

Simulação por E.F. de uma solda TIG longitudinal em um tubo de aço inoxidável AISI 304

Francisco das Chagas Duarte Neto¹, Francisco Edson Nogueira Fraga²

¹Graduando Bel. em Ciência & Tecnologia, UFRSA, Mossoró-RN, E-mail: duarte.neto@hotmail.com

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

Resumo: Foi realizada uma simulação computacional utilizando o método de elementos finitos para modelar o fluxo de calor presente no processo de soldagem TIG autóloga em um tubo de aço inoxidável AISI 304, com dimensões de 200 mm x 66,66 mm x 60,66 mm, para seu comprimento, diâmetro externo e diâmetro interno, respectivamente. Foi utilizado a versão estudantil do software ANSYS® em conjunto com a extensão *Moving Heat Flux* para a modelagem da fonte de calor na superfície do tubo. Na simulação foram inseridas propriedades termofísicas (condutividade térmica, calor específico e densidade) do material variando com a temperatura levando em consideração uma análise térmica transiente de calor solucionada por um modelo matemático inserido ao ANSYS® denominado *Transient Thermal*. Todavia a simulação ainda necessita do fornecimento das perdas de calor durante o processo de soldagem, foram consideradas perdas por radiação, condução e convecção. Com o intuito de obter a distribuição de temperatura no material e as curvas de ciclo térmico em todos os pontos, contudo os pontos de maior relevância estão dispostos próximo ao cordão de solda. A validação do modelo foi feita com base em uma literatura que utilizou de termopares tipo K para fazer a medição de temperatura na superfície do material, as medições ocorreram em 3 mm, 8 mm, 13 mm, 18 mm e 23 mm de distância do cordão de solda. Comparando os resultados da simulação com os resultados experimentais da literatura de referência, é possível perceber que os valores do procedimento numérico convergiram com os valores do procedimento experimental. Com isso, foi possível concluir que com o modelo matemático para a resolução do problema, os parâmetros de soldagem e as condições de contorno adotadas, foi possível obter resultados de temperatura de pico de 452,15 °C a 3 mm do cordão de solda, 263,60 °C a 8 mm, 178 °C a 13 mm, 134,02 °C a 18 mm e 113,09 °C a 23 mm, bem próximos dos valores obtidos na literatura de referência, especialmente os resultados mais próximos do cordão.

Palavras-chave: Simulação computacional; Soldagem TIG; Distribuição de temperatura;

1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem realiza a união de metais de maneira confiável, eficiente e prática. É amplamente utilizado nas indústrias automobilística, marítima, nuclear, aeroespacial e em diversos outros setores. Entretanto, existem algumas limitações que afetam este processo e que podem ser analisadas previamente para que os erros sejam minimizados. Em razão do aquecimento local causado pela transferência de calor no processo de soldagem, ter o controle dos ciclos térmicos é fundamental. [1]

A distribuição de temperatura em um processo de soldagem com chapas de aço inoxidável AISI 304 foi medida experimentalmente com a utilização de termopares, deixando evidente que, a distribuição de temperatura em um processo de soldagem é dependente de variáveis como: fluxo de calor, velocidade de soldagem, gradiente de temperatura e inúmeras condições de soldagem [1,9,12,14]. Contudo, todas essas condições podem dificultar a análise matemática do problema, tornando a solução analítica do processo de soldagem complexa ou inviável de ser realizada, dessa forma, é necessário a utilização de um software para realizar a análise numérica, a modelagem e a simulação do processo de soldagem. O método dos elementos finitos (MEF) tem sido muito utilizado atualmente para a resolução desses problemas, o MEF permite levar em consideração as propriedades termofísicas (condutividade elétrica, densidade e calor específico) do material variando com a temperatura, as perdas de calor por condução, convecção e radiação, além da possibilidade de modelar estruturas com geometrias complexas [11]. Obtendo experimentalmente distribuições de temperatura em juntas de tubos de aço AISI 304 soldados e comparando aos resultados com simulações por elementos finitos, foi possível perceber que o modelo de distribuição de calor na superfície obteve resultados confiáveis prevendo com precisão os ciclos térmicos durante a soldagem dos tubos. [10]

O presente trabalho tem como objetivo uma análise numérica-computacional do processo de soldagem TIG autólogo, com a intenção de obter a distribuição de temperatura e fluxos de calor para a visualização dos ciclos

térmicos em um tubo de aço inoxidável AISI 304. O software *ANSYS®* foi usado para simular o processo de transferência de calor no processo de soldagem fazendo o uso do método dos elementos finitos para discretizar o problema, introduzindo o modelo matemático para regime transiente (*Transient Thermal*) e todas as variáveis, parâmetros de soldagem, aporte térmico e condições de contorno. A validação dos resultados foi feita por meio da comparação dos resultados experimentais apresentados no trabalho de Attarha e Sattari-Far, de 2011, intitulado “*Study of welding temperature distribution in thin welded plates through experimental measurements and finite element simulation. Journal of Materials Processing Technology*” [1].

2. DESENVOLVIMENTO

O processo de simulação de soldagem TIG autógena requer análises analíticas, experimentais e numéricas para que seja validado. Os tópicos a seguir esclarecem a necessidade do uso da simulação na soldagem com resultados obtidos, deixando claro que são confiáveis, além de tratar da análise térmica relacionada a transferência de calor e condições de contorno para modelar as perdas de calor durante o processo de soldagem e por fim fará um esclarecimento sobre o modelo de fonte de calor adotado na simulação.

2.1 Simulação do processo de soldagem TIG autógena

A soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (Gas Tungsten Arc Welding – GTAW) é um processo no qual a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento e fusão destas através de um arco elétrico estabelecido entre o eletrodo não consumível e as peças a serem soldadas. Uma característica importante deste processo é o excelente controle da energia transferida para a peça, tornando o processo bastante adequado para a soldagem de peças de pequena espessura e, permitindo a soldagem de materiais de difícil soldabilidade, com ótimos resultados. As principais aplicações industriais da soldagem TIG são: costura e união de topo de tubos de aço inoxidável, soldagem de alumínio, magnésio e titânio [4]. Contudo, a análise analítica dos parâmetros de soldagem e condições de contorno vem sendo substituída pela análise numérica por ter apresentado maior praticidade e confiabilidade nos resultados, necessitando apenas de um procedimento experimental para ser comparado e validado. Uma literatura usou a modelagem numérica da soldagem TIG em um aço inoxidável AISI 304 para investigar a variação de tensão, corrente e velocidade de soldagem e seus resultados na distribuição de temperatura, com resultados obtidos apresentando erros mínimos, foi possível perceber que com o aumento da corrente mantendo a tensão e velocidade constante, a temperatura na linha de soldagem aumentou [13].

A simulação pode ser feita por diferentes caminhos e mesmo assim obter resultados confiáveis, como por exemplo utilizando o software *ANSYS®* e em conjunto elaborando rotinas em *MATLAB®* para realizar o movimento da tocha durante o processo de soldagem TIG, obtendo resultados numéricos em concordância com os resultados experimentais, havendo um desvio máximo de 4,35% [11]. É possível obter resultados de distribuição de temperatura no processo de soldagem TIG autógena de uma chapa de aço inoxidável AISI 304, utilizando rotinas em *APDL* (ANSYS Parametric Design Language) no próprio software *ANSYS®* para modelar o movimento da fonte de calor gaussiana sobre a chapa, obtendo resultados confiáveis com erros percentuais máximos da ordem de 4,347% [12]. Como também seguir o caminho usado no presente trabalho, a utilização de uma extensão do software *ANSYS®* denominada *Moving Heat Flux* na qual consegue modelar uma fonte de calor gaussiana e determinar o movimento da tocha sobre a superfície do material, apresentando resultados confiáveis [5].

2.2 Análise térmica

Durante o processo de soldagem parte da energia disponível é dissipada para a atmosfera em três mecanismos diferentes de transferência de calor, sob a forma de calor irradiante (radiação), outra pequena fração perde-se por convecção no meio gasoso que protege a poça de fusão e a terceira parte é realmente usada para a execução da soldagem. A condução de calor através de um sólido no domínio de tempo t e referido a um sistema cartesiano triortogonal (x,y,z) pode ser expresso pela Equação 1. [3]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_{(r)} = \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Onde T é a temperatura em °C do material, k é a condutividade térmica do material, ρ (kg/m^3) é a densidade do material, c ($J/kg \cdot K$) é o calor específico e $q_{(r)}$ (W) é a fonte de calor.

As perdas por convecção podem ser dadas pela equação de Newton para transferência de calor redigida pela Equação 2, enquanto as perdas por radiação são dadas pela lei de Stefan-Boltzmann redigida pela Equação 3. [4]

$$q_c = h_c(T - T_0) \quad (2)$$

Onde T é a temperatura da superfície externa, T_0 é a temperatura do gás ou líquido e h_c é o coeficiente de convecção. O coeficiente de convecção depende das condições de convecção na superfície sólida, além das

propriedades da superfície e do ambiente. [4]

$$q_r = \varepsilon_r \sigma_r (T^4 - T_0^4) \quad (3)$$

Onde ε_r é a emissividade da superfície do material e σ_r é a constante de Boltzman dada por $5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-4}$. O valor da emissividade depende da temperatura no processo de soldagem, em geral, quanto maior a temperatura, maior a emissividade. [4]

2.2.1 Fonte de calor gaussiana

Para que haja boa convergência entre os resultados teóricos e simulados durante a análise térmica de um processo de soldagem, a escolha da modelagem da fonte de calor é extremamente importante. A maior dificuldade em representar de forma satisfatória a distribuição de temperaturas durante a soldagem é a modelagem da fonte de energia. [5]

Uma fonte de calor muito utilizada é a do tipo Gaussiana, onde o único parâmetro de regulação da fonte é o sigma (σ) que representa a distância radial do centro e aumenta ou diminui a densidade de calor imposto sobre determinada área [4,6]. Nesse estudo o calor do arco de soldagem foi modelado por uma distribuição bidimensional da fonte de calor com distribuição gaussiana, dada pela Equação 4 e ilustrada na Figura 2. [4]

$$q(r) = \frac{\eta VI}{2\pi\sigma^2} e^{-\left(\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (4)$$

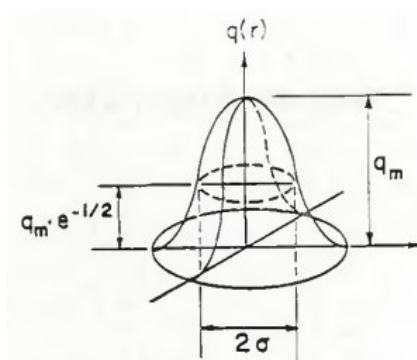


Figura 2. Fonte de Calor Gaussiana. [7]

Onde $q(r)$ representa o fluxo de calor na chapa, η representa a eficiência do processo de soldagem, V representa a tensão, I a corrente elétrica e o σ equivale a distância radial da distribuição de calor. Esses parâmetros são extremamente importantes para a simulação quando tratamos da intensidade da fonte da calor.

A fonte de calor gaussiana é um modelo onde o calor é gerado sobre uma superfície, podendo por esta razão não ser adequado a geometrias com espessuras mais espessas, a literatura investigou a precisão desse modelo em um processo de soldagem TIG e obteve resultados que estavam em concordância com resultados obtidos experimentalmente para distribuição de temperatura, formação da zona de fusão com largura e profundidade coerentes [4]. Outras literaturas obtiveram resultados numéricos que convergiram com os resultados experimentais modelando a fonte de calor gaussiana [2,11].

2.3 Metodologia

A escolha da literatura tomada como referência para este trabalho se deu a partir de alguns requisitos mínimos, a utilização do mesmo aço inoxidável para que as propriedades termofísicas do material fossem as mesmas, a realização de um procedimento experimental com resultados de distribuição de temperatura para validar a simulação por elementos finitos, além de obter resultados com um baixo erro na simulação, tornando o trabalho confiável e replicável para a utilização dos parâmetros de soldagem, condições de contorno e propriedades do material.

2.3.1 Material

Inicialmente foi necessário a modelagem do corpo de prova com todas as dimensões estabelecidas, esse procedimento foi feito em um software CAD. A literatura tomada como base para este trabalho simula a distribuição de temperatura em um processo de soldagem TIG autógena em uma chapa plana de aço inoxidável AISI 304, ilustrada na Figura 3, com dimensões de 200 mm de comprimento, 200 mm de largura e 3 mm de espessura, os furos presentes na figura representam o diâmetro e a posição dos termopares [1].

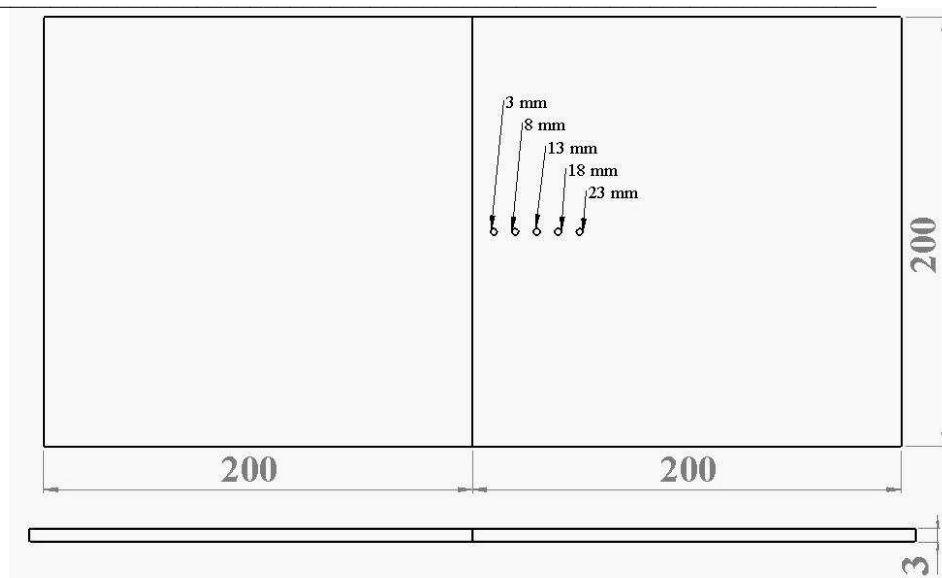


Figura 3. Dimensões da chapa. (Autoria própria)

Ao final do trabalho, todas as propriedades e parâmetros de soldagem foram transferidos para um tubo com medidas oriundas da chapa analisada, apresentando um diâmetro interno de 60,6 mm, diâmetro externo de 66,6 mm, comprimento de 200 mm e espessura 3 mm, a Figura 4 ilustra o tubo mencionado.

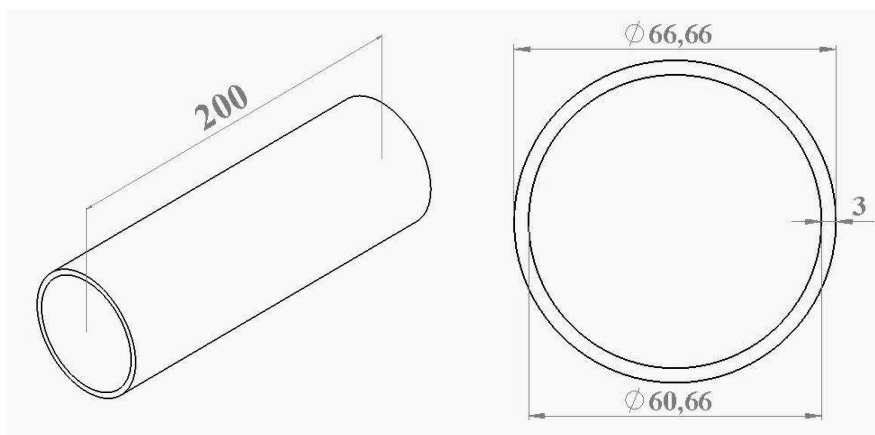


Figura 4. Dimensões do tubo. (Autoria própria)

Após modelada, a chapa foi exportada para o software *ANSYS®* com a utilização do modelo matemático *Transient Thermal* que permite a análise de problemas em regime transiente, onde a temperatura e as propriedades podem variar com o tempo. Dessa forma, para caracterizar o material foi inserido as propriedades de condutividade térmica, densidade e calor específico do aço inoxidável austenítico AISI 304 variando com a temperatura. As propriedades inseridas são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades termofísicas do AISI 304. [1]

Temperatura (°C)	Condutividade térmica (W/m°C)	Calor específico (J/kg°C)	Densidade (kg/m³)
0	14,6	462	7900
100	15,1	496	7880
200	16,1	512	7830
300	17,9	525	7790
400	18	541	7750
600	20,8	577	7660
800	23,9	604	7560
1200	32,2	676	7370
1300	33,7	692	7320
1500	120	701	7320

2.3.2 Malha Computacional

O corpo de prova foi modelado de forma fracionada, com o intuito de conseguir um melhor refino da malha, sendo a região mais afastada da zona afetada pelo calor (ZAC) com uma menor quantidade de elementos e nós enquanto a região mais próxima do cordão de solda onde a fonte de calor irá interagir diretamente com uma malha mais refinada, otimizando o esforço computacional e obtendo resultados mais precisos. A Figura 5 ilustra a divisão da malha entre as regiões citadas.

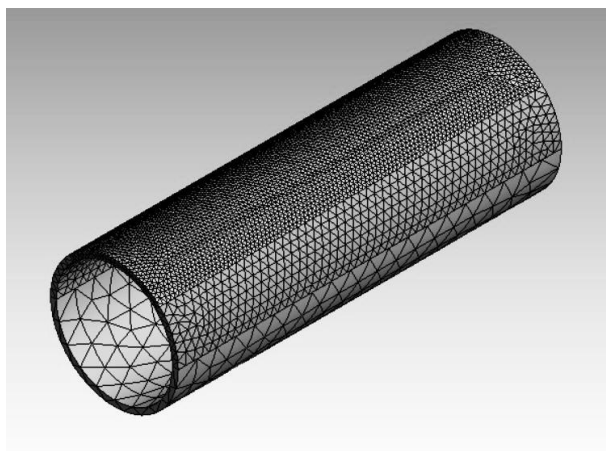


Figura 5. Malha Computacional. (Autoria própria)

O formato que mais se adequou a geometria para análise de processos de soldagem foram os elementos tetraédricos, pelo fato de conseguir obter uma maior quantidade de elementos e, consequentemente, um melhor refino da malha computacional. A malha foi dividida em três regiões, para a região mais próxima a fonte de calor foi escolhido elementos com tamanho médio de 2 mm, a região intermediária teve elementos com tamanho médio de 4 mm enquanto a região mais afastada foi composta por elementos com tamanho médio de 10 mm. Ao final a geometria foi constituída por 70600 nós e 39442 elementos.

2.3.3 Modelagem da Fonte de Calor

No presente trabalho a fonte de calor foi modelada a partir de uma distribuição gaussiana, com isso é necessário obter alguns parâmetros como a distância radial da fonte de calor, representado por σ , a escolha desse parâmetro foi tomada com base na literatura [4] onde obteve melhores resultados usando um raio de 2 mm em variadas espessuras. Outros dados a serem incluídos na modelagem para calcular a intensidade da fonte de calor são os parâmetros de soldagem como: eficiência do arco, tensão, corrente. O software *ANSYS®* ainda necessita de parâmetros para a simulação como velocidade de soldagem, além disso, é adotado a temperatura de fusão do aço inoxidável AISI 304 como 1454 °C de acordo com a literatura [8]. Tais parâmetros estão ilustrados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de soldagem. [1]

Parâmetros	Valores
Tensão do Arco (V)	14.8
Corrente (A)	100
Velocidade de Soldagem (mm/s)	3.125
Eficiência do arco (%)	50
Distância Radial da Fonte de Calor (mm)	2
Intensidade da Fonte de Calor (W/m²)	29443000

A utilização de uma extensão do *ANSYS®* denominada *Moving Heat Flux* é necessária para a inclusão dos parâmetros de soldagem, direção e sentido do cordão de solda assim como o ponto de início e fim do processo de soldagem. O *Moving Heat Flux* é uma extensão que pode ser combinada ao modelo matemático para problemas de transferência de calor em regime transiente (*Transient Thermal*) para resolução de processos de soldagem, utilizando da distribuição gaussiana para determinar a fonte de calor.

2.3.4 Condições de Contorno

A simulação contou com os mesmos valores da literatura de base para as condições de contorno em um processo de soldagem [1]. As condições de contorno consideradas foram as formas de perdas de calor por convecção e radiação. Sendo as perdas por convecção dominantes em temperaturas mais baixas e as perdas por radiação em temperaturas mais altas próximo ao cordão de solda [1]. O coeficiente de convecção h foi considerado variando com a temperatura, a Tabela 3 apresenta os valores.

Tabela 3. Coeficiente de convecção variando com a temperatura. [1]

h (W/m ² K)	$T - T_0$ (K)
1.85	56
9.079	278
18.5	556
52.6	2778

As perdas de calor por radiação foram consideradas, tendo a emissividade igual a 0.7. Perdas por condução são consideradas de forma automática pelo software, essas perdas ocorrem em relação a temperatura ambiente que foi adotada como 22 °C.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Diante dos procedimentos adotados pela simulação para modelar a fonte de calor, a geometria do material, definir o tipo de elemento para compor a malha como o tetraédrico, inserir parâmetros de soldagem, propriedades termofísicas do aço inoxidável AISI 304 variando com a temperatura e condições de contorno para modelar as perdas de calor durante o processo de soldagem. Os tópicos a seguir mostram os resultados obtidos pelo pós-processamento do software com todos os dados inseridos, obtendo a distribuição de temperatura e a formação dos ciclos térmicos. Ao final é feita uma comparação com os resultados obtidos pelo procedimento experimental feito pelo trabalho tomado como base e os resultados obtidos pela simulação do presente trabalho.

3.1 Deslocamento da Fonte de Calor

Com todos os parâmetros de soldagem, condições de contorno e propriedades termofísicas do material variando com a temperatura é feito o post-processing (pós-processamento) dos dados inseridos para obtenção dos resultados. É possível observar a distribuição de temperatura e o deslocamento da fonte de calor, no início do processo de soldagem não é possível observar um gradiente de temperatura bem definido (ilustrado na Figura 6-A), mas com o decorrer do deslocamento da fonte de soldagem é possível obter um gradiente de temperatura em toda a superfície do material que pode ser comparado (ilustrados nas Figuras 6-B, 6-C e 6-D).

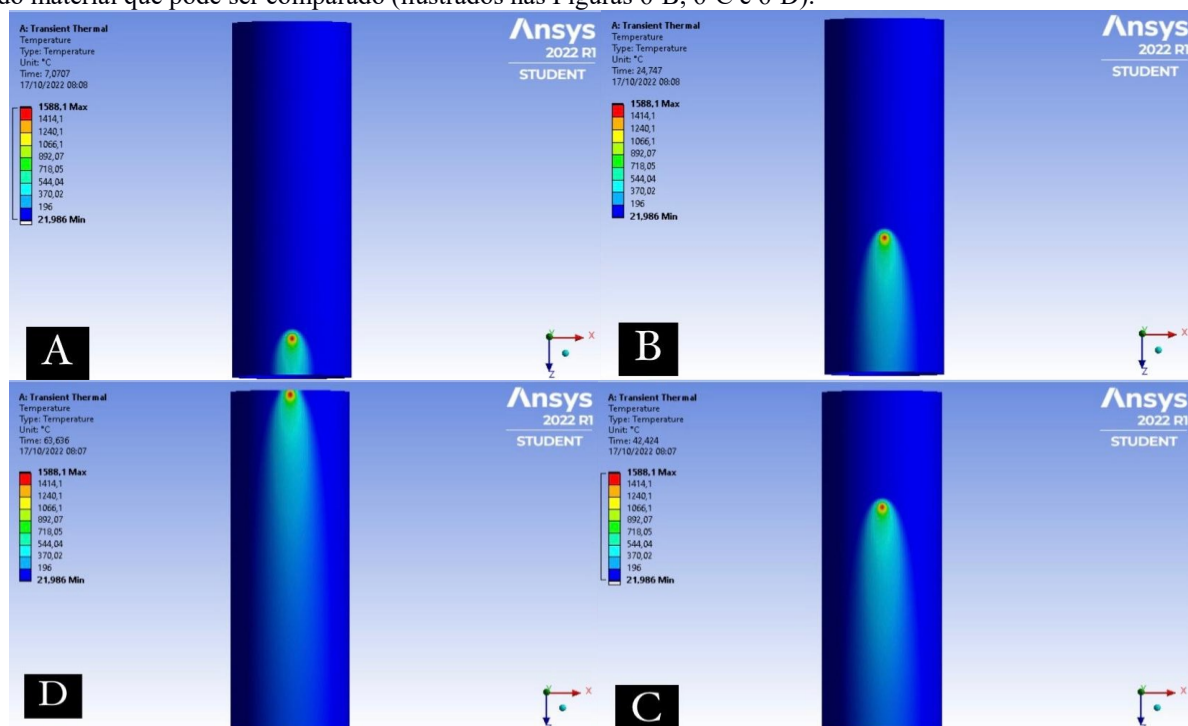


Figura 6. Distribuição de temperatura na superfície do tubo. (Autoria própria)

Nota-se que a simulação obtém temperaturas que possibilitam a fundição do aço inoxidável AISI 304 desde o início até o fim do processo de soldagem. A temperatura de fusão do AISI 304 é de aproximadamente 1454 °C, a simulação obteve resultados de temperatura na linha de soldagem de 1588 °C, acima da temperatura de fusão, podendo ser um fator de erro acarretado pelas condições de contorno ou propriedades termofísicas que variam com a temperatura e podem conter dados que facilitem a discrepância dos resultados na resolução do problema. As curvas de distribuição de temperatura apresentadas são de origem gaussiana, pois apresentam um perfil simétrico a superfície.

3.2 Curvas de Ciclo Térmico

No decorrer do processo de soldagem, cada ponto do material irá passar por um aquecimento e um resfriamento, com isso é possível obter curvas de temperatura variando em função do tempo em todos os pontos do material, denominadas curvas de ciclo térmico. A temperatura foi medida em cinco pontos diferentes na superfície do material ao longo do processo de soldagem, os pontos estão a uma distância de 3 mm, 8 mm, 13 mm, 18 mm e 23 mm respectivamente do cordão de solda. Tais medidas foram feitas com o auxílio de uma função no ANSYS® nomeada de *Named Selection* onde é possível fixar um ponto no material e realizar análises localizada da temperatura durante a simulação da soldagem.

A Figura 7 ilustra as curvas de ciclo térmico obtidas experimentalmente com o auxílio de termopares tipo K pela literatura [1]. Enquanto a Figura 8 mostra as curvas obtidas pela simulação do presente trabalho.

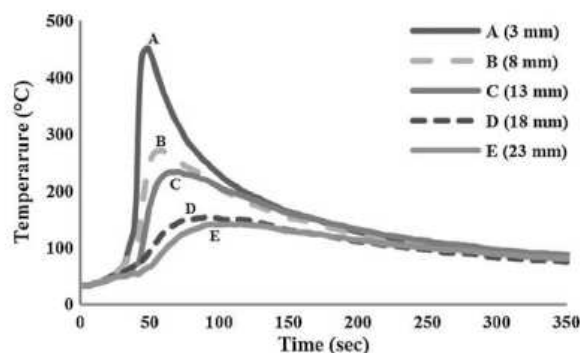


Figura 7. Curvas de ciclo térmico obtidas no procedimento experimental. [1]

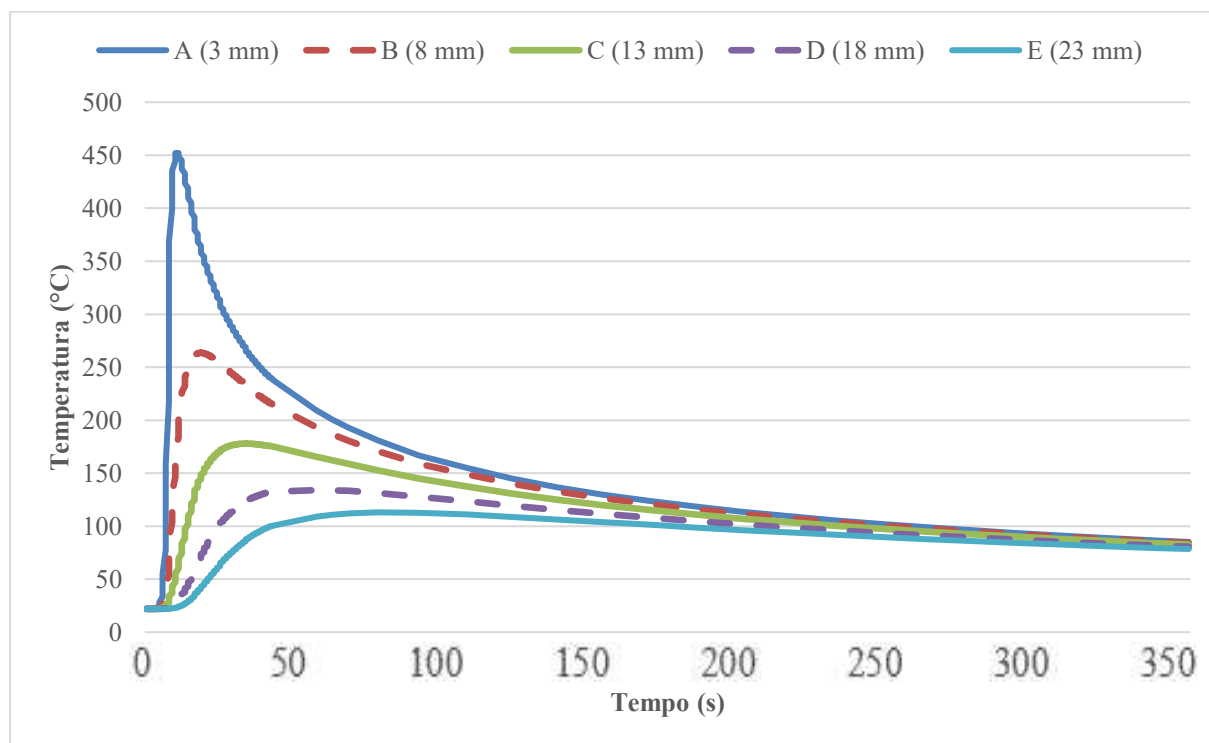


Figura 8. Curvas de ciclo térmico obtidas no procedimento numérico. (Autoria própria)

Ao comparar os resultados obtidos na simulação realizada com os resultados tomados como base pela literatura [1], é possível perceber que as temperaturas de pico no ciclo térmico apresentam a maior divergência na distância de 13 mm do cordão de solda, enquanto as temperaturas de pico dadas nas duas primeiras medições convergem e apresentam erros mínimos, oriundos da própria simulação, que podem ser desconsiderados. A Tabela 4 mostra os valores obtidos experimentalmente e os valores obtidos no procedimento numérico.

Tabela 4. Valores experimentais, numéricos e seus respectivos erros percentuais. (Autoria própria)

Distância da medição (mm)	Procedimento experimental (°C)	Procedimento numérico (°C)	Erro percentual (%)
3	451,90	472,05	4,46
8	274,55	260,62	5,07
13	236,47	181,09	23,42
18	155,31	136,52	12,09
23	143,28	114,66	19,97

Os valores acima indicam a comparação entre o processo de soldagem realizado pela literatura base em uma chapa de aço inoxidável AISI 304 e a simulação realizada pelo presente trabalho, é possível perceber uma convergência entre os resultados e afirmar que a simulação está coerente com a realidade, podendo assim utilizá-la em outros procedimentos de soldagem com o mesmo material, parâmetros de soldagem e condições de contorno. Diante disso, como o presente trabalho trata de uma soldagem longitudinal em um tubo AISI 304, foi inserido as mesmas condições e feita a análise da distribuição de temperatura. É esperado que a diferença entre as temperaturas na simulação não seja exorbitante e foi o que aconteceu. A Tabela 5 mostra os valores de temperatura medidos nas mesmas distâncias do cordão de solda.

Tabela 5. Valores experimentais aplicados ao tubo AISI 304. (Autoria própria)

Distância da medição (mm)	Procedimento numérico (°C)
3	452,12
8	263,60
13	178,00
18	134,02
23	113,09

As medições apresentam ciclo térmicos e temperaturas semelhantes, chamando atenção apenas a temperatura de pico da primeira medição com uma variação de 19,93 °C, essa diferença de temperatura pode ser gerada pelo limite de elementos e nós em uma malha estabelecido pelo software *ANSYS®* em sua versão estudantil deixando o refino da malha um processo dificultoso e gerador de erros.

4. CONCLUSÕES

Com desenvolvimento deste trabalho foi possível realizar uma análise numérica-computacional do processo de soldagem TIG autógeno, onde obteve-se como um dos resultados a distribuição do fluxo de calor durante o processo de soldagem e distribuição de temperatura variando com o tempo e ao longo do material em um tubo de aço inoxidável AISI 304. Ao final foi possível chegar as seguintes considerações:

- A temperatura obtida na simulação a 3 mm do cordão de solda convergiu com os resultados obtidos no procedimento experimental feito pela literatura tomada como base [1], tendo um erro percentual de 4,46% e uma variação na temperatura de pico de 20,15 °C, erros dessa magnitude podem ser aceitos em uma simulação;
- A temperatura obtida na simulação a 8 mm do cordão de solda convergiu com os resultados obtidos no procedimento experimental, tendo um erro percentual de 5,07% e uma variação na temperatura de pico de 13,93 °C.
- A temperatura obtida na simulação a 13 mm do cordão de solda foi a que mais se distanciou dos resultados obtidos pelo procedimento experimental, tendo um erro percentual de 23,42% e uma variação na temperatura de pico de 55,38 °C, contudo a temperatura máxima obtida nessa posição não interfere nas propriedades do material ou em mudanças na sua estrutura cristalina.
- A temperatura obtida na simulação a 18 mm do cordão de solda convergiu com os resultados obtidos no procedimento experimental, tendo um erro percentual de 12,09% e uma variação na temperatura

de pico de 18,79 °C.

- A temperatura obtida na simulação a 23 mm do cordão de solda convergiu com os resultados obtidos no procedimento experimental, tendo um erro percentual de 19,97% e uma variação na temperatura de pico de 28,62 °C.

A comparação dos resultados obtidos com o trabalho de referência confirma que a simulação obteve êxito, os resultados convergiram com o procedimento experimental obtendo erros percentuais em três medições que podem ser considerados irrelevantes pela pequena diferença de temperatura entre o processo de soldagem e a simulação, para as medições que apresentam o maior erro percentual é possível estimar que as divergências nos resultados podem ser influenciadas pela quantidade limitada de elementos e nós na malha computacional permitida pela versão estudantil do *ANSYS®*, a escolha da fonte de calor pode ter influência, uma vez que a mesma simula a distribuição de calor somente na superfície desconsiderando a espessura do material, além dos erros operacionais obtidos pelo *Moving Heat Flux* já que a extensão não permite alterações para diferentes tipos de soldagem.

Desse modo, é possível concluir que a substituição de uma análise analítica que acaba gerando um esforço de cálculo considerado muitas vezes inviável por uma análise numérica onde o esforço será computacional necessitando apenas de um experimento para a sua validação é extremamente viável. A simulação envolvendo os processos de soldagem demonstram uma grande eficácia, nessa circunstância o software *ANSYS®* com o auxílio do *Transient Thermal* se mostrou válido nesse tipo de análise. Por fim, o modelo de análise numérico-computacional adotado obteve resultados com uma convergência satisfatória que pode auxiliar na tomada de decisões técnicas a respeito do processo de soldagem e seus fenômenos.

5. AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado sabedoria e força nos momentos que mais necessitei. Ao meu orientador Professor Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga pela paciência e maestria em me indicar o caminho para a conclusão deste trabalho. Ao meu colega e companheiro do programa de educação tutorial de engenharia mecânica e elétrica, Hugo Eduardo Tavares Vieira, pelo auxílio na resolução de alguns gargalos durante a simulação. A minha família por todo o apoio durante a minha formação. A minha mãe que sonhava com este dia e mesmo não estando presente fisicamente está em minhas memórias todos os dias.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Attarha MJ, Sattari-Far I. Study on welding temperature distribution in thin welded plates through experimental measurements and finite element simulation. *Journal of Materials Processing Technology*. vol. 211, p. 688-694, 2011.
- [2] VIEIRA, Hugo Eduardo Tavares. Análise computacional das curvas de ciclo térmico em uma chapa de alumínio AL 5052 soldada com o processo TIG autógena. Orientador: Francisco Edson Nogueira Fraga. 2022. 11 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2022.
- [3] ÇENGEL, Yunus A. Transferência de calor e massa: Uma abordagem prática. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2009.
- [4] TEIXEIRA, Paulo R. F. et al. Study of the Gaussian distribution heat source model applied to numerical thermal simulations of tig welding processes. *Science and Engineering Journal*, v. 23, n. 1, p. 115-122, 2014.
- [5] MOURA, Antonio Rodolfo da Silva. Simulação numérica do campo de temperatura na soldagem TIG do aço AISI 316L. Orientador: Daut de Jesus Nogueira Peixoto Couras. 2018. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Universidade Federal Rural do Semi-Árido.
- [6] ARAÚJO, Douglas Bezerra de. Estudo de distorções em soldagem com uso de técnicas numéricas e de otimização. 2012. 262 f. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.
- [7] EAGAR, T. W; TSAI, N. S. Temperature fields produced by traveling distributed heat sources. *Welding journal*, v. 62, n. 12, p. 346-355, 1983.
- [8] MOLENDÁ, Carlos Henrique de Andrade; PARIS, Aleir Antônio Fontana de; LIMBERGER, Inácio da Fontoura; SILVA, Rogério Brites da; OLIVEIRA, Leandro Marin de; RIGHI, Luiz Antônio. Simulação Numérica do Crescimento da Lentilha de Solda Obtida pelo Processo de Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica no Aço Inox AISI 304. Universidade Federal de Santa Maria. *Soldag. insp.* São Paulo, Vol. 15, No. 4, p.307-316, Out/Dez 2010.
- [9] MURUGAN, S.; KUMAR, P.V.; RAJ, B.; BOSE, M.S.C.. Temperature distribution during multi-pass welding of plates. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 75, p.891–905, 1998.
- [10] DENG, D.; MURAKAWA, H.. Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements. *Computational Materials Science* 37, p.269-277, 2006.
- [11] BEZERRA, Alexandre Campos; RADE, Domingos Alves. Análise térmica do processo de soldagem TIG via elementos finitos. 14º POSMEC - Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia/MG, 10f, 2004
- [12] VENKATKUMAR, D.; RAVINDRAN, D.. 3D finite element simulation of temperature distribution, residual stress and distorcion on 304 stainless steel plates using GTA welding. *Journal of Mechanical Science and Technology*, p.67-76, 2015.
- [13] KUMAR, Pramod; KUMAR, Rajest; ARIF, Abdul; VEERABADU, M.. Investigation of numerical modelling of TIG welding of austenitic stainless steel (304L). *Materialstoday Proceedings*, p.1636-1640, 2020.
- [14] GERY, D.; LONG, H.; MAROPOULOS, P. Effects of welding speed, energy input and heat source distribution on temperature variations in butt joint welding. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 167, p. 393- 401, 2005.