

COMPARAÇÃO DE TÉCNICAS TRIDIMENSIONAIS TRANSIENTES PARA DETERMINAÇÃO DO FLUXO DE CALOR EM UM PROCESSO DE SOLDAGEM TIG

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- 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
Campus Santa Mônica, Av. João Naves de Ávila, S/N - CEP 38400-902 Tel.: (34) 3239-4148,
Fax: (34) 3239-4206, 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 os vários processos de soldagem disponíveis, o 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 a soldagem. Neste sentido, foram usados os códigos computacionais INV3D e GRAD3D, que utilizam duas técnicas distintas na solução de problemas inversos: seção áurea e gradiente conjugado, respectivamente. Ambas as técnicas consideram a transferência de calor tridimensional, transiente e as trocas convectivas de calor. Para determinação do fluxo de calor, foi realizado um conjunto de experimentos nos quais atribuiu-se diferentes condições de soldagem, baseadas numa matriz de Projeto Robusto (Taguchi). As duas metodologias se mostraram eficientes tanto na determinação da distribuição de temperatura como na determinação do aporte de calor, 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 a uma chapa metálica submetida a um processo de soldagem é uma tarefa de alta complexidade e sujeita a erros (Vilarinho, 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 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 desta 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 bastante empregado é o processo TIG (Tungsten Inert Gas), 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 deve-se 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, 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, 2001). Para a obtenção deste aporte de calor na chapa propõe-se neste trabalho o uso de técnicas de problemas inversos. Assim, o programa computacional INV3D desenvolvido por Carvalho et al (2003) para o cálculo da temperatura é usado. Neste programa a abordagem considera o problema térmico a ser estudado da forma mais realista possível, o modelo de condução de calor tridimensional transiente leva em consideração as variações com a temperatura das propriedades térmicas (valores fornecidos por Hsu et al, 1986) e do coeficiente de transferência de calor por convecção (Incropera & DeWitt, 1996). O fluxo de calor é obtido a partir da minimização de uma função objetivo de mínimos quadrados definida pela diferença ao quadrado entre as temperaturas experimentais e calculadas pelo modelo térmico. Para a minimização desta função utiliza-se uma combinação da técnica de otimização seção áurea com aproximação polinomial cúbica (Vanderplaats, 1984). Propõe-se também a comparação dos resultados obtidos por este programa com os resultados obtidos por Lima e Silva et al, (2002). No trabalho de Lima e Silva et al, (2002) para a obtenção do fluxo de calor foi usado o código computacional GRAD3D desenvolvido por Lima, (2001). Neste programa o modelo térmico de transferência de calor tridimensional transiente é resolvido por diferenças finitas. Para a solução do problema inverso é usada a técnica do gradiente conjugado e equação adjunta. Com o objetivo de diminuir o número de experimentos, aplicou-se neste trabalho o planejamento estatístico Taguchi (Phadke, 1989). Nesse sentido, obteve-se 9 (nove) experimentos nos quais modificou-se a corrente elétrica, o comprimento do arco, o gás de proteção e o ângulo de apontamento no processo de soldagem de placas de aço inoxidável AISI 304.

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 x , estando as outras superfícies da placa sujeitas a perdas de calor convectivas.

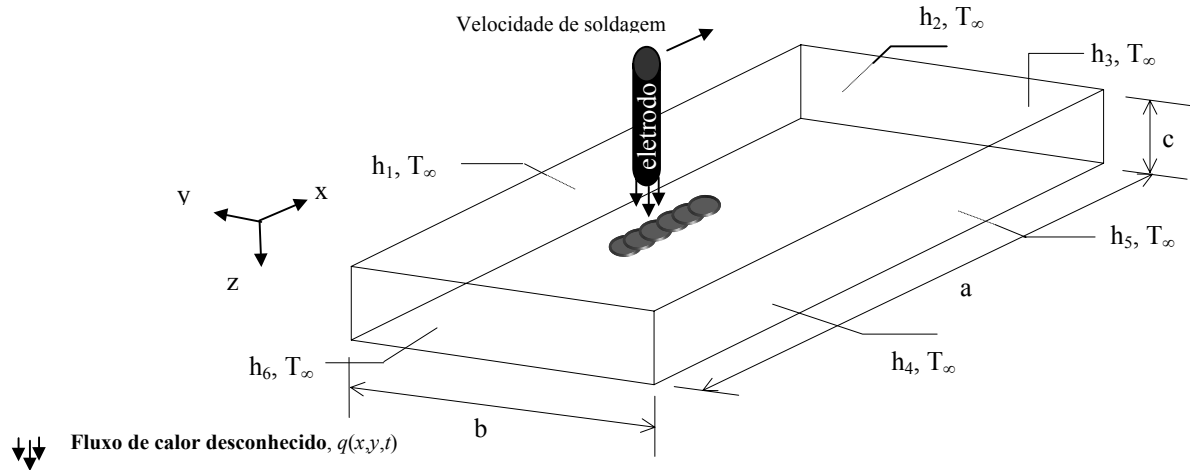


Figura 1. Modelagem do problema térmico tridimensional

Se uma fonte de calor com uma velocidade constante é imposta a uma placa inicialmente a uma temperatura T_0 , pode se dizer que:

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

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

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

e às condições de contorno na superfície S ($0 \leq x \leq a$, $0 \leq y \leq b$, $z = 0$) dada por

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(x, y, 0, t)}{\partial z} = \begin{cases} q(x, y, t) \text{ em } S_1 \ (\pi r^2) \\ h_3(T)[T_\infty - T(x, y, 0, t)] \text{ em } S_2 \ (x, y \in S \mid (x, y) \notin S_1) \end{cases} \quad (3)$$

onde S_1 representa a área submetida à fonte de calor e S_2 a superfície remanescente submetida a troca convectiva, Fig. (1). As condições de contorno nas demais superfícies podem ser escritas como

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n_i} = h_i(T)[T - T_\infty], \quad t > 0 \quad (4)$$

onde o índice i (1,2,4,5,6) representa a i -ésima superfície, n_i representa a normal à essa superfície e $h_i(T)$ o respectivo coeficiente de transferência de calor variando com a temperatura. Ainda, nas equações acima $\alpha(T)$ e $\lambda(T)$ são respectivamente a difusividade térmica e condutividade térmica variando com a temperatura e T_∞ é a temperatura ambiente. A fonte de calor móvel imposta na chapa é representada pelo parâmetro $q(x,y,t)$ cujo o valor é estimado ao longo do tempo de soldagem. A solução do problema dado pelas Eqs. (1)-(4) foi obtida através do método das diferenças finitas.

2.2 Problema Inverso

Neste trabalho, na solução do problema inverso foi usada a técnica de otimização seção áurea com aproximação polinomial cúbica. Esta técnica busca através de um processo iterativo de minimização de um funcional, o fluxo de calor que flui para a placa a partir de temperaturas medidas na face oposta à zona afetada pelo processo de soldagem, sendo a função objetivo definida por

$$F = \sum_{i=1}^{t_{aq}} [Y(x, y, c, t_i) - T(x, y, c, t_i)]^2 \quad (5)$$

onde F é a função erro quadrático definida pelo quadrado da diferença entre as temperaturas medidas na placa, Y , e as temperaturas calculadas pela solução do modelo teórico, T , (Eqs 1-4) e t_{aq} é o tempo de aquecimento. Pode-se então estimar o fluxo de calor através de um algoritmo computacional que inclui um procedimento iterativo para a solução do problema inverso. Ressalta-se que neste trabalho a cada posição do termopar é minimizado o funcional, obtendo-se uma resposta de fluxo de calor.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Apresenta-se na Fig. (2a) o esquema de montagem da bancada experimental usada para a determinação do fluxo de calor no processo de soldagem TIG. Utilizou-se como amostras de teste placas de aço inoxidável AISI 304 com dimensões de 200 x 50 x 4 mm. Nesta placa na superfície inferior foram fixados (soldados) dez termopares do tipo K (Cromel-Alumel) espaçados de 16,7 mm (Fig. 2b). Os termopares foram conectados a um sistema de aquisição HP75000 series B, onde a partir de uma calibração prévia, adquiriu-se a evolução da temperatura com o tempo. 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 (3) mostra uma fotografia da montagem da placa de teste no suporte. Para evitar um possível efeito aleta pela presença dos parafusos usou-se um material isolante entre estes e a superfície.

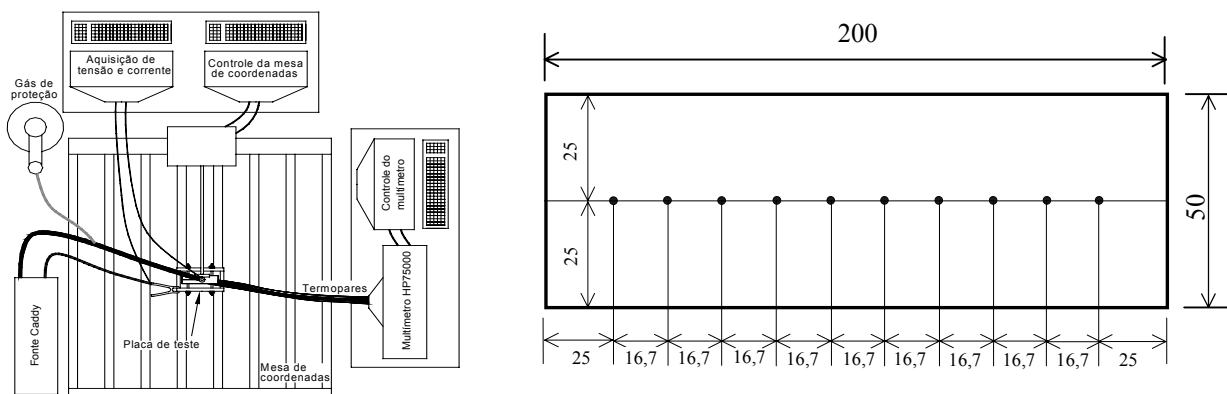


Figura 2. a) Esquema de montagem da bancada experimental b) Posicionamento dos termopares.

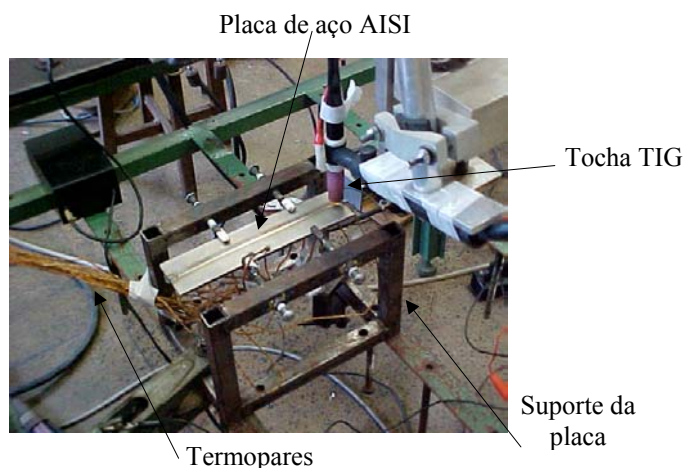


Figura 3. Fotografia da montagem da placa de teste no suporte.

Para determinação do fluxo de calor um conjunto de experimentos é usado para diferentes condições de soldagem, conforme Tab. (1). Este conjunto de experimentos foi selecionado a partir de um planejamento estatístico Taguchi (Projeto Robusto) (informações mais detalhadas podem ser encontradas em Vilarinho (2001)). Nesta tabela também é apresentada a largura do cordão obtida para cada condição experimental, medida através de um analisador de imagens. Este equipamento é composto por uma câmera de vídeo Hitachi CCD, modelo KP-110, por um computador AMD K6 450 MHz, Z DT-55 por um software de tratamento das imagens, o GLOBAL LAB Image.

Tabela 1. Condições experimentais usadas.

Ensaio	Ângulo de apontamento (°) ($\pm 1^\circ$)	La (mm) ($\pm 0.1mm$)	Corrente (A) ($\pm 0.1A$)	Gás de Proteção	Largura do cordão (mm) ($\pm 0.1mm$)
1	30	2.0	40.0	Ar	2.0
2	30	3.0	70.0	Ar+25%He	3.0
3	30	4.0	100.0	Ar+25%He	4.0
4	60	2.0	70.0	Ar+25%He	3.0
5	60	3.0	100.0	Ar	4.0
6	60	4.0	40.0	Ar+25%He	2.0
7	90	2.0	100.0	Ar+25%He	4.0
8	90	3.0	40.0	Ar+25%He	2.0
9	90	4.0	70.0	Ar	3.0

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Na Figura (4a) apresenta-se os sinais de temperatura medidos na superfície oposta a soldagem para o ensaio 3. Observa-se que em geral as temperaturas máximas encontradas flutuam em torno de um ponto fixo de aproximadamente 400°C. Na Figura (4b) apresenta-se o fluxo de calor estimado para cada posição do termopar a partir das temperaturas experimentais da Fig. (4a). Pode-se verificar na Fig. (4b) que o fluxo de calor médio estimado para este caso é de 475 W. Na Figura (5a) é mostrada a comparação entre as temperaturas estimadas pelos dois códigos computacionais (GRAD3D e INV3D) e a experimental para o ensaio 3, para três posições específicas relativas aos termopares 1, 4 e 7 (veja Fig. 2b). Observa-se na Fig. (5a) uma boa concordância entre os sinais de temperatura estimados e a temperatura experimental. Entretanto, os resultados apresentados pelo programa INV3D apresentaram um menor desvio quando comparados com os sinais de temperatura experimental, como mostrado nas Figs. (5b, 5c e 5d). O desvio percentual médio ficou em torno de

5% para o INV3D, enquanto para o GRAD3D ficou em torno de 30 %. Estes resultados se repetiram para todos os ensaios apresentados na Tab. (1).

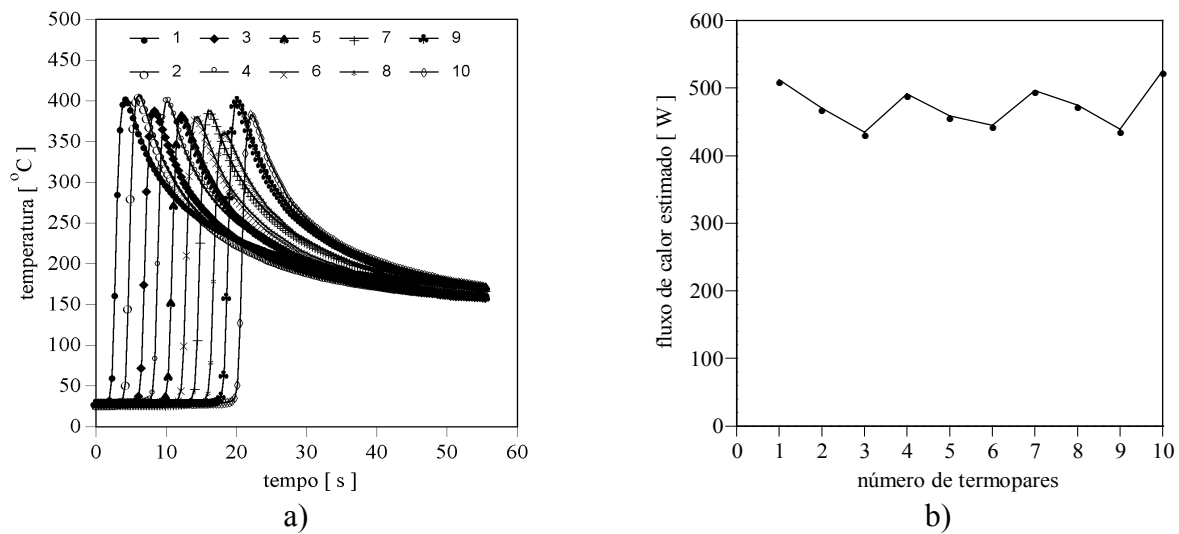


Figura 4. a) Perfil de temperatura medido na superfície oposta a soldagem para o ensaio 3 b) Fluxo de calor estimado para cada termopar para o ensaio 3

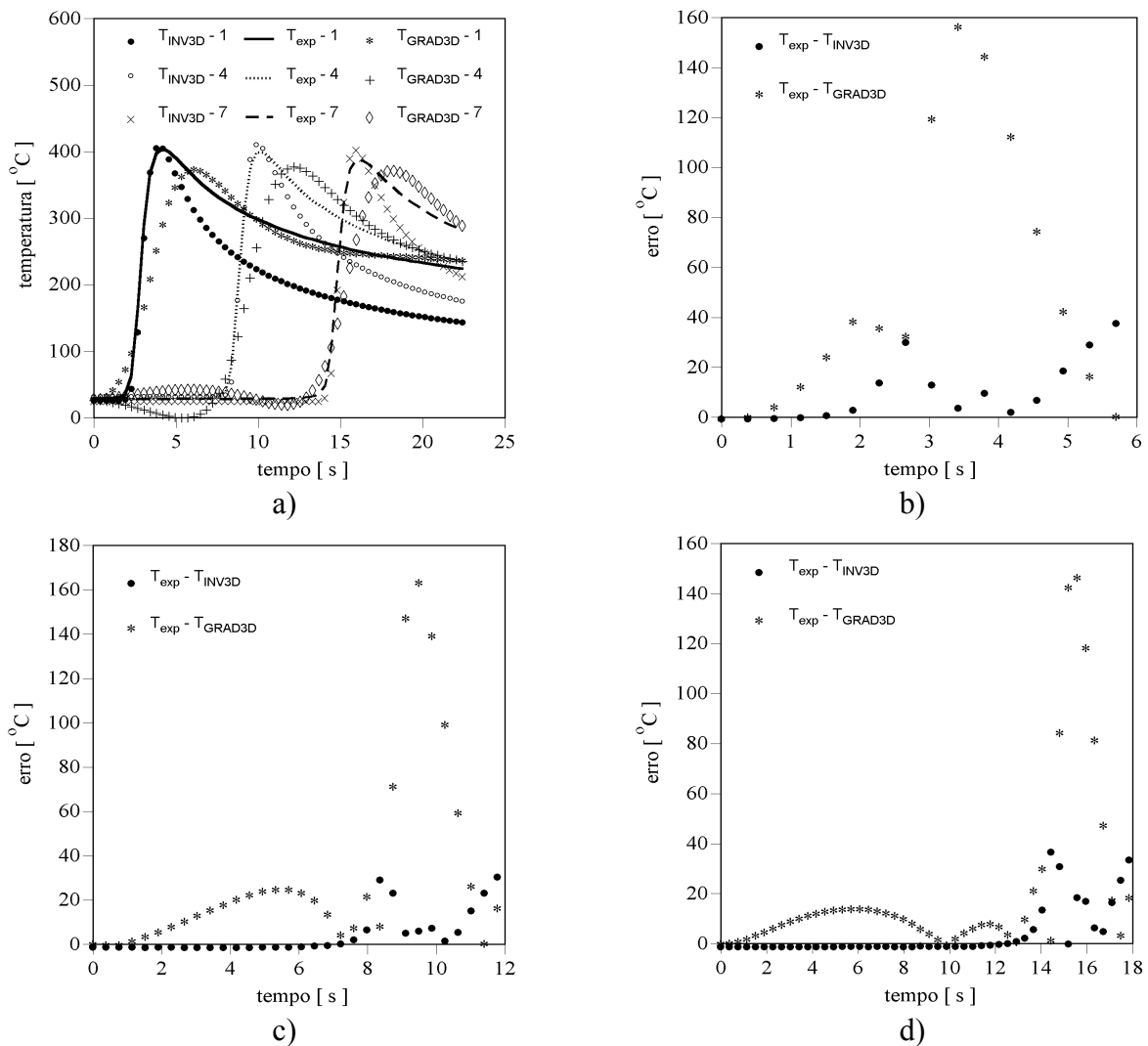


Figura 5. a) Comparação entre as temperaturas estimadas e experimental na superfície oposta a soldagem b) desvio entre estas temperaturas para o termopar 1 c) desvio entre estas temperaturas para o termopar 4 d) desvio entre estas temperaturas para o termopar 7

Um 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. (6). Neste caso, o efeito da velocidade da fonte móvel bem como a estabilidade do valor estimado pode ser observado 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. (6), nota-se que a distribuição encontrada pelo programa INV3D apresenta-se mais estável, não mostrando falhas nas zonas onde não se tem termopares. Assim, é possível afirmar que os resultados encontrados mostram-se promissores apontando para uma adequabilidade da metodologia experimental empregada e potencialidade do código computacional desenvolvido.

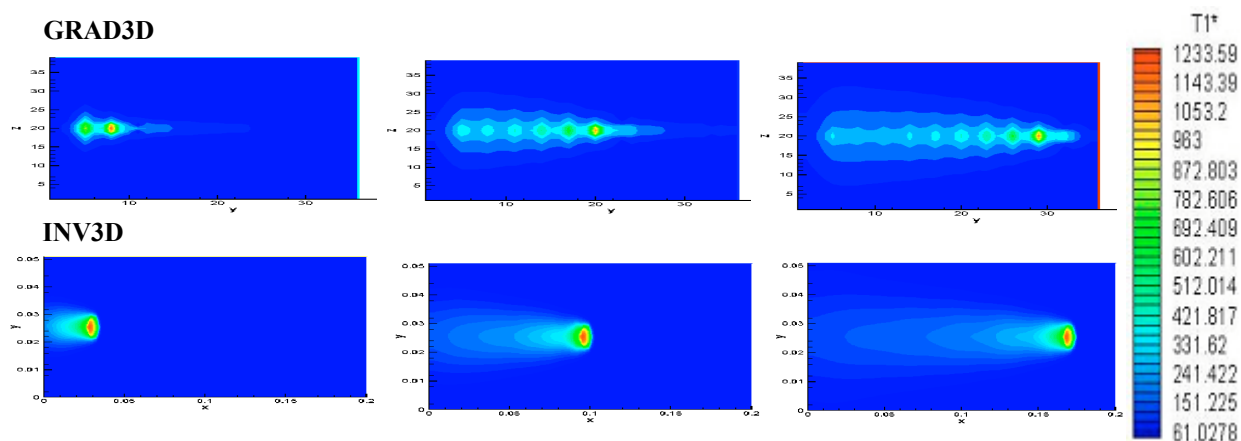


Figura 6. Distribuição de temperatura na superfície da placa.

Com relação aos resultados obtidos pelo Projeto Robusto, a Fig. (7) apresenta o gráfico de análises com o efeito obtido para ambos os programas GRAD3D e INV3D. Nesta análise foi utilizada a função “Larger-the-Better” do Taguchi, uma vez que o aumento do rendimento do processo de soldagem é sempre desejável. O programa GRAD3D calculou um rendimento maior que aquele obtido pelo INV3D. Isto pode ser explicado pelo fato que o fluxo de calor estimado pelo código INV3D apresenta uma maior confiabilidade, que no GRAD3D. Como já mencionado anteriormente, observa-se uma maior estabilidade no cálculo da temperatura (Fig. 6) na superfície frontal pelo INV3D. Outros dois fatos importantes são que além dos algoritmos de estimação inversa serem diferentes, o método de cálculo da área de aporte de calor (com base na largura do cordão – Tab. 1) foi também diferente. Devido à formulação utilizada, no GRAD3D foi considerado um retângulo como área, enquanto que no INV3D uma área circular foi assumida com base em filmagens do arco elétrico. A literatura (AWS, 1987) apresenta uma ampla faixa para rendimento no processo TIG. Não há consenso entre os valores de rendimento (valores entre 90% e 30% são reportados), nem tampouco há um consenso acerca da influência de algumas variáveis no rendimento.

A influência do ângulo de apontamento foi determinada diferentemente pelos dois métodos inversos (Fig. 7). Todavia, resultados ambíguos também são encontrados na literatura (AWS, 1987). Assim, maiores estudos devem ser conduzidos para explicar o efeito do ângulo de apontamento do eletrodo. Já a influência do comprimento do arco se mostrou concordante, onde um aumento no comprimento do arco tende a reduzir o rendimento do processo. Isto pode ser explicado pelo fato de que ao aumentar o comprimento do arco, aumenta-se a área de troca de calor e dessa forma aumenta-se as perdas por radiação e convecção para o ambiente. A corrente de soldagem apresentou uma influência oposta para os dois algoritmos inversos. Esta discrepância também é encontrada na literatura (AWS, 1987), o que demanda uma maior investigação. Já a influência do gás de proteção foi calculada em concordância, onde ao adicionar Hélio ao Argônio, aumentou-se a influência do processo. Isto se deve ao fato do Hélio possuir uma maior condutividade térmica.

Com relação ao ponto ótimo de trabalho, o Taguchi obteve para os valores do GRAD3D, a condição 30°, 2 mm, 40 A e Ar+25%He e um rendimento esperado de 86,4 %. Este teste foi

realizado e um rendimento de 86,2 %, o que mostra a aplicabilidade do Taguchi neste tipo de estudo. Com relação ao INV3D, o ponto ótimo de trabalho obtido pelo Taguchi foi a condição 90°, 2mm, 100 A e Ar+25%He e um valor esperado de 49,8 % para o rendimento. Apesar do valor encontrado experimentalmente ser maior 52,7 % (ensaio 7), pode-se dizer que o Projeto Robusto também mostrou-se adequado, uma vez que a diferença foi menor que 5,0 %.

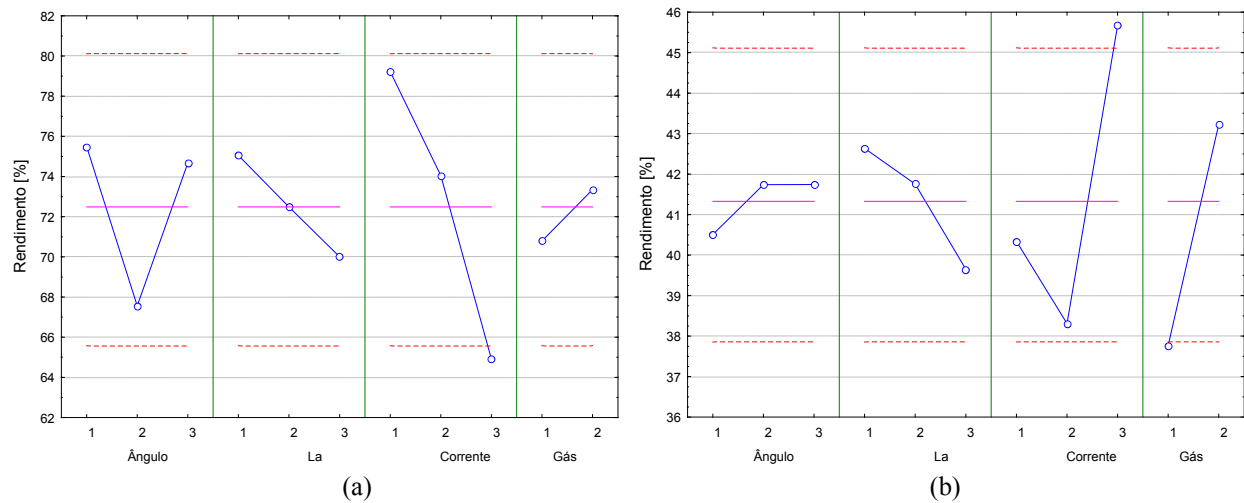


Figura 7. Gráfico do Taguchi mostrando a influência das variáveis no rendimento do processo obtido pelo programa GRAD3D (a) e INV3D(b).

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 da técnica de otimização seção áurea com aproximação polinomial cúbica. Esta metodologia mostrou-se adequada, apesar do modelo térmico ainda não considerar os efeitos de mudança de fase e perda de calor por radiação. 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 a potencialidade do programa. Ressalta-se também que neste trabalho somente o tempo de aquecimento foi usado no processo de otimização. Todavia, os autores já estão trabalhando com uma metodologia que englobe também o resfriamento, bem como os efeitos de mudança de fase e perda de calor por radiação. Um outro problema que está sendo resolvido é a baixa sensibilidade do modelo nas regiões afastadas a medição da temperatura. Neste caso, várias funções objetivos estão sendo estudadas para verificar a sensibilidade nestas regiões.

O projeto experimental Taguchi (Projeto Robusto) se mostrou adequado para reduzir o número de experimentos, garantindo a confiabilidade dos resultados.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos órgãos de fomento Capes, CNPq e Fapemig, pelo apoio financeiro. Os autores também agradecem aos Professores Gilmar Guimarães e Américo Scotti e o Eng. Valério Luiz Borges pelo apoio técnico.

7. REFERÊNCIAS

AWS, 1987, "Welding Handbook", Vol.1, 8th edition, pp. 47-87.

- 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, Welding Journal, 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”, 4^o International Conference on Inverse Problems in Engineering, Angra dos Reis, Rio de Janeiro, Brazil.
- Hsu, Y.F., Rubinsky, B. and Mahin, K., 1986, “An Inverse Finite Element Method for the Analysis of Stationary Arc Welding Processes”, Journal of Heat Transfer, Vol. 108, pp. 734-740.
- Incropera, F. P., and DeWitt, D. P., 1998, “Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”, Livros Técnicos Científicos Editora S.A., 4^o ed., Brasil.
- Lima e Silva, S. M. M., Vilarinho, L. O., 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., 2001, “Modelagem Tridimensional de Problemas Inversos em Condução de Calor: Aplicação em Problemas de Usinagem”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.
- Phadke, M. S., Quality Engineering Using Robust Design, Prentice Hall, 1989, 334 p.
- Vanderplaats G. N., 1984, “Numerical Optimization Techniques for Engineering Design”, McGraw-Hill, New York, USA.
- Vilarinho, L. O., 2001, “Avaliação de Gases de Proteção em Soldagem Através de Técnicas Experimentais e Numéricas”, Relatório de Qualificação, LAPROSOLDA No. 10/2001, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

8. DIREITOS AUTORAIS

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

COMPARISON OF THREE-DIMENSIONAL TRANSIENT TECHNIQUES FOR DETERMINING THE HEAT FLUX IN THE GAS-TUNGSTEN-ARC WELDING PROCESS

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 - FEMEC, School of Mechanical Engineering - UFU,

Campus Santa Mônica, Av. João Naves de Ávila, S/N - CEP 38400-902 Tel.: (34) 3239-4148, Fax: (34) 3239-4206, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

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 and TIG (Tungsten Inert Gas) welding is one of the most widely used process. TIG is a high quality and safety welding 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 employ two different techniques in the solution of the inverse problems: simulated annealing and conjugated gradient, respectively. In both techniques the thermal models consider the three-dimensional transient heat transfer and the heat convection losses. For determining the heat flux a set of runs was carried out at different welding conditions in a stainless steel plate following a Robust Project (Taguchi). 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.*