

Simulação computacional de uma soldagem por pontos e análise do gradiente térmico

Jeremy Michael Venâncio da Silva¹ , Francisco Edson Nogueira Fraga¹ 

¹ Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Mossoró, RN, Brasil.

Como citar: Silva JMV, Fraga FEN. Simulação computacional de uma soldagem por pontos e análise do gradiente térmico. Rev. Soldag. Insp. 2025;30:e3006. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI30.06>

Resumo: Este trabalho tem como objetivo simular o processo de soldagem por pontos através do método dos elementos finitos, obter dimensões do ponto de solda e analisar a zona afetada pelo calor (ZAC), observando as diferentes regiões da ZAC e comparando com a literatura. O material das chapas é aço de baixo teor de carbono com espessura de 2 mm, a corrente utilizada é de 15 kA durante um período de 20 ciclos. A geometria e as configurações para a implementação do processo foram selecionadas com base na literatura específica e nas normas vigentes. Para a análise computacional foi utilizado o software ANSYS® Workbench 23.2, na versão estudantil, juntamente com a extensão Moving Heat Flux, na qual o modelo matemático foi solucionado pela ferramenta Transient Thermal e sendo consideradas perdas térmicas por condução, convecção e radiação. Ao final do trabalho, os resultados da simulação convergiram para os resultados previstos em literatura, na qual o ponto de solda apresentou aspectos semelhantes aos dispostos em literatura, com um diâmetro de 6,8 mm e conseguiu-se verificar as regiões da ZAC, através das cores referentes a cada faixa de temperatura que ocorre transformações microestruturais.

Palavras-chave: Soldagem por pontos; Simulação computacional; Gradiente térmico.

Computer simulation of spot welding and thermal gradient analysis

Abstract: This work aims to simulate the spot welding process using the finite element method, obtain dimensions of the welding point and analyze the heat affected zone (HAZ), observing the different regions of the HAZ and comparing with the literature. The material of the plates is low carbon steel with a thickness of 2 mm, the current used is 15 kA over a period of 20 cycles. The geometry and parameters for carrying out welding are specified by literature and standards. For the computational analysis, the ANSYS® Workbench 23.2 software, in the student version, was used, together with the Moving Heat Flux extension, in which the mathematical model was solved by the Transient Thermal tool and thermal losses due to conduction, convection and radiation were considered. At the end of the work, the simulation results converged with the results predicted in the literature.

Key-words: Spot welding; Computer simulation; Thermal gradient.

1. Introdução

A soldagem por pontos é um dos tipos de soldagem por resistência, na qual utiliza o efeito Joule como princípio de funcionamento, sendo a resistência à passagem da corrente o fator responsável pela geração de calor. Esse tipo de soldagem permite uma grande produtividade, uma automatização do processo produtivo, não necessita de material de adição, apresenta uma ótima qualidade e é bastante utilizada na indústria automotiva. Os principais parâmetros de influência na soldagem são: corrente, pressão dos eletrodos e tempo, sendo a corrente o parâmetro de maior influência. A principal dificuldade é obter os parâmetros ideais que resultem em propriedades mecânicas desejáveis, além de haver uma alta demanda na rede elétrica, já que o processo consome muita energia, tendo correntes na casa de quilo ampères. Nesse sentido, as simulações computacionais apresentam uma grande importância, já que é possível realizar simulações de soldagem e obter valores muito próximos dos aceitáveis e, com isso, reduzir o número de experimentos necessários e conseguir otimizar os parâmetros de soldagem.

O objetivo do trabalho foi realizar uma simulação computacional de uma soldagem por pontos e, a partir desta análise, identificar as sub-regiões da Zona Afeta pelo Calor (ZAC). Adicionalmente, apresentar um modelo de simplificação/adaptação do cálculo da quantidade de calor para implementar computacionalmente no software de elementos finitos. Para validar o resultado foi realizado um comparativo entre os resultados da simulação e o que está disposto em literatura. O principal objetivo de análise da simulação foi a distribuição de calor nas chapas [1].

O modelo utilizado se baseia em trabalhos da mesma linha de pesquisa, realizando uma simplificação e transformando a corrente elétrica em um fluxo de calor e fazer esse fluxo percorrer dos eletrodos para as chapas [2].

Recebido: 27 Jul., 2024. Aceito: 31 Mar., 2025.

E-mails: venanciojeremy@gmail.com (JMV), nfraga@ufersa.edu.br (FENF)



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a licença *Creative Commons Attribution* (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

O processo de soldagem por pontos é um dos tipos de soldagem que utilizam como princípio de funcionamento a resistência elétrica (*Resistance Spot Welding – RSW*), na qual o calor necessário para realizar a soldagem é gerado a partir da resistência que as chapas fornecem à passagem da corrente elétrica [3].

Esse processo trata-se da união de chapas metálicas sobrepostas ou em contato topo a topo através de uma solda formando um ponto de fusão (também chamado de lentilha de solda), por causa do calor gerado pela resistência do material à passagem de corrente elétrica (efeito Joule) com uma pressão nos eletrodos [4].

A soldagem por pontos se diferencia de outros processos de soldagem por não necessitar de metal de adição, uso de gás de proteção e apresenta uma alta velocidade do processo. Esses são um dos pontos que fazem com que esse processo seja amplamente utilizado na indústria [5].

Essa forma de soldagem é altamente utilizada na indústria automobilística, para realizar a união de chapas que formam a carroceria e o chassi. É um processo bastante utilizado devido a uma forma simplificada de operação e utilização e à uma maior facilidade de automatização do processo em linhas produtivas [3].

Este processo apresenta algumas dificuldades na otimização de parâmetros, pois a utilização de uma corrente elétrica incorreta, além de consumir um alto valor de energia, pode aumentar a ZAC e promover transformações microestruturais indesejadas. Diante desse ponto, a simulação se torna um grande artifício já que reduz a necessidade de realizar um alto número de experimentos para se obter os parâmetros corretos de soldagem. A otimização dos parâmetros garante uma maior economia no processo, além de um aumento produtivo. Vale salientar que é improvável que as simulações computacionais de soldagem eliminem a necessidade de realizar experimentos, mas vão reduzir o número e custos dos experimentos [5,6].

Existem parâmetros que influenciam o processo de soldagem por pontos diretamente e outros indiretamente. A corrente elétrica, pressão dos eletrodos e tempo são os que afetam o processo diretamente e possuem uma maior influência nos resultados e são parâmetros que podem ser variados e podem ser otimizados. Os parâmetros que influenciam indiretamente o processo são: a composição e propriedades mecânicas do material, composição do eletrodo, condições ambientais durante o processo, condutividade térmica e elétrica do material e a resistividade elétrica do eletrodo e das chapas [5].

O calor necessário para realização da soldagem é gerado a partir da resistência oferecida pelas chapas à passagem de corrente elétrica. Esse calor gerado funde as peças e promove sua união após a solidificação. A energia térmica gerada pelo processo depende da corrente, da resistência elétrica e da duração da corrente e pode ser calculada pela lei de Joule, descrita pela Equação 1 [7].

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (1)$$

Na qual: Q é o calor gerado em joules [J], I é a intensidade de corrente de soldagem em amperes [A], R é a resistência elétrica do conjunto em ohms [Ω] e t é o intervalo de tempo em segundos [s].

A transferência de calor por condução através de um sólido, em certo tempo t e se tratando de um sistema cartesiano triortogonal (x,y,z), pode ser expresso pela Equação 2 [7].

$$Q = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_0 = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

Na qual T é a temperatura [$^{\circ}\text{C}$]; x , y e z as coordenadas [mm]; t é o tempo [s]; λ_T é a condutibilidade térmica do material [$\text{J/s} \cdot \text{mm} \cdot ^{\circ}\text{C}$]; ρ é a densidade do material [g/mm^3], c é o calor específico [$\text{J/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$] e q_0 é a fonte ou sorvedouro de calor [$\text{J/s} \cdot \text{mm}^3$].

As perdas de calor devido às transferências de calor por convecção são dadas pela seguinte Equação 3. As perdas de calor por convecção foram consideradas em todo o sistema [8].

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

Na qual, h é o coeficiente de convecção [$\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$], e T_s e T_{∞} são as temperaturas da superfície de fluido da vizinhança [K], respectivamente.

A perda de calor devido às transferências de calor por radiação é dada pela seguinte Equação 4. As perdas de calor por radiação foram consideradas, somente, nas regiões próximas a soldagem, pois só em altas temperaturas elas são levadas em consideração [8].

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

Na qual, ε representa a emissividade que varia de 0 para 1 (corpo negro), σ é a constante de Stefan-Boltzmann que vale $5,67 \times 10^{-8}$ [$\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-4}$], T_s e T_{viz} são as temperaturas da superfície e da vizinhança [K], respectivamente.

Os valores de intensidade de corrente, assim como o tempo de passagem, podem ser variados na máquina de soldagem, porém a resistência das chapas e dos componentes da soldagem são mantidos fixos, já que são propriedades dos materiais e

não podem ser alterados facilmente. O valor da resistência total do circuito é dado pela soma de todas as resistências que fazem parte do sistema, como mostra a Equação 5 [7].

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad (5)$$

Em R_T é a resistência total do sistema; que R_1 é a resistência de contato entre eletrodo superior e chapa superior; R_2 é a resistência da chapa superior; R_3 é a resistência de contato entre as chapas; R_4 é a resistência da chapa inferior e R_5 é a resistência de contato entre o eletrodo inferior e a peça inferior, como mostrado na Figura 1. As resistências elétricas dos eletrodos não são consideradas, devido a sua baixa resistência elétrica [7].

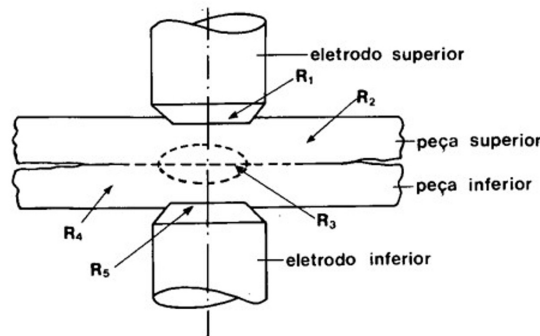


Figura 1. Identificação das resistências [7].

Na Figura 1 é possível identificar (através de simbologias) a localização de cada resistência. Nela, a resistência R_3 é a maior e, por isso, a soldagem é realizada nesse local, já que ela é a de maior valor. As resistências das chapas (R_2 e R_4) podem ser calculadas pela Equação 6. As resistências dos eletrodos são desconsideradas, por elas apresentarem um valor baixo [9].

$$R = \mu \frac{L}{A} \quad (6)$$

Na qual, μ é a resistividade do material [$\Omega \cdot m$], L é a espessura da chapa [m] e A é a área por onde a corrente passa [m^2] que é a área da ponta do eletrodo.

As resistências R_1 , R_3 e R_5 , como são resistências de contato, são calculadas de acordo com a Equação 7 [9].

$$R_c = \frac{\mu_1 + \mu_2}{4a} \quad (7)$$

Na qual, μ é a resistividade elétrica dos materiais em contato [$\Omega \cdot m$] e a é o raio de contato entre os metais, que é o raio do eletrodo de soldagem [m].

Para o cálculo da resistência, ainda pode ser levada em consideração a resistência de filme, que é a resistência causada pelo revestimento da chapa de aço ou por uma camada de óxido fino. No entanto, para fins do presente trabalho, esse fator será desconsiderado, levando em consideração que a chapa não é revestida e que não tem camada de óxido.

Outro fator analisado é o diâmetro do ponto de solda. Para chapas de mesma espessura, de forma que o calor nas duas é igual, o diâmetro do ponto de solda é calculado de acordo com a Equação 8 [7].

$$D = 2,5 + 2 \cdot s \quad (8)$$

Na qual, D é o diâmetro do ponto de solda [mm] e s é a espessura da chapa [mm]. Portanto, para a simulação de soldagem realizada neste trabalho, espera-se um ponto de solda de diâmetro 6,5 mm.

Recomenda-se que o eletrodo de soldagem seja cerca de 1,5 mm maior que o diâmetro esperado do ponto de solda, por exemplo, nesse caso como se espera um ponto de solda com diâmetro de 6,5 mm, o diâmetro do eletrodo tem que ser, no mínimo, 8,0 mm [7].

A seção transversal do ponto de solda, ao final do processo de soldagem, deve possuir um gradiente térmico e as zonas termicamente afetadas de acordo com o que está mostrado na Figura 2.

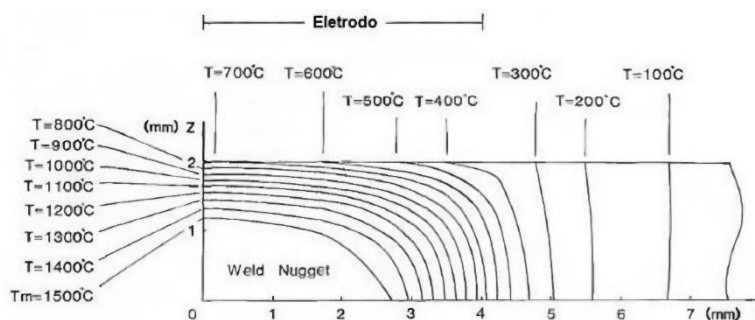


Figura 2. Modelo teórico do gradiente térmico [10].

Percebe-se que o local que se encontra o ponto de solda (*Weld Nugget*), é o local com a maior temperatura, a qual a temperatura mínima para essa região, deve ser a temperatura de fusão do material.

Para análise da ZAC, leva-se em consideração que ela é subdividida em regiões. Em uma delas ocorre crescimento de grão, o que acarreta no aumento da temperabilidade do aço que favorece a formação de microconstituintes. Há outra região que ocorre refino de grão que faz a temperabilidade do aço diminuir. Fora essas, existem outras regiões nas quais as curvas de resfriamento são diferentes da curva de resfriamento do metal base. A ZAC pode ser separada em até 5 regiões, que levam em consideração a temperatura de pico a qual foi aquecida durante a soldagem. Cada região apresenta características próprias devido às alterações microestruturais sofridas [11,12].

A ZAC é dividida em:

1. Região Parcialmente Fundida: Região em que a temperatura está em torno da temperatura de fusão do aço (1500 °C);
2. Região de Crescimento de Grão: Esse fenômeno ocorre entre as temperaturas de 1100 °C e 1500 °C e sofre influência da transformação da ferrita para austenita. Porém, o crescimento de grão nessa região irá depender do tempo em que a região ficará acima da temperatura de 1300 °C;
3. Região de Refino de Grão: Esta região se encontra entre as temperaturas de 900 °C e 1100 °C, nessa região a transformação da ferrita em austenita gera uma deformação menor do que na anterior. Com isso, a deformação é insuficiente para cristalização primária. Dessa forma, a austenita é recuperada em ferrita e/ou perlita com um tamanho de grão pequeno. Geralmente, essa região não é considerada problemática;
4. Região Intercrítica: Está entre as temperaturas de 750 °C a 900 °C e sofre transformação parcial, onde apenas uma parte de sua estrutura é transformada em austenita;
5. Região Subcrítica: Esta região se situa entre as temperaturas de 700° C e 750°C e apresenta pequenas alterações microestruturais, ocorrendo apenas uma pequena esferoidização das lamelas de cementita da perlita, gerando uma redução na resistência mecânica.

2. Materiais e Métodos

Para análise do gradiente térmico e da ZAC formada ao final do processo de soldagem, foi realizada uma simulação pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) utilizando o software de simulação computacional ANSYS® *Workbench* 23.2, na versão estudantil, a qual a ferramenta escolhida para solucionar o problema foi o módulo *Transient Thermal*, que permite a inserção das propriedades variando com a temperatura e a análise em regime transiente. Além disso, foi utilizada a extensão *Moving Heat Flux*, utilizada para modelar a fonte de calor.

Como no software não é possível simular uma corrente passando pelas chapas e essa corrente gerando o calor de soldagem, foi realizada uma adaptação, transformando essa corrente em calor, através da Equação 1, e fazendo esse calor percorrer um caminho, usando a extensão *Moving Heat Flux*. Para isso se tornar possível, foram realizadas algumas adequações e ajustes na modelagem do problema.

Diante disso, foi possível calcular a intensidade da fonte de calor, simulando que ela vai partir dos dois eletrodos e que vão se encontrar no ponto de contato entre as chapas. Para isso, a velocidade da fonte de calor foi de 0,006 m/s, um tempo de soldagem de 20 ciclos, o que equivale a 0,3334 s e um raio de soldagem igual ao raio do eletrodo que é de 0,04 m.

Para a criação do modelo, foram adotadas chapas com espessura de 2 mm cada, e a geometria utilizada na simulação está representada na Figura 3. A chapa tem largura de 45 mm, comprimento de 175 mm e espessura de 2 mm.

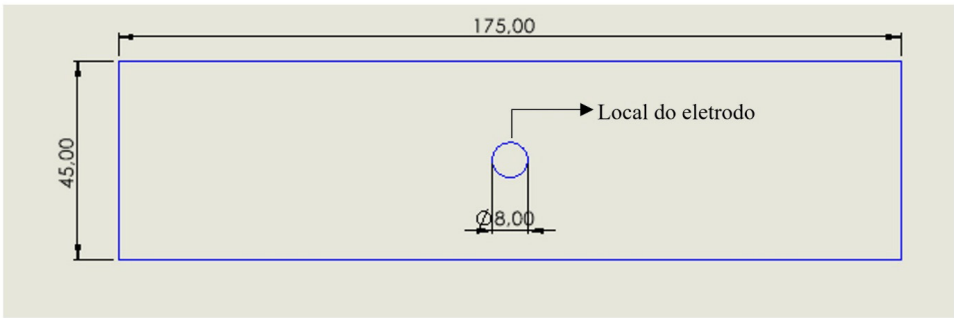


Figura 3. Dimensões (em milímetros) do modelo utilizado. Fonte: Autor.

O círculo que está descrito na imagem representa o eletrodo de soldagem. Os desenhos e a modelagem do sistema foram feitos em um software de modelagem 3D e depois foram exportados para o ANSYS® para realizar a simulação.

Os eletrodos foram modelados seguindo as regras da AWS (*American Welding Society*), com as devidas recomendações para a espessura de chapa adotada. Os eletrodos são de cobre e de codificação RWMA classe 2 [13,14].

Para o trabalho foi considerado que as chapas são de aço de baixo teor de carbono (SAE 1020), sem revestimento e sem a presença de camada de óxido, os valores de suas propriedades foram adquiridos levando em consideração sua variação com a temperatura. As propriedades do aço estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades do aço utilizado [15].

Temperatura (°C)	Calor específico (J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹)	Condutividade térmica (W.m ⁻¹ .°C ⁻¹)	Coefficiente de convecção (W.m ⁻² .°C ⁻¹)	Densidade (kg.m ⁻³)
0	500	52	2,5	7840
200	550	50	6,5	7800
400	600	43	7	7740
600	800	37	7,5	7650
800	950	26	8	7640
1000	950	28	8,2	7520
1200	950	30	8,4	7500
1400	950	33	8,6	7500
1600	950	120	9,2	7500
1800	950	120	9,2	7500
2000	950	120	9,2	7500

O material utilizado para os eletrodos foi um liga de cobre que está descrita na Tabela 2. Como não foi possível obter os valores das propriedades variando com a temperatura, os dados foram mantidos constantes.

Tabela 2. Propriedades dos eletrodos [13,16].

Calor específico (J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹)	Condutividade térmica (W.m ⁻¹ .°C ⁻¹)	Densidade (kg.m ⁻³)
486	323,7	8890

Os valores referentes às resistividades elétricas estão presentes na Tabela 3. Esses valores são utilizados para calcular a resistência elétrica total do sistema.

Tabela 3. Resistividade elétrica dos materiais [17].

Material	Resistividade elétrica (Ω.m)
Aço SAE 1020	1,6 x 10 ⁻⁷
RWMA classe 2	2,16 x 10 ⁻⁸

Levando em consideração as trocas térmicas por radiação, foi considerado uma emissividade da radiação de 0,75 [8].

Os parâmetros utilizados para realizar a simulação foram uma corrente de 15 kA e um tempo de soldagem de 20 ciclos, que equivale a, aproximadamente, 0,3334 segundos [7].

O cálculo da resistência elétrica total (RT) do sistema foi realizado com base na Equação 5 e na Equação 6. Com isso, a fórmula para o cálculo da resistência total está descrita na Equação 9.

$$RT = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2a} + \frac{\mu_1}{2a} + \frac{2 \cdot \mu_1 \cdot L}{A} \quad (9)$$

Na qual, μ_1 é a resistividade elétrica da chapa [$\Omega \cdot m$], μ_2 é a resistividade elétrica do eletrodo [$\Omega \cdot m$], L é a espessura da chapa [m], a é o raio de contato entre os metais, que é o raio do eletrodo de soldagem [m] e A é a área de contato entre as chapas, que é a área do eletrodo. Substituindo os valores, tem-se que o valor da resistência total (RT) do sistema é:

$$RT = 5,5357 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Utilizando o valor dessa resistência total e substituindo na Equação 1 e dividindo pela área de contato (área do eletrodo), encontra-se o fluxo (q) de valor que é de:

$$q = 82614048,8 W \cdot m^{-2}$$

Para o modelo foi utilizada uma malha refinada na região do eletrodo, pois é a região que ocorre a soldagem e formação da lentilha de solda e uma malha menos refinada nas outras regiões, devido às limitações da versão estudantil do software. Os dados da malha estão na Tabela 4.

Tabela 4. Dados da malha utilizada.

Região	Tipo de malha	Tamanho do elemento
Núcleo da chapa	Tetraédrica	0,2 mm
Chapa	Tetraédrica	0,2 mm
Eletrodo	Tetraédrica	1 mm

A Figura 4 mostra o corte da seção transversal do modelo utilizado, evidenciando as regiões das malhas.

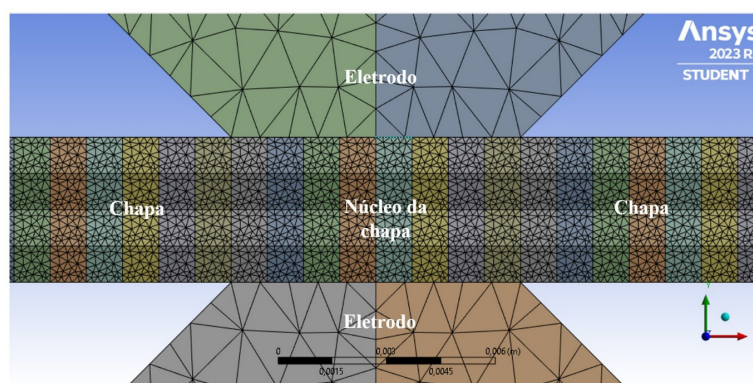


Figura 4. Malha e suas regiões em um corte de seção transversal. Fonte: Autor.

Inicialmente foi realizado um estudo para identificar qual tipo de malha e qual tamanho de elemento era o mais apropriado para a simulação e verificou-se que a malha tetraédrica foi a que mais se adequou ao sistema e um refino de malha na região da soldagem. Dessa forma, o ponto de solda ficou com um aspecto próximo ao disposto em literatura [10] e as temperaturas obtidas foram próximas ao que era esperado [11,12].

3. Resultados e Discussões

Os resultados das simulações, juntamente com os dados em relação as regiões da ZAC, campos de gradiente térmico, ciclo térmico, temperatura máxima obtida nos pontos, foram obtidas através do pós-processamento (*post-processing*) do ANSYS®.

A região destacada em vermelho representa o local onde há a maior temperatura e as demais temperaturas vão decrescendo de acordo com a escala de cores, como está mostrado na Figura 5.

A escala de cores foi modificada, para ficar de acordo com as temperaturas das regiões da ZAC que foi descrita na introdução deste trabalho, ou seja [11,12]:

1. Região Parcialmente Fundida: $T \geq 1500^{\circ}\text{C}$, em vermelho;
2. Região de Crescimento de Grão: $1100^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1500^{\circ}\text{C}$, em laranja;
3. Região de Refino de Grão: $900^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1100^{\circ}\text{C}$, em amarelo;
4. Região Intercrítica: $750^{\circ}\text{C} \leq T \leq 900^{\circ}\text{C}$, em verde-amarelo;
5. Região Subcrítica: $700^{\circ}\text{C} \leq T \leq 750^{\circ}\text{C}$, em verde.

A partir de processos de simulação pode-se estimar as transformações microestruturais no material, tanto na lentilha de solda quanto na ZAC.

Em processos de soldagem a ponto de aços carbono, é possível encontrar uma variação de microestruturas semelhante aquelas encontradas em processos convencionais à arco voltaico. A exemplo da região da lentilha de solda, que o produto de transformações de um aço ferrita perlita pode inclusive evoluir para uma predominância de martensita [18]. Enquanto que na região da ZAC, predominar também o crescimento de grão no metal base [18]. Além disso, desenvolver-se na ZAC microestruturas como a ferrita de contorno de grão e a ferrita de segunda fase alinhada, que são microestruturas que também podem ser encontradas na ZAC de uma solda ponto [5]

As transformações microestruturais sofridas na ZAC foram comparadas com o trabalho em referência [19], que afirma que:

1. Na região da lentilha de solda foi observada grande quantidade de martensita e ferrita primária;
2. A microdureza na região foi em média 400 HV, que é semelhante a dureza de um aço de baixo carbono;
3. Na ZAC foi verificada a presença de ferrita poligonal e perlita;
4. De acordo com o estudo, a perlita se “desmancha” na estrutura entre os grãos de ferrita, se transformando em glóbulos, contribuindo para uma diminuição na resistência;
5. O aumento de grão depende da potência de soldagem, ou seja, para maiores correntes de soldagem utilizada, há um aumento no crescimento do grão em comparação com baixas correntes;

De modo geral, o trabalho de referência [19], traz que na região da lentilha de solda, a microestrutura é predominantemente martensita e agregados de ferrita e na ZAC, há a presença de microestruturas variadas e diferentes tamanhos de grão, com uma microestrutura ferrita e agregados. Desse modo, os dados obtidos aqui foram comparados com o descrito nos trabalhos [11,12] e corrobora os resultados da simulação, avaliando-se as faixas de temperatura.

A Figura 5 mostra o gradiente térmico formado na região da lentilha de solda instantaneamente após o tempo de soldagem (0,33s), para uma corrente de 15kA, produzindo uma lentilha de solda de, aproximadamente, 6,8 mm. Essa região do ponto de solda é toda região em vermelho, região essa que ultrapassou a temperatura de fusão do aço (1500°C).

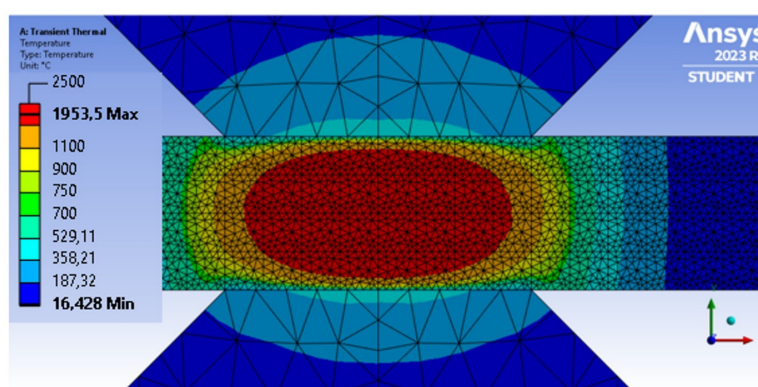


Figura 5. Gradiente térmico formado ao fim do tempo de soldagem. Fonte: Autor.

O diâmetro do ponto de solda foi calculado contando quantos elementos (de tamanho 0,2 mm) a região vermelha atinge ao final do tempo de soldagem. Dessa forma, contabilizou-se 34 elementos, o que gera um ponto de solda de 6,8 mm de diâmetro. De acordo com a Equação 8, o diâmetro do ponto de solda esperado era de 6,5 mm, obteve-se um erro de, aproximadamente, 4,61%.

Consegue-se verificar, que a pressão exercida pelos eletrodos apresenta pouca influência nos resultados, já que a simulação foi, exclusivamente, térmica e chegou a resultados bem próximos do esperado em literatura, levando em consideração o diâmetro do ponto de solda [7] e das zonas da ZAC [11,12].

Para análise das regiões da ZAC, tem-se que:

- A região em vermelho é toda região parcialmente fundida, que apresenta temperaturas maiores que 1500 °C;
- A região em laranja é a região que apresenta crescimento de grão e que corresponde a região com temperatura superior a 1100 °C e inferior a 1500 °C;
- A região em amarelo é a região que apresenta refino de grão e apresenta temperaturas entre 900 °C e 1100 °C;
- A região em verde-amarelo é a região intercrítica que está entre 750 °C e 900 °C;
- A região em verde é a região subcrítica que apresenta temperaturas entre 700 °C e 750 °C.

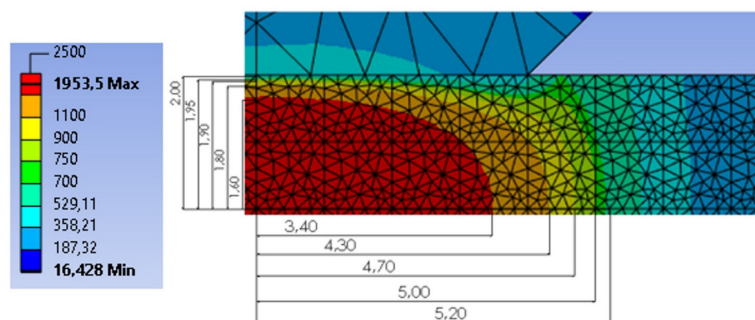


Figura 6. Tamanho de cada região da ZAC. Fonte: Autor.

Após realizar as medições na largura da ZAC, como mostrado na Figura 6, foi possível criar as curvas de ciclo térmico tomando como pontos, o ponto central da lentilha de solda e o final de cada região da ZAC, ou seja, a distância em mm do ponto central da lentilha de solda, conforme pode ser indicado pelos pontos na Figura 6. As curvas de ciclo térmico obtidas para cada um desses pontos estão mostradas na Figura 7.

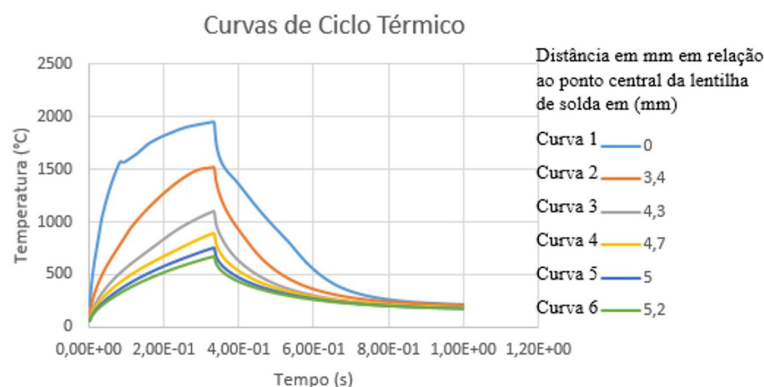


Figura 7. Curvas de Ciclo Térmico. Fonte: Autor.

A taxa de resfriamento das curvas 1 e 2, mostradas na Figura 7, são maiores que 0,5 °C/s e, segundo [20], taxas de resfriamento maiores que 0,5 °C/s formam uma microestrutura predominantemente martensita e uma pequena quantidade de ferrita, em alinhamento com o que foi mostrado no trabalho e na referência [19].

4. Conclusão

Na realização deste trabalho foi possível analisar o processo de soldagem por pontos, sua distribuição de calor e análise da ZAC em chapas de aço SAE 1020 com 2 mm de espessura por meio de uma simulação computacional através do método dos elementos finitos.

Ao fim do trabalho, chegou-se à conclusão que a simulação utilizando o ANSYS® foi eficaz e obteve resultados bem próximos dos previstos em literatura, mostrando que a utilização do modelo estudado é viável para esse tipo de soldagem.

Pode-se observar ainda que o diâmetro do ponto de solda simulado alcançou uma medida de 6,8 mm, valor em concordância com o que o que diz a Equação 8, que retorna um diâmetro teórico de 6,5mm, ou seja, há uma diferença de 4,6%. O diâmetro da lentilha medido na simulação foi realizado considerando a quantidade e tamanho dos elementos no CAD.

Foi possível identificar as regiões da ZAC, mostrando que no núcleo do ponto de solda, a microestrutura é predominantemente martensita e com pequenas frações de ferrita.

Para trabalhos futuros, sugere-se utilizar outros métodos de elementos finitos para realização da simulação; a utilização de uma versão não estudantil por não apresentar limite de malha; a tentativa de utilizar outros modelos e outras abordagens para realizar a simulação.

Contribuição dos autores

JMVS: redação de texto, investigação, conceituação, metodologia, simulação, tratamento e análise dos resultados. FENF: orientação, supervisão, metodologia, planejamento, revisão e edição.

Referências

- [1] Rosário RK, Costa JCR, Brandão SM, Dias MJ, Rodrigues RFN, Silva WP. Determinação de parâmetros otimizados na soldagem a ponto por resistência utilizando duas e três chapas em uma indústria automobilística. *Revista Processos Químicos*. 2021;14(28):83-93. <http://doi.org/10.19142/rpq.v14i28.605>.
- [2] Silva JMV, Duarte FCD No, Fraga FEN. Avaliação da distribuição de calor de um processo de soldagem por pontos através do método dos elementos finitos. In: *Anais do IV Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia*; 2023; Diamantina, MG. Recife: Even3; 2023. <http://doi.org/10.29327/1298891.4-224>.
- [3] Santos FB, Mainier FB. Variáveis relevantes para a qualidade do processo de soldagem por pontos por resistência elétrica utilizado na indústria automobilística. In: *Anais do III Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia (SEGeT)*; 2006; Rio de Janeiro. Ano 3. Resende: AEDB; 2006. p. 12.
- [4] Branco HLO. Avaliação de capas de eletrodos utilizados na soldagem por resistência de chapas galvanizadas automotivas. Curitiba: UFPR; 2005.
- [5] Christofletti GM. Soldagem por pontos: avaliação dos parâmetros de soldagem e das propriedades mecânicas da junta soldada [monografia]. Belo Horizonte: Centro Federal de Educação Tecnológicas de Minas Gerais; 2013.
- [6] Goldak JA, Akhlaghi M. *Computational welding mechanics*. New York: Springer; 2005.
- [7] Wainer E, Brandi SD, Mello FDH. *Soldagem: processos e metalurgia*. São Paulo: Edgar Blucher; 2004.
- [8] Çengel YA, Ghajar AJ. *Transferência de calor e massa: uma abordagem prática*. 4ª ed. Porto Alegre: AMGH Editora; 2012.
- [9] Braunovic M, Myshkin NK, Konchits VV. *Electrical contacts: fundamentals, applications and technology*. Boca Raton: CRC Press; 2006. <http://doi.org/10.1201/9780849391088.ax3>.
- [10] Han Z, López Orozco JA, Indacochea E, Chen C. Resistance spot welding: a heat transfer study. *Welding Journal*. 1989;69(9):363-371.
- [11] Sá ALC. Análise microestrutural e de propriedades mecânicas resultantes da soldagem de um aço do tipo HY-80 com os processos eletrodo revestido e arame tubular [tese]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 1999.
- [12] Bueno RS. Análise microestrutural de junta soldada de aço baixa liga [monografia]. Rio de Janeiro: Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2010.
- [13] American Welding Society. *RWMA: Resistance welding manual*. 4th ed. Miami: AWS; 1989. 443 p.
- [14] American Welding Society. *Welding handbook*. Vol. 3. Miami: AWS; 2007.
- [15] Souza CFM. Análise numérica e experimental de tensões residuais em juntas soldadas de aço de baixo carbono [dissertação]. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro; 2016.
- [16] Cooper Development Association Inc. C18200. McLean, VA: CDA; 2018 [acesso em 20 dez. 2023]. Disponível em: <https://alloys.copper.org/alloy/C18200>
- [17] Callister WD. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 7ª ed. Rio de Janeiro: Editora LTC; 2002.
- [18] Lopes DM. Avaliação de parâmetros do processo de soldagem a ponto por resistência para a união de chapas de aço “interstitial free” (IF) [dissertação]. Rio de Janeiro: Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica; 2015.
- [19] Rezende MC, Natal YD. Análise microestrutural da lente de solda e da zta na soldagem a ponto por resistência elétrica de armações treliçadas. In: *Anais do 63º Congresso Anual da ABM*; 2008; Santos, SP. São Paulo: ABM; 2008. p. 2238-2246.
- [20] Vilela LBM, Faria GL, Alcântara CM, Oliveira TR, Cota AB. Efeito da taxa de resfriamento sobre a formação de martensita em um aço inoxidável ferrítico com 11%Cr e baixos teores de intersticiais. *Matéria*. 2019;24(1):1-11. <http://doi.org/10.1590/s1517-707620190001.0617>.