

DETERMINAÇÃO NUMÉRICA DO CAMPO DE TEMPERATURA DE UMA JUNTA SOLDADA DE AÇO ASTM AH-36

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: *O Campo de Temperatura serve de base para prever os níveis de tensões residuais em uma junta soldada. Para determiná-lo numericamente foi utilizada uma placa retangular de aço ASTM AH-36 com 60 mm x 50 mm e 2,5mm de espessura, soldada pelo processo TIG. Para simulação do processo, foi usado um aplicativo comercial baseado no método dos elementos finitos (MEF). Através do MEF, foram considerados 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). A fonte de calor analítica utilizada neste estudo foi do tipo dupla elipsóide proposta por Goldak para modelar o aporte de calor. Esse estudo serve de base para determinar as tensões residuais que causam diversos inconvenientes na fabricação de equipamentos, tais como: formação de trincas em soldas, corrosão do cordão sob tensão, instabilidade dimensional.*

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

1. INTRODUÇÃO

O termo soldagem abrange uma vasta gama de diferentes processos utilizados na fabricação e recuperação de peças. Entre esses processos de união permanente de materiais, a soldagem TIG (Tungstênio Inerte Gás) que tem por princípio criar e manter um arco elétrico entre um eletrodo de tungstênio não-consumível e a peça (Modenesi et al, 2006; Gonçalves et al., 2006), teve grande desenvolvimento devido à necessidade de disponibilidade de processos eficientes para materiais de difícil soldabilidade, tais como: alumínio e magnésio, notadamente na indústria da aviação no começo da segunda guerra mundial. Assim, com o seu aperfeiçoamento, surgiu um processo de alta qualidade e relativo alto custo, de uso em aplicações diversas (Bracarense, 2000; Fonseca, 2004). Neste trabalho foi desenvolvido uma metodologia para determinar numericamente o campo de temperatura visando posteriormente a obtenção das 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.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na década de 40, para a resolução do problema térmico, inicialmente eram propostos métodos analíticos, como os de Rosenthal (1941), que considerava uma fonte de calor concentrada (pontual ou linear). Rosenthal propôs as seguintes hipóteses simplificadoras para as soluções analíticas (Ramanzini et al, 2006 e Goyal et al 2009): A fonte de calor (linear, pontual) se deslocando a uma velocidade constante ao longo de uma chapa; As propriedades físicas do meio (peça) são constantes; As perdas de calor das superfícies do meio condutor para a atmosfera são desprezíveis; A soldagem é suficientemente longa para se atingir o estado quase-estacionário (distribuição de temperaturas constante para o observador que se movimenta junto com a fonte de calor) e as transformações de fase são desprezíveis. Para a modelagem de chapas finas, a distribuição de temperaturas é constante para o observador que se movimenta junto a uma fonte de calor linear com velocidade constante, conforme mostrado pela figura 1.

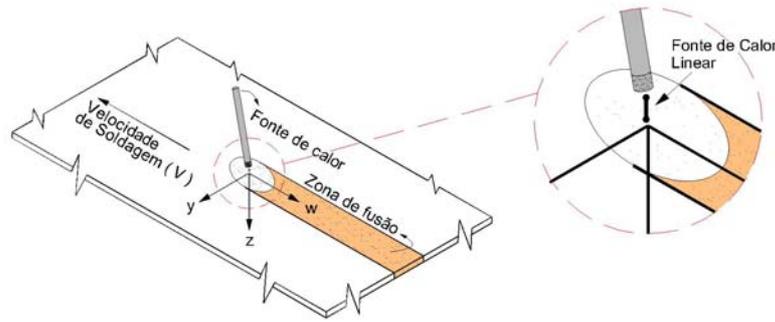


Figura 1 – Fonte de calor linear para análise de fluxo de calor bidimensional.

Considerando-se que não há fluxo na direção da espessura da chapa e transferindo a origem de coordenadas da chapa para a fonte de calor linear, resultando numa condução que se processa nas direções x e y, caracterizando um fluxo bidirecional (Binda et al, 2004 e Gonçalves et al, 2006). Tomando como referência as coordenadas móveis, a temperatura de um ponto situado a uma distância r (x,y) tem solução dada pela Equação 1.

$$T = T_0 + \frac{P/h}{2\pi k} e^{-\frac{v}{2\alpha}x} K_0 \cdot \frac{v}{2\alpha} \cdot \sqrt{x^2 + y^2} \quad (1)$$

Onde α é a difusividade térmica, k é a condutividade térmica, h é a espessura da chapa e v é a velocidade de soldagem. Segundo Depradeux (2003), estes modelos analíticos são bem adaptados apenas quando se considera o tamanho da zona fundida muito pequena em comparação com as dimensões da peça. Novas soluções analíticas vêm sendo propostas, as quais levam em consideração uma fonte de calor distribuída (Fassani e Trevisan, 2003). Para modelização da fonte de calor são propostas soluções analíticas, como a proposta por Goldak e atualmente é a mais adequada para processos TIG, nela considera-se uma gaussiana 3D finita sobre uma dupla elipsóide, conforme mostra a figura 2.

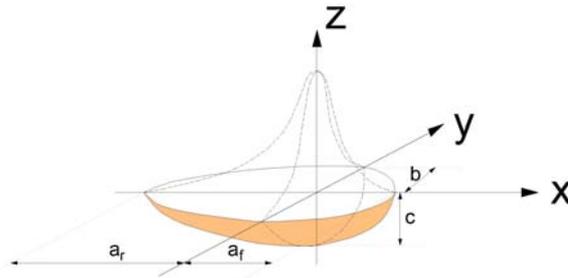


Figura 2 – Representação esquemática da fonte dupla elipsóide.

Essa fonte é definida analiticamente pelas equações 2 e 3 (Goldak & Chakravarti, 1984; Goldak & Akhlaghi, 2005).

$$q_f(x, y, z) = f_f \frac{\eta UI}{a_f bc \pi \sqrt{\pi}} \cdot 6\sqrt{3} \cdot \exp\left(\frac{-3x^2}{a_f^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-3z^2}{c^2}\right) \quad (2)$$

$$q_r(x, y, z) = f_r \frac{\eta UI}{a_f bc \pi \sqrt{\pi}} \cdot 6\sqrt{3} \cdot \exp\left(\frac{-3x^2}{a_r^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-3z^2}{c^2}\right) \quad (3)$$

Onde q_f e q_r são as distribuições volumétrica de energia antes e após a tocha [W/m^3], f_f e f_r são as repartições de energia antes e após a tocha; a_f e a_r são os comprimentos da poça de fusão antes e após a tocha [m]; b é a Semi-largura da poça de fusão [m] e c é a profundidade da zona fundida [m], conforme mostrado na figura 2.

Os parâmetros U, I, η estão ligados diretamente ao procedimento de soldagem, enquanto que b e c são os parâmetros geométricos da fonte e podem ser determinados através de exame metalográfico. Os outros parâmetros a_f , a_r , f_f e f_r , são obtidos com a ajuda dos parâmetros b e c e das relações existentes dentro da literatura, conforme mostram as equações 4, 5 e 6 (Gery et. al, 2005; Goldak & Akhlaghi, 2005).

$$f_f + f_r = 2 \quad (4)$$

$$f_f = \frac{2 \cdot a_f}{a_f + a_r} \quad (5)$$

$$f_r = \frac{2 \cdot a_r}{a_f + a_r} \quad (6)$$

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 2,5 mm 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 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.

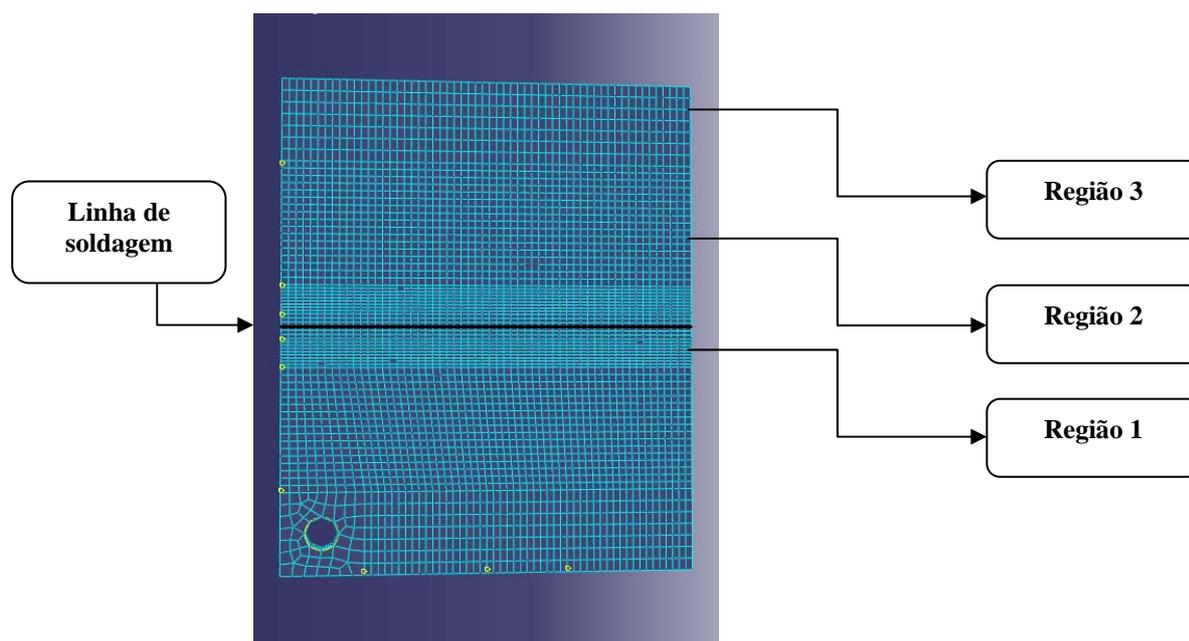


Figura 3 – Malha e suas regiões utilizadas para solução do problema térmico.

Tabela 2 – Número de 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.

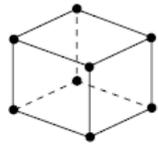


Figura 4 – Elemento DC3D8 - 8 nós e formulação linear (Hibbit et al., 2007).

A solução do problema térmico foi dada pela equação 7

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

Onde K , \dot{q} , ρ e c são a condutividade térmica, geração de calor, massa específica e calor específico, respectivamente. 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. As trocas de calor por convecção e radiação foram expressas pelas equações 8 (lei de Newton) e 9 (lei de Stefan Boltzmann), respectivamente.

$$q_c = h(T - T_0) \quad (8)$$

$$q_R = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T^4 - T_\infty^4) \quad (9)$$

Onde h é o coeficiente de convecção, σ é a constante de Stefan-Boltzmann e ε a emissividade. Foram utilizados os valores obtidos na literatura para modelar as trocas de calor e suposto uma convecção livre em torno da placa. A temperatura ambiente foi considerada 25°C e a emissividade 0,7. Os valores utilizados para o coeficiente de convecção (h), calor específico (C_p) e condutividade térmica (k) são mostrados em função da temperatura na figura 5 (Tsirkas et al., 2003).

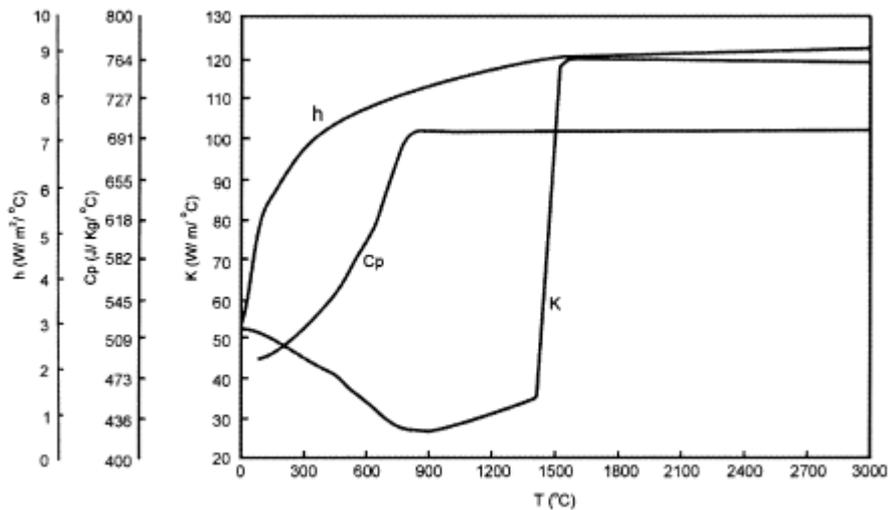


Figura 5 – Variação das propriedades do material em função da temperatura (Tsirkas et al., 2003).

A fonte utilizada neste estudo foi a dupla elipsoide proposta por Goldak, conforme mostrado na figura 2. 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 são mostrados na 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. Foi estabelecida apenas uma condição de contorno mecânica, pois a placa foi presa mediante um furo de 4 mm de diâmetro engastado, conforme figura 5. Neste modelo não foi utilizada hipótese de simetria para melhor mobilidade da placa visando diminuir erros devido às restrições (Danis, 2008).

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 (Goldak & Akhlaghi, 2005, Danis, 2008).

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

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

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A soldagem virtual teve duração de 50 segundos, a evolução do campo de temperatura é mostrado através da figura 6.

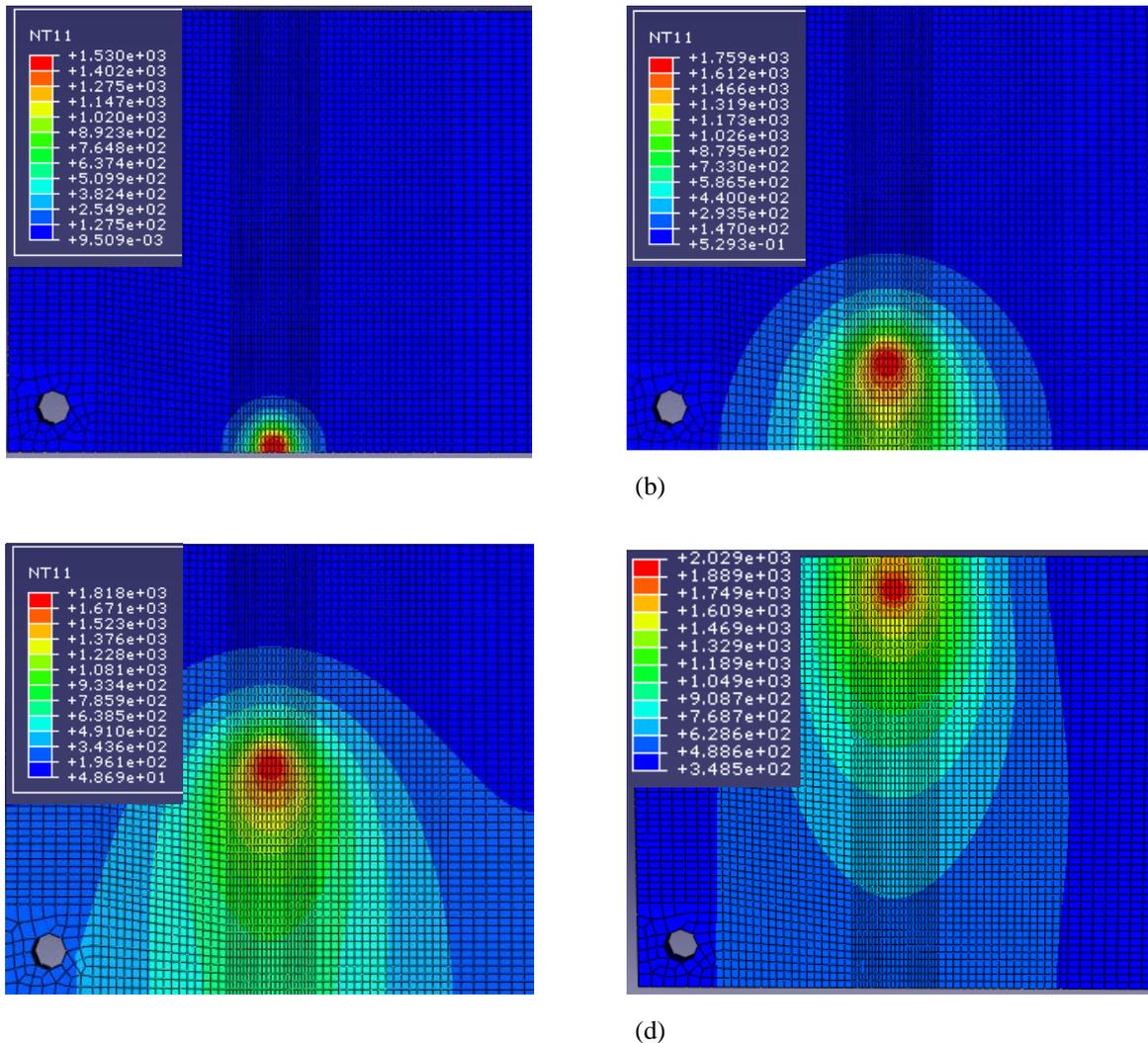


Figura 6 – Evolução do campo de temperatura em função do tempo de soldagem. (a) 1 s; (b) 10 s; (c) 25 s e (d) 50 s.

A evolução do campo de temperatura é influenciada pelos parâmetros da fonte de calor e o aporte térmico de soldagem. Os contornos deste campo são influenciados diretamente pela velocidade de soldagem e pelas propriedades físicas do material. A velocidade de soldagem empregada foi de 1 mm/s e conforme mostrado pela figura 6 podemos observar a Zona Termicamente Afetada (ZTA). Através do aumento da velocidade de soldagem os contornos das isotermais tendem a se alongar mais em direção ao sentido contrario a soldagem, afetando uma zona menor (Chon e Chin, 1993). A figura 7 mostra o campo de temperatura para um tempo de 25 s com a chapa sendo atravessada em toda sua espessura pelo fluxo de calor. Nesta modelagem a temperatura permanece praticamente constante ao longo da espessura da peça conforme solução do problema de chapas finas propostas por Rosenthal (1941).

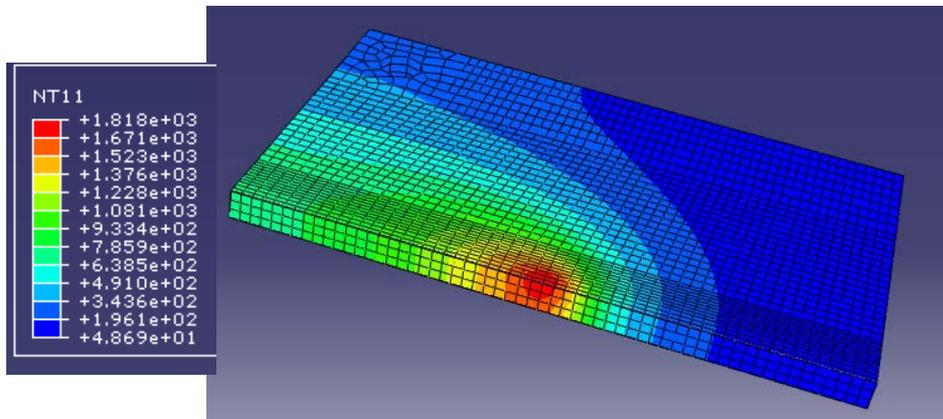


Figura 7 – Campo de temperatura em corte no sentido longitudinal após 25 s.

O ciclo térmico para um ponto situado na superfície da junta soldada a 3 mm do centro do cordão de solda é mostrado na figura 8. Os ciclos térmicos sofridos a cada ponto do material soldado determinam as transformações microestruturais, e conseqüentemente as propriedades esperadas para uma junta. A temperatura máxima atingida para este ponto foi 1391°C no tempo de 25s.

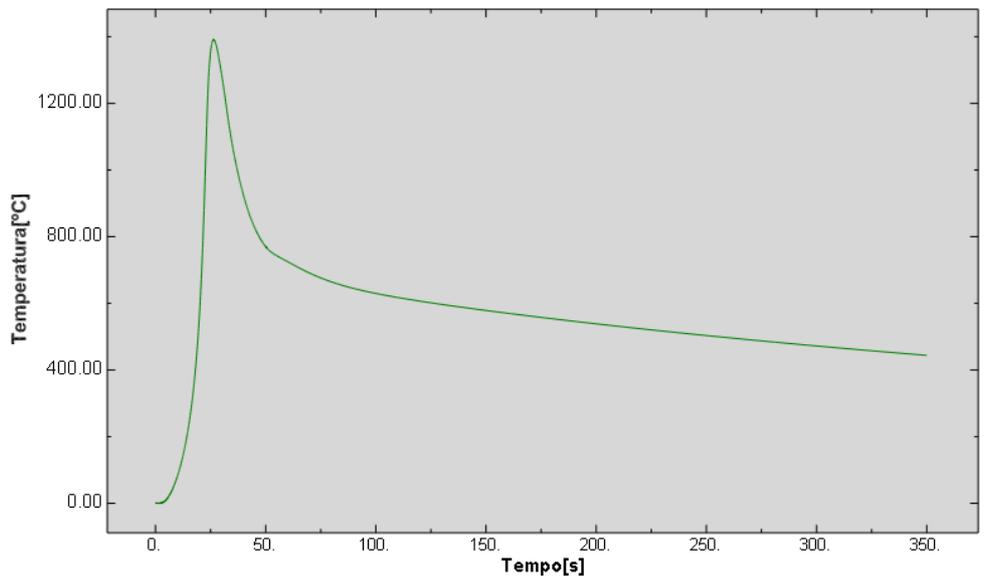


Figura 8 – Ciclo térmico de um ponto a 3 mm do centro do cordão de solda.

5. CONCLUSÕES

A determinação do campo de temperaturas em uma junta soldada é de grande importância para análise das tensões residuais. 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 ($\gamma-\alpha$). Essa distribuição de temperatura servira de base para obtenção das tensões residuais. Este Campo de temperatura deverá ser comprovado através de procedimento experimental para validação do mesmo.

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

- Binda, B., Capello, E. and Previtali, B., 2004, “A semi-empirical model of the temperature field in the AISI 304 laser”, welding Journal of Materials Processing Technology. Vol 155, pp. 1235–1241.
- Bracarense, A. Q., 2000, “Processo de Soldagem TIG – GTAW”, Universidade Federal de Minas Gerais. DEM, Belo Horizonte - MG, pp. 1-22. 1 Abr 2009, < <http://www.infosolda.com.br/download/61dpb.pdf>.>
- Chon, L. T. and Chin, M. T., 1993, “Heat Flow in Fusion Welding - Parametric Effects”, ASM HANDBOOK. Vol 6, pp. 46-53.
- 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).
- Depradeux, L. and Jullien, J. F., 2003, “Experimental and numerical simulation of thermomechanical phenomena during a TIG welding process”, International Conference on Thermal Process Modelling and Computer Simulation N°2, Nancy, Vol. 120, pp. 697-704.
- Fassani, R. N. S. and Trevisan, O. V., 2003, “Analytical Modeling of Multipass Welding Process with Distributed Heat Source”, Journal of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng. Vol. XXV, No. 3, pp. 302-305.
- Fonseca, A. S., 2004, “Soldagem TIG”, SENAI - Centro de Formação Profissional “Aloysio Ribeiro de Almeida.Varginha-MG, pp. 6-29. 1 Abr 2009, <www.oxigenio.com/oxi/dbc/download_senai_soldagem_tig.htm>.
- 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.
- Gonçalves, C. V., Vilarinho, L. O., Scotti, A. and Guimarães, G., 2006, “Estimation of heat source and thermal efficiency in GTAW process by using inverse techniques”, Journal of Materials Processing Technology . Vol. 172, pp. 42-51.
- Goyal, V. K., Ghosh, P. K. and Saini, J. S., 2009, “Analytical studies on thermal behaviour and geometry of weld pool in pulsed current gas metal arc welding”, Journal of materials processing technology. Vol. 209, pp.1318-1336.
- 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.
- Modenesi, P. J, Marques, P. V and Santos, D. B., 2006, “Introdução à Metalurgia da Soldagem”. Universidade Federal de Minas Gerais. DEM, Belo Horizonte - MG, Cap. 3. pp 1-29.
- Ramanzini, R. and Paucar Casas, W. J., 2006, “Distribuição do Campo de Temperaturas num Protótipo Virtual de Junta Soldada Multipasse”, 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. PR, Brasil. pp. 7791-7800.
- Rosenthal, D., 1941, “Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting”, Weld. J. Vol. 20, pp. 220–234.
- 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.

NUMERICAL DETERMINATION OF TEMPERATURE FIELD OF A WELDED JOINT STEEL ASTM AH-36

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. *The Temperature Field serves as the basis for predicting the levels of residual stresses in a welded joint. In order to determine it numerically we used a rectangular plate of steel ASTM AH-36 with 60 mm x 50 mm and 2,5 mm thick, welded by TIG process. For the simulate the process, we used a commercial application based on the finite element method (FEM). Through the MEF, we considered the aspects that make the mathematical modeling of complex welding process, such as: physical and mechanical properties of materials as a function of temperature, the transience and speed of the welding process, the phase transformation of material, the different mechanisms of heat exchange with the environment (convection and radiation). The heat source used in this analytical study of the double ellipsoid proposed by Goldak to model the heat input. This study provides the basis for determining the residual stresses that cause several disadvantages in manufacturing equipment, such as formation of weld crack, stress corrosion and dimensional instability.*

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