

PROBLEMAS INVERSOS EM TRANSFERÊNCIA DE CALOR COM MUDANÇA DE FASE

Ana Paula Mazaro Cângani

paulacangani@yahoo.com.br

Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia. Campus Santa Mônica. CEP 38400-902.
Uberlândia-MG-Brasil

Cristiene Vasconcelos Gonçalves

cgoncalves@mecanica.ufu.br

Solidônio Rodrigues de Carvalho

srcarvalho@mecanica.ufu.br

Gilmar Guimarães

gguima@mecanica.ufu.br

Resumo: Este trabalho apresenta uma primeira abordagem no estudo de campos térmicos decorrentes de um processo de soldagem a TIG em uma superfície cilíndrica. O estudo inicialmente se dedica à investigação de um problema térmico de difusão de calor transiente bidimensional através da formulação implícita em volumes finitos. Resultados são comparados com a literatura sendo previstos como passos futuros a incorporação da mudança de fase e procedimentos inversos para a identificação da penetração de soldagem.

Palavras-chave: mudança de fase, método implícito, processo de soldagem.

1. INTRODUÇÃO

Os fenômenos de solidificação e de fusão estão associados a muitas aplicações práticas. Ocorrem em diversos processos industriais, tais como processamento de metal, solidificação das carcaças, engenharia ambiental e no sistema térmico do armazenamento da energia em uma estação espacial.

A análise de problemas de transferência de calor no processo de solidificação e fusão, chamados problemas de fronteira móvel na literatura científica, é especialmente complicada devido o fato de que a fronteira sólido e líquido se move dependendo da velocidade que o calor latente é absorvido ou perdido na fronteira, de modo que a posição da fronteira não é conhecida a princípio, mas faz parte da solução.

Uma das necessidades na identificação da posição ocorre devido ao comportamento particular das propriedades dos materiais de mudança de fase no domínio para cada fase. Além disto, a identificação da fronteira permite a determinação das parcelas de energia latente e sensível doada através da avaliação do volume fundido. Assim, a geometria da fronteira juntamente com os campos de temperatura e velocidades, permite avaliações no sentido de determinar a posição onde a transferência de calor é mais intensa e o mecanismo é predominante nesta troca. Buscando a solução desta classe de problemas desenvolve-se a formulação em entalpia, que será apresentada e discutida.

Quando a substância que solidifica é pura, a solidificação ocorre em uma única temperatura, enquanto que no caso contrário (como misturas, ligas e materiais impuros) a solidificação ocorre sobre uma escala de temperatura na qual aparece uma zona bifásica, denominada região de mushy,

entre a zona sólida e a líquida (Zalba et. al, 2003). Neste último caso, é apropriado considerar a equação de energia em termos da entalpia, desprezando o movimento advectivo no interior do líquido, ou seja,

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \vec{\nabla} \left(k \vec{\nabla} T \right) \quad (1)$$

onde ρ é definido como sendo a massa específica, H a entalpia, T a temperatura e k a difusividade térmica do material.

A solução da Eq(1) requer obviamente o conhecimento da dependência da entalpia em função da temperatura, o qual para uma substância impura é mostrado na Fig. 1. Similarmente, é necessário se conhecer a função que relaciona a condutividade térmica e a temperatura.

As principais vantagens deste procedimento é o uso de uma equação que é diretamente aplicada para a determinação da temperatura e a avaliação das propriedades termofísicas em cada fase e determinação da posição da fronteira sólido-líquido.

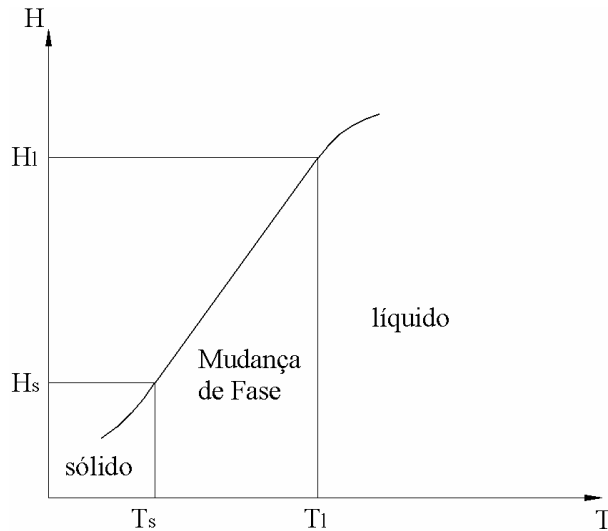


Figura 1. Variação da entalpia com a temperatura

Segundo Gonçalves (2004), problemas de transferência de calor com mudanças de fase, tais como soldagem de metais e ligas, são de grande interesse devido as suas aplicações práticas. Esses problemas envolvem o movimento de uma interface de mudança de fase sólido-líquida através do meio, onde é requerido o controle da transferência de calor e da posição da frente de mudança de fase. Os fluxos de calor e velocidades da frente de solidificação determinam a estrutura fundida (Flemings, 1974). O uso eficiente da energia durante o processo de soldagem requer o conhecimento da interface de fusão e do perfil de temperatura no material. A transferência de energia térmica causa a fusão do metal e forma uma poça fundida usualmente chamada de poça de solda. O controle do tamanho e da forma da poça de solda é importante, pois ela deve ser pequena o suficiente para ser manejável e minimizar o consumo de energia. Entretanto deve ser grande o suficiente para que a união das duas peças ocorra corretamente. A distribuição de temperatura nas peças sólidas bem como as taxas de fusão e solidificação da poça de solda afetam a distribuição de tensão (Andersson and Karisson, 1981) e o processo de recristalização no metal (Ashby and Easterling, 1982). O pequeno tamanho da poça de solda e as elevadas temperaturas que ocorrem durante o processo de soldagem têm até agora excluído determinações experimentais das variações transientes da poça de solda e das distribuições de temperatura. Durante experimentos típicos de soldagem a forma da poça é determinada ou usando a técnica do “impact decanting” ou através do “rapidly quenching” da amostra e investigação do tamanho dos grãos e distribuição. Esses métodos

não fornecem as distribuições de temperatura transiente no sólido e devido a curta duração do processo de soldagem (poucos segundos) é impossível obter informação detalhada do crescimento transiente da poça de solda. Cálculos precisos desses parâmetros são difíceis devido a não linearidade associada à interface de mudança de fase móvel, com exceção de casos muito simples. O calor latente de fusão na interface é liberado ou absorvido, dependendo das propriedades físicas do meio, da forma geométrica e das condições de contorno da interface. Assim, a característica geométrica pode ser relatada no mecanismo básico da junta, e as características térmicas podem indicar a microestrutura final do material.

2. PROBLEMAS DIRETOS E INVERSOS.

Para a solução de problemas com mudança de fase, muitas aproximações analíticas e numéricas têm sido feitas. Essas análises são divididas em duas categorias, problemas direto e inverso de transferência de calor com mudança de fase.

Um problema é considerado direto quando as condições de contorno são prescritas para a superfície exterior do domínio. As condições térmicas para os pontos interiores e localizações da mudança de fase são então encontradas. Em um problema inverso informações sobre uma ou mais condições de contorno são desconhecidas. Assim, um problema inverso requer o conhecimento da temperatura em um determinado ponto interior do domínio para a obtenção do perfil de temperatura na superfície desconhecida. Observa-se que esse é um problema mal condicionado, desde que é resolvido um problema de valor de contorno onde as condições de contorno não são especificadas. Existem várias soluções para o problema direto de transferência de calor com mudança de fase podendo citar, por exemplo, Wilson et al. (1978), Okedon e Hodgkins (1977), Shian e Wei (1993), Frederick e Greif (1985). No trabalho de Shian e Wei (1993), uma solução analítica é apresentada para o campo de temperatura tridimensional nas zonas líquidas e afetadas pelo calor em volta da cavidade da solda é encontrada. Os resultados mostraram que as profundidades preditas e as temperaturas da cavidade concordam com os dados experimentais. Frederick e Greif (1985) apresentam uma solução para problemas de mudança de fase, podendo ser usado para geometria planas, cilíndricas ou esféricas e convecção, geração de calor, diferenciando as propriedades da fase sólida e líquida, entretanto apresentou problemas para variação das propriedades térmicas e sistemas multidimensionais. Entretanto o aspecto mais difícil de analisar transferência de calor em soldagem de forma direta deve-se a complexidade dos mecanismos de transferência na peça de solda. Transferência de calor turbulenta convectiva ocorre na região com vaporização do metal para o contorno. Para complicar, o volume da região líquida não é constante com o tempo. A vantagem então do uso de uma técnica inversa está no fato de que o processo de condução na região sólida é analisada antes do complicada transferência de calor na poça de solda, ou seja, não requer uma solução na região líquida para se predizer a posição da interface de mudança de fase. Isso permite uma boa aproximação para o perfil de temperatura na região sólida e para a posição da interface sólido-líquida.

2.1. O processo de soldagem a ser estudado.

O processo TIG tem como característica principal a concentração do calor do arco e conseqüentemente o melhor controle da poça de fusão. Apesar da baixa capacidade produtiva o processo TIG permite realizar cordões de solda de ótimo acabamento. Essa característica do TIG é acentuada quando se usa corrente pulsada, ou seja, durante a imposição de uma corrente de pico há uma fusão mais efetiva da chapa e do material de adição, enquanto que durante a imposição de uma corrente de base há um esfriamento da poça, induzindo-se melhores condições de tensão superficial e viscosidade, garantindo-se melhor controle da poça.

O uso de métodos inversos é proposto aqui como meio de se obter a solução de um problema real de soldagem, fornecendo o rendimento térmico dos processos envolvidos assim como a distribuição de temperatura ao longo da peça de trabalho e posição da interface móvel. Para tal é

necessário o desenvolvimento de um pacote computacional que fornecerá a solução de um problema inverso bidimensional transiente com mudança de fase.

3. METODOLOGIA

A metodologia para solucionar o problema inverso com mudança de fase baseia-se na determinação de um modelo teórico bidimensional, no desenvolvimento de um pacote computacional que forneça os parâmetros desejados e da aplicação direta de uma bancada experimental de um processo TIG.

Embora o principal objetivo deste trabalho seja a solução do problema inverso, inicialmente será abordado a solução de um problema direto de difusão de calor sem a presença de mudança de fase.

Neste caso, apresenta-se a formulação de um problema decorrente de um processo de soldagem no topo de uma superfície cilíndrica. A solda é representada por uma fonte de calor, $q''(t)$ e a sua penetração será posteriormente identificada na direção axial do cilindro ou seja, o efeito, da mudança de fase será incluído na formulação do problema de difusão de calor somente após a sua validação.

3.1. Desenvolvimento do modelo teórico para o problema.

Como já mencionado, o problema físico consiste em um processo transiente de soldagem, TIG, onde deseja-se estudar o comprimento de penetração do cordão de solda e a distribuição de temperatura. A Figura 2 representa um modelo físico do sistema de soldagem a ser estudado.

Para a solução do problema usou-se o método dos volumes finitos. Este método consiste na integração das equações diferenciais parciais sobre um certo número de volumes de controle originários da discretização do domínio. Uma vez que as equações diferenciais são obtidas originalmente através de balanços sobre volumes de controle, tem-se a garantia de que a energia é conservada. Neste sentido, mesmo em uma malha grosseira haverá a conservação.

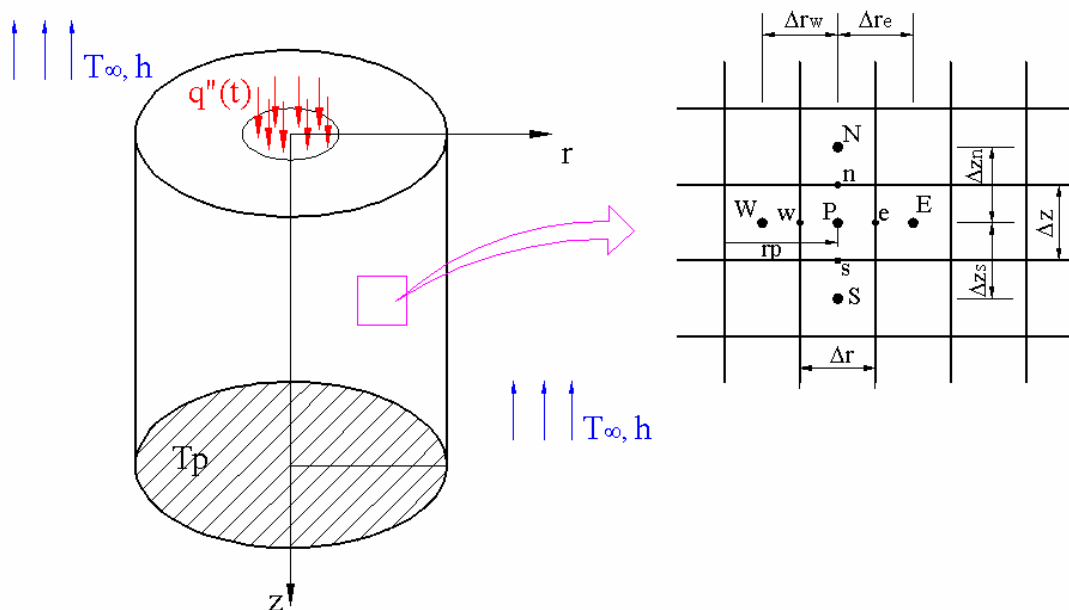


Figura 2. Problema físico estudado:
a) geometria cilíndrica; b) volume discretizado

Aplicando-se o princípio da conservação de energia no volume de controle mostrado na Fig (2b) obtém-se

$$\frac{1}{r_p} \left(r_p - \frac{\Delta r}{2} \right) (T_w - T_p) + \frac{1}{r_p} \left(r_p + \frac{\Delta r}{2} \right) (T_p - T_E) + T_N - 2T_p + T_S = \frac{\Delta r^2}{\alpha} \left[\frac{T_p - T_p^0}{\Delta t} \right] \quad (2)$$

k é a condutividade térmica e C_p é o calor específico.

A integração desta equação no espaço e no tempo, aproximando as derivadas nas interfaces do volume elementar por diferenças centrais e usando uma formulação totalmente implícita, resulta em:

$$A_p T_p + A_e T_E + A_w T_w + A_n T_N + A_s T_S = B \quad (3)$$

onde os coeficientes são dados por:

$$A_p = \frac{1}{r_p} \left(r_p - \frac{\Delta r}{2} \right) + \frac{1}{r_p} \left(r_p + \frac{\Delta r}{2} \right) + 2 + \frac{\Delta r^2}{\alpha \Delta t} \quad (4)$$

$$A_e = -\frac{1}{r_p} \left(r_p + \frac{\Delta r}{2} \right) \quad (5)$$

$$A_w = -\frac{1}{r_p} \left(r_p - \frac{\Delta r}{2} \right) \quad (6)$$

$$A_n = -1 \quad (7)$$

$$A_s = -1 \quad (8)$$

$$B = \frac{\Delta r^2}{\alpha \Delta t} T_p^0 \quad (9)$$

As condições de contorno para este problema, conforme a Fig. 2 são: Temperatura prescrita na superfície inferior do cilindro; fluxo prescrito e convecção na superfície superior do cilindro; e convecção nas superfícies remanescentes.

Para o caso de fluxo de calor e convecção na superfície superior do cilindro, tem-se,

Para fluxo prescrito tem-se

$$T_N = \frac{q'' \Delta z_n}{k_p} + T_p \quad (10)$$

Para convecção tem-se:

$$T_N = T_p \left(\frac{4k_p}{h \Delta z_n + 2k_p} - 1 \right) + \frac{2hT_\infty \Delta z_n}{h \Delta z_n + 2k_p} \quad (11)$$

Temperatura Prescrita

$$T_S = 2T_2 - T_p \quad (12)$$

4. FORMULAÇÃO NUMÉRICA

A solução numérica do modelo matemático é então resolvida usando-se o método dos volumes finitos com formulação implícita. Optou-se pela metodologia implícita uma vez que esta elimina os problemas com o passo de tempo e dimensões da malha. Entretanto, o problema térmico fica condicionado à solução de um sistema linear do tipo $A.T = B$, onde a matriz A representa os coeficientes das equações, T a temperatura na amostra e B a matriz dos termos independentes. Para a resolução do sistema linear, aplicou-se pelo método iterativo, S.O.R (Método das Sobre relaxações Sucessivas) procurando acelerar o processo de convergência do sistema linear. O S.O.R pode ser facilmente deduzido a partir do método de Newton-Raphson, cujo objetivo é a determinação do zero da função $F(T)$, Figura 3.

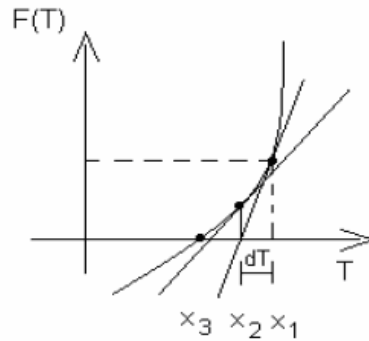


Figura 3. Zero da função $F(T)$ encontrado pelo método de Newton-Raphson

Com base na Fig. (3) obtém-se:

$$T = T - W \frac{F(T)}{F'(T)} \quad (13)$$

onde T é a temperatura, W é o coeficiente de relaxação.. Ressalta-se que W depende fortemente da distância entre nós e do intervalo de tempo. $F(T)$ é obtido a partir da modelagem numérica e $F'(T)$ é a derivada de $F(T)$.

5. RESULTADOS

O algoritmo computacional foi desenvolvido a partir do *software* C++ Builder 5. O problema térmico consiste em um cilindro de cobre de raio e espessura 0.6 m, que se encontra a uma temperatura inicial de 20 °C. Na superfície superior do cilindro adotou-se um fluxo de calor prescrito de 3×10^5 (W/m²), enquanto que a superfície inferior se encontra a uma temperatura prescrita de 20 (°C). As demais superfícies do cilindro foram consideradas isoladas termicamente.

Considerou-se ainda uma malha regular com 100 nós, um passo de tempo de 12 (s) e um tempo final de aquecimento é de 120 (s). As propriedades térmicas da amostra em questão são: $k=401$ (W/mK) e $\alpha=117 \times 10^{-6}$ (m²/s).

A partir dos dados anteriores e da solução numérica da equação da difusão, determinou-se a temperatura em três posições específicas do cilindro de cobre, ou seja, em $(r = 0.3, z = 0)$, $(r = 0.3, z = 0.3)$ e $(r = 0.3, z = 0.6)$. Os resultados são apresentados nas Figs. (4) e (5):

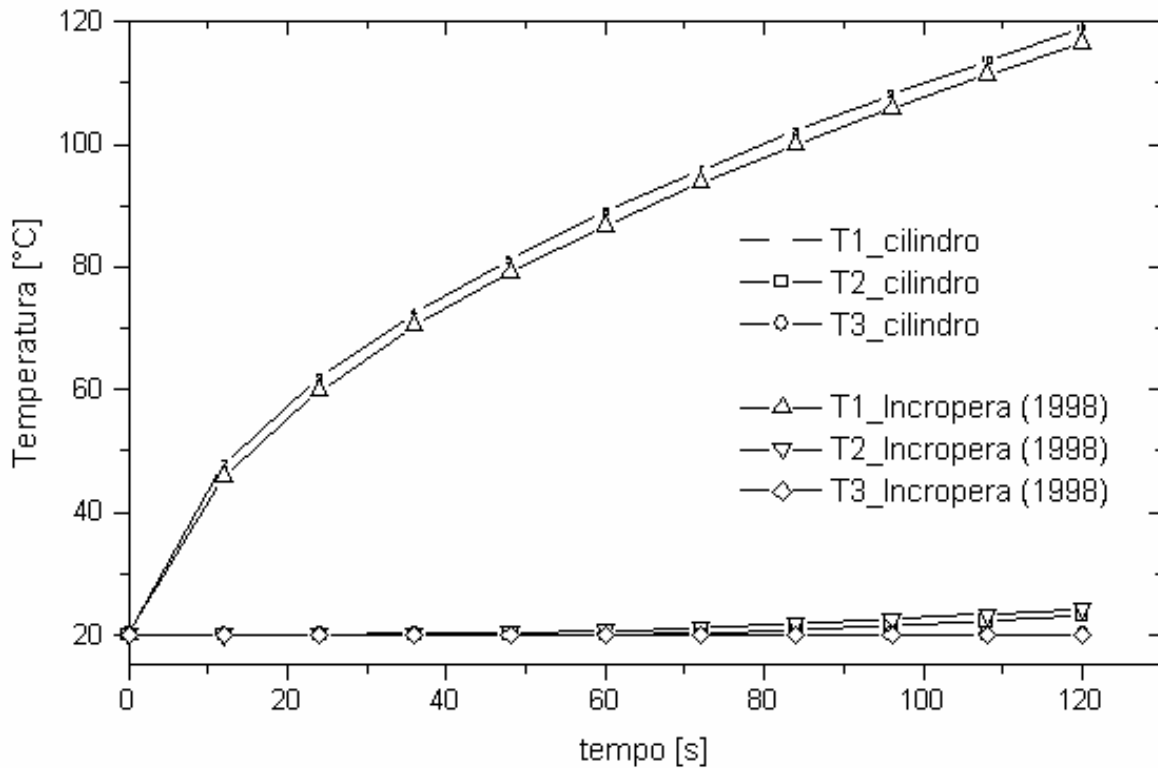


Figura 4. Temperatura em posições específicas da amostra.

A Fig (4) apresenta uma comparação com resultados de uma solução unidimensional transiente. Esta comparação somente é possível devido às características físicas e geométricas do problema proposto ou seja, como o fluxo de calor é imposto em toda a região frontal do cilindro (topo) e a sua superfície é isolada o problema térmico apresenta características unidimensionais na direção axial, z , do cilindro.

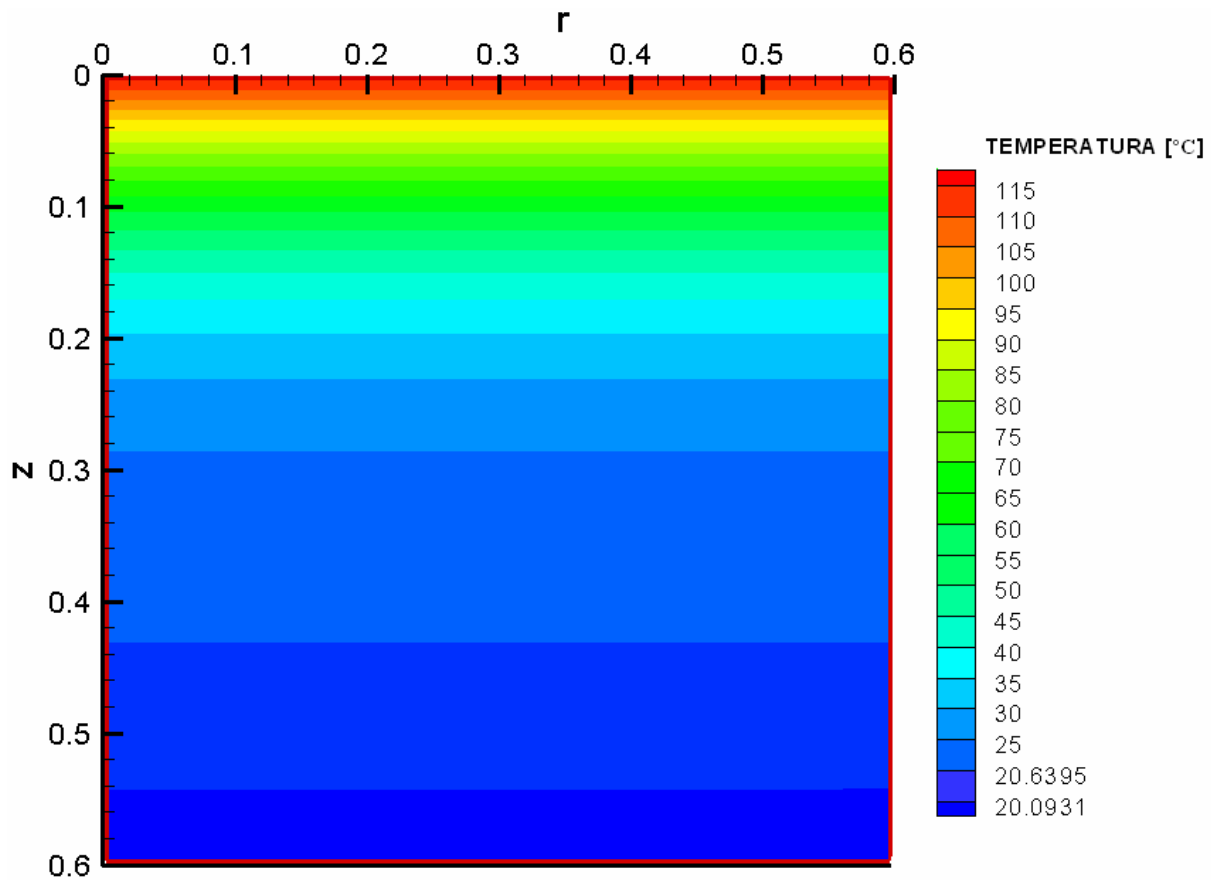


Figura 5. Distribuição de temperatura bidimensional no cilindro de cobre.

Verifica-se na Fig.(4) que os resultados apresentaram uma boa concordância com aqueles obtidos por Incropera (1998) para o caso de um problema unidimensional de transferência de calor resolvido pelo método das diferenças finitas. A Fig. (5), por sua vez, apresenta a distribuição de temperatura bidimensional no cilindro de cobre.

6. CONCLUSÃO

Um problema térmico de difusão calor bidimensional transiente foi estudado. Este problema térmico representa na realidade, uma primeira abordagem para o estudo da penetração de solda de um processo TIG em uma superfície cilíndrica. Os resultados apresentados para a difusão de calor sem mudança de fase foram validados.

A mudança de fase, bem como o procedimento inverso serão implementados em uma etapa seguinte.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ e a FAPEMIG pelo apoio financeiro.

8. REFERÊNCIAS

- Andersson, B. and Karisson, L., 1981, "Thermal Stresses in Large Butted-Welded Plates", Journal of Thermal Stresses, Vol. 4, pp. 491 – 500.
- Ashby, M. F., and Easterling, K. E., 1982, "A First Report on Diagrams for Grain Growth in Welds", Act. Journal of Metallurgy, Vol.130, pp. 1969 – 1978.

- Flemings, M. C., 1974, “ Solidification Processing, McGraw-Hill, New York.
- Frederick, D. and Greif., R., 1985, “ A Method for th0e Solution of Heat Transfer Problems With a Change of Phase ”, Journal of Heat Transfer, Vol. 107, pp. 520 – 526.
- Gonçalves, C. V., 2004, “Problemas Inversos em Transferência de Calor com Fronteira móvel: Aplicação em Processos de Soldagem” Tese, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., 1998, “Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”, Editora LTC, Rio de Janeiro.
- Okendon, J. R., and Hodgkins, W. R., 1977, “Moving Boundary Problems in Heat Flow and Diffusion”, Clarendon, Oxford.
- Patankar, Suhas V., 1980, “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, Hemisphere Publishing Company.
- Zalba, B., Marin, J. M., Cabeza, L. F., Mehling, H., 2003, “Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications”, Applied Thermal Engineering Volume 23, Issue 3 , February 2003, Pages 251-283.
- Wei, P. S. and Shian, M. D., 1993, “Three-Dimensional Analytical Temperature Field Around the Welding Cavity Produced by a Moving Distributed High-Intensity Beam”, Journal of Heat Transfer, Vol. 115, pp. 848 – 855.
- Wilson, D. G. and Solomon, D. G. and Boggs, P. T., 1978, “Moving Boundary Problems”, Academic, New York.

INVERSE PROBLEMS IN HEAT TRANSFER WITH PHASE CHANGE

Ana Paula Mazaro Cângani

Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia
Campus Santa Mônica
CEP 38400-902 Uberlândia-MG-Brasil
paulacangani@yahoo.com.br

Solidonio Rodrigues Carvalho

srcarvalho@mecanica.ufu.br

Cristiene Vasconcelos Gonçalves

cgoncalves@mecanica.ufu.br

Gilmar Guimarães

gguima@mecanica.ufu.br

Abstract: *This work presents a first step in the thermal analysis of a welding process. Initially is developed a numerical model based on finite volumes and implicit formulation. A two-dimensional and transient thermal model is developed in cylindrical coordinates in order to obtain the temperature field of a cylindrical sample that are supposed to be subjected to the welding process. Results are compared with literature.*

Keywords: *phase change, finite volumes, welding process.*