

USO DE TÉCNICA DE PROBLEMA INVERSO EM TRANSFERÊNCIA DE CALOR PARA ESTIMAR A TAXA DE CALOR NO PROCESSO DE SOLDAGEM POR DESCARGA CAPACITIVA

Fábio Silva Faria

Gustavo Cardoso Zotin

Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva

Laboratório de Transferência de Calor – LabTC, Instituto de Engenharia Mecânica – IEM, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Campus Prof. José Rodrigues Seabra, Av. BPS, 1303, 37550-903, Itajubá, MG, Brasil.
e-mails: fabiofaria@unifei.edu.br, gustavo.zotin@gmail.com, metrevel@unifei.edu.br

Rodrigo Gustavo Dourado da Silva

Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, Divisão de Pós-Graduação e Pesquisa, Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, - Vila das Acácias, 12228-900, São José dos Campos, SP, Brasil.
e-mail: rodrigodourado@hotmail.com

Resumo: Determinar o aporte térmico em um processo de soldagem é essencial para aprimoramento do processo. Com o conhecimento da quantidade de calor usada no processo é possível controlar o equipamento para que não exista excesso ou falta de energia. Quando é fornecida energia em excesso no processo, o material pode se deteriorar ou oxidar, afetando suas propriedades mecânicas. Por outro lado, quando há falta de energia no processo, a união dos materiais não é resistente e pode se romper. No caso da soldagem de termopares em metais, a falta de precisão ocasiona erros nas medições de temperaturas. Nesse trabalho, uma técnica de problema inverso é utilizada para estimar a taxa de calor fornecida na soldagem de termopares tipo K. Um problema inverso de condução de calor é aquele em que as condições de contorno ou parâmetros de entrada são desconhecidos. Para resolver o problema, são usados dados de temperaturas obtidas experimentalmente em um ponto acessível do domínio. Como o processo estudado neste trabalho é rápido, a obtenção dessas temperaturas é difícil. Além disso, seria difícil medir o fluxo de calor na poça de fusão usando um transdutor de fluxo de calor, por exemplo. Por esta razão, para avaliar parâmetros desconhecidos e difíceis de medir é essencial aplicar uma técnica de problema inverso de condução de calor. Para resolver o problema numérico, um modelo tridimensional foi estudado utilizando o programa comercial COMSOL Multiphysics. Para resolver o problema inverso, o Método da Função Especificada não-linear foi utilizado, nele é estimado o fluxo de calor que minimiza a função objetivo em cada intervalo de tempo. Na função objetivo são comparadas as temperaturas medida e calculada em uma região próxima a fonte de calor. Uma vez que a energia total empregada é conhecida pelo cálculo da energia armazenada no banco de capacitores, a eficiência do processo de soldagem também é avaliada. O valor da eficiência do processo obtido no resultado desse trabalho foi de aproximadamente 18%. O baixo valor de eficiência é justificado pela alta quantidade de energia dissipada em forma de luz e som.

Palavras-chave: Problemas Inversos; COMSOL; Descarga Capacitiva; Método da Função Especificada Iterativa

1. INTRODUÇÃO

Vários materiais e processos da engenharia são afetados devido a exposição a altas temperaturas. Um exemplo é o processo de soldagem, o qual necessita de altas temperaturas para ocorrer. As altas temperaturas alteram as propriedades mecânicas e químicas dos materiais, com isso, pode ocorrer oxidação dos materiais que serão soldados. A oxidação, pode alterar a capacidade termoelétrica dos termopares. A consequência dessas alterações é a redução da precisão e exatidão das medições de temperatura.

O conhecimento da energia necessária no processo de soldagem, resulta em vantagens como melhor eficiência do processo, maior vida útil do material, e a precisão das medições de temperatura.

O problema inverso em condução de calor tem um papel importante em estudos complexos, como o processo de soldagem e outros processos de fabricação, nos quais são difíceis de obter resultados satisfatórios apenas com experimentos. Os problemas inversos são utilizados para estimar um parâmetro desconhecido, como por exemplo a taxa de calor real fornecida durante o processo, a partir do histórico de temperaturas medidas experimentalmente no interior do domínio.

Um dos primeiros trabalhos de problemas inversos empregando transferência de calor foi apresentado por Stoltz (1960), quem apresentou um método para determinar o fluxo de calor na superfície de esferas durante o processo de têmpera. O Método da Função Especificada foi proposto por Beck et al. (1985) para minimizar o ruído nos dados de

temperatura apresentado por Stoltz (1960). Este método não exige grande tempo computacional e apresenta robustez aos ruídos presentes nos dados.

Silva *et al.* (2012) estimaram o fluxo de calor na superfície de uma amostra de aço inox AISI 304, utilizaram as técnicas de problemas inversos da Seção Áurea, Brent, Função Especificada, Regularização de Tikhonov e Métrica Variável. Os autores concluíram que todas as técnicas tiveram concordância com as temperaturas experimentais. As técnicas Função Especificada e Regularização de Tikhonov tiveram um custo computacional menor que as demais técnicas.

Brito *et al.* (2015) analisaram os aspectos térmicos na operação da ferramenta de corte no processo de usinagem. Pela dificuldade de obter dados do processo com a ferramenta em movimento, utilizaram os problemas inversos pela técnica da Função Especificada para determinar o campo de temperatura e o fluxo de calor na região da ferramenta.

Dourado da Silva *et al.* (2018) compararam três técnicas de problemas inversos: o método da Seção Áurea com a Regularização por Viagem no Tempo, o Método da Função Especificada e o Método da Função Especificada Sequencial iterativa. A fim de estimar o fluxo de calor em um problema tridimensional em transferência de calor. Concluiu que para seu problema as técnicas iterativas (Regularização por Viagem no Tempo e Método da Função Especificada Sequencial iterativa) apresentaram melhores resultados, porém maiores tempos computacionais.

Neste trabalho foi usada técnica de problemas inversos, junto com o software COMSOL *Multiphysics*, para estimar a energia utilizada no processo de soldagem por descarga capacitiva, para estimar o fluxo de calor em processo de soldagem usando equipamento de soldagem por microeletrônica de descarga capacitiva usando termopares do tipo K. O programa em MATLAB, com a técnica da Função Especificada Iterativa, foi usado para estimar a taxa de calor, a partir de temperaturas medidas experimentalmente em regiões próximas a junta soldada. O modelo térmico considerado é não linear, uma vez que as propriedades térmicas são dependentes da temperatura.

2. METODOLOGIA

2.1. Modelo térmico

O domínio do modelo é composto por três subdomínios: Um fio composto por Alumel, um fio composto por cromel e uma esfera de solda composta pela mistura de cromel e alumel. Cada subdomínio possuindo propriedades térmicas distintas, além das propriedades convectivas distintas. A equação da difusão de calor para problema tridimensional não linear com mudança de fase pode ser expressa como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{Q(t)}{V} = \rho \frac{\partial H(T)}{\partial t} \quad (1)$$

onde k é a condutividade térmica, T é a temperatura, ρ é a massa específica e t é o tempo. A função da entalpia pode ser definida como:

$$H = \int c dT + fL \quad (2)$$

onde c é o calor específico, L é o calor latente e f é a função de Heaviside, definida em função da temperatura de fusão T_m . A função $\theta(T)$ é utilizada para definir a região de transição de fases, quando $\theta(T)=0$ o domínio se encontra no estado sólido, se $\theta(T)=1$ o domínio se encontra totalmente no estado líquido. $\theta(T)$ é modelada através da função de Heaviside:

$$\theta(T) = \begin{cases} 0, & T > T_s \\ 1, & T < T_L \\ 0.5 + 0.9375 \left(2 * \frac{T-T_m}{\Delta T} \right) - 0.625 \left(2 * \frac{T-T_m}{\Delta T} \right)^3 + 0.1875 \left(2 * \frac{T-T_m}{\Delta T} \right)^5, & T_s < T < T_L \end{cases} \quad (3)$$

O fluxo de calor, representado por $Q(t)$, atua de maneira uniforme na esfera de volume V .

O problema térmico está sujeito a condições de contorno de convecção e radiação:

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial \eta}(x, y, z, t) = h(T)(T - T_\infty) + \sigma \varepsilon(T)(T^4 - T_\infty^4) \quad (4)$$

onde η é a direção normal, h é o coeficiente de calor por convecção, σ a constante de Stefan-Boltzmann, ε a emissividade e T_∞ a temperatura ambiente. O coeficiente de transferência calor por convecção h foi definido constante para os fios do termopar como 15 W/m² e para a junta soldada a correlação definida por Incropera *et al.* (2008) para uma esfera, como:

$$Nu_D = 2 + \frac{0.589 Ra_D^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.469}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{4/9}} \quad (5)$$

onde Ra_D é o número de Rayleigh, Nu_D número de Nusselt e Pr número de Prandtl.

O cálculo da distribuição de temperaturas tridimensional foi realizado utilizando o Método dos Elementos Finitos através do programa comercial COMSOL Multiphysics. Foi gerada uma malha tetraédrica com 54000 elementos. As propriedades termofísicas, massa específica, condutividade $k(T)$ e calor específico $c(T)$ consideradas para o Alumel e Cromel foram obtidas de Buttsworth (2001), além disso, os valores considerados constantes de emissividade de 0.1 para o cromel e 0.6 para o alumel foram obtidos de Sasaki *et al.* (1994).

$$c_{cromel}(T) = 0.1786 * T + 394.3 \quad [\text{J/kgK}] \quad (6)$$

$$k_{cromel}(T) = 0.01912 * T + 12.11 \quad [\text{W/mK}] \quad (7)$$

$$c_{Alumel}(T) = 0.0712 * T + 500.8 \quad [\text{J/kgK}] \quad (8)$$

$$k_{Alumel}(T) = 0.02981 * T + 18.42 \quad [\text{W/mK}] \quad (9)$$

As propriedades térmicas na zona de transição de fases são calculadas como a média ponderada da fração de sólido/líquido representado pelo $\theta(T)$ na Eq. (3).

Foi considerado, de maneira aproximada, que a esfera que representa a junta soldada é formada por 50% de Alumel e 50% de Cromel. Sendo assim, as propriedades termofísicas nesse subdomínio são obtidas pela média das propriedades dos metais que compõem o termopar.

Apresenta-se na Figura 1 a geometria do termopar com junta soldada, a qual foi utilizada no modelo térmico tridimensional. Neste modelo a extremidade soldada do termopar de temperatura inicial T_0 é sujeita a uma fonte transiente de calor, causado por uma descarga capacitiva. Esse fluxo de calor funde as duas extremidades entrelaçadas, onde ocorre a transformação de fases e forma-se uma esfera de solda.

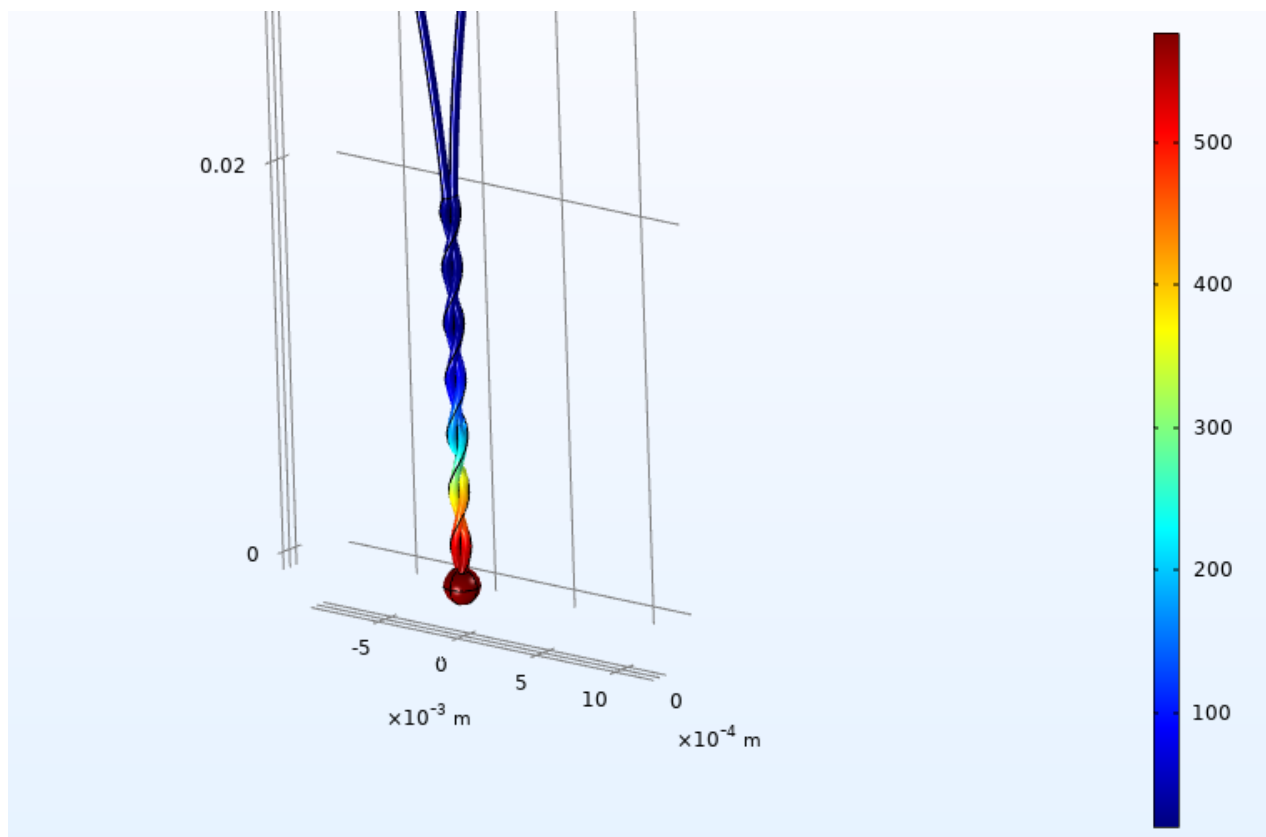


Figura 1. Modelo térmico tridimensional

2.2. Procedimento experimental

Para a aplicação da técnica de problemas inversos foram necessários experimentos, os quais foram realizados no Laboratório de Transferência de Calor da Universidade Federal de Itajubá.

A bancada usada para executar os experimentos é mostrada na Figura 2. Um termopar do tipo K 30 AWG foi soldado, através de um equipamento de soldagem por descarga capacitiva, em um termopar tipo K 24 AWG a 4mm de distância da extremidade deste. O termopar de 30 AWG foi conectado a uma aquisição de dados 34980A que foi controlada por um microcomputador. Foi realizada a soldagem do termopar de 24 AWG, o resultado da soldagem é apresentado na Figura 3, e obtidos os dados de temperatura, apresentados na Figura 4.

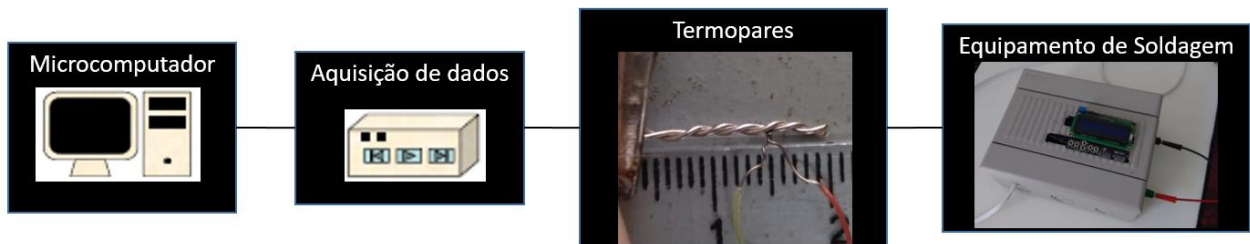


Figura 2- Esquema de montagem da bancada experimental utilizada na execução dos experimentos



Figura 3. Termopar soldado

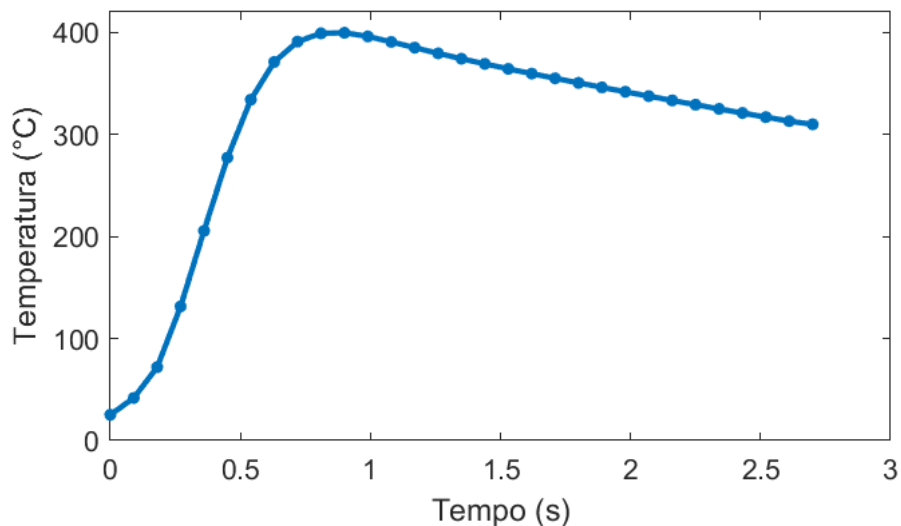


Figura 4- Perfil da distribuição de temperatura experimental no processo de soldagem.

2.3. Método da Função Especificada Iterativo

O Método da Função Especificada Iterativo é uma técnica baseada no Método de Minimização de Gauss com regularização em tempos futuros (Beck e Arnold, 1977), capaz de resolver problemas inversos não lineares em condução de calor.

O vetor T é considerado um vetor de observações com tamanho n , dependente de outro vetor com parâmetros desconhecidos β de comprimento p , quando uma variação de Δb é aplicada neste vetor, a temperatura em um ponto do domínio pode ser aproximada através de uma expansão em série de Taylor:

$$T|_{b+\Delta b} \approx T|_b + \left. \frac{\partial T}{\partial \beta} \right|_b \Delta b \quad (10)$$

A Equação (11) representa a matriz sensibilidade, a qual representa o gradiente da Eq. (10).

$$X_\beta = \frac{\partial T}{\partial \beta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_1}{\partial \beta_1} & \frac{\partial T_1}{\partial \beta_2} & \cdots & \frac{\partial T_1}{\partial \beta_p} \\ \frac{\partial T_2}{\partial \beta_1} & \frac{\partial T_2}{\partial \beta_2} & \cdots & \frac{\partial T_2}{\partial \beta_p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial T_{no}}{\partial \beta_1} & \frac{\partial T_{no}}{\partial \beta_2} & \cdots & \frac{\partial T_n}{\partial \beta_p} \end{bmatrix} \quad (11)$$

O problema inverso é resolvido através da minimização da Eq. (12).

$$S = (Y - T)^T (Y - T) \quad (12)$$

Substituindo as Equações (10) e (11) na Eq. (12), e minimizando para Δb , tem-se:

$$\Delta b = (X_\beta^T X_\beta)^{-1} X_\beta^T (Y - T|_b) \quad (13)$$

Para o problema inverso estudado, o parâmetro β possui somente um componente, que é a potência de soldagem $Q(t)$, portanto temos $\Delta b = \Delta Q$. Para cada passo de tempo M , o incremento ΔQ deve ser computado até que a Eq. (14) atinja a convergência.

$$Q_M^{(i+1)} = Q_M^{(i)} + \Delta Q_M^{(i)} \quad (14)$$

2.4. Quantidade de Energia Armazenada no Banco de Capacitores

Segundo Halliday *et al.* (2014) quando existe a associação de capacitores em paralelos, cada capacitor tem a mesma diferença de potencial. Nesse caso, a carga elétrica total armazenada na associação, é a soma da carga de todos os capacitores.

A equação da Energia armazenada pode ser definida por:

$$W = C * \frac{V^2}{2} \quad (15)$$

onde W é a energia armazenada, C é a capacitância total e V é a tensão aplicada no banco de capacitores.

O equipamento de soldagem por descarga capacitiva é composto por três capacitores de 22000 μF totalizando uma capacitância total de 66000 μF , que são submetidos a uma tensão de 40 V, portando a energia total armazenada no banco de capacitores é 52,8J.

3. RESULTADOS

Nessa seção, é apresentado o resultado da estimação da potência e tempo de soldagem obtidos pelo Método da função especificada iterativa junto com o COMSOL.

A potência foi estimada usando parâmetro de regularização, r , de 3 passos de tempos futuros. Na Figura 5 apresenta-se o resultado da potência estimada usando o Método da Função Especificada Iterativa. A potência máxima estimada foi

de 37,8 W, a potência atinge o valor máximo entre os tempos de 0,63 e 0,72 segundos e retorna a zero no tempo de 0,92 segundos.

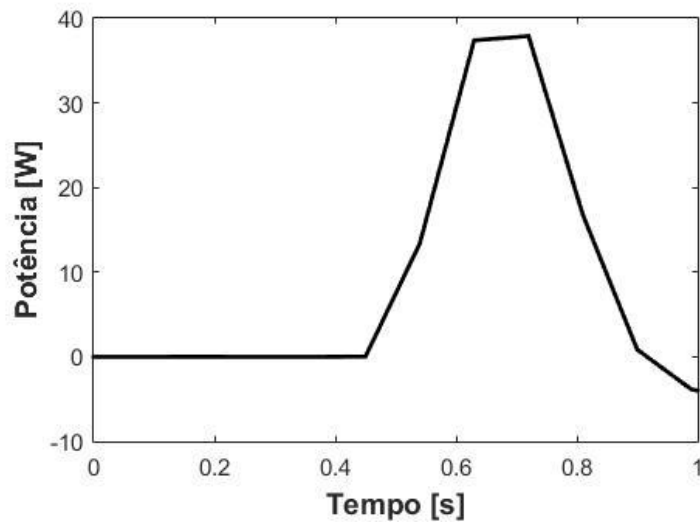


Figura 5. Potência estimada em função do tempo pelo Método da Função Especificada Iterativo.

Na Figura 6 apresenta-se o erro relativo de convergência do método aplicado, o método converge para erros menores que 0,001, portanto para todos os passos de tempo a convergência foi atingida.

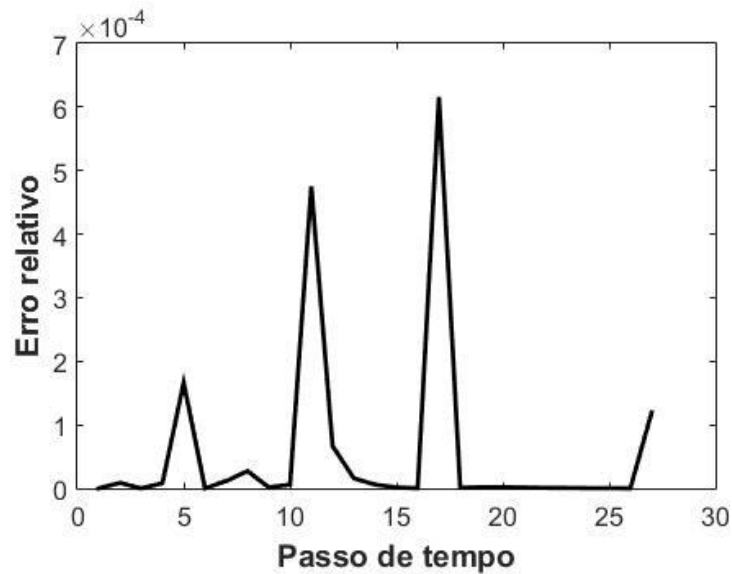


Figura 6. Erro relativo

Na Figura 7 apresenta-se a comparação dos dados de temperatura medidos experimentalmente e as temperaturas estimadas a partir do fluxo de calor estimado. Os valores de temperaturas obtidos experimentalmente estão bem próximos dos calculados. Os valores residuais entre as temperaturas experimentais e as estimadas estão representados com a linha tracejada do gráfico apresentado na Figura 7. O resíduo de temperatura máximo obtido é de 16 °C, com uma média de 0,16 °C e o desvio padrão de 4,8 °C.

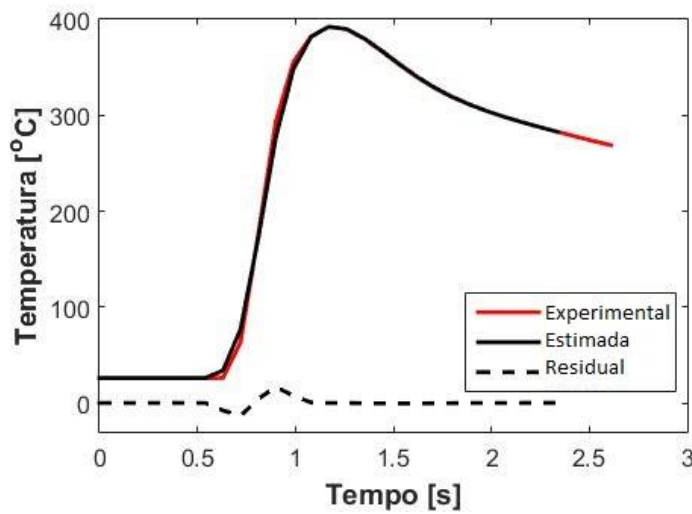


Figura 7. Temperatura estimada, experimental e resíduo de temperatura.

Para o cálculo da eficiência foi utilizada a energia gerada pelo fluxo de calor estimado em Joules, calculada pela área hachurada na Figura 8. E é obtida pela integral da potência estimada pelo tempo do processo de soldagem por descarga capacitiva. O valor da energia calculada foi 9,5293 J.

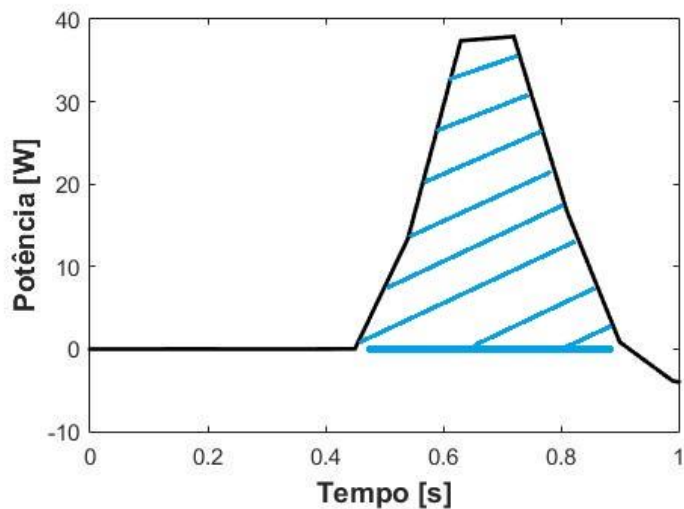


Figura 8. Energia utilizada no processo de soldagem.

A eficiência é dada por:

$$\eta = \frac{E}{W} \quad (16)$$

onde η é a eficiência, E a energia consumida pelo fluxo de calor e W a energia total armazenada no banco de capacitores.

O valor da eficiência média calculada para o processo de soldagem por descarga capacitiva foi 0,18048. O tempo de fluxo de calor produzido pela descarga capacitiva estimado foi de 0,47 s. Com a energia gerada pelo fluxo de calor de 9,5293 J, foi possível realizar uma esfera de solda com diâmetro de 1,83 mm, a qual é eficaz para a utilização do termopar. A baixa eficiência do processo pode ser explicada pela grande dissipação de energia em forma de luz e som durante o processo.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma técnica de problemas inversos para estimar a taxa de transferência de calor do processo de soldagem por descarga capacitiva em termopares tipo K. O Método da Função Especificada Iterativa foi capaz de

estimar a potência utilizada no processo, o que resultou em bons resultados da comparação de dados experimentais com dados estimados.

O uso do COMSOL permitiu fazer ajustes nas condições de contorno, a fim de obter um modelo térmico próximo da realidade, isso foi essencial para que os dados do modelo pudessem ser comparados com os dados experimentais.

A sugestão para os próximos trabalhos é replicar o método utilizado na soldagem de outros tipos de termopares, como tipo T, tipo E, tipo J, entre outros, os quais são constituídos de materiais diferentes dos estudados nesse trabalho.

3. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES e à FAPEMIG pelo apoio financeiro.

4. REFERÊNCIAS

Beck, J. V., Arnold, K. J., 1977. "Parameter Estimation in Engineering and Science". Wiley Interscience, New York, 1977.

Beck, J.V., Blackwell, B. and Clair, C.St., 1985. "Inverse Heat Conduction: Ill-posed Problems", Wiley-Interscience Publication, New York, NY.

Brito, R.F., Carvalho S.R., Lima E Silva, S.M.M., 2015. "Experimental investigation of thermal aspects in a cutting tool using comsol and inverse problem". Applied Thermal Engineering, Volume 86, Pages 60-68.

Buttsworth, D. R., 2001. "Assessment of effective thermal product of surface junction thermocouples on millisecond and microsecond time scales", Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 25, Issue 6, Pages 409-420.

Dourado da Silva, R.G., Magalhaes, E.S., Lima E Silva, S.M.M., 2018. "A Time Traveling Regularization Method For Three Dimensional Inverse Problems in Heat Conduction". In Proceedings of the 17th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering- ENCIT 2018. Águas de Lindóia, Brazil.

Halliday, D., Resnick, R., Walker, J., 2014. "Fundamentos de Física" 9ª ed., Editora LTC, Rio de Janeiro-RJ, v. 4.

Incropera, F.P., Bergman, T.L., Dewitt, D.P., Lavine, A.S., 2008. "Fundamentos de transferência de calor e de massa", 6ª ed., Editora LTC, Rio de Janeiro-RJ, 643p

Sasaki, S., Masuda, H., Higano, M., 1994. Simultaneous measurements of specific heat and total hemispherical emissivity of chromel and alumel by a transient calorimetric technique. Int J Thermophys 15, 547–565.

Silva, C. P.; Lima e Silva, A. L. F.; Lima e Silva, S. M. M., 2012. "Uso de regularização em problemas inversos de transferência de calor. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2012.

Stoltz Jr., G., 1960, "Numerical solution to an inverse problem of heat conduction for simple shapes", Journal of Heat Transfer", Vol. 82, No. 1, pp. 20-26.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

USE OF THE INVERSE PROBLEM TECHNIQUE IN HEAT TRANSFER TO ESTIMATE THE HEAT RATE IN THE CAPACITIVE DISCHARGE WELDING PROCESS

Fábio Silva Faria

Gustavo Cardoso Zotin

Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva

Laboratório de Transferência de Calor – LabTC, Instituto de Engenharia Mecânica – IEM, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Campus Prof. José Rodrigues Seabra, Av. BPS, 1303, 37550-903, Itajubá, MG, Brasil.
e-mails: fabiofaria@unifei.edu.br, gustavo.zotin@gmail.com, metrevel@unifei.edu.br

Rodrigo Gustavo Dourado da Silva

Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, Divisão de Pós-Graduação e Pesquisa, Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, - Vila das Acácias, 12228-900, São José dos Campos, SP, Brasil.
e-mail: rodrigodourado@hotmail.com

Abstract. *Determining the heat input in a welding process is essential for process improvement. With the knowledge of the amount of heat used in the process, it is possible to control the equipment so that there is no excess or lack of energy. When too much energy is supplied to the process, the material may deteriorate or oxidize, affecting its mechanical properties. On the other hand, when there is a lack of energy in the process, the union of materials is not resistant and can break. In the case of welding thermocouples in metals, the lack of precision causes errors in temperature measurements. In this work, an inverse problem technique is used to estimate the rate of heat input when welding K-type thermocouples. An inverse heat conduction problem is one in which the boundary conditions or input parameters are unknown. To solve the problem, temperature data obtained experimentally at an accessible point of the domain are used. As the process studied in this work is fast, obtaining these temperatures is difficult. Furthermore, it would be difficult to measure the heat flux in the weld pool using a heat flux transducer, for example. For this reason, to evaluate unknown and difficult to measure parameters it is essential to apply an inverse heat conduction problem technique. To solve the numerical problem, a three-dimensional model was studied using the commercial program COMSOL Multiphysics. To solve the inverse problem, the non-linear Function Specification Method was used, in which the heat flux that minimizes the objective function in each time interval is estimated. The objective function compares the measured and calculated temperatures in a region close to the heat source. Once the total energy employed is known by calculating the energy stored in the capacitor bank, the efficiency of the welding process is also evaluated. The process efficiency value obtained in the result of this work was approximately 18%. The low efficiency value is justified by the high amount of energy dissipated in the form of light and noise.*

Keywords: *Inverse Problem; COMSOL; Capacitive discharge; Iterative Function Specification method.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.