

ANÁLISE NUMÉRICA-EXPERIMENTAL DO CAMPO DE TEMPERATURA EM SOLDAGEM TIG DO AISI 304

R. L. F. Melo¹, J. D. Rocha Junior², E. W. A. Figueredo², F. E. N. Fraga²
^{1,2}Laboratório de Soldagem, Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA,
R. Francisco Mota, 572 – Costa e Silva, CEP: 59600-971, Mossoró – RN, Brasil
¹rafaelfm@outlook.com

RESUMO

Foi realizado uma modelagem térmica da soldagem TIG autógena em uma chapa de aço inoxidável AISI 304. Utilizou-se o software de elementos finitos ANSYS®. Para fidelidade da condição real de soldagem, as propriedades físicas do material (condutividade térmica, calor específico e densidade) foram criadas para variar com a temperatura, levando a uma análise transiente. Foram consideradas as perdas de calor por condução, convecção natural e radiação. A fim de obter o campo de temperatura, foram utilizados pontos estratégicos de medição dispostos próximos ao cordão de solda. Tentou-se realizar a validação do modelo através de uma análise experimental do processo, com medições de temperaturas através de termopares dispostos nas mesmas condições adotadas no modelo numérico. Por mais que os resultados numéricos e experimentais desse trabalho não apresentaram convergência entre si, os resultados experimentais foram coerentes com os numéricos e com a literatura.

Palavras-chave: Soldagem TIG, Campo de temperatura, Simulação numérica.

INTRODUÇÃO

Analisar um problema de engenharia via métodos numéricos tem sido cada vez mais utilizado nos dias atuais, em especial o método de elementos finitos (MEF). Este permite realizar considerações não lineares e em regimes transientes de propriedades termofísicas do material tais como: condutividade térmica, calor específico e densidade ⁽⁴⁾.

A 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⁽²⁾.

Considerando os fatores analisados, o conhecimento do campo transiente de temperatura em um processo de soldagem apresenta-se como o primeiro passo a determinação do campo de tensões residuais⁽¹⁾.

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[®], e de forma experimental através de uma bancada de soldagem TIG, recolhendo a temperatura através de termopares.

A comparação entre a simulação e o experimento, justifica-se pela obtenção da garantia do método de elementos finitos⁽¹⁾.

Análise térmica

A análise térmica tem por objetivo a obtenção dos campos de temperatura ao longo do componente soldado. Estas estimativas podem ser obtidas por meio de métodos analíticos e métodos numéricos, os quais são os mais empregados atualmente.

No estudo do campo de temperatura, a fonte de calor utilizada no modelo térmico pode ser considerada por meio de princípios de convecção ou condução, sendo o último o modelo mais utilizado⁽³⁾.

A equação da condução de calor que governa o estudo térmico em sólidos é apresentada pela equação (A).

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

Tabela 1: Parâmetros de soldagem para situação numérica e experimental.

Parâmetros	Valores
Tensão do arco	10 V
Corrente	60 A
Velocidade de soldagem	2,5 mm/s
Energia de soldagem	240 J/mm
Rendimento	80%
Insumo de calor	192 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 na vertical. O mesmo foi considerado no processo experimental, cortando-se uma chapa em um processo a plasma nas mesmas dimensões e foi feito o cordão de solda no mesmo tamanho e localização (meio da peça).

Para a realização da análise computacional foi necessário criar o material AISI 304 no software ANSYS[®]. Para isso, foram utilizadas as seguintes propriedades, mostradas na tabela 2.

Tabela 2: Propriedades termofísicas computacionais do AISI 304.

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

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, foi necessário 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 figura 2.

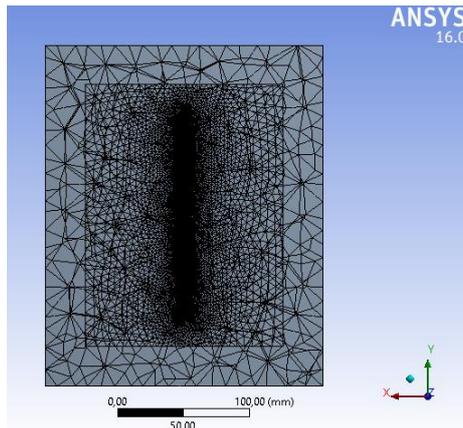


Figura 2: Configuração da malha da peça e do ambiente.

Para o processo experimental, as condições de contorno são mostradas na figura 3.

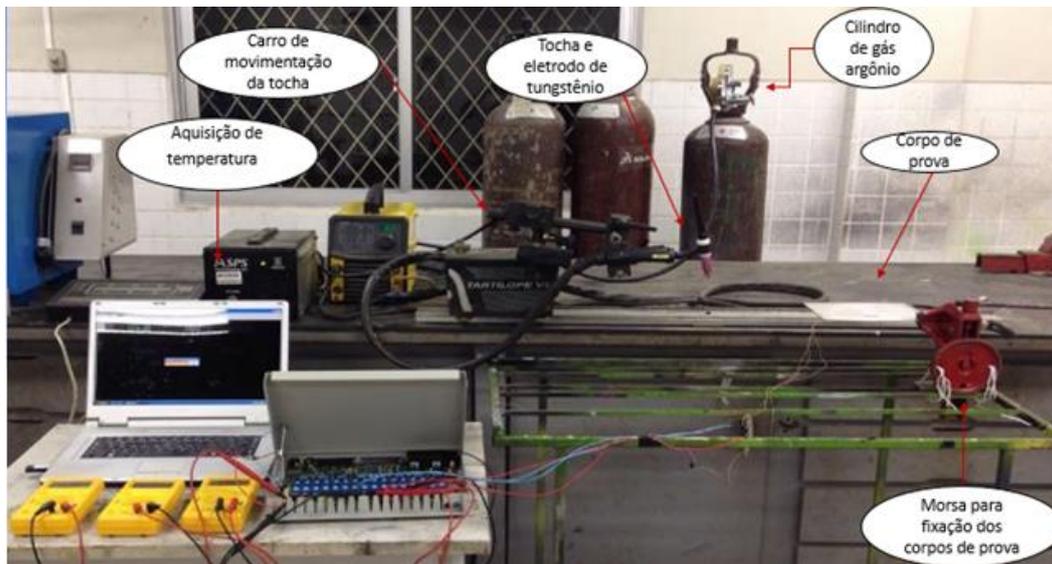


Figura 3: Condições de contorno da análise experimental.

O gás utilizado foi o argônio puro e sua vazão foi de 15 l/min. Outras considerações foram: fixar o corpo de prova, de forma que este fique suspenso ao ar, preso apenas por uma morsa, para que troque o mínimo de calor por condução com outros corpos além do mesmo.

Com respeito a obtenção do campo de temperatura, a figura 4 ilustra a configuração utilização para obtenção tanto no modelo numérico como no modelo experimental. Na situação experimental, foram feitos 3 ensaios em cada seguimento.

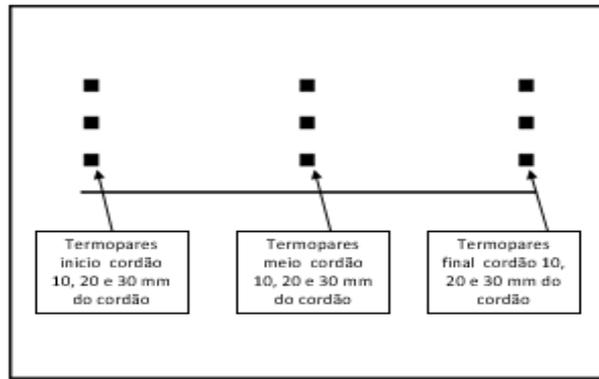


Figura 4: Localização dos termopares para medição do campo de temperatura numérico e experimental.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Deslocamento da fonte de calor computacional

A simulação numérica conforme apresentado na figura 5.

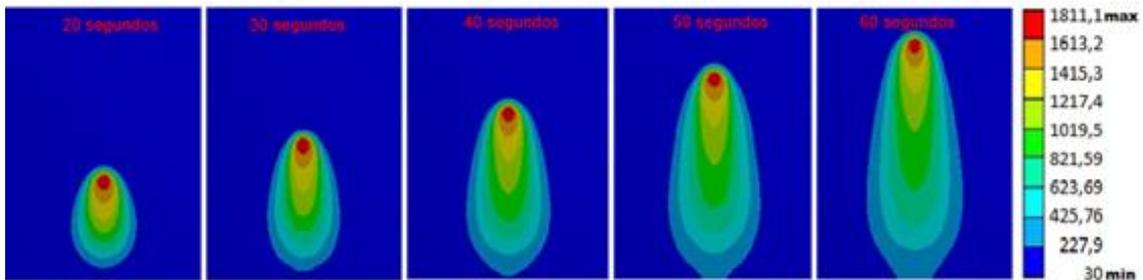


Figura 5: Simulação do deslocamento da fonte de calor.

É notório que a simulação possibilitou a fundição do aço AISI 304, no momento inicial de soldagem, já que possui zona vermelha com um valor de temperatura de 1811,1°C e a temperatura de transição sólido – líquidos do aço inoxidável AISI 304 é 1454°C⁽⁷⁾.

É possível observar o gradiente de temperatura, ocorrendo uma distribuição heterogênea. Além disso, é possível perceber a dupla elipsoidal de Goldak⁽⁵⁾, pela forma que a região afetada pelo calor apresenta.

Medições computacionais e experimentais de temperatura versus tempo

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 figura 6, mostra as medições computacionais do início da formação do cordão de solda, em seus 3 termopares iniciais.

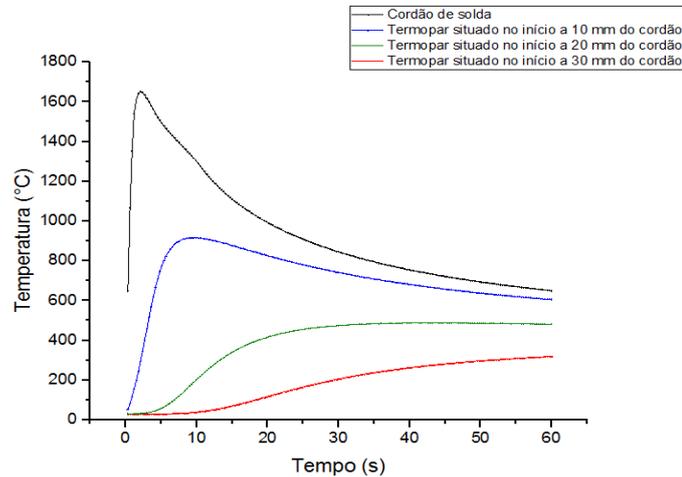


Figura 6: Ciclo térmico medido computacionalmente no início do cordão de solda.

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.

Os resultados coletados experimentalmente são mostrados na figura 7.

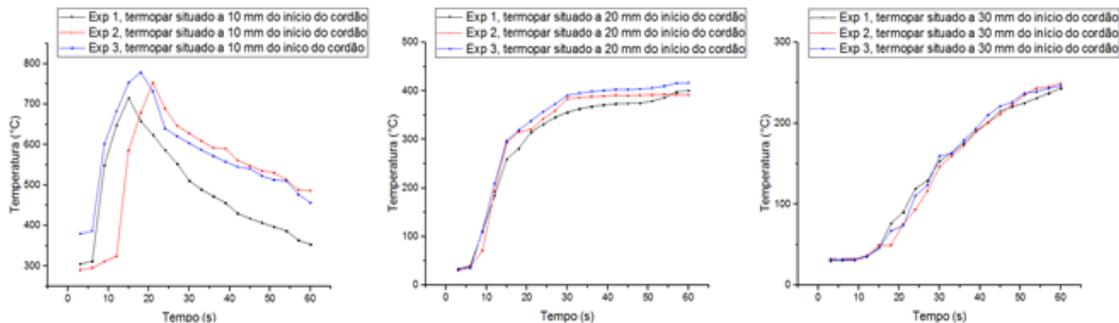


Figura 7: Ciclo térmico medido experimentalmente no início do cordão de solda.

Os 3 experimentos realizados com os termopares localizados no início, a 10 mm do cordão de solda, tiveram divergências entre si, fato que pode ter acontecido devido a falhas operacionais. Comparando o experimental a 10 mm do início do cordão de solda com os dados obtidos computacionalmente, podemos notar que há uma diferença no tempo de pico de temperatura, o experimental leva cerca de 20 segundos para obter o máximo valor registrado, e esse valor por sua vez, difere do computacional em cerca de 100°C. Além disso, os dados experimentais possuem uma taxa de resfriamento maiores que os dados computacionais.

As medições de temperatura no meio do cordão de solda se justificam pelo conhecimento do desenvolvimento da fonte de calor. A figura 8 mostra a temperatura no meio do cordão.

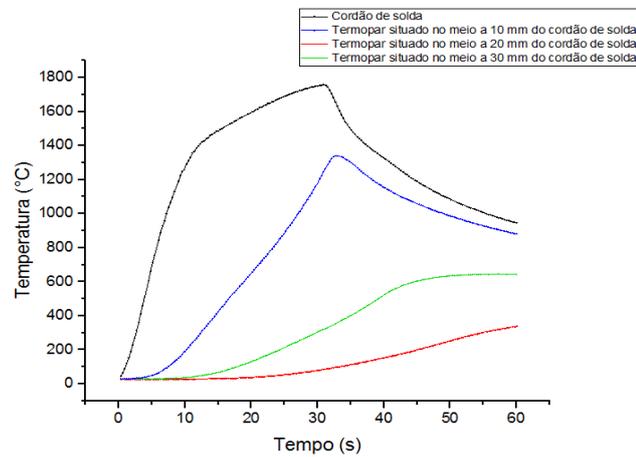


Figura 8: Ciclo térmico medido computacionalmente no meio do cordão de solda.

É possível notar que a poça de fusão possui tendência natural de aumento de temperatura, saindo de cerca de 1615°C, no início, para cerca de 1750°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. Os resultados obtidos experimentalmente são observados na figura 9.

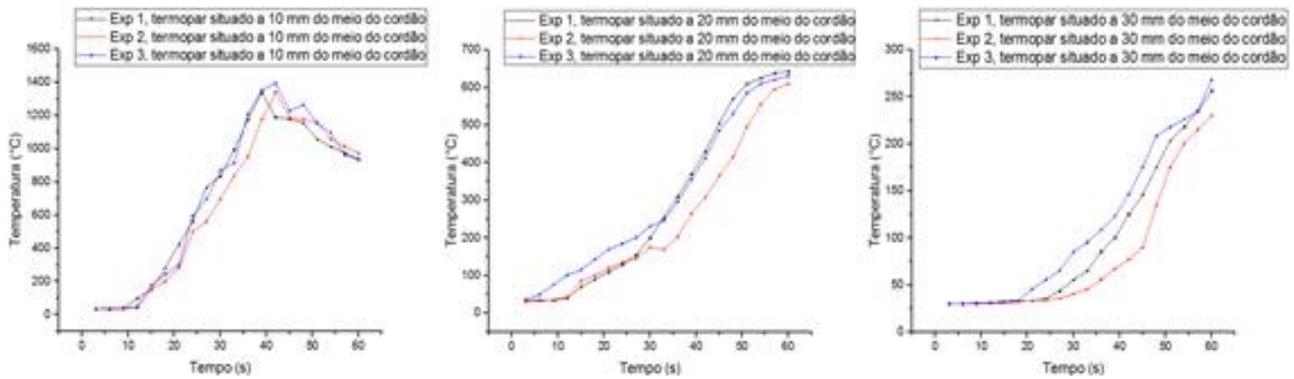


Figura 9: Ciclo térmico medido experimentalmente no meio do cordão de solda.

Os dados mostraram que os picos de temperatura foram obtidos em intervalos diferentes dos dados mostrados computacionalmente, demorando cerca de 40 segundos para acontecer. Entretanto, os valores de picos de temperatura mostraram-se próximos.

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 figura 10, mostra as medidas realizadas no final do cordão de solda.

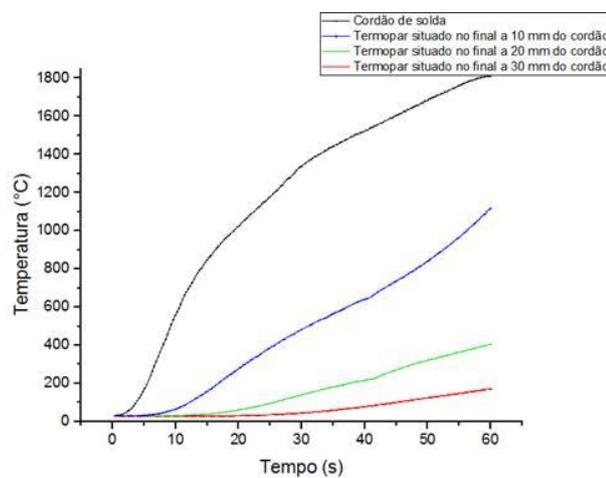


Figura 10: Ciclo térmico medido computacionalmente no final do cordão de solda.

A temperatura do final da poça de fusão chegou a 1811,1°C, como mostrado na figura 5. 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. Os dados experimentais são mostrados na figura. 11.

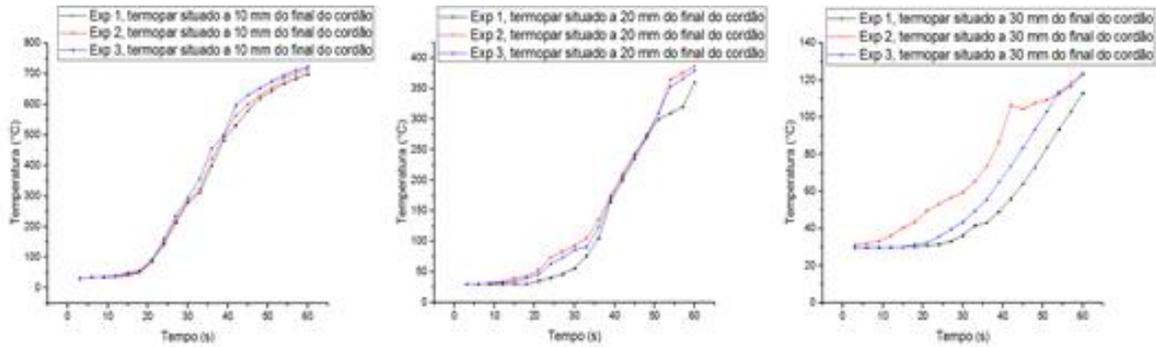


Figura 11: Ciclo térmico medido experimentalmente no final do cordão de solda.

Esses dados tiveram seu pico de temperatura ao final dos 60 segundos de processo em cerca de 200°C menor que os obtidos computacionalmente.

Os dados experimentais a 20 mm do final do cordão de solda mostraram-se mais próximos dos dados computacionais, dentre todos os outros, figura 12.

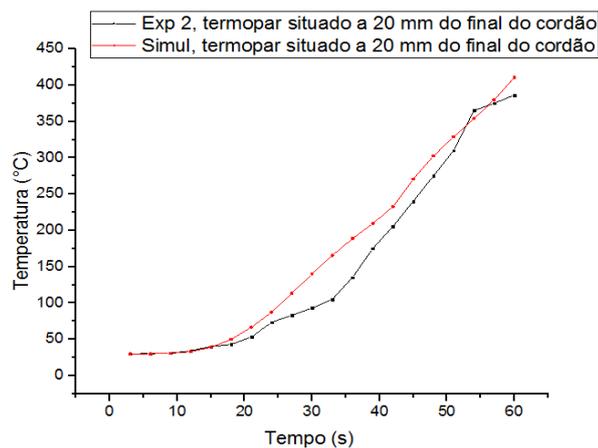


Figura 12: Comparação entre a situação experimental que melhor se assemelha com a simulação.

Mesmo com está situação obtida, não se pode dizer que os dados numéricos foram validados exclusivamente pelo experimental realizado, já que, dentre todos os experimentos realizados, este foi o que melhor assemelhou-se a simulação.

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 figura 13.

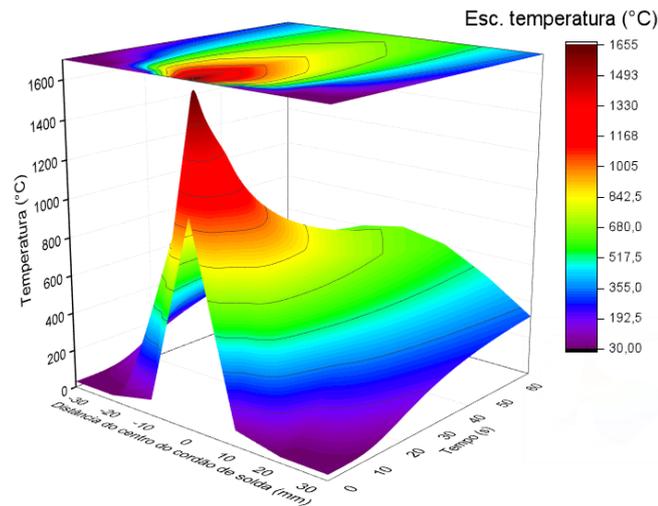


Figura 13: Curva do gradiente de temperatura para medições realizadas no início do cordão de solda.

CONCLUSÃO

Notou-se que a simulação do deslocamento da fonte de calor foi possível nas condições de contorno empregadas e foi coerente como apresentada por outros autores, além disso, foi possível observar uma semelhança, ainda que não convergente, das curvas de temperaturas experimentais com as curvas de temperatura numérica, mostrando que a técnica da dupla elipsoidal de Goldak é eficiente para previsão dos campos de temperatura em um processo de soldagem TIG autógeno via elementos finitos.

REFERÊNCIAS

1. BARBAN, L. M.; **Análise numérica-computacional das tensões induzidas pela soldagem.** 2014. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade de São Paulo.
2. BEZERRA, A. C.; **Simulação numérica da soldagem com aplicação à caracterização do comportamento dinâmico de estruturas soldadas.** 2006. 232f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia.
3. BEZERRA, C. A.; “Modelagem térmica do processo de soldagem TIG via elementos finitos” In: XII Congresso Nacional de estudantes de Engenharia Mecânica. 26, 2005. São Paulo. **Anais. Uberlândia: UFU, 2014.**

4. CAGANI, A. P. M; **Análise térmica do processo de soldagem TIG de amostras metálicas**. 2010. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia.
5. GOLDAK, A. J.; **Computational welding mechanics**. 1ed. Canada: Springer, 2005. 325p.
6. MIRANDA, M. C.; CARVALHO, S. R.; BORGES, V. L.; “Modelo térmico para análise da poça de fusão durante o processo de soldagem TIG”, In: Simpósio de programa de Pós – Graduação em Engenharia Mecânica. 28, 2014. Uberlândia. **Anais. Uberlândia: UFU, 2014.**
7. SEYYEDIAN, M.C.; HAGHPANAHI, M.; SEDIGHI, M.; **Effects of welding sequence and direction on angular distortions in butt-welded plates**. The Journal of Strain Analysis for Engineering Desing. V. 47, N. 1. P 46 – 54, 2012.

NUMERICAL-EXPERIMENTAL ANALYSIS TEMPERATURE FIELD IN TIG WELDING OF AISI 304

ABSTRACT

It conducted a thermal modeling of autogenous TIG welding a steel plate AISI 304 used the finite element software ANSYS Workbench 16.0. To faithfully the actual welding condition, the physical properties of the material (thermal conductivity, specific heat and density) were set to vary with temperature, leading to a transient analysis. heat loss by conduction, convection and radiation were considered. In order to obtain the temperature range were used strategic points of measurement disposed near the weld. He tried to perform the validation of the model through an experimental analysis of the process, with temperature measurements by thermocouples arranged in the same conditions adopted in the numerical model. Although the numerical and experimental results of this work showed no convergence with each other, the experimental results were consistent with the number and the literature.

Key-Words: TIG welding, temperature field, numerical simulation.