

AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE CALOR DE UM PROCESSO DE SOLDAGEM POR PONTOS ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.

Jeremy Michael Venâncio da Silva¹, Francisco Edson Nogueira Fraga²

¹Graduando Bel. em Ciência & Tecnologia, UFERSA, Mossoró-RN, E-mail: jeremy.silva@alunos.ufersa.edu.br

²Professor Orientador, DET/CE – UFERSA, Mossoró – RN. E-mail: nfraga@ufersa.edu.br

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 aço na indústria automobilística, com uma média de 2000 a 5000 pontos de solda na estrutura de um carro de passeio. Este trabalho tem como objetivo simular o processo de soldagem a resistência por pontos através do método dos elementos finitos para a determinação das curvas de ciclos térmicos e campos transientes de temperatura para analisar a distribuição de calor. O artigo apresenta inicialmente uma explanação sobre os conceitos principais que influenciam nesse processo de soldagem assim como os princípios físicos relacionados. Para a análise da simulação computacional, foi utilizado o software ANSYS® *Workbench* 22.2, na versão estudantil, juntamente com a extensão *Moving Heat Flux* no qual o modelo matemático foi solucionado pela ferramenta do software 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 material das chapas utilizado no referido trabalho é o aço SAE 1020 com espessura de 1 mm. 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. A simulação utilizando uma corrente de 9,2 kA e um tempo de duração da passagem da corrente de 0,28 s produziu uma solda ponto com uma lentilha de 4,2 mm de diâmetro, alcançando uma temperatura de fusão parcial no material de 1576,2 °C na região da lentilha. Esse resultado foi o que se mostrou mais compatível para a realização de uma solda ponto no material e dimensões considerados aqui e esses resultados de simulação convergiram para os resultados observados no trabalho adotado como referência. Adicionalmente foi possível obter computacionalmente curvas de ciclo térmico em diferentes pontos do material.

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

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. 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]

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. [3]

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. [4]

A solda ponto pode ser utilizada para união de chapas de até 6,35 mm, mas usualmente é utilizada para união de chapas de até 3,2 mm de espessura. [1]

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. [5]

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. Por exemplo, quanto maior a corrente de soldagem, para uma mesma pressão, menor será o tempo necessário para realizar a solda. Da mesma forma, quanto menor a corrente, maior será esse tempo necessário. Para cada variável desta há limites a serem respeitados, por exemplo a pressão, está limitada à resistência mecânica dos eletrodos de contato e também ao limite de escoamento da peça a ser soldada, a fim de evitar deformações plásticas tanto do material a ser soldado quanto deformação dos eletrodos. A corrente elétrica pode variar de 4 kA a cerca de 15 kA. [3]

Além dessas variáveis citadas, que chamamos de variáveis de influência diretas do processo, existem as variáveis indiretas, que também afetam o processo de soldagem, mas que não podem ser controladas ou otimizadas no processo. 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. A condutividade térmica se destaca como uma propriedade determinante nos processos de simulação computacional por elementos finitos, uma vez que esta varia em função da temperatura durante a evolução do processo de soldagem. [3]

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, que é um dos parâmetros de influência da soldagem por pontos, mas com uma menor importância para a análise da distribuição de calor. Alguns trabalhos experimentais na área, como o produzido por Guilherme Mendes Christofolletti, 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. [3]

Este trabalho tem como objetivo simular o processo de soldagem por pontos, 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. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Soldagem por resistência é o principal processo de união de chapas metálicas nas indústrias automobilísticas. Inventada por Elihu Thomson em 1877, que aplicou esse processo de soldagem para unir fios de cobre e percebeu que essa técnica poderia ser usada para a soldagem de outros materiais. A RSW (*Resistance Spot Welding*) trata-se da união de chapas metálicas sobrepostas ou em contato topo a topo através de uma solda formando um ponto de fusão (lentilha de solda), devido ao calor gerado pela resistência do material à passagem de corrente elétrica (efeito Joule) com a devida pressão dos eletrodos. Existem algumas variáveis que influenciam esse tipo de soldagem e que estão descritas a seguir. [5,6]

O processo de soldagem por resistência se diferencia de outros processos de soldagem por não necessitar de material de adição, uso de fluxos e gases de proteção. Como é de fácil operação, tem uma alta velocidade do processo, já que para realizar um ponto de solda, gasta-se menos de um segundo, permite a união de chapas de materiais diferentes e é um processo autógeno, ou seja, não consome material durante a soldagem. [3,7]

Esse processo tem grandes vantagens, como a simplicidade da operação, não necessitando habilidade do operador como em outros tipos de soldagem; simplicidade da manutenção; facilidade de automatizar o processo e utilização em linha de montagem, por este motivo, é amplamente utilizada na indústria automotiva; além de possuir uma alta produtividade. Dentre as desvantagens, pode-se citar o alto custo dos equipamentos e de implantação; necessidade de redes elétricas de grandes portes devido à altas correntes associadas ao processo; a limitação de soldar apenas peças de geometrias simples. [3]

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. [3]

2.1 Princípio da RSW

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. [8]

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

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. [8]

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

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 [J/s.mm. $^{\circ}\text{C}$]; “ ρ ” é a densidade do material [g/mm³], “ c ” é o calor específico [J/g. $^{\circ}\text{C}$] e “ q_0 ” é a fonte ou sorvedouro de calor [J/s.mm³].

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. $^{\circ}\text{C}$], 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, já que só em altas temperaturas que essas perdas térmicas são levadas em consideração. [9]

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

Na qual, “ ε ” representa a emissividade que varia de 0 para 1 (corpo negro), “ σ ” é a constante de Stefan-Boltzmann que vale $5,67 \times 10^{-8}$ [W.m².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 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. [8]

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

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. [8]

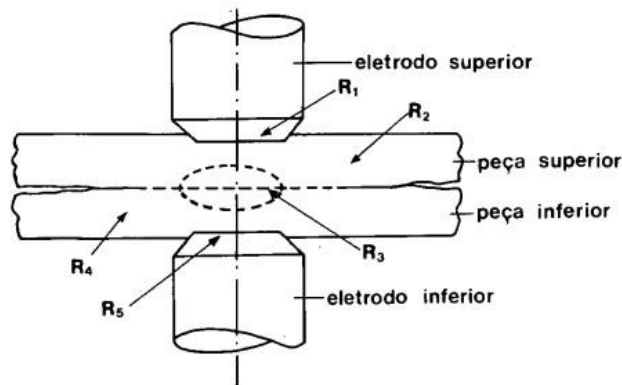


Figura 1. Resistência elétricas de contato. [8]

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. [10]

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

Na qual, “ ρ ” é a resistividade do material [$\Omega \cdot m$], “ L ” é a espessura da chapa [m] e a “ 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. [10]

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

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 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.

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. [8]

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

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 4,5 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 4,5 mm, o diâmetro do eletrodo tem que ser, no mínimo, 6,0 mm. [8]

2.2 Distribuição de Temperatura

A seção transversal do ponto de solda, de uma peça soldada, deve ter, ao final do processo, um gradiente térmico e as zonas termicamente afetadas segundo o diagrama de fases mostrado na Figura 2.

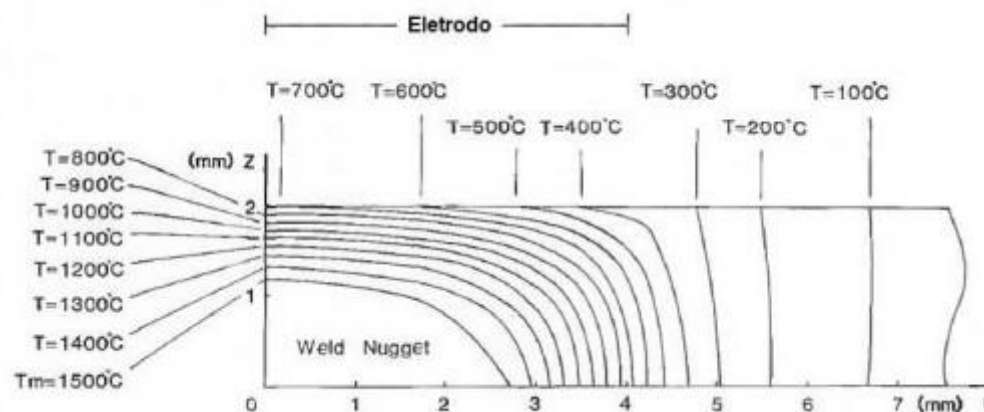


Figura 2. Modelo teórico do gradiente de temperatura para um aço. [11]

Para soldagem por pontos em chapas de aço-carbono, espera-se que no centro do ponto de soldagem apresente uma temperatura próxima a temperatura de fusão do material (1515 °C para aço SAE 1020) e é considerado como ponto de solda, para fins do cálculo do diâmetro do ponto de solda, toda região adjacente ao centro do ponto de solda com temperatura acima de 1150 °C, além do que a temperatura da chapa na superfície de contato entre a chapa e o eletrodo não deve exceder 900 °C, para evitar desgaste precoce do eletrodo de soldagem. [8]

Percebe-se que o local que se encontra o ponto de solda (*Weld Nugget*), é o local com a maior temperatura, que deve ser a temperatura de fusão do material, a partir desse ponto, a temperatura vai diminuindo à medida que se afasta dele. Ao final do trabalho, está inserido uma figura com o gradiente de temperatura obtido pela simulação computacional do modelo em questão, para fazer uma comparação com o modelo teórico.

3. METODOLOGIA

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 22.2, versão estudantil, utilizando uma função do ANSYS chamada de *Transient Thermal*, juntamente com a extensão *Moving 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. [12]

Os resultados das simulações foram validados com os resultados dos experimentos realizados no trabalho dos autores Ezequiel Franco Soares, João Pedro da Silva Santos e Luciano Marcos da Silva, de 2021, intitulado “Influência da corrente elétrica no processo de soldagem a resistência por pontos aplicados na montagem de carrocerias em uma indústria automotiva”. [13]

Para a simulação foi necessário realizar algumas adequações e ajustes para que a simulação pudesse se ajustar aos resultados experimentais. No software não há uma extensão que simule uma corrente passando por chapas para realizar a soldagem pelo efeito joule, então foi necessário utilizar a extensão *Moving Heat Flux*, para simular o fluxo de corrente como um fluxo de calor.

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 24 partes (a região central ficou com 24 chapas), com o intuito de promover um refino de malha melhor, além de proporcionar a realização do modelo de soldagem por pontos, com o intuito de fazer com que o fluxo de calor tenha partida em toda a região de contato do eletrodo com a chapa. Sendo assim, foi utilizado 26 pontos de partida para a soldagem, 26 caminhos para o fluxo de calor percorrer, além das faces para a distribuição de calor, que foram todas as faces do sistema.

Com isso, foi calculado a intensidade da fonte de calor, simulando que ela vai partir dos dois eletrodos e se encontrando no contato das chapas. Para isso, foi utilizado uma velocidade da fonte de calor de 0,0035714 m/s, um tempo de realização de soldagem de 0,28 s, um raio de soldagem igual ao raio do eletrodo que é de 0,0315 m.

3.1 Geometria

Para a criação do modelo, foram adotadas chapas com espessura de 1 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 1 mm, que são as mesmas dimensões adotadas no trabalho de referência. [13]

O círculo que está descrito na imagem, representa o eletrodo de soldagem que está representado na Figura 3. Os desenhos foram feitos utilizando a versão estudantil do AutoCAD 2023. [13]

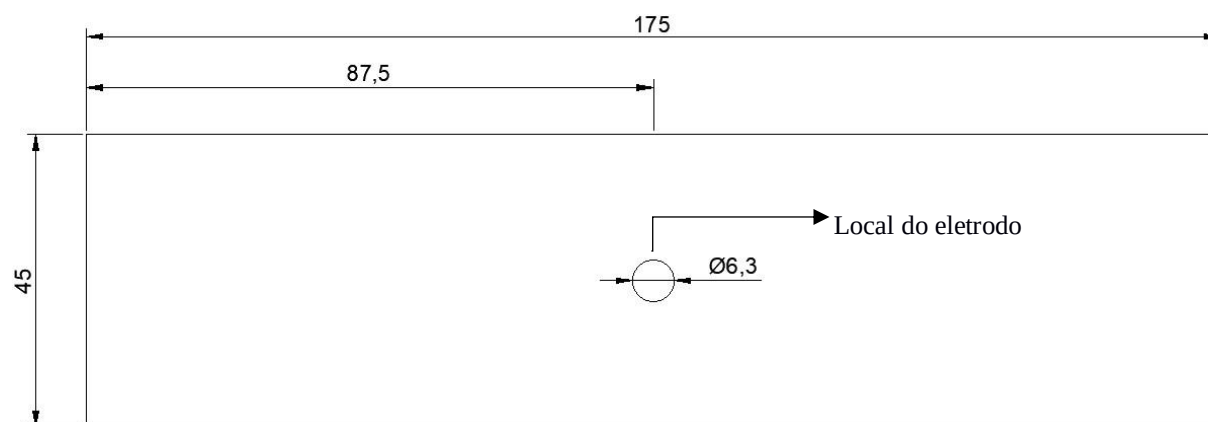


Figura 3. Dimensões (em milímetros) do modelo utilizado. (Autoria própria)

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 está mostrada na Figura 3. Os eletrodos utilizados são de cobre e de codificação RWMA classe 2. [7,14]

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. [8]

A modelagem das chapas e dos eletrodos foi realizada na versão estudantil do software de modelagem Autodesk Inventor Professional 2023 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.

3.2 Propriedades dos materiais

Foram utilizadas chapas 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 tabelados e foi considerada a variação das propriedades

com a temperatura. As propriedades do aço estão descritas 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 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. [7,16]

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

Os valores 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 (Ω.m)
SAE 1020	1,6 x 10 ⁻⁷
RWMA classe 2	2,16 x 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. [9]

3.3 Parâmetros de soldagem

Os parâmetros de soldagem utilizados neste trabalho tiveram como base os valores do trabalho experimental [13], onde foi realizada a soldagem por pontos para várias intensidades de correntes e buscou-se verificar qual valor de corrente melhor se ajustava para soldagem de chapas de aço de baixo teor de carbono com espessura de 1 mm. Os valores foram descritos na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros de soldagem utilizados. [13]

Nº da amostra	Corrente (kA)	Tempo de soldagem (s)
1	5,2	0,28
2	7,2	0,28
3	9,2	0,28
4	11,2	0,28
5	13,2	0,28

As amostras foram realizadas no trabalho experimental citado acima. Seus resultados foram verificados através de simulação computacional no presente trabalho.

3.4 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:

$$RT = 6,44877 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Utilizando esse valor de resistência calculado, os parâmetros de tempo e corrente estabelecidos, encontra-se os valores do fluxo de calor para cada corrente, de acordo com a Equação 1. Os valores estão listados na Tabela 5.

Tabela 5. Valores do fluxo de calor para cada valor de corrente. (Autoria própria)

Corrente (kA)	Fluxo de calor ($W \cdot m^{-2}$)
5,2	15662844,13
7,2	30028174,55
9,2	49027482,52
11,2	72660768,05
13,2	100928031,1

3.5 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 6.

Tabela 6. Parâmetros da malha utilizada. (Autoria própria)

Região	Tipo de malha	Tamanho da malha
Núcleo da chapa	Tetraédrica	0,1 mm
Chapa	Automática	1 mm
Eletrodo	Tetraédrica	1 mm

A região denominada como “Núcleo da chapa” é a que está em contato direto com os eletrodos, e como é nessa região que acontece a soldagem, a formação e crescimento da lentilha de solda, buscou-se fazer um refino de malha melhor para se obter melhores resultados, já que essa região é a de maior interesse no trabalho.

A malha apresentou um número de 122.797 nós e 46.776 elementos. A Figura 4 mostra o corte de seção transversal do modelo utilizado, colocando em evidência a malha utilizada.

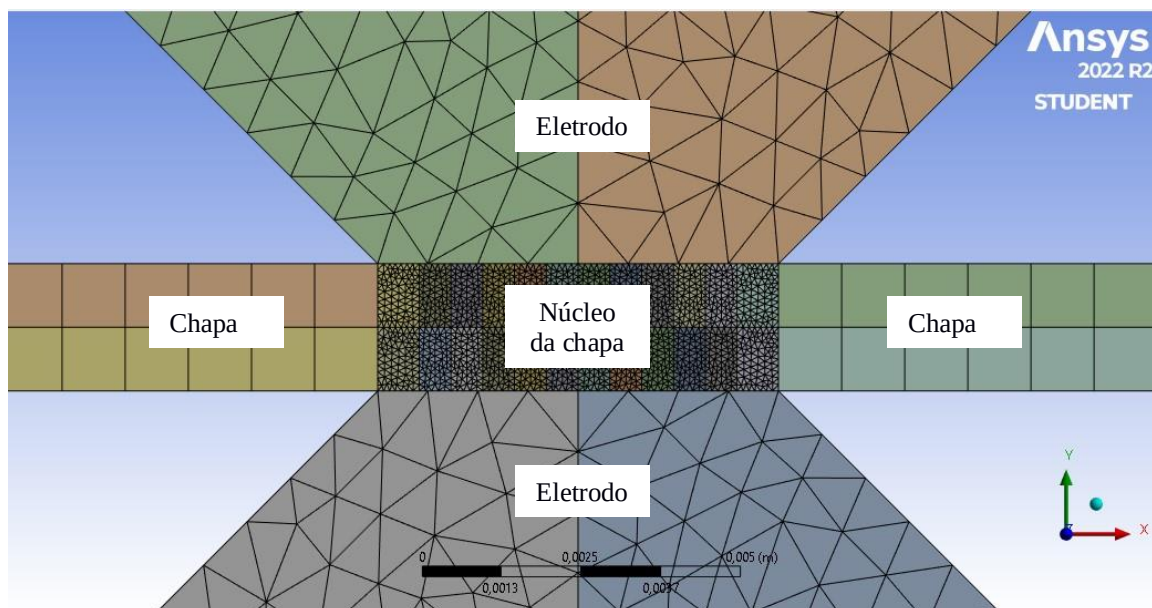


Figura 4. Malha vista em corte de seção transversal do modelo. (Autoria própria)

3.6 Resultados

Inicialmente, realizou-se um teste de malha, para verificar com qual tamanho de elemento conseguiu-se o melhor resultado e que mais se aproximasse dos resultados experimentais, buscando uma melhor adequação do modelo utilizado. Esse estudo de malha foi realizado somente na região do núcleo da chapa, mostrada na Figura 4 e para a corrente de 9,2 kA. Os resultados do teste de malha estão mostrados na Tabela 7.

Tabela 7. Estudo de malha realizado. (Autoria própria)

Tamanho do elemento (mm)	Temperatura máxima obtida (°C)
1	1328,6
0,5	1443,4
0,2	1512
0,1	1576,2

Também 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 temperatura próxima da esperado e um ponto de solda parecido ao disposto em literatura. Quando se utilizou a malha automática, as temperaturas ficaram muito diferentes do esperado, além do que o ponto de solda ficou deformado e em desconformidade do que está em literatura.

Como mostrado na Tabela 7, percebe-se que o refino de malha permite que a temperatura máxima obtida na simulação aumente e, com isso, se aproxime mais dos resultados experimentais. O estudo de malha se limitou até um tamanho de elemento de 0,1 mm devido a limitações da versão estudantil do software.

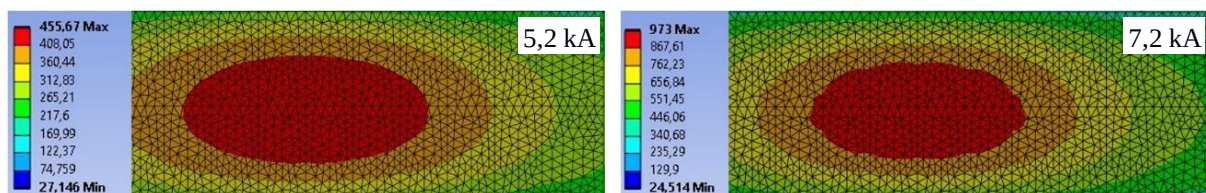
Os resultados das simulações juntamente com todos os dados a respeito dos campos transientes de temperatura, ciclo térmico, temperatura máxima obtida em certo ponto, foram obtidas a partir do ANSYS®, utilizando o pós-processamento (*post-processing*).

Foram feitas simulações para cada valor de corrente elétrica, com o intuito de validar, computacionalmente, o resultado experimental descrito no trabalho dos autores Ezequiel Franco Soares, João Pedro da Silva Santos e Luciano Marcos da Silva, de 2021, intitulado “Influência da corrente elétrica no processo de soldagem a resistência por pontos aplicados na montagem de carrocerias em uma indústria automotiva”; no qual foram realizados testes metalográficos nos corpos de prova, para analisar os resultados. A Tabela 8 mostra os resultados encontrados. [13]

Tabela 8. Resultado computacional e experimental para cada valor de corrente. (Autoria própria)

Corrente (kA)	Resultado experimental	Temperatura máxima na simulação (°C)	Resultado simulação
5,2	REPROVADO	455,67	REPROVADO
7,2	REPROVADO	973	REPROVADO
9,2	APROVADO	1576,2	APROVADO
11,2	REPROVADO	1752	REPROVADO
13,2	REPROVADO	2029,6	REPROVADO

Para todas as amostras a simulação e o resultado experimental tiveram uma grande semelhança e foi permitido verificar que a simulação foi válida para todas as correntes. Para as correntes baixa (5,2 e 7,2 kA) o ponto de solda não foi realizado devido a temperatura máxima atingir valores bem inferiores à temperatura de fusão do material. Para a corrente de 9,2 kA, o resultado experimental afirmou, depois de testes metalográficos, que o ponto de solda apresentou um bom aspecto, e este dado foi corroborado pela simulação, na qual a temperatura máxima foi de 1576,2 °C, passando um pouco da temperatura de fusão (1515 °C). Percebeu-se que o ponto de solda foi realizado e a temperatura máxima não foi tão alta para gerar tensões térmicas e induzir o surgimento de trincas. Para as correntes maiores (11,2 e 13,2 kA) o ponto de solda foi realizado, mas a temperatura máxima passou muito da temperatura de fusão do aço, confirmando o resultado experimental de surgimento de trinca devido a tensões térmicas observadas no trabalho experimental [13] de referência. A Figura 5 mostra o gradiente térmico para as várias correntes utilizadas na simulação.



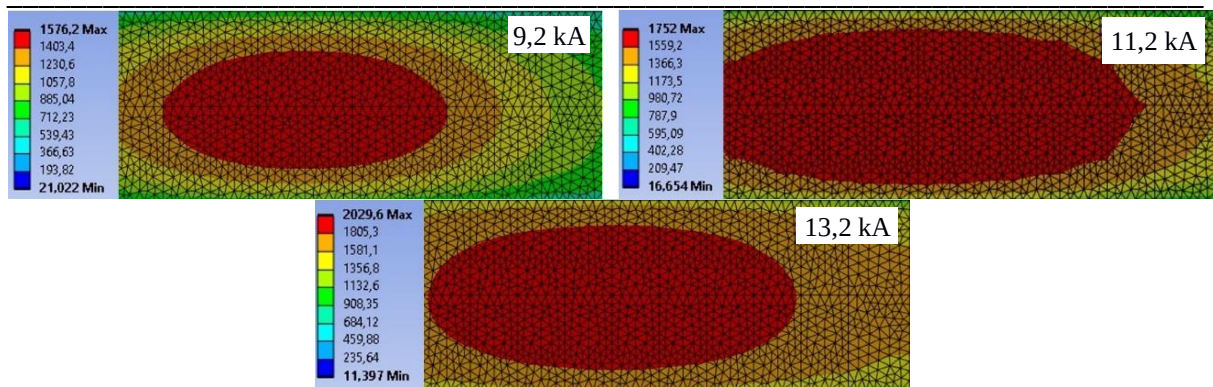


Figura 5. Comparativo de gradiente térmico para cada corrente utilizada no trabalho. A ordem das correntes utilizadas foi a seguinte: 5,2 kA; 7,2 kA; 9,2 kA; 11,2 kA e 13,2 kA. (Autoria própria)

Analisando a Figura 5 consegue-se perceber que o aumento da corrente de soldagem promove um aumento do diâmetro do ponto de solda, mostrando que a simulação está alinhada com o que diz a literatura estudada que afirma que o aumento da corrente promove um aumento no diâmetro do ponto de solda e um aumento da resistência mecânica das juntas soldadas, porém aumenta o tamanho da ZAC (Zona Afetada por Calor) e pode favorecer o surgimento de trincas. A região destacada em vermelho representa o local onde há a maior temperatura.

Para as correntes de 5,2 e 7,2 kA a região vermelha é a que apresenta a maior temperatura, mas essa temperatura não chegou nem próximo da temperatura de fusão, portanto para essas temperaturas essa região só representa a região de maior temperatura, não realizando o ponto de solda.

Para a corrente de 9,2 kA o ponto de solda é representado pelas regiões vermelha e laranja, já que é considerado ponto de solda toda região com uma temperatura maior que 1150 °C e, para essa corrente, a região vermelha conseguiu atingir a temperatura de fusão do aço e a região laranja apresenta uma temperatura mínima de 1230,6 °C, portanto, o ponto de solda é toda região compreendida pelas cores vermelha e laranja.

Para as correntes de 11,2 e 13,2 kA o ponto de solda é representado pelas regiões vermelha, laranja e amarela, já que apresentam, para essas regiões, temperaturas acima de 1150 °C. Portanto, o ponto de solda não ficou conforme literatura, já que o diâmetro do ponto de solda foi igual ou maior ao diâmetro do eletrodo e, nesse caso, poderia causar desgaste do eletrodo e sua fusão com as chapas.

A Figura 6 mostra o gradiente térmico formado na região da lentilha de solda instantaneamente após o tempo determinado de soldagem (0,28 s), para a corrente de 9,2 kA, que foi a que mais se adequou ao modelo utilizado e a que foi aprovada no experimento e na simulação, pois produziu uma lentilha de solda de 4,2 mm e alcançou uma temperatura de fusão compatível para a realização do processo de soldagem (temperatura próxima da temperatura de fusão do material).

A temperatura máxima esperada no processo é a temperatura do ponto de fusão do aço SAE 1020 que é de, aproximadamente, 1515 °C. A simulação com a corrente de 9,2 kA foi a que mais se aproximou, chegando a 1576,2 °C, apresentando um erro de, aproximadamente, 4 %.

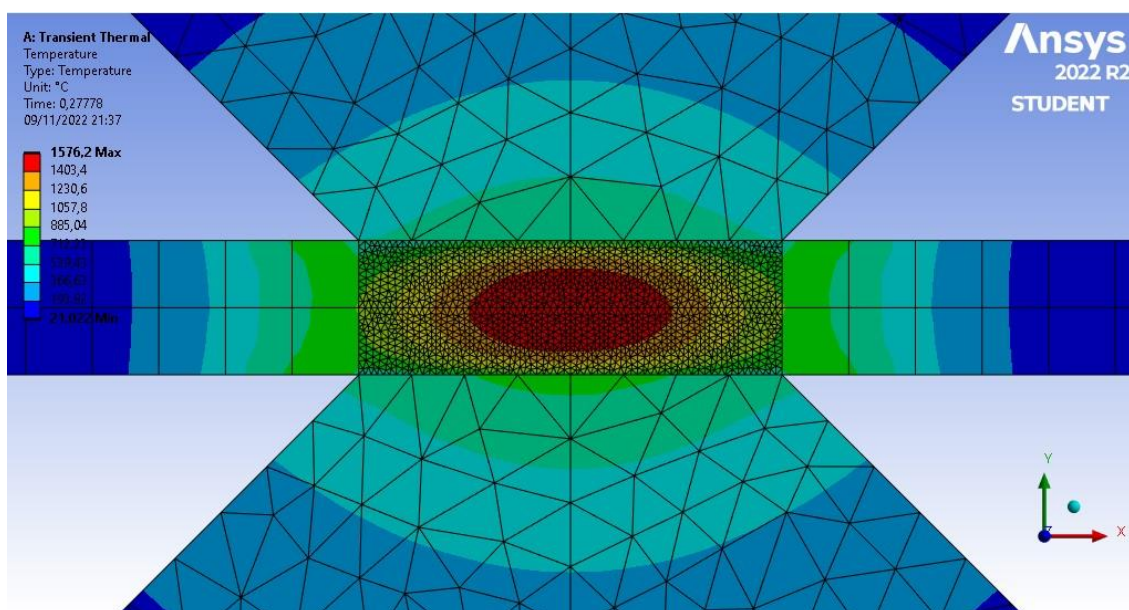


Figura 6. Gradiente térmico formado ao final do tempo de soldagem para a corrente de 9,2 kA visto em corte de seção transversal. (Autoria própria)

Na Figura 6 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, 4,2 mm (verificando o diâmetro da região vermelha e laranja, onde cada elemento da malha representa 0,1 mm e essas regiões têm, aproximadamente, 42 elementos), como mostrado na Figura 6 e o esperado para esse tipo de soldagem é 4,5 mm. Outro fator, é que a temperatura de contato entre chapa e eletrodo não pode ultrapassar 900 °C, e na simulação verificou-se que para a corrente de 9,2 kA a temperatura máxima de contato entre a chapa e o eletrodo é 885,04 °C.

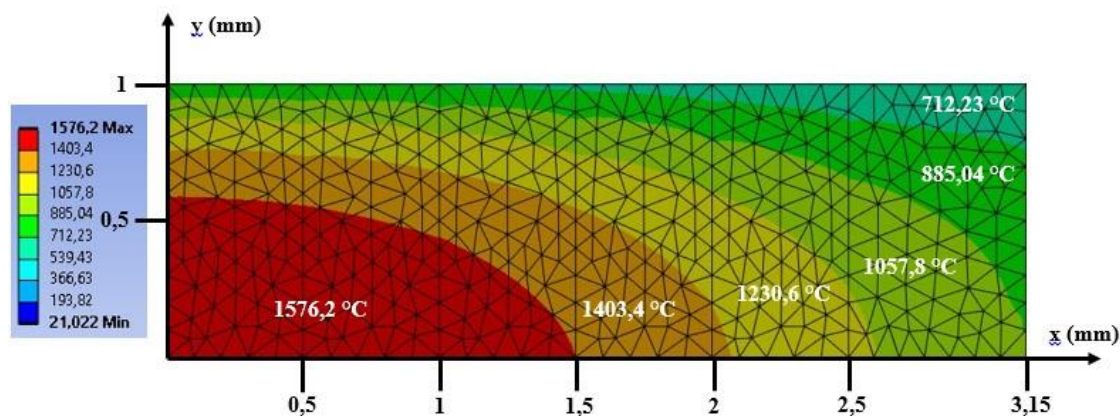


Figura 7. Gradiente de temperatura formado para a corrente de 9,2 kA. (Autoria própria)



Figura 8. Representação do ponto de solda para a corrente de 9,2 kA. O diâmetro aproximado do ponto de solda é de 4,1 mm. Adaptado de [13]

Comparando a Figura 7 com a Figura 8, ou seja, o resultado da simulação com a análise metalográfica feita no trabalho de referência [13], percebe-se que se obteve grande semelhança. No trabalho prático obteve penetração de, aproximadamente, 0,66 mm e um diâmetro do ponto de solda de, aproximadamente, 4,1 mm. Através da análise da imagem da simulação, percebe-se que o diâmetro do ponto de solda foi de, aproximadamente, 4,2 mm e uma penetração de, aproximadamente, 0,7 mm. Para o cálculo do diâmetro leva-se em consideração que a Figura 7, mostra só metade da região de soldagem, portanto, a região vermelha e laranja apresentam 21 elementos, simbolizando o raio do ponto de solda, sendo assim, o diâmetro é de 4,2 mm.

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.

O gradiente térmico de temperatura após o tempo de soldagem está mostrado na Figura 7 e assemelhou-se muito como modelo teórico que foi mostrado na Figura 2. Apresentaram-se alguns erros por conta da espessura das chapas que foram utilizadas para esse trabalho e o modelo teórico encontrado era para chapas de maior espessura.

3.7 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 com as curvas de ciclo térmico, que representam esse processo de aquecimento e resfriamento para cada ponto. Para a simulação, a temperatura foi medida em seis pontos diferentes, são eles: 0,0 mm (No ponto central do ponto de solda); 0,6 mm; 1,2 mm; 1,8 mm; 2,4 mm e 3,15 mm.

As medidas das temperaturas foram obtidas usando uma ferramenta do ANSYS® chamada de *Named Selection*, onde pode-se escolher pontos específicos do material com o intuito de se obter a variação de temperatura em cada ponto no tempo que foi informado no software. Para a análise o tempo total foi de 0,5 segundos, separados em tempo de aquecimento e resfriamento. O sistema foi aquecido até 0,28 segundos e depois analisado seu resfriamento até 0,5 segundos. A Figura 10 mostra as curvas de ciclo térmico.

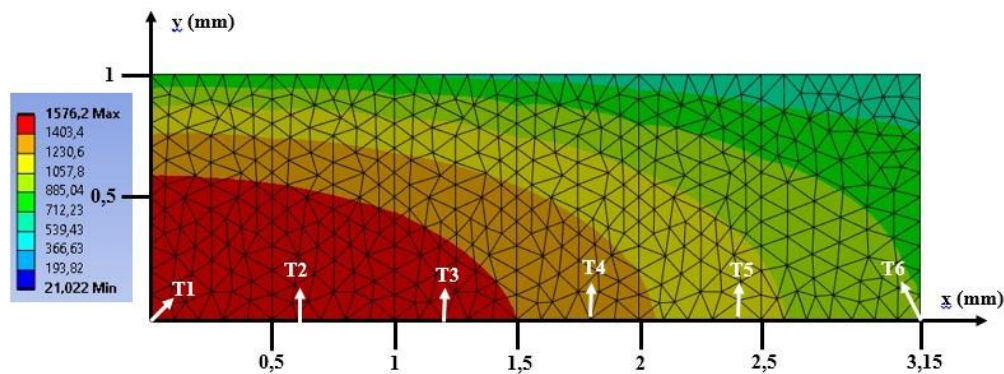


Figura 9. Localização dos pontos (termopares) que foram obtidos os dados. (Autoria própria)

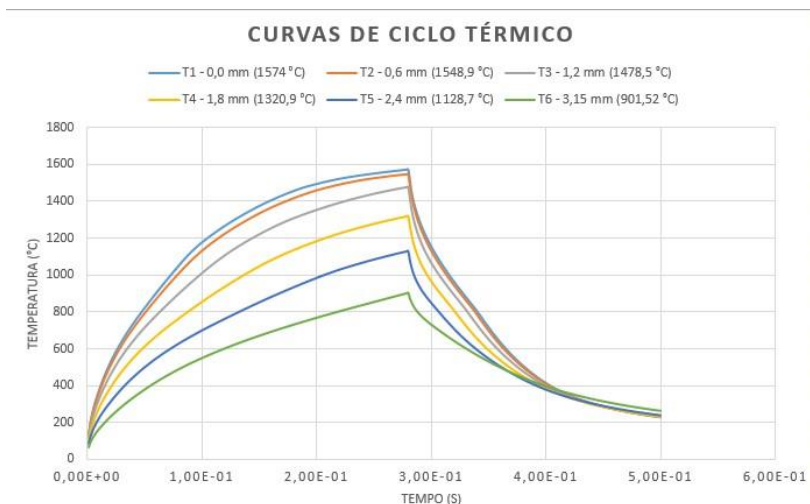


Figura 10. Curvas de ciclo térmico obtidas na análise numérica. (Autoria própria)

A Figura 9 mostra a localização dos pontos de obtenção dos dados para as curvas de ciclo térmico, esses pontos simulam termopares. A Figura 10 mostra as curvas de ciclo térmico, a legenda mostra a identificação do ponto de obtenção de dados, a distância do ponto de obtenção dos dados com relação ao centro do crescimento da lentilha de solda e entre parênteses estão descritas as maiores temperaturas obtidas para cada ponto, verificando-se que o ponto central (0,0 mm) é o que obteve a maior temperatura do sistema, pois é nesse ponto que começa o processo de soldagem. O principal intuito das curvas de ciclo térmico é analisar a forma de aquecimento e resfriamento do sistema.

4. CONCLUSÃO

Na realização deste trabalho foi possível analisar o processo de soldagem por pontos e a distribuição de calor em uma chapa de aço SAE 1020 com 1 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 utilizando uma corrente de 9,2 kA e um tempo de duração da passagem da corrente de 0,28 s produziu uma solda ponto com uma lentilha de 4,2 mm de diâmetro, alcançando uma temperatura de fusão parcial no material de 1576,2 °C na região da lentilha. Esse resultado foi o que se mostrou mais compatível para a realização de uma solda ponto no material e dimensões considerados aqui e esses resultados de simulação convergiram para os resultados observados no trabalho adotado como referência.

Outras conclusões, também possível com este trabalho, foram:

- As correntes de 5,2 e 7,2 kA não realizaram a soldagem, pois a temperatura máxima obtida nessas correntes não foram suficientes para realizar a soldagem;
- As correntes de 11,2 e 13,2 kA realizaram o processo de soldagem, mas chegaram a temperaturas que passaram muito do ponto de fusão do material, ou seja, além de promover desgaste no eletrodo de soldagem, induzem o surgimento de trincas por tensões térmicas nas chapas;
- O diâmetro do ponto de solda aumentou com o aumento da corrente;
- A distribuição de calor obtida foi muito semelhante com a prevista em literatura;
- As curvas de ciclo térmico mostraram que, independentemente da posição, elas têm formato parecido e 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.

5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros pode-se utilizar um modelo que considere a pressão exercida pelos eletrodos, a utilização de uma fórmula, para o cálculo de resistência elétrica de contato, que melhor se adeque ao sistema; um melhor refino de malha; a utilização de abordagens diferentes para a realização da simulação e a utilização de outros softwares de MEF para realizar a simulação.

6. 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 e durante toda a graduação.

Ao PET Mecânica & Energia pelo suporte financeiro com a bolsa e aos meus colegas e companheiros do Programa de Educação Tutorial de Engenharia Mecânica & Energia, Hugo Eduardo Tavares Vieira e Francisco das Chagas Duarte Neto, pelo auxílio e parceria durante a realização das simulações deste referido trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [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] CRISTOFOLETTI, 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.
- [4] GOLDAK, J. A.; AKHLAGHI, M. Computational welding mechanics. Springer, 2005.
- [5] 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.
- [6] BRANCO, H. L. O., Avaliação de capas de eletrodos utilizados na soldagem por resistência de chapas galvanizadas automotivas. UFPR – Curitiba, 2005.
- [7] RWMA, Resistance Welding Manual. 4. Ed. E.U.A., 1989. 443 p.
- [8] WAINER, EMILIO.; BRANDI, SÉRGIO DUARTE.; MELLO, FÁBIO DÉCOURT HOMEM DE. Soldagem: Processos e Metalurgia, 2004.
- [9] ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. Transferência de Calor e Massa: Uma abordagem prática. 4. Ed. Porto Alegre: AMGH editora, 2012.
- [10] BRAUNOVIC, M.; MYSHKIN, N. K.; KONCHITS, V. V. Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [11] HAN, Z. et al. Resistance Spot Welding: A Heat Transfer Study. Welding Journal, USA, v.69, n.9, p.363-371, Jun. 1989.
- [12] 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.
- [13] SOARES, E. F.; SANTOS, J. P.; SILVA, L. M. INFLUÊNCIA DA CORRENTE ELÉTRICA NO PROCESSO DE SOLDAGEM A RESISTÊNCIA POR PONTOS APLICADOS NA MONTAGEM DE CARROCERIAS EM UMA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA. 2021. P. 23, Artigo Científico – Repositório Universitário da Ânima (RUNA).
- [14] American Welding Society. Welding Handbook - Volume 3. 9. ed. Miami, 2007.
- [15] 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.
- [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.