

ANÁLISE NUMÉRICA DO GRADIENTE DE TEMPERATURA EM SOLDAGEM TIG DO AISI 316L

COBEF2017-1241

João Dehon da Rocha Junior, joaodehonjunior@gmail.com¹

Rafael Leandro Fernandes Melo, rafaellfm@outlook.com¹

André Ferreira de Oliveira, engmecandre@hotmail.com¹

João Felipe Lima, joaofelipe_12@hotmail.com¹

Shyrlei da Silva Oliveira, shyrlei.arquiteta@gmail.com¹

Alessandro Jacinto Rodrigues de Carvalho, alessandro66@hotmail.com

¹Universidade Federal Rural do Semi-Árido – Av. Francisco Mota – Pintos, Mossoró – RN, CEP: 59.625-900.

Resumo: Estruturas soldadas apresentam tensões residuais devido ao gradiente térmico gerado durante o processo de soldagem podendo gerar prejuízos operacionais devido a distorções e falhas na peça. Dessa forma, foi realizada uma simulação numérica do gradiente de temperatura em um processo de soldagem TIG autógeno em uma chapa de aço inoxidável AISI 316L. Foi utilizado o software de elementos finitos ANSYS Workbench 16.0 conjugados com uma extensão matemática para movimento da fonte de calor. No software, foi criado o material AISI 316L com as propriedades: condutividade térmica, calor específico e densidade variantes com a temperatura, proporcionando uma análise não linear do processo. A fonte de calor utilizada para o modelo foi a dupla elipsoide de Goldak. Foram consideradas as perdas de calor para o ambiente através da convecção natural e radiação, além da condução na própria peça. Para encontrar o gradiente de temperatura, foram utilizados três pontos distintos de medição, estrategicamente dispostos no início da passagem do cordão de solda. A validação do modelo foi realizada através de uma pesquisa a literatura, verificando os perfis de temperatura encontrados por outros autores.

Palavras-chave: Simulação, Soldagem, Gradiente térmico.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente os processos de soldagem possuem uma ampla aplicação na indústria. Com a globalização e a entrada de empresas estrangeiras no país, as indústrias nacionais se vêem cada vez mais pressionadas a buscar soluções para aumentar sua competitividade e reduzir seus custos, seja através da redução de custos de matéria prima e logística, assim como no aumento da sua eficiência nos processos de fabricação. O crescimento da produtividade nos processos de soldagem, contudo, podem maximizar efeitos indesejáveis como deformações, tensões residuais e alterações microestruturais no material devido ao aporte excessivo de calor na peça. Os ciclos térmicos afetam significativamente parâmetros como tensões residuais, deformações, microestrutura de solda, dureza HAZ. Devido ao aquecimento local durante o processo de soldagem, o controle dos ciclos térmicos é crítico.

Murugan et al. (1998) mediram a distribuição de temperatura em placas soldadas de aço inoxidável tipo 304 usando termopares. Seus resultados mostram que as distribuições de temperatura nos pontos de medição são claramente dependentes das condições de soldagem. Deng e Murakawa (2006) obtiveram experimentalmente distribuições de temperatura em juntas de tubos soldadas com termopares e compararam os resultados com simulações de elementos finitos. Com referência aos seus resultados, é óbvio que a distribuição de temperatura em torno da fonte de calor é muito estável quando a tocha de soldadura se move em torno do tubo. Assim, podemos inferir que possibilidade de determinar numericamente a distribuição de temperatura em um material soldado permite a observação da tendência natural da dilatação das partes aquecidas, a qual é restringida pelas regiões adjacentes menos aquecidas, assim gerando deformações elásticas e plásticas não uniformes responsáveis por criar tensões residuais no material, bem como, as transformações de fases que levam as variações de volume em contrações e expansões.

Desta forma o presente trabalho por sua vez, visa à obtenção do campo de temperatura transiente e não linear devido a um processo de soldagem TIG autógeno de forma simulada através da técnica MEF utilizando o software Ansys®, uso de uma solução como o Ansys® para esta aplicação apresenta um alto grau de complexidade do modelo de simulação em função da dificuldade para se realizar o modelamento dos fenômenos físicos, tais como a representação da fonte de calor e a adição de material à peça ao mesmo tempo em que ocorre a movimentação da fonte de calor durante o processo de soldagem.

O método analítico mais usado para calcular a distribuição de temperatura na soldagem foi desenvolvido por Rosenthal na década de 30. Rosenthal propôs vários modelos, com destaque para três: (i) fonte de calor pontual deslocando-se sobre uma placa de espessura infinita; (ii) fonte de calor linear distribuída ao longo da espessura da chapa, e (iii) fonte de calor pontual atuando sobre uma placa de espessura finita. Atualmente as fontes de calor mais empregadas na literatura são com modelos de condução e com modelo de convecção térmica. Na soldagem, existe uma

fonte que gera um diferencial U entre a peça soldada, esta diferença de potencial produz a formação de um arco elétrico que é percorrido por uma corrente I . Através da multiplicação desses dois parâmetros podemos encontrar o potencial total que é gerado. Logo, devido a perdas por diferentes fatores, como a convecção e radiação, somente uma parte desta potência é realmente aproveitada para a fusão do material, tornando necessária a adoção do rendimento η . Assim, a quantidade de calor transferida no processo pode ser expressa por:

$$Q = \eta \cdot U \cdot I \quad (1)$$

A equação do fluxo de calor na peça não é linear devido as suas propriedades termofísicas dos materiais serem dependentes da temperatura. O balanço de energia para fluxo de calor é expresso por (Rodeiro, 2002):

$$\rho(T)c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = Q + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

Onde ρ é a densidade, c é o calor específico, Q é a entrada de calor (Equação 1), K_x, K_y, K_z são os coeficientes de condutividade térmica nas três direções, T é a temperatura e t é o tempo.

Para a simulação da fonte de calor, outros pesquisadores buscam desenvolver modelos tridimensionais que consideram os efeitos da penetração na poça de fusão. Dentre estes modelos estão os de distribuição hemisférica, o elipsoidal, e o mais aceito na atualidade: o modelo de duplo elipsoide de Goldak, experimentos mostram que os gradientes térmicos na parte traseira da poça de fusão são mais suaves comparados aos da parte frontal. Na busca de um modelo, mas preciso desenvolveram o modelo de duplo elipsóide para distribuição de energia transferida pela fonte de calor para a peça. Neste modelo, uma geometria em duplo elipsóide é utilizada, em que a parte frontal do arco interagindo com a peça é representada pelo primeiro quadrante de um elipsóide, e a parte traseira é representada pelo segundo quadrante do elipsóide, mostrado na Fig. (1).

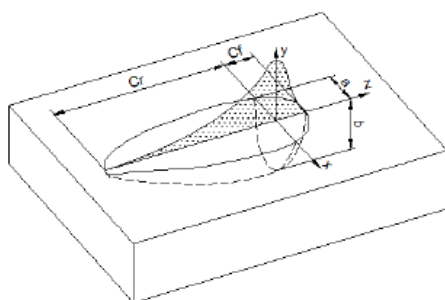


Figura 1: Dupla elipsoide de Goldak (2005).

2. METODOLOGIA

O trabalho consistiu em obter os resultados numéricos, do campo de temperatura, feita no ANSYS® com a extensão de movimento de fluxo *Moving Heat Flux*, do processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) autógeno no aço inoxidável autêntico AISI 316L.

Os parâmetros de soldagem utilizados para situação numérica são mostrados na Tab. (1).

Tabela 1. Parâmetros de soldagem para o processo numérico.

Parâmetros	Valores
Tensão do arco	10 V
Corrente	150 A
Velocidade de soldagem	2,5 mm/s
Energia de soldagem	600 J/mm

O corpo de prova simulado foi desenhado no próprio ANSYS®, e foi admitido uma chapa de 150x200 mm com uma espessura de 2 mm. Foi considerado um caminho para a solda de 150 mm. Para a realização da análise computacional foi necessário criar o material AISI 316L no software ANSYS®. Para isso, foram utilizadas as seguintes propriedades, mostradas na Tab. (2).

Tabela 2. Propriedades termofísicas numéricas do AISI 316L.

Temperatura (K)	Calor específico (J/KgK)	Condutividade térmica (W/mK)	Densidade (Kg/m ³)
293	450	14,0	8000
373	490	15,2	7970
473	525	16,6	7940
573	545	17,9	7890
673	560	19,0	7850
773	570	20,6	7800
873	580	21,8	7750
973	595	23,1	7700
1073	625	24,3	7660
1173	650	26,0	7610
1273	660	27,3	7570
1473	677	29,9	7450

Para a geração da malha, foi utilizado o método de refino da malha exatamente onde o cordão de solda passou. A malha do tipo triângulos, possuiu um número de 13888 nós e 20565 elementos. Além da malha do corpo de prova, optou-se por criar uma outra para o ambiente, para dessa forma inserir as trocas de calor neste, através dos mecanismos de convecção natural e radiação. A configuração é mostrada na Fig. (2).

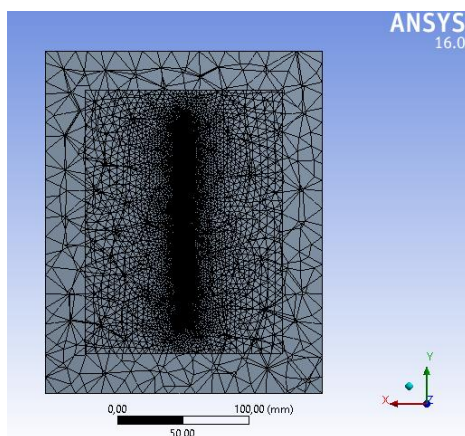


Figura 2: Configuração da malha da peça e do ambiente.

As medições de temperatura para obtenção do gradiente de temperatura, foram feitas a 10, 20 e 30 mm do início, meio e final do cordão de solda.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O deslocamento da fonte de calor é mostrada na Fig. (3).

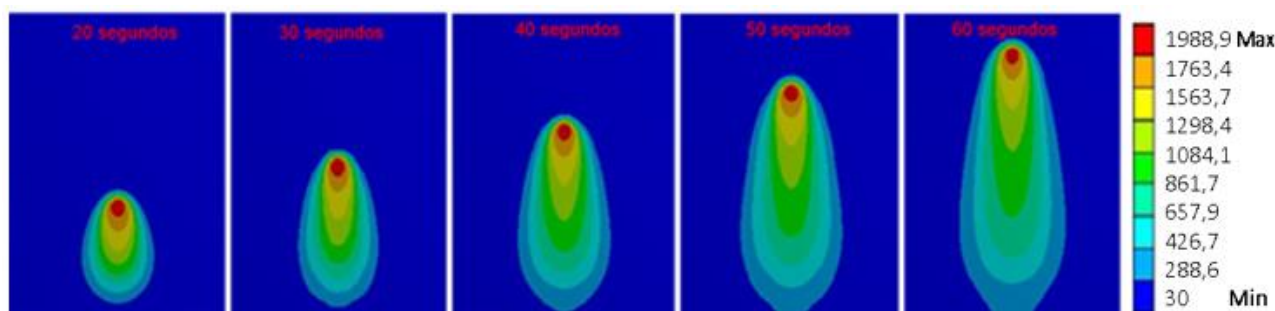


Figura 3: Simulação do deslocamento da fonte de calor.

É notório que a simulação possibilitou a fundição do aço AISI 316L, no momento inicial de soldagem, já que possui zona vermelha com um valor de temperatura de 1988,9°C e a temperatura de transição sólido – líquidos do aço inoxidável AISI 316L é 1454°C.

É possível observar o gradiente de temperatura, ocorrendo uma distribuição heterogênea. Além disso, é possível perceber a dupla elipsoidal de Goldak, pela forma que a região afetada pelo calor apresenta.

Como as temperaturas de soldagem inicial são diferentes das temperaturas do final do processo, o conhecimento dessas, mostra-se essencial para a construção do gradiente de temperatura. Além disso, saber se a peça irá fundir logo no começo do processo é importante para validar a utilização dos parâmetros de soldagem escolhido.

A Fig. (4), mostra as medições computacionais do início da formação do cordão de solda, em seus 3 termopares iniciais.

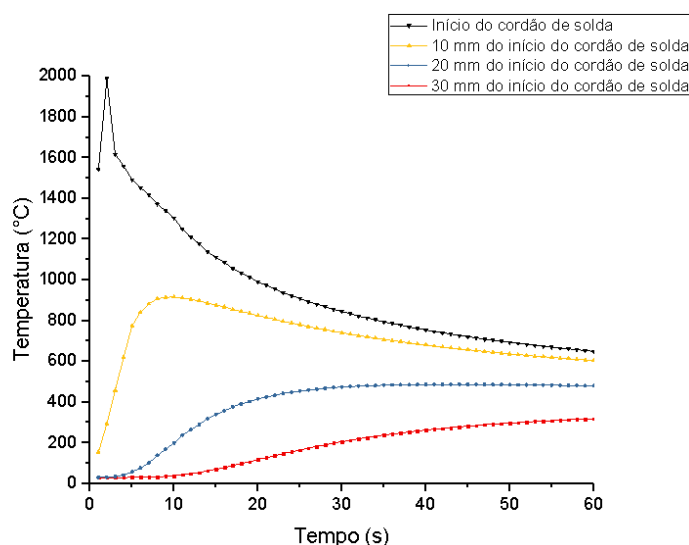


Figura 4: Ciclo térmico medido computacionalmente no início do cordão de solda.

Através do gráfico é possível notar que no momento inicial da abertura do arco de soldagem a peça sofre fusão. O gráfico mostra que há um intervalo inicial para que a máxima temperatura seja atingida, a qual os dados numéricos mostram que é de aproximadamente 4 segundos. Esse fato pode ser explicado devido ao retardo de absorção de energia do material. Além disso, foi mostrado que nos 60 segundos de processo, a temperatura do cordão tem uma taxa de resfriamento bem maior que as medidas pelos termopares.

As medições de temperatura no meio do cordão de solda se justificam pelo conhecimento do desenvolvimento da fonte de calor. A Fig. (5) mostra a temperatura no meio do cordão.

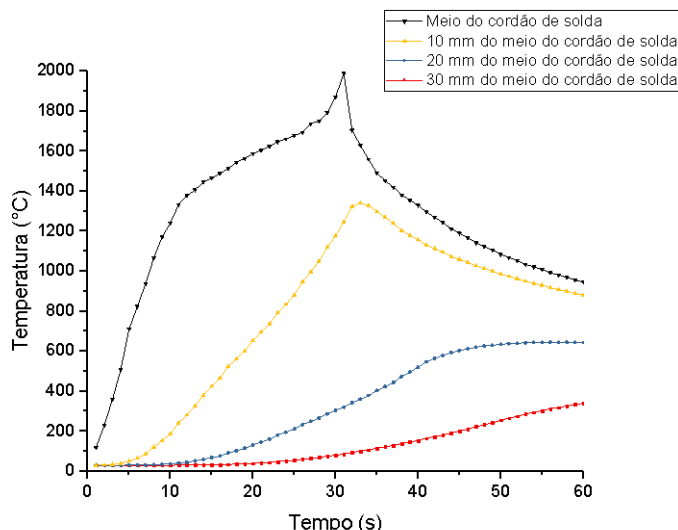


Figura 5: Ciclo térmico medido computacionalmente no meio do cordão de solda.

É possível notar que a poça de fusão possui tendência natural de aumento de temperatura, saindo de cerca de 1950°C, no início, para cerca de 1980°C no meio do caminho do cordão de solda. Esse aumento de temperatura é justificável pela propagação da fonte de calor a frente do cordão de solda.

As medições de temperatura no final do cordão de solda, possui a mesma justificativa das medições feitas no meio do cordão, o conhecimento do aumento da temperatura devido a propagação da fonte de calor. A Fig. (6), mostra as medidas realizadas no final do cordão de solda.

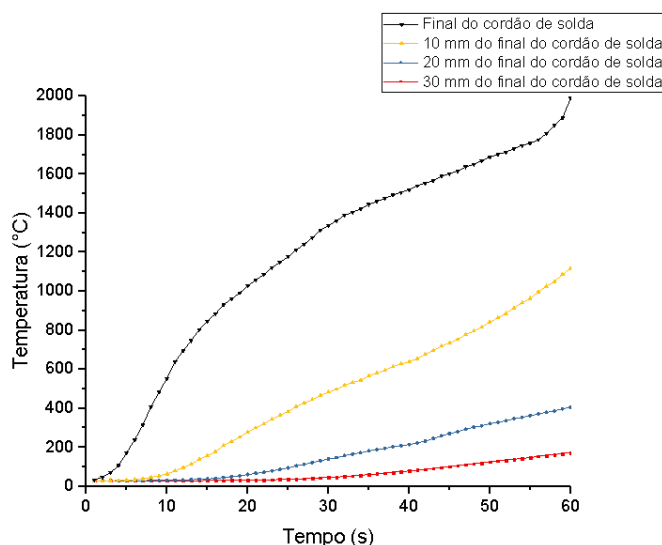


Figura 6: Ciclo térmico medido computacionalmente no final do cordão de solda.

A temperatura do final da poça de fusão chegou a 1988,9°C, como mostrado na Fig. (3). É possível perceber que a energia acumulada pela peça ao final do processo de soldagem é maior do que todo o caminho anterior percorrido pela fonte de calor.

Após a coleta dos dados apresentado, foi obtido uma curva de aquecimento gerado pela soldagem, no início do processo, para uma melhor visualização do campo de temperatura. Mostrado na Fig. (7).

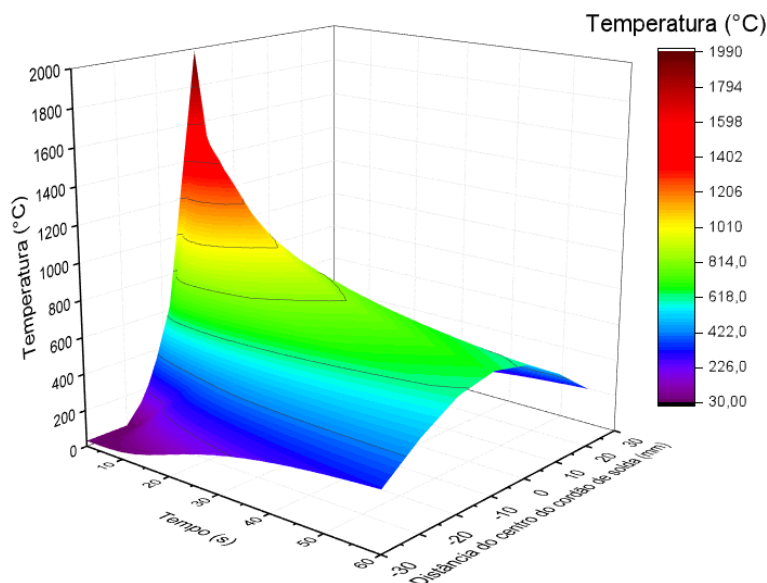


Figura 7: Curva do gradiente de temperatura para medições realizadas no início do cordão de solda.

4. CONCLUSÃO

Este artigo comprovou a previsão do campo de temperatura do AISI 316L, através de um modelo numérico, utilizando simulação computacional com o auxílio do software ANSYS e a extensão matemática *Moving Heat Flux*. A dupla elipsoidal de Goldak (2005), foi confirmada mais uma vez para soldagem TIG autógeno. As condições de contorno utilizadas nesse trabalho foram eficientes para obter resultados compatíveis com já obtidos na literatura, e dessa forma, esses dados são possíveis para obtenção do campo de tensão e deformação em um processo de soldagem.

5. REFERÊNCIAS

- Araujo, D. B., 2012, “Estudo de distorções em soldagem com uso de técnica numérica e de otimização”, Doctor thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Bezerra, C. A., 2014 “Modelagem térmica do processo de soldagem TIG via elementos finitos”, Congresso Nacional de estudantes de Engenharia Mecânica, Vol 26, São Paulo, Brazil.
- Cagani, A. P. M., 2010 “Análise térmica do processo de soldagem TIG de amostras metálicas”, Master dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Goldak, A. J., 2005, “Computational welding mechanics”, Springer, Canada, 325 p.
- Miranda, M. C., Carvalho, S. R. and Borges, V. L., 2014 “Modelo térmico para análise da poça de fusão durante o processo de soldagem TIG”, Simpósio de programa de Pós – Graduação em Engenharia Mecânica, Vol. 28, Uberlândia, Brazil.
- Nascimento, A. C. S., 2012, “Determinação numérica da repartição térmica de soldagem numa junta de topo de aço inoxidável AISI 304”, Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Vol 20, Santa Catarina, Brazil.
- Melo, R. L. F., 2016, “Obtenção numérica e experimental do campo de temperatura na soldagem TIG do aço AISI 304”, Graduation monograph, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró.
- Outeiro, J. C., Umbrello, D. and Saoubi, R. M., 2006, “Experimental and numerical modelling of the residual stresses induced in orthogonal cutting of AISI 316L steel”, International Journal of Machine tools and Manufacture, p.1786-1794.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

Nome do primeiro autor, email
Nome do segundo autor, email
Nome do terceiro autor, email
Nome do quarto autor, email
Nome do quinto autor, email
Nome do sexto autor, email

¹Universidade Federal Rural do Semi-Árido – Av. Francisco Mota – Pintos, Mossoró – RN, CEP: 59.625-900.

Abstract: Welded structures present residual stresses due to the thermal gradient generated during the welding process and can generate operational losses due to distortions and failures in the part. Thus, a numerical simulation of the temperature gradient was performed in an autogenous TIG welding process on an AISI 316L stainless steel plate. ANSYS Workbench 16.0 finite element software was used in conjunction with a mathematical extension for the movement of the heat source. In the software, the AISI 316L material was created with the properties: thermal conductivity, specific heat and temperature density, providing a non-linear analysis of the process. The heat source used for the model was Goldak's double ellipsoid. Heat losses to the environment were considered through natural convection and radiation, in addition to the conduction in the piece itself. To find the temperature gradient, three distinct measuring points were used, strategically arranged at the beginning of the weld bead passage. The validation of the model was performed through a literature search, verifying the temperature profiles found by other authors.

Keywords: Simulation, Welding, Thermal gradient.