

TERMOGRAFIA, MUDANÇA DE FASE E PROBLEMAS INVERSOS PARA O CALCULO DO RENDIMENTO ENERGETICO EM UM PROCESSO DE SOLDAGEM TIG.

Guilherme Barros Ameloti, gui.ameloti@gmail.com

Valério Luiz Borges, vlborges@mecanica.ufu.br

Solidônio Rodrigues de Carvalho, srcarvalho@mecanica.ufu.br

Resumo. *Este trabalho apresenta uma metodologia para estudar os fenômenos térmicos da soldagem a arco elétrico com eletrodo de tungstênio (TIG) que ocorre no aço inox AISI 304. A técnica confere do método da secção áurea para resolver o problema inverso. A mesma é aplicada num modelo direto que faz o uso da equação transiente tridimensional de difusão de calor com mudança de fase e fonte móvel. O modelo leva em consideração a dependência das propriedades térmicas com a temperatura e condições de contorno de perdas de calor por convecção. A aquisição das temperaturas experimentais foi feita através de termografia, filmando a face oposta de soldagem. Conclui-se que o modelo com: mudança de fase, propriedades térmicas variando com a temperatura e perdas de calor nas faces, mostra-se eficiente para a estimativa a eficiência térmica.*

Palavras chave: Mudança de fase, problemas inversos, termografia, soldagem TIG.

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho consta um estudo térmico da soldagem TIG em chapas de aço inox, cujas temperaturas foram capturadas por sensores de contato e termografia. No estudo, propõe-se estimar o rendimento do processo através de uma técnica inversa e analisar a técnica proposta.

A soldagem TIG (sigla em inglês de Tungsten Inert Gas) é um processo de soldagem por Fusão a arco elétrico entre um eletrodo não consumível de Tungstênio que utiliza se necessário um metal de adição assim como proteção gasosa de um agente protetor de Argônio ou Helio. Largamente utilizada nos processos de fabricação com alta precisão de solda destacando neste caso o aço inox AISI 304. (MONDANESI e MARQUES, 2006).

Gonçalves Vilarinho e Guimarães (2006) apresentaram um trabalho para estudar os fenômenos térmicos da soldagem a arco elétrico com eletrodo de tungstênio (TIG) que ocorre no aço inox AISI 304. A técnica utiliza secção áurea e *simulated annealing* (SA) para resolver o problema inverso. A técnica foi aplicada em dois diferentes modelos diretos. A aquisição das temperaturas experimentais foi feita através de termopares acoplados à face oposta de soldagem.

O objetivo geral desta pesquisa é realizar uma análise térmica do processo de soldagem TIG aplicado a aços inoxidáveis AISI 304. Nesse sentido foi utilizado um modelo numérico que permite simular o processo dito, sendo este transiente e considerando a mudança de fase sólido/líquido e perdas de calor por convecção nas faces.

Com esse estudo, será analisada a prática de usar termografia como método alternativo ao uso de termopares acoplados à peça. Pela técnica ser capaz de fornecer um mapa térmico através da imagem termográfica e não somente temperaturas pontuais, acredita-se que ela seja capaz de estimar as grandezas de interesse com acurácia.

Espera-se que este trabalho possa determinar a eficiência do processo de soldagem para um melhor controle do mesmo, além de prever o aspecto da solda através da determinação da frente de fusão. Caso seja confirmada a metodologia, o uso alternativo de termografia possibilita a captura das temperaturas experimentais em casos de temperaturas extremas como, por exemplo, em chapas finas.

2. METODOLOGIA

A quantidade efetiva de calor absorvido pela peça e conseqüentemente a eficiência do processo, é um interesse comum nos diversos processos de soldagem. Nestes, os efeitos de difusão de calor são sempre severos, uma vez que o calor entregue à peça metálica é suficiente para mudá-la de fase, ultrapassando freqüentemente seu ponto de fusão. Neste sentido, o controle do calor entregue durante o processo de soldagem é vital para assegurar a qualidade da solda, compreendendo os efeitos do processo sob o material soldado como: zona afetada pelo calor e profundidade da solda. Entretanto, a intensidade do calor absorvido e a distribuição de temperatura ao longo de toda a peça são indeterminados.

Sendo assim, esse é o caminho proposto neste estudo, auxiliar a compreensão dos efeitos da soldagem sob o material, em termos de eficiência de calor do processo e distribuição tridimensional das temperaturas.

Lembrando ainda que, o calor absorvido é uma incógnita ao experimento, resta apenas a possibilidade de se capturar as temperaturas superficiais ao longo do processo, classificando assim, o problema proposto, um problema inverso. “Se o fluxo de calor é desconhecido então o problema térmico é definido como um problema inverso de condução de calor. Ao contrário, se $q''(x,y,z)$ é conhecido, assim como todas as outras condições de contorno, estabelece-se o problema direto.”(SOUZA, 2009).

Ademais, o algoritmo de otimização usado é o da técnica da secção áurea que minimiza uma função objetivo relacionada com informações de temperaturas experimentais.

O DPT (Determinação de Propriedades Termofísicas) é um *software* desenvolvido e em estágio de constante atualização no LTCM - Laboratório de Transferência de Calor e Massa – UFU (BORGES, 2008). Uma vez que o DPT tem diversas funções de pós-processamento e tem aplicação na solução de problemas diretos e inversos de condução de calor opta-se por usá-lo.

Modelagem térmica de um processo de soldagem: problema direto.

A Figura 1 apresenta a modelagem do problema térmico. A entrega de calor durante o processo de soldagem é indicada por uma distribuição de fluxo de calor $q''(x, y, z)$ sobre uma área circular definida pelo diâmetro da poça de fusão. Nesta modelagem considera-se que todas as faces externas da peça estão expostas a um meio convectivo e, portanto sujeitas a um coeficiente de transferência de calor por convecção natural.

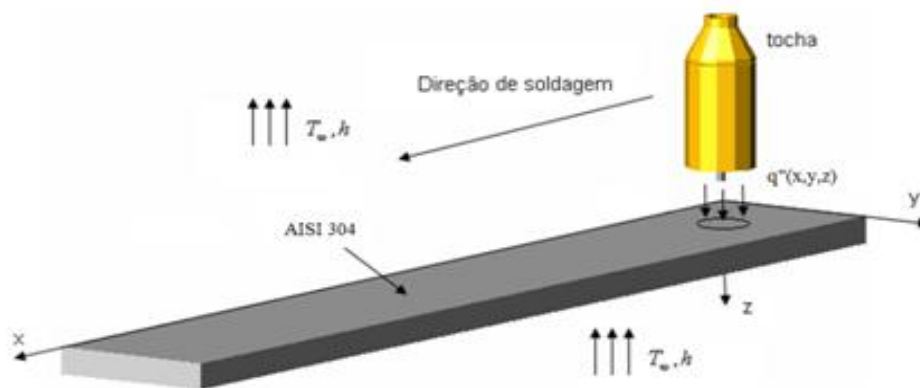


Figura 1 – Modelo térmico adotado (CARVALHO, 2006)

A equação governante, segundo Özisik (1993), para o modelo térmico tridimensional transiente é descrito pela equação da difusão baseada na entalpia pode ser escrita como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \rho L \frac{\partial f}{\partial t} \quad (1)$$

onde k é a condutividade térmica, ρ a densidade, T é a temperatura, t é o tempo e x, y, z o sistema de coordenadas e H a entalpia.

Cujas condições de contorno podem ser escritas por

$$-k \frac{\partial T}{\partial \eta_i} = h(T - T_\infty) \quad (2)$$

nas regiões expostas ao meio convectivo e,

$$-k \frac{\partial T}{\partial \eta} = q''(x_v, y_v, t) \quad (3)$$

onde $q''(x, y)$ representa o fluxo de calor móvel transiente, x e y são as coordenadas da fonte de calor que são atualizadas conforme o tempo de soldagem t , η representa a normal à superfície, T a temperatura do contorno, T_∞ a temperatura ambiente e h o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Ainda Özisik (1993), para uma liga metálica, a variação da entalpia H é definida por:

$$H = \begin{cases} CT & \text{para } T < T_s \\ CT + fL & \text{para } T_s \leq T \leq T_m \\ CT + L & \text{para } T > T_m \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{material na fase sólida} \\ \text{transição sólido – líquido} \\ \text{material na fase líquida} \end{matrix}$$

onde C é o calor específico, f a fração mássica, L o calor latente, T_s a temperatura abaixo da qual o material se encontra no estado sólido e T_m a temperatura acima da qual há apenas a fase líquida do material.

Segundo Brent, Voller e Reid (1989), uma forma para estimar a fração mássica ($k+1$) durante o processo iterativo é dada por

$$f^{k+1} = f^k + \lambda \cdot \left(\frac{c}{L} \frac{A_p}{A_{p0}} (T^k - T_m) \right) \quad (4)$$

onde λ é um coeficiente de sub-relaxação ($0 < \lambda < 1$), A_p e A_{p0} são parâmetros obtidos a partir da discretização numérica da equação da Eq. (1), T_m é a temperatura de fusão do material e o índice k indica a iteração.

O método numérico selecionado para a resolução das equações de conservação, para o modelo é o método de volumes finitos. (PATANKAR, 1980).

Uma vez discretizadas as equações governantes, o problema se reduz a solução de um sistema de equações algébricas lineares. O método utilizado para a solução do sistema linear foi o método SOR (CARVALHO, 2005).

A Figura 2 ilustra um fluxograma sequencial do modelo direto.

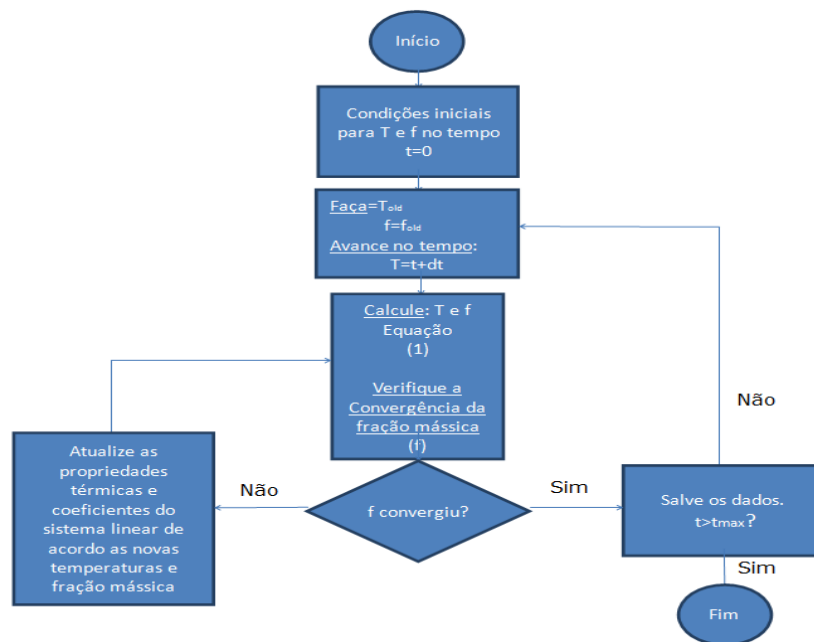


Figura 2 – Fluxograma do Modelo Direto (MAIA NETO, 2012).

Modelagem térmica de um processo de soldagem: problema inverso.

No estudo do problema térmico de soldagem proposto neste trabalho, as técnicas de otimização têm como objetivo minimizar uma função erro quadrática F_{obj} definida pelo quadrado da diferença entre as temperaturas experimentais, $Y(r_i, z_i, t)$, e as temperaturas calculadas pelo modelo teórico, $T(r_i, z_i, t)$ (CANGANI, 2010). Assim, a função a ser minimizada pode ser escrita como:

$$F_{obj} = \sum_{t=1}^{nt} \sum_{i=1}^N [Y(r_i, z_i, t) - T(r_i, z_i, t)]^2 \quad (5)$$

onde N representa o número de termopares e nt representa o período de aquecimento e/ou resfriamento do cilindro submetido ao processo de soldagem. A função objetivo F_{obj} é reduzida a partir do uso da técnica da Seção Áurea.

Obtenção das Temperaturas experimentais: Uso de termografia.

A medição direta deste campo de temperatura usando sensores de contato na interface entre a peça e o arco voltaico é extremamente complexa devido às condições térmicas extremas do processo nessa região. A termografia, por outro lado, representa uma boa solução apenas se algumas limitações forem respeitadas. (HUANG, LIU E SONG, 2007).

A Figura 3, mostra de maneira ilustrativa o que se faz com a imagem pura, obtida da câmera termográfica. Nota-se que a imagem original é corrigida e transformada em um mapa térmico do qual as posições de cada pixel da imagem corrigida compõe uma malha de pontos de temperatura.

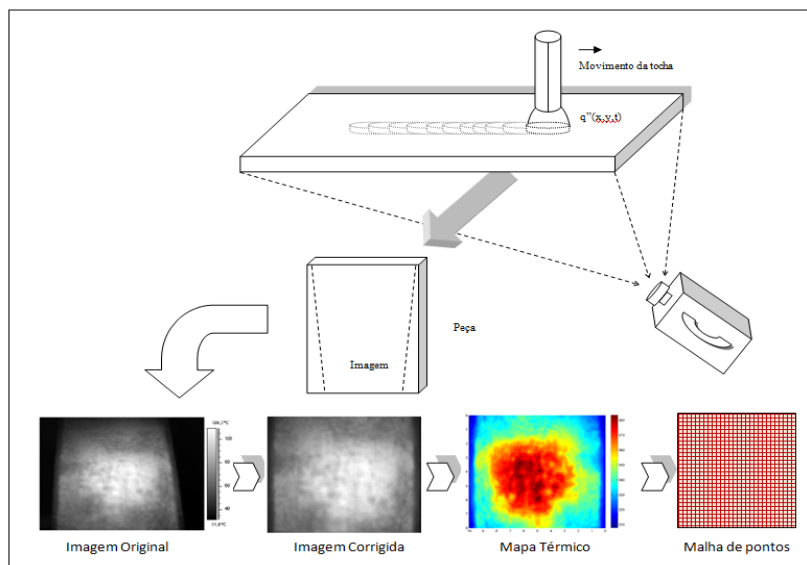


Figura 3 – Representação do Método de Obtenção das Temperaturas Experimentais

Essas são as informações necessárias para se alimentar o modelo direto e inverso, a fim de se obter o calor entregue pela peça.

3. CONCLUSÃO

Após compreender e aplicar a modelagem direta e inversa em problemas de soldagem espera-se com este trabalho ser possível determinar a eficiência térmica do processo. Assim como, validar a metodologia de uso de campos termográficos substituindo o uso de termopares.

5. REFERÊNCIAS

- BORGES, L. V., *Desenvolvimento do método de aquecimento plano parcial para a determinação simultânea de propriedades térmicas sem o uso de transdutores de fluxo de calor*. 2008. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.
- CÂNGANI, A. P. M., *Análise Térmica do Processo de Soldagem TIG de Amostras Metálicas*. 2010. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 111f.
- CARVALHO, S. R. *Determinação da temperatura na interface cavaco-peça-ferramenta durante o processo de usinagem por torneamento*. 2005. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.
- CARVALHO, S. R. *Análise térmica do processo de soldagem TIG em ligas de alumínio usando problemas inversos*. Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. 2006.
- GONÇALVES, C. V., VILARINHO, L.O., SCOTTI, A., GUIMARÃES, G. *Estimation of heat source and thermal efficiency in GTAW process by using inverse techniques*. Journal of Materials Processing Technology, Elsevier Science Ltd., v. 172, pp.42–51, 2006.
- HUANG, R. -S., LIU L.-M., SONG, G., *Infrared temperature measurement and interference analysis of magnesium alloys in hybrid laser-TIG welding process*. Material Science and Engineering A 447 (2007) 239-243.
- MAIA NETO, A. S. *Análise térmica do processo de soldagem TIG de uma junta de topo de chapas de aço inoxidável da série 304 com deposição de material*. 2012. 100f. Relatório de Qualificação. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- MONDENESI, P. J.; MARQUES, P. V. *Introdução aos Processos de Soldagem*. Apostila. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte – MG, 51pp., 2006.
- OZISIK, M.N. Heat conduction. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1993.
- PATANKAR, S. V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing Corporation. New York. 1980.
- SOUSA, P. F. B., *Estudos de Processos Térmicos Decorrentes da Usinagem: Aplicação de Problemas Inversos em Furação*, 2009, 172f, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.
- BRENT, A. D., VOLLER V. R., REID K. J., *The enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal*. Mineral Resources Research Center. University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455.