

Trabalho contemplado com o prêmio "AGA"

*Ivanilza Felizardo
Alexandre Queiroz Bracarense*

Resumo

Uma das grandes dificuldades encontrada no projeto de sistema de automação para a soldagem é que os modelos existentes são, em geral, complexos e estáticos. Esse trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para incluir ao modelo desenvolvido por Rosenthal, uma certa dinâmica. Com este modelo foi possível ter indicações de alterações na distribuição de temperatura durante a soldagem e a partir destas, sugerir ajustes nos parâmetros do processo de forma a prevenir efeitos térmicos indesejáveis e que resultam em tensões residuais, as quais representam um dos maiores problemas decorrentes do processo de soldagem.

Abstract

One of the most difficult task for a welding automation design is that many of the existing models are complex and static. This paper presents a methodology developed to introduce a dynamic feature into Rosenthal's thermal gradient profile model. With this new approach, it was possible to have indications of temperature distribution variation during welding and to perform adjustments of welding parameters to prevent undesirable thermal effects that can result in residual stresses due to welding procedure.

Introdução

Na soldagem por fusão, as partes dos materiais a serem unidas são fundidas através do fornecimento de energia térmica. Durante o processo de aquecimento, a ligação entre as partes se dá através da "poça de fusão", a qual contém o material de base e normalmente material de adição. Imediatamente após a formação da "poça de fusão" inicia-se a solidificação e conseqüentemente a contração da região aquecida.

Pelo fato da tensão de escoamento à quente nesta região ser muito baixa, esta contração é impedida pelas regiões que permaneceram em menores temperaturas sem opor resistência.

Com a continuidade do resfriamento da junta soldada, e portanto diminuição da temperatura, a tensão de escoamento à quente do material na região aquecida começa a aumentar, fazendo com que esta, ao contrair, comece também a se opor ao material de base. Até a temperatura ambiente, em consequência de efeitos térmicos [1], criam-se tensões térmicas de tração nas regiões aquecidas e de compressão nas regiões em menores temperaturas. Se as tensões térmicas alcançarem a tensão de escoamento do material, deformações plásticas poderão ocorrer e o acúmulo remanescente das tensões térmicas, após o material retornar a temperatura ambiente, se transformam em tensões residuais [2-6].

Observa-se portanto que, o calor suprido pela soldagem produz complexos ciclos térmicos causando vários problemas, incluindo mudanças microestruturais, tensões térmicas que podem resultar em deformações plásticas e tensões residuais e/ou distorções. Desta forma, descrever o fluxo de calor na soldagem é o problema mais fundamental em simulação numérica ou experimental dos efeitos térmicos devido à distribuição de calor na peça soldada [7-9].

Entre as diversas soluções propostas para descrever a distribuição de calor, decorrente do processo de soldagem, destaca-se a de Rosenthal [10,11] que pode ser considerada uma das precursoras para o modelamento do processo e utilizada como base de vários estudos até hoje [12]. Rosenthal propôs para descrever a distribuição de temperatura no estado quase-estacionário a seguinte equação:

$$T = T_0 + \exp(-\lambda v \xi) \cdot \varphi(\xi, y, z) \quad (1)$$

Que para uma placa semi-infinita corresponde a:

$$T(R, \xi) = T_0 + \frac{Q}{2\pi K R} \exp\left[-\frac{v}{2\alpha}(R + \xi)\right] \quad (2)$$

sendo

$$R = \sqrt{\xi^2 + y^2 + z^2}; \quad \xi = x - vt; \quad Q = \eta \cdot IV; \quad \alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$$

cuja simbologia e unidades utilizadas são apresentadas na TAB. 1.

Modelamento Matemático

Várias análises foram realizadas com o objetivo de transformar o modelo matemático estático apresentado por Rosenthal (Equação 1) em um modelo dinâmico. A equação descreve a distribuição de temperatura para o estado quase-estacionário, onde a distribuição e a geometria da poça de fusão não variam no tempo. Esta seria a situação ideal para a realização de uma solda porém, experimentalmente, comprova-se que tanto a geometria do cordão de solda quanto à distribuição de temperatura variam no decorrer do processo de soldagem [13].

A alternativa proposta nesse trabalho, para que a Equação 1 pudesse ser utilizada para mostrar como a distribuição de temperatura atinge o estado quase-estacionário, descrevendo a dinâmica do processo, foi rescrever esta equação de forma que passasse a ser solução geral da equação de condução de calor transiente. Para isto e como a Equação 1 é do tipo exponencial, um termo transitório, também do tipo exponencial, foi incorporado a ela [14]. A forma satisfatória encontrada para acrescentar a parte transitória a Equação 1 corresponde a:

$$T = [T_o + \exp(-\lambda \nu \xi) \cdot \varphi(\xi, y, z)] [1 - \exp(-\beta \cdot t_e)] + T_r \cdot \exp(-\beta \cdot t_e) \quad (3)$$

Onde, observa-se que quando t_e for zero o valor da temperatura será igual ao valor de T_r (que para o instante inicial será igual a T_o e a cada instante corresponderá ao valor de T do instante anterior) e quando t_e tender a infinito retorna-se a equação original proposta por Rosenthal. Percebe-se que a questão para a utilização da Equação 3, está em estabelecer t_e e β . Acredita-se que estes valores diferem de processo para processo e dependem, consideravelmente, do material a ser utilizado e qual o caso a ser estudado. Para o caso de placa semi-infinita, o modelo correspondente para descrever a distribuição de temperatura transiente será:

$$T = \left[T_o + \frac{Q}{2\pi K R} \exp\left[-\frac{\nu}{2\alpha}(R + \xi)\right] \right] [1 - \exp(-\beta \cdot t_e)] + T_r \cdot \exp(-\beta \cdot t_e) \quad (4)$$

Resultados e Análise dos Resultados

As simulações foram realizadas em ambiente MATLAB. O valor dos parâmetros utilizados foram escolhidas de forma a tornar a simulação o mais próximo possível da realidade. Estes parâmetros estão listadas na TAB. 2. Os parâmetros relacionados ao processo foram escolhidas tendo como referência o processo GMAW. Os relacionados ao material foram escolhidos tendo como referência o aço de baixo carbono.

É importante destacar que pelo fato destas equações não darem qualquer informação relativo à forma da poça de fusão, as temperaturas máximas obtidas durante as simulações foram niveladas à temperatura de fusão do material, sendo que a esta região admitiu-se ser a poça de fusão. Além disto, admitiu-se que o cordão de solda teria 250 mm de comprimento e as temperaturas calculadas foram obtida até 50 mm lateralmente a ele e na superfície da placa, ou seja, $x_{\text{máx}} = 250$ mm, $y_{\text{máx}} = 50$ mm e $z = 0$.

Inicialmente, utilizando a Equação 2 foi calculado a distribuição de temperatura supondo que a fonte de calor estivesse localizada em uma posição intermediária ao longo do comprimento proposto para ser o cordão de solda, ou seja, $x = 120$ mm. A FIG. 1 mostra a distribuição da temperatura para a posição citada. Utilizando esta equação a distribuição de temperatura será igual para qualquer posição da fonte ao longo do cordão; o que evidencia o fato da equação ser estática e a dificuldade para visualizar o que ocorreria com a distribuição de temperatura no decorrer do processo.

Para realizar o “controle do processo em tempo real” as temperaturas de interesse correspondem as calculadas exatamente ao lado da fonte de calor. Acredita-se que serão os valores destas temperaturas que devem informar qual o procedimento a ser utilizado. Além disto, após o término do processo, não há o que controlar, a não ser utilizar técnicas alternativas como, por exemplo, tratamentos térmicos após a soldagem. Sendo assim, a Equação 2 foi utilizada para calcular somente as temperatura correspondentes a $x = 0$ através de toda a largura e supondo que a fonte de calor percorre todo o comprimento proposto, simulando a realização de uma solda. A FIG. 2 mostra o perfil térmico encontrado e qual a região que corresponderia a do cordão de solda.

Percebe-se através das FIG. 1 e 2 a relevância do trabalho realizado por Rosenthal para descrever a distribuição de temperatura em uma placa. O modelo matemático é relativamente simples e fácil de ser programado. Entretanto, como se trata de um modelo para o estado quase-estacionário a distribuição de temperatura e a geometria da poça de fusão não variam no tempo e a FIG. 2 confirma este fato, sendo as isotérmicas paralelas a região designada para ser a do cordão de solda. Na prática, as isotérmicas tendem para o estado quase-estacionário porém, na maioria dos casos o comprimento do cordão de solda é tal que não há tempo suficiente para este estado ser alcançado.

Para a simulação da Equação 4, modelo desenvolvido nesse trabalho, necessita-se da determinação de t_e e b . Para isto e futuras comparações, decidiu-se realizar um teste experimental utilizando o processo GMAW em uma placa de aço de baixo carbono e de dimensões tais que simulasse uma placa semi-infinita (400x160x20 mm). Foram utilizados os mesmos parâmetros, relacionados ao processo GMAW, citados na TAB. 2. Para medir as temperaturas, foram soldados três termopares, todos sobre a placa, simulando a situação de $z = 0$ e a uma distância $y = 20$ mm da linha central do cordão de solda. O primeiro termopar foi soldado em $x = 30$ mm, o segundo em $x = 120$ mm e o terceiro em $x = 210$ mm do início do cordão de solda. O valor da temperatura de interesse corresponde ao valor medido por cada termopar quando a fonte de calor estiver passando, exatamente, ao lado das posições citadas.

Para que a simulação da Equação 4 fosse realizada e os valores das temperaturas obtidas fossem compatíveis com os resultados experimentais, os valores de b e t_e foram calculados e corresponde, respectivamente, a 0,0034 e 1 segundo. A FIG. 3 mostra o perfil térmico simulado utilizando os mesmos parâmetros apresentados na TAB. 2. Observa-se através desta figura o período transiente do processo que comparando com a FIG. 2 percebe-se que a distribuição de temperatura avança para o estado quase-estacionário, mas não o atinge. O que confirma o fato que a Equação 2 pode ser utilizada como o limite superior do processo, pois super-dimensiona os valores de temperatura.

Para uma melhor visualização foram extraídos alguns valores de temperatura e estes valores correspondem às mesmas posições citadas para a localização dos termopares. A TAB. 3 mostra os valores encontrados experimentalmente, os encontrados através da simulação da Equação 2 e da Equação 4. A FIG. 4 mostra os resultados apresentado na TAB. 3. Observa-se através desta Figura que os valores encontrados a partir da Equação 4 comparados com os valores obtidos experimentalmente, apresentam uma tendência mais realista do que comparados aos valores encontrados a partir da Equação 2.

O propósito de desenvolver um modelo dinâmico para o processo foi obter indicações de possíveis mudanças a serem feitas nos parâmetros de soldagem, tais como velocidade de soldagem e corrente, e a partir destas mudanças minimizar efeitos térmicos resultantes do processo. Para que o aporte térmico diminua, a velocidade de soldagem deve aumentar e a corrente diminuir. Para isto, foram simulados tanto a Equação 2 como a Equação 4 aumentando a velocidade de soldagem e diminuindo a corrente. As FIG. 5 e 6 mostram os perfis térmicos para uma velocidade de soldagem igual à 10 mm/seg. A FIG. 7 e 8 mostram os perfis térmicos para uma corrente igual a 200 Amp. Nas quatro simulações foram mantidos iguais os demais parâmetros citados na TAB. 2.

Observa-se através das FIG. 5 e 7, comparadas com a FIG. 2, obtidas através da Equação 2, que a largura do cordão de solda diminuiu, sendo que esta diminuição é mais evidente quando houve o aumento da velocidade de soldagem (FIG. 5). Esta mesma tendência é observada através das Fig. 6 e 8, comparadas com a FIG. 3, obtidas através da Equação 4.

Manter a geometria do cordão de solda (largura e penetração) constante durante o processo de soldagem representa um critério de qualidade. Observa-se que para cada caso simulado a largura do cordão de solda foi diferente. Entretanto, em nenhum caso pode-se dizer que houve controle. A FIG. 9 mostra o que ocorre com o perfil térmico aumentando a velocidade de soldagem “gradativamente” ao longo do comprimento proposto, iniciando com uma velocidade de soldagem de 5 mm/seg e terminando com 10 mm/seg.

A FIG. 10 mostra o que ocorre com perfil térmico quando a corrente diminui “gradativamente” de 260 Amp para uma corrente de 200 Amp, simulando nos dois casos o “controle em tempo real” da velocidade de soldagem e da corrente, respectivamente.

Comparando estas Figuras com a FIG. 3, e também com as demais Figuras obtidas através da simulação da Equação 4, observa-se que as isotérmicas tendem a ficar paralelas mais rapidamente e que a largura do cordão de solda é semelhante ao encontrado na FIG 3. Comparando a FIG. 9 com a FIG. 10 observa-se que variando a velocidade de soldagem as isotérmicas tendem a ficar paralelas mais rápido do que variando a corrente. Entretanto, observa-se que a largura do cordão de solda é mais homogêneo variando a corrente.

Conclusões

- 1- A partir de um modelo matemático estático desenvolveu-se um modelo dinâmico capaz de prever as variações de temperatura ao longo do tempo de soldagem;
- 2- Conhecendo o perfil térmico transiente do processo de soldagem foi possível variar “gradativamente” a velocidade de soldagem e a corrente, simulando o “controle da soldagem em tempo real”;
- 3- Tanto a velocidade de soldagem como a corrente mostraram-se capazes de serem utilizados para desenvolver uma lei de controle viabilizando a automação do processo de soldagem.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos Professores Dr. R.L. Utsch F. Pinto e Dr. P.J. Mondenesi pela valiosa colaboração para o modelamento matemático e o teste experimental desenvolvido nesse trabalho, respectivamente. E a CAPES pelo auxílio financeiro recebido.

Referências Bibliográficas

- 1) MACHIRAUCH, E. e WOHFAHRT, H. Different sources of residual stresses as a result welding. London: The Welding Institute, International Conference, Residual stresses in welded construction and their effects , p.267-282, Novembro, 1977.
- 2) HUBER, A.W. Residual stresses in wide flange beams and columns. Lehigh University: Fritz Lab. Report, p. 220-225, Julho, 1956.

- 3) TALL, L. Residual stresses in welded plates: A theoretical study. *Welding Journal* 43(1), p.10-23, Janeiro, 1964.
- 4) MASUBUCHI, K., Applications of numerical analysis in welding, *Welding in the world*, v. 17 no 11/12 , p.268-291, 1979.
- 5) AWS. *Welding handbook; Welding technology*. Miami: American Welding Society, 8 o ed., v. 1, p. 242, 1987.
- 6) BLODGETT, O.W. Control of Shrinkage and distortion. *AWS Convection: Welding Mechanic and Design*, p.37-43, 1996.
- 7) LOMBERA, G., SEDRANI, A. e VEDIA, L.A. Computational and experimental determination of temperature distribution in arc welding. *ASM International: Recent Trends in Welding Science and Technology*, Edited by David, S.A., and Vitek, J.M., Gatlinburg, Tennessee, p. 55-58, Maio, 1989.
- 8) DOMEY, J., AIDUN, D.K., AHMADI, G. e DIEBOLD, T. Numerical simulation of GTA welds on titanium alloys with comparison to experimental results. *ASM International: Recent Trends in Welding Science and Technology*, Edited by David, S.A., and Vitek, J.M., Gatlinburg, Tennessee, p. 81-85, Junho, 1992.
- 9) MARQUES, P.V. *Tecnologia da soldagem*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica, p. 77-81, 1991.
- 10) ROSENTHAL, D. Mathematical theoretical of heat distribution during welding and cutting, *Welding Journal*, 20(5), p.220-234, Maio, 1941.
- 11) ROSENTHAL, D. The theory of moving sources of heat and its applications to metal treatments. Cambridge: *Transactions of the ASME*, p.849-866, Novembro, 1946.
- 12) PARIONA, M.M., LEAL, V.S., ALCÂNTARA, N.G. e KIMINAMI, C.S. Modelamento computacional do histórico térmico na junta soldada de aço ARBL. Caxias do Sul - Rio Grande do Sul: XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, ABS - Associação Brasileira de Soldagem. p. 755-769, Junho, 1995.
- 13) BRACARENSE, A.Q. Relatório de avaliação técnica: Avaliação das causas de trincamentos de cordões de solda estruturais do eixo traseiro 178. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, p.11-49, Dezembro, 1996.

14) PINTO, R.L.U.F. Conversa privada: Modelamento matemático. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, 1996.

TABELA 1 - Lista de simbologia e unidades

T	temperatura (°C)	$1/2\lambda = \alpha$	difusividade térmica (mm^2/seg)
T_r	temperatura de referência (°C)	ρ	densidade do material (Kg/m^3)
T_o	temperatura inicial do material (°C)	η	eficiencia do processo
T_f	temperatura de fusão do material (°C)	ϕ	função a ser achada (°C)
Q	potência do calor (W)	β	constante adicional
t_e	tempo de estabilidade (seg)	$\xi_{x,y,z}$	coordenada do material (mm)
t	tempo (seg)	v	velocidade de soldagem (mm/seg)
I	corrente (amp)	K	condutividade térmica ($\text{J}/\text{m m seg } ^\circ\text{C}$)
V	tensão do arco (volts)	C_p	calor específico ($\text{J}/\text{Kg } ^\circ\text{C}$)

TABELA 2 - Variáveis utilizadas na simulação

Parâmetros relacionadas com o processo	Parâmetros relacionadas com o material
I = 260 amp; V = 33 volts v = 5 mm/seg; $\eta = 0,85$	K = 0,054 J/seg.mm/°C; $T_{\sigma} = 25,4 ^\circ\text{C}$ $\alpha = 15 \text{ mm}^2/\text{seg}$; $T_f = 1500 ^\circ\text{C}$

TABELA 3 - Resultados das temperaturas encontradas

Posição	Experimental	Equação 2	Equação 4
x = 30 m m	51,34	228,38	48,17
x = 120 m m	93,80	228,38	95,67
x = 210 m m	120,87	228,38	130,66

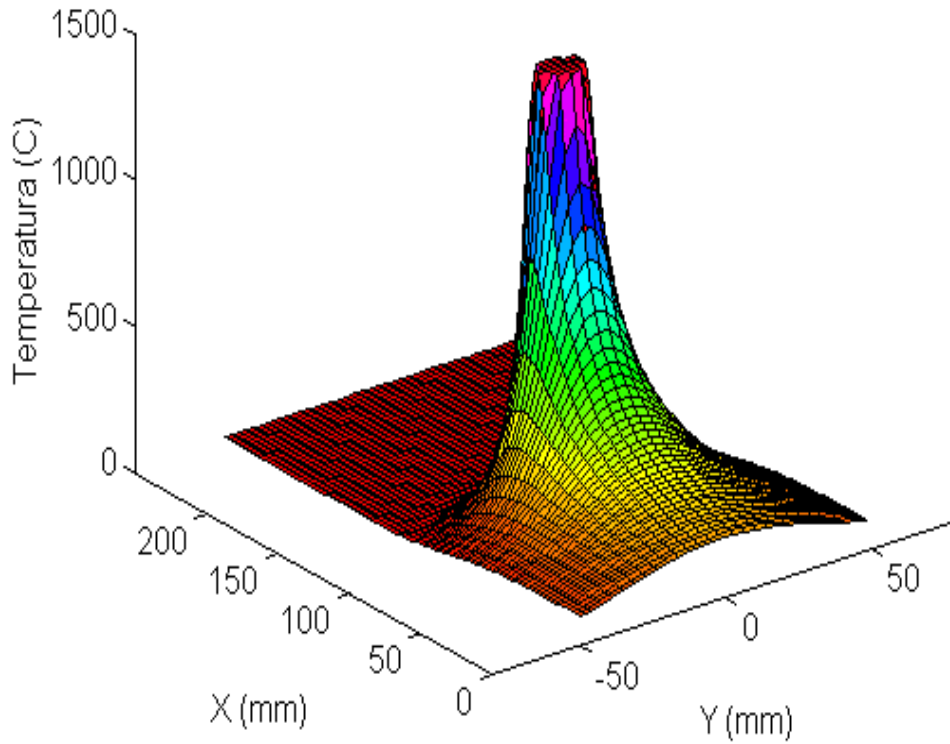


FIGURA 1 - Distribuição de temperatura a 120 mm ao longo do cordão utilizando o modelo proposto por Rosenthal

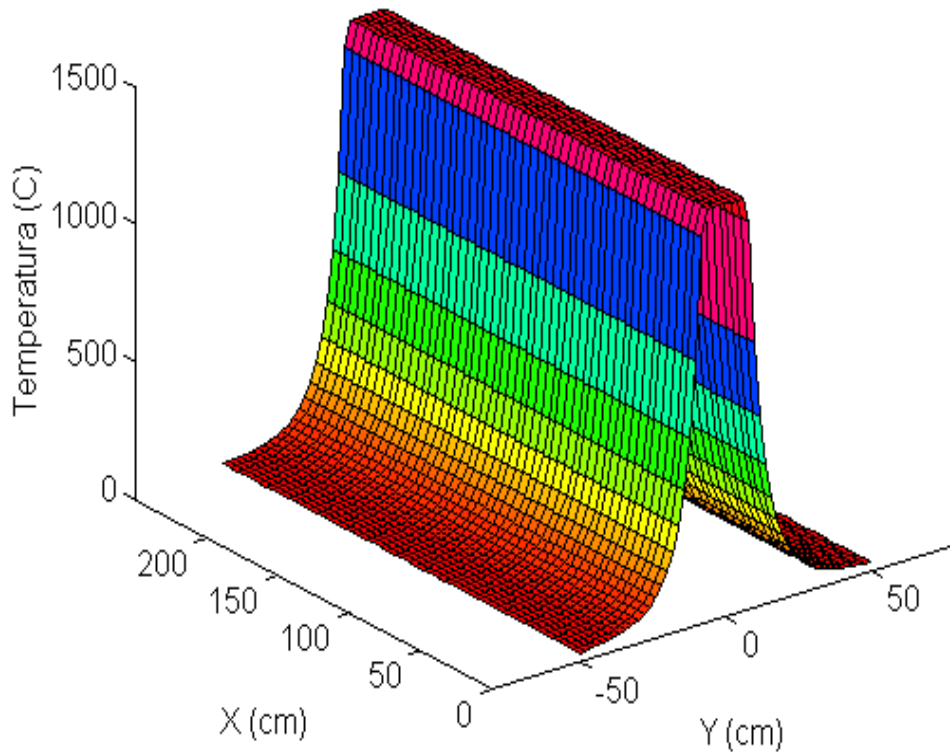


FIGURA 2 - Perfil térmico ao longo do cordão de solda no estado quase-estacionário utilizando o modelo proposto por Rosenthal

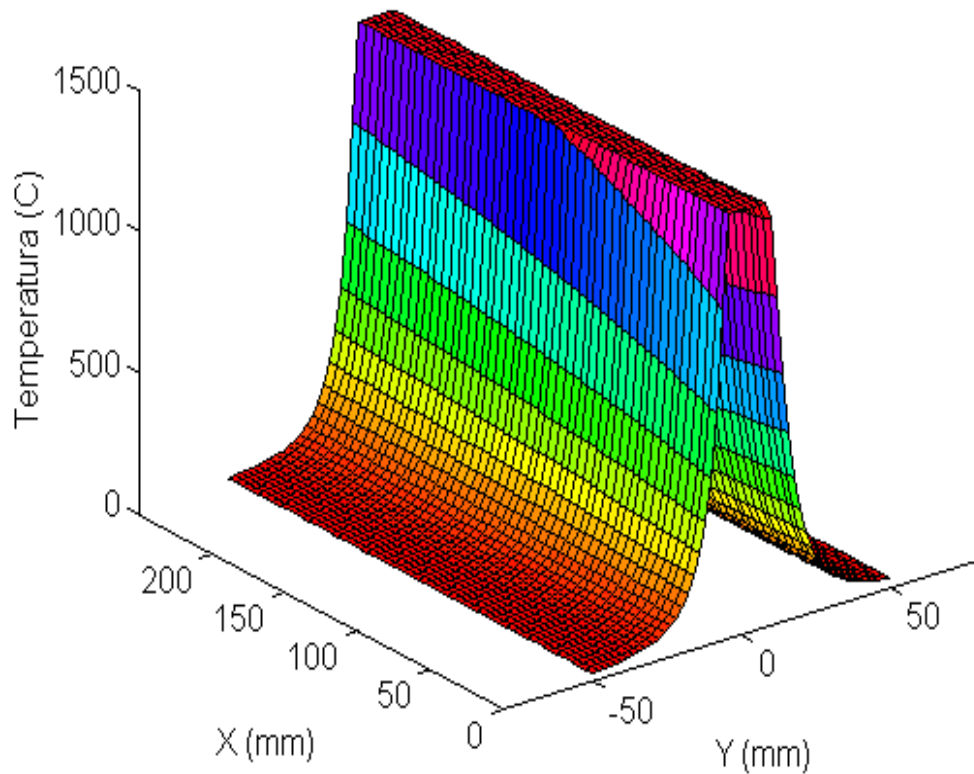


FIGURA 3 - Perfil térmico ao longo do cordão de solda utilizando o modelo desenvolvido nesse trabalho

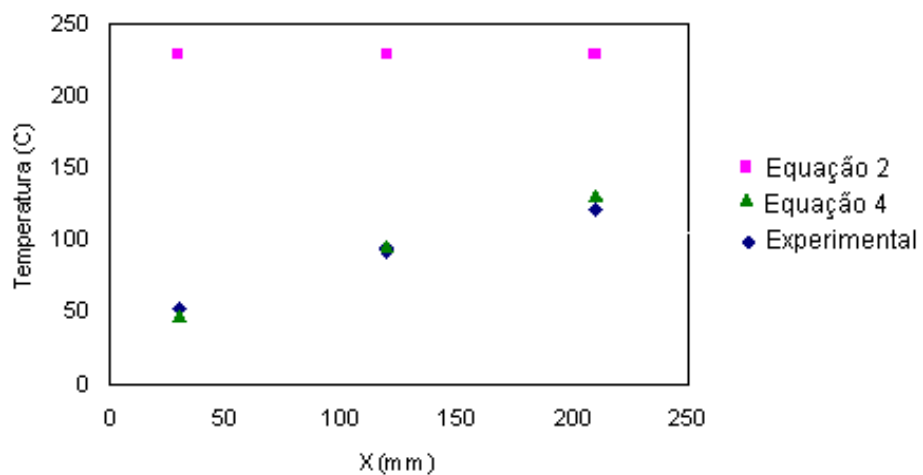


FIGURA 4 - Comparação entre os valores das temperaturas obtidas

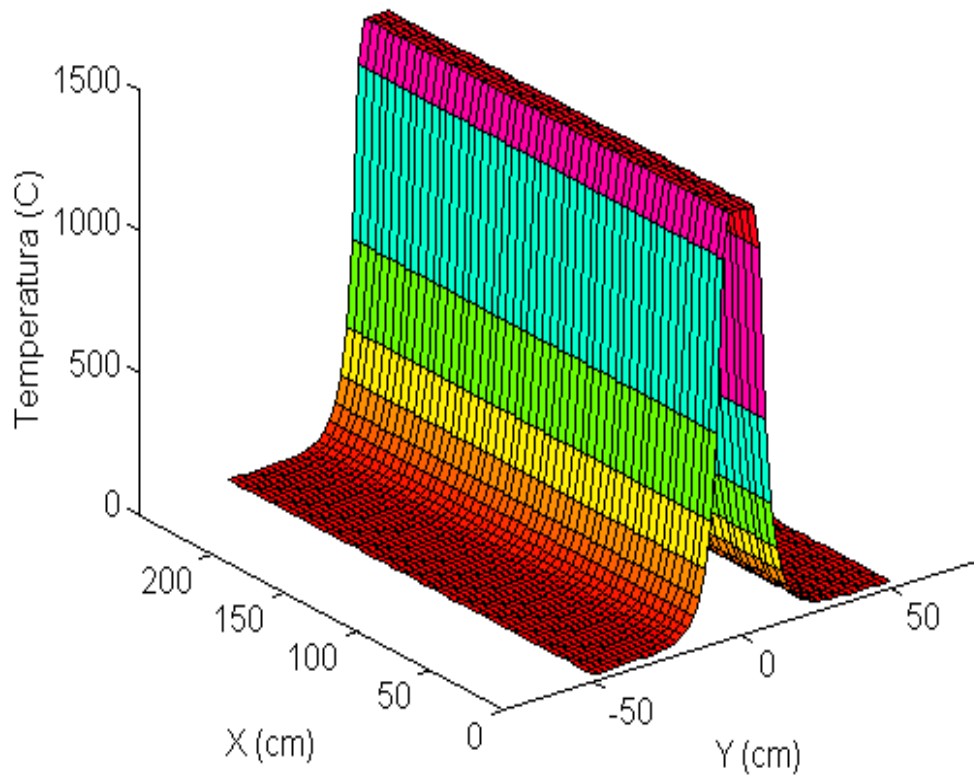


FIGURA 5 - Perfil térmico utilizando a Equação 2 para uma velocidade de soldagem igual a 10 mm/seg

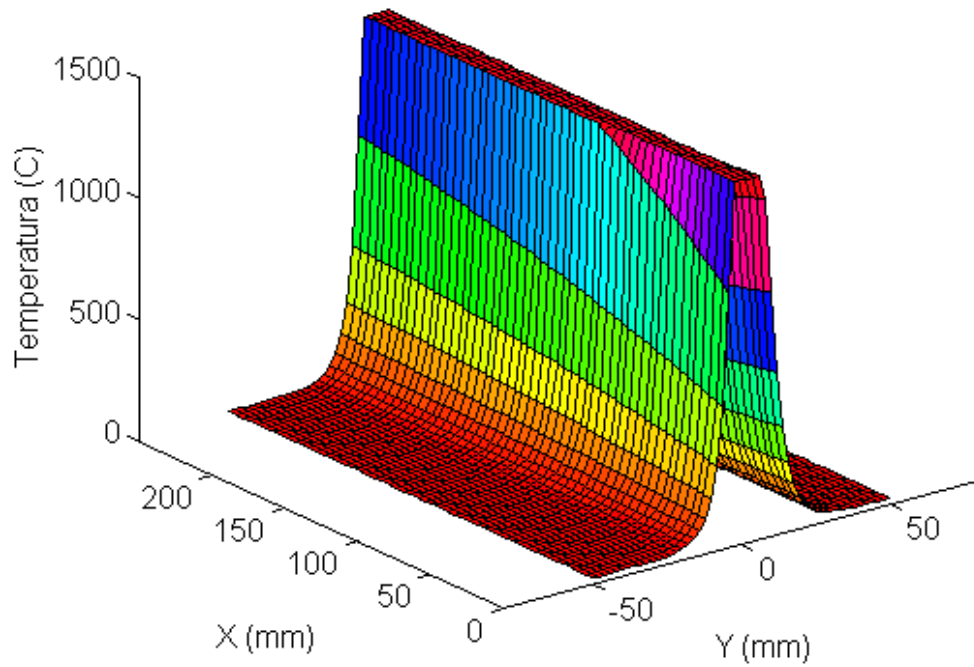


FIGURA 6 - Perfil térmico utilizando a Equação 4 para uma velocidade de soldagem igual a 10 mm/seg

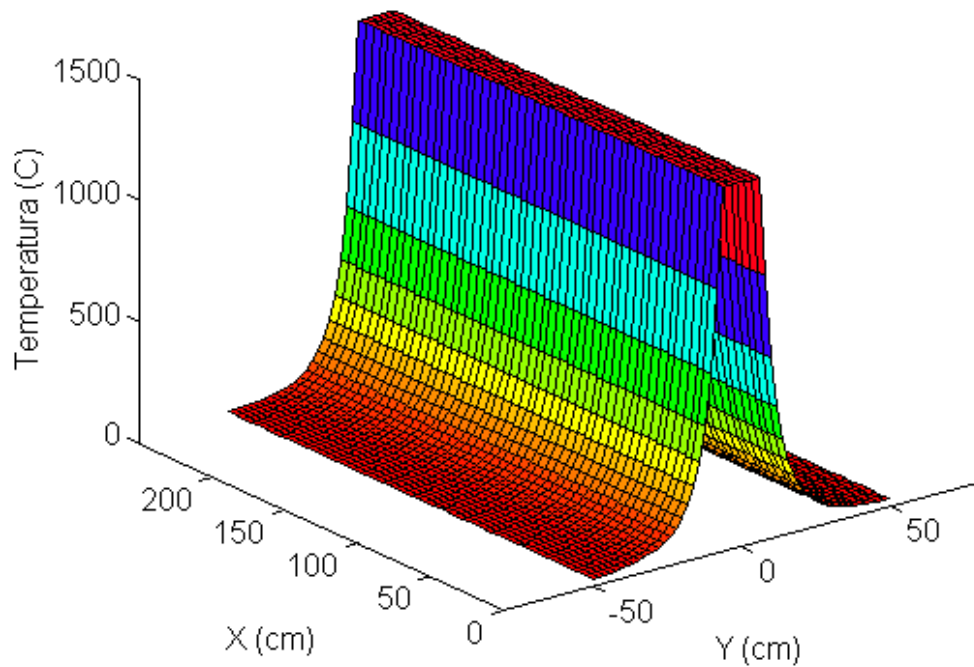


FIGURA 7 - Perfil térmico utilizando a Equação 2 para uma corrente igual a 200 Amp.

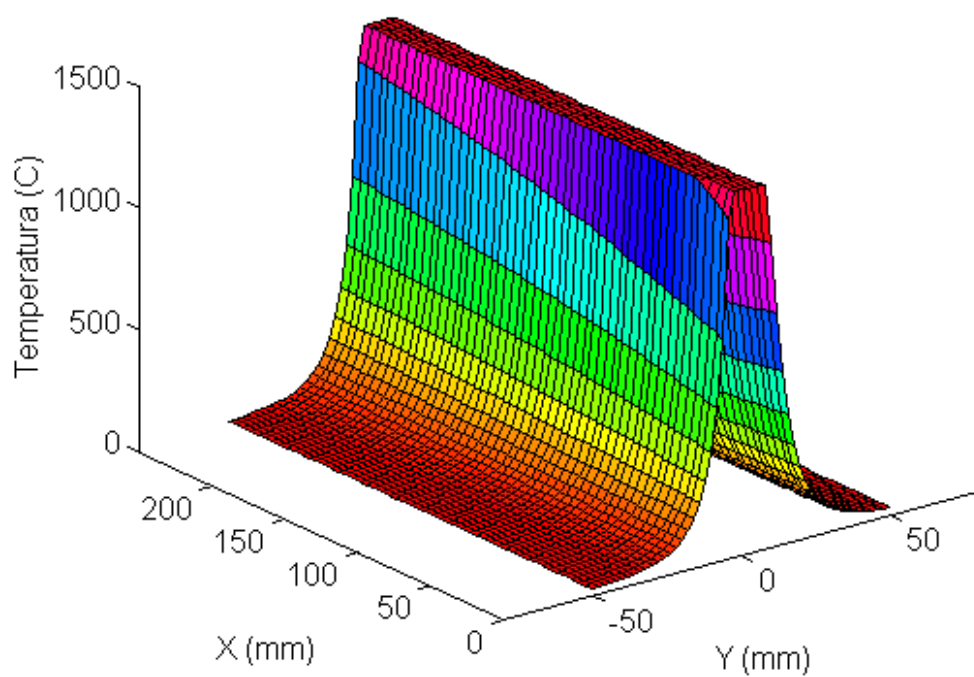


FIGURA 8 - Perfil térmico utilizando a Equação 4 para uma corrente igual a 200 Amp.

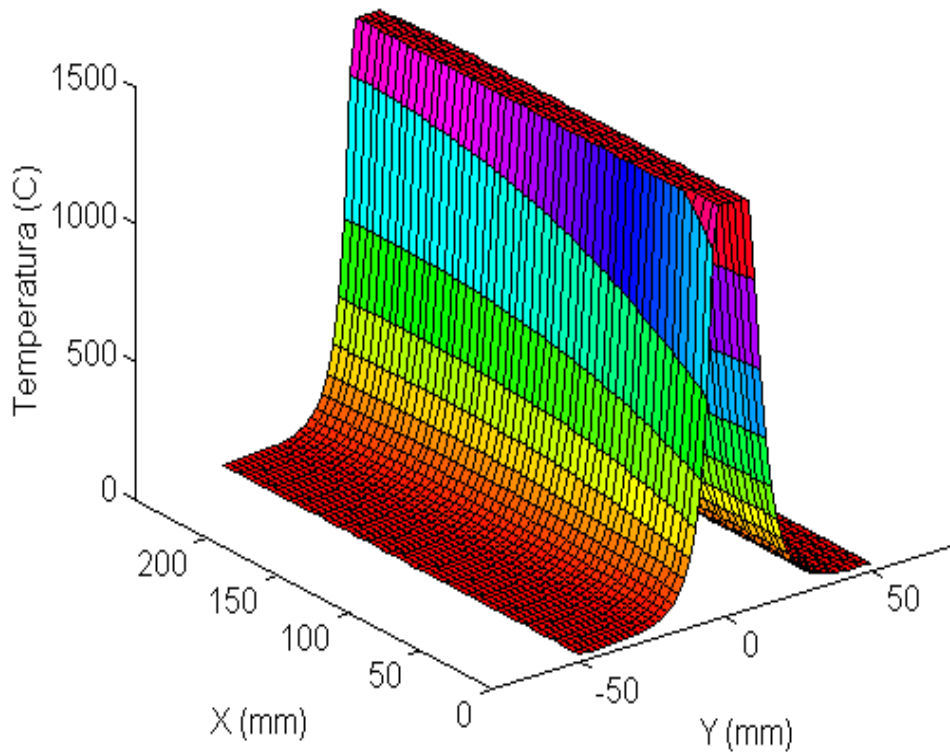


FIGURA 9 - Perfil térmico aumentando a velocidade de soldagem no decorrer do processo

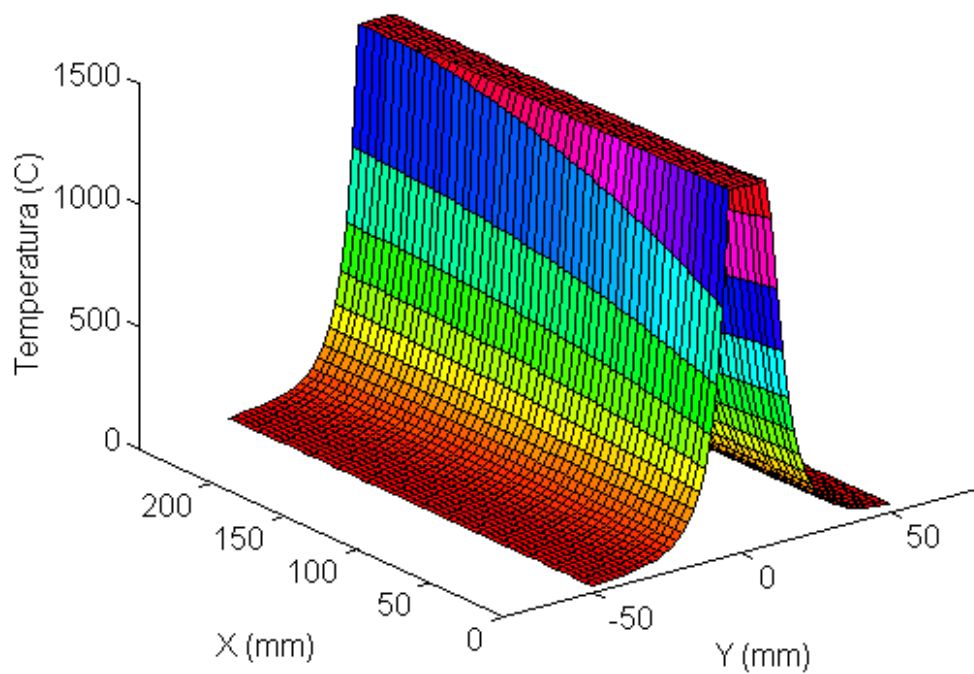


FIGURA 10 - Perfil térmico diminuindo a corrente no decorrer do processo