



12ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos

**COTEQ2013 – 012**

**EVOLUÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS E DISTORÇÕES GEOMÉTRICAS  
DOS PAINÉIS NAVAIS SOLDADOS**

Segen F. Estefen<sup>1</sup>, Tetyana Gurova<sup>2</sup>, Anatoli Leontiev<sup>3</sup>, John Chujutali<sup>4</sup>,  
Giancarlo F.S. Chavez<sup>4</sup>

*Copyright 2013, ABENDI, ABRACO e IBP.*

*Trabalho apresentado durante a 12ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos.  
As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade  
dos autores..*

**SINOPSE**

---

Uma das primeiras operações tecnológicas na construção naval consiste na fabricação dos painéis navais através da junção de topo das chapas, realizada por soldagem. O surgimento das distorções geométricas dos painéis, indesejáveis para posterior uso destes na fabricação e montagem de sub-blocos, é relacionado às tensões residuais de soldagem. Recentemente nos nossos trabalhos foi relatado o efeito de redistribuição das tensões residuais de soldagem dentro de um curto, do ponto de vista tecnológico, período de tempo. Este efeito consiste no decaimento com tempo do valor da tensão efetiva (de von Mises) numa área próxima ao cordão de solda. No presente trabalho nós continuamos o estudo deste fenômeno realizando o monitoramento diário das tensões residuais de soldagem, acompanhado da medição das distorções geométricas da superfície das chapas soldadas. A soldagem das chapas foi realizada com arame tubular e o monitoramento e medição dos valores absolutos das tensões foram realizados pelo método magnético e de difração de raios-X, para medição das distorções geométricas foi utilizado equipamento mecanizado. Nós apresentamos resultados de evolução das tensões residuais e deformações das chapas soldadas monitoradas durante primeiros cinco dias após a remoção das restrições de soldagem, e posteriormente, no período de um mês.

---

1 Doutor, Professor – LTS – COPPE – UFRJ

2 Doutora, Engenheira Metalúrgica e Professora – Curso de Construção Naval – UEZO

3 Doutor, Professor – IM – UFRJ

4 Aluno do doutorado – COPPE – UFRJ

## 1. INTRODUÇÃO

---

Uma das primeiras operações tecnológicas na construção naval consiste na fabricação dos painéis navais através da junção de topo das chapas, realizada por soldagem. O surgimento das distorções geométricas dos painéis, indesejáveis para posterior uso destes na fabricação e montagem de sub-blocos, é relacionado às tensões residuais de soldagem, Fig. 1.



Fig. 1: Processo de soldagem das chapas navais (à esquerda) e painéis navais soldados na linha de produção (à direita). Foto: Tetyana Gurova

Entre as fontes de tensões residuais de soldagem distinguem a contração no resfriamento de regiões diferentemente aquecidas e plastificadas durante a operação de soldagem, o resfriamento superficial mais intenso e a 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 influenciam 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 a 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 de 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 o 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 comparam os resultados da simulação numérica com resultados das medições experimentais provavelmente supunham que a

distribuição das tensões de soldagem não sofre nenhuma variação desde o término do processo da soldagem.

Recentemente nos nossos trabalhos foi relatado o efeito de redistribuição das tensões residuais de soldagem dentro de um curto, do ponto de vista tecnológico, período de tempo, ver (7 – 9). Este efeito consiste no decaimento com o tempo do valor da tensão efetiva (de von Mises) numa área próxima ao cordão de solda. A análise microestrutural realizada descarta a possibilidade do relaxamento das tensões ser resultado de falha do material.

No presente trabalho nós continuamos o estudo deste fenômeno realizando monitoramento diário das tensões residuais de soldagem, acompanhado de medição dos deslocamentos verticais da superfície das chapas soldadas.

## **2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL, EQUIPAMENTOS E SOFTWARE**

Nos testes foram utilizadas chapas de aço carbono DH-36. Duas chapas do tamanho 1200 x 500 x 19 mm e chanfro com ângulo 20° foram unidas ao longo do seu lado de comprimento maior com solda de topo, utilizando soldagem com arame tubular E71T-1 de diâmetro 1.2mm. Foram realizados sete passes de solda, com corrente 180A (CC+), voltagem 28,2V, com velocidade de alimentação de arame de 6,1m/min, utilizando argônio com gás de proteção, com vazão 13L/min. Os dados da velocidade de soldagem se encontram em Tabela 1. Durante o procedimento de soldagem as chapas foram posicionadas numa mesa de gabarito e fixadas ao longo do perímetro. As restrições impostas durante soldagem foram retiradas no dia seguinte da soldagem.

Tabela 1. Velocidade de soldagem

Velocidade de Soldagem [cm/min]							ACABAMENTO	
CAMADA no. /CORDAO no.	A	B	C	D	E	F	G	
1	20,0	18,5	14,5	16,5	21,9	37,4	44,0	
2	21,5	28,0	17,3	16,4	20,5	19,4	46,9	
3	21,0	21,0	16,0	14,8	17,1	28,9	36,4	
4			14,7	14,5	20,8	51,4	32,6	
5				11,5	22,8	33,3	38,7	
6				12,0	17,0		45,8	
7					17,5		51,6	
8					18,0		45,4	
9							38,5	

Os valores absolutos das tensões residuais foram medidas com equipamento portátil de raios-X RAYSTRESS que utiliza o método de dupla exposição. Para mapeamento do estado das tensões foi utilizado equipamento magnético portátil, que emprega o efeito inverso de magnetostrição, com sensor magneto-anisotrópico. Os deslocamentos das superfícies das chapas soldadas foram medidas com equipamento FARO ARM, Fig. 2, junto com um software para a aquisição dos dados. O FARO ARM é um braço articulado de medição portátil, em que os valores medidos são obtidos através do

contato da ponta da extremidade do braço com a superfície da chapa. Os dados da posição geométrica dos pontos da superfície da chapa são recolhidos pelo braço e coletados numa nuvem de pontos tridimensionais, utilizando o programa FARO CAM2 MEASURE. Para aproximar a nuvem de pontos obtidos nas medições das distorções das chapas pós-soldagem foi utilizado o pacote computacional MATLAB. A posição da superfície foi definida mediante um ajuste de curvas a um polinômio de grau dois pelo método de mínimos quadrados, utilizando a ferramenta SFTOOLS – SURFACE FITTING TOOLS.

As medições das tensões residuais pelo 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 MS), zona termicamente afetada (ponto ZTA) e metal base próximo ao cordão de solda (ponto MB), todos localizados na mesma linha. Distância entre ponto ZTA e ponto MB e distância entre ponto MB e ponto 1 são de 10 mm. Em cada ponto as tensões foram medidas na direção paralela ao cordão de solda (tensão longitudinal  $\sigma_L$ ), na direção perpendicular ao cordão de solda (tensão transversal  $\sigma_T$ ) e na direção diagonal as duas primeiras (tensão  $\sigma_{45}$ ).



Fig. 2: Medição dos deslocamentos verticais da superfície das chapas soldadas com equipamento FARO ARM (a esquerda) e mapeamento das tensões residuais com equipamento magnético (a direita)

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 (11). Foi utilizado o feixe de raios-X com sessão 0.5 x 6 mm.

Mapeamento das tensões através do método magnético foi realizado numa área de tamanho 90 x 45 mm em 190 pontos da malha retangular com passo uniforme de 5 mm. Área das medições foi centralizada pelo seu lado maior com relação ao cordão de solda e pelo seu lado menor com relação à linha do meio da chapa perpendicular ao cordão de solda. O resultado das medições é apresentado na forma de mapa de distribuição do fator de concentração da tensão cisalhante máxima. As medições foram feitas sobre área composta dos materiais com diferentes propriedades mecânicas e magnéticas (especificamente metal base, metal depositado e ZTA). Por esta razão os resultados destes mapeamentos têm caráter relativo para cada das partes da área mapeada. Além disso, mapeamento magnético envolve mais pontos de análise do que medições feitas por raios-X. E, finalmente, o método magnético representa um valor médio na profundidade de até 3 mm sob a superfície, enquanto os resultados das medições por método de raios-X representam os valores superficiais absolutos das tensões. Sendo assim, os resultados de mapeamento foram utilizados somente para comparar entre si a evolução das tensões com o tempo.

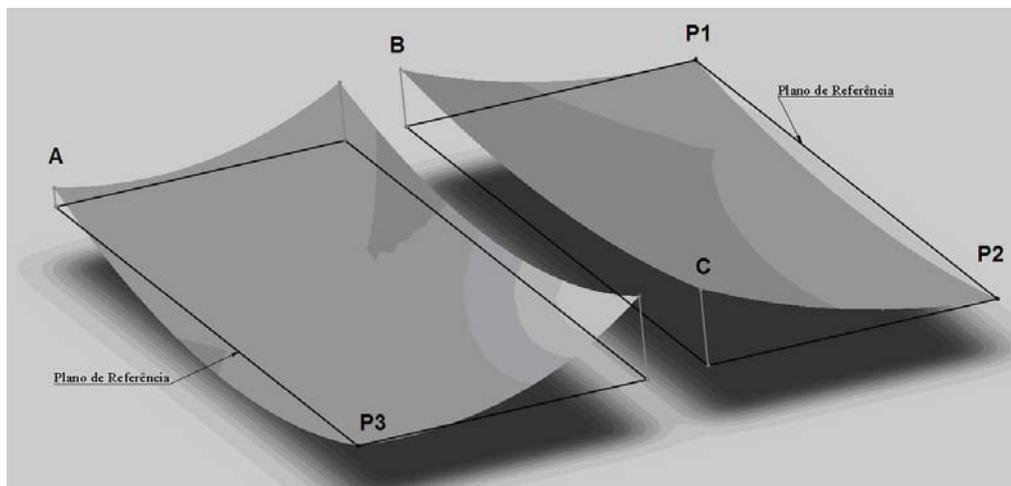


Fig. 3: Plano de referência e posição dos pontos de controle A, B e C

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

---

Para observar os deslocamentos verticais da superfície da chapa foi escolhido um plano de referência dos pontos P1, P2 e P3, como se indica na Fig. 3, e calculada a distância dos pontos de controle A, B e C até o plano. Fig. 4 representa resultados de medição dos deslocamentos verticais dos pontos A, B e C da chapa soldada, relativos aos seus valores medidos logo após remoção das restrições de soldagem (1º dia de monitoramento) e durante quatro dias seguidos (2º, 3º, 4º e 5º dia). Observam-se variações destes valores durante todos os cinco dias, com magnitude de até 4mm e posterior diminuição destas variações com o tempo.

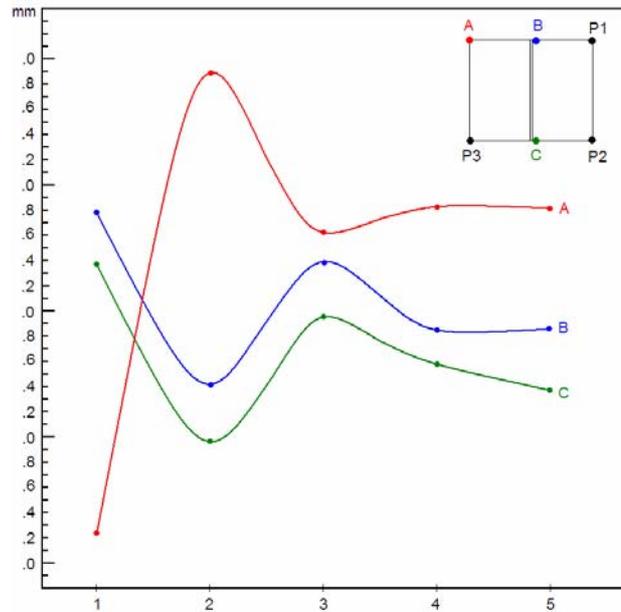


Fig. 4: Deslocamentos verticais dos pontos A, B e C da superfície frontal das chapas soldadas durante cinco dias de monitoramento

Entendemos que deslocamento da superfície das chapas soldadas é uma consequência do processo de redistribuição das tensões residuais de soldagem, que foi observado com base nos resultados de mapeamento e medição das tensões apresentados a seguir.

Medições pelo método de raios-X e mapeamento magnético foram realizadas durante primeiros cinco dias a partir do dia seguinte da soldagem quando foram removidas as restrições de soldagem, com intervalo de 24 horas e, posteriormente, utilizando método de raios-X, depois de 12 e 30 dias. Os resultados de mapeamento pelo método magnético estão apresentados na Fig. 5. A principal variação na posição das linhas de nível é observada no cordão de solda (colunas 9 – 12 do mapa) e ZTA (colunas 8 – 9 e 12 – 13). Comparando o mapeamento feito em 0 horas com resultado final, 120 horas após, pode ser observada uma diminuição nos valores de concentração da tensão cisalhante máxima e mudança explícita no campo de distribuição destes valores.

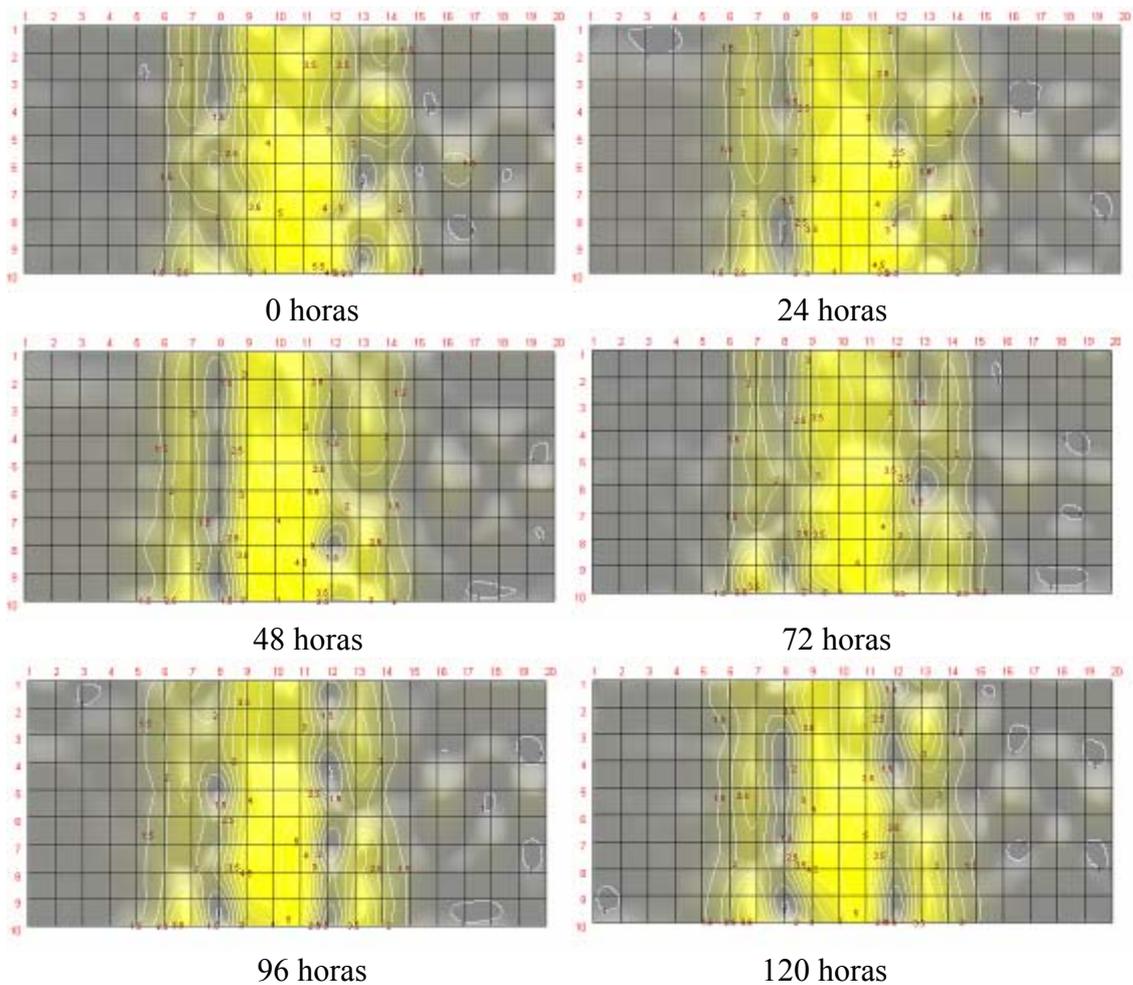


Fig. 5: Variação com tempo das tensões cisalhantes máximas numa vizinhança do cordão de solda no meio das chapas soldadas a partir do momento de remoção das restrições de soldagem (0 horas) até 5 dias seguidas (120 horas)

A partir dos três valores absolutos das tensões  $\sigma_L$ ,  $\sigma_T$  e  $\sigma_{45}$  medidos no metal depositado, ZTA, metal base próximo ao cordão e nos pontos 1, 2 e 3 pelo método de difração de raios-X, foram calculados valores das tensões principais e, posteriormente, valor da tensão cisalhante máxima nestes pontos.

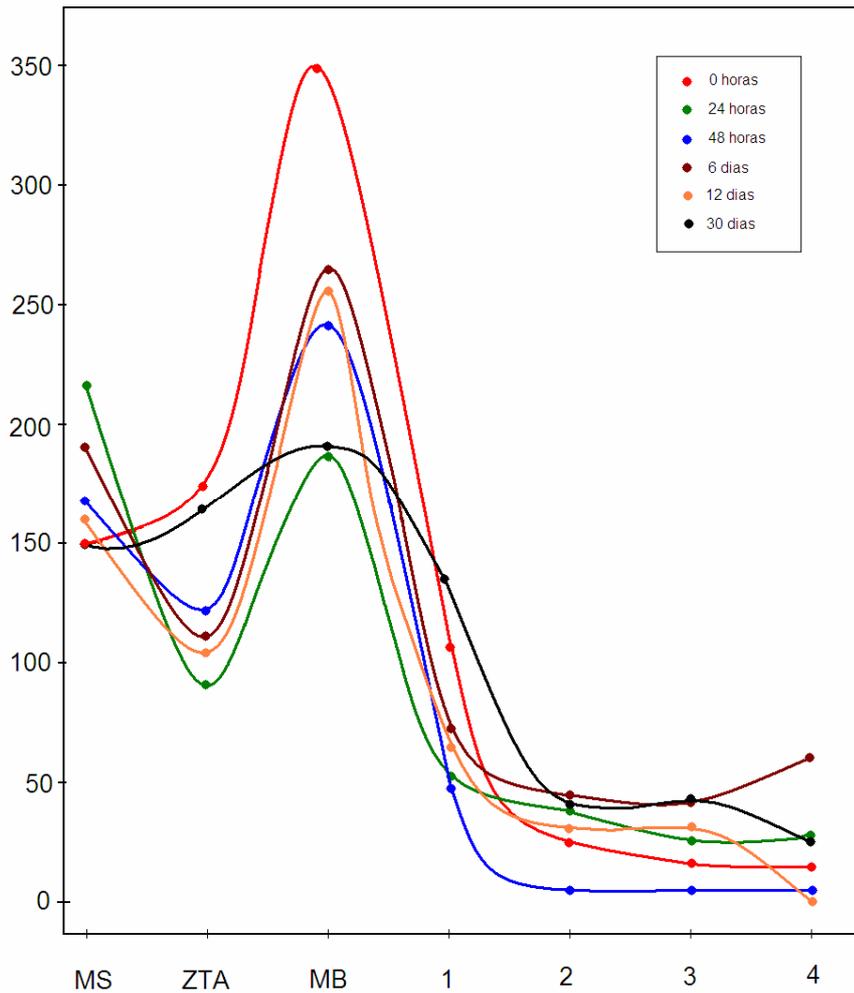


Fig. 6: Variação nos valores da tensão cisalhante máxima observada durante primeiros 30 dias após remoção das restrições de soldagem (0 horas).

A Fig. 6 apresenta os valores da tensão cisalhante máxima para primeiro dia de medição, ou seja, logo depois da remoção das restrições de soldagem, 24 e 48 horas depois e, conseqüentemente, 6, 12 e 30 dias depois da primeira medição. Observa-se uma variação considerável nos valores da tensão cisalhante máxima nos pontos do metal depositado, área termicamente afetada e nos pontos de metal base próximos ao cordão de solda. Nos pontos 2, 3 e 4 a variação está presente também, porém com magnitude menor. Esta variação não é monótona e sim possui características de oscilação. Somente nos pontos de metal depositado e ZTA os valores finais da tensão cisalhante máxima ficaram próximos os valores iniciais. Maior variação observa-se nos pontos de metal base e é bem significativa no ponto próximo ao cordão de solda.

#### **4. CONCLUSÕES**

---

1. Os resultados experimentais de medição dos deslocamentos verticais da superfície das chapas soldadas de topo assim como, de medição e mapeamento das tensões residuais de soldagem, obtidos através das duas técnicas diferentes, mostram uma variação destes valores no tempo, bem explicita nos primeiros cinco dias após a remoção das restrições de soldagem.
2. O estado final das tensões residuais 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. A observada variação das tensões residuais e dos deslocamentos verticais da superfície das chapas soldadas após o término do processo da soldagem indica a necessidade de especificar nos resultados experimentais o período de tempo entre a execução da operação de soldagem e a realização das medições.
4. Para obter resultados com aplicabilidade prática na simulação numérica dos processos de soldagem, o fenômeno de evolução das tensões após execução do processo da soldagem deve ser incluído nos modelos numéricos.
5. Observado efeito de redistribuição das tensões de soldagem após término do processo de soldagem pode contribuir significativamente no entendimento dos processos relacionados às tensões residuais de soldagem, ajudar no ajuste dos modelos computacionais e na interpretação dos dados da simulação numérica das tensões de soldagem.

#### **5. AGRADECIMENTOS**

---

Apoio financeiro: ANP, PRH-03 (J. Chujutali e G.F.S. Chavez); CNPq, PQ 302531/2009-2 (S.F. Estefen) e PQ 304463/2012-4 (A. Leontiev); FINEP, projeto PROFAB – Processos de Fabricação na Construção Naval. Apoio tecnológico e operacional: Equipe técnica do Laboratório da Tecnologia Submarina COPPE – UFRJ.

#### **6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---

- (1) Macherauch E. e Wohlfahrt H. “Different Sources of Residual Stress as a Result of Welding”, Em: Nichols RW, editor. Residual Stress in Welded Construction and Their Effects: An international conference, 1977 Nov 15-17, London, Cambridge, Welding Institute, 267-82, 1978-1979.
- (2) Schenk T., Richardson I. M., Kraska M. e Ohnimus S. “A Study on the Influence of Clamping on Welding Distortion”, Comput Mater Sci 45 999–1005 2009.
- (3) Korsunsky A. M., Regino G. M. e Nowell D. “Variational Eigenstrain Analysis of Residual Stresses in a Welded Plate”, J Solids Struct 44 4574-91 2007.
- (4) Paradowska A. M., Price J. W. H., Finlayson T. R., Lienert U., Walls P. e Ibrahim R. “Residual Stress Distribution in Steel Butt Welds Measured Using Neutron and

Synchrotron Diffraction”, J Phys: Condens Matter 21 2009, doi: 10.1088/0953-8984/21/12/124213.

(5) Deng D. e Murakawa H. “Prediction of Welding Distortion and Residual Stress in a Thin Plate Butt-Welded Joint”, Comput Mater Sci 43 353-65 2008.

(6) Aloraier A., Al-Mazrouee A., Price J. W. H. e Shehata T. “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 87 127-33 2010.

(7) Estefen S., Gurova T., Werneck D. S. e Leontiev A. “Efeito de Redistribuição das Tensões Residuais de Soldagem”, Em: COTEQ 2011 – Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, Porto de Galinhas – Ipojuca – PE. ABEND, 2011.

(8) Gurova T., Estefen S. e Leontiev, A. “Redistribuição das Tensões Residuais de Soldagem”, Em: NAVTEC 2012: Conferência Internacional em Tecnologias Naval e Offshore: Ciência e Inovação, Rio Grande – RS, 2012.

(9) Estefen S., Gurova T., Werneck D. S. e Leontiev A. “Welding Stress Relaxation Effect in Butt-Jointed Steel Plates”, Marine Structures 29 211-25 2012.

(10) Monin V., Teodosio J. R. e Gurova T. “A Portable X-Ray Apparatus for Both Stress Measurements and Phase Analysis Under Field Conditions”, Adv X-ray Anal 43 66-71 2000.

(11) Hauk V. “Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods. Evaluation – Application – Assessment”, Amsterdam: Elsevier Science, 1997.