

MODELO TÉRMICO PARA ANÁLISE DA POÇA DE FUSÃO DURANTE O PROCESSO DE SOLDAGEM TIG

Michelle Crescêncio de Miranda, Universidade Federal de Uberlândia, michelle@doutorado.ufu.br
Solidônio R. de Carvalho, Universidade Federal de Uberlândia, srcarvalho@mecanica.ufu.br
Valério Luiz Borges, Universidade Federal de Uberlândia, vlborges@mecanica.ufu.br

Resumo. Uma das grandes dificuldades com problemas de transferência de calor envolvendo mudança de fase é a identificação da posição da interface sólido/líquido, devido às propriedades físicas para cada fase e impossibilidade de medição de temperaturas em pontos no interior da peça. Nesse sentido, as técnicas numéricas tornam-se um caminho atrativo para obter as soluções de problemas físicos reais e identificar configurações de interesse prático como, a interface sólido/líquido. 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. O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo para análise térmica de um processo de soldagem TIG de peças de aço AISI 304. Por meio da implementação numérica de um modelo térmico tridimensional transiente é proposto calcular o perfil de temperatura e definir a geometria da poça de fusão (largura e profundidade da poça).

Palavras chave: modelagem numérica, mudança de fase e soldagem.

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 às propriedades físicas para cada fase. Nesse sentido as técnicas numéricas tornam-se um caminho atrativo para obter soluções de problemas físicos reais e identificar configurações de interesse prático como, por exemplo, a interfase sólido/líquido.

A desvantagem das soluções analíticas consiste no fato dessas resolverem 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 em 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. Esse estudo torna-se relevante já que a soldagem possui aplicação desde a indústria microeletrônica até a fabricação de navios ou estruturas compostas por centenas de toneladas, tendo sua aplicação desde estruturas simples até estruturas com elevado grau de responsabilidade.

2. MODELO MATEMÁTICO E COMPUTACIONAL

2.1. Modelo físico

O modelo desenvolvido visa simular o aquecimento e mudança de fase do aço AISI 304. Trata-se de um problema tridimensional no qual, considera-se o efeito de convecção nas fronteiras da esquerda, direita e inferior. Já na fronteira superior tem-se o efeito de convecção e injeção de um fluxo de calor, como pode ser visto na Fig. (1).

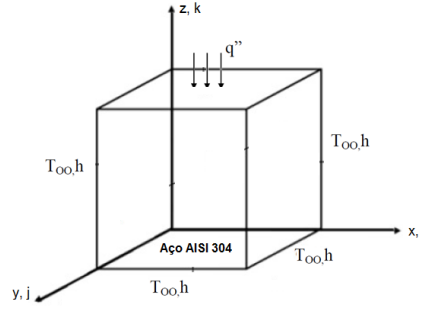


Figura 1. Modelo a ser simulado e suas condições de contorno

2.2. Modelo matemático e numérico

A Eq. (1) da energia é utilizada da seguinte forma:

$$\rho \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

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:

$$H = cT + fL \quad (2)$$

em que, c corresponde o calor sensível, T temperatura, f fração mássica e L calor latente. Assim, pode-se reescrever a Eq. (1) da energia da seguinte forma:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \rho L \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right) \quad (3)$$

Utilizou-se o método dos volumes finitos para a discretização numérica do problema térmico e uma formulação totalmente implícita. Organizando de acordo com a Eq. (4), definem-se os coeficientes como ilustra a Tab. (1).

$$A_p T_p^{t+\Delta t} + A_E T_E^{t+\Delta t} + A_W T_W^{t+\Delta t} + A_S T_S^{t+\Delta t} + A_N T_N^{t+\Delta t} + A_a T_a^{t+\Delta t} + A_b T_b^{t+\Delta t} = A_{p0} T_p^t + b_p - A_{p0} \frac{L}{c} f_p^{t+\Delta t} \quad (4)$$

Tabela 1. Coeficientes

$A_p = \frac{\rho c}{\Delta t} + \frac{2k}{(\Delta x)^2} + \frac{2k}{(\Delta y)^2} + \frac{2k}{(\Delta z)^2}$	
$A_E = A_W = -\frac{k}{(\Delta x)^2}$	$A_N = A_S = -\frac{k}{(\Delta y)^2}$
$A_A = A_B = -\frac{k}{(\Delta z)^2}$	$A_{p0} = \frac{\rho c}{\Delta t}$
$b_p = A_{p0} \frac{L}{C} f_p^t$	

Segundo Voller et al. (1990), uma forma genérica para estimar a fração mássica (k+1) durante o processo iterativo é dada na Eq.(5)

$$f_p^{k+1} = f_p^k + \lambda \frac{ca_p}{La_{p0}} (T_p^{t+\Delta t} - T_m) \quad (5)$$

Além disso, valem as seguintes relações:

$$\begin{aligned} f_p^{k+1} < 0 &\rightarrow f_p^{k+1} = 0 \\ f_p^{k+1} > 0 &\rightarrow f_p^{k+1} = 1 \end{aligned} \quad (6)$$

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.

3. RESULTADOS

Conforme dito anteriormente o modelo matemático desenvolvido foi baseado na equação diferencial de condução de calor com mudança de fase, segundo um sistema de coordenadas cartesianas. A solução deste problema foi obtida a partir do método numérico de volumes finitos e formulação implícita. O algoritmo computacional foi implementado a partir da plataforma C++ Builder e permite obter perfis de temperatura na amostra metálica, a fração mássica e a penetração da região fundida.

Para simulação utilizou-se um corpo de prova de dimensões: $x = 0,1021\text{m}$, $y = 0,1021\text{m}$ e $z = 0,0279\text{m}$. Adotou-se um tempo total de simulação de 240 s e um intervalo de 0,01s no intuito de identificar as regiões de transição sólido/líquido e líquido/sólido. Na solução do problema direto, adotou-se um fluxo de calor constante $q_0 = 1,6 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ na área A_q de raio de 0,01m durante os 120s iniciais de soldagem. Para simular a transferência de calor por convecção em todas as faces do modelo térmico, considerou-se $h = 40 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ e uma temperatura inicial de 20°C.

A Fig.(2) apresenta os perfis térmicos, durante o tempo de aquecimento da amostra metálica, conforme os seguintes instantes de tempo: a) 30 s ; b) 60 s ; c) 90 s e d) 120 s. Quando a temperatura é superior a 1400° C ocorre a transição sólido líquido que é identificada por sua vez pela fração mássica para os tempos a) 30 s; b) 60 s; c) 90s e d) 120 s, como pode ser visualizado na Fig.(3).

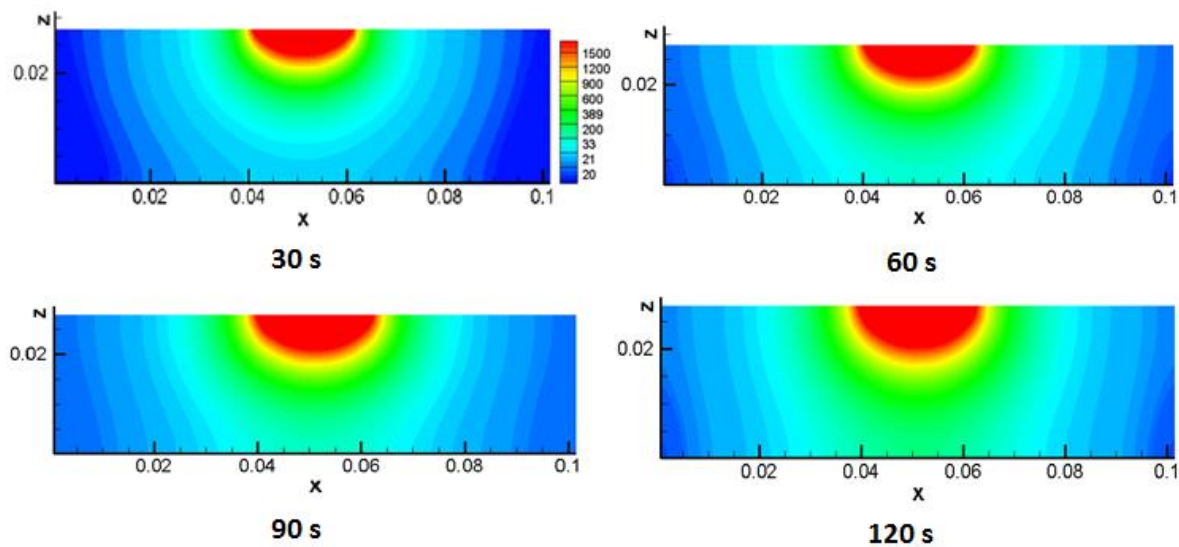


Figura 2. Simulação dos campos térmicos durante o período de aquecimento da amostra metálica para os tempos a) 30 s; b) 60 s; c) 90s e d) 120 s

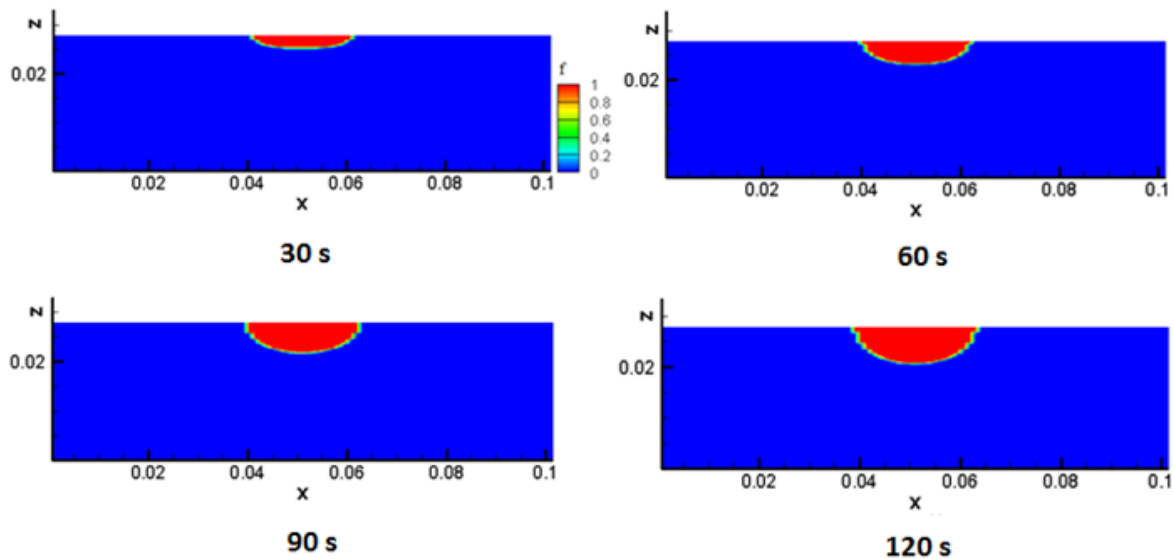


Figura 3. Simulação da fração mássica durante o período de aquecimento da amostra metálica para os tempos a) 30 s; b) 60 s; c) 90s e d) 120 s

No instante de tempo 120s, verificou-se que a poça de fusão apresentou raio de 0,01305m e penetração de 0,00753m.

A Fig. (4) demonstra a evolução da fração mássica (f) na região de incidência do fluxo de calor (coordenadas do sensor numérico: $x = 0.05105$; $y = 0.05105$ e $z = 0.0279$ m). Verifica-se que a partir de 8s de aquecimento ocorre a transição sólido líquido do metal, ou seja, a fração mássica deixa de ser nula e tende ao valor unitário. Ressalta que tais valores definem respectivamente o estado sólido e líquido da amostra metálica. Na transição ($0 < f < 1$) surge uma interface entre os dois estados físicos do metal que é denominada região de mushy (OZISIK, 1993), onde as duas fases coexistem.

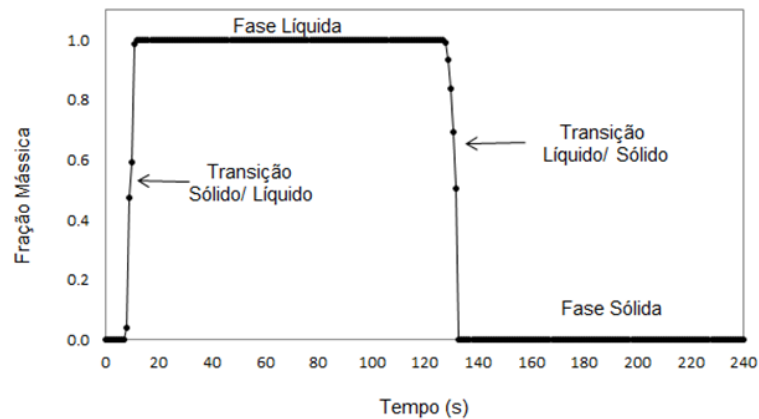


Figura 4. Fração mássica calculada na região de incidência do fluxo de calor (coordenadas do sensor numérico: $x = 0.05105$; $y = 0.05105$ e $z = 0.0279$ m).

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.
Voller, V.R.; Swaminathan c.r.; e Thomas b.g., “Fixed grid techniques for phase change problems: a review”, Int. J. Num. Meth. Engng., Vol. 30, pp. 875-898, (1990).

4. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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