



SIMULAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS DE CHAPAS SOLDADAS NA CONSTRUÇÃO NAVAL

Xavier Castello¹, Tatiana Gurova^{1&2}, Segen Estefen¹
¹ Laboratório de Tecnologia Submarina – COPPE/UFRJ
² GURTEQ – Ensaios Não Destrutivos Ltda

1 – Introdução

Modificações significativas do estado de tensão e deformação são observadas em componentes e estruturas após os processos de soldagem. Presença de metal fundido e gradientes de temperatura causam diversos efeitos como a contração, transformação de fase e têmpera (*quenching*). Os primeiros trabalhos sobre análise do estado de tensões das peças soldadas aparecem ainda na primeira metade do século passado, (Okerblom, 1948). Em seguida, as melhorias das técnicas e equipamentos de medição estimularam diversos estudos na análise experimental de tensões residuais e distorções após a soldagem, (Cho et al., 2004, Law et al., 2006, Mochizuki, 2007, Paradowska et al., 2006, Pfeiffer, 1997). Com os avanços das técnicas computacionais surgiram varias aplicações dos métodos numéricos para simulações do processo de soldagem, (Lindgren, 2001, Mollicone et al., 2006, Zhu e Chao, 2002). Atualmente, programas comerciais especializados são amplamente empregados na avaliação de estados de tensão e deformação após o processo de soldagem. Estes programas supostamente levam em consideração todos os fatores que influenciam o estado de tensões e deformações das estruturas soldadas, como o tipo e condições de soldagem, distribuição de temperatura e transformações de fase. Em alguns casos, contudo, existem certas dificuldades na aplicação dos modelos computacionais, que consistem em determinação das condições iniciais e de contorno do processo de soldagem, e em identificação dos principais parâmetros que descrevem o comportamento termo-mecânico das partes soldadas. A falta ou a incerteza destes dados pode levar aos grandes erros no resultado final da simulação.

Uma das possibilidades para conseguir um resultado mais realístico de análise das tensões de soldagem através da simulação computacional é sua combinação com técnicas experimentais de medição das tensões, entre quais se destacam como mais utilizadas o método de difração de raios-X e o método de furo cego. Enquanto o primeiro método é não destrutivo, o método de furo cego é um método semi-destrutivo.

Neste trabalho é proposto um modelo numérico para determinar o estado de tensões devido à soldagem de duas chapas de aço de construção naval. O modelo assume as não-linearidades geométricas de material e as condições de contorno utilizadas no experimento. A simulação emprega somente o efeito da expansão térmica do aço como efeito causador das tensões residuais, desprezando a transformação de fase e de resfriamento superficial (*quenching*). Para verificação da consistência do modelo computacional proposto, os resultados numéricos foram confrontados com os resultados experimentais obtidos pelo método da difração de raios-X.

2 - Modelo Numérico de Análise de Tensões

No modelo proposto, é considerada soldagem de duas chapas retangulares sem possibilidade de seus deslocamentos durante o processo da soldagem. Neste caso, a relaxação de tensões e deformações das chapas soldadas ocorre somente após a retirada das restrições de deslocamento impostas pelo gabarito do experimento de soldagem. Isto significa que as tensões e deformações pós-solda podem ser consideradas como resultado de um processo de relaxação. De acordo com o modelo proposto, a junta soldada é considerada como um sólido elasto-plástico com capacidade de deformação devido à expansão térmica.

O programa comercial de elementos finitos ABAQUS®, (ABAQUS User's and Theory Manual, 2006) foi empregado na simulação numérica. Foram usados elementos tridimensionais quadráticos de 20 nós com integração reduzida (C3D20R). A análise é estática, estrutural e resolvida pelo método numérico de Newton para problemas não-lineares. A condição de contorno das chapas é assumida como apoiada nas bordas e com restrições internas superiores e inferiores para deslocamento normal ao plano da chapa, as quais foram impostas no experimento por meio de vigas de seção tipo I presentes no gabarito de soldagem, posicionados como visto na Figura 1. Condições de simetria transversal e longitudinal foram adotadas.

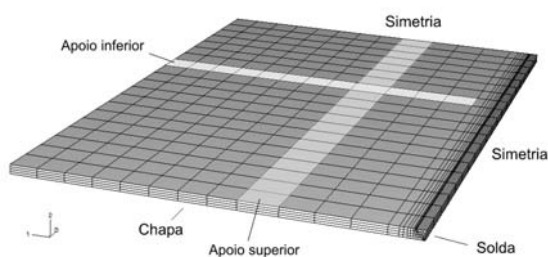


Fig. 1: Malha de elementos finitos das chapas soldadas, restrições (apoios) e condições de contorno aplicadas

As propriedades mecânicas de material foram determinadas por testes de tração de corpos de prova retirados do mesmo aço em temperatura ambiente e a 200°C. Os dados para temperaturas maiores de 200 °C foram extrapolados com base nos resultados do Mollicone et al. (2006) e Zhu e Chao (2002). O comportamento não-linear das propriedades do metal está no regime elasto-plástico e depende da temperatura. O módulo de Young e o coeficiente de expansão térmica também são termicamente dependentes.

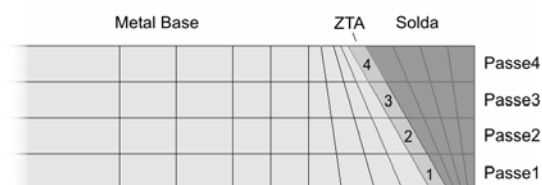


Fig. 2: Visão da seção transversal da malha na área de solda

O carregamento aplicado para simular a soldagem é a imposição da temperatura nodal. Inicialmente, é simulado o pré-aquecimento da zona termicamente afetada (ZTA) antes de cada passo de solda, indicado por ZTA 1, 2, 3 e 4, na Figura 2. Os elementos da parte pertencente ao cordão de solda também são desativados inicialmente, para serem sequencialmente reativados para simular a deposição gradual de material a cada passe (Passe 1, 2, 3 e 4). Assim que cada passe de solda é reativado na temperatura de soldagem de 2000°C, é em seguida definido à temperatura intermediária de 400°C. O processo de pré-aquecimento, reativação e resfriamento é repetido até que a junta seja terminada. Após isto, a temperatura de toda a estrutura é definida para a ambiente, o efeito da gravidade é aplicado e as condições de restrição de deslocamento são retiradas.

A combinação de diferentes refinamentos de malha e de tipos de elementos foi testada e verificada durante a modelagem, para obter resultados precisos com tempo razoável de processamento.

3 – Metodologia de Medição de Tensões

Medições de tensão foram realizadas pelo equipamento portátil de difração de raios-X RAYSTRESS® mostrado na Figura 3.



Fig. 3: 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 – em mecânica dos materiais e, em particular, na teoria da elasticidade do corpo sólido, (Monin, Teodosio e Gurova, 2000, Noyan e

Cohen, 1987). 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 em determinação de duas componentes de deformação: $\varepsilon_{\varphi, \psi_1}$ e $\varepsilon_{\varphi, \psi_2}$. Se a deformação é determinada através da fórmula:

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

então a diferença entre duas componentes da deformação é:

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

onde E e ν são constantes elásticas do material, ψ e φ são os ângulos polar e azimutal, σ_{φ} - componente medida da tensão, σ_1 e σ_2 são tensões principais. Da equação (1), a componente σ_{φ} é igual a:

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

Derivando a lei de Bragg:

$$\varepsilon_{\varphi, \psi} = \frac{d_{\varphi, \psi} - d_0}{d_0} = -\text{ctg} \theta_0 (\theta_{\varphi, \psi} - \theta_0), \quad (3)$$

onde $d_{\varphi, \psi}$, d_0 e $\theta_{\varphi, \psi}$, θ_0 são distâncias interplanares e os ângulos de difração para materiais com e sem tensão respectivamente. Usando as formulas (2) e (3), temos:

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

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 .

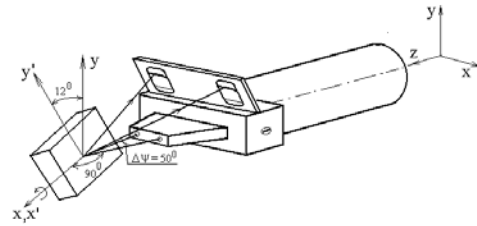


Fig. 4: Esquema de medição de tensões com o equipamento RAYSTRESS®

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 4. A precisão da medição do valor absoluto da tensão por RAYSTRESS® é de $\pm 10\text{MPa}$.

4 – Resultados

Duas chapas de aço ASTM A-131 de 2200 mm x 800 mm x 19 mm foram unidas por procedimento de soldagem tipo Gás Inerte Metálico (MIG) usando chanfro tipo V simples com 7 mm de raiz e 30° de inclinação. 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.

Distorções de empenamento e de embicamento das chapas soldadas foram observadas após a remoção das restrições, como definido na Figura 5.

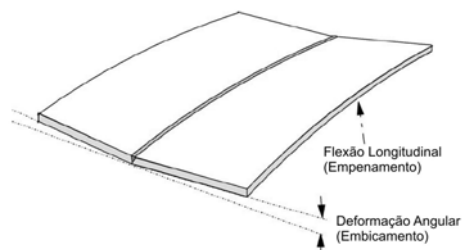


Fig. 5: Definição das distorções das chapas após a retirada das restrições (Mollicone et al., 2006)

O ponto de distorção com maior amplitude tanto para o resultado da simulação numérica, Figura 6, como do experimento em laboratório, Figura 7, 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.

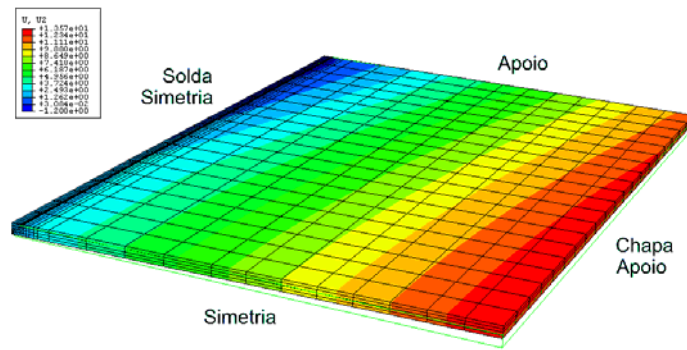


Fig. 6: Distorções na simulação numérica (valores em tabela em milímetros)

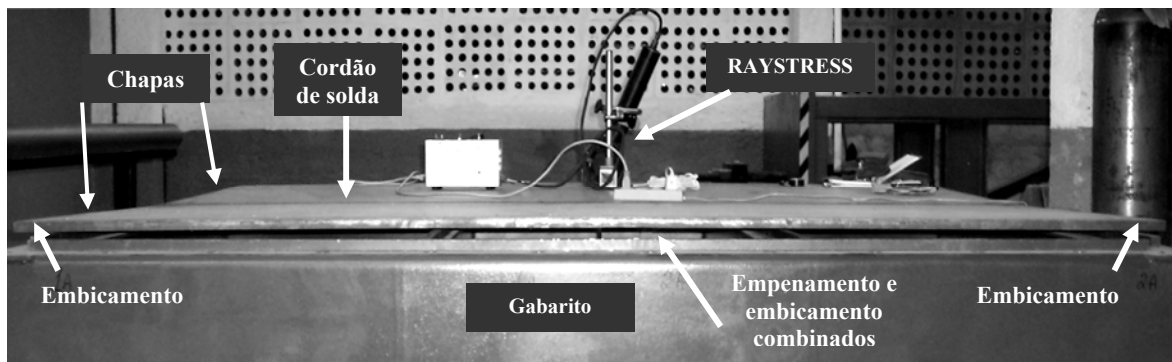


Fig. 7: Vista do gabarito e das distorções de embicamento (distorção angular) e de empenamento (distorção longitudinal) nas chapas soldadas

Medições de tensões residuais foram realizadas no metal depositado, na ZTA (Zona Termicamente Afetada) e no metal base. As medidas no metal base foram feitas no meio da chapa na linha perpendicular ao cordão de solda na direção longitudinal (paralelo ao cordão de solda) e na direção transversal (perpendicular ao cordão de solda). As Figuras 8 e 9 representam a distribuição das tensões medidas após a remoção das restrições. O eixo horizontal indica a distância desde o centro do cordão de solda e o eixo vertical a tensão absoluta medida em MPa, com valores positivos associados à tensão trativa. A posição zero representa a posição da linha central da solda e em 10 mm está delimitada a ZTA.

Tensões longitudinais e transversais calculadas pelo modelo numérico foram comparadas aos valores medidos pela técnica de difração de raios-X, como indicados nas Figuras 10 e 11. Como pode ser observado, existe uma boa correlação numérico-experimental entre as duas distribuições.

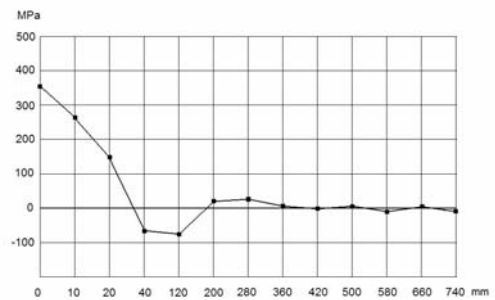


Fig. 8: Distribuição das tensões residuais longitudinais

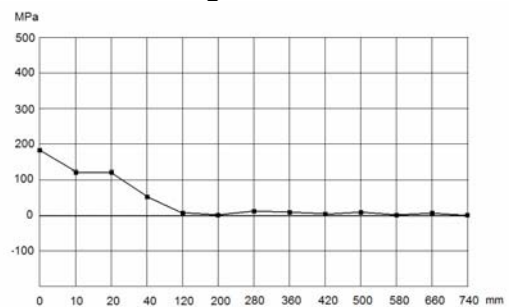


Fig. 9: Distribuição das tensões residuais transversais

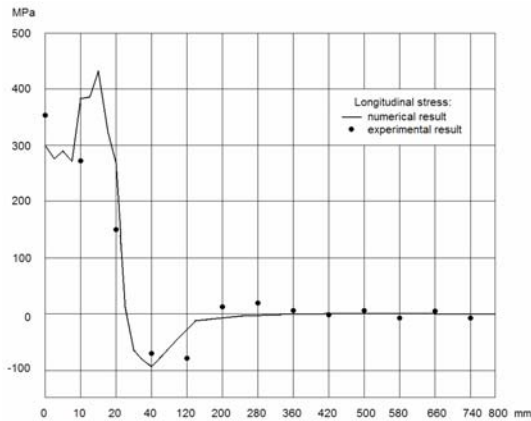


Fig. 10: Correlação numérico-experimental das tensões longitudinais

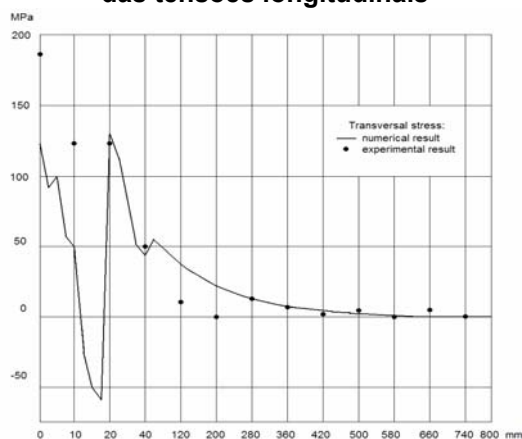


Fig. 11: Correlação numérico-experimental das tensões transversais

5. Conclusões

O modelo numérico proposto emprega somente o efeito da expansão térmica do metal para induzir as tensões e distorções, desconsiderando as mudanças de fase do material e o resfriamento superficial mais intenso (*quenching*), que causam efeitos adicionais. A soldagem real foi feita com 11 passes de cordões, enquanto a simulação foi feita com 4 passes, cada um com largura igual à do chanfro em cada camada. Mesmo que algumas das complexidades da soldagem real tenham sido simplificadas na simulação, a correlação entre os resultados numéricos e experimentais para tensões residuais após a soldagem foi satisfatória. O mesmo se observa no caso das distorções, onde tanto o comportamento quanto a amplitude dos resultados experimental e numérica estão próximos. Deve ser enfatizado que o modelo numérico é fortemente dependente da distribuição de temperatura definida e de pré-aquecimento e reativação dos elementos.

6 – Referências Bibliográficas

- Cho, J.R. et al. (2004), "Investigation of Residual Stress and Post Weld Heat Treatment of Multi-Pass Welds by Finite Element Method and Experiments", *Journal of Materials Processing Technology*, Number 155-156, pages 1690-1693.
- Law, M., Prask, H. Luzin, V. e Gnaeupel-Herold, T. (2006), "Residual Stress Measurements in Coil, Linepipe and Girth Welded Pipe", *Material Science and Engineering, A*, Number 437, pages 60-63.
- Lindgren, L.-E. (2001), "Finite Element Modeling and Simulation of Welding", *Journal of Thermal Stresses*, Volume 24, Number 4, pages 305-334.
- Mochizuki, M. (2007), "Control of Welding Residual Stress for Ensuring Integrity Against Fatigue and Stress-Corrosion Cracking", *Nuclear Engineering and Design*, Number 237, pages 107-123.
- Mollicone, P., Camilleri, D., Gray, T.G.F. e Comlekci, T. (2006), "Simple Thermo-Elastic-Plastic Models for Welding Distortion Simulation", *Journal of Materials Processing Technology*, Number 176, pages 77-86.
- Monin V.I., Teodosio J.R. e Gurova T. (2000), "A Portable X-Ray Apparatus for Both Stress Measurements and Phase Analysis Under Field Conditions", *Advances in X-ray Analysis*, Number 43, pages 66-71.
- Noyan I.S. e Cohen J.B. (1987), *Residual Stress Measurement by Diffraction and Interpretation*, Springer Verlag, New York, Berlin.
- Okerblom N.O. (1948), *Welding Strains and Stresses. Theory and its Application*. MTM-USSR, State Scientific-Technical Publishing of Engineering Literature, Moscow, Leningrad, 252 P.
- Paradowska, A. et al. (2006), "Investigation of Reference Sample for Residual Strain Measurements in a Welded Specimen by Neutron and Synchrotron X-ray Diffraction", *Physica B*, Number 385-386, pages 904-907.
- Pfeiffer, W. (1997), "Residual Stress in Heavy Wall Weldments", *Intn. Symp. "Safety in Application of High Strength Steel"*, Trondheim, 1-2 July.
- Zhu, X.K. e Chao, Y.J. (2002), "Effects of Temperature-Dependent Material Properties on Welding Simulation", *Journal Computers and Structures*, Number 80, pages 967-976. ABAQUS User's and Theory Manual, Version 6.7. (2006) Hibbitt, Karlsson, Sorensen, Inc.