



21-25  
AGOSTO DE 2016  
FORTALEZA - CEARÁ

## ANÁLISE DA CURVA DE RENDIMENTO TÉRMICO DE PROCESSO DE SOLDAGEM TIG

Elisan dos Santos Magalhães, elisan@unifei.edu.br<sup>1</sup>  
Ana Lúcia Fernandes Lima e Silva, alfsilva@unifei.edu.br<sup>1</sup>  
Sandro M. M. de Lima e Silva, metrevel@unifei.edu.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica – IEM, Laboratório de Transferência de Calor – LabTC, Campus Prof. José Rodrigues Seabra, Av. BPS, 1303, bairro Pinheirinho, Itajubá - MG, CEP 37500-903

**Resumo:** Apresenta-se neste trabalho uma análise da curva de rendimento térmico em função do tempo para o processo de soldagem TIG em Aço Inox AISI 304. Para isso, modificou-se o código computacional, previamente desenvolvido em linguagem C++, baseado na equação da difusão tridimensional com fonte de calor móvel e mudança de fase calculada através do método da Entalpia. Para estimação do fluxo de calor utilizou-se a técnica inversa de minimização da Seção Áurea. No programa também, as propriedades termofísicas foram consideradas sendo dependentes da temperatura. Duas metodologias são propostas: acoplar um sensor móvel de temperatura para minimização da função objetivo da técnica da Seção Áurea e a análise temporal fundamentada no conceito de viagem no tempo. O sensor móvel de temperatura consiste em aproximar as temperaturas experimentais medidas na face oposta ao cordão de solda de modo que se obtenha uma função de temperatura em relação ao eixo  $x$  e ao tempo. A metodologia embasada na viagem no tempo é uma proposta de regularização para técnica da Seção Áurea. Essa regularização constitui-se em verificar o comportamento da temperatura em uma determinada posição no tempo futuro e alinha-la no passo de tempo atual. Essa nova técnica permite a estimação precisa do aporte de calor em função do tempo da amostra. A partir do aporte de calor em função do tempo é possível determinar a curva do rendimento de um processo de soldagem. Para validação da metodologia, realizou-se experimentos controlados em laboratório. A metodologia desenvolvida para este trabalho apresentou resultados satisfatórios. Para o caso experimental analisado a curva de rendimento térmico foi determinada com precisão.

**Palavras-chave:** Problemas Inversos, Condução de calor, Estimação de Fluxo de calor, Métodos numéricos e experimentais.

### 1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios em todos os processos de soldagem é o desenvolvimento de uma metodologia simples e de baixo custo para determinar a eficiência térmica. O que permitiria a determinação precisa dos parâmetros de soldagem que levam ao rendimento térmico máximo sem a necessidade de realizar vários experimentos laboratoriais. O que implicaria na redução de custos do processo. Os parâmetros ótimos para um processo de soldagem podem ser obtidos através de uma análise estatística (Koleva, 2005). Apesar do método estatístico poder determinar a melhor configuração em experimentos aleatórios, ele não pode obter numericamente o aporte de calor a placa. Consequentemente, a eficiência do processo não pode ser determinada.

A maior parte dos modelos térmicos de processos de soldagem possuem o termo de fluxo de calor prescrito com um termo de eficiência acoplado. Encontram-se várias menções do uso desse termo na equação de distribuição de calor, no entanto, frequentemente esse valor não é apresentado, por exemplo o modelo térmico usado por Wahab *et al.* (1998). Outros autores usam valores de rendimento tabelados na literatura como por exemplo; Pieskarska e Kubiak (2011) que assumiram o rendimento de um processo de soldagem a laser híbrido como sendo 75%, ou também Sudheesh e Prasad (2015) que modelaram a eficiência térmica do processo de soldagem TIG como sendo 70%. O caráter empírico da determinação da eficiência térmica impede a validação desses modelos propostos. Portanto, os resultados atingidos por esses autores podem ser confrontados. Na verdade, a eficiência térmica de um processo de soldagem não depende apenas do tipo de processo por si só, mas de um conjunto de fatores que influenciaram na sua qualidade como: o material a ser soldado, a corrente utilizada, tensão, ângulo de apontamento, a distância entre o eletrodo e a placa, etc.

Um método para medir diretamente a eficiência do processo é através do uso de um calorímetro (Nasiri *et al.*, 2014). No entanto, devido ao custo deste equipamento pode ser necessário esse método é usualmente deixado de lado. Outra maneira é através dos modelos numéricos. O primeiro modelo térmico para processos de soldagem relatado na literatura é o descrito por Rosenthal (1946). Apesar desse modelo ser amplamente utilizado até os dias atuais (por exemplo, Xia *et al.*, 2008; Pham, 2013, e Han *et al.*, 2014), ele considera a energia de soldagem concentrada em apenas um ponto. Essa limitação impossibilita o cálculo da temperatura nas proximidades da zona de fusão. Outro ponto fraco desse modelo é a dependência linear das propriedades. Ou seja, ele assume a temperatura como sendo independente da variação das propriedades térmicas com a temperatura (Goldak e Akhlaghi, 2005). Devido às limitações apresentadas no modelo de Rosenthal, ele não deve ser usado para análise de rendimento térmico do processo.

Uma metodologia eficiente para determinação do aporte de calor é a análise via problemas inversos. O uso de problemas inversos permite a determinação precisa do aporte de calor através de técnicas de otimização. Nessas análises, a temperatura numérica é minimizada através de uma função objetivo até que ela atinja a temperatura medida. Por exemplo, para estimar o aporte de calor em um processo de soldagem TIG, Gonçalves *et al.* (2010) utilizaram a técnica da Seção Áurea para minimizar uma função objetivo baseada na diferença quadrática entre a temperatura calculada experimentalmente e numericamente. No entanto, nesse caso os autores puderam apenas estimar o aporte de calor médio devido à falta de um termo de regularização acoplada a técnica de minimização. Yang *et al.* (2011) aplicaram o método do gradiente conjugado e o princípio da discrepância para determinar a taxa de geração de calor em um processo de soldagem por fricção. Magalhães *et al.* (2015) desenvolveram um código inverso baseado na técnica de otimização BFGS para estimar o aporte de calor no processo de soldagem TIG em alumínio.

Propõe-se neste trabalho uma metodologia diferente para determinação da curva de rendimento térmico temporal de um processo de soldagem TIG. Para isso, a técnica de minimização da Seção Áurea (Vanderplaats, 2005) foi utilizada como uma técnica de solução de problemas inversos para minimização do aporte de calor durante o processo de soldagem. No entanto, um modelo baseado no conceito de viagem no tempo foi desenvolvido para regularização da técnica da Seção Áurea. Uma técnica de sensor numérico móvel de temperatura também é proposta para estimação da curva de rendimento de soldagem.

## 2. METODOLOGIA

Um modelo térmico baseado na equação da difusão de calor tridimensional com fonte de calor móvel e modelagem térmica da poça de fusão através do método da Entalpia foi resolvido através do método das diferenças finitas em linguagem de programação C++. Maiores detalhes sobre o desenvolvimento da metodologia computacional aplicada a resolução do problema proposto neste trabalho podem ser encontrados em Magalhães *et al.* (2015). Detalhes do desenvolvimento teórico, bem como as condições de contorno utilizadas também estão descritos em Magalhães *et al.* (2015).

### 2.1. Método Viagem no Tempo

A técnica de estimação do fluxo de calor proposta neste trabalho possui uma modificação fundamentada no conceito de viagem no tempo. Portanto, o principal ponto da técnica de otimização é de a partir de um chute inicial analisar uma linha do tempo hipotética. A partir disso, comparar o parâmetro a ser minimizado em um tempo futuro. Se a linha do tempo não satisfazer a condição de ponto ótimo, o método volta ao tempo presente e muda o chute inicial. Essa metodologia permite contornar o tempo de resposta do material devido a condição de contorno imposta. Portanto, essa configuração reduz o número de passos de tempo futuros nas técnicas de regularização convencionais.

Apresenta-se na Fig. 1 a representação esquemática da metodologia viagem no tempo, sendo que  $ntf$  representa o número de passos de tempo futuro,  $i$  é o contador do método Viagem no Tempo e  $j$  o contador do modelo analisado. A metodologia apresentada na Fig. 1 pode ser aplicada num problema de soldagem por exemplo. Utilizando o método de solução para o problema de soldagem descrito em Magalhães *et al.* (2015), as propriedades térmicas são assumidas como dependentes da temperatura. Portanto, para esse caso a única variável a ser minimizada é o fluxo de calor. A técnica de otimização requer um chute inicial para o fluxo de calor. A partir desse chute, o fluxo de calor será considerado como uma constante no intervalo 1 a  $ntf$  (número de tempos futuros). A função objetivo será então comparada no passo de tempo  $j+ntf$ . Se o chute inicial não se aproximar do valor ótimo, a técnica de otimização redefinirá o valor do fluxo de calor e reiniciará o modelo a partir dos valores obtidos para  $j-1$ . Esse procedimento iterativo será compilado até o critério de sensibilidade ser satisfeito.

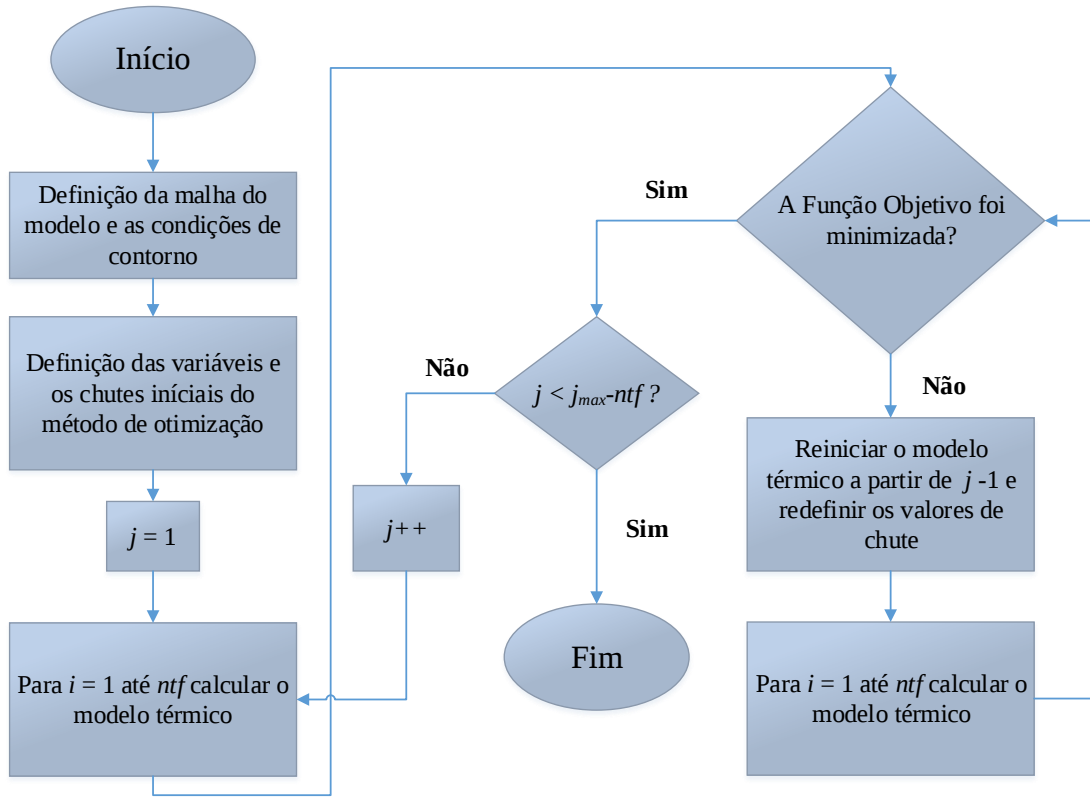


Figura 1. Diagrama do Método Viagem no Tempo.

## 2.2. Função Objetivo

Para estimar a entrada de calor neste trabalho, aplicou-se a técnica da Seção Áurea. Essa técnica de otimização requer uma função objetivo. Devido ao elevado gradiente térmico característico do processo, optou-se pela utilização de uma função objetivo com diferenças de temperatura elevada a quarta potência. Portanto, a função objetivo adotada nesse trabalho é definida por:

$$F_{obj} = (T_e^{j+ntf} - T_n^{j+ntf})^4 - \alpha_{reg} (q_j - q_{j-1})^2 \quad (1)$$

sendo  $F_{obj}$  a função objetivo,  $T_e^{j+ntf}$  e  $T_n^{j+ntf}$  as temperaturas experimental e numérica respectivamente no passo de tempo  $j + ntf$ ,  $\alpha_{reg}$  o parâmetro de regularização,  $q_j$  o fluxo estimado e  $q_{j-1}$  o último valor para o fluxo estimado.

## 2.3. Propriedades térmicas

A condutividade, difusividade e emissividade foram consideradas como dependentes da temperatura. As curvas de condutividade e difusividade foram construídas a partir dos dados apresentados em Touloukian *et al.* (1975). E a curva de emissividade foi obtida através regressão logarítmica dos dados apresentados por Roger *et al.* (1979). As Equações (2-4) apresentam as curvas utilizadas:

$$\lambda(T) = -7.52 \times 10^{-11} T^4 + 1.95 \times 10^{-7} T^3 - 1.80 \times 10^{-4} T^2 + 8.43 \times 10^{-2} T + 1.73 [\text{W/mK}] \quad (2)$$

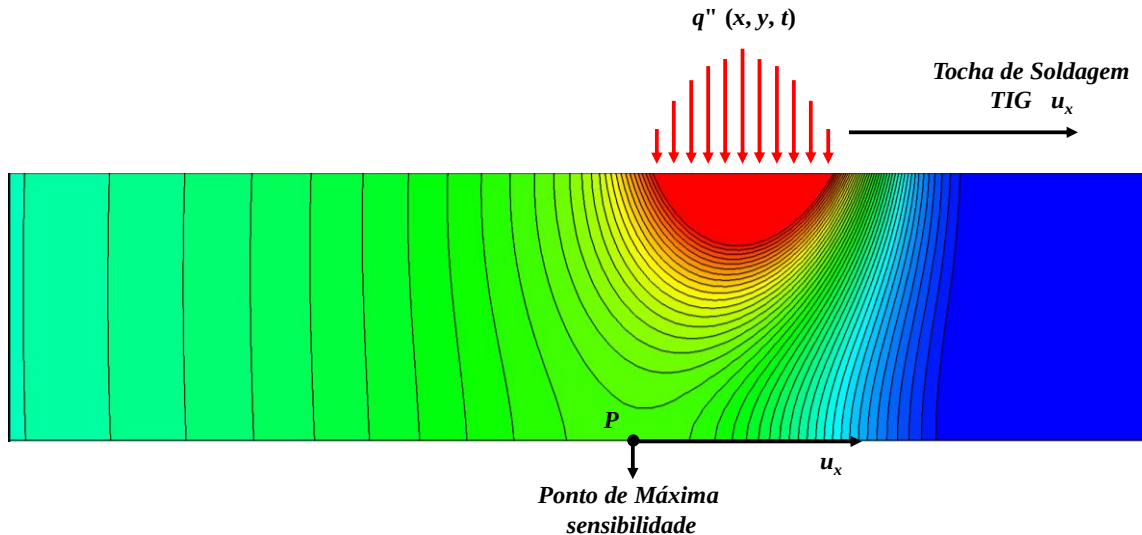
$$\alpha(T) = 1.41 \times 10^{-9} T + 3.10 \times 10^{-6} [m^2/s^2] \quad (3)$$

$$\varepsilon(T) = 8.47 \times 10^{-2} \ln(T) - 39.32 \times 10^{-2} \quad (4)$$

sendo  $\lambda$  a condutividade,  $\alpha$  a difusividade térmica,  $\varepsilon$  a emissividade e  $T$  a temperatura.

## 2.4. Sensor Móvel de Temperatura

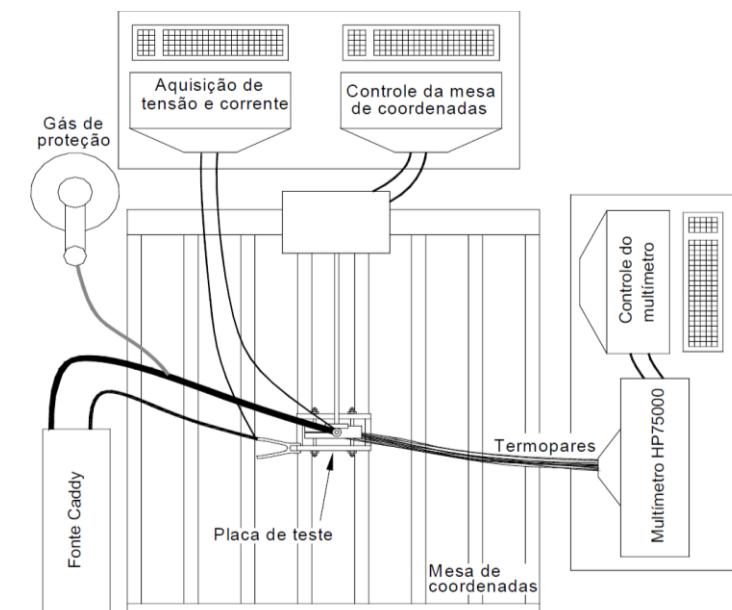
Visando aprimorar a estimação do fluxo de calor, propõe-se neste trabalho a estimação do fluxo de calor a partir de um sensor móvel de temperatura. O aprimoramento proposto permite a determinação da curva de eficiência térmica da tocha de soldagem. Da mesma maneira, o sensor móvel permite a estimação do calor no ponto de máxima sensibilidade. Apresenta-se na Fig. 2 o problema descrito. Para este trabalho, a tocha de soldagem TIG impõe a condição de contorno de fluxo de calor  $q''(x, y, t)$  com velocidade  $u_x$ . O ponto de minimização  $P$  também se move com velocidade  $u_x$  na direção correspondente ao eixo  $x$ . O acoplamento entre o sensor de temperatura móvel e o método Viagem no Tempo possibilita a determinação eficiente da curva de rendimento térmico da tocha de soldagem.



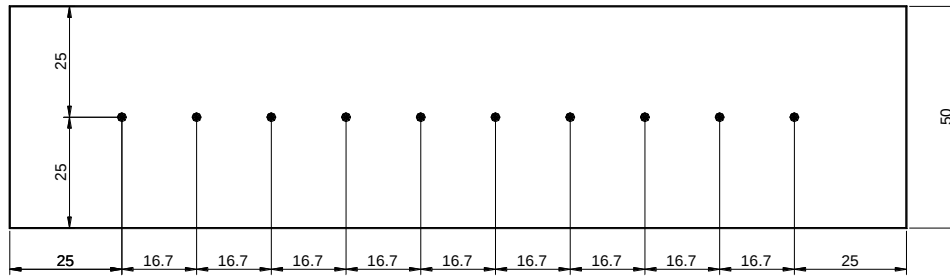
**Figura 2.** Esquema do posicionamento do sensor móvel para um determinado passo de tempo.

## 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Apresenta-se na Fig. 3 a disposição e os equipamentos utilizados para realização dos experimentos de determinação do fluxo de calor em um processo de soldagem TIG. Utilizou-se amostras de aço inoxidável AISI 304 com dimensões  $200 \times 50 \times 4$  mm. Dez termopares tipo K foram soldados por descarga capacitiva na superfície oposta ao fluxo de calor da amostra. Os termopares foram espaçados de 16,7 mm conforme mostrado na Fig. 4. O elevado número de sensores de temperatura permite a aproximação linear dos picos de temperatura na superfície oposta ao aquecimento da amostra. Essa aproximação é necessária para aplicação da técnica do sensor de temperatura móvel. Utilizou-se um sistema de aquisição de dados HP75000 series B acoplado a um computador para aquisição dos dados de temperatura. Utilizou-se também uma mesa de coordenadas para automatização do processo.



**Figura 3.** Esquema de montagem da bancada experimental.



**Figura 4.** Posicionamento dos termopares nas amostras de Aço Inox AISI 304.

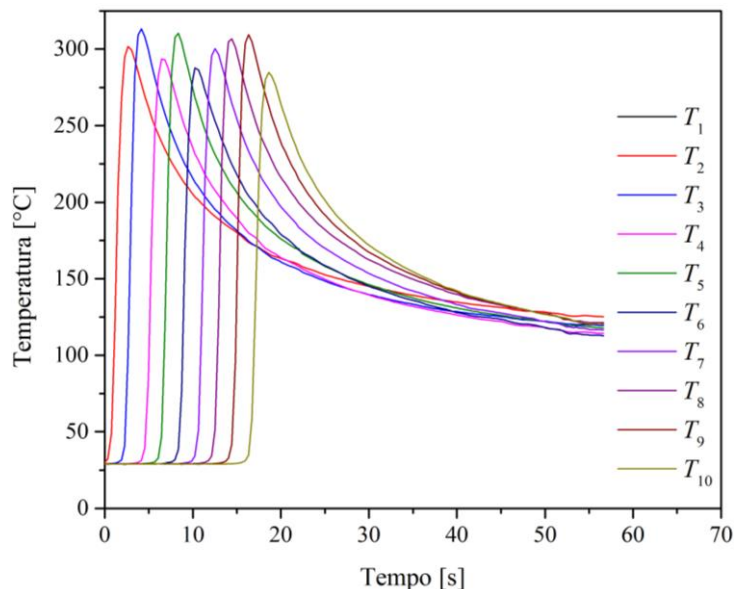
Apresenta-se na Tab. 1 as condições experimentais testadas, bem como o ângulo de apontamento utilizado, a distância  $La$  entre a tocha de soldagem e a amostra, a corrente, o gás de proteção e a largura do cordão. Este conjunto de experimentos foi selecionado a partir de um planejamento estatístico Taguchi (Projeto Robusto). Obteve-se a largura do cordão para cada condição experimental através de um analisador de imagem.

**Tabela 1.** Condições experimentais testadas

| Ensaio | Ângulo de apontamento<br>( $\pm 1^\circ$ ) | $La$ [mm]<br>( $\pm 0,1$ mm) | Corrente [A]<br>( $\pm 0,1$ A) | Gás de proteção | Largura do cordão [mm]<br>( $\pm 0,1$ mm) |
|--------|--------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------|-------------------------------------------|
| A01    | 30°                                        | 2                            | 40                             | Ar              | 2                                         |
| A02    | 30°                                        | 3                            | 70                             | Ar+25%He        | 3                                         |
| A03    | 30°                                        | 4                            | 100                            | Ar+25%He        | 4                                         |
| A04    | 60°                                        | 2                            | 70                             | Ar+25%He        | 3                                         |
| A05    | 60°                                        | 3                            | 100                            | Ar              | 4                                         |
| A06    | 60°                                        | 4                            | 40                             | Ar+25%He        | 2                                         |
| A07    | 90°                                        | 2                            | 100                            | Ar+25%He        | 4                                         |
| A08    | 90°                                        | 3                            | 40                             | Ar+25%He        | 2                                         |
| A09    | 90°                                        | 4                            | 70                             | Ar              | 3                                         |

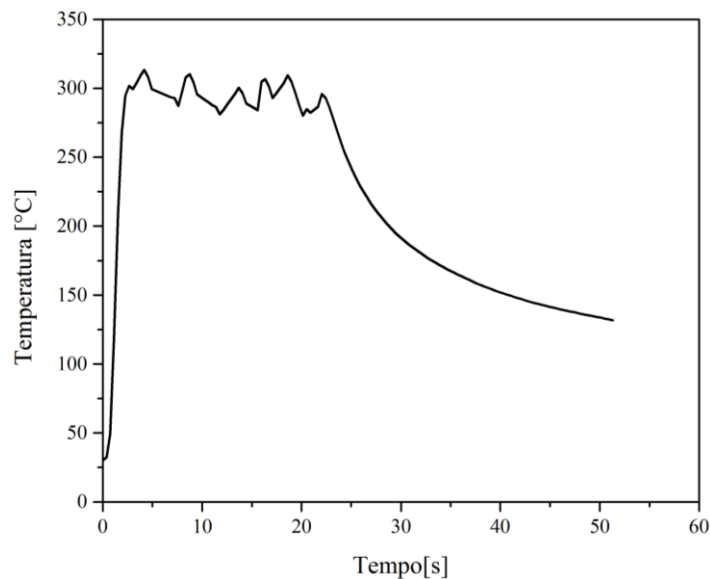
#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Devido ao elevado custo computacional para simulação dos processos de soldagem (cerca de 74 horas por simulação), a seguir são apenas mostrados os resultados para o caso A02. Apresenta-se na Fig. 5 os sinais de temperatura medidos para o ensaio A02 apresentado na Tab.1. Observa-se que para esta condição experimental a temperatura experimental máxima obtida na superfície oposta ao aquecimento foi cerca de 315°C.



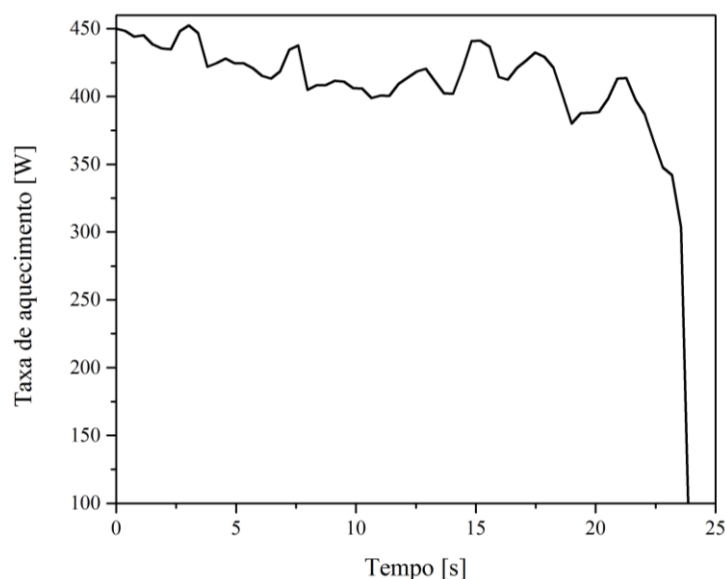
**Figura 5.** Temperatura experimental na superfície oposta ao aquecimento para condição A02.

O elevado número de sensores de temperatura possibilita a aproximação de uma curva de temperatura para o sensor móvel que é representado de acordo com a Fig. 2 pelo ponto  $P$ . Na Figura 6 apresenta-se a curva de temperatura  $P$  ( $u_x \times t, t$ ) utilizada para a estimação do fluxo de calor. Portanto para cada ponto observado na Fig. 6,  $P$  apresenta uma posição diferente em relação ao eixo  $x$ . Observa-se que apesar do aquecimento girar entorno de  $300^\circ\text{C}$ , não há uma suavização da temperatura na região de aquecimento. Essa oscilação pode ser associada a diversas causas: a velocidade de soldagem ser irregular, o material não ser homogêneo e a fixação dos termopares não ter sido adequada. Os experimentos foram feitos em uma mesa de coordenadas automatizada o que, portanto, minimiza as possíveis oscilações na velocidade de soldagem. Para a precisa determinação da homogeneidade do material são necessárias diversas análises microestruturais para determinação da microestrutura do material. A análise microestrutural possibilitaria a identificação de novas fases de precipitados que possuiriam valores de condutividade e difusividade que poderiam interferir na taxa de aquecimento e resfriamento do material. No entanto, a causa mais provável da não linearidade na região do aquecimento é a fixação do termopar. Para essa avaliação é necessário a realização de maiores números de experimentos para cada condição experimental.



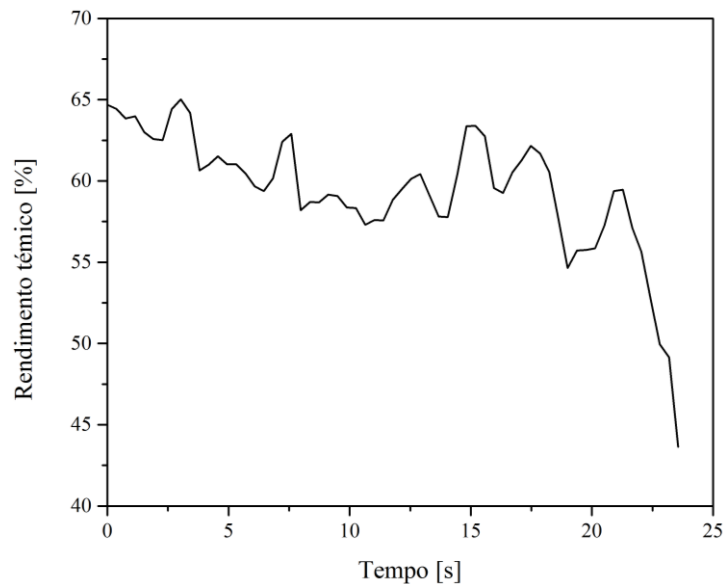
**Figura 6.** Temperatura do sensor móvel  $P$ .

A não uniformidade da temperatura na região de aquecimento implicará em oscilações semelhantes na estimação da taxa de aquecimento do processo de soldagem. Na Figura 7 apresenta-se a taxa de aquecimento da chapa em função do tempo para o caso experimental A02 apresentado na Tab. 1. Observa-se que apesar de o método utilizado ser o da Seção Áurea, não existe uma oscilação brusca na região de aquecimento. A simulação contou com apenas 3 passos de tempos futuros no método Viagem no Tempo.



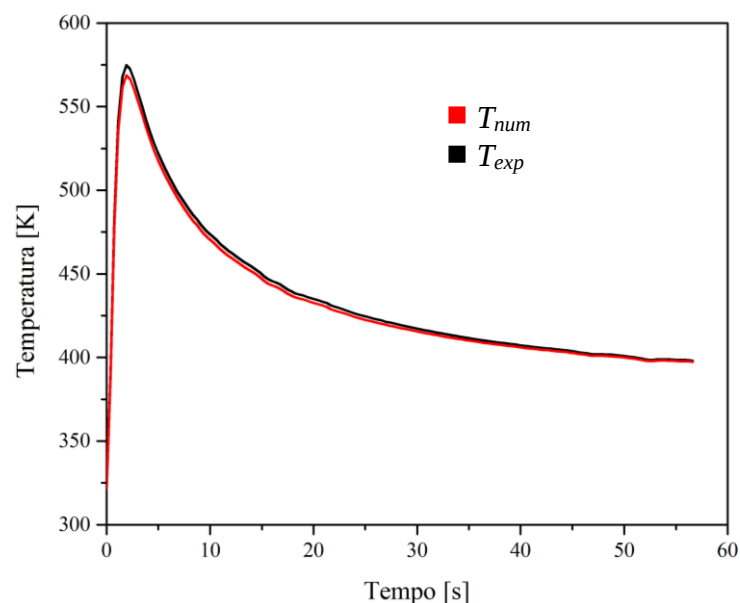
**Figura 7.** Taxa de aquecimento para o caso A02.

Dividindo-se os valores obtidos para a taxa de aquecimento na placa pelos valores de tensão e corrente aplicados na fonte obtém-se o rendimento térmico do processo em função do tempo para o caso A02 mostrado na Fig. 8. Sendo o rendimento de soldagem definido como a porcentagem do calor gerado pelo arco elétrico que é efetivamente entregue a chapa soldada. Observa-se que o rendimento térmico da tocha em função do tempo tende a decrescer a medida que o tempo aumenta. Isso pode ser explicado, durante o processo de soldagem ocorre uma contínua difusão de calor na amostra. Esse armazenamento de energia leva ao aumento da temperatura nos pontos, sobre a chapa, que serão soldados a seguir. Como esses pontos possuem maior energia que os anteriores, eles tendem refletir mais o calor que lhes é imposto. Diminuindo assim o rendimento térmico da tocha de soldagem TIG.



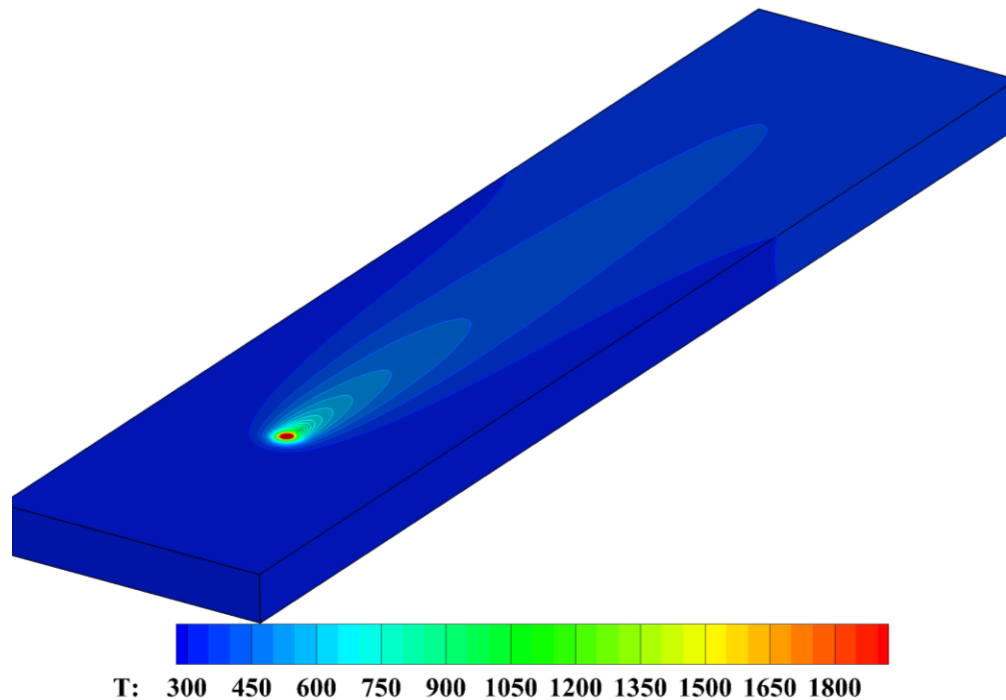
**Figura 8.** Curva de rendimento térmico do processo de soldagem TIG para o caso A02.

Como apresentado em Magalhães *et al.* (2015), o código computacional desenvolvido também prediz com exatidão as temperaturas numéricas. Um comparativo entre os valores experimentais de temperatura para o termopar  $T_1$  (Fig. 5) e os valores calculados pelo software é mostrado na Fig. 9. Observa-se a boa concordância entre as curvas. No entanto a temperatura de pico tende a ser um pouco menor quando comparada a temperatura experimental. Essa diferença é correlacionada ao erro inerente dos valores atribuídos as propriedades térmicas. Para uma maior precisão dos dados calculados é necessária a estimativa da condutividade e difusividade térmica do Aço Inox AISI 304 a elevadas temperaturas, principalmente na fase líquida. Infelizmente esses valores ainda não são comumente reportados na literatura.



**Figura 9.** Temperatura numérica e experimental para o caso A02.

Apresenta-se na Fig. 10 o campo de temperaturas obtido para a condição A02 (Tab. 1) para o instante de tempo  $t = 19\text{s}$ . Diferentemente do caso analisado por Magalhães *et al.* (2015), em que os autores obtiveram isotérmicas circulares devido à alta condutividade do alumínio, na simulação realizada para o Aço AISI 304 obteve-se isotérmicas ovais. Este fato está intrinsecamente ligado a baixa condutividade do aço inox quando comparada ao alumínio. Com uma menor condutividade, o calor tende a reter na região de solda provocando assim, um resfriamento mais lento do processo.



**Figura 10.** Campo de temperaturas em [K] do processo de soldagem TIG para o caso A02 no instante  $t = 19\text{s}$ .

## 5. CONCLUSÕES

Apresentou-se nesse trabalho uma modelagem de menor custo e acessível para determinação do rendimento térmico de um processo de soldagem. O agrupamento entre o modelo proposto de viagem no tempo e a técnica do sensor móvel de temperatura provaram ser de grande utilidade para estimação da eficiência de um processo de soldagem TIG. A mesma metodologia pode ser aplicada para estimação do aporte de calor de diversos processos de soldagem. A aplicação da técnica de otimização Seção Áurea permitiu a estimação do fluxo de calor da chapa. Através desse fluxo, o rendimento térmico do processo pode ser determinado. A similaridade entre a temperatura estimada e medida comprovam a eficiência do software desenvolvido. Uma proposição para trabalhos futuros é a aplicação do modelo desenvolvido para estimação do rendimento térmico em outros processos de fabricação, como por exemplo o processo de usinagem.

## 6. AGRADECIMENTOS

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

## 7. REFERÊNCIAS

- Goldak, J.A., Akhlaghi, M., 2005, Computational Welding Mechanics, Springer.
- Gonçalves, C.V., Carvalho, S.R., Guimarães, G., 2010, "Application of optimization techniques and the enthalpy method to solve a 3D-inverse problem during a TIG welding process", Applied Thermal Engineering, Vol. 30, pp. 2396-2402.
- Han, K., Yoo, J., Lee, B., Han, I., Lee, C., 2014, "Effect of Ni on the hot ductility and hot cracking susceptibility of high Mn austenitic cast Steel", Materials Science Engineering A, Vol. 618, pp. 295-304.
- Koleva, E. 2005, "Electron beam weld parameters and thermal efficiency improvement", Vacuum, Vol. 77, No. 4, pp. 413-421.
- Magalhães, E.S., Carvalho, S.R., Lima e Silva, A.L.F., Lima e Silva, S.M.M., 2015, "The use of non-linear inverse problem and enthalpy method in GTAW process of aluminum", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 66, pp. 114-121.

- Nasiri, M.B., Behzadinejad, M., Latifi, H., Martikainen, J., 2014, "Investigation on the influence of various welding parameters on the arc thermal efficiency of the GTAW process by calorimetric method", *Journal of Mechanical Science Technology*, Vol. 28, pp. 3255-3261.
- Pham, X.-T., 2013, "Two-dimensional Rosenthal moving heat source analysis using the meshless element free Galerkin Method", *Numerical Heat Transfer Part A Applications*, Vol. 63, pp. 807-823.
- Piekarska, W., Kubiak, M., 2011, "Three-dimensional model for numerical analysis of thermal phenomena in laser-arc hybrid welding process", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol 54, pp. 4966-4974.
- Roger, C.R., Yen, S.H., Ramanathan, K.G., 1979, "Temperature variation of total hemispherical emissivity of stainless steel AISI 304", *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 69, p. 1384.
- Rosenthal, D., 1946, "The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments", *Trans. ASME*, Vol. 68, pp. 849-866.
- Sudheesh, R.S., Prasad, N.S., 2015, "Comparative study of heat transfer parameter estimation using inverse heat transfer models of a trailing liquid Nitrogen jet in welding", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 36, pp. 178-185.
- Touloukian, Y.S., Kirby, R.K., Taylor, R.E., Desai, P.D., 1975, Volume 1: Thermal conductivity – Metallic elements and alloys, *Thermophysical Properties of Matter – The TPRC Data Ser.*
- Vanderplaats, G.N., 2005, *Numerical optimization techniques for engineering design*, 4<sup>th</sup> ed., Vanderplaats Research and Development Inc..
- Xia, M., Biro, E., Tian, Z.L., Zhou, Y.N., 2008, "Effects of heat input and martensite on HAZ softening in laser welding of dual phase steels", *ISIJ International*, Vol. 48, pp. 809-814.
- Yang, Y.-C., Chen, W.-L., Lee, H.-L., 2011, "A nonlinear inverse problem in estimating the heat generation in rotary friction welding", *Numerical Heat Transfer Part A: Applications*, Vol. 59, pp. 130-149.
- Wahab, M.a., Painter, M.J., Davies, M.H., 1998, "The prediction of the temperature distribution and weld pool geometry in the gas metal arc welding process", *J. Materials Processing Technology*, Vol. 77, pp. 233-239.

## 8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

"Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho".

## A THERMAL EFFICIENCY ANALYSIS OF A TIG WELDING PROCESS

Elisan dos Santos Magalhães, [elisan@unifei.edu.br](mailto:elisan@unifei.edu.br)<sup>1</sup>

Ana Lúcia Fernandes Lima e Silva, [alfsilva@unifei.edu.br](mailto:alfsilva@unifei.edu.br)<sup>1</sup>

Sandro M. M. de Lima e Silva, [metrevel@unifei.edu.br](mailto:metrevel@unifei.edu.br)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica – IEM, Laboratório de Transferência de Calor – LabTC, Campus Prof. José Rodrigues Seabra, Av. BPS, 1303, bairro Pinheirinho, Itajubá - MG, CEP 37500-903

**Abstract.** *This work presents an analyze of the thermal efficiency curves as a function of the time in a AISI 304 stainless steel TIG welding process. With the purpose of estimate the amount of heat delivered by the GTAW torch, a previous developed handmade C++ code based on the three-dimensional heat diffusion equation and the enthalpy method was modified. The new model proposes the heat flux estimation through the Gold Section optimization technique. The software considered the thermal properties as temperatures dependent. Two innovative methodologies were proposed: a mobile sensor of temperature for the Golden Section objective function and the temporal analysis based on time travelling concept. The mobile sensor of temperature consists on the approximation of the experimental temperature of the opposite surface of the weld, this approach allows to obtaining a temperature curve as function of the axes  $x$  and the time. The time travelling methodology is a proposition to minimize the required future time steps on the regularization objective function of the Golden Section technique. This approach consists of verify the temperature behavior in a determined position in a future time and regularize it on the actual time step. This new technique allows the precise estimation of the heat input as function of the time on the sample. From the heat input determination, the welding efficiency curve is obtained. In order to validate the methodology, lab controlled experiments were conducted. The proposed methodology presented satisfactory results. For the experimental case analyzed, the welding efficiency curve was determined with precision.*

**Keywords:** *Inverse Problems, Heat Conduction, Heat Flux Estimation, Numerical and Experimental Methods.*