

ANÁLISE TÉRMICA DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG VIA ELEMENTOS FINITOS

Alexandre Campos Bezerra

acbezerra@mecanica.ufu.br

Domingos Alves Rade

domingos@ufu.br

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2160 – Campus Santa Mônica – Bloco 1M – Uberlândia/MG – CEP 38400-902

Resumo: *O processo de soldagem TIG tem por princípio criar e manter um arco elétrico entre um eletrodo de tungstênio não-consumível e a peça de trabalho, que são protegidos da oxidação por um fluxo contínuo de gás inerte, aplicando-se com ou sem o uso de material de adição. Neste tipo de soldagem, os ciclos térmicos envolvidos são responsáveis pela geração de tensões residuais que, por sua vez, ocasionam diversos fenômenos que vão desde a distorção da peça de trabalho até a sensitização da mesma. Assim, diversos pesquisadores têm desenvolvido estudos no intuito de avaliar e minimizar a ocorrência de tensões residuais devidas ao ciclo térmico da soldagem. Neste estudo preliminar, que é parte integrante de um projeto que visa a análise das tensões residuais na soldagem, é realizada uma modelagem térmica da soldagem TIG autógena, ou seja, sem material de adição, em uma placa de aço inoxidável austenítico AISI 316L. Utiliza-se o código comercial de elementos finitos ANSYS®. A placa é modelada e discretizada com um elemento finito do tipo casca que, apesar de ser um elemento tridimensional, tem capacidade de condução de calor somente no plano. A modelagem da fonte de calor é discutida. Para maior fidelidade à condição real de soldagem, são consideradas as variações das propriedades termofísicas do material (condutividade térmica, calor específico e densidade) com a temperatura, o que leva a uma análise não-linear. Além da transferência de calor por condução, são levadas em conta as perdas de calor por convecção natural e radiação. As equações do fluxo e transferência de calor utilizadas são expostas. Uma análise transiente é conduzida, a fim de se obter o campo de temperatura em função do tempo. Os resultados numéricos obtidos apresentam uma boa correlação com resultados experimentais disponíveis na literatura, comprovando a viabilidade e eficiência do método dos elementos finitos na simulação do ciclo térmico deste tipo de soldagem.*

Palavras-chave: Soldagem TIG, elementos finitos, modelagem térmica.

1. INTRODUÇÃO

A soldagem é um processo de união amplamente difundido mundialmente. A soldagem TIG (também conhecida como GTAW – Gas Tungsten Arc Welding) é um processo de soldagem bastante utilizado e, contrariamente a outros processos como o laser e feixe de elétrons, só provoca a fusão do metal, causando apenas uma vaporização muito localizada (Depradeux, 2004). Em geral, durante este processo, ocorre forte aquecimento de certas regiões das peças a serem unidas, enquanto que o restante destas permanecem a temperaturas bem inferiores (Modenesi, 2001), havendo assim uma distribuição de temperatura não-uniforme e transiente. Desta forma, com a tendência natural de dilatação das partes aquecidas, a qual é restringida pelas regiões adjacentes menos aquecidas, são geradas deformações elásticas e plásticas não uniformes. Estas últimas são as responsáveis por grande parte das tensões residuais de soldagem. Contudo, as transformações de

fase do material, que levam a variações de volume (expansões e contrações), também geram tensões residuais.

Com base no exposto, a obtenção do campo transiente de temperatura torna-se o primeiro passo a ser realizado para a determinação do campo de tensões residuais. Diversos trabalhos expõem o problema, onde são propostas diferentes formas e considerações para solucioná-lo. Inicialmente foram propostos métodos analíticos, como o de Rosenthal (1941), onde é considerada uma fonte de calor concentrada. Segundo Depradeux (2004), estes modelos analíticos são bem adaptados quando se considera o tamanho da zona fundida muito pequena em comparação com as dimensões da peça, apesar de que novas soluções analíticas estão sendo propostas, as quais levam em consideração uma fonte de calor distribuída (Nguyen et al., 1999; Fassani e Trevisan, 2003). A resolução do problema utilizando métodos numéricos tem sido muito utilizada atualmente, especialmente o método dos elementos finitos (MEF). O MEF permite levar em consideração as não-linearidades das propriedades termofísicas do material (condutividade térmica, calor específico e densidade), que dependem da temperatura, as trocas de calor com o meio (convecção e radiação), além da possibilidade de modelar estruturas de geometrias complexas (Depradeux, 2004). Desde as primeiras simulações, como a de Hibbitt e Marcal (1973), a complexidade e a performance dos modelos tem evoluído muito, principalmente devido aos avanços tecnológicos. Durante esta evolução foram gerados desde modelos bidimensionais da seção transversal da estrutura (Papazoglou e Masubuchi, 1982; Free e Goff, 1989; Hong et al., 1998) até modelos tridimensionais transientes completos com propriedades não-lineares variando com a temperatura (Fricke et al., 2001; Francis, 2002; Depradeux, L., 2004).

Este trabalho visa a obtenção do campo de temperatura transiente devido a um processo de soldagem TIG autógeno (sem material de adição) em uma placa de aço inoxidável austenítico AISI 316L. Para tanto, é utilizado o MEF com um elemento de casca tridimensional. A exatidão dos resultados obtidos é evidenciada a partir de comparação com resultados experimentais extraídos da literatura.

2. ANÁLISE TÉRMICA

Durante a soldagem, uma fonte de elétrica gera uma diferença de potencial U entre o eletrodo e a peça a ser soldada. Esta diferença de potencial induz a formação de um arco elétrico, percorrido por uma corrente I . A potência total gerada é dada pela multiplicação destes dois parâmetros. No entanto, devido a perdas por diferentes fatores, como a convecção e radiação no arco e no eletrodo, somente uma parte desta potência é realmente aproveitada para a fusão do material, tornando necessária a adoção do rendimento η , também conhecido como eficiência do arco. Assim, a entrada real de calor pode ser expressa por:

$$Q = \eta.U.I \quad (1)$$

A equação do fluxo de calor na peça é não-linear devido ao fato de as propriedades termofísicas dos materiais serem dependentes da temperatura. Sendo assim, o balanço de energia para o fluxo de calor conduz à relação (Rodeiro, 2002):

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial t} = Q + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (2)$$

onde ρ é a densidade, c é o calor específico, Q é a entrada de calor (Equação 1), K_x , K_y e K_z são os coeficientes de condutividade térmica nas três direções, T é a temperatura e t é o tempo.

As perdas de calor por convecção e radiação são avaliadas usando as seguintes equações (Depradeux, 2004):

$$q_c = h(T - T_\infty) \quad (3)$$

$$q_r = \varepsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4) \quad (4)$$

onde h é o coeficiente de convecção, T_∞ é a temperatura ambiente, ε é a emissividade da superfície do corpo e σ é a constante de Stefan-Boltzmann.

Para levar em conta a mudança de fase ocorrida durante o processo, ou seja, o calor latente, a entalpia H pode ser especificada através da seguinte equação:

$$H = \int \rho c dT \quad (5)$$

Um ponto muito importante para a simulação da soldagem é a modelagem da fonte de calor ou, mais especificamente, a distribuição da entrada de calor. Dentre as distribuições mais utilizadas, estão a repartição constante sobre um disco de raio R_d , a repartição gaussiana infinita e a repartição gaussiana finita sobre um raio R_g . Estas três estão ilustradas na Figura 1.

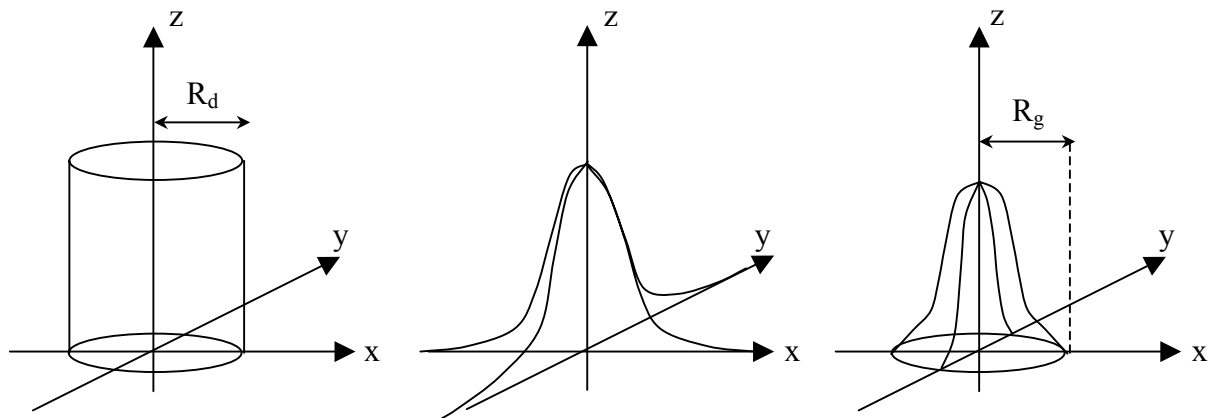


Figura 1. Exemplos de distribuições de entrada de calor durante a soldagem (Depradeux, 2004)

3. MODELAGEM COMPUTACIONAL

A modelagem computacional é realizada no código de cálculo ANSYS[®], o qual é baseado no método dos elementos finitos. A peça a ser modelada é uma placa de 0,250 x 0,160 x 0,010 m de aço inoxidável austenítico AISI 316L. As propriedades deste material estão apresentadas na Tabela 1.

As perdas por convecção e radiação são consideradas no modelo, sendo o coeficiente de convecção h de 10 W/K e a emissividade ε de 0,75. A temperatura ambiente é considerada de 301 K.

O elemento utilizado na discretização do modelo é o SHELL57, que é um elemento de casca 3D com capacidade de condução térmica em seu plano e que possui quatro nós com um grau de liberdade por nó (temperatura). O modelo discretizado está ilustrado na Figura 2. A malha foi refinada na zona da solda, tendo elementos quadrados de 0,001 m, tornando-se gradativamente mais grosseiros, chegando a elementos retangulares de 0,004 x 0,0085 m nas bordas da placa.

Tabela 1. Propriedades termofísicas dependentes da temperatura do aço AISI 316L.

Temperatura (K)	Condutividade Térmica (W/mK)	Densidade (kg/m³)	Calor Específico (J/kg/K)
293	14,0	8000	450
373	15,2	7970	490
473	16,6	7940	525
573	17,9	7890	545
673	19,0	7850	560
773	20,6	7800	570
873	21,8	7750	580
973	23,1	7700	595
1073	24,3	7660	625
1173	26,0	7610	650
1273	27,3	7570	660
1473	29,9	7450	677

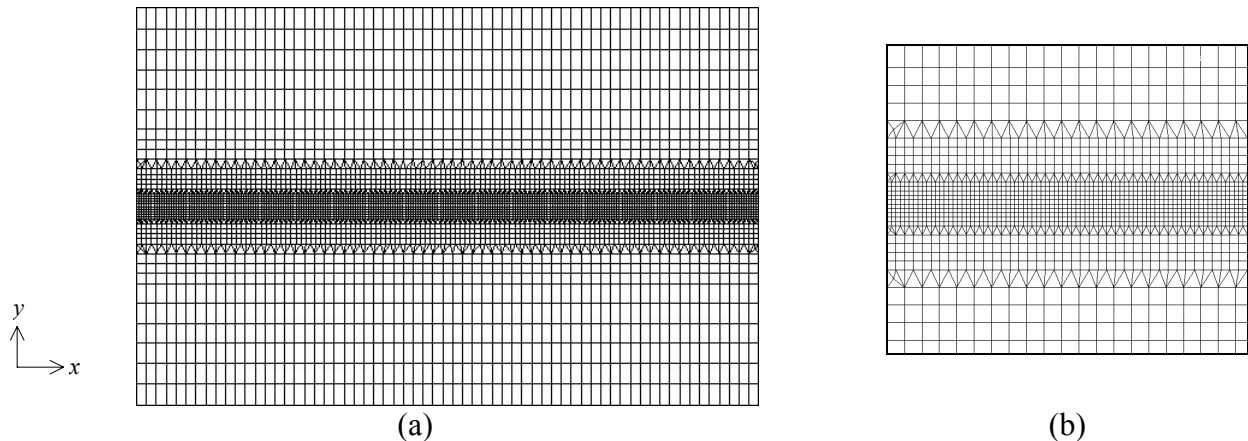


Figura 2. Modelo da placa a ser soldada (a) e zoom na região refinada (b).

O elemento SURF152 foi utilizado para incluir o efeito da radiação térmica. Este elemento necessita de um nó afastado da base de elementos para simular a radiação. Desta forma, foi criado um nó no espaço ao centro da placa a uma altura de 1,0 m, ao qual foi aplicado o valor da temperatura ambiente.

O processo de soldagem simulado foi o TIG. Os parâmetros de soldagem utilizados estão mostrados na Tabela 2. O calor gerado pela fonte de soldagem foi distribuído em 29 nós conforme ilustrado na Figura 3.

Tabela 2. Parâmetros de soldagem utilizados na simulação.

Corrente	Tensão	Rendimento	Velocidade de Soldagem
150 A	10 V	70 %	0,001 m/s

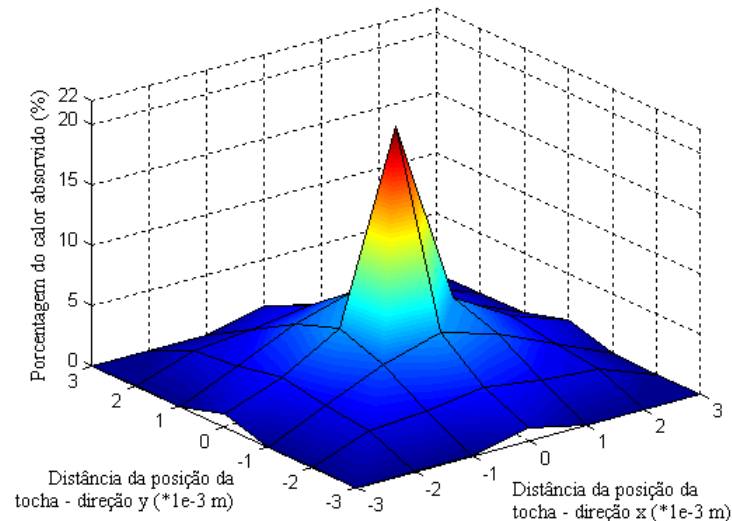


Figura 3. Distribuição do fluxo de calor em relação à posição da fonte (tocha).

A simulação do movimento da fonte de calor é realizada da seguinte forma: à medida que a tocha se move, o fluxo de calor é aplicado no conjunto de nós subsequente. Como, em princípio, o programa ANSYS[®] não realiza este movimento automaticamente, foi necessária a elaboração de duas rotinas em MATLAB[®] para escrever um arquivo de entrada que realiza esta tarefa. A primeira gera a lista de nós a serem percorridos pela fonte de calor e a segunda aplica sequencialmente o fluxo de calor ao longo do tempo, de acordo com a velocidade de soldagem adotada.

A solda tem início a 0,010 m de distância da aresta $x=0$ e término a 0,010 m da aresta $x=0,250$ m, tendo o cordão de solda, portanto, um comprimento total de 0,230 m.

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos numericamente foram comparados com os resultados experimentais apresentados por Depradeux (2004). A seção transversal utilizada para comparação dos resultados, bem como os pontos de comparação de resultados, estão ilustrados na Figura 4. Note-se que esta seção está a 0,085 m do início do cordão de solda. Desta forma, a fonte de calor, que se move a 0,001 m/s, passa nesta seção após 85 s de soldagem.

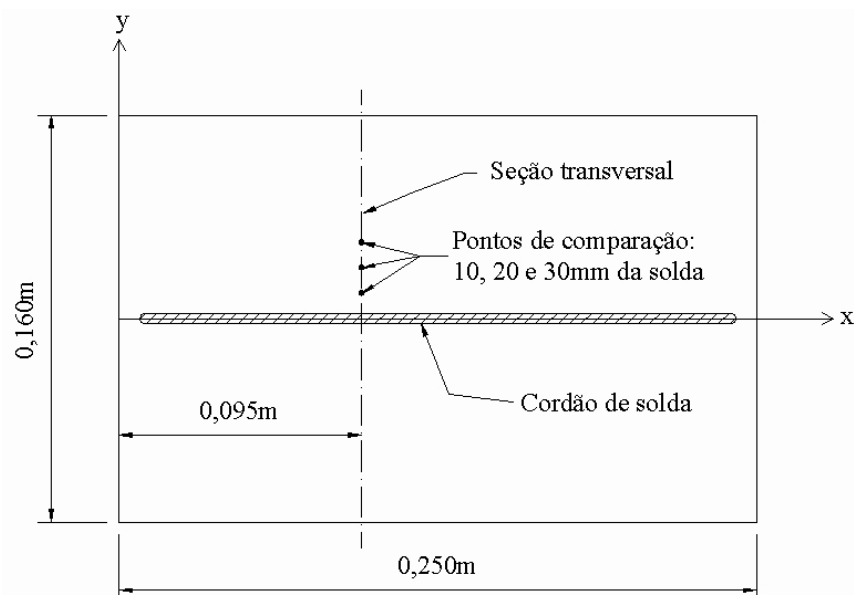


Figura 4. Seção transversal utilizada para comparação dos resultados.

A Figura 5 mostra a comparação entre os resultados numéricos e experimentais da evolução da temperatura na face superior da placa para os pontos especificados na Figura 4, além de um ponto sobre a linha de fusão.

Na Figura 5, é possível verificar uma ótima concordância entre os resultados numéricos e experimentais, havendo um desvio máximo de 4,35 % para o resultado no ponto a 0,010 m da linha de fusão, 3,63 % para o ponto a 0,020 m e 2,35 % para o ponto a 0,030 m. Estas diferenças são referentes ao início do aquecimento nos respectivos pontos, sendo que a temperatura começa a subir no experimento antes que na simulação. Isto se deve ao fato de o movimento da tocha ser discreto no modelo e contínuo na soldagem, pois, na modelagem, a tocha “salta” de um nó para outro a cada instante de tempo, ao invés de se movimentar continuamente.

Uma superfície representando do perfil bidimensional de temperatura ao longo da seção transversal a 0,095 m da aresta $x=0$ (Figura 4) em função do tempo é apresentada na Figura 6. Note-se que à medida que se distancia da linha de fusão, a evolução da temperatura fica mais suave. Tanto que, nesta seção, a temperatura no ponto mais distante da linha de fusão (0,08 m) só começa a subir mais de 15 s após da passagem da tocha de soldagem. Verifica-se também que há uma tendência natural de estabilização do perfil de temperatura, o qual entra em regime após mais de 2000 s do início da soldagem, a uma temperatura de aproximadamente 415 K.

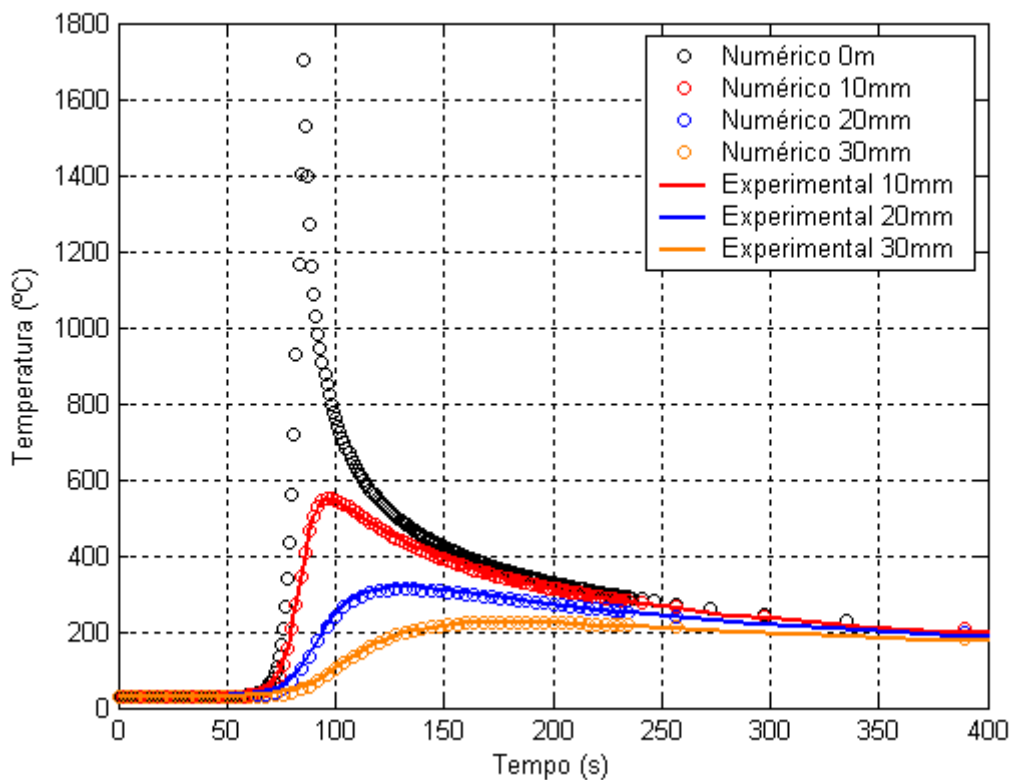


Figura 5. Evolução da temperatura em função do tempo para a seção $x=0,095$ m em diferentes pontos ($y=0$; 0,010 m; 0,020 m; 0,030 m).

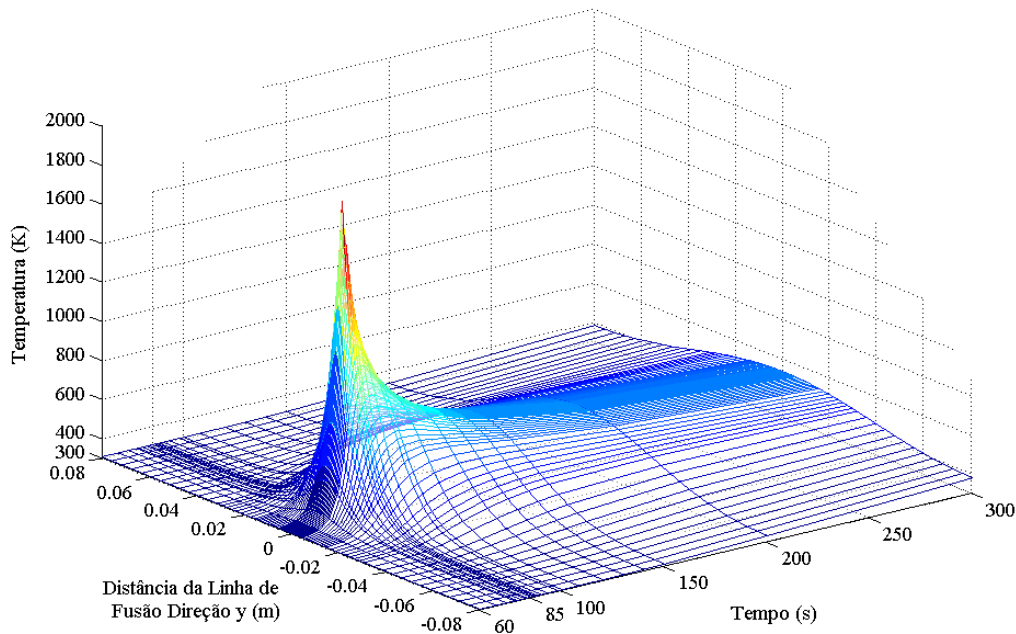


Figura 6. Perfil de temperatura na seção transversal $x = 0,095\text{m}$ em função do tempo.

A Figura 7 ilustra o campo de temperatura na placa, na forma de isovalores, para diferentes instantes de tempo. Pode-se verificar, de forma coerente, a evolução do campo de temperatura até o instante anterior ao “desligamento” da fonte de calor. É possível notar também o efeito de borda, principalmente através do isovalor de 150°C , o qual, caso a placa fosse de comprimento infinito, deveria ter um formato elíptico (conforme os outros isovalores). No entanto, como a placa tem dimensões finitas, nas regiões próximas às arestas ocorrem concentrações de calor devido ao fato de a transferência de calor por convecção nas bordas ser bem inferior à condução que há nas regiões afastadas das bordas, no interior da placa.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma simulação computacional, baseada no MEF, do problema térmico do processo de soldagem TIG autógeno (sem deposição de material) em uma placa de aço inoxidável austenítico AISI 316L. Uma análise térmica transiente foi realizada e o campo de temperatura em função do tempo foi obtido. A não-linearidade das propriedades do material foi levada em consideração, bem como as perdas de calor por convecção e radiação.

Os resultados numéricos obtidos e os experimentais da literatura apresentaram uma ótima concordância. Este resultado confirma a viabilidade e a eficiência do método dos elementos finitos na simulação térmica da soldagem, além de estimular novos estudos, principalmente para obtenção do campo transiente de tensões térmica e de tensões residuais através de uma análise estrutural. No entanto, deve-se lembrar que esta análise é altamente não-linear devido ao fato de haver o efeito da plasticidade e encruamento, além da dependência das propriedades termomecânicas com a temperatura.

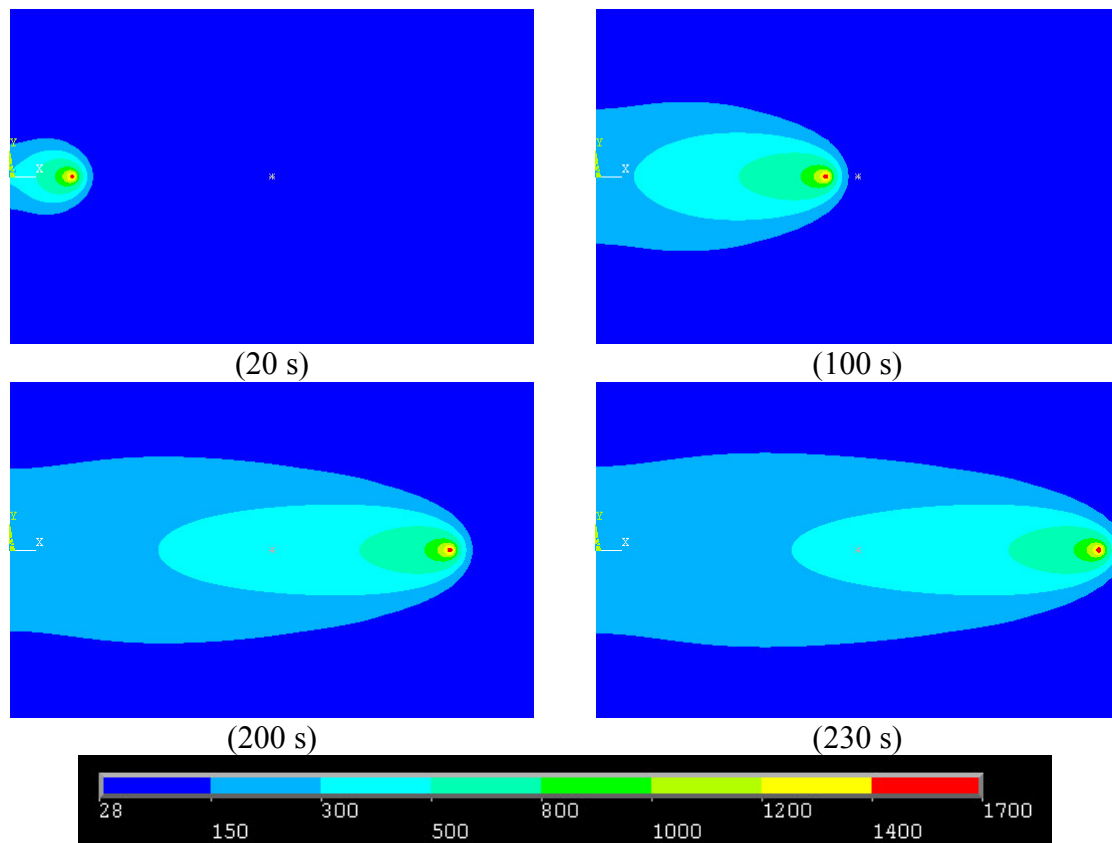


Figura 7. Campo de temperatura na placa modelada em diferentes tempos (temperatura em °C).

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq e a CAPES pelo apoio financeiro.

7. REFERÊNCIAS

- Depradeux, L., 2004, "Simulation Numerique du Soudage – Acier 316L – Validation sur Cas Tests de Complexite Croissante", Tese de Doutorado, Ecole Doctorale des Sciences de L'Ingenieur de Lyon, L'Institut National des Sciences Appliquees de Lyon;
- Fassani, R.N.S e Trevisan, O.V., 2003, "Analytical Modeling of Multipass Welding Process with Distributed Heat Source", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. XXV, No. 3, pp. 302-305;
- Francis, J.D., 2002, "Welding Simulations of Aluminum Alloy Joints by Finite Element Analysis", dissertação de mestrado, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University;
- Free, J.A. e Goff, R.F.D.P., 1989, "Predicting Residual Stresses in Multi-Pass Weldments with the Finite Element Method", Computers and Structures, vol. 32, n. 2, pp. 365-378;
- Fricke, S., Keim, E. e Schmidt, J., 2001, "Numerical Weld Modeling – a Method for Calculating Weld-Induced Residual Stresses", Nuclear Engineering and Design, vol. 206, pp. 139-150;
- Hibbitt, H.D. e Marcal, P.V., 1973, "A numerical, thermo-mechanical model for the welding and subsequent loading of a fabricated structure", Computers and Structures, Vol. 3, 5, pp. 1145-1174;
- Hong, J.K., Tsai, C.-L. e Dong, P., 1998, "Assessment of Numerical Procedures for Residual Stress Analysis of Multipass Welds", Welding Journal, vol. 77, n. 9, pp. 372-382;
- Modenesi, P. J., 2001, "Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico", Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais;

- Nguyen, N.T., Ohta, A., Matsuoka, K., Suzuki, N. e Maeda, Y., 1999, “Analytical Solution of Double-Ellipsoidal Moving Heat Source and Its Use for Evaluation of Residual Stresses in Bead-on-Plate”, International Workshop on Fracture Mechanics & Advanced Materials, Sydney University, Dec. 8-10;
- Papazoglou, V.J. e Masubuchi, K., 1982, “Numerical Analysis of Thermal Stresses during Welding Including Phase Transformation Effects”, Journal of Pressure Vessel Technology, vol. 104, pp. 198-203;
- Rodeiro, P.F., 2002, “Análise de Distribuição de Temperaturas e Tensões Residuais em Soldas do Tipo Ring-Weld”, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo;
- Rosenthal, D., 1941, “Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting”, Welding Journal, N. 20, pp. 220-234.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

THERMAL ANALYSIS OF TIG WELDING USING FINITE ELEMENT METHOD

Alexandre Campos Bezerra

acbezerra@mecanica.ufu.br

Domingos Alves Rade

domingos@ufu.br

Federal University of Uberlândia – School of Mechanical Engineering, 2160 João Naves de Ávila Av. – Santa Mônica – Uberlândia/MG - Brazil

Abstract: *TIG welding is based upon the creation and maintenance of an electric arc between a non-consumable tungsten electrode and the working part, which are protected from oxidation by a continuous flux of an inert gas. TIG welding can be employed with or without filler metal. In this type of welding process, the involved thermal cycles are responsible for the generation of residual stresses that, in turn, bring up several other phenomena like distortion and sensitizing. Thus, several researchers have been carrying out studies in order to evaluate and to minimize the occurrence of welding residual stresses. In this preliminary study, which is part of a broader project that aims the analysis of welding residual stresses, a thermal modeling is performed to analyze the TIG welding process without filler metal on a stainless steel AISI 316L plate. Finite element commercial code ANSYS® is used. The plate is meshed using shell elements with in-plane thermal conduction capability. Heat source modeling is discussed. For a better matching to real welding condition, temperature dependent thermo-physical material properties are considered (thermal conductivity, specific heat and density), which leads to a non-linear analysis. Convection and radiation heat losses are also taken into account. The heat transfer equations used in the analysis are presented. A transient analysis is carried out to obtain the temperature field as a function of time. The numerical results obtained are in good agreement with experimental results found in the literature, which demonstrates the viability and efficiency of the finite element method for simulation of welding thermal cycles.*

Keywords: *TIG welding, finite element, thermal modeling.*