

ANÁLISE TÉRMICA E NUMÉRICA DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG DE METAIS

Michelle Crescêncio de Miranda, michelle@doutorado.ufu.br

Valério Luiz Borges, vlborges@mecanica.ufu.br

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

Resumo. A simulação numérica de problemas térmicos envolvendo mudança de fase é de interesse de vários ramos da engenharia, tais como solidificação de ferro fundido ou outros materiais, os tratamentos térmicos de peças metálicas e a soldagem. A grande dificuldade de problemas térmicos com mudança de fase está na identificação da interface sólido/líquido. O objetivo do presente estudo é desenvolver um modelo térmico e numérico para análise térmica de um processo de soldagem TIG de chapas de aço AISI 304. Para estimar o fluxo de calor na peça de trabalho durante o processo de soldagem, bem como calcular o perfil de temperatura e definir a geometria da poça de fusão (largura e profundidade do cordão de solda), propõe-se a implementação numérica de um modelo térmico tridimensional baseado no método da entalpia porosa. Outra finalidade deste estudo é compreender a influência da polaridade do eletrodo nas linhas de corrente do fluxo e do campo magnético.

Palavras chave: Modelagem numérica, soldagem TIG, mudança de fase.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente a utilização de técnicas numéricas para a solução de problemas reais é observada tanto no meio acadêmico quanto industrial. Com a crescente evolução dos computadores e agilidade no processamento é possível resolver problemas complexos de engenharia utilizando técnicas numéricas.

Uma das grandes dificuldades com problemas de transferência de calor envolvendo mudança de fase é a identificação da posição da interface sólido/líquido, devido as propriedades físicas para cada fase. Nesse sentido as técnicas numéricas torna-se um caminho atrativo para obter as soluções de problemas físicos reais e identificar configurações de interesse prático como, por exemplo, a interfase sólido/líquido.

Já que uma desvantagem das soluções analíticas consiste no fato dessas resolver problemas triviais de condução de calor, com geometria simples e distante de problemas práticos. E os métodos de experimentação em laboratório são geralmente onerosos e alguns casos imprecisos. Assim, a substituição por simulações numéricas podem reduzir os custos com projetos. E utilizar os testes de laboratório apenas para refinamentos e validação de resultados, ou então, para problemas que não se tem uma formulação matemática adequada.

O presente estudo concentra-se na aplicação de soluções numéricas em problemas de transferência de calor com mudança de fase e com uma aplicação no processo de soldagem. A inovação e contribuição científica neste trabalho consistem no desenvolvimento de um modelo térmico mais completo para o estudo de processo de soldagem comparado a outros disponíveis na literatura científica. Praticamente não há um trabalho na literatura científica que aborde de forma conjunta técnicas de problemas inversos em transferência de calor, o fenômeno da mudança de fase e as equações de Navier- Stokes.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo térmico e numérico para análise térmica de um processo de soldagem TIG de chapas de aço AISI 304. Para estimar o fluxo de calor na peça de trabalho durante o processo de soldagem, bem como calcular o perfil de temperatura e definir a geometria da poça de fusão (largura e profundidade do cordão de solda), propõe-se a implementação numérica de um modelo térmico tridimensional baseado no método da entalpia porosa.

Outra finalidade deste estudo é compreender a influência da polaridade do eletrodo nas linhas de corrente do fluxo. É de conhecimento que a escolha da polaridade afeta a penetração e aquecimento na região do arco no processo TIG. Na polaridade negativa, os elétrons são emitidos pelo eletrodo e acelerados em direção ao material base. Desta forma tem-se um bom aquecimento do material base, o que ocasiona uma boa penetração. No caso contrário, polaridade positiva, além da baixa penetração, o eletrodo sofre grande aquecimento, o que aceleraria seu desgaste no processo TIG. Deste modo, o intuito é analisar a influência da polaridade nas linhas de corrente do fluxo e do campo magnético.

Por se tratar de um problema envolvendo engenharia reversa, prevê-se ainda o uso do método da Secção Áurea para vários sensores e tempos futuros. Por meio da implementação computacional desta técnica e da análise da sensibilidade do modelo térmico, espera-se desenvolver uma ferramenta capaz de estimar o fluxo de calor na peça de trabalho.

2. METODOLOGIA

O modelo térmico de soldagem é baseado naquele proposto por Carvalho (2005), mas o mesmo será aprimorado, contemplando o método da entalpia porosa e as equações de Navier-Stokes. O problema térmico estudado por Carvalho (2005) representa o processo de soldagem TIG de chapas metálicas como ilustra a Figura 1.

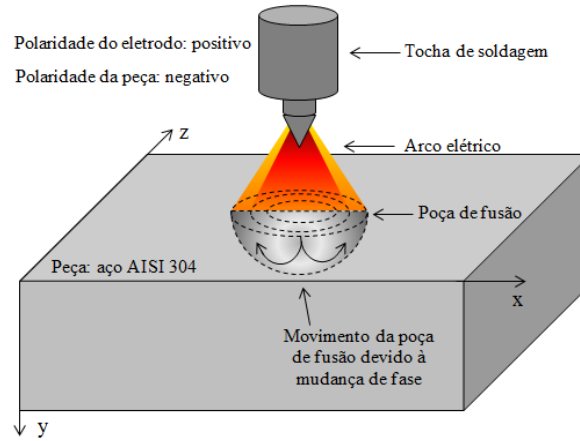


Figura 1 – Modelo Físico

O modelo térmico tridimensional transiente é descrito pela equação (1) da difusão baseada na entalpia, ou seja:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right) + \rho c \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

cujas condições de contorno podem ser escritas por

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

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

A equação (2) nas regiões expostas ao meio convectivo e equação (3) na área circular definida por A_{xy} , em que $q''(x_v, y_v, t)$ representa o fluxo de calor, A área do chanfro e x_v e y_v são as coordenadas da fonte de calor que são atualizadas conforme o tempo de soldagem t . O índice i (1,2,4,5,6) representa a i -ésima superfície da chapa, η_i representa a normal à essa superfície, T a temperatura, T_∞ a temperatura ambiente, λ a condutividade térmica da chapa de Alumínio e h o coeficiente de transferência de calor por convecção. Como condição inicial adotou-se

$$T(x, y, z, 0) = T_o \quad (4)$$

onde T_o representa a temperatura inicial da chapa de alumínio. O modelo utiliza uma formulação matemática básica apresentada por Brent et al. (1988). E considera-se a transição sólida líquida como um meio poroso. A entalpia (H) pode ser escrita como sendo:

$$H = cT + fL \quad (5)$$

em que, c corresponde o calor sensível, T temperatura, f fração mássica e L calor latente. Assim, podemos reescrever a Equação 1 da energia da seguinte forma:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) - \rho L \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right) \quad (6)$$

Segundo Voller et al. (1989), uma forma genérica para estimar a fração mássica ($k+1$) durante o processo iterativo é dada por:

$$f_p^{n+1} = f_p^{n+1} + \lambda cor \quad (7)$$

onde λ é um coeficiente de sub-relaxação ($0 < \lambda < 1$) e cor a correção no valor de f_p^{k+1} . Além disso, valem as seguintes relações:

$$f_p^{n+1} < 0 \Rightarrow f_p^{n+1} = 0 \quad (8)$$

$$f_p^{n+1} > 1 \Rightarrow f_p^{n+1} = 1 \quad (9)$$

Para estimar a fração mássica (k+1) durante o processo iterativo, deve-se utilizar a expressão:

$$f_p^{n+1} = f_p^n + \lambda \frac{ca_p}{La_{po}} (T_p^{t+\Delta t} - T_m) \quad (10)$$

É proposto neste método tratar cada volume finito como um elemento poroso, com porosidade igual à fração mássica, onde f representa a fração mássica que é a porcentagem de massa fundida no volume de controle. Assim, a velocidade gradualmente transiciona de zero a um conforme o volume de controle muda de sólido para líquido, garantindo a estabilidade e acurácia do método.

O modelo fluidodinâmico será baseado na equação da continuidade e nas equações de Navier- Stokes.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + S_u \quad (12)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + S_v \quad (13)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + S_w \quad (14)$$

Os termos fontes de quantidade de movimento linear S_u , S_v e S_w funcionam como dissipadores de velocidades quando o elemento se encontra em estado sólido ou tendendo a este estado. Em células onde há a mudança de fase o termo fonte S assume a forma apropriada da equação (20) de Carman- Kozeny para escoamentos como destacado por Voller and Prakash (1987).

$$\vec{S} = -C \left(\frac{(1-f)^2}{f^3 + b} \right) \vec{V} \quad (15)$$

onde C é uma constante suficientemente grande para dissipar toda velocidade na célula mas não tão grande a ponto de causar uma instabilidade numérica, $\vec{V}$ é o vetor velocidade, sendo u quando trata-se da coordenada em x , v quando trata-se da coordenada em y e w quando trata-se da coordenada z , e finalmente b é uma constante muito pequena usada somente para prevenir divisão por zero em casos onde a célula se encontra em estado sólido e a fração mássica é nula.

Os efeitos de convecção natural são tratados com o modelo de Boussinesq, o qual leva em conta a mudança de densidade de acordo com a temperatura do material. Pretende-se fazer o acoplamento pressão velocidade pelo método SIMPLE. A Figura 2 mostra o algoritmo computacional para resolver equações diferenciais parciais apresentados neste trabalho.

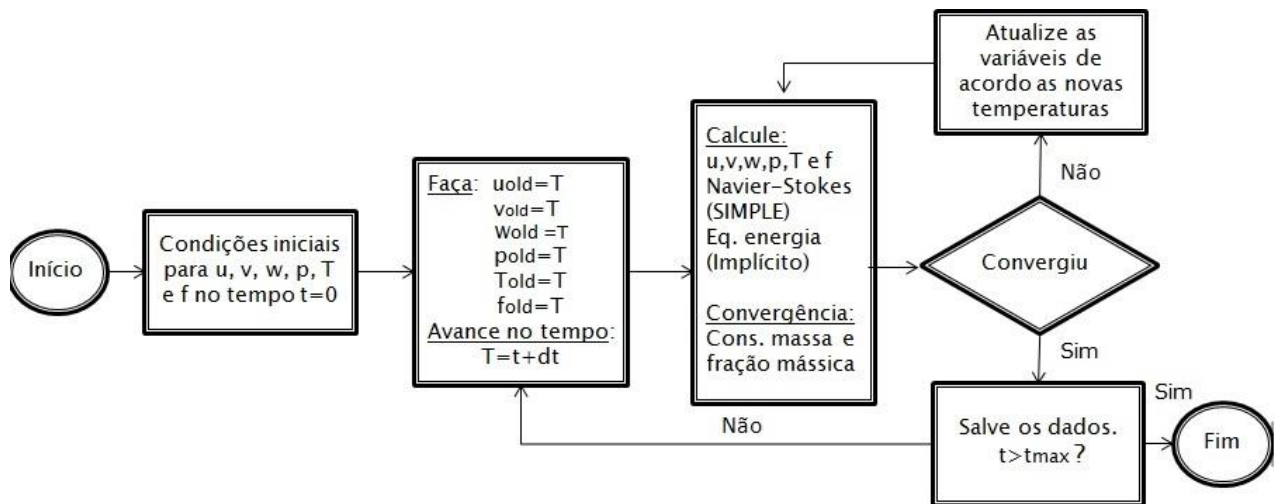


Figura 3 – Algoritmo computacional para resolver o problema direto.

A partir da análise da Figura 2, verifica-se que a solução do problema térmico-fluidodinâmico, a cada instante de tempo, é obtida a partir de um processo iterativo que tem como parâmetros de saída a conservação da massa (Equação 11) e convergência da fração mássica (Equação 10).

A solução inversa será obtida por meio da técnica de otimização da Seção Áurea. No processo de soldagem, o objetivo é determinar uma fonte de calor constante, durante todo o comprimento do cordão de solda, a partir do monitoramento da temperatura experimental após o desligamento do arco voltaico. Nesse sentido, a função objetivo que avalia temperaturas experimentais medidas na chapa, Y , e as calculadas pelo modelo teórico (problema direto) T como descrito na Equação (6) durante todo o período de aquecimento e resfriamento da chapa metálica. Assim, a função objetivo a ser minimizada pode ser escrita como:

$$Func = \sum_{t=1}^{nt} \sum_{i=1}^{nterm} (Y(x, y, z, t)_i - T(x, y, z, t)_i)^2 \quad (16)$$

onde nt representa o período de aquecimento e resfriamento da chapa de alumínio e $nterm$ o número de termopares usados. Analisando a Equação 16, verifica-se que o objetivo é encontrar o valor de um fluxo de calor (q''), a cada instante de tempo, que minimiza a função $Func$ a partir de avaliações da temperatura teórica T calculada a partir da solução da Equação 6.

3. CONCLUSÃO

Espera-se desenvolver um modelo térmico mais completo para o estudo de processo de soldagem comparado a outros disponíveis na literatura científica. Em que se aborde de forma conjunta técnicas de problemas inversos em transferência de calor, o fenômeno da mudança de fase e as equações de Navier- Stokes.

3. REFERÊNCIAS

- BRENT, D.; VOLLER V. R., and REID K. J., Enthalpy-Porosity Technique for Modeling Convection-Diffusion Phase Change: Application to the Melting of a Pure Metal, Numer. Heat Transfer, vol. 13, pp. 297–318, 1988
- CARVALHO, S.R. Determinação da temperatura na interface cavaco-peça-ferramenta durante o processo de usinagem por torneamento, 2005. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.
- VOLLER, V.R. and PRAKASH, C., A Fixed Grid Numerical Modelling Methodology for Convection/Diffusion Mushy Phase Change Problems, Int. J. Heat and Mass Transfer, 30 1709-1719, 1989.

4. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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