

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE DUAS FONTES DE CALOR ANALÍTICAS EM SOLDAGEM MIG/MAG DO AÇO 1020 UTILIZANDO SIMULAÇÃO NUMÉRICA BASEADA NO MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS.

Amália Celina Santos Lacerda¹, Daut de Jesus Nogueira Peixoto Couras²

Resumo: A modelagem da fonte de calor em soldagem assume um papel muito importante no cálculo do campo de temperatura, o qual é essencial para analisar o comportamento físico da solda. Dessa forma, este trabalho tem como finalidade realizar um estudo comparativo entre duas fontes de calor analíticas em soldagem, uma superficial e outra volumétrica, através de simulação numérica transiente. Para validar esse estudo, foi utilizado dados de um processo de soldagem MIG/MAG em uma chapa grossa de aço AISI 1020. A simulação numérica foi realizada no software ANSYS *Fluent* 18.2, o qual usa o método dos volumes finitos. Para alcançar o objetivo desse trabalho, foi determinado o perfil de temperatura, ciclos térmicos e as dimensões das zonas fundida e termicamente afetada. Devido à limitação do software, os resultados gerados com a fonte de calor superficial não condisseram com a realidade e, portanto, não foi possível comparar as fontes de calor analíticas. Mas, foi possível observar que os resultados obtidos com a fonte de calor volumétrica foram próximos dos dados experimentais: as dimensões da região compreendida pelas zonas fundida e termicamente afetada se aproximaram dos valores experimentais; e o ciclo térmico apresentou boa convergência.

Palavras-chaves: fontes de calor analíticas; simulação numérica; método dos volumes finitos; perfil de temperatura.

1. INTRODUÇÃO

A soldagem é o processo de união de metais mais importante na indústria. Esse método de união possui ampla área de aplicação, podendo ser usado desde a indústria microeletrônica à fabricação de estruturas pesadas como navios [1]. Portanto, em diversos casos, boa parte dos custos de fabricação de um produto está relacionada ao processo de soldagem. Assim, obter melhorias nesta área é essencial para o desenvolvimento da indústria, e para isso é necessário conhecer os fenômenos físicos inerentes a esse processo de união.

Segundo Gonçalves, citado por [2], o primeiro passo para analisar precisamente o comportamento físico da solda é a determinação do campo de temperatura transiente para algum ponto de interesse, pois com o perfil de temperatura é possível obter vários parâmetros como as dimensões das zonas de fusão e termicamente afetada, a tensão residual, a microestrutura e entre outros.

Para calcular o campo de temperatura é necessário antes modelar a distribuição de energia na peça de trabalho realizada pela fonte de calor. Essa distribuição é muito complexa [3]. Assim, são utilizadas equações matemáticas conhecidas para descrever aproximadamente a distribuição de energia real na peça. Essas equações são as fontes de calor analíticas.

Além da escolha da fonte de calor analítica, o método utilizado para calcular o perfil de temperatura é muito importante para obter bons resultados. O campo de temperatura em soldagem pode ser calculado através de métodos analíticos ou métodos numéricos. Os métodos analíticos são mais simples, porém as equações obtidas são geralmente muito simplificadas em relação ao que se observa na realidade, como as equações de Rosenthal [3], e, portanto, os resultados podem se distanciar significativamente dos valores reais. Já os métodos numéricos, apesar de considerar hipóteses simplificadoras em relação à realidade, podem determinar o perfil de temperatura muito próximo do real.

As principais limitações da modelagem numérica são a capacidade e o tempo de processamento dos computadores. Um dos fatores que influencia nessas limitações são as fontes de calor analíticas. Existem várias delas em soldagem, as quais podem descrever uma distribuição de energia pontual, linear, superficial (bidimensional - 2D) ou volumétrica (tridimensional - 3D). As mais utilizadas são as bidimensionais e as tridimensionais. As fontes de calor analíticas 2D são mais simples que as 3D e, portanto, requerem menos capacidade e tempo de processamento do computador.

Dessa forma, uma fonte de calor analítica bidimensional pode ser mais viável que uma tridimensional dependendo da exatidão dos resultados bem como da capacidade e do tempo de processamento requeridos do computador. A maioria das literaturas sugere o uso de fontes 2D para soldagem de chapas finas, já que a energia de soldagem imposta nas chapas grossas é maior que em chapas finas. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo comparar duas fontes de calor analíticas, uma bidimensional e a outra tridimensional, em soldagem de

uma chapa grossa utilizando simulação numérica, para verificar se a fonte 2D é viável nesse caso mais extremo (soldagem de uma chapa grossa).

Para alcançar esse objetivo serão determinados o perfil de temperatura, ciclos térmicos, e as dimensões das zonas de fusão e termicamente afetada da chapa através do software *ANSYS Fluent* 18.2. Esses resultados serão comparados com os dados experimentais, verificando qual fonte de calor apresenta maior exatidão bem como se a diferença entre os resultados das fontes de calor é significativa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Fontes de Calor Analíticas

A modelagem da fonte de calor assume um papel muito importante na simulação de soldagem. Ela precisa ser bem adequada para gerar resultados próximo da realidade. É difícil conhecer a real distribuição de energia da fonte de calor sobre a peça de trabalho devido a interação entre a fonte de calor e a poça de fusão, a qual é um fenômeno físico complexo [3]. Dessa forma, podem-se utilizar funções matemáticas conhecidas – fontes de calor analíticas – para aproximar a distribuição exata de energia da fonte de calor sobre a peça.

Existem várias fontes de calor analíticas em soldagem, as quais basicamente descrevem uma distribuição de energia sobre a peça pontual, linear, superficial ou volumétrica. As fontes de calor analíticas utilizadas neste trabalho são descritas a seguir.

2.1.1 Fonte de Calor Analítica Superficial - Gaussiana

Pavelic et al. citado por [3] propôs uma fonte de calor analítica que descreve uma distribuição de energia superficial sobre um disco com um formato de uma Gaussiana, conforme mostrado na Figura 1. Essa fonte de calor pode ser representada pela Equação 1:

$$q(r) = q(0)e^{-Cr^2} \quad (1)$$

onde:

- $q(r)$ = Fluxo de calor superficial no raio r (W/m^2).
- $q(0)$ = Fluxo de calor máximo (W/m^2).
- C = Coeficiente de distribuição de largura (m^{-2}).
- r = Distância radial do centro da fonte de calor (m).

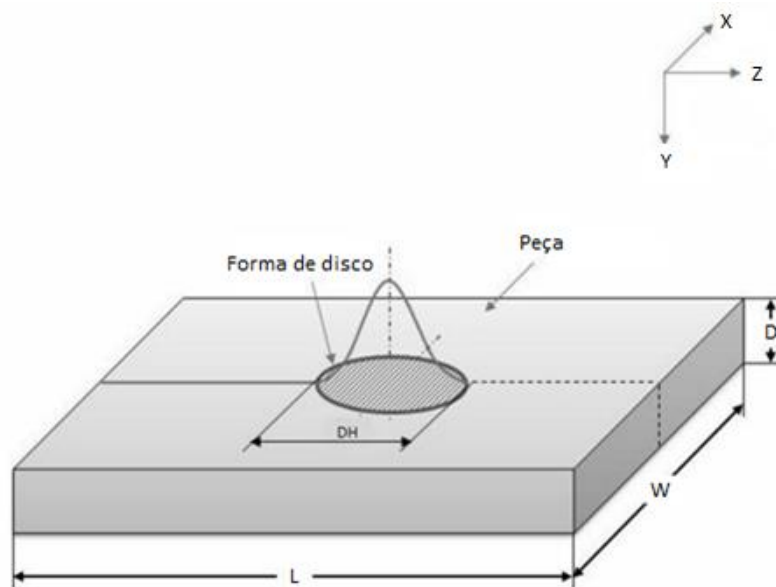


Figura 1. Geometria da fonte de calor analítica de Pavelic et al. (Adaptado de [4])

A fonte de calor analítica proposta por Pavelic et al pode ser expressa em um sistema de coordenadas que se move com a fonte de calor (x, y, ξ) através da Equação 2, sugerida por Friedman e Krutz e Segerland citados por [3]:

$$q(x, \xi) = \frac{3Q}{\pi c^2} e^{-3x^2/c^2} e^{-3\xi^2/c^2} \quad (2)$$

$$\xi = z + v(\tau - t) \quad (3)$$

onde:

- Q = Taxa de entrada de energia (W).
- c = Raio característico da distribuição do fluxo de calor (m).
- v = Velocidade de soldagem (m/s).
- t = Tempo
- τ = Fator de tempo de atraso que define a posição da fonte de calor no tempo $t = 0$.

A Equação 2 é válida para $x^2 + \xi^2 < c$. Para $x^2 + \xi^2 > c$, $q(x, \xi) = 0$

2.1.2 Fonte de Calor Analítica Volumétrica - Hemisférica

A fonte de calor analítica hemisférica descreve uma distribuição de energia volumétrica - com formato de uma Gaussiana - sobre um volume de geometria hemisférica, conforme a Figura 2. A mesma pode ser expressa pela Equação 4 [3]:

$$q(x, y, \xi) = \frac{6\sqrt{3}Q}{c^3\pi\sqrt{\pi}} e^{-3x^2/c^2} e^{-3y^2/c^2} e^{-3\xi^2/c^2} \quad (4)$$

onde $q(x, y, \xi)$ é o fluxo de calor volumétrico (W/m³).

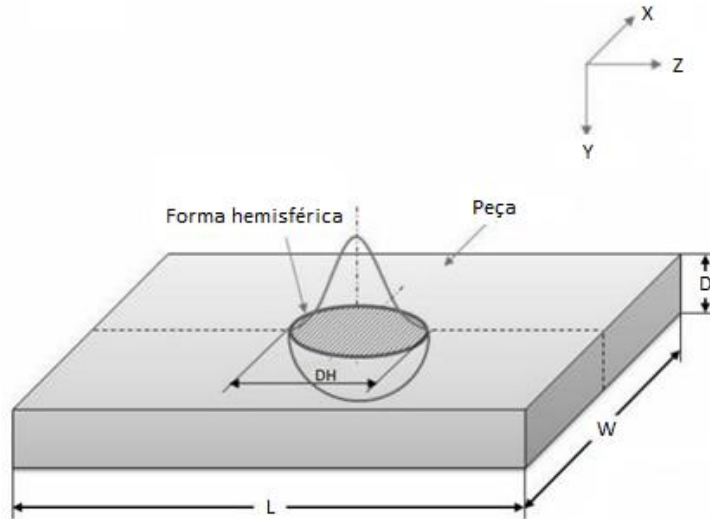


Figura 2. Distribuição de energia da fonte de calor com forma hemisférica. (Adaptado de [4])

2.2 Análise Térmica

No processo de soldagem por fusão, a fonte de calor transfere energia na forma de calor para a peça de trabalho. Parte dessa energia escoa ao longo da peça através do processo de transferência de calor conhecido como condução. Outra parte dessa energia é perdida para ao ambiente através dos processos de transferências de calor por convecção e por radiação. Essas transferências de energia são as principais contribuições para o balanço de energia em soldagem por fusão.

O campo de temperatura em soldagem pode ser determinado pelo balanço de energia, ou seja, utilizando o princípio da conservação de energia. Este pode ser representado pela Equação 5 [1]:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t}(cT) + \rho \vec{v} \cdot \nabla(cT) = \nabla \cdot (k \nabla T) + s \quad (5)$$

onde s representa a fonte de calor ou calor gerado, T é a temperatura, k é a condutividade térmica, c é o calor específico, v é a velocidade, ρ é a massa específica do material e t é o tempo.

Durante o processo de soldagem, normalmente a peça permanece parada. Dessa forma, o termo convectivo da Equação 5 (segundo termo do primeiro membro) pode ser retirado, pois a velocidade v é nula. Assim, essa equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t}(cT) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + s \quad (6)$$

Na Equação 6, a condução do calor é contabilizada através dos três primeiros termos do lado direito da igualdade, os quais representam a **lei de Fourier** [5]:

$$q''_n = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (7)$$

sendo que q''_n representa a taxa de transferência de calor por unidade de área perpendicular à direção n .

As perdas de energias por convecção e por radiação são contabilizadas através da fonte de calor s , da seguinte forma:

$$s = q - q_{conv} - q_{rad} \quad (8)$$

onde, q_{conv} e q_{rad} representam as perdas de energias por convecção e por radiação, respectivamente. E q é o calor gerado pela fonte de calor, o qual pode ser modelado com funções matemáticas conhecidas.

As transferências de calor por convecção e por radiação podem ser representadas através das Equações 9 e 10, respectivamente [5]:

$$q_{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad (9)$$

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (10)$$

onde:

- q_{conv} = fluxo de calor por convecção (W/m^2)
- h = coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2 \cdot K$)
- T_s = temperatura da superfície (K)
- T_∞ = temperatura do fluido (K)
- q_{rad} = fluxo de calor por radiação (W/m^2)
- ε = emissividade (propriedade radiante da superfície que varia entre 0 e 1)
- $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K$ (constante de Stefan-Boltzmann)
- T_{viz} = temperatura da vizinhança (K)

2.3 Solução do Balanço de Energia

A solução da Equação 6 pode ser obtida através de métodos analíticos ou de métodos numéricos. As soluções analíticas são expressões matemáticas capazes de fornecer os valores das variáveis dependentes em todos os infinitos pontos do domínio de forma contínua. Diferentemente, as soluções numéricas fornecem os valores das variáveis dependentes em apenas alguns pontos discretos de interesse do domínio.

2.3.1 Métodos Analíticos

As primeiras soluções analíticas em soldagem foram propostas por Rosenthal. Ele determinou o perfil de temperatura para chapas finas e chapas grossas, conforme as Equações 11 e 12, respectivamente [2]:

$$T = T_0 + \frac{Q}{2\pi k g} \exp\left(-\frac{Vx}{2\alpha}\right) k_0\left(\frac{Vr}{2\alpha}\right) \quad (11)$$

$$T = T_0 + \frac{Q}{2\pi k R} \exp\left(\frac{-V(R-x)}{2\alpha}\right) \quad (12)$$

onde T é a temperatura desejada, T_0 é a temperatura inicial da peça, Q é o calor da fonte ou a taxa de entrada de energia, k é a condutividade térmica, g é a espessura da chapa, V é a velocidade de soldagem, α é a difusividade térmica da peça, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ e $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ são as distâncias radiais da origem e k_0 é a função de Bessel modificada de segundo tipo e ordem zero.

Para obter as equações acima, Rosenthal realizou algumas simplificações. Para as chapas finas, ele considerou uma distribuição de calor bidimensional sobre a peça, bem como uma fonte de calor linear. Para as chapas grossas, foi considerada uma fonte de calor pontual e uma distribuição de calor tridimensional sobre a peça. Além disso, Rosenthal considerou as seguintes simplificações para ambas as equações acima:

- distribuição de temperatura quase-estacionária, ou seja, a temperatura assume um valor constante, tornando-se independente do tempo, para a um sistema de coordenadas que se desloca com a fonte de calor;
- propriedades térmicas constantes. As propriedades físicas que variam com o tempo como a condutividade térmica assumem valores médios;
- perda de calor na superfície da peça, através dos processos de convecção e de radiação, desprezível;
- inexistência de fusão, ou seja, a absorção de calor latente de fusão é negligenciada.

Devido as simplificações realizadas, as equações de Rosenthal são úteis apenas em algumas situações. Quando se deseja determinar as zonas de fusão e termicamente afetada, as equações de Rosenthal não são indicadas. Nessas equações, as propriedades térmicas são consideradas constantes e a temperatura na fonte de calor é assumida infinita. Essas simplificações aumentam consideravelmente o erro nas proximidades da fonte de calor, gerando grandes erros nas zonas de fusão e termicamente afetada, bem como nas proximidades dessas regiões [3].

2.3.2 Métodos Numéricos

Os métodos numéricos tem como objetivo solucionar uma equação diferencial parcial a partir da transformação da mesma em um conjunto de equações algébricas aproximadas. Para tanto, é necessário antes discretizar o domínio da equação diferencial, isto é, particionar o domínio em um número discreto de pontos, para os quais serão determinados os valores da variável dependente. A forma de obter as equações algébrica caracteriza o método numérico. Existem muitos métodos numéricos, os mais conhecidos são: o método dos elementos finitos, o método de diferenças finitas e o método dos volumes finitos.

2.3.2.1 Método dos Volumes Finitos

No método dos volumes finitos, o domínio da equação diferencial parcial é dividido em um número finito de pequenos volumes, conhecidos como volumes de controle ou elementares. Para obter as equações aproximadas através desse método, geralmente, integra-se a equação diferencial sobre cada um dos volumes de controle. É importante saber que os valores das variáveis a serem resolvidas são armazenadas nos nós, os quais normalmente são localizados nos centros dos volumes elementares. O conjunto dos volumes de controle e dos nós formam uma grade numérica, conhecida como malha. Em geral, o método dos volumes finitos pode ser resumido através dos seguintes passos:

- 1 - particionar o domínio em volumes de controle;
- 2 - integrar a equação diferencial parcial em cada volume de controle. Se o problema envolver derivadas parciais com relação ao tempo e ao espaço, deve-se integrar no tempo e no espaço;
- 3 - determinar as relações entre as variáveis através de aproximações como interpolação numérica, para conseguir determinar aproximadamente as derivadas parciais;
- 4 - organizar e resolver o sistema de equações lineares obtido, formado pelas equações aproximadas.

Para solucionar a Equação 6 através do método dos volumes finitos, é preciso inicialmente dividir o domínio da mesma em volumes de controle. Sabe-se que quanto maior a quantidade de volumes elementares, maior é a acurácia dos resultados, pois a medida que o número de volumes de controle aumenta, os nós tornam-se mais próximos e as aproximações (como a interpolação numérica) tornam-se mais exatas.

Ao integrar a Equação 6 no tempo e no espaço sobre cada volume de controle, algumas derivadas parciais desaparecem e outras, no entanto, permanecem e/ou aparecem. Para determinar essas derivadas é preciso escolher uma relação entre as variáveis. Vale salientar que apesar das escolhas das funções de aproximação das derivadas serem arbitrárias é preciso optar por uma aproximação realista, isto é, que condiz com o problema físico. Patankar [6] mostra algumas regras que auxiliam na determinação das funções de aproximação das derivadas que condizem com a realidade.

Após determinar todas as derivadas parciais, obtém-se as equações aproximadas. A solução do sistema linear formado por essas equações fornece o valor da variável dependente, a temperatura, em cada nó.

2.4 Determinação do Tipo de Chapa

A determinação do tipo de chapa é muito importante para escolher a equação de Rosenthal adequada. Ela não depende apenas da espessura da chapa mas também dos parametros de soldagem. A American Welding Society (AWS) [7] apresenta uma expressão matemática (Equação 13), conhecida como **espessura relativa** (τ), utilizada para determinar se a chapa é grossa ou fina:

$$\tau = h \sqrt{\frac{\rho c (T - T_0)}{H_L}} \quad (13)$$

onde h é a espessura da chapa, ρ é a densidade da peça, c é o calor específico peça, T_0 é a temperatura inicial da placa, T é a temperatura da placa em que se deseja calcular a velocidade de resfriamento e H_L é a energia líquida imposta na chapa por unidade de comprimento. Para soldagem a arco em que a corrente (I) e a tensão (V) são aproximadamente constantes, a energia líquida imposta na chapa pode ser

$$H_L = \eta(VI/v) \quad (14)$$

sendo v a velocidade de soldagem e η o rendimento térmico.

Quando τ é maior que 0,9, a chapa pode ser considerada grossa. Já quando τ é menor que 0,6, tem-se uma chapa fina. Para valores de τ entre 0,6 e 0,9 não é possível determinar o tipo de chapa. Porém, se for adotado a divisão arbitrária entre os tipos de chapas em $\tau = 0.75$, os erros não excederão a 15% no cálculo da velocidade de resfriamento [7].

3. METODOLOGIA

A simulação numérica foi realizada através do *solver Fluent 18.2* do software ANSYS. Para realizar a simulação, foi necessário antes definir a geometria da chapa, a malha e alguns parâmetros relacionados ao material da placa e ao processo de soldagem. Após finalizar a simulação, foram obtidos os resultados utilizando o pós-processador *CFD-Post 18.2* do ANSYS.

3.1 Definição da Geometria

As características geométricas da chapa utilizada nesse trabalho estão de acordo com o experimento realizado por [8]. A chapa tem 55mm de largura, 140mm de comprimento e 12,5mm de espessura. Além disso, sobre sua superfície há um cordão de solda depositado, conforme a Figura 3. A geometria da chapa foi obtida através do software ANSYS *SpaceClaim 18.2*.

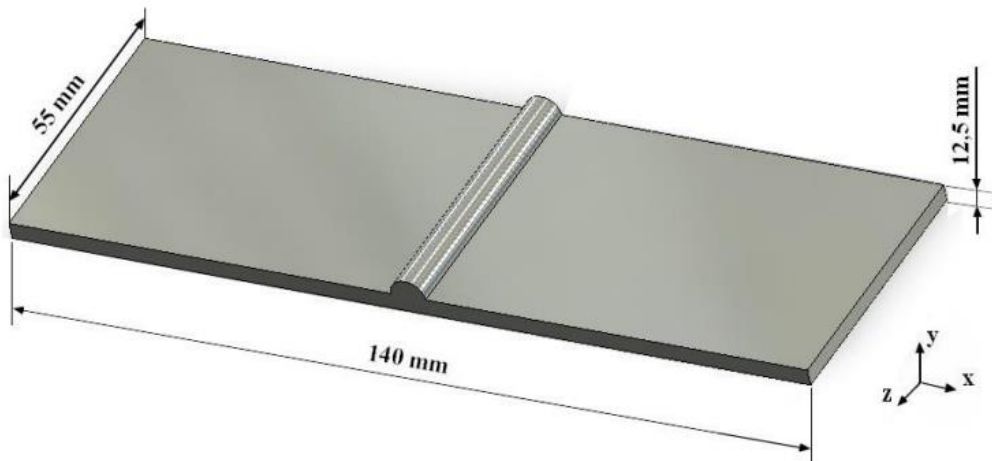


Figura 3. Geometria da chapa em estudo. [8]

3.2 Geração da Malha

A malha utilizada foi gerada no software ANSYS *Meshing 18.2*. Devido a simplicidade da geometria da placa, foi possível obter uma malha com elementos hexaédricos através do método *Multizone*. A utilização de elementos hexaédricos é vantajosa porque os mesmos ficam alinhados na direção do escoamento, reduzindo os erros numéricos. Além disso, a utilização desse tipo de elemento reduz o número de elementos na malha em relação ao uso de elementos tetraédricos.

Devido à importância dos fenômenos que ocorrem nas zonas fundida e termicamente afetada durante a soldagem, foi realizado um maior refino nessas regiões e proximidades. O nível desse refino foi determinado a partir de um teste de malha, no qual foi verificada e escolhida a malha com menor refino que possibilitou obter a convergência da solução do problema. Nesse teste, foi observado a convergência do ciclo térmico em um ponto

localizado no centro da superfície da poça de fusão. Os elementos da malha na região do refino ficaram com dimensões da ordem de 0,4 mm.

Para aplicar o refino na malha, a chapa foi dividida inicialmente em três volumes. Posteriormente, a mesma foi particionada novamente para melhorar a qualidade da malha, totalizando em seis partes diferentes. As partições foram realizadas através do software *ANSYS SpaceClaim 18.2*. Nele foi definido também uma topologia compartilhada, permitindo que as partições fossem tratadas como um único componente durante a geração da malha. Dessa forma, apesar das divisões da chapa, foi gerada uma única malha e, portanto, os volumes compartilham os mesmos nós nas interfaces. Na Figura 4 é possível observar a malha definida.

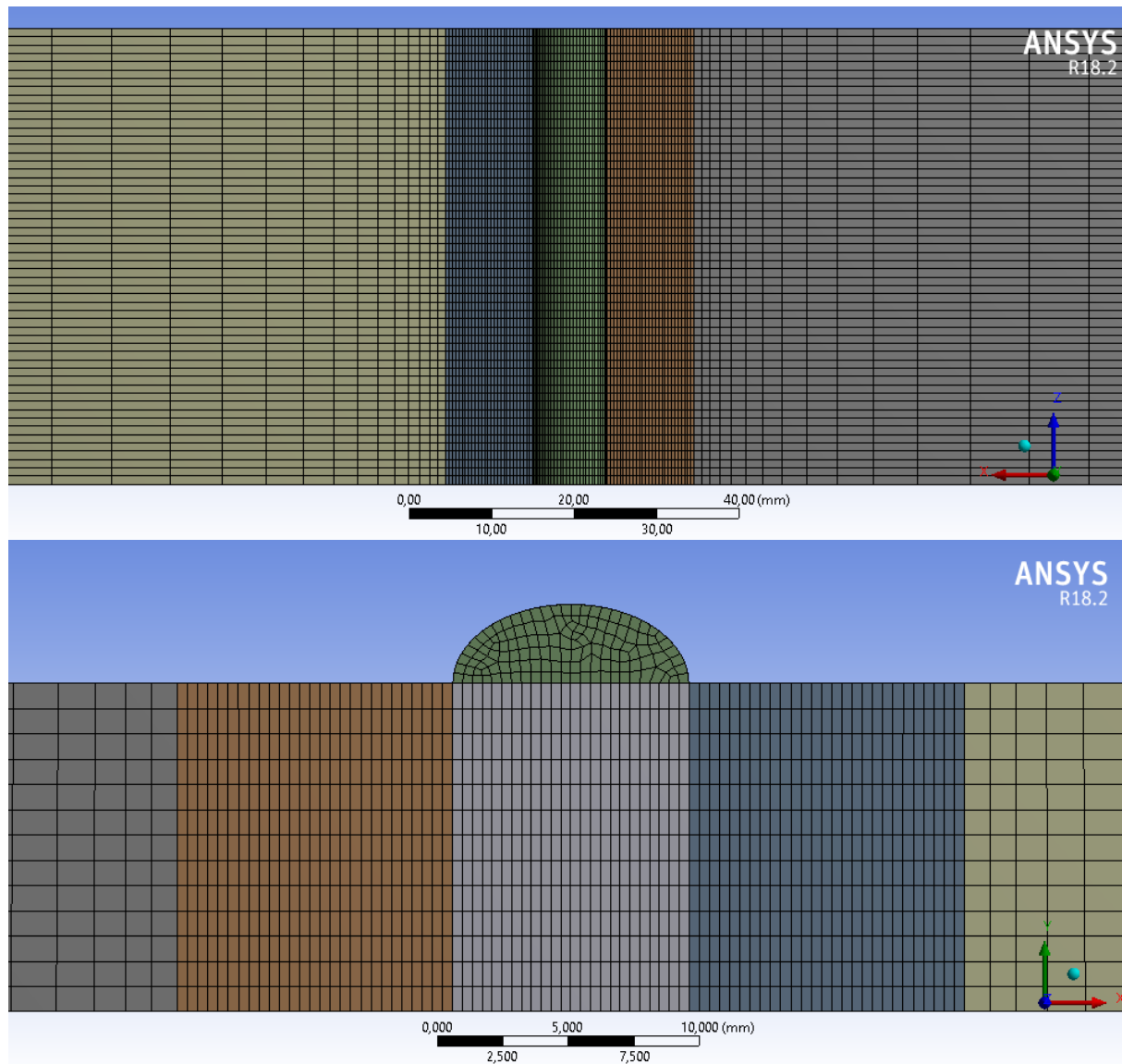


Figura 4. Vistas superior e frontal da malha. (Autoria própria)

O software *ANSYS Meshing* disponibiliza várias métricas para avaliar a qualidade da malha, como *aspect ratio*, *skewness* e *orthogonal quality*. O parâmetro *aspect ratio* relaciona os lados de uma face e seu melhor valor é igual a 1. Em relação as faces quadrilaterais, a face quadrada apresenta *aspect ratio* igual a 1. O critério *skewness* indica o quão próximo uma célula ou face está do ideal (equilateral ou equiangular). Ele varia de 0 a 1, sendo que o zero representa o ideal. A métrica *orthogonal quality* também varia entre 0 e 1, porém o 1 representa o melhor valor. Para células hexaédricas, esse parâmetro determina o quão próximo os ângulos entre faces ou arestas adjacentes de um elemento estão de um ângulo ideal, isto é, 60° para elementos de face triangular e 90° para elementos de face quadrilateral.

A Tabela 1 mostra os valores das métricas citadas bem como alguns dados estatísticos da malha. A partir desses parâmetros é possível verificar que a malha apresenta boa qualidade, pois os valores médios dos critérios *skewness* e *orthogonal quality* são muito bons e o número médio do *aspect ratio* é razoável.

Tabela 1. Dados relativos a malha. (Autoria própria)

Dados estatísticos				
Nós		Elementos		
101864		92675		
Qualidade da malha				
Métrica	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Aspect Ratio	3,1331	1,2435	1,0364	7,7554
Skewness	0,017744	0,060842	4,3658e-07	0,53589
Orthogonal Quality	0.99705	0,015087	0,81413	1

3.3 Ajuste das Fontes de Calor Analíticas

As fontes de calor analíticas foram inseridas na simulação numérica através de duas UDFs (*user-defined functions*) referentes a Equação 2 e a Equação 4. Nessas equações foi determinado o raio característico da distribuição do fluxo de calor “*c*” de acordo com o resultado da macrografia realizada por [8]. Esse parâmetro foi considerado igual ao valor de “*a*” mostrado na Figura 5. E quanto a taxa de entrada de energia “*Q*”, para soldagem a arco elétrico (cuja corrente (*I*) e a tensão (*V*) são aproximadamente constantes) ela é determinada através da Equação 15:

$$Q = \eta VI \quad (15)$$

onde η é o rendimento térmico.

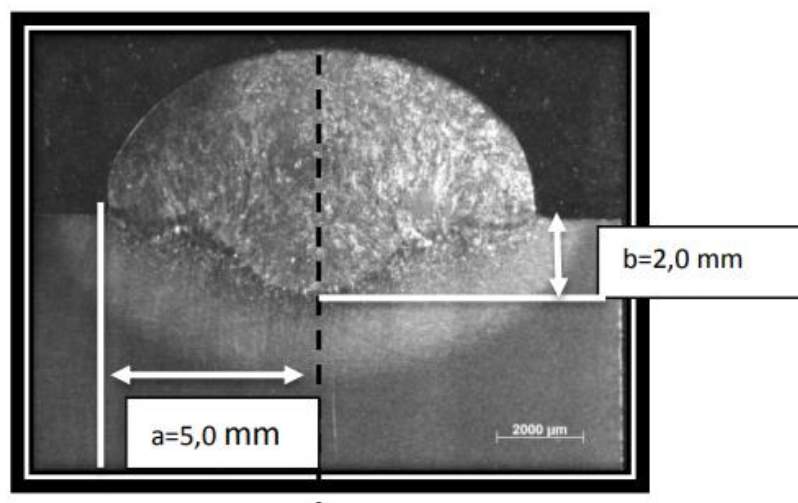


Figura 5. Macrografia. [8]

3.6 Parâmetros de Soldagem

Os parâmetros de soldagem utilizados foram baseados no trabalho realizado por [8]. Esses dados são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de soldagem. [8]

Rendimento térmico	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade (mm/s)
0,85	21	144	2

3.5 Propriedades do material

O material da chapa é o aço AISI 1020. A Tabela 3 apresenta a variação da sua condutividade térmica (*K*) e do seu calor específico (*c*) em função da temperatura (*T*). A densidade desse material foi considerada constante e igual a 7872 Kg/m^3 (valor estimado para temperatura próxima da temperatura ambiente).

Tabela 3. Propriedades térmicas do aço baixo carbono em função da temperatura. [8]

$T(^{\circ}\text{C})$	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
$K[W/(m^{\circ}\text{C})]$	52	50	43	37	26	28	30	33	120	120	120
$c[J/(Kg^{\circ}\text{C})]$	500	550	600	800	950	950	950	950	950	950	950

Através da Tabela 4, foi realizada uma regressão polinomial para os valores que variam. Como no *solver Fluent* só permite um polinômio com até 8 coeficientes, foi obtido um polinômio do 7º grau para os valores da condutividade térmica entre 0°C e 1600 °C. Já para o calor específico, foi obtido um polinômio do 4º grau (máximo grau possível com 5 pontos) para os valores entre 0°C e 800°C.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da simulação numérica foram obtidos através do pós-processador *CFD-Post* 18.2 do software ANSYS. Utilizando o mesmo foi possível plotar o gráfico de um ciclo térmico, obter as zonas fundida e termicamente afetada bem como observar a evolução da fonte de calor durante a soldagem.

4.1 Evolução das Fontes de Calor Analíticas

A evolução da fonte de calor analítica volumétrica é apresentada na Figura 6. Nela é possível observar o formato circular das isotermas característico da fonte de calor analítica volumétrica hemisférica. As regiões amarelas e verdes representam a zona fundida, pois estão com uma temperatura superior a 1500 °C - temperatura de fusão do material [8].

A Figura 7 mostra a evolução da fonte de calor analítica superficial. O formato circular das isotermas verificado através da mesma condiz com a fonte de calor analítica de Pavelic, Friedman e Krutz. É possível observar também que a temperatura não ultrapassa 37 °C, valor muito inferior a temperatura de fusão do material. Esse erro deve-se a uma limitação do *solver Fluent* 18.2 do ANSYS, o qual não possui a opção de unidade para fonte de calor superficial. Dessa forma, o mesmo considera a fonte de calor superficial como sendo uma volumétrica.

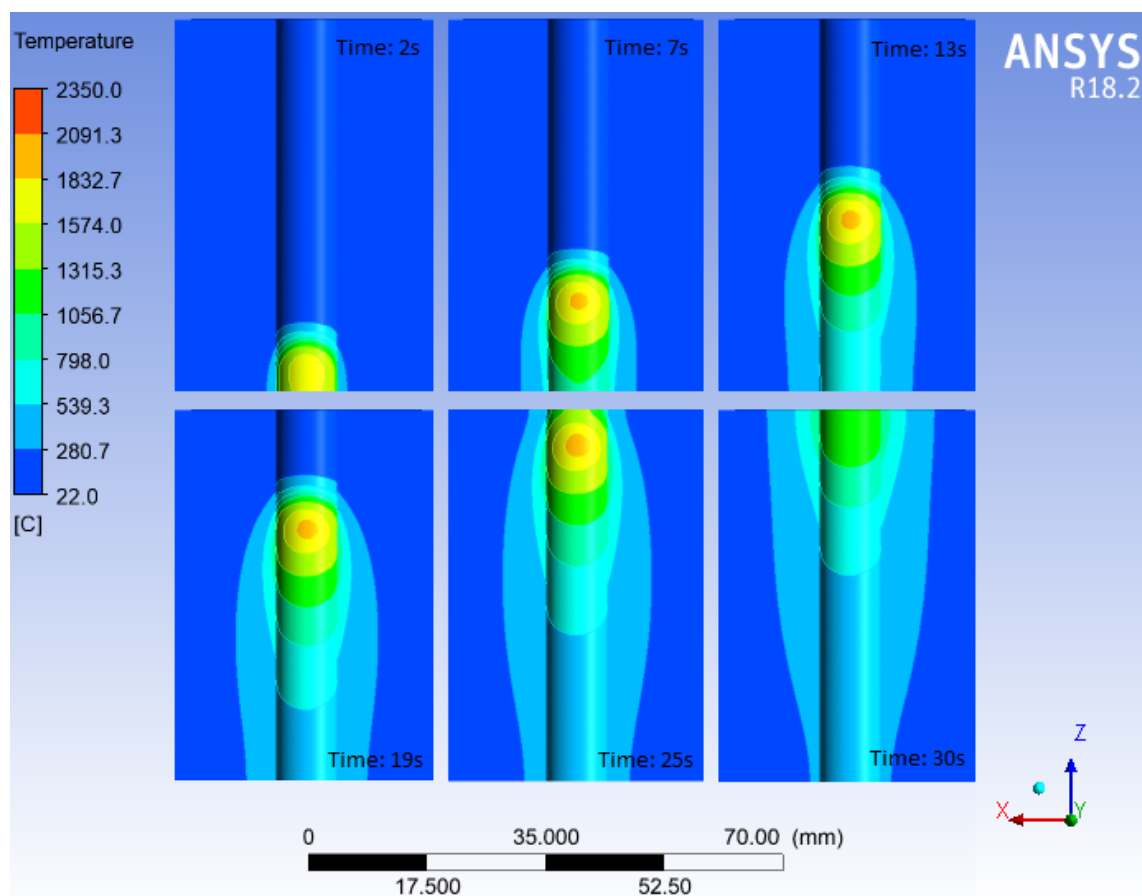


Figura 6. Evolução da fonte de calor analítica volumétrica. (Autoria própria)

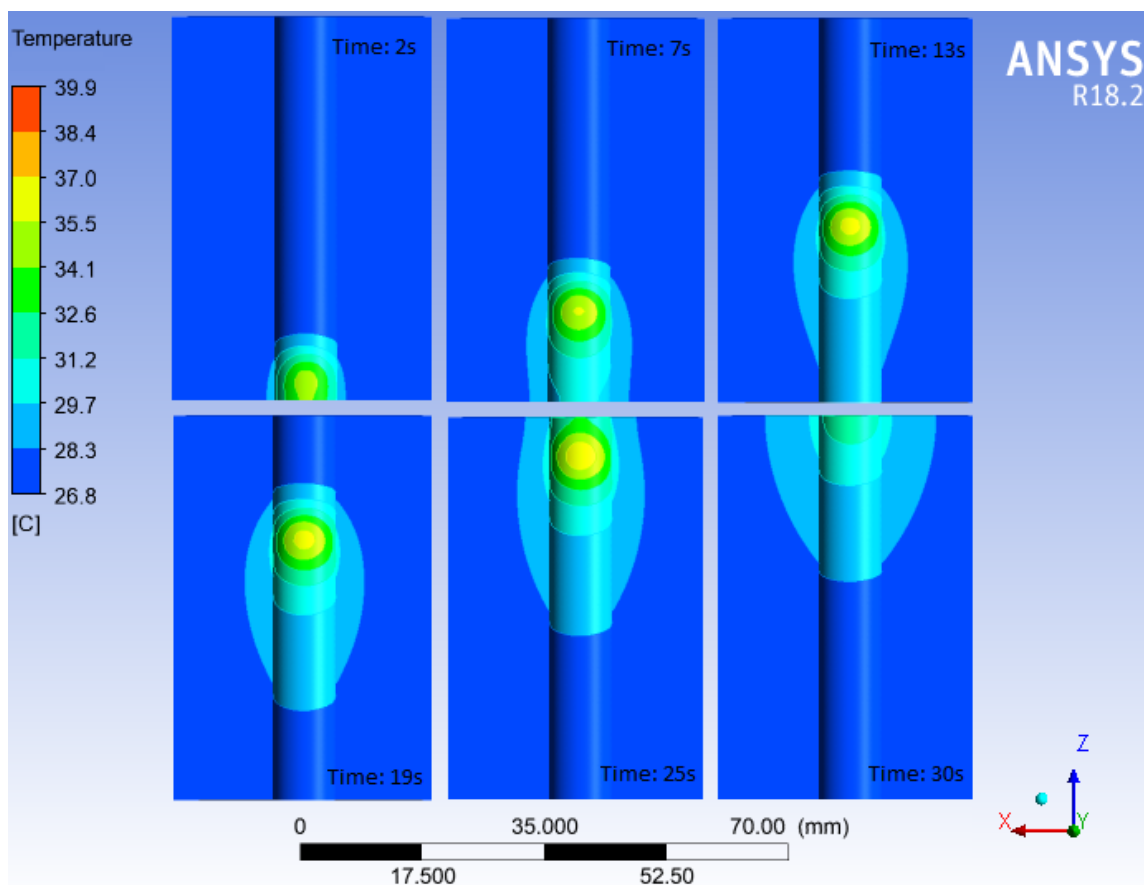


Figura 7. Evolução da fonte de calor analítica superficial. (Autoria própria)

4.2 Ciclo Térmico

O ciclo térmico foi obtido para o ponto T3 localizado sobre a chapa a uma distância de 6 mm tanto da borda quanto do centro da placa, conforme a Figura 8. No Gráfico 1 é possível observar a variação da temperatura desse ponto com relação ao tempo. As curvas vermelha e azul foram geradas pela simulação numérica, utilizando as fontes de calor analíticas volumétrica hemisférica e superficial de Pavelic, Friedman e Krutz, respectivamente. A curva verde foi obtida através do experimento realizado por [8].

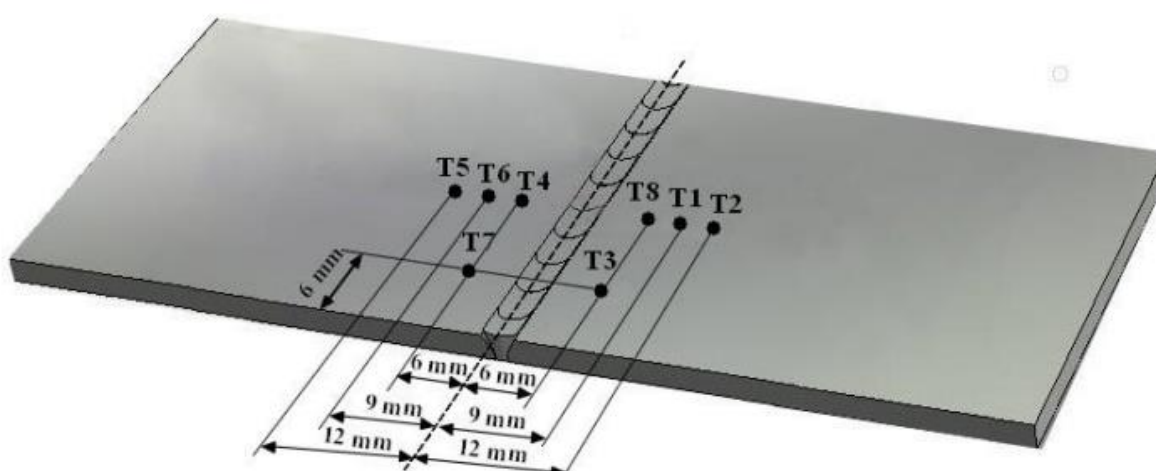


Figura 8. Localização dos termopares. [8]

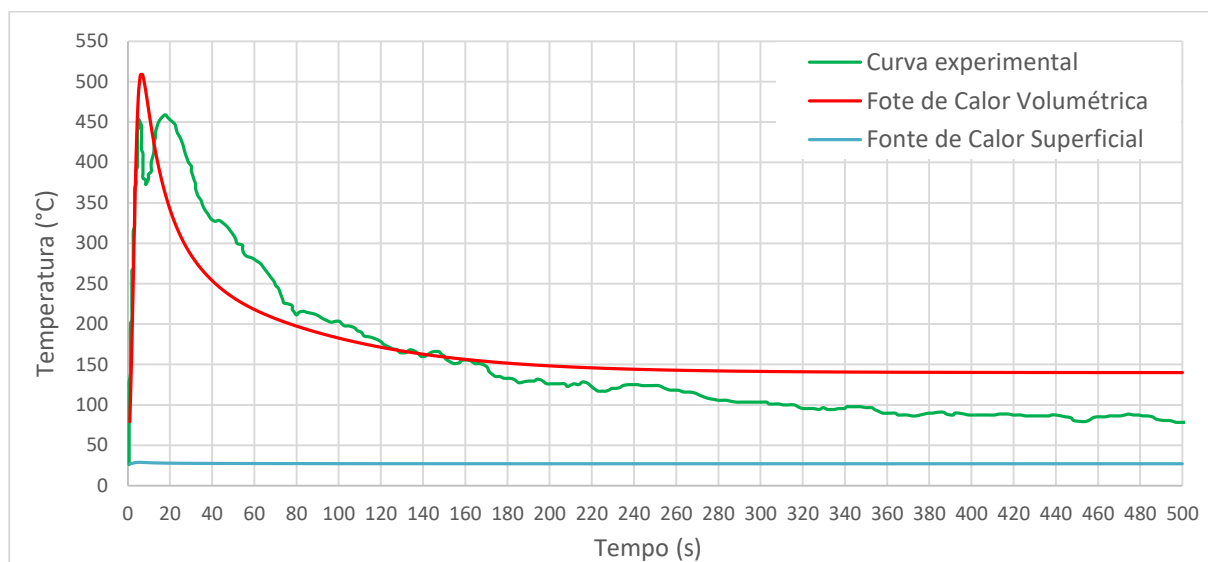


Gráfico 1. Ciclos térmicos obtidos experimentalmente e através de simulação numérica. (Autoria própria)

Através do Gráfico 1, é possível observar que a temperatura máxima do experimento é aproximadamente 460°C, já a temperatura de pico da curva vermelha é aproximadamente 509 °C. Dessa forma, o erro associado a esses valores é 49°C ou 10,65%. Parte desse erro deve-se as perdas de calor para o ambiente que foram negligenciadas na simulação. Outra parte pode estar associada a densidade do material por ter sido considerada constante.

A curva obtida com a fonte de calor superficial parece ser uma reta horizontal no Gráfico 1. Porém seu formato é semelhante as demais curvas vermelha e verde. Dessa forma, foi plotado o Gráfico 2 com apenas a curva azul para mostrar seu real comportamento.

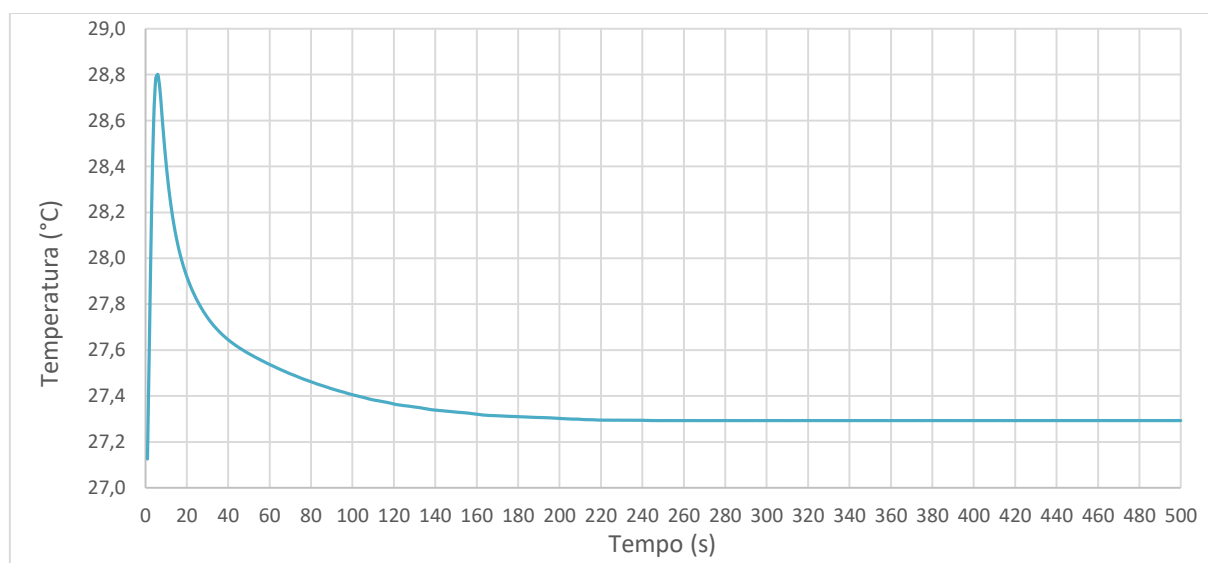


Gráfico 2. Ciclo térmico referente a fonte de calor superficial. (Autoria própria)

4.3 Determinação das Zonas Fundida e Termicamente Afetada

Para obter a zona fundida (ZF) e a zona termicamente afetada (ZTA), foi analisado um plano transversal paralelo a direção z, localizado no centro da chapa, no instante em que a fonte de calor passou. A ZTA é a área compreendida entre os valores 800°C (temperatura de austenitização do material) e 1500 °C (temperatura de fusão) [8]. Já a ZF é identificada como a área com temperatura igual ou superior a 1500 °C. Dessa forma, não é possível obter essas regiões através da simulação que utilizou a fonte de calor analítica superficial, pois sua maior temperatura alcançada é inferior a 37°C.

Na Figura 9 é exposto as dimensões da ZF junto com a ZTA geradas pela simulação que usou a fonte de calor analítica volumétrica. Os valores dessa região obtidos através do método numérico e do experimento realizado por [8] bem como os erros associados a esses dados foram apresentados na Tabela 4. Vale salientar que esses dados experimentais estão presentes na Figura 5.

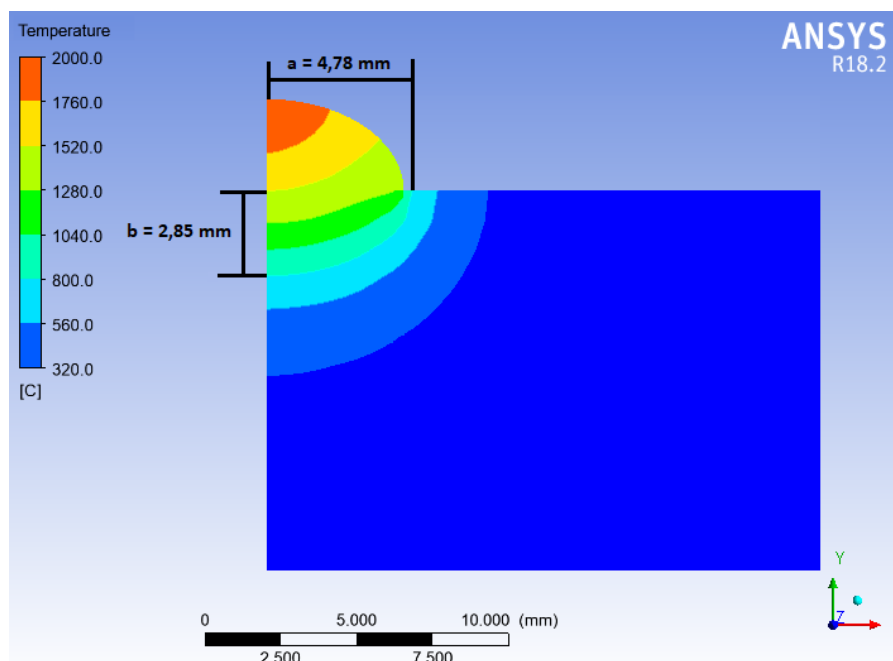


Figura 9. Dimensões da ZF mais ZTA. (Autoria própria)

Tabela 4. Dados experimentais e numéricos referentes à ZF mais ZTA.

Dimensões da ZF + ZTA	Dado Experimental	Dado da Simulação	Erro
a	5 mm	4,78 mm	4,4 %
b	2 mm	2,85 mm	42,5 %

5. CONCLUSÕES

Para comparar as fontes de calor analíticas volumétrica e superficial, foi determinada a variação de temperatura ao longo do tempo em um ponto específico, bem como foi verificada as dimensões das zonas de fusão e termicamente afetada.

Devido ao erro gerado pela limitação do *solver Fluent* 18.2 do ANSYS, relacionada a falta de opção de unidade para fonte de calor superficial, não foi possível comparar as fontes de calor analíticas.

Quanto aos resultados obtidos com a simulação numérica que utilizou a fonte de calor volumétrica, é possível verificar que os mesmos estão próximos dos valores experimentais. O ciclo térmico apresentou boa convergência e as dimensões da região compreendida pelas zonas fundida e termicamente afetada também se aproximaram dos dados experimentais, indicando que a fonte volumétrica hemisférica modela bem a distribuição de calor sobre a chapa.

Em relação aos erros associados a esses resultados, parte deles são devido a simplificações adotadas na simulação. Para diminuir esses erros é indicado considerar as transferências de calor por condução e radiação. Uma maior exatidão pode ser alcançada também utilizando uma densidade em função da temperatura.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem fundamentos e tecnologia. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.
- [2] ARAÚJO, D. B. Estudo de distorções em soldagem com uso de técnica numérica e de otimização. 2012. 212f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia.
- [3] GOLDAK, J. A.; AKHLAGHI, M. Computational welding mechanics. New York: Springer, 2005. 321 p.
- [4] PARRE, M. D. Heat and fluid flow modeling in twin-wire welding. 2011. 54p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) - Indian Institute of Technology Hyderabad, Telangana, 2011.
- [5] INCROPERA, F. P. et al. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. Tradução: Eduardo Mach Queiroz e Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 643 p.
- [6] PATANKAR, S. V. Numerical heat transfer and fluid flow. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. 197 p.
- [7] AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding handbook. vol. 1, 9. ed. Miami, 2001.
- [8] SOUZA, C. F. M. Análise numérica e experimental de tensões residuais em juntas soldadas de aço de baixo carbono. 2016. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

As 16:00 horas do dia **12 de setembro de 2018**, no Centro de Engenharias – Oeste – Sala 30, reuniu-se a banca examinadora de defesa do Projeto de Conclusão de Curso de autoria de **Amália Celina Santos Lacerda**, aluna do curso de Bacharelado de Ciência e Tecnologia desta instituição, com o título **“Estudo comparativo entre duas fontes de calor analíticas em soldagem MIG/MAG do aço 1020 utilizando simulação numérica baseada no método dos volumes finitos”**. A Banca Examinadora foi constituída pelos professores Daut de Jesus Nogueira Peixoto Couras, presidente da banca e Orientador; Luís Morão Cabral Ferro (membro) e Jakson Gomes de Oliveira Junior (membro). Foram registradas as seguintes ocorrências: Foi apresentado o trabalho pelo discente, houve arguição por parte dos membros da Banca Examinadora. As sugestões de alterações textuais foram entregues ao aluno que se comprometeu em fazê-las na sua totalidade. Concluída a defesa, procedeu-se o julgamento pelos membros da Banca Examinadora, tendo a aluna obtido as seguintes notas: 10,0;10,0;10,0. Apuradas as notas verificou-se que **a aluna foi Aprovada com média geral 10,0; cumprindo as exigências para a aprovação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso**. E, para constar, eu, Daut de Jesus Nogueira Peixoto Couras, presidente da Banca Examinadora e Orientador do Trabalho de Conclusão de Curso da aluna Amália Celina Santos Lacerda, lavrei a presente ata que, após lida e considerada conforme, segue assinada pelos professores membros da banca examinadora.

Mossoró 12 de Setembro de 2018



Prof. MSc. Daut de Jesus N. P. Couras
Presidente e Orientador



Prof. Dr. Luís Morão Cabral Ferro
Membro



Prof. Jakson Gomes de Oliveira Junior
Membro