

ESTUDOS DOS CAMPOS TÉRMICOS NO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG USANDO TÉCNICAS DE PROBLEMAS INVERSOS

Alex Soares Landim¹

alexlandim@mec.ufu.br

Louriel Oliveira Vilarinho²

vilarinho@mecanica.ufu.br

Solidônio Rodrigues de Carvalho¹

srcarvalho@mecanica.ufu.br

Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva¹

metrevel@mecanica.ufu.br

1- Laboratório de Transferência de Calor e Massa e Dinâmica dos Fluidos - LTCM

2 - Laboratório para o Desenvolvimento de Processos de Soldagem - LAPROSOLDA

Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC, Universidade Federal de Uberlândia UFU
Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

Resumo: *A soldagem de chapas metálicas ocupa um papel estratégico no setor industrial, pois permite a união de aços inoxidáveis e metais não-ferrosos com ótima eficiência. Dentre as várias técnicas de soldagem disponíveis, a TIG (Tungsten Inert Gas) se destaca por ser um processo de altíssima qualidade e segurança. Neste processo, a determinação do fluxo de calor entregue a chapa durante a soldagem representa uma tarefa complexa, pois o arco de soldagem é uma fonte de calor não uniforme. Para a solução deste problema, propõe-se neste trabalho o uso de técnicas de problemas inversos em condução de calor para a determinação do aporte de calor entregue à chapa durante o processo de soldagem. Neste sentido, foram usados os códigos computacionais, INV3D e GRAD3D, que utilizam duas técnicas distintas na solução de problemas inversos: simulated annealing e gradiente conjugado, respectivamente. Ressalta-se que ambas as técnicas consideram a transferência de calor tridimensional, transiente e as trocas convectivas de calor, analisando as equações através da técnica de diferenças finitas. Para determinação do fluxo de calor foram realizados um conjunto de experimentos nos quais atribuiu-se diferentes condições de soldagem em cada ensaio. Ambas as metodologias se mostraram eficientes tanto na determinação da distribuição de temperatura como na determinação do aporte de calor. Os resultados obtidos pelos programas situam-se dentro da faixa esperada para o rendimento térmico, apesar do INV3D se mostrar mais preciso e estável para o cálculo da temperatura.*

Palavras-chave: soldagem TIG, problemas inversos, otimização, condução de calor.

1. INTRODUÇÃO

A medição ou determinação do calor imposto à uma chapa metálica submetida a um processo de soldagem é uma tarefa de alta complexidade e sujeita a erros (Vilarinho et al., 2001). A principal razão deve-se ao fato do arco de soldagem ser um arco de calor não uniforme, e possuir alto gradiente térmico cujas propriedades são altamente dependentes de qualquer variação nas condições de soldagem o que acaba dificultando a medição da área de transferência de calor e do rendimento

térmico. Na prática é muito comum o uso do rendimento térmico como simplesmente uma constante presente nos modelos teóricos, ajustada para minimizar as diferenças entre resultados teóricos e experimentais (Giedt et al. 1989).

O estudo do arco de soldagem, tanto experimental como teórico, é bastante complexo, sendo que muitos aspectos poucos compreendidos ainda permanecem. Por isso a obtenção da intensidade e forma dessa fonte de calor e dos gradientes de temperatura provocados nas peças de trabalho são, extremamente importantes para o estudo de processos de soldagem.

Um processo de soldagem largamente empregado atualmente, é o processo TIG (Tungsten Inert Gás) que é usado com sucesso para soldagem de aços inoxidáveis e metais não-ferrosos. Este processo teve grande desenvolvimento após 1940, onde usava-se inicialmente apenas hélio como gás de proteção (Gonçalves et al., 2002). Neste processo, hoje, é usado um eletrodo de tungstênio protegido por um fluxo de gás inerte que pode ser argônio, hélio ou mistura destes dois. A união de duas ou mais peças de trabalho é obtida através de um arco voltaico que é uma fonte de calor móvel e muito intensa como já mencionado anteriormente. Observa-se que nem toda a potência necessária à obtenção do arco voltaico é absorvida pela peça soldada. A diferença entre elas se deve às perdas de calor durante o processo. Uma das alternativas para a obtenção do fluxo de calor que efetivamente é entregue à peça é a aplicação de técnicas de solução de problemas inversos em transferência de calor. Nestas técnicas o estudo teórico é feito através do modelamento do arco, que pode ser feito através de modelos analíticos ou numéricos. O estudo experimental do arco é realizado principalmente de forma indireta, uma vez que as condições no arco são extremamente agressivas e métodos diretos tendem a perturbar de forma significativa as condições do arco. (Vilarinho et al., 2001). Nota-se a estreita relação existente entre o problema inverso e o fluxo de calor em soldagem, uma vez que medindo-se a temperatura na face oposta à soldagem, pode-se conhecer o fluxo de calor efetivamente entregue à chapa. (Vilarinho et al., 2001). Assim propõe-se neste trabalho o estudo e a implementação de técnicas de problemas inversos no programa computacional para o cálculo de temperaturas tridimensional desenvolvido por Carvalho et al., (2003). Propõe-se também a comparação dos resultados obtidos por este programa, que utiliza a técnica de problemas inversos Simulated Annealing, com o código computacional desenvolvido por Lima, (2001) para a obtenção do fluxo de calor no processo de soldagem TIG, baseado na técnica do gradiente conjugado e equação adjunta. Além da otimização de uma técnica experimental mais adequada, que leve em consideração os efeitos de mudança de fase, perdas de calor por radiação e efeitos convectivos.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Problema Direto

O problema térmico decorrente do processo de soldagem TIG pode ser representado pela Fig. (1). Onde o campo de temperatura resultante é obtido através da solução da equação da difusão de calor, considerando como excitação térmica uma fonte móvel de calor ao longo da direção y , estando as superfícies da placa sujeitas a perdas de calor convectivas.

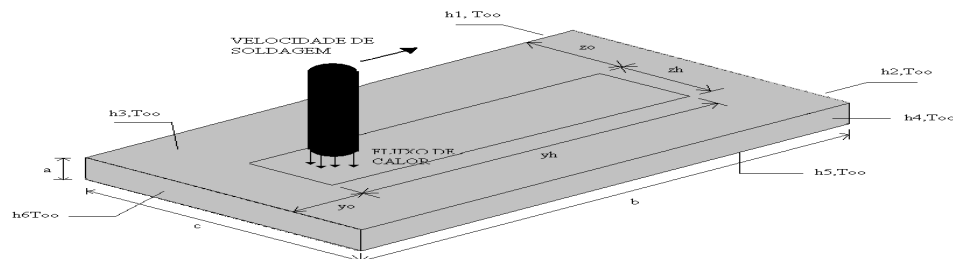


Figura 1: Modelagem do problema térmico tridimensional

Assim, se uma fonte de calor com uma velocidade constante é imposta a uma placa inicialmente a uma temperatura T_0 e considerando as propriedades térmicas da placa constante, pode se dizer que:

$$\nabla^2 T(x, y, z, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \quad (1)$$

na região R ($0 < x < a$, $0 < y < b$, $0 < z < c$) em $t > 0$, sujeito à condição inicial

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (2)$$

e às condições de contorno nas superfícies

$$-k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} = \begin{cases} q(y, z, t) \text{ em } S_1 \text{ (} 0 \leq y \leq y_H, 0 \leq z \leq z_H \text{)} \\ h_3 [T_\infty - T(x, y, z, t)] \text{ em } S_2 \text{ (} y, z \in S \mid (y, z) \notin S_1 \text{)} \end{cases} \quad (3)$$

na qual S representa a superfície dada por ($0 \leq y \leq b$, $0 \leq z \leq c$). As condições de contorno das superfícies remanescentes, Fig. (1), podem ser escritas como

$$-k \frac{\partial T}{\partial n_i} = h_i [T - T_\infty] \text{ para } x = a, t > 0 \quad (4)$$

onde o índice i (1,2,4,5,6) representa a i -ésima superfície, n_i representa a normal à essa superfície e h_i o respectivo coeficiente de transferência de calor.

Ainda, nas equações acima α é a difusividade térmica, k a condutividade térmica, T_∞ é a temperatura ambiente. A fonte de calor móvel imposta na chapa é representada pelo parâmetro $q(x,y,z)$ cujo o valor da intensidade é permitido variar ao longo da superfície e do tempo.

2.3 Problema Inverso

A técnica de problemas inversos usada neste trabalho baseia-se no método do gradiente conjugado e da equação adjunta proposta inicialmente por Alifonov (1974) e expandida por Jarny et al, (1991), e da técnica do Simulated Annealing que é uma técnica derivada inicialmente do processo de recozimento de metais. (Saramago, et al, 1999).

As técnicas utilizadas buscam através de um processo iterativo de minimização de um funcional o fluxo de calor que flui para a peça a partir de temperaturas medidas na face oposta à zona afetada pelo processo de soldagem a técnica do gradiente conjugado e da equação adjunta pode ser encontrada com mais detalhes em Lima e Silva et al, (2001), e sendo que

$$F = (Y(y, z) - T(y, z))^2 \quad (5)$$

é o funcional utilizado pela técnica Simulated Annealing, esta função representa o erro quadrático definida pelo quadrado da diferença entre as temperaturas medidas na ferramenta, Y , e as temperaturas calculadas pelo método teórico da Eq. (5). Pode-se então estimar o fluxo de calor através de um algoritmo computacional que inclui um procedimento iterativo para solução do problema direto, o problema inverso, problema de sensibilidade, problema adjunto e a equação gradiente.

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAL

Utilizou-se placas de aço inoxidável AISI 304 com as dimensões 200x50x0.004 (mm), onde na superfície inferior foram fixados (soldados) dez termopares do tipo K(Cromel - Alumel) espaçados de 16.7 mm (Fig. 2).

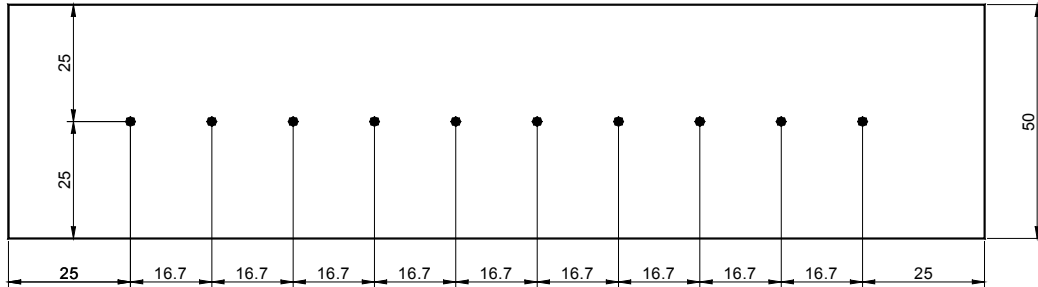


Figura 2: Posicionamento dos termopares na superfície inferior da amostra

Apresenta – se na Fig. (3) o esquema de montagem da bancada experimental usada para a determinação do fluxo de calor no processo de soldagem TIG.

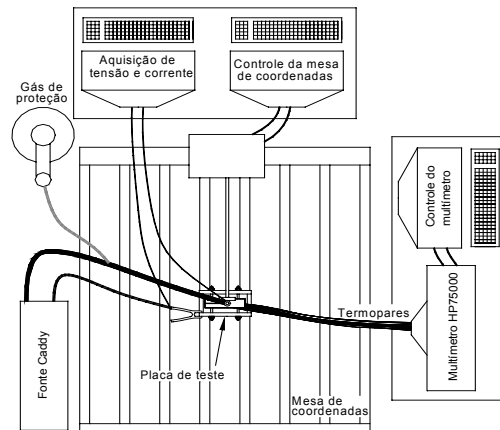


Figura 3: Esquema de montagem da bancada experimental

Os termopares foram conectados a um sistema de aquisição HP75000 series B, onde a partir de uma calibração prévia, adquiriu-se a variação temporal da temperatura. Todas as soldas são realizadas na posição plana e com deposição sobre a chapa. A tensão e a corrente foram adquiridas através de uma placa de aquisição D/A ajustada para adquirir em 12 bits e 10 kHz por canal. A Figura (4) mostra o suporte da placa de teste. Para evitar um possível efeito aleta pela presença dos parafusos usou-se um material isolante entre estes e a superfície.

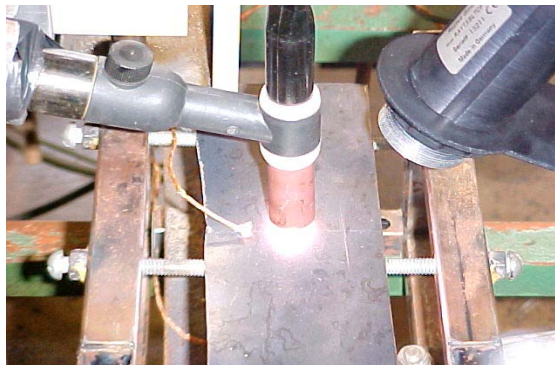


Figura 4: Suporte da placa de teste

Para determinação das componentes do fluxo de calor um conjunto de experimentos é usado para diferentes condições de soldagem, conforme Tab. (01). Este conjunto de experimentos foi selecionado a partir de um planejamento estatístico Taguchi (projeto robusto), que pode ser encontrado com mais detalhes em Lima e Silva et al., (2002).

Tabela 01- Condições Experimentais.

Ensaio	Angulo de apontamento. (°)	La (mm)	Corrente (A)	Gás de proteção
1	30	2	40	Ar
2	30	3	70	Ar+25%He
3	30	4	100	Ar+25%He
4	60	2	70	Ar+25%He
5	60	3	100	Ar
6	60	4	40	Ar+25%He
7	90	2	100	Ar+25%He
8	90	3	40	Ar+25%He
9	90	4	70	Ar

As propriedades térmicas do aço inoxidável foram consideradas constantes em ambos os programas, condutividade térmica igual a 14.9 W/mK e difusividade térmica de $3.95 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ Incropera & DeWitt (1998). O coeficiente de transferência de calor de convecção também foi considerado constante e igual a 15W/m²K.

4. ANALISE DE RESULTADOS

Na Figura (5) é apresentado o perfil de temperatura obtido experimentalmente na superfície oposta a soldagem para o ensaio 02.

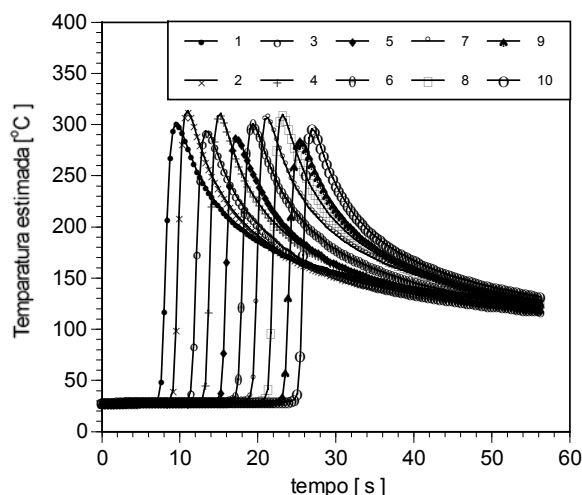


Figura 5: Perfil de temperatura medido na superfície oposta a soldagem para o ensaio A02.

Observa-se que em geral as temperaturas máximas encontradas flutuam em torno de um ponto fixo (300°C). Na Figura (6), a comparação entre as temperaturas estimadas pelos dois códigos e experimental é apresentada.

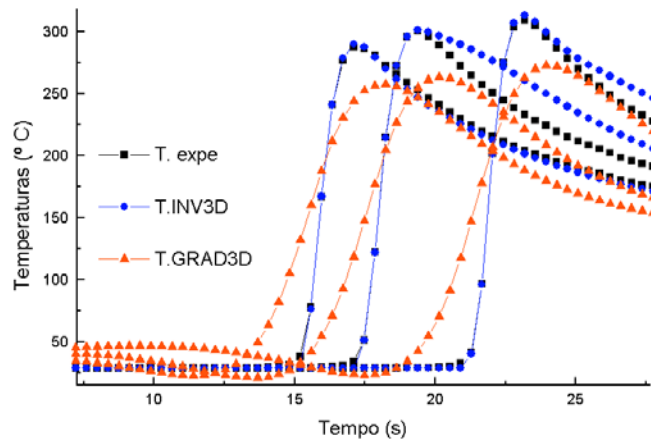


Figura 6: Comparação entre as temperaturas estimadas e experimentais.

Pode - se analisar na Fig. (6) uma boa concordância entre os sinais de temperatura encontrados pelos dois códigos computacionais e a temperatura experimental. Entretanto, observa-se uma melhor resposta obtida pelo programa INV3D, tendo na região de aquecimento e resfriamento, uma melhor aproximação do que os valores encontrados pelo GRAD3D. Outro aspecto que deve ser destacado é a comparação entre a distribuição do campo de temperatura ao longo da superfície da solda, o que pode ser analisado na Fig. (7). Neste caso o efeito da velocidade da fonte móvel bem como a estabilidade do valor estimado pode ser verificado a medida que a fonte de calor se desloca. Ressalta-se também o efeito simétrico da distribuição de calor em relação à direção do movimento da fonte. De acordo com a Fig. (7), observa-se que a distribuição encontrada pelo programa INV3D, se apresenta mais estável, não apresentando falhas nas zonas de resfriamento, bem com uma melhor simetria do fluxo estimado, em comparação com a distribuição gerada pelo GRAD3D.

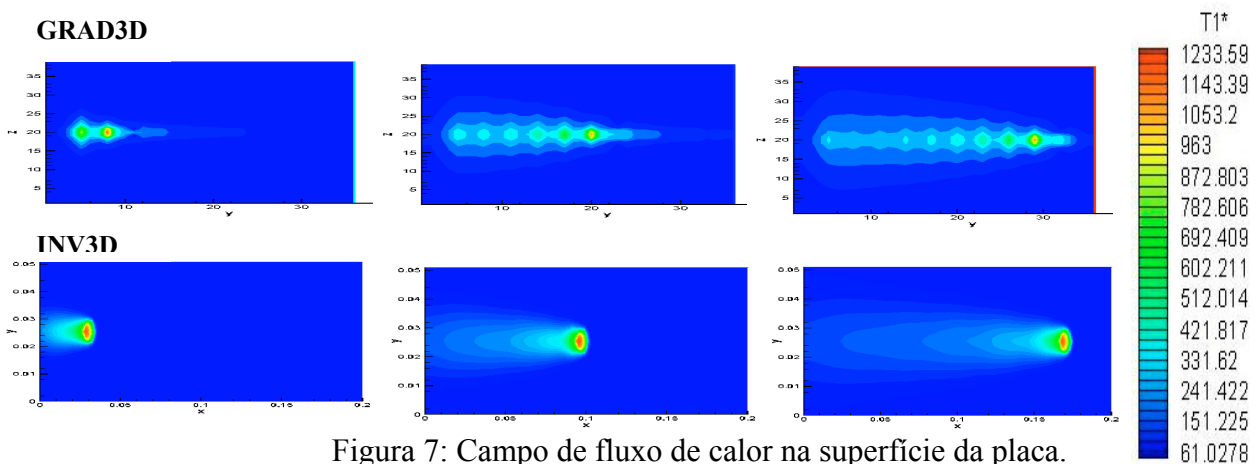


Figura 7: Campo de fluxo de calor na superfície da placa.

Os resultados encontrados, se mostram promissores, apontando para um adequacidade da metodologia experimental empregada e potencialidade do código.

5. CONCLUSÕES

A comparação de dois códigos computacionais que utilizam técnicas de problemas inversos em condução de calor para determinação dos campos térmicos superficiais e rendimento térmico do processo de soldagem TIG, foi apresentada. A taxa de calor imposta na superfície da placa de teste foi estimada através do método Simulated Annealing. A técnica experimental mostrou-se adequada, apesar da não consideração dos efeitos de mudanças de fase, perdas de calor por radiação, coeficientes de transferência de calor e propriedades térmicas constantes. Observa-se que os valores encontrados para os campos térmicos nos dois códigos (distribuição de temperatura e fluxo de

calor) se encontram na faixa esperada, obtendo uma melhora considerável no programa INV3D, indicando uma potencialidade do programa.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos órgãos de fomento Capes, CNPq e Fapemig, e pelo apoio financeiro. O graduando Alex Soares Landim, gostaria de agradecer, o apoio técnico do Eng. Valério Luiz Borges que é por sua vez inestimável.

7. REFERÊNCIAS

- Alifonov, O. M., 1974, “Solution of an inverse problem of heat conduction by iterations methods”, *Journal of Engineering Physics*, 26,4.
- Carvalho, S. R., Lima e Silva, S. M. M., Pinho, F. A. A., Machado, A. R. & G. Guimarães, G., 2003 Determinação da temperatura na interface cavaco ferramenta durante o processo de torneamento usando a técnica do Simulated Annealing, II Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF2003. Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.
- Giedt, W.H., Talerico, L.N. & Fuerschbach, P.W., 1989, GTA Welding Efficiency: Calorimetric and Temperature Field Measurements, *Weld. J.*, vol. 68, pp 28s 32s.
- Gonçalves, V. C., Scotti, A. & Guimarães, G., 2002, “Simulated Annealing Inverse Technique Applied in Welding: A Theoretical and Experimental Approach”, 4º Internacional Conference on Inverse Problems in Engineering, Angra dos Reis, Rio de Janeiro, Brazil.
- Incropera, F. P., and DeWitt, D. P., 1998, “Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”, John Wiley & Sons Inc., 4º Ed., Brasil.
- Jarny, Y., Özisik, M. N. & Bardon, J. P., 1991, “A general optimization method using adjoint equation for solving multidimensional inverse heat conduction, International”, *Journal of Heat and Mass Transfer*, 34, p.2911-2919
- Lima e Silva, S. M. M., Vilarinho, L. , Borges, V. L., Scotti, A. E. Guimarães, G., 2002. Desenvolvimento de uma Técnica Experimental para a Determinação Do Fluxo de Calor em um Processo de Soldagem TIG, IX Congresso Brasileiro De Engenharia e Ciências Térmicas (ENCIT 2002), Brasil.
- Lima, F. R. S., Machado, A., Guimarães, G. & Guths, S., 2000, Numerical and Experimental Simulation for Heat Flux and Cutting Temperature Estimation Using Three-dimensional Inverse Heat Conduction Technique, *Inverse Problems in Engineering*, 553-577.
- Lima, F. R. S., 2001, “Modelagem Tridimensional de Problemas Inversos em Condução de Calor: Aplicação em Problemas de Usinagem”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.
- Marques, P.V., 1991, “Tecnologia da Soldagem”, Editora Belo Horizonte –Brasil.
- Rosenthal, D., 1935, “Etude theorique du régime thermique pendant la soudure à la arc”, *Congrès National des Sciences, Comptes Rendus, Bruxelles*, v. 2, p. 1277.
- Saramago, S. F. P., Assis, E. G., & Steffen, V., 1999. Simulated annealing: Some applications in mechanical systems optimization, 20º Iberian Latin – American Congress on Computational Methods in Engineering (CD - ROM), São Paulo, Brasil.
- Vilarinho, L. O., 2001, “Avaliação de Gases de Proteção em Soldagem Através de Técnicas Experimentais e Numéricas”, Relatório de Qualificação, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

8. DIREITOS AUTORAIS

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

STUDY OF THE THERMAL FIELDS IN WELDING GTA PROCESS BY USING INVERSE PROBLEMS TECHNIQUES.

Alex Soares Landim¹

alexlandim@mec.ufu.br

Louriel Oliveira Vilarinho²

vilarinho@mecanica.ufu.br

Solidônio Rodrigues de Carvalho¹

rscarvalho@mecanica.ufu.br

Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva¹

metrevel@mecanica.ufu.br

1- Heat and Mass Transfer and Fluid Dynamics Laboratory - LTCM

2 - Laboratory for Welding Process Development - LAPROSOLDA

Federal University of Uberlândia, School of Mechanical Engineering,

Avenida João Naves de Ávila, S/N, 38400-902, Uberlândia, Brazil

Abstract: *The welding of metallic materials has an important role in the industrial sector. It allows the union (by welding) of stainless steels and non-ferrous with great efficiency. Several techniques of welding are available, where one of the most widely used welding process is the GTA (Gas Tungsten Arc). The GTA is a high quality and safety process. In this process, the heat input measurement is a highly complex task. The main reason is due to the fact that the welding arc is a non-uniform heat source. To solve this problem, the use of inverse problem techniques in heat conduction represents an alternative way to obtain the heat flux delivered to the workpiece during the welding process. In this case, two computational codes were used: INV3D and GRAD3D. They use two different techniques in the solution of the inverse problems: simulated annealing and conjugated gradient, respectively. In both techniques the thermal models proposed consider the transient and three-dimensional heat transfer solved through finite differences technique. For determining the heat flux a set of runs was carried out at different welding conditions in a stainless steel plate. Both methodologies showed to be efficient in the temperature distribution and in the heat flux determinations. The results showed good agreement, although the code INV3D shows to be more precise and stable to the temperature calculus.*

Keywords: *GTA welding, inverse problems, optimization, heat conduction.*