

DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS A PARTIR DE UM CAMPO DE TEMPERATURA OBTIDO NUMERICAMENTE

Pablo Batista Guimarães, pablo.guima@oi.com.br¹
Paulo Marcelo Almeida Pedrosa, pmarcelo@hotlink.com.br²
Yogendra Prasad Yadava, yadava@ufpe.br²
José Maria Andrade Barbosa, jmab13@gmail.com²
Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira, ras@ufpe.br²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Av Professor Luiz Freire, 500, Cidade Universitária-PE, CEP 50740-540, Recife-PE.

²Universidade Federal de Pernambuco; Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Ac. Hélio Ramos s/n, Cidade Universitária, CEP 50.740-530, Recife-PE.

Resumo: Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia para determinar numericamente as tensões residuais de uma junta soldada. O modelo numérico se apóia no acoplamento de diferentes fenômenos físicos de natureza térmica, mecânica e metalúrgica presentes em uma operação de soldagem. As simulações numéricas foram realizadas através do código de cálculo Abaqus baseado no método dos elementos finitos (MEF). Através do MEF consideraram-se os aspectos que fazem a modelagem matemática do processo de soldagem complexa, tais como: variação das propriedades físicas e mecânicas dos materiais em função da temperatura, a transitoriedade e rapidez do processo de soldagem, as transformações de fase do material, os diferentes mecanismos de troca de calor com o meio (convecção e radiação), todos associados a uma elevada não-linearidade. A fonte de calor analítica utilizada para modelar o aporte térmico foi do tipo dupla elipsóide proposta por Goldak e para modelagem foi utilizada uma placa retangular de aço ASTM AH-36 com 60 mm x 50 mm e 2,5 mm de espessura, soldada pelo processo TIG. Pode-se, através deste estudo, otimizar parte dos procedimentos de soldagem praticados atualmente nas indústrias petroquímica e naval, em função da redução dos níveis de tensão residual.

Palavras-chave: Campo de Temperatura, Tensões Residuais, Soldagem TIG

1. INTRODUÇÃO

A multiplicidade de fenômenos que ocorrem durante um processo de soldagem e a heterogeneidade microestrutural resultante dificulta enormemente as análises teóricas e previsão de propriedades físicas e mecânicas das juntas soldadas. Estas microestruturas heterogêneas e complexas quando somadas às tensões residuais produzidas pela plastificação tornam mais difíceis as previsões das propriedades mecânicas de uma junta soldada. Conforme Masubuchi (1980) e Bhadeshia (2004), 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. As tensões residuais exercem grande influência nas características de resistência mecânica e no funcionamento dos elementos de uma estrutura e surgem após diversos processos tecnológicos como soldagem, tratamento mecânico superficial e/ou tratamentos termoquímicos, podendo ser causada por deformação plástica heterogênea, ação térmica e/ou transformações de fase.

Neste trabalho foi desenvolvido uma metodologia teórico-experimental para determinar numericamente as tensões residuais de uma junta soldada, este modelo numérico se apóia no acoplamento de diferentes fenômenos físicos de natureza térmica, mecânica e metalúrgica presentes em uma operação de soldagem.

O objetivo deste estudo foi definir condições que permitam efetuar as operações de soldagem desenvolvendo menores níveis de tensões residuais, reduzindo a aparição de trincas. Para tanto foi utilizada uma fonte de calor analítica do tipo dupla elipsóide proposta por Goldak & Akhlaghi (2005), para modelar o aporte de calor. Este modelo pode ser facilmente aplicado na indústria devido seu controle através dos parâmetros de entrada do processo de soldagem, tais como: corrente elétrica, tensão elétrica e velocidade de soldagem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na soldagem por fusão a arco elétrico, a energia é concentrada em uma região da junta onde será realizada a soldagem enquanto que o restante do material permanece em temperaturas bem inferiores, gerando um complexo campo de temperaturas em função da posição e do tempo que produz uma distribuição de temperatura não-uniforme e transiente (variável com o tempo). Desta forma, com a dilatação natural das partes aquecidas, a qual é restringida pelas regiões adjacentes menos aquecidas, são geradas deformações elásticas e plásticas não uniformes. As deformações plásticas são responsáveis por grande parte das tensões residuais de soldagem. Outro fator que pode levar ao aparecimento de tensões residuais são as variações de volume (expansão ou contração) que ocorrem durante as transformações de fase no estado sólido (Gurova et al, 2008; Castello et al 2008).

Em síntese, segundo Macherauch et al (1986) e Bhadeshia (2004), na soldagem considera-se o surgimento de tensões residuais devido:

- Contração no resfriamento de regiões diferentemente aquecidas e plastificadas (deformações plásticas heterogêneas);
- Resfriamento superficial mais intenso;
- Transformações de fase;

A figura 1 mostra o desenvolvimento de tensões residuais longitudinais durante a soldagem, onde a área ainda não afetada pelo calor (seção A-A'), não possui variações de temperaturas e o material permanece sem tensões. Próximo à poça de fusão (seção B-B') o material aquecido tende a se expandir sendo, contudo, restringido pelas regiões mais frias da peça, gerando, assim, tensões de compressão em regiões próximas a Z.F. e tensões de tração nas regiões um pouco mais afastadas. Quando o seu limite de escoamento é atingido, o material aquecido deforma-se plasticamente em compressão. Na poça de fusão, como o material está líquido, as tensões são nulas. Com o resfriamento e após a solidificação da solda, o material passa a se contrair, sendo novamente impedido pelas regiões mais frias e afastadas da solda. Surgem assim tensões de tração junto ao cordão e compressão nas regiões mais afastadas (seção C-C'). Estas tensões aumentam de intensidade levando ao escoamento da região aquecida. Após o resfriamento completo (seção D-D'), as tensões residuais no centro da solda chegam a níveis próximos ao limite de escoamento do material.

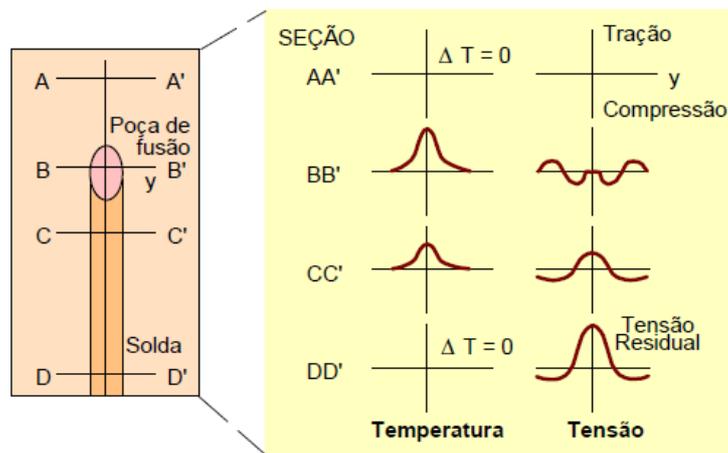


Figura 1 – Desenvolvimento de tensões residuais longitudinais durante a soldagem (Modenesi, 2001).

Devido ao resfriamento superficial mais intenso, sendo este não homogêneo ao longo da espessura, será estabelecido um gradiente de temperatura ao longo da espessura da peça, que aliado ao gradiente de temperatura nas direções longitudinal e transversal ao cordão provoca tensões residuais ao longo da espessura. As tensões residuais tendem a aumentar para chapas de maior espessura por apresentarem maior gradiente térmico, considerando unicamente o efeito do resfriamento mais rápido na superfície.

As variações de volume (expansão ou contração) que ocorrem durante as transformações de fase no estado sólido também podem levar também ao surgimento das tensões residuais. Em aços, na transformação da austenita para ferrita, perlita, cementita ou martensita, ocorre com expansão do volume que será impedido pelas regiões não transformadas, adjacentes ao cordão de solda (Francis et al., 2007). A intensidade das tensões residuais no cordão de solda está relacionada com o grau de restrição da estrutura mecânica, que geralmente é total na direção longitudinal dos cordões de solda.

As variações de temperatura provocam deformações, devido a fenômenos de dilatação térmica. As deformações irreversíveis são acompanhadas de uma plastificação do material, resultando então em uma dissipação de energia sob a forma de calor no material que se levada em conta em um modelo numérico deve ser acrescido mais um termo de fonte

na equação de calor para realizar um acoplamento termo-mecânico. Entretanto, de um modo geral, uma deformação plástica de 1% em uma solicitação de 400 MPa, é apenas responsável por uma elevação de temperatura da ordem de um grau que pode ser considerada desprezível em relação as temperaturas de um processo de soldagem (Kerrouault, 2000; Danis, 2008). O problema termo-mecânico de soldagem pode ser tratado como um acoplamento fraco, que consiste em resolver o problema térmico que servirá como carregamento para o calculo mecânico. Dentro destas condições a mecânica não exerce influência sobre o campo térmico. As tensões residuais podem ser obtidas a partir das deformações geradas durante uma operação de soldagem. Estas deformações podem ser de natureza elástica (ϵ_{El}), plástica (ϵ_{Pl}), visco-elásticas (ϵ_{VE}) e térmicas (ϵ_T), portanto, a deformação total pode ser determinada pela equação 1.

$$\epsilon_{Total} = \epsilon_{El} + \epsilon_{Pl} + \epsilon_{VE} + \epsilon_T \tag{1}$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Para a simulação foi utilizada uma placa retangular de aço ASTM AH-36 com 60mm x 50mm e 2,5mm de espessura soldadas pelo processo TIG. A tabela 1 mostra a composição química da liga.

Tabela 1 – Composição química da amostra do aço ASTM AH-36

C	Cr	Mn	Ni	Si	V	Al	Cu	S	P	Sn	Nb
0,130	0,026	1,418	0,012	0,346	0,056	0,028	0,015	0,007	0,023	0,002	0,020

3.2 Métodos

A metodologia empregada nesta simulação numérica de soldagem será descrita nos próximos itens e as etapas deste estudo são mostradas conforme figura 2.

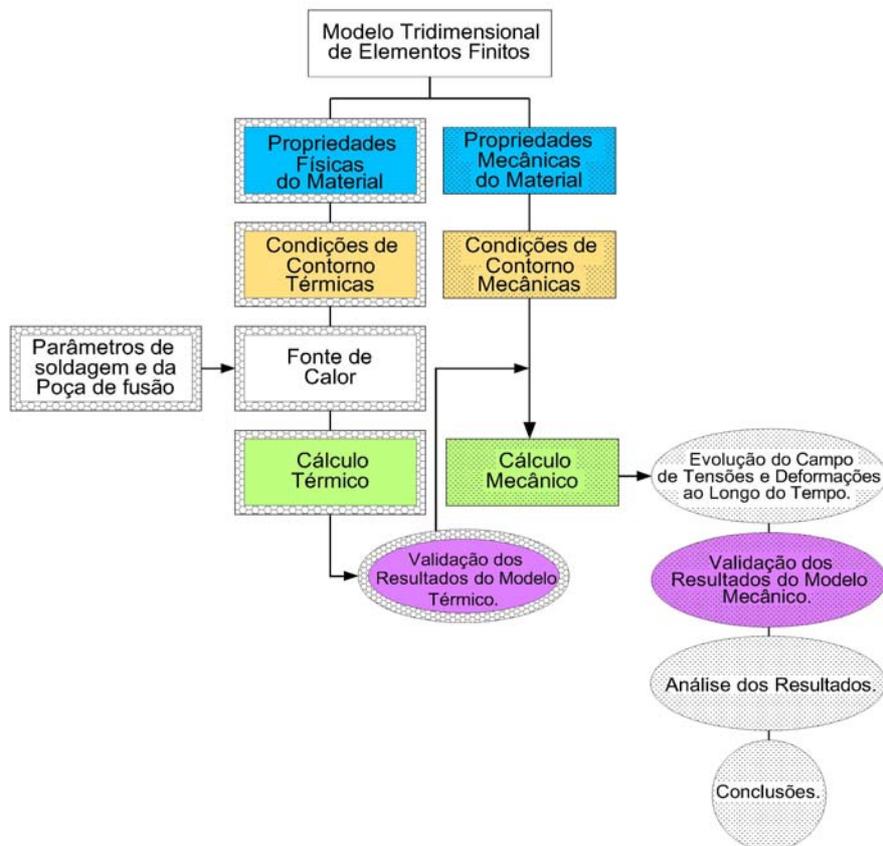


Figura 2 – Representação esquemática das etapas do estudo para modelagem numérica em soldagem

A simulação computacional foi realizada através código de cálculo Abaqus, que é um conjunto de programas de simulação em engenharia, baseado no método dos elementos finitos (MEF). A placa foi dividida em elementos do tipo

DC3D8 totalizando 12495 elementos. Essa malha teve um maior refinamento na zona fundida e zona termicamente afetada (ZTA) por serem regiões em que ocorrem os fenômenos de maior importância na soldagem, esse refinamento da malha é mostrado pela figura 3 e tabela 2.

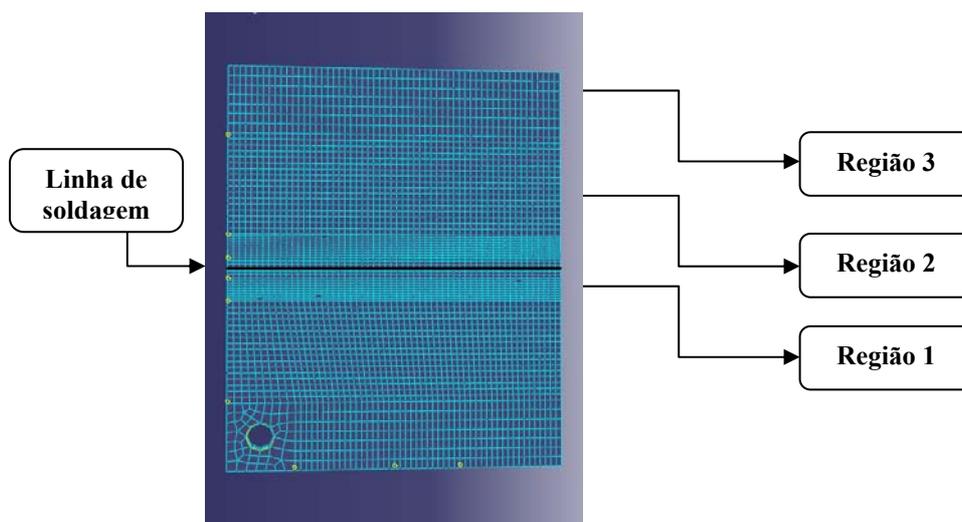


Figura 3 – Malha e suas regiões utilizadas para solução do problema térmico.

Tabela 2 – Elementos que compõem a malha para cálculo pelo MEF

Elementos	Região 1	Região 2	Região 3
	4176	5916	2403

Esses elementos são contínuos - 3D, de formulação linear e possuem cada um 8 nós, conforme mostrado na figura 4. Para todos os elementos foram utilizadas arestas de 1mm ao longo da espessura, permanecendo sempre 3 elementos ao longo da espessura da placa.

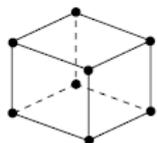


Figura 4 – Elemento DC3D8 - 8 nós e formulação linear (Hibbit et al., 2007).

Para as condições de contorno térmicas foram consideradas as trocas de convecção e radiação durante a operação de soldagem. Essas condições de contorno foram introduzidas no modelo nas cinco faces da placa sendo soldada com exceção da face inferior que fica apoiada na mesa durante a operação de soldagem (Guimarães et al., 2010). Foi estabelecida apenas uma condição de contorno mecânica, pois a placa foi presa mediante um furo de 4 mm de diâmetro engastado com parafuso, conforme figura 5. Neste modelo não foi utilizada hipótese de simetria para melhor mobilidade da placa visando diminuir erros devido às restrições (Danis, 2008).



Figura 5 – Condição de contorno mecânica assegurada por parafuso.

A fonte utilizada neste estudo foi a dupla elipsoide proposta por Goldak, conforme mostrado na figura 6. Atualmente é a mais adequada para processos TIG, nela considera-se uma gaussiana 3D finita sobre uma dupla elipsóide, conforme mostra a figura 6.

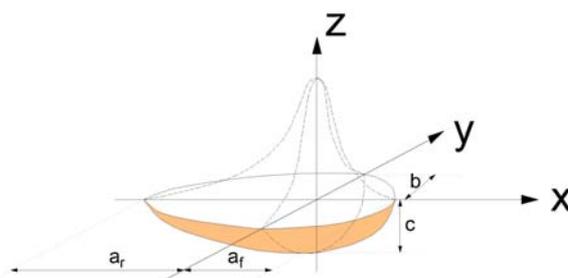


Figura 6 – Representação esquemática da fonte dupla elipsóide.

Os parâmetros geométricos a_f , a_r , b , c e os parâmetros energéticos f_f e f_r , foram obtidos com o auxílio das relações existentes dentro da literatura (Gery et. al, 2005; Goldak & Akhlaghi, 2005) e foram dados pela tabela 3. Para modelar o deslocamento da fonte de calor foi desenvolvida uma sub-rotina em Fortran do tipo DFLUX (Hibbit et al., 2007). Essa função permite determinar a posição da tocha em função do tempo e calcular o aporte de calor em todos os pontos da placa.

Tabela 3 – Parâmetros geométricos e energéticos da fonte de calor (Goldak & Akhlaghi, 2005, Danis, 2008).

Parâmetro	Valor
a_f	0,0015m
a_r	0,003m
b	0,003m
c	0,003m
f_f	0,6
f_r	1,4

Os parâmetros de soldagem utilizados neste trabalho são mostrados através da tabela 4

Tabela 4 – Parâmetros do aporte térmico utilizados na simulação numérica.

Corrente (A)	Tensão(V)	Rendimento (%)	Velocidade (m/s)
150	24	60	0,001

As tensões residuais foram obtidas a partir das deformações geradas durante a operação de soldagem. Estas deformações foram consideradas de natureza elásticas, plásticas e térmicas, logo a deformação total foi determinada pela equação 2.

$$\varepsilon_{Total} = \varepsilon_{El} + \varepsilon_{Pl} + \varepsilon_T \quad (2)$$

As deformações elásticas e plásticas foram obtidas por ensaio de tração, e as deformações térmicas foram obtidas em função do coeficiente de dilatação térmica em função da temperatura, através da equação 3.

$$\varepsilon_T = \alpha \cdot (T - T_0) \quad (3)$$

Sendo α o coeficiente de dilatação linear, T_0 a temperatura ambiente e T a temperatura do ponto considerado. Os valores das propriedades mecânicas em função da temperatura são mostrados na figura 7 (Tsirkas et al., 2003).

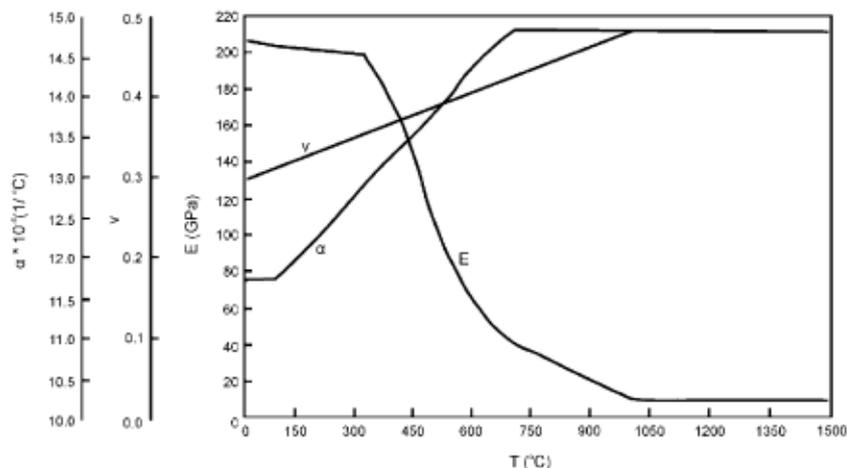


Figura 7 – Variação das propriedades mecânicas do material - α (Coeficiente de dilatação linear), ν (Coeficiente de Poisson) e E (Módulo de elasticidade) em função da temperatura (Tsirkas et al., 2003).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O campo de tensões residuais no sentido longitudinal e transversal ao cordão de solda após o resfriamento é mostrado pelas figuras 8 e 9.

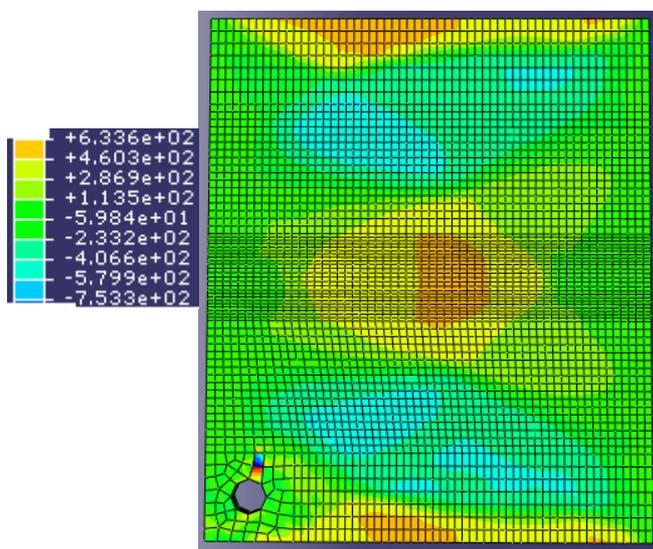


Figura 8 – Campo de tensões residuais no sentido longitudinal a solda.

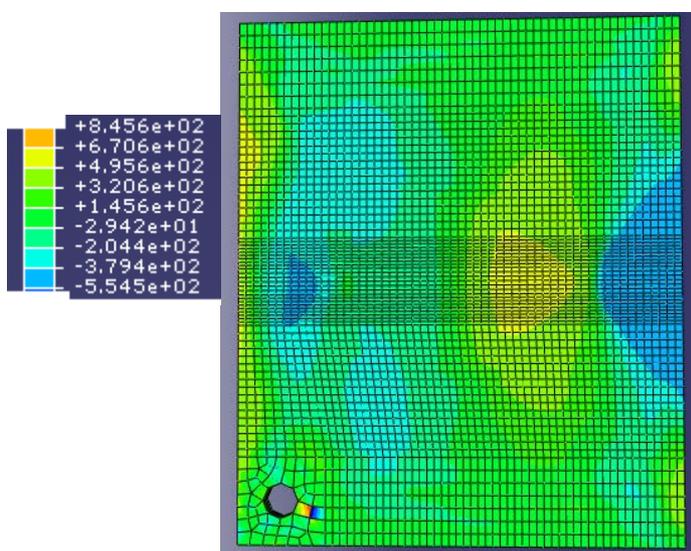


Figura 9 – Campo de tensões residuais no sentido transversal a solda.

Com o resfriamento e após a solidificação da solda, o material passa a se contrair sendo impedido pelas regiões mais frias e afastadas da solda, dando origem a tensões de tração junto ao cordão e compressão nas regiões mais afastadas. Quanto ao comportamento dessas tensões este modelo mostra-se coerente do ponto de vista trativo e compressivo. Após o resfriamento completo, as tensões residuais no centro da solda chegam a níveis de mesma ordem de grandeza do limite de escoamento do material (430 MPa), porém neste modelo alguns pontos ultrapassaram o limite de resistência do material necessitando de ajustes complementares. A figura 10 mostra o comportamento da tensão longitudinal em função do tempo de um ponto localizado na superfície superior do centro da placa.

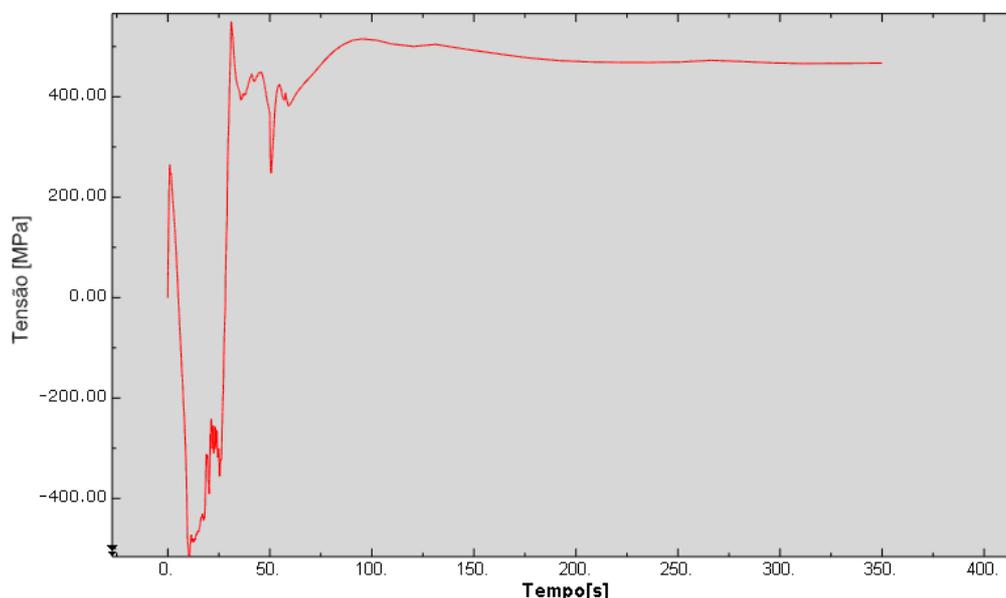


Figura 10 – Tensões no sentido longitudinal de um ponto localizado no centro da placa

O tempo de soldagem foi de 50s e a peça foi submetida a um resfriamento durante os 300s seguintes. Para este ponto no centro da placa a tensão chegou a um valor máximo de 549,4 MPa e um valor mínimo de -521,6 MPa e se manteve aproximadamente constante após 150s durante o resfriamento da placa.

5. CONCLUSÕES

A determinação das tensões residuais em uma junta soldada é de grande importância para otimizar os procedimentos de soldagem praticados atualmente nas indústrias, em função da redução dos níveis de tensão residual. Na literatura encontramos modelos que não levam em conta as transformações de fase do material, como as que ocorrem nos aços por não apresentarem as inconvenientes transformações de fase no estado sólido ($\gamma-\alpha$). Este modelo devido a complexidade dos fenômenos envolvidos durante uma operação de soldagem ainda necessita de ajustes complementares e deverá ser validado posteriormente através de procedimento experimental.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos pelo apoio financeiro da FACEPE (Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco) a este trabalho e acima de tudo a Deus que é a razão da nossa existência.

7. REFERÊNCIAS

- Bhadeshia, H.K.D.H., 2004, “*Developments in martensitic and bainitic steels: role of the shape deformation*”. Materials Science and Engineering. University of Cambridge, Materials Science and Metallurgy, Cambridge, UK. pp. 34–39.
- Castello, X., Gurova, T. and Estefen, S., 2008, “*Simulação das Tensões Residuais de Chapas Soldadas na Construção Naval*”. SOBENA – Sociedade Brasileira de Engenharia Naval. pp. 01-05.
- Danis, P. Y., 2008, “*Étude de la soudabilité d’un superalliage base nickel fortement chargé en éléments durcissants titane et aluminium: l’inconel 738*”. França. 193p. (These L’Université Bordeaux 1).
- Francis, J. A., Bhadeshia, H. K. D. H. and Withers, P. J., 2007, “*Welding residual stresses in ferritic power plant steels*”. *Materials Science and Technology*. Vol. 23, pp. 1009-1020.
- Gery, D., Long, H. and Maropoulos, P., 2005, “*Effects of welding speed, energy input and heat source distribution on temperature variations in butt joint welding*”, *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 167. pp. 393–40.

- Goldak, J. A. and Akhlaghi, M., 2005, “*Computational Welding Mechanics*”, Spring - New York. pp. 30-35.
- Guimarães, P. B., Pedrosa, P. M. A., Yadava, Y. P., Barbosa, J. M. A. and Ferreira, R. A. S., 2010, “*Determinação Numérica do Campo de Temperatura de uma Junta Soldada de Aço ASTM AH-36*”. In: CONEM 2010 - VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.
- Gurova, T., Quaranta, F. and Estefen, S., 2008, “*Monitoramento do Estado de Tensões Residuais Durante a Fabricação de Navios*”. SOBENA – Sociedade Brasileira de Engenharia Naval. pp. 01-09.
- Hibbit, Karlsson & Sorenson Inc., 2007, “*Abaqus User Subroutines Reference Manual - Version 6.7*”, USA. “DFLUX” Section 1.1.3, “USDFLD” Section 1.1.40.
- Hibbit, Karlsson & Sorenson Inc., 2007, “*Abaqus Getting Started with Abaqus – Interactive Edition*” Versão 6.7. USA. Section 1-4;8-10.
- Kerrouault, 2000, “*Fissuration à Chaud en Soudage d’un acier inoxydable austénitique*”. PhD Thesis, Centrale Paris.
- Masubuchi, K., 1980, “*Analysis of Welded Structures. Residual Stress and Distortion and Their Consequences*”. Pergamon Press, Oxford-New York. pp. 33.
- Modenesi, P. J., 2001, “*Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico*”. UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, 5 Mai 2008, <www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/tensao_residual.pdf>.
- Tsirkas, S. A., Papanikos, P. and Kermanidis, T.H., 2003, “*Numerical Simulation of the Laser Welding Process in butt-joint specimens*”, Journal of Materials Processing Technology. Vol. 134. pp. 59–69.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

DETERMINATION OF THE RESIDUAL STRESSES FROM A TEMPERATURE FIELD OBTAINED NUMERICALLY

Pablo Batista Guimarães, pablo.guima@oi.com.br¹
Paulo Marcelo Almeida Pedrosa, pmarcelo@hotlink.com.br²
Yogendra Prasad Yadava, yadava@ufpe.br²
José Maria Andrade Barbosa, jmab13@gmail.com²
Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira, ras@ufpe.br²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Av Professor Luiz Freire, 500, Cidade Universitária-PE, CEP 50740-540, Recife-PE.

²Universidade Federal de Pernambuco; Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Ac. Hélio Ramos s/n, Cidade Universitária, CEP 50.740-530, Recife-PE.

Abstract. *In this work was developed a methodology to determine numerically the residual stresses of a welded joint. The numerical model is based on the coupling of different physical phenomena of thermal, mechanical and metallurgical nature present in a welding operation. The numerical simulations were performed using the code Abaqus based on the finite element method (FEM). Through the FEM were considered the aspects that make the mathematical modeling of complex welding process, such as changes in physical and mechanical properties of materials as a function of temperature, flux and speed of the welding process, the phase transformation of material with different mechanisms of heat exchange with the environment (convection and radiation), all associated with a high nonlinearity. The heat source used in this analytical study of the double ellipsoid was proposed by Goldak to model the heat input, in which it was used a rectangular plate of steel ASTM AH-36 with 60 mm x 50 mm and 2,5 mm thick, welded by TIG process. Through this study can be optimized part of the welding procedures currently practiced in the petrochemical and shipbuilding industries, due to the reduction of the levels of residual stress.*

Keywords: *Temperature Field, Residual Stress, TIG Welding*