

Artigo

Análise computacional das curvas de ciclo térmico em uma chapa de alumínio soldada com o processo TIG autógena

Hugo Eduardo Tavares Vieira ^[1], Francisco Edson Nogueira Fraga ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; hugovieira2018.2@gmail.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; nfraga@ufersa.edu.br

Recebido: 18/10/2022;

Aceito: 21/12/2022;

Publicado: 23/12/2022.

Resumo: O processo de soldagem é largamente utilizado na indústria, sendo aplicado em diversas áreas, inclusive com o uso dos métodos de simulação computacional por elementos finitos (MEF) como ferramenta que auxilia o profissional de engenharia na otimização de parâmetros de soldagem e na consecutiva tomada de decisões para mitigar defeitos. Todavia, modelos de simulação por MEF necessitam previamente de serem validados, seja com um procedimento experimental, seja por meio de comparação com resultados de outros trabalhos consolidados, a fim de que possam ser aplicados posteriormente para simular outras condições de soldagem que respeitem aquelas mesmas condições de contorno previamente validadas. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo realizar a simulação computacional, através de MEF, de um processo de soldagem TIG autógeno em uma chapa de alumínio Al 5052 para obter as curvas de ciclo térmico em diferentes pontos do material, e após isso, comparar com os resultados obtidos na literatura, a fim de validar o modelo aqui proposto para obtenção destas curvas de ciclo térmico em outras condições correlatas. A fonte de calor na superfície da chapa foi modelada a partir de uma distribuição gaussiana, na qual foi inserida no software ANSYS 2022 R1 STUDENT-Transient Thermal® em forma de uma rotina. A partir dos dados obtidos foi possível observar o campo de temperaturas na chapa e, com isso, obter as curvas de ciclo térmico em pontos específicos na chapa em função do tempo de soldagem. Comparando esses resultados com uma literatura de referência, observou-se que, para as condições de contorno e demais parâmetros utilizados, conseguiu-se alcançar uma convergência de valores na meta dos pontos medidos. Com isso, foi possível concluir que para os parâmetros de soldagem adotados e o modelamento matemático, bem como as condições de contorno adotadas, conseguiu-se uma aproximação entre os valores numéricos e experimentais para a maioria das regiões de interesse, entretanto, para os pontos ao fim do cordão de solda e na periferia da chapa, observou-se maior divergência de resultados.

Palavras-chave: Soldagem TIG; Método dos elementos finitos; Simulação computacional; Distribuição gaussiana.

Abstract: The welding process is widely used in industry, being applied in several areas, including several methods of computational finite computation (FEM) as a tool that assists the engineering professional in optimizing selection parameters and in making configuration decisions to mitigate tasks. , simulation by FEM, even though they are similar to other valid test procedures, with comparison of consolidated experimental models to a model that can be applied to other models that can be applied to other models that can be applied to other models that are applicable to other conditions previously validated boundary conditions. In this sense, this work aims to perform a computational simulation, through a FEM methodology, of an autogenous TIG welding process on an Al 5052 aluminum plate to obtain the thermal cycle curves at different points of the material, after that, comparing with the results obtained in the literature, in order to validate the model proposed here for these cycle curves of other correlated conditions. The heat source on the surface of the plate was modeled from a Rio Grande do Sul distribution, which was incorporated into the ANSYS 2022 R1 STUDENT-Transient Thermal® software in the form of a routine. From the data obtained, it was possible to observe the temperature field on the plate and, with that, to obtain the curves of the thermal cycle at specific points of the plate as a function of the welding time. Comparing with a reference literature, it was observed that, for the boundary conditions and other parameters used, it was possible to reach a convergence of values in the target of the midpoints. With this, it was possible, it is intended to be possible for the definition models, as well as delineated, an approximation between the numerical and experimental values was carried out for

most of the mathematical points of the definitions at the end of the weld bead and at the periphery. of the plate, a greater divergence of results was observed.

Key-words: TIG welding; Finite element method; Computer simulation; Gaussian distribution.

1. INTRODUÇÃO

A soldagem é amplamente utilizada na indústria, sendo aplicada em diversos setores, tais como: automotivo, naval, aeroespacial, estrutural, marítimo e eletrônico, tanto em processos de construção mecânica quanto como processo de reparo e manutenções. Em destaque, temos o processo TIG (*Tungsten Inert Gas*), no qual permite a soldagem de diversos materiais com ou sem o uso de metal de adição e possível de ser automatizado, sendo assim um processo versátil, além de produzir resultados de ótima qualidade [1].

Durante a soldagem as variáveis envolvidas, tais como: velocidade de soldagem, distribuição de temperaturas variando ao longo da peça (gradiente), fluxo de calor transiente e modelagem da fonte de calor, podem adicionar comportamentos complexos, do ponto de vista matemático, e não-lineares ao sistema, tornando a transferência de calor de difícil análise e mais complexa de obter uma solução analítica. Porém, com o avanço tecnológico, os métodos numéricos vêm ganhando espaço nesse tipo de análise. Logo, para obter resultados válidos, é preciso partir para métodos numéricos, porém esses resultados têm a necessidade de serem validados experimentalmente. Dentre os métodos mais difundidos, o chamado Método dos Elementos Finitos (MEF), por sua capacidade de discretizar geometrias complexas, aproxima soluções de problemas numericamente, dadas pela resolução de um sistema de equações diferenciais, para um sistema algébrico de equações e, ainda assim, obter resultados confiáveis, como por exemplo, problemas de análise estrutural e transferência de calor, passando por acústica e eletromagnetismo, indo até problemas complexos de multifísica e interação fluido-estrutura, consolidou-se como referência nos problemas de engenharia nos mais diversos casos [2]. Para simular o regime transiente, o software *ANSYS Transient Thermal*® faz uso da discretização por elementos finitos, onde é possível inserir a velocidade de avanço da fonte de calor e o modelo numérico desta, entretanto, em algumas ocasiões, pode ser necessário simplificar o problema, pois essas variáveis podem acarretar em maior dificuldade na modelagem matemática do problema, como, por exemplo, se a velocidade de soldagem não for constante, a fonte de calor estará acelerando durante o processo, isto levaria em um maior complexidade no equacionamento e maior esforço computacional.

O processo de transferência de calor envolve variáveis que, muitas vezes, não são constantes e também sofrem alterações em decorrência da temperatura. Dentre elas, a condutividade térmica é uma propriedade importante na simulação de processos de soldagem, visto que representa a capacidade de condução de calor do material. Quando a condutividade térmica do material muda consideravelmente com a temperatura, pode ser necessário levar essa variação em conta durante a análise do problema [3, 4]. Este trabalho tem como objetivo simular por elementos finitos um processo de soldagem TIG autógeno e obter, a partir desta, curvas de ciclo térmico de soldagem em chapas metálicas de alumínio, liga Al 5052, e, para a validação dos resultados da simulação, esta foi feita por meio de comparação com os resultados experimentais apresentados em um trabalho científico que utilizado como referência.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Soldagem TIG autógena

A soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (*Tungsten Inert Gas – TIG* ou *Gas Tungsten Arc Welding – GTAW*) é um processo no qual a união de peças metálicas pela fusão destas por meio de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e as peças a serem soldadas [5].

Uma vez que o processo TIG é bastante estável, metais reativos, como titânio, zircônio, alumínio e magnésio podem ser soldados com eficiência [6]. Nesse tipo de procedimento, também é possível realizar a soldagem autógena, ou seja, sem material de adição, nesse caso não existirá fluxo de massa entrando na poça de fusão, sendo uma propriedade importante para soldagem em peças de espessuras finas [5].

Na análise dos processos de soldagem é necessário estimar o rendimento dos mesmos, pois este dirá a quantidade de calor, responsável pela fusão do material de base, que será convertida em energia útil de soldagem. Para o processo TIG existem diversos estudos, tanto experimentais como computacionais, sobre a

eficiência do mesmo [7, 8]. A Figura 1 apresenta um histórico temporal dos valores médios trazidos pela literatura.

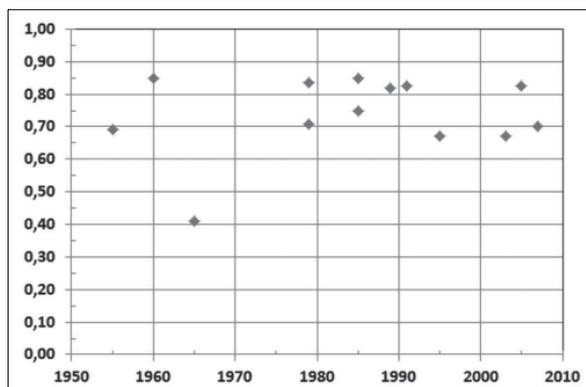


Figura 1. Valores médios de eficiência do processo TIG com o tempo. [9]

Nesse trabalho foi adotada a eficiência do processo sendo 0,67 [4], na qual é um valor coerente com a média dos valores apresentados na Figura 1. Em simulações computacionais envolvendo soldagem, o processo TIG sem material de adição se torna mais fácil de modelar, pois não é necessário avaliar a quantidade de massa entrando no sistema. Caso o contrário, além da fonte calor, seria necessário levar em consideração o fluxo de massa entrando no sistema, estabelecer o passo de tempo que o material é adicionado na poça de fusão e definir uma velocidade de adição do material, isto acarretaria em maior dificuldade matemática de equacionar o problema, mais equações de restrição e, por consequência, maior esforço computacional.

2.2. Análise térmica

Durante o processo de soldagem, o calor envolvido é dissipado a partir de três mecanismos de transferência de calor, parte é convertida em irradiação, uma pequena parcela em convecção com o gás de proteção e a maioria é convertida em condução, sendo esta última a parcela responsável pelo processo de soldagem. A condução de calor através de um sólido, no domínio do tempo t referido a um sistema cartesiano tridimensional (x,y,z) pode ser expresso pela Equação 1 [1]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_o = \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Onde T é temperatura do material em °C, ρ a densidade do material, c calor específico, q_o termo fonte ou sorvedouro de calor e λ_T é a condutibilidade térmica do material.

No caso da soldagem, pode-se considerar as fontes ou sorvedouros no interior do material como desprezíveis e/ou inexistentes, e também é válido considerar a condutibilidade térmica constante [1], logo, a Equação 1 é reduzida para a lei de Fourier.

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\kappa} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

Onde κ é a difusividade térmica do material. As perdas por convecção podem ser dadas pela equação de Newton para transferência de calor (Equação 3), enquanto as perdas por radiação podem ser definidas pela Equação 4:

$$q_{convec} = h(T_s - T_\infty) \quad (3)$$

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (4)$$

Onde h é o coeficiente de calor por convecção, T_s é a temperatura na superfície do sólido, T_∞ é a temperatura na vizinhança, ε é emissividade e σ é a constante de Stefan-Boltzman, dada por $5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

2.3. Fonte de calor gaussiana

Com o avanço das ferramentas computacionais, simulações com métodos numéricos envolvendo soldagem estão cada vez mais presentes. O método dos elementos finitos (MEF) é a técnica mais usual na análise de problemas de soldagem envolvendo questões térmicas, metalurgia e fenômenos mecânicos simultaneamente [10].

Na análise computacional do processo de soldagem, é necessário realizar a modelagem matemática da fonte de calor, para isso, alguns modelos foram criados com esse propósito. A maior dificuldade em simular o campo de temperaturas durante a soldagem é a modelagem da fonte de energia [11]. A Figura 2 apresenta diferentes fontes de calor e seus autores:

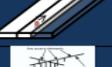
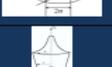
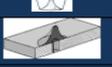
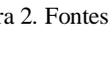
Geometria	Fonte de calor	Autores
	Pontual	Rosenthal (1941)
	Linear	Rosenthal (1941)
	Conjunto de linhas	Lambraskos, Milewski e Moore (2003)
	Planar	Akbari, Sinton e Bahrami (2009)
	Gaussiana	Eagar e Tsai (1983); Cho e Kim (2002); Deng, Murakawa e Liang (2007); Rayamyaki, Karkhin e Khomich (2007)
	Gaussiana Cônica	Balasubramanian et al.(2008); Zaeih e Schober (2008); Ziolkowski e Brauer (2009)
	Gaussiana com cilindro	Bachorki et al. (1999)
	Duplo-Elipsóide	Goldak, Chakravarti e Bibby(1984); Nguyen et al.(1999); Goldak (2005); Gery, Long e Maropoulos (2005); Zhang, Zhang e Wu (2007)
	Duplo-Elipsóide com uma fonte de calor esférica	Wahab, Painter e Davies (1998)
	Duplo-elipsóide com uma fonte de calor cilíndrica	Wu, Hu e Gao (2009)

Figura 2. Fontes de calor e seus autores. Adaptado de [11]

A fonte Gaussiana é uma das fontes mais utilizadas nesse tipo de análise, devido a sua simplicidade e boa modelagem do fenômeno térmico envolvido, sendo o único parâmetro de regulagem o sigma (σ_g), na qual aumenta ou diminui a densidade de calor [11]. Nesse estudo é usado a fonte calor gaussiana [4, 10, 12], dada pela Equação 6:

$$q(r) = \frac{\eta VI}{2\pi\sigma_g^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma_g^2}} \quad (5)$$

$$q(x,y) = \frac{\eta VI}{2\pi\sigma_g^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma_g^2}} \quad (6)$$

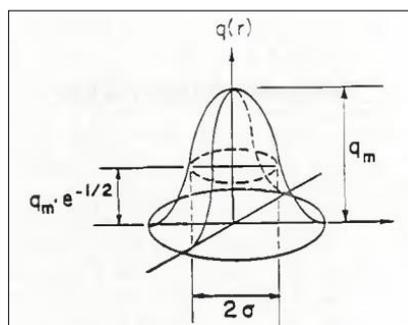


Figura 3. Fonte de calor Gaussiana. [12]

Onde $q_{((x,y))}$ é o fluxo de calor na superfície da chapa, η é a eficiência do processo de soldagem, V é

tensão elétrica, I a corrente usada e σ_g é a distância radial da distribuição de calor na superfície da peça. Para um sistema de coordenadas móveis, tem-se:

$$\xi(t) = x + vt \quad (7)$$

No qual v é velocidade de soldagem e t o tempo. Substituindo a componente fixa (x), na Equação 5, por uma componente móvel (ξ), tem-se que a fonte gaussiana, para um sistema de coordenadas em função do tempo, é dada por (8):

$$q_{(x,y)} = \frac{\eta VI}{2\pi\sigma_g^2} e^{-\frac{(\xi^2+y^2)}{2\sigma_g^2}} \quad (8)$$

2.4. Ciclo térmico

Durante a soldagem, cada ponto do material irá sofrer um aquecimento e, em seguida, um resfriamento, com isso, é possível plotar curvas de temperatura, em função do tempo, de determinados pontos do cordão de solda, estas curvas são chamadas de curvas de ciclo térmico (Figura 4).

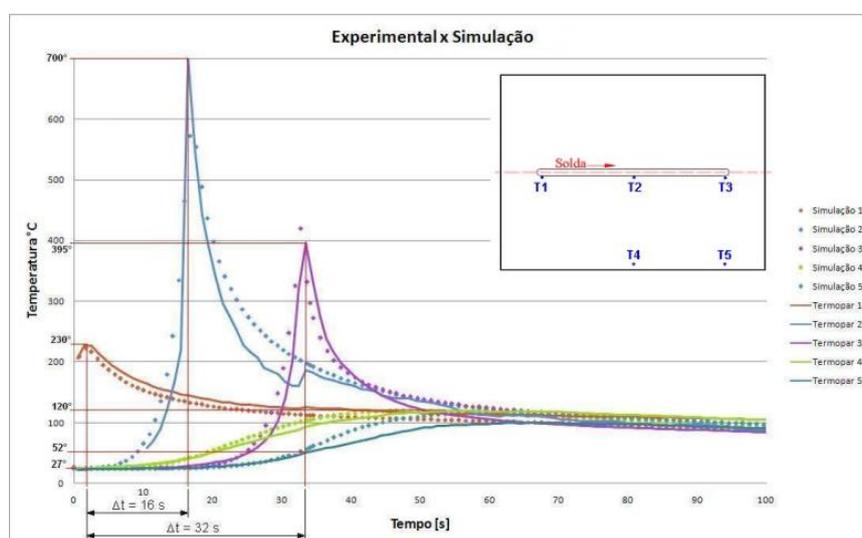


Figura 4. Curvas de ciclo térmico. [4]

Para a metalurgia, a obtenção das curvas de ciclo térmico também é importante, visto que, com as informações de temperatura máxima atingida em uma determinada região do material, intervalos de aquecimento e resfriamento do material e velocidade de resfriamento, é possível prever as transformações microestruturais no material [1, 4], nesse sentido, alguns parâmetros são importantes nesse tipo de análise, sendo a temperatura de pico o maior valor durante determinado ciclo, além disso é possível saber o tempo que a região passou sob efeito dessa temperatura, na qual pode influenciar no crescimento de grãos da zona afetada, as curvas de ciclos também proporcionam a taxa e o tempo de resfriamento do material naquela região, com isso é possível estimar a microestrutura final e as transformações de fase do material. Essa análise pode ser realizada em diferentes pontos do material, podendo obter assim um perfil de distribuição térmica ao longo do material, desse modo pode-se avaliar o perfil microestrutural ao longo da peça, ou seja, se existe de um gradiente significativo de fases na extensão do material de base.

Os defeitos de distorção em juntas soldadas são dados pelo aquecimento e resfriamento dos ciclos térmicos da peça [4], logo, é de interesse a obtenção dessas curvas para a tomada de decisões. Durante o ciclo térmico, é possível observar um aquecimento e resfriamento não uniforme, devido a isso poderá existir, no material após a soldagem, um perfil de tensões internas, nas quais são chamadas de tensões residuais, sendo funções das taxas de aquecimento e resfriamento e da distribuição do fluxo de calor no material e do perfil de ciclo térmico.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A simulação de soldagem foi realizada no software *ANSYS 2022 R1 STUDENT-Transient Thermal*®, para isso, foi modelado o corpo de prova, com dimensões estabelecidas, em um software CAD, após isso foi gerada a malha computacional, realizada a modelagem da fonte de calor e inserido as condições de contorno do problema. A Figura 5 ilustra as etapas do processo de simulação deste trabalho. E a Figura 6 ilustra as dimensões

do corpo de prova simulado.

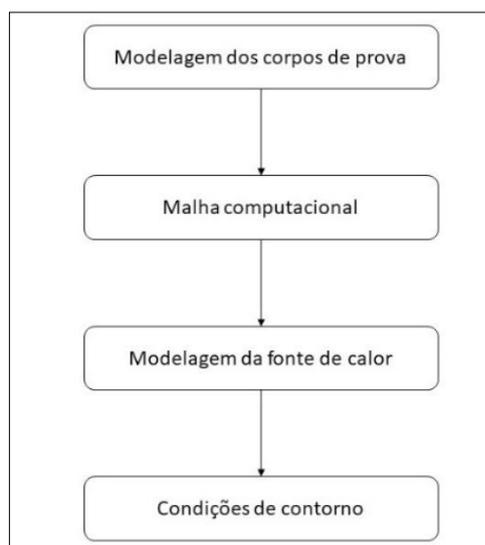


Figura 5. Fluxograma do processo. (Autoria própria)

As dimensões da chapa usada como corpo de prova foram 200 mm de comprimento, 150 mm de largura e 2 mm de espessura, juntamente com um cordão de solda de 140 mm. O corpo de prova é ilustrado na Figura 6.

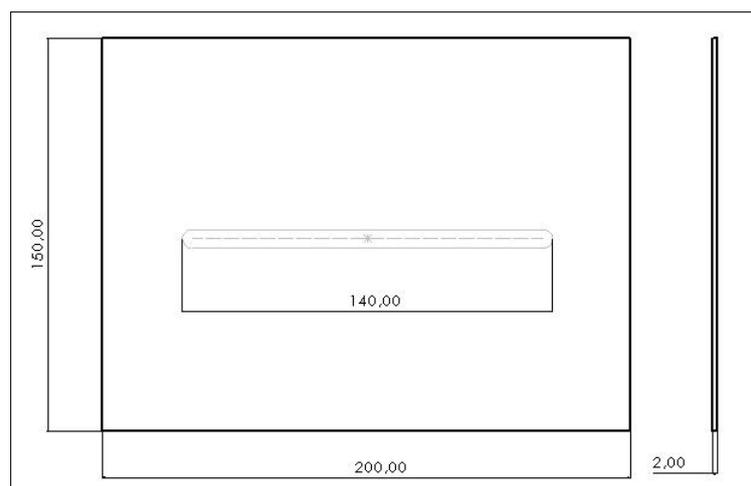


Figura 6. Ilustração do corpo de prova. (Autoria própria)

O modelo CAD foi desenhado nas dimensões do trabalho usado como referência [4], para, em seguida, ser exportado para o software de simulação por elementos finitos.

3.1. Malha computacional

A malha computacional foi gerada em duas regiões, a primeira é a criação dos elementos na chapa, e a segunda na região que engloba o cordão de solda. Com o intuito de obter resultados precisos e otimizar o esforço computacional, a malha na região do cordão é mais refinada, isto se dá devido ao maior interesse nos processos que ocorrem nessa região, pois é nela onde a fonte de calor irá interagir diretamente, logo, o aporte térmico será maior, com isso, é necessário que a discretização ocorra de forma mais precisa nessa região.

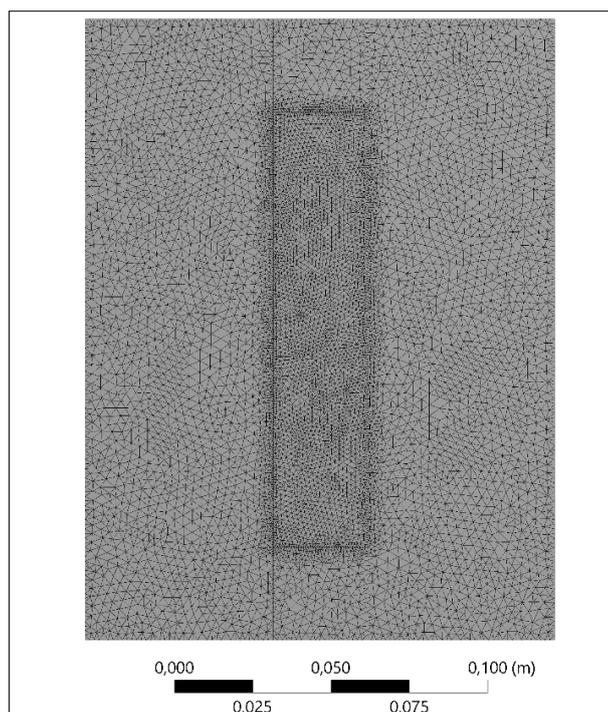


Figura 7. Malha computacional. (Autoria própria)

Foi usado elementos tetraédricos de tamanho médio de 1,5 mm, enquanto na região de refino foi utilizado elementos de tamanho médio de 0,5 mm, este formato foi escolhido por melhor se adaptar a geometria do corpo de prova (Figura 7).

3.1.1. Convergência de malha

Para definir o tamanho adequado da malha computacional, foi realizado um estudo de convergência de malha, onde o parâmetro variado foi κ_i e, a cada resultado, foi computado a temperatura T1 máxima no início de cordão de solda.

$$\kappa_i = \frac{1}{n} \quad (8)$$

Onde n é o número de nós. Com isso é possível plotar um gráfico de κ_i vs T1 e obter uma reta de tendência, onde, para κ_i tendendo a zero, ou seja, n tendendo ao infinito, T1($\kappa_i = 0$) será a temperatura convergida. Esse resultado é mostrado na Figura 8.

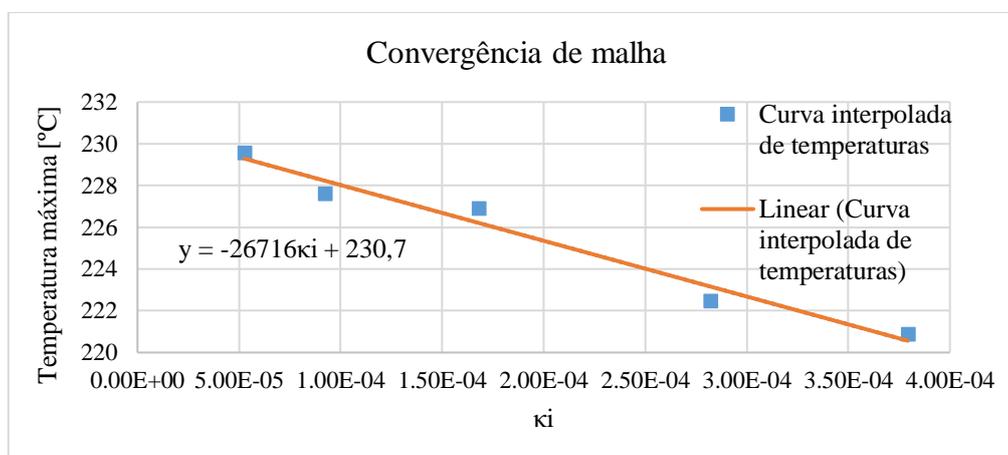


Figura 8. Gráfico de convergência da malha computacional. (Autoria própria)

É possível observar que, para $\kappa_i \rightarrow 0$, a temperatura irá convergir para, aproximadamente, 230 °C, esse resultado está coerente com o obtido na literatura, logo, é possível que afirmar que a malha computacional

escolhida é adequada.

3.2. Modelagem Computacional da Fonte de Calor e do Material

No presente trabalho a fonte de calor foi modelada a partir de uma distribuição gaussiana, para isso, é necessário conhecer o raio da distribuição de calor na peça (σ_g), este foi obtido a partir da literatura de referência, onde foi estabelecido 7 mm. Outros parâmetros também são necessários para, conforme a equação 7, o cálculo do calor na superfície, tais como; eficiência do processo, tensão do arco, corrente e velocidade de soldagem. A Tabela 1 apresenta os parâmetros exigidos.

Tabela 1. Parâmetros de soldagem. Adaptado de [4].

Eficiência do processo (η)	Tensão do arco (V)		Corrente (A)	Velocidade de soldagem (mm/min)
0,67	13		90	250

Tabela 2. Propriedades do material. (ANSYS Engineering Data)

Densidade ($\frac{kg}{m^3}$)	Condutividade térmica ($\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$)	Calor específico ($\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$)
2685,0	144,20	982,50

O material utilizado é o mesmo da literatura de referência [4], sendo o alumínio Al 5052. Para os fins dessa análise, foi utilizado as propriedades padrões do *software*, no qual considera a condutividade térmica do material constante, a Tabela 2 apresenta os valores das propriedades termofísicas do material utilizado. Além disso, é adotado a temperatura de fusão do alumínio em torno de 660 °C [13].

3.3. Condições de contorno

Para realizar a simulação, buscou-se replicar condições semelhantes ao estudo feito na literatura. A partir dos parâmetros descritos na T 1, a fonte de calor móvel possui um deslocamento linear de, no máximo, 140 mm. A fonte gaussiana foi programada a partir de uma rotina implementa em APDL, sendo inserida na janela de comandos do Thermal.

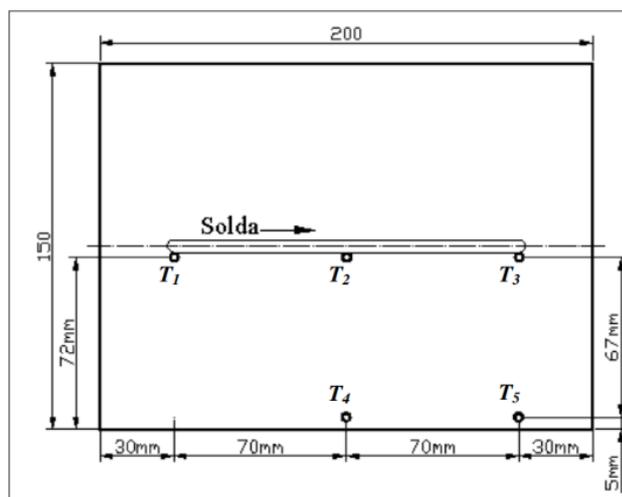


Figura 9. Posição dos pontos de interesse. [4]

As medições de temperatura foram realizadas em 5 pontos diferentes da chapa, para isso foi monitorado os nós da malha computacional durante a simulação através do comando *Named Selections*, com isso foi possível observar o estado térmico de cada ponto durante a passagem da fonte de calor. A temperatura inicial do processo de soldagem foi considerada como 25 °C (temperatura ambiente), o coeficiente de calor por convecção foi adotado como $h=15 \text{ W/h}^2 \text{ K}$ e as perdas por radiação foram consideradas, sendo a emissividade $\epsilon=0,75$ [14].

4. RESULTADOS

Com os resultados obtidos no pós-processamento, a partir da Figura 10, foi possível observar os campos de temperaturas da chapa em função do tempo e da posição da fonte de energia. Nos primeiros instantes de tempo, representados pela Figura 9-a, o campo de temperaturas inicial gerado a partir dos primeiros 6 s do fluxo de calor, enquanto nos outros é possível observar um gradiente de temperaturas totalmente desenvolvido, inclusive,

comparando as Figuras 9-b para 9-c para 9-d, pode-se observar o deslocamento da fonte de calor, ou seja, o deslocamento da fonte de soldagem.

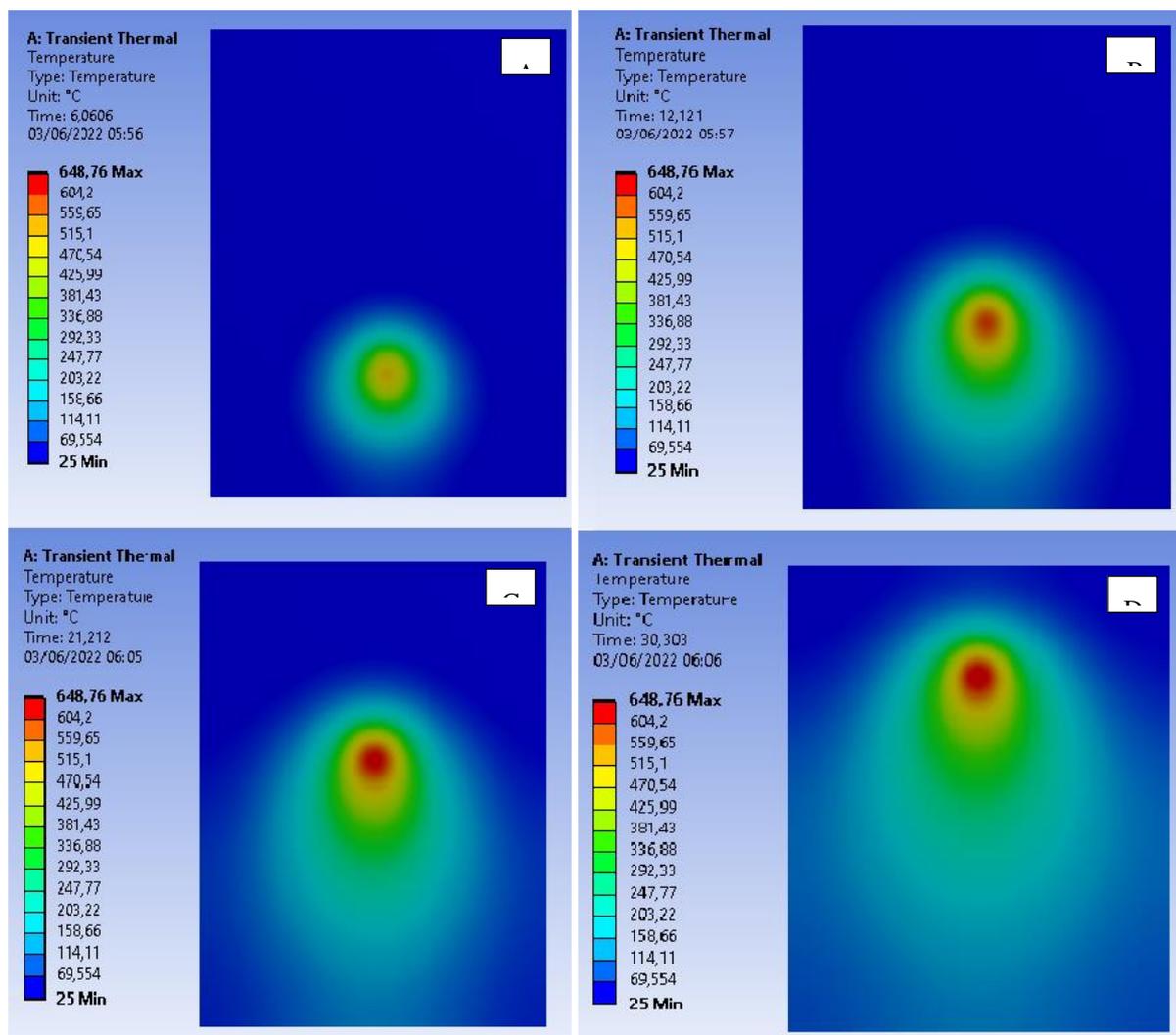


Figura 10. Campo de temperaturas. (Autoria própria)

O campo de temperaturas ilustrado nas imagens “A, B, C” e “D” da Figura 10 apresentam isotérmicas durante o deslocamento da fonte de calor na simulação do processo de soldagem, o “A” representa o início do deslocamento da fonte no processo de soldagem e “D” representa o final. Estas curvas são de natureza da fonte gaussiana. As áreas em vermelho representam a temperatura máxima, onde foi observado um pico de aproximadamente 648 °C, sendo a temperatura de fusão do alumínio em torno de 660 °C, é possível notar que a região se aproxima desta, entretanto não ocorre a fusão definitiva do material, uma possível fonte de erro, na qual pode ter acarretado nessa discrepância de valores, é a modelagem matemática das propriedades termofísicas do material, pois, uma vez consideradas constantes, não foi levada em consideração a variação destas em relação ao aumento de temperatura no sólido, ou seja, não é computado, na análise, as mudanças de fase do alumínio, logo, para temperaturas próximas da de fusão, ocorre um relaxamento dos resultados.

4.1. Curvas de Ciclo Térmico

As curvas de ciclo térmico foram obtidas para os pontos T1, T2, T3, T4 e T5 descritos na Figura 11, dessa forma é possível visualizar estado de temperatura desses pontos com relação ao tempo de soldagem.

A Figura 11 mostra as curvas obtidas com a simulação numérica do processo de soldagem TIG. É possível notar que o ponto T2 apresenta o maior ciclo térmico, com uma temperatura de pico de, aproximadamente, 620°C, se aproximando da temperatura de fusão. Além disso o ponto T3, juntamente com o ponto T2, apresentam aquecimento e resfriamento consideravelmente rápidos.

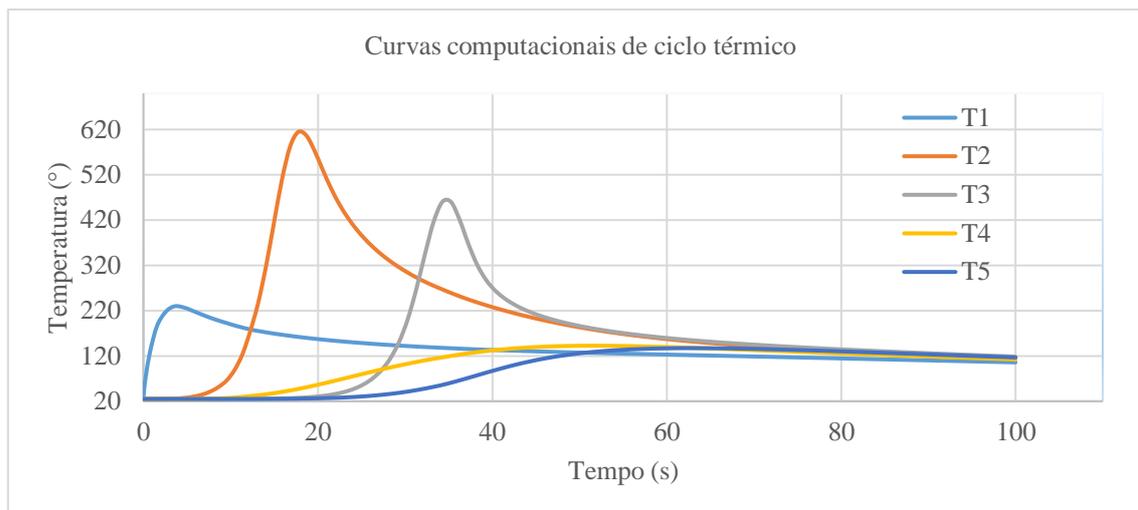


Figura 11. Curvas computacionais de ciclo térmico. (Autoria própria)

Em comparação com os resultados obtidos na literatura de referência [4], nota-se, conforme as Figuras 11 e 12, uma convergência de resultados para os pontos T1, T2 e T5, entretanto os pontos T3 e T4 obtiveram temperaturas acima dos resultados experimentais. A Tabela 3 apresenta um comparativo entre as temperaturas de pico de cada curva.

Tabela 3. Comparativo entre os valores de pico. (Autoria própria)

	Computacional (°C)	Experimental (°C)	Erro relativo (%)
T1	229,58	230	0,18
T2	614,29	700	12,24
T3	460,02	395	16,46
T4	142,54	120	18,78
T5	137,24	120	14,37

Foi possível observar que o ponto T1 obteve excelente convergência de resultados e, com base no erro relativo entre os valores computacionais e experimentais, os demais apresentaram relativa divergência dos valores de referência, sendo os pontos T3 e T4 os mais discrepantes.

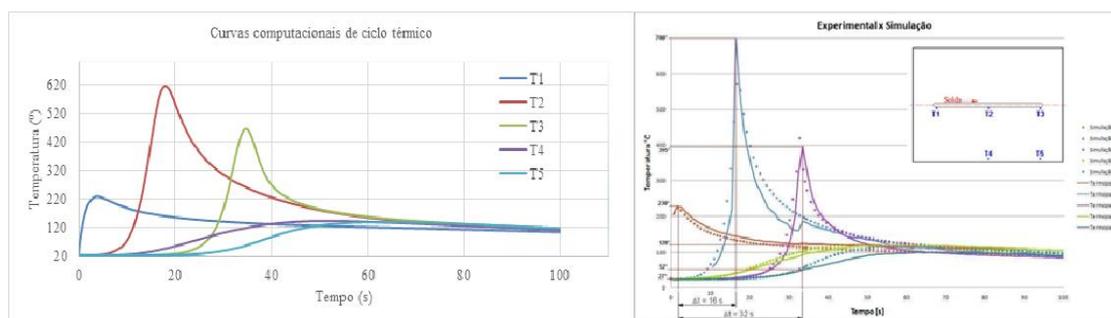


Figura 12. Comparação das curvas de ciclo térmico. Adaptado de [4].

O fato de considerar a condutividade térmica do material constante pode ser a principal fonte de erro, visto que, para consideráveis variações da temperatura, a mesma sofrerá variações no seu valor, os resultados no ponto T4 também podem ter sido afetados devido a malha computacional, pois os mesmos estão localizados na periferia da malha, em uma região menos refinada. O ponto T3 está localizado no final do escoamento, logo, os resultados nele podem conter resíduos numéricos, oriundo da modelagem matemática das propriedades termofísicas. Outra possível fonte de discrepância entre os resultados numéricos e experimentais é a sensibilidade dos sensores térmicos utilizados na medição real, pois os mesmos captam a temperatura na interface com o material de base e não o valor absoluto da região de interesse.

Apesar da divergência observada em alguns pontos, de um modo geral, pode-se afirmar que, para o que se pretende utilizar o modelo computacional aqui estudado, os resultados de convergência obtidos conseguem modelar, aproximadamente, o fenômeno real, sendo capaz de estimar as transformações microestruturais e as zonas em que provavelmente ocorreram fusão do material. A fim de refinar o modelo e obter resultados mais

precisos, este trabalho tem, como próxima etapa, o objetivo de simular o fluxo de calor, a partir de uma distribuição gaussiana, considerando as mudanças das propriedades termofísicas do material de base.

5. CONCLUSÃO

O objetivo do trabalho foi simular um processo de soldagem TIG autógeno em uma chapa de alumínio Al 5052 e, a partir dos resultados computacionais, extrair as curvas ciclo térmico para os pontos denominados para, em seguida, comparar com um trabalho científico de referência. A simulação computacional logrou êxito, onde foi possível observar a convergência de resultados em dois pontos, entretanto o restante apresenta picos de temperaturas acima dos registrados em experimento. As possíveis fontes de erro são, provavelmente, a constância das propriedades termofísicas do material com a temperatura, onde, devido ao gradiente de temperaturas, as mesmas podem sofrer variações, a escolha da fonte pode ter influência, visto que a mesma considera uma distribuição simétrica do calor na superfície, logo, essa simplificação do modelo pode ter afetado os resultados, além dos erros matemáticos inerentes ao método numérico.

Dessa forma, conclui-se que as simulações envolvendo os processos de soldagem são de bastante eficácia, podendo estimar o comportamento térmico do material durante a soldagem, e com isso tomar decisões. Nesse contexto, a ferramenta computacional ANSYS Transient Thermal® se mostrou eficaz neste tipo análise. Por fim, observou-se que o modelo numérico-computacional implementado obteve uma convergência satisfatória de resultados, podendo ser um importante dispositivo para tomada de decisões técnicas acerca do processo de soldagem e seus fenômenos térmicos.

REFERÊNCIAS

- [1] WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. Soldagem – Processos e Metalurgia. 2ª ed. Editora Edgard Blucher, São Paulo, 1992.
- [2] PEREIRA, Heitor Abdias da Silva. Implementação de padrões de tecimento na simulação de operações de soldagem pelo método dos elementos finitos. 2019. 81 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.
- [3] ÇENGEL, Yunus A. Transferência de calor e massa: Uma abordagem prática. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2009.
- [4] FRAGA, Francisco E. N. Proposta de modelo para caracterizar susceptibilidade à distorção devido à soldagem em chapas de alumínio. 2009. 158 f. Tese (Doutorado) – Curso de engenharia mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
- [5] BRACARENSE, Alexandre Queiroz. Soldagem: fundamentos e tecnologia. 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.
- [6] KOU, Sindo. Welding Metallurgy. 2 ed. John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2003.
- [7] HAELSIG, A.; MAYR, P. Energy balance study of gas-shielded arc welding processes. *Welding In The World*, [s.l.], v. 57, n. 5, p.727-734, 26 jun. 2013. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s40194-013-0073-z>>. Acesso em: junho de 2022.
- [8] PEREIRA, G.B.A. Metodologia para determinação do rendimento térmico de um processo de soldagem. 2020. 10 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2020.
- [9] STENBACKA, N. On arc efficiency in gas tungsten arc welding. *Soldag. insp.*, São Paulo, v. 18, n. 4, p. 380-390, Dec. 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242013000400010&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 03 Jun. 2022.
- [10] TEIXEIRA, Paulo R. F. et al. Study of the Gaussian distribution heat source model applied to numerical thermal simulations of tig welding processes. *Science and Engineering Journal*, v. 23, n. 1, p. 115-122, 2014.
- [11] ARAÚJO, Douglas Bezerra de. Estudo de distorções em soldagem com uso de técnicas numéricas e de otimização. 2012. 262 f. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.
- [12] EAGAR, T. W; TSAI, N. S. Temperature fields produced by traveling distributed heat sources. *Welding journal*, v. 62, n. 12, p. 346-355, 1983.
- [13] CHIAVERINI, V. Tecnologia mecânica: materiais de construção mecânica. 2 ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- [14] INCROPERA, F. P.; DEWITT, P. D.; BERGMAN, T.; LAVINE, A. Fundamentos de Transferência de Calor e De Massa. 6a ed. São Paulo: LTC. 2008. 664.