

MODELAGEM ELÍPTICA APLICADA NA DETERMINAÇÃO DA LARGURA DA ZONA TERMICAMENTE AFETADA

COBEF2017-0379

Resumo: O trabalho tem como objetivo apresentar uma formulação matemática capaz de descrever as isotermas em um processo de soldagem contendo uma fonte de calor pontual e considerando as propriedades físicas do material e a velocidade de soldagem aplicada. A partir da equação descrita por Adams, os ciclos térmicos, por exemplo, para o aço ABNT 1020 foram plotados e, para validação, comparados como os dados propostos para o aço ABNT 1018. Assim, como o conhecimento dos parâmetros de soldagem é de importância fundamental para a previsão dos resultados esperados nesse processo, duas formulações foram propostas. A primeira descreve o fenômeno de soldagem para velocidades muito baixas, no qual as isotermas são circulares e, por sua vez, a segunda considera qualquer velocidade de soldagem (modelagem das isotermas por elipses). A determinação analítica da função que descreve essas isotermas foi derivada da equação proposta por Rosenthal para o caso da transferência de calor tridimensional (espessura relativa $> 0,75$). Como etapa final, a análise da equação exponencial foi testada numericamente e os limites para a sua utilização foram levantados. Por sua vez, a modelagem por elipses foi comparada com os resultados da equação exponencial. Como resultados, observa-se que, em comparação aos modelos tradicionais (Adams e Rosenthal), as equações propostas apresentam as características capazes de descrever, de forma aproximada, as isotermas para um determinado calor aportado, com velocidade de soldagem conhecida, e temperatura de pico prescrita. Este trabalho atende a necessidade de modelos que simulem os resultados de soldagem e sejam capazes de prever o comportamento das isotermas na Zona Termicamente Afetada diante dos parâmetros de soldagem.

Palavras-chave: Processo de soldagem, modelagem, transferência de calor, Zona Termicamente Afetada.

1. INTRODUÇÃO

A transferência de calor é um dos aspectos mais importantes no estudo da soldagem (Song et al., 2003). Os diversos processos de soldagem utilizam o calor injetado para obter a solda de boa qualidade. No entanto, essa energia inserida no material, se não administrada corretamente, pode gerar problemas devido a sua influência nos processos metalúrgicos e mecânicos do local da solda.

A determinação correta dos parâmetros de soldagem, como a quantidade de energia inserida no sistema, o rendimento térmico do arco elétrico, e a distribuição de temperaturas, é de fundamental importância para que a região de solda não apresente problemas, pois as complexas interações entre os processos físicos presentes na soldagem afetam as propriedades da zona de solda (Nandan et al., 2007).

Um modelo teórico normalmente oferece uma poderosa alternativa para estimar os parâmetros de entrada mais importantes, mas também para calcular os efeitos da variação de qualquer um desses fatores (Kim et al., 1998). Os modelos matemáticos de transferência de calor na Zona Termicamente Afetada (ZTA) são muito úteis no controle da mudança microestrutural no metal de base devido ao processo de soldagem, e, portanto, oferece a possibilidade de mudar as propriedades mecânicas do material devido a adição de calor poder ser controlada.

Em relação a modelagem, Ulysse (2002) e Hamilton et al. (2008) desenvolveram modelos capazes de analisar a sensibilidade dos parâmetros de soldagem na distribuição de temperaturas. Cato et al. (2010) analisaram pelo Método de Elementos Finitos, a falha causada na região plástica na ZTA de uma conexão de alumínio soldada. Kuo et al. (2002) analisaram a distribuição de temperaturas durante o processo de soldagem de uma placa usando o método das diferenças finitas para determinar a ZTA.

Modelos matemáticos foram desenvolvidos por Gunaraf et al. (1999), para estudar os efeitos das variáveis do processo e do calor inserido na ZTA, a partir da soldagem a arco submerso em tubos de aço. Já Kim et al. (1998) desenvolveram um modelo matemático de transferência de calor e de escoamento de gás no processo de soldagem a arco metálico.

Conforme Gunaraf et al. (2002), um incremento no calor inserido resulta em uma diminuição da taxa de resfriamento e a zona, a qual foi termicamente afetada, sofre uma considerável mudança na sua microestrutura, devido ao crescimento dos grãos e, portanto, suas propriedades mecânicas se alteram.

Este artigo se concentra em desenvolver uma nova formulação matemática capaz de descrever a variação da largura da ZTA em função da temperatura em um processo de soldagem, tendo como base a solução analítica proposta por Rosenthal para a transferência de calor tridimensional.

2. METODOLOGIA

De acordo com Winczek (2011) a equação que descreve a condução de calor em um sólido, onde o campo de temperaturas varia no tempo e no espaço, pode ser expressa como:

$$\nabla(\lambda \nabla T) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Onde λ é a condutibilidade térmica do material, ρ é a densidade do material, c é o calor específico do material no estado sólido, e $\dot{q}$ é a fonte ou sorvedouro de calor.

A partir da Eq. (1), é possível descrever o campo de temperaturas para um corpo infinito com uma fonte transiente de calor aplicada em qualquer ponto do material.

A análise do pico de temperatura na superfície do material pode ser feita a partir da equação de Adams para o caso bidimensional:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4,13 V Y g \rho c}{Q} + \frac{1}{T_m - T_0} \quad (2)$$

Em que T_p é a temperatura de pico, T_0 é a temperatura de pré-aquecimento, T_m é a temperatura de fusão do material, V é a velocidade da soldagem, Y é a distância da temperatura em relação a linha de fusão, g é a espessura da chapa, e Q é a quantidade de energia inserida no sistema.

A temperatura em função do tempo para um material fornece a informação de como o calor está sendo dissipado no local onde existe mudança de fase. O ciclo térmico pode ser mostrado a partir da equação obtida por Rosenthal para o caso de transmissão de calor tridimensional Eq. (3):

$$\frac{2\pi(T_p - T_0)kR}{Q} = e^{\frac{-V(R-x)}{2\alpha}} \quad (3)$$

Em que k é a condutividade térmica, α é a difusividade térmica do material, e $R = (x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}$ é o raio que indica a isoterma. Com essa equação, é possível saber o formato do ciclo térmico para cada material, dado o calor aportado e a velocidade de soldagem.

A partir da Equação (2) montou-se um gráfico afim de determinar o valor da ZTA mostrado na Figura (1).

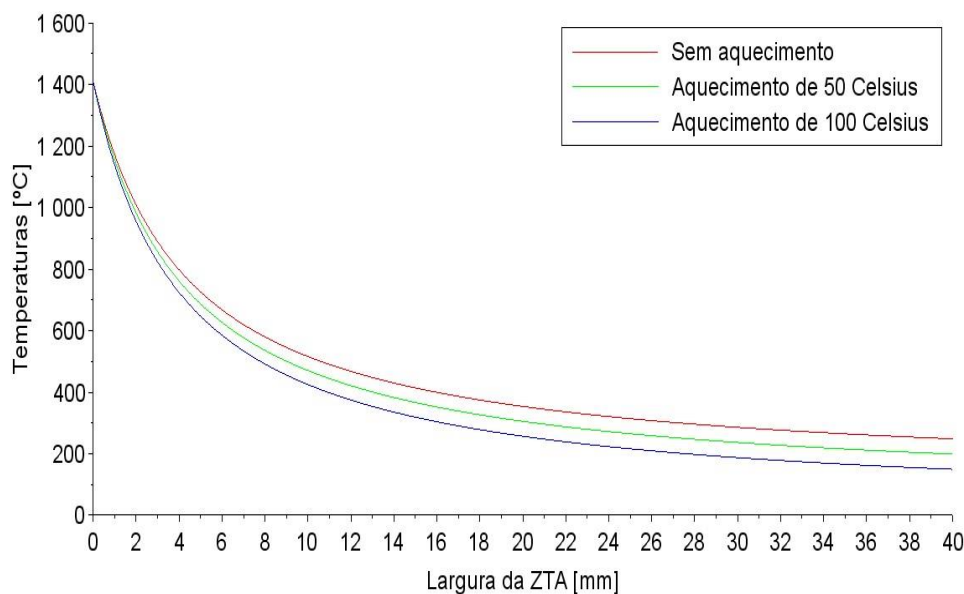


Figura 1. Largura da ZTA em função da temperatura para uma chapa de aço baixo-carbono com espessura de 5 mm e calor aportado de 720 J.mm-1, sem aquecimento, com aquecimento de 50°C e com aquecimento de 100°C.

Para gerar os gráficos do ciclo térmico do aço 1020, utilizou-se os dados da Tab. (1). A difusividade térmica foi calculada e a espessura da chapa, assim como a temperatura foram escolhidas aleatoriamente.

Tabela 1. Propriedades do aço 1020

Propriedades do aço 1020	
Densidade (kg/mm ³)	7,85 E-6
Calor específico no seu estado sólido (J/kg.°C)	486
Condutividade térmica (J/mm.s.°C)	0,0519
Temperatura de fusão do material (°C)	1410

Fonte: Callister, 1999.

A Figura (2) mostra uma comparação entre os ciclos térmicos do aço 1020, com os ciclos térmicos do aço 1018 (Kou, 2003), utilizando a Eq. (3), conforme abaixo:

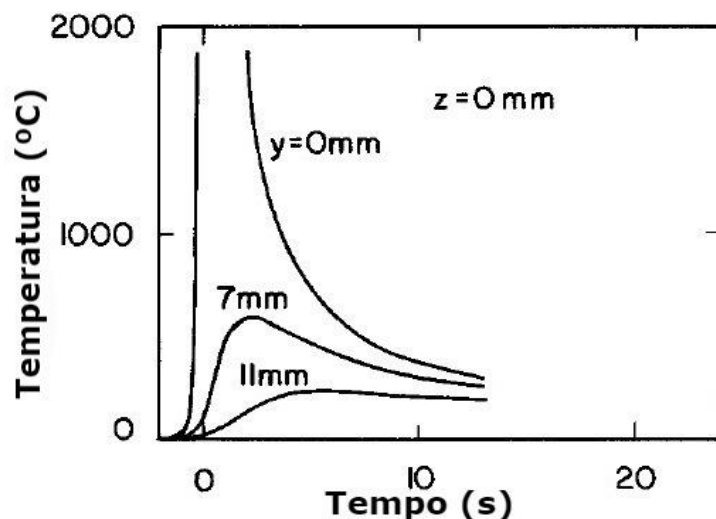
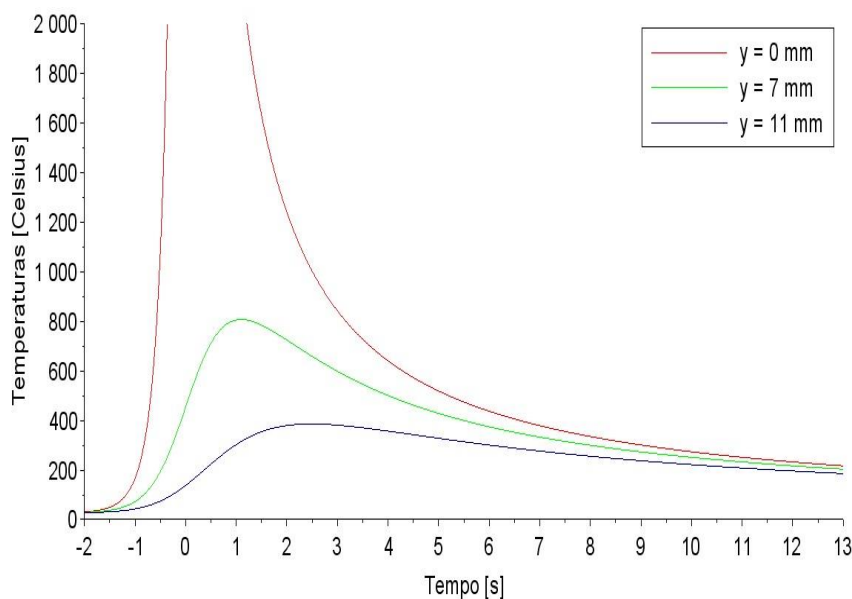


Figura 2. Ciclos térmicos do aço 1020 (acima), e do aço 1018 (abaixo), com velocidade de soldagem de 62 mm/s, e calor aportado de 5000 W.

A partir da Eq. (3) é possível encontrar uma relação que descreva o comportamento da poça de fusão e das isotermas no plano mais superficial do material, conforme mostra a Equação (4).

$$Re^{-\frac{V}{2\alpha}R} = e^{\frac{Vx}{2\alpha}} \frac{Q}{2\pi(\tau_p - \tau_\theta)k} \quad (4)$$

No entanto, depois de obtido o valor de R, a modelagem somente poderia ser feita por uma circunferência, o que seria válida apenas para baixos valores de velocidades de soldagem. Após um pouco de álgebra, é possível demonstrar a Eq. (5), a qual é a necessária para relacionar as isotermas com o plano de soldagem, em $z = 0$.

$$Y = \left\{ \left[\frac{Q}{2\pi(\tau_p - \tau_\theta)k} e^{\frac{V}{2\alpha} \left[x - (x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}} \right]} \right]^2 - x^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

A Equação (5) foi plotada a partir dos dados de um aço 1020, mostrado na Fig. (3), onde a velocidade de soldagem foi de 2.4 mm/s e o calor aportado foi de 3200W, para as temperaturas de 1803 K, 1373 K, 1053 K, 823 K, e 673 K. A velocidade de soldagem está no sentido do eixo x negativo.

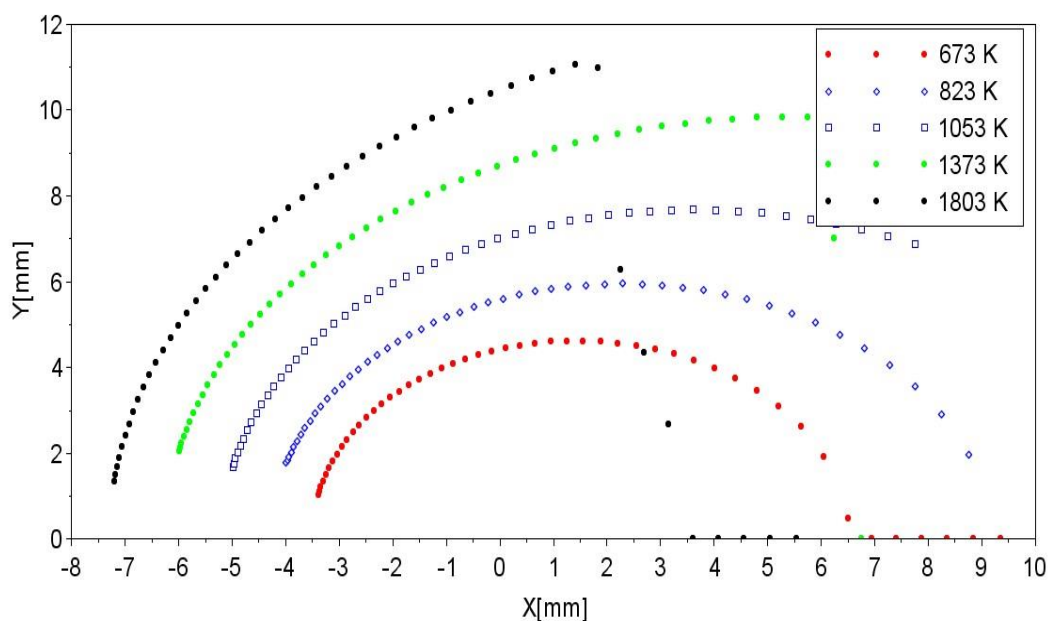


Figura 3. Simulação das isothermas para o aço 1020, com velocidade de soldagem de 2.4 mm/s e calor aportado de 3200 W.

A Figura (3) mostra os dados plotados através do método numérico utilizado. Uma hipótese para a falta de convergência, conforme o x aumenta, é que a diferença de temperaturas $T_p - T_o$ diminui e a influência desse termo na Eq. (5) aumenta.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA PARA A DETERMINAÇÃO DO CAMPO DE TEMPERATURAS

Para resolver esse problema, utilizou-se um modelo de uma elipse para extrapolar os resultados, e para cada temperatura foram obtidos, a partir da Fig. (3), os valores dos parâmetros conforme a Tab. (2).

Tabela 2. Constantes obtidas a partir da Fig. (3).

Temperatura (K)	Xo (Posição de soldagem deslocada do foco em (mm))	B (Eixo menor da elipse (mm))	A (Eixo maior da elipse (mm))
1803	1,498	4,475	4,990
1373	2,489	6,002	6,644
1053	3,627	7,659	8,737
823	5,279	9,831	11,343
673	5,580	11,509	12,855

A partir dos dados da Tab. (2), pode-se construir equações capazes de extrapolar os resultados numéricos apresentados em função das temperaturas.

$$Y = \frac{B}{A} (A^2 - (X - X_o)^2)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Essas equações são capazes de descrever, de forma aproximada, as isothermas para um determinado calor aportado, com velocidade de soldagem conhecida, e temperatura de pico prescrita.

4. CONCLUSÕES

A Equação (6) foi utilizada para gerar os pontos nos quais a Eq. (5) não foi capaz de produzir. Na Fig. (4), os pontos foram plotados através da Eq. (5), e as linhas pela Eq. (6), utilizando os dados da Tab. (2).

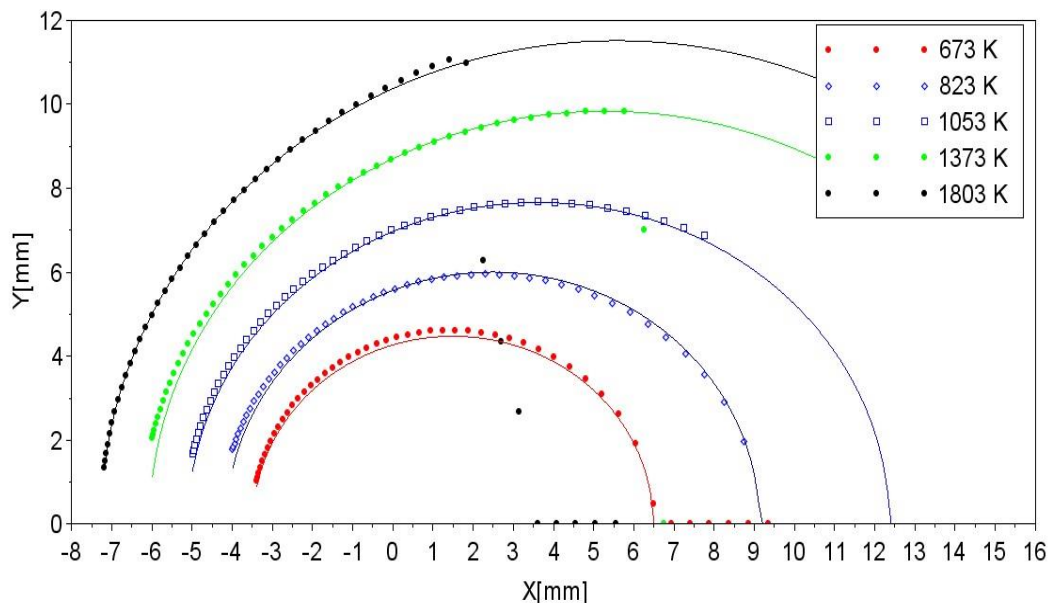


Figura 4. Extrapolação dos resultados obtidos pela Eq. (5), utilizando a Eq. (6) e os dados da Tab. (1), para simular as formas das isothermas.

A partir das Eqs. (1) e (2) foi possível encontrar a largura da ZTA, para condições de processos específicas, conforme mostrada na Fig. (1), a partir da temperatura.

Com a Eq. (3) pode-se determinar o ciclo térmico para qualquer material, desde que sejam dados o calor aportado e a velocidade de soldagem, da mesma forma, os ciclos térmicos encontrados da Fig. (2) podem ser utilizados para obter a taxa de resfriamento do aço ABNT 1020 e do aço ABNT 1018. Assim, é possível compreender como se comporta cada ciclo térmico à medida que se alteram os parâmetros de soldagem.

Para descrever o perfil da poça de fusão, além do comportamento das isothermas, utilizou-se a Eq. (4), pois esta relação envolve as principais propriedades dos aços ABNT 1020 e ABNT 1018. A Eq. (5) possibilita encontrar a distância da temperatura em relação a linha de fusão, sendo possível descrever as isothermas em um plano de soldagem, conforme mostra a Figura (3).

Para gerar as isothermas, devido à falta de convergência do método, foi necessário modelar o sistema de dados pela Eq. (6), ou seja, uma elipse, o que pode ser observado na Fig. (4). Seria possível também gerar isothermas para baixas velocidades a partir da Eq. (2), no entanto isso resultaria em isothermas circulares, o que não condiz com o fenômeno de transferência de calor na soldagem.

Na Fig. (4) as isothermas evidenciaram que a medida que a temperatura se eleva ocorre o aumento da ZTA. As isothermas na Fig. (3) se apresentaram em formato circular, o que não condiz com a forma da poça de fusão em um processo de soldagem, já as isothermas na Fig. (4) se apresentaram em formato elíptico o que corresponde à forma da poça de fusão.

5. REFERÊNCIAS

- Cato, D., Lodemo, O. G., Myhr, R., Berstad, T., Hopperstad, O. S., 2010, "Finite element analysis of plastic failure in heat affected zone of welded aluminium connections", Computers and Structures, Vol. 88, pp 519-528.
- Gunaraf, V., Muragan, N., 1999, "Prediction and comparison of the area of the bead-on-joint in submerged arc welding of pipes", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 95, pp 246-261.
- Gunaraf, V., Muragan, N., 2002, "Prediction of Heat-Affected zone characteristics in submerged arc welding of structural steel pipes", Welding Research.
- Hamilton, C., Dymek, S., Sommers, A., 2008, "A thermal model of friction stir welding in alluminium alloys", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 48, pp 1120-1130.
- Kim, I. S., Basu, A., 1998, "A mathematical model of heat transfez and fluid flow in the gas metal arc welding process", Journal of Material Processing Technology, Vol. 77, pp. 17-24.
- Kuo, H. C., Wu, L. J., 2002, "Prediction of heat affected zone using Grey Theory", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 120, pp. 1151-168.
- Kou, S., 2003, Welding Metallurgy, 2nd edition, John Wiley, New York, 53 p.
- Nandan, R., Roy, G. G., Lienert, T. J., Debroy, T., 2007, "Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel", Acta Materialia, Vol. 55, pp. 883-895.

- Song, M., Kovacevic, R., 2003, "Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, pp. 605-615.
- Ulysse, P., 2002, "Three-dimensional modeling of the friction stir-welding", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 42, pp 1549-1557.
- Winczek, J., 2011, "Modelling of heat affected zone in cylindrical steel elements surfaced by welding", Applied Mathematical Modelling.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ELLIPTIC MODELLING APPLIED TO DETERMINE THE WIDTH OF HEAT-AFFECTED ZONE

Dorgival Albertino da Silva Júnior, dorgival.silva@ufersa.edu.br¹

Gleidson Leite da Silva, gledson.leytte@hotmail.com¹

Nayana de Freitas Gadelha, nayanagdufersa@hotmail.com¹

Sérgio Rodrigues Barras, barra@ct.ufrn.br²

¹Universidade Federal Rural do Semiárido, Centro de tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Caraúbas, RN, Brasil.

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Natal, RN, Brasil.

Abstract: This work aims at presenting a mathematical formulation able to describe the isotherms in a welding process, considering the physical properties of the material as well as its applied welding speed. Based on the equation developed by Adams, the thermal cycles to steel ABNT 1020 were plotted and for its validation, taking into consideration the proposed data for steel ABNT 1018. Thus, two formulations were proposed, once the knowledge of the welding parameters is highly important for predict the results which are expected in such process. The first one describes the phenomenon of welding for very low speeds, in which the isotherms are circular and the second one takes into account any welding speed (isotherms modelling by ellipsis). The analytical determination of the function that describes these isotherms was derived from the equation of Rosenthal regarding tridimensional heat transfer (relative width $> 0,75$). Towards the end, the exponential equation analysis was numerically tested and the limits for its usage were found. Thus, the ellipsis modelling was compared with the exponential equation answers. As a result, it is possible to notice that comparing with the traditional models (Adams and Rosenthal), the proposed equations present features able to describe accurately the isotherms to a certain heat input with a known welding speed as well as the prescribed summit temperature. This work answers the need of models to simulate the welding results and that are also able to predict the behavior of isotherms in the heat-affected zone before the welding parameters.

Key-words: Welding process, modelling, heat transfer, Heat-Affected Zone.

1. COPYRIGHT

The authors are solely responsible for the content of the printed material included in their work.