, 2, 3 e 4) de medições no metal base foi escolhida com passo variável de 50, 100 e 150 mm, respectivamente. As medições foram realizadas também no metal depositado (ponto WM), ZTA (ponto HAZ) e metal base próximo ao cordão de solda (ponto BM), todos localizados na mesma linha. Distância entre ponto HAZ e ponto BM e distância entre ponto BM e ponto 1 são de 10 mm, Fig. 2. Em cada ponto as tensões foram medidas na direção paralela ao cordão de solda (tensão longitudinal  $\sigma_L$ ) e na direção perpendicular ao cordão de solda (tensão transversal  $\sigma_T$ ).

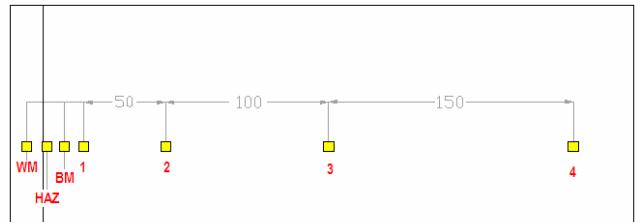


Fig. 2. Localização dos pontos das medições.

Polimento eletrolítico com profundidade 0.2 mm foi aplicado nos pontos de medição para garantir a ausência das tensões mecânicas induzidas na superfície da chapa durante processo de fabricação, assim como para identificar localização e limites da ZTA. Para análise de raios-X foi utilizado plano difratante {211} de ferrita. Constantes elásticas foram obtidas de referência [12]. Foi utilizado o feixe de raios-X com sessão 0.5 x 6 mm. Medições adicionais das tensões em diferentes pontos das chapas em direções arbitrárias mostraram a presença das tensões uniformes de tração com valores entre 20 e 40 MPa, cuja origem pode ser relacionada ao tratamento termo-mecânico durante a fabricação das chapas.

Medições por método de raios-X foram feitas em três situações: no dia seguinte da soldagem com chapa ainda presa na mesa de gabarito (no mesmo dia, logo depois das

medições, as chapas foram soltas), em dois dias, e posteriormente, em duas semanas após soldagem.

O quadro mais completo da evolução das tensões de soldagem apresenta distribuição dos valores da tensão cisalhante máxima. Medições adicionais na direção de 45 graus com relação às direções de medição das tensões longitudinal e transversal em cada dos pontos analisados mostraram que os valores das tensões  $\sigma_L$  e  $\sigma_T$  são valores principais para os pontos próximos ao cordão de solda e que para resto dos pontos no metal base os valores  $\sigma_L$  e  $\sigma_T$  são bastante próximos aos valores das tensões principais.

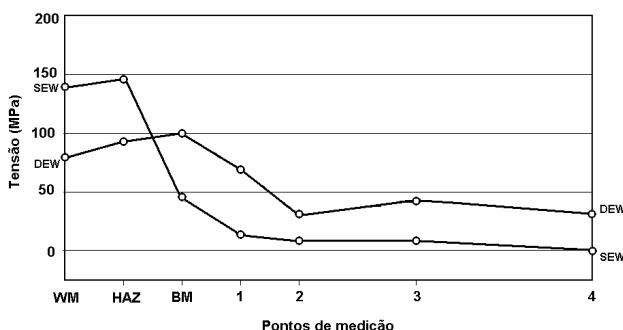


Fig. 3. Valores absolutos da tensão cisalhante máxima para chapas soldadas com eletrodo simples (SEW) e eletrodo duplo (DEW) dois dias após a soldagem.

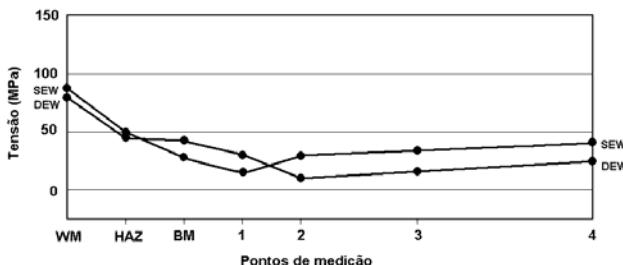


Fig. 4. Valores absolutos da tensão cisalhante máxima para chapas soldadas com eletrodo simples (SEW) e eletrodo duplo (DEW) duas semanas após a soldagem.

Período de observação de duas semanas foi escolhido experimentalmente, pois corresponde ao período de relaxamento das tensões para chapas soldadas com solda simples e solda dupla. Não podemos afirmar que este prazo é o mínimo necessário para o fenômeno observado. Porém neste período é observada uma variação significativa na redistribuição das tensões de soldagem. Para chapas soldadas com eletrodo simples e eletrodo duplo observa-se após duas semanas uma distribuição similar dos valores absolutos da tensão cisalhante máxima, embora esta distribuição em dois dias não apresentasse semelhanças, Figs. 3 e 4.

O quadro da evolução das tensões residuais para chapas soldadas com eletrodo simples e eletrodo duplo é

caracterizado pela diminuição e uniformidade dos valores das tensões. Por esta razão associamos este comportamento com o relaxamento das tensões de soldagem.

#### IV. ENSAIOS METALOGRÁFICOS

Para descartar a possibilidade do observado relaxamento das tensões para chapas soldadas, com eletrodo simples e eletrodo duplo, ser o resultado de alguma falha (trincamento) do material, foi realizada análise metalográfica. Amostras de tamanho 10 x 60 x 19 mm compostas por metal base e metal depositado foram retiradas na direção transversal ao cordão de solda do local onde foram realizadas as medições das tensões. Polimento mecânico e ataque por Nital 2% foram aplicados para revelar a microestrutura. Observações foram feitas utilizando microscópio óptico convencional.

Fig. 5-A mostra a microestrutura do metal depositado no caso da solda com eletrodo simples. Microestrutura é refinada, contendo perlita e partículas dispersas de cementita em matriz ferrítica. Essa microestrutura é resultado da recristalização do metal depositado promovida pelo passe subsequente.

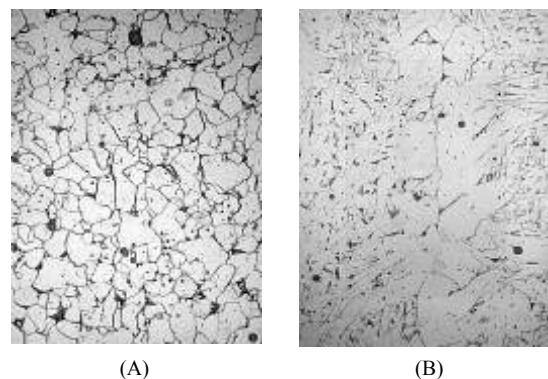


Fig. 5. Microestrutura do metal depositado. A - Solda com eletrodo simples. B - Solda com eletrodo duplo (direita). Amplificação original x200.

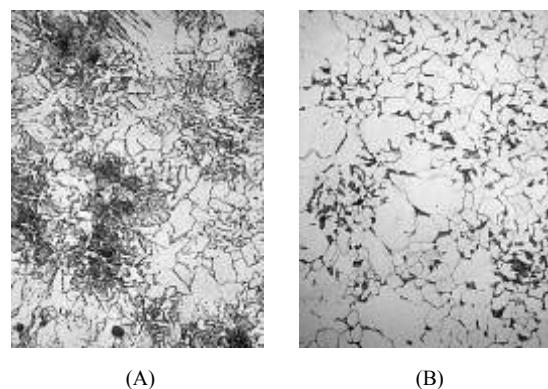


Fig. 6. Microestrutura da ZTA. (A) - Solda com eletrodo simples. (B) - Solda com eletrodo duplo. Amplificação original x100.

Fig. 5-B apresenta a microestrutura do metal depositado no cordão de acabamento para solda com eletrodo duplo. Microestrutura constituída por ferrita em arranjo dendrítico colunar, contendo partículas de carboneto. Amplificação da imagem original é de 200 vezes. Fig. 6-A apresenta a microestrutura da ZTA próxima ao cordão de acabamento no caso da solda com eletrodo simples. Microestrutura normal, constituída por matriz ferrítica e cementita em arranjo celular. Na Fig. 6-B temos a microestrutura da ZTA próxima ao cordão de acabamento para solda com eletrodo duplo. Amplificação da imagem original é de 100 vezes. A microestrutura do metal de base das amostras soldadas com eletrodo simples e eletrodo duplo é usual para uma chapa de aço carbono estrutural, constituída por ferrita, grãos claros, e perlita. Tamanho de grão ASTM 8.

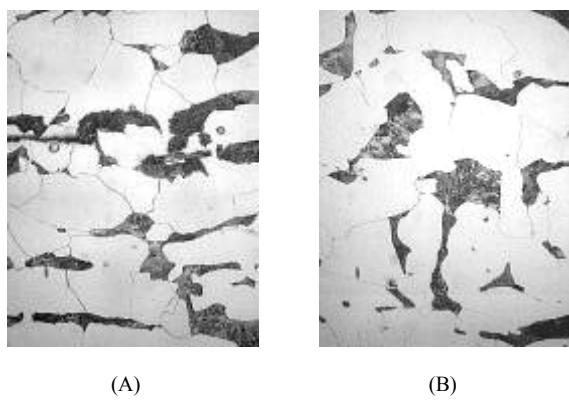


Fig. 7. Microestrutura do metal de base. (A) – Solda com eletrodo simples. (B) – Solda com eletrodo duplo. Amplificação original x100

Exemplo desta estrutura está aposentado na Fig. 7-A para chapa soldada com eletrodo simples e na Fig. 7-B para chapas soldada com eletrodo duplo. Amplificação da imagem original é de 100 vezes.

Análise microestrutural mostra a ausência de microtrincas no metal depositado, ZTA e metal base próximo ao cordão de solda. Isso descarta a possibilidade de observado efeito de relaxamento das tensões para solda com eletrodo simples e solda com eletrodo duplo ser o resultado de falha do material.

## V. CONCLUSÕES

1. Os resultados experimentais obtidos mostram que a distribuição dos valores das tensões de soldagem varia significativamente dentro do período de duas semanas, desde o momento da soldagem, o fato até então não relatado na literatura.

2. Estado final das tensões para solda com eletrodo simples e eletrodo duplo é caracterizado pela distribuição mais uniforme da tensão cisalhante máxima e valores absolutos menores, quando comparados com os mesmos logo após a remoção das restrições de soldagem.

3. Observada variação das tensões após o término do processo da soldagem indica a necessidade de especificar nos resultados experimentais de análise das tensões de soldagem o período de tempo entre a execução da operação de soldagem e a realização das medições.

4. Para efeito de comparação dos resultados de simulação computacional com resultados experimentais, o fenômeno de evolução das tensões após execução do processo da soldagem deve ser incluído nos modelos numéricos.

## AGRADECIMENTOS

Apoio financeiro: CNPq (projetos 302531/2009-2 (S.F. Estefen) e 305338/2009-9 (A. Leontiev)); FINEP (contrato 0582/10), TRANSPETRO/PETROBRAS. Apoio tecnológico e operacional: White Martins S.A., Equipe técnica do Laboratório da Tecnologia Submarina COPPE - UFRJ

## REFERÊNCIAS

- [1] E. Macherauch, and H. Wohlfahrt, "Different sources of residual stress as a result of welding", In: Nichols RW, editor. Residual Stress in Welded Construction and Their Effects: *An international conference*, 1977 Nov 15-17, London, Cambridge, Welding Institute, pp. 267-282, 1978-1979.
- [2] T. Schenk, I.M. Richardson, M. Kraska, and S. Ohnimus, "A study on the influence of clamping on welding distortion", *Comput. Mater. Sci.*, vol.145, pp. 999–1005, 2009.
- [3] S.F. Estefen, T. Gurova, X. Castello, and A. Leontiev, Surface residual stress evaluation in double-electrode butt welded steel plate. *Mater Des.* vol. 31, pp. 1622–27, 2010.
- [4] A.M. Paradowska, J.W.H. Price, T.R. Finlayson, U. Lienert, P. Walls, and R. Ibrahim, "Residual stress distribution in steel butt welds measured using neutron and synchrotron diffraction", *J. Phys: Condens. Matter.* Vol. 21, 2009, doi: 10.1088/0953-8984/21/12/124213.
- [5] D. Deng, and H. Murakawa, "Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint", *Comput. Mater. Sci.*, vol. 43, pp. 353-365, 2008.
- [6] A. Aloraeer, A. Al-Mazrouee, J.W.H. Price, and T. Shehata, "Weld repair practices without post weld heat treatment for ferritic alloys and their consequences on residual stresses: A review", *Int. J. Pressure Vessels and Piping*, vol. 87, pp. 127-133, 2010.
- [7] V. Monin, J.R. Teodosio, and T. Gurova, "A portable X-ray apparatus for both stress measurements and phase analysis under field conditions", *Adv. X-ray Anal.*, vol. 43, pp. 66-71, 2000.
- [8] T. Gurova, J.R.Todosio, J.M. Rebello, and V. Monin, "Model for the variation of the residual stress state during plastic deformation under uniaxial tension", *J. Strain and Eng. Des.*, vol. 33, pp. 367-72, 1998.
- [9] V. Monin, J.R. Teodosio, T. Gurova, and J. Assis, "X-ray study of the inhomogeneity of surface residual stresses after shot-peening treatment", *Adv. X-ray Anal.*, vol. 43, pp. 48-53, 2000.
- [10] V. Monin, J.R. Teodosio, and T. Gurova, "Study and service control of stress state of high-strength steel cables used in prestressed concrete structures", *Adv. X-ray Anal.*, vol. 44, pp. 195-200, 2001.
- [11] V. Monin, J.R. Teodosio, and T. Gurova, "Analysis of residual stress state in speed gears for automotive vehicles", *Adv. X-ray Anal.*, vol. 44, pp. 187-94, 2001.
- [12] V. Hauk, *Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods. Evaluation – Application – Assessment*. Amsterdam: Elsevier Science, 1997.