



Artigo

Simulação computacional de um processo de soldagem por pontos em chapas de alumínio

Jeremy Michael Venâncio da Silva ^[1], Francisco Edson Nogueira Fraga ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; jeremy.silva@alunos.ufersa.edu.br

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

Recebido: 30/10/2023;

Aceito: 22/12/2023;

Publicado: 26/12/2023.

Resumo: O processo de soldagem por pontos é um dos tipos de soldagem por resistência elétrica, cujo princípio básico de funcionamento é o efeito Joule, no qual a resistência à passagem de corrente elétrica gera calor suficiente para unir as chapas. A soldagem por resistência é o processo mais utilizado na união de chapas de alumínio na indústria automobilística especialmente em soldagens de carrocerias. Este trabalho tem como objetivo simular o processo de soldagem a resistência por pontos através do método dos elementos finitos. O artigo apresenta inicialmente uma explanação sobre os conceitos principais que influenciam nesse processo de soldagem. Para a análise da simulação computacional, foi utilizado o software ANSYS® Workbench 23.2, na versão estudantil, juntamente com a extensão *Heat Flux* no qual o modelo matemático foi solucionado pela ferramenta chamada *Transient Thermal*. Foram consideradas perdas térmicas por condução, convecção e radiação. As geometrias utilizadas nas simulações são especificadas por literaturas e por norma. O processo de simulação foi validado através de comparação com os resultados de um trabalho experimental na área, utilizando os mesmos parâmetros de corrente e tempo. Ao final do trabalho verificou-se que a simulação se mostrou muito eficaz e se assemelhou muito com os resultados experimentais.

Palavras-chave: Soldagem por pontos; Distribuição de calor; Simulação, Alumínio.

Abstract: The spot welding process is one of the types of electrical resistance welding, whose basic operating principle is the Joule effect, in which resistance to the passage of electric current generates sufficient heat to join the sheets. Resistance welding is the most used process for joining aluminum sheets in the automobile industry, especially when welding bodies. This work aims to simulate the resistance spot welding process using the finite element method. The article initially presents an explanation of the main concepts that influence this welding process. To analyze the computer simulation, the ANSYS® Workbench 23.2 software, in the student version, was used, together with the Heat Flux extension in which the mathematical model was solved by the tool called Transient Thermal. Thermal losses due to conduction, convection and radiation were considered. The geometries used in the simulations are specified by literature and standards. The simulation process was validated through comparison with the results of experimental work in the area, using the same current and time parameters. At the end of the work it was found that the simulation proved to be very effective and was very similar to the experimental results.

Key-words: Spot welding; Heat distribution; Simulation, Aluminum.

1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem por pontos é um dos tipos de soldagem por resistência elétrica (*Resistance Spot Welding - RSW*), cujo princípio básico de funcionamento é o efeito joule, onde o calor da soldagem é gerado a partir da resistência oferecida pelas chapas à passagem de corrente elétrica. [1,2]

O processo de soldagem de resistência por pontos é amplamente utilizado na indústria, especialmente no setor automobilístico, para união de chapas que formam as estruturas metálicas do chassi e da carroceria. Dentre esse processo, as ligas de alumínio são muito utilizadas. Observa-se que é um processo muito utilizado devido à simplicidade de operação e manutenção, ao baixo custo, à alta confiabilidade e à facilidade na adaptação para um processo de automação. [2]

As folhas de alumínio são amplamente utilizadas devido à sua densidade e sua boa conformabilidade em comparação com o aço. Porém, um problema na utilização de solda ponto em alumínio, é que o alumínio tem uma alta afinidade com o cobre que é utilizado no eletrodo, portanto, há um desgaste maior do eletrodo de soldagem, sendo necessário um estudo bem preciso dos parâmetros para que não haja esse desgaste. [3]

Esse processo de soldagem apresenta algumas dificuldades, como a definição de parâmetros adequados para obter propriedades mecânicas desejáveis, alto custo do equipamento, assim como o alto valor dos eletrodos e é necessária uma grande demanda da rede elétrica, já que esse processo consome bastante energia elétrica com correntes na casa de quilo ampères. [4]

É improvável que as simulações computacionais de soldagem eliminem a necessidade da realização de experimentos, mas as simulações deverão reduzir notoriamente o número e custo dos experimentos, melhorando a precisão dos dados para a realização deles. A otimização dos parâmetros permite obter maior confiabilidade das juntas soldadas e economia no processo, além de um aumento produtivo, o que afeta diretamente no lucro da empresa. [5]

Atualmente, o número de simulações desse, e de outros processos de soldagem, aumentaram consideravelmente. Os trabalhos nessa área simulam, principalmente, a distribuição de calor nas chapas e buscam formas de otimizar esse processo. [6]

As principais variáveis que influenciam no processo de soldagem por resistência são: corrente, pressão dos eletrodos na peça e tempo. Essas três variáveis estão interligadas de modo que a variação de uma influencia diretamente na outra. De acordo com artigos analisados, percebe-se que a variável que mais influencia no processo é a corrente elétrica, a qual pode variar até valores de 40 kA. [4]

Além dessas variáveis citadas, que se chama de variáveis de influência diretas do processo, existem as variáveis indiretas, que também afetam o processo de soldagem, mas que não são facilmente controladas. Dentre elas há principalmente: a composição e propriedades mecânicas do material a ser soldado, a composição do eletrodo, as condições ambientais durante o processo, a condutividade térmica e condutividade elétrica do material a ser soldado, a resistividade do eletrodo e das chapas a serem soldadas. [4]

Para a simulação desenvolvida no presente trabalho, foi determinado uma série de condições de contorno, para que a simulação consiga ser realizada. Um dos fatores desconsiderado na simulação foi a pressão exercida do eletrodo na chapa, já que pouco influencia na análise da distribuição de calor. Alguns trabalhos experimentais na área, como o produzido por Guilherme Mendes Christofoletti, de 2013, intitulado “Soldagem por pontos: Avaliação dos parâmetros de soldagem e das propriedades mecânica já junta soldada”, comprovaram que a força e pressão dos eletrodos é o parâmetro que menos influencia na formação do ponto de solda, sendo a corrente e o tempo os parâmetros mais importantes na geração de calor da soldagem. [4]

O presente trabalho trata, especificamente, do processo de soldagem por resistência por pontos (*Spot Welding*), mas existe outros tipos de processo de soldagem por resistência, como, por exemplo, a soldagem por resistência por projeção (*Projection Welding*), muito utilizada para soldar componentes de fixação em chapas e peças. A soldagem por resistência por costura (*Seam Welding*), aplicada em soldas de tanques de combustíveis de automóveis. [4]

Este trabalho tem como objetivo simular o processo de soldagem por pontos na união de chapas de alumínio de 2 mm de espessura, buscando o modelo que mais se adequa com a realidade, com o intuito de avaliar a distribuição de calor nas chapas e otimizar os parâmetros de soldagem.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O calor necessário para soldagem é gerado pela resistência oferecida pelas chapas à passagem da corrente elétrica. Este calor funde as peças e promove sua união após a solidificação. A energia térmica total gerada durante o processo de soldagem depende das resistências do conjunto, da passagem e da duração da corrente, podendo 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]

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

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 as transferências de calor por convecção é dada pela seguinte Equação 3. As perdas de calor por convecção foram consideradas em todo o sistema. [9]

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

Na qual, “h” é o coeficiente de convecção [W/m².°C], e “Ts” 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, já que só em altas temperaturas que essas perdas térmicas 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 5,67x10⁻⁸ [W.m².K⁻⁴], “Ts” e “Tviz” 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 alterando os ajustes dos controles de solda, 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]

$$RT = R1 + R2 + R3 + R4 + R5 \quad (5)$$

Em que R1 é a resistência de contato entre eletrodo superior e chapa superior; R2 é a resistência da chapa superior; R3 é a resistência de contato entre as chapas; R4 é a resistência da chapa inferior e R5 é a resistência de contato entre o eletrodo inferior e a peça inferior, como mostrado na imagem a seguir. As resistências elétricas dos eletrodos não são consideradas, devido a sua baixa resistência elétrica. [7]

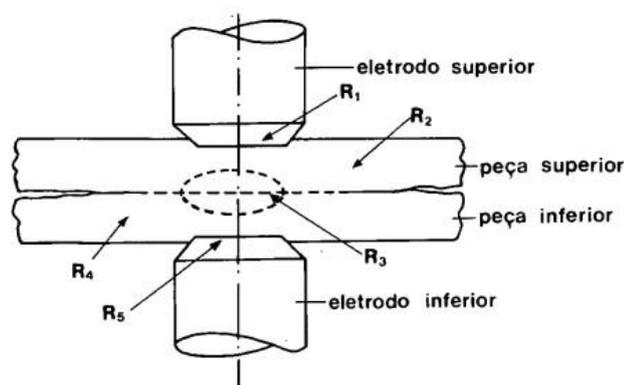


FIGURA 1. Resistência elétricas de contato. [7]

A Figura 1 mostra a localização e simbologia de cada resistência explicada no parágrafo anterior. A resistência R3 é maior que as outras e, por este motivo, a solda é realizada no local onde ela se insere. As resistências R2 e R4, que são as resistências das chapas, podem ser calculadas pela Equação 6. Para o cálculo da resistência é desconsiderado a resistência elétrica dos eletrodos, por ela ser baixa. [9]

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

Na qual, “ρ” é a resistividade do material [Ω.m], “L” é a espessura da chapa [m] e a “A” é a área por onde a corrente passa [m²] que é a área da ponta do eletrodo.

As resistências R1, R3 e R5, como são resistências de contato, são calculadas de acordo com a Equação 7. [9]

$$R_c = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4a} \quad (7)$$

Na qual, “ ρ ” 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 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.

Um outro parâmetro que é verificado nesse tipo de soldagem, é o diâmetro do ponto de solda. Para chapas com a mesma espessura, em que o calor gerado em ambas as peças deva ser igual, o diâmetro do ponto de solda é calculado conforme 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 6,0 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]

2.1. Metodologia

Para a realização da simulação foi tomado como base o trabalho dos autores Jeremy Michael Venâncio da Silva, Francisco das Chagas Duarte Neto e Francisco Edson Nogueira Fraga, intitulado como “Avaliação da distribuição de calor de um processo de soldagem por pontos através do método dos elementos finitos”, no qual descreve um modelo utilizado para realização da simulação. [10]

Para a análise do gradiente térmico de temperatura formado 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, versão estudantil, utilizando uma função do ANSYS chamada de *Transient Thermal*, juntamente com a extensão *Heat Flux*, utilizada para a modelagem da fonte de calor.

Neste trabalho, o fluxo de calor foi considerado como sendo bidimensional, já que o material das chapas pode ser considerado como chapa fina, fazendo com que a temperatura em ambas as faces da chapa sejam a mesma durante e após a soldagem. [11]

Os resultados das simulações foram validados com os resultados dos experimentos realizados no trabalho do autor Karin Mendes Penteado, intitulado de: “Otimização da Solda de Pontos por Resistência Elétrica na Liga de Alumínio 5052-H32 através do Projeto e Análise de Experimentos (DOE)”. [12]

Como não há uma função do ANSYS que realize a simulação deste tipo de soldagem, foi realizado uma simplificação do modelo, adequando o sistema para uma fonte de calor, já que a soldagem por pontos é realizada pela passagem de uma corrente elétrica, mas no modelo foi convertido o calor produzido por essa corrente, transformando o fluxo de corrente em um fluxo de calor para utilizar a extensão do *Heat Flux*.

Para isso, foi necessário realizar alguns ajustes que possibilitaram a sua realização. Na região das chapas que estão em contato com o eletrodo, foi necessário realizar uma divisão em 128 partes (a região central ficou com 128 chapas), com o intuito de promover um refino de malha melhor com a versão estudantil.

2.2 Geometria

Para a criação do modelo, foram adotadas chapas com espessura de 2 mm cada, e a geometria utilizada na simulação está representada na Figura 2. A chapa tem largura de 60 mm, comprimento de 138 mm e espessura de 2 mm, que são as mesmas dimensões adotadas no trabalho de referência. [12]

O círculo que está descrito na imagem, representa o eletrodo de soldagem que está representado na Figura 2. Os desenhos foram feitos em um software de modelagem.

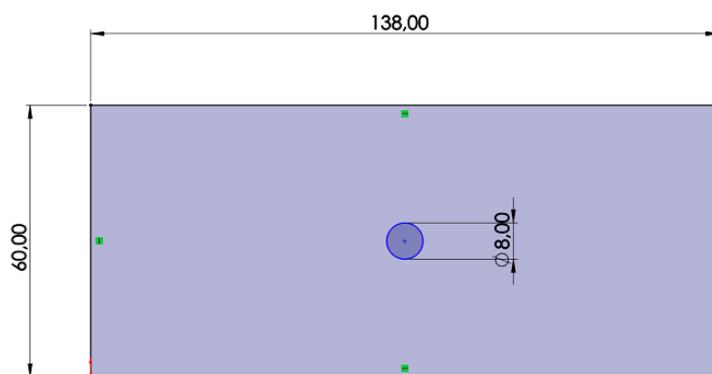


FIGURA 2. Dimensões (em milímetros) do modelo utilizado. (Autoria própria)

Os eletrodos foram modelados seguindo as regras da AWS (*American Welding Society*), com as devidas recomendações para a espessura de chapa utilizada no processo. A localização do eletrodo na chapa esta mostrada na Figura 2. Os eletrodos utilizados são de cobre e de codificação RWMA classe 2. [13,14]

As dimensões do eletrodo estão de acordo com o previsto em literatura, já que se recomenda que o diâmetro do eletrodo seja cerca de 1,5 mm maior que o diâmetro do ponto de solda esperado. [7]

A modelagem das chapas e dos eletrodos foi realizada em um software de modelagem e depois o sistema foi exportado para o ANSYS® para realizar a simulação utilizando o modelo *Transient Thermal* que permite que insira as propriedades variando com a temperatura, além da análise do problema em regime transiente.

2.3 Propriedades dos materiais

Foram utilizadas chapas de alumínio, sem revestimento e sem a presença de camada de óxido, os valores de suas propriedades foram tabelados e foi considerada a variação das propriedades com a temperatura. As propriedades do alumínio estão descritas na Tabela 1.

TABELA 1. Propriedades do alumínio utilizado. [15]

| Calor específico ($\text{J.kg}^{-1}.\text{C}^{-1}$) | Condutividade térmica ($\text{W.m}^{-1}.\text{C}^{-1}$) | Densidade (kg.m^{-3}) |
|--|--|-------------------------------------|
| 880 | 137 | 2680 |

O material utilizado para os eletrodos foi uma liga de cobre seguindo os parâmetros do eletrodo RWMA classe 2, como descrito na Tabela 2. Como não foi obtido os valores das propriedades variando com a temperatura, foram considerados os valores constantes a temperatura ambiente.

TABELA 2. Propriedades do eletrodo utilizado. [14,16]

| Calor específico ($\text{J.kg}^{-1}.\text{C}^{-1}$) | Condutividade térmica ($\text{W.m}^{-1}.\text{C}^{-1}$) | Densidade (kg.m^{-3}) |
|--|--|-------------------------------------|
| 486 | 323,7 | 8890 |

Os valores das resistividades elétrica dos materiais estão descritos na Tabela 3. Os valores das resistividades vão ser utilizados para calcular a resistência total do sistema e calcular o fluxo de calor da soldagem.

TABELA 3. Resistividade elétrica dos materiais utilizados. [17]

| Material | Resistividade elétrica ($\Omega.\text{m}$) |
|---------------|--|
| Alumínio | $2,82 \times 10^{-8}$ |
| RWMA classe 2 | $2,16 \times 10^{-8}$ |

Ainda relacionado as trocas térmicas do sistema com o meio, foi considerado, para fins de trocas térmicas por radiação, que a emissividade da radiação foi de 0,75. Esse valor foi estimado, levando em consideração a grande utilização dele em trabalhos de simulação, nos quais variavam entre 0,7 e 0,75. [8]

2.4 Parâmetros de soldagem

Os parâmetros de soldagem utilizados neste trabalho tiveram como base os valores do trabalho experimental. Foi utilizado uma corrente de 33,5 kA e um tempo de soldagem de 13,6 ciclos, o que equivale a 0,23 s. [12]

2.5 Resistência elétrica e fluxo térmico

O cálculo da resistência elétrica total do sistema foi realizada com base nas Equações 5 e 6. Com isso, a fórmula para o cálculo da resistência total está descrita na Equação 9.

$$RT = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2a} + \frac{\rho_1}{2a} + \frac{2 \cdot \rho_1 \cdot L}{A} \quad (9)$$

Onde, “ ρ_1 ” é a resistividade elétrica da chapa [$\Omega \cdot m$], “ ρ_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 do sistema é:

$$RT = 1,2 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Utilizando esse valor de resistência calculado, os parâmetros de tempo e corrente estabelecidos, encontra-se o valor de fluxo de calor, de acordo com a equação 10.

$$\dot{q} = \frac{I^2 \cdot R \cdot t}{A} \quad (10)$$

Com essa equação encontra-se o valor do fluxo de calor que é de 61621014,04 W. m⁻².

2.6 Características da malha

A malha utilizada no modelo foi definida de acordo com as limitações da versão estudantil do software. Um melhor refino de malha só seria possível com a versão paga do software e com um computador com melhor processamento. Diante das condições de utilização, as malhas utilizadas estão descritas na Tabela 4.

TABELA 4. Parâmetros da malha utilizada. (Autoria própria)

| Região | Tipo de malha | Tamanho da malha |
|-----------------|---------------|------------------|
| Núcleo da chapa | Tetraédrica | 0,2 mm |
| Chapa | Tetraédrica | 7 mm |
| Eletrodo | Tetraédrica | 2 mm |

A região denominada como “Núcleo da chapa” é a que está em contato direto com os eletrodos, e é na mesma em que ocorre a formação do ponto de solda, e como o objetivo do trabalho é analisar a formação da lentilha de solda, buscou-se refinar a malha nessa região para aprimorar os resultados.

A malha apresentou um número de 96.969 nós e 38.582 elementos. A Figura 3 mostra o corte de seção transversal do modelo utilizado, colocando em ênfase as regiões mencionadas anteriormente.

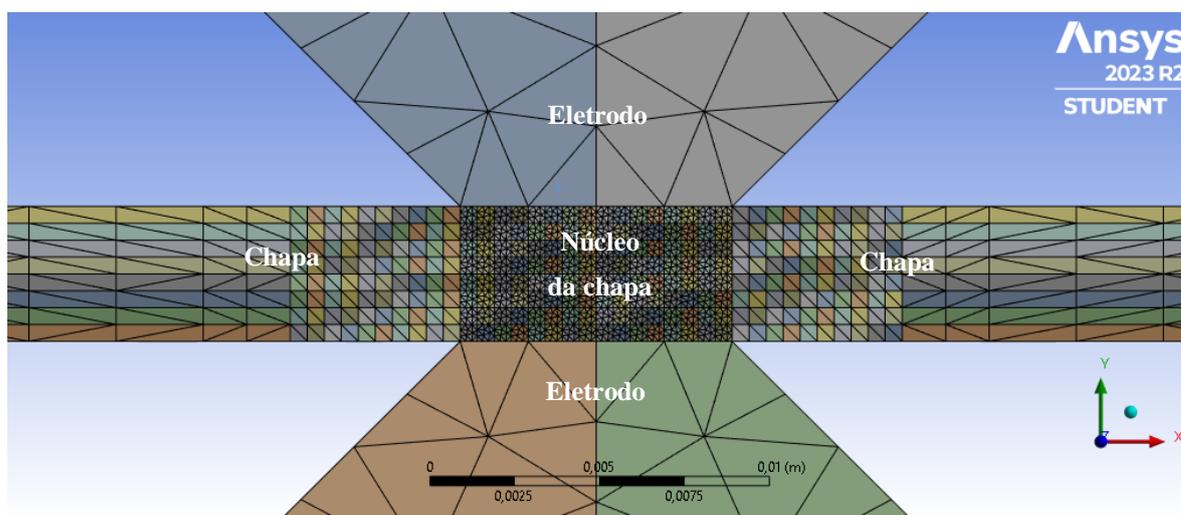


FIGURA 3. Malha vista em corte de seção transversal do modelo. (Autoria própria)

2.7 Modelagem da fonte de calor

Para a modelagem da fonte de calor, foi utilizado a ferramenta *Heat Flux* do *ANSYS* de forma que a quantidade de calor fornecida ao sistema fosse tabulada, para poder analisar de que forma o sistema aquece e resfria. Para o aquecimento foi utilizado um período de até 0,23 segundos e depois analisado o resfriamento até 1 segundo de tempo total. Ao total foram realizadas 100 divisões no tempo. De 0,01 s até 0,23 s teve um fluxo de calor de 61621014,04 W. m⁻² e no intervalo de 0,24 s até 1 s teve um fluxo de calor de 0 W. m⁻².

Os dados inseridos no software estão descritos na Tabela 5.

TABELA 5. Parâmetros da fonte de calor utilizada. (Autoria própria)

| Tempo (s) | Fluxo de calor (W. m ⁻²) |
|-----------|--------------------------------------|
| 0 | 0 |
| 0,01 | 61621014,04 |
| 0,02 | 61621014,04 |
| 0,03 | 61621014,04 |
| 0,04 | 61621014,04 |
| 0,05 | 61621014,04 |
| 0,06 | 61621014,04 |
| 0,07 | 61621014,04 |
| 0,08 | 61621014,04 |
| 0,09 | 61621014,04 |
| 0,1 | 61621014,04 |
| 0,11 | 61621014,04 |
| 0,12 | 61621014,04 |
| 0,13 | 61621014,04 |
| 0,14 | 61621014,04 |
| 0,15 | 61621014,04 |
| 0,16 | 61621014,04 |
| 0,17 | 61621014,04 |
| 0,18 | 61621014,04 |
| 0,19 | 61621014,04 |
| 0,20 | 61621014,04 |
| 0,21 | 61621014,04 |
| 0,22 | 61621014,04 |
| 0,23 | 61621014,04 |
| . | 0 |
| . | 0 |
| . | 0 |
| . | 0 |
| 1 | 0 |

3. RESULTADOS

Inicialmente, foi realizado um estudo variando o tipo de malha e verificou-se que a malha tetraédrica foi a que mais se adequou ao modelo, deixando a temperatura próxima da esperado e um ponto de solda semelhante ao disposto em literatura. Quando se utilizou a malha automática, a temperatura ficou muito diferente do esperado, além do que o ponto de solda ficou deformado e diferente do que está em literatura.

Os resultados das simulações juntamente com todos os dados a respeito dos campos transientes de temperatura, ciclo térmico, temperatura máxima obtida em certo ponto, foram obtidas a partir do *ANSYS*®, utilizando o pós-processamento (*post-processing*).

A simulação foi feita com os parâmetros definidos como ideal no trabalho da autora Karin Mendes Penteadó, intitulado de: “Otimização da Solda de Pontos por Resistência Elétrica na Liga de Alumínio 5052-H32 através do Projeto e Análise de Experimentos (DOE)”, na qual definiu uma corrente de 33,5 kA e um tempo de soldagem de 13,6 ciclos, o que equivale a 0,23 segundos, aproximadamente.

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, mostradas em anexo.

A Figura 4 mostra o gradiente térmico formado na região da lentilha de solda instantaneamente após o tempo determinado de soldagem (0,23 s), para uma corrente de 33,5 kA, produzindo uma lentilha de solda de, aproximadamente, 7 mm, região a qual ultrapassou a temperatura de fusão do material. Para a determinação do ponto de solda, considerou-se as regiões em vermelho e laranja, as quais englobam faixas de temperatura que superam a temperatura de fusão do material.

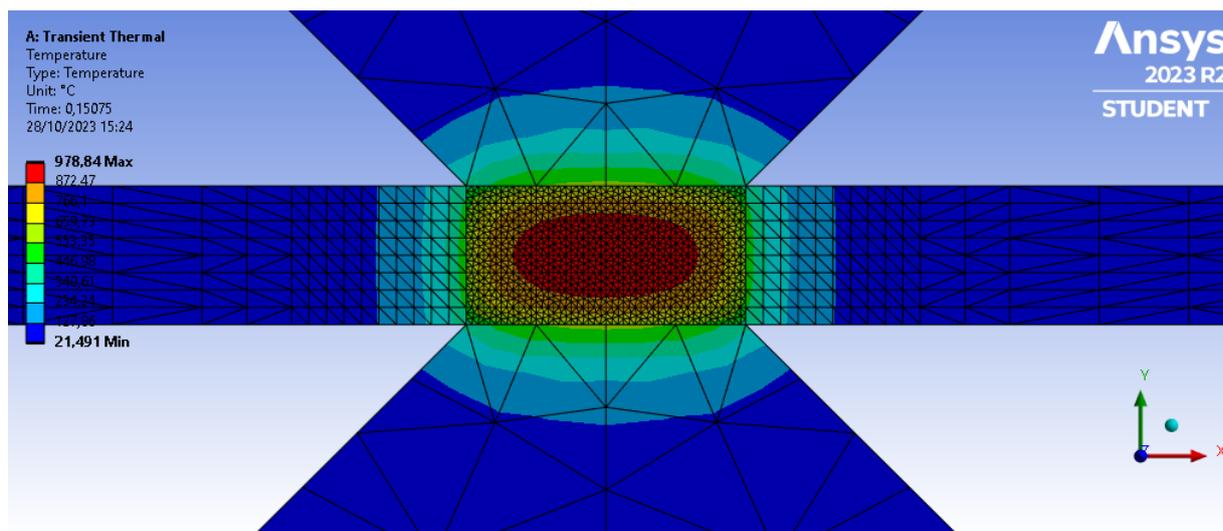


FIGURA 4. Gradiente térmico formado ao final do tempo de soldagem. (Autoria própria)

Na Figura 5 percebe-se que a região vermelha e a laranja, são as de formação da lentilha de solda, na qual a vermelha é a que obteve maior temperatura. Consegue-se ver que o ponto de solda formado tem diâmetro de, aproximadamente, 7 mm (verificando o diâmetro da região vermelha e laranja, onde cada elemento da malha representa 0,5 mm e essas regiões têm, aproximadamente, 14 elementos).

O diâmetro do ponto de solda esperado para esse tipo de aplicação, de soldagem em chapas de 2 mm de espessura é de 6,5 mm. Com a simulação obteve-se o resultado de 7 mm para o ponto de solda, obtendo um erro de, aproximadamente, 7,7 %.

Outro fator, é que a temperatura de contato entre chapa e eletrodo não pode ultrapassar 900 °C, ou seja, não causa o desgaste do eletrodo, já que em soldagens em alumínio provoca o desgaste dos eletrodos de cobre.

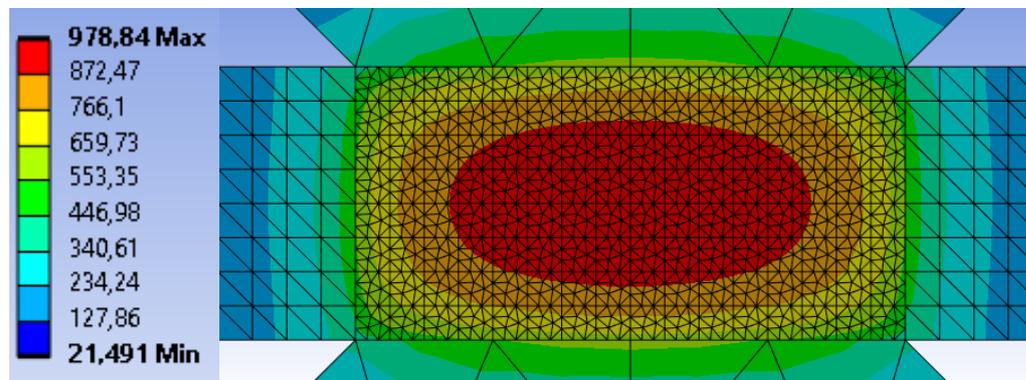


FIGURA 5. Detalhe do ponto de solda formado ao final do processo, com a escala de temperatura ao lado. (Autoria própria)

Consegue-se verificar que a pressão dos eletrodos tem pouca influência nos resultados, como previsto em literatura, já que a simulação foi, exclusivamente, térmica e chegou a resultados bem próximos dos experimentais, mesmo sem levar em consideração a pressão dos eletrodos.

3.1 Curvas de ciclo térmico

Ao decorrer do processo de soldagem, cada ponto do material passa por um aquecimento e um resfriamento específico e que varia de acordo com a posição e afastamento do ponto central da soldagem. Essa análise pode ser feita analisando as curvas de ciclo térmico, que representam esse processo de aquecimento e resfriamento para cada ponto. Para a simulação, foi realizado dois estudos.

O primeiro estudo foi analisar as curvas de ciclo térmico da região que está em contato com o eletrodo, de forma que os pontos foram selecionados a partir do ponto central de soldagem, determinado como ponto (0), a partir daí foram escolhidos 4 pontos variando 1 mm entre eles. O ponto a 1 mm do ponto central está determinado como "1", o que está a 2 mm está determinado como "2", o que está a 3 mm está determinado como "3" e o que está a 4 mm (final do eletrodo) está determinado como "4". A Figura 6 mostra as curvas de ciclo térmico para essa análise.

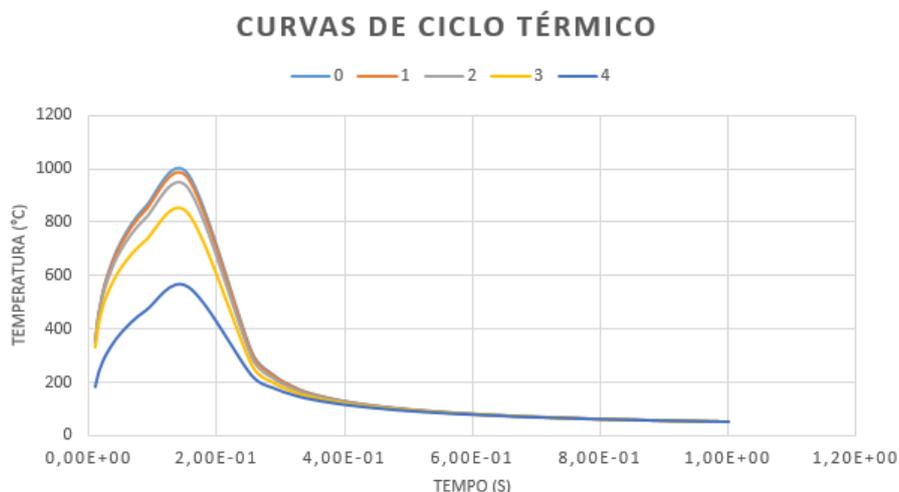


FIGURA 6. Curvas de ciclo térmico para os pontos que estão em contato com o eletrodo. (Autoria própria)

A próxima análise é verificar como se comporta a distribuição de calor dos pontos que estão à uma distância de até 5 mm depois do eletrodo, com o intuito de avaliar a Zona Afetada pelo Calor (ZAC). Foram dispostos 6 pontos, distantes 1 mm entre eles. O ponto que está em contato com o eletrodo está determinado como “0”, o ponto a 1 mm do ponto central está determinado como “1”, o que está a 2 mm está determinado como “2”, o que está a 3 mm está determinado como “3”, o que está a 4 mm está determinado como “4” e o que está a 5 mm (final da análise) está determinado como “5”. A Figura 7 mostra as curvas de ciclo térmico para essa análise.

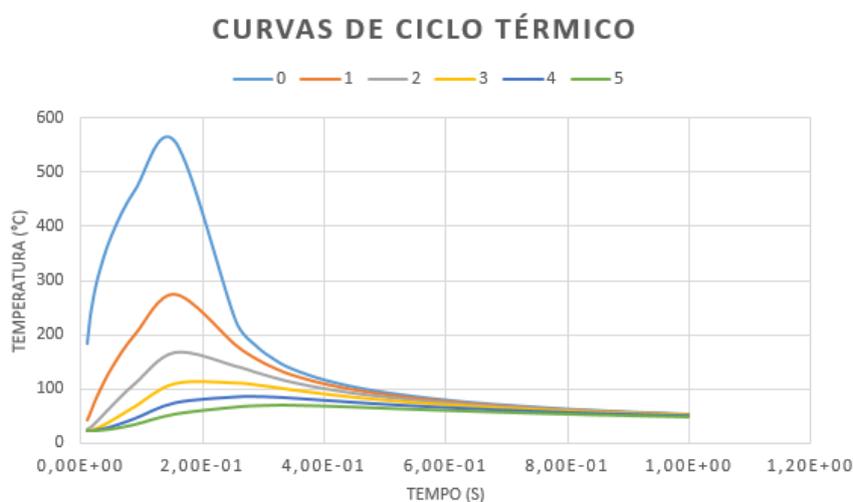


FIGURA 7. Curvas de ciclo térmico para os pontos que estão depois do eletrodo. (Autoria própria)

4. CONCLUSÃO

Na realização deste trabalho foi possível analisar o processo de soldagem por pontos e a distribuição de calor em uma chapa de alumínio com 2 mm de espessura por meio de simulação computacional por elementos finitos. Ao final deste trabalho a principal conclusão que foi obtida foi que:

A simulação computacional de uma solda ponto em chapas de alumínio se mostrou bem eficiente, chegando a resultados bem próximos dos previstos em literatura e do trabalho experimental tomado como base.

Outras conclusões, também possível com este trabalho, foram:

- A distribuição de calor obtida foi muito semelhante com a prevista em literatura;
- O erro foi de 7,7 %, mostrando que a simulação é bem eficaz para otimizar o processo de soldagem desse tipo;
- As curvas de ciclo térmico mostram que os pontos aquecem e resfriam de forma parecida;
- Por usar uma versão estudantil, não foi possível realizar um melhor controle de

malha, o que pode ter influenciado nos resultados;

- Verificou-se que a simulação utilizando o ANSYS® foi bem eficaz e chegou a resultado bem próximos dos previstos, mostrando que a utilização desse software para simulação de solda ponto é válida.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador e grande amigo, o professor Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga pela disponibilidade e disposição de me auxiliar, ajudar e me guiar durante a realização deste trabalho.

Ao PET Mecânica & Energia pelo suporte financeiro com a bolsa.

REFERÊNCIAS

- [1] OLIVEIRA, L. S. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM PROCESSO DE SOLDAGEM POR PONTOS PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS. 2018. P. 12, Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2018.
- [2] SANTOS, F. B.; MAINIER, F. B. Variáveis Relevantes para a Qualidade do Processo de Soldagem de Pontos por Resistência Elétrica Utilizado na Indústria Automobilística. III SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, Rio de Janeiro, ano 3, p. 12, 2006.
- [3] A. De (2002) Finite element modelling of resistance spot welding of aluminium with spherical tip electrodes, Science and Technology of Welding and Joining, 7:2, 119-124, DOI: 10.1179/136217102225002998
- [4] CHRISTOFOLETTI, G. M. Soldagem por pontos: Avaliação dos parâmetros de soldagem e das propriedades mecânicas da junta soldada. 2013. 68 p. Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- [5] GOLDAK, J. A.; AKHLAGHI, M. Computational welding mechanics. Springer, 2005.
- [6] KENNEDY R. ROSARIO; JOÃO C. R. COSTA; SÉRGIO M. BRANDÃO; MÁRCIO J. DIAS; ROSEMBERG F. N. RODRIGUES; WILSON P. SILVA. Determinação de Parâmetros Otimizados na Soldagem a Ponto por Resistência Utilizando Duas e Três Chapas em uma Indústria Automobilística. Revista Processos Químicos, v. 14, n. 28, p. 83-93, 24 abr. 2021.
- [7] WAINER, EMILIO.; BRANDI, SÉRGIO DUARTE.; MELLO, FÁBIO DÉCOURT HOMEM DE. Soldagem: Processos e Metalurgia, 2004.
- [8] ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. Transferência de Calor e Massa: Uma abordagem prática. 4. Ed. Porto Alegre: AMGH editora, 2012.
- [9] BRAUNOVIC, M.; MYSHKIN, N. K.; KONCHITS, V. V. Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [10] SILVA, Jeremy Michael Venâncio da; NETO, Francisco das Chagas Duarte; FRAGA, Francisco Edson Nogueira. AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE CALOR DE UM PROCESSO DE SOLDAGEM POR PONTOS ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.. In: Anais do Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia. Anais...Diamantina(MG) Online, 2023. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/cobicet2023/651445-AVALIACAO-DA-DISTRIBUICAO-DE-CALOR-DE-UM-PROCESSO-DE--SOLDAGEM-POR-PONTOS-ATRAVES-DO-METODO-DOS--ELEMENTOS-FINITO>. Acesso em: 26/10/2023
- [11] FRAGA, Francisco Edson Nogueira. Proposta de modelo para caracterizar susceptibilidade a distorção devido a soldagem em chapas de alumínio. 2009. 138 p. Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1608824>. Acesso em: 4 nov. 2022.
- [12] PENTEADO, Karin Mendes. Otimização da Solda de Pontos por Resistência Elétrica na Liga de Alumínio 5052-H32 através do Projeto e Análise de Experimentos (DOE). 2011. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - Mg, 2011.
- [13] American Welding Society. Welding Handbook - Volume 3. 9. ed. Miami, 2007
- [14] RWMA, Resistance Welding Manual. 4. Ed. E.U.A., 1989. 443 p.
- [15] Armansyah et al 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 426 012127
- [16] Cooper Development Association Inc. C18200. Disponível em: <<https://alloys.copper.org/alloy/C18200>>. Acesso em: 23 outubro 2022.
- [17] CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 7. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2002.