



## Obtenção Numérica do Campo de Temperatura, Ciclos Térmicos e Repartição Térmica de uma Junta Soldada de Aço Inoxidável AISI 304

Maria Luiza de Melo Moura<sup>1</sup>, Lorene Ester Fernandes<sup>1</sup>, Abner Conrado Soares do Nascimento<sup>1</sup>, Carlos Augusto do Nascimento Oliveira<sup>2</sup>, Rodrigo José Ferreira da Silva<sup>3</sup>, Pablo Batista Guimarães<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Estudantes do Curso Técnico de Mecânica industrial- IFPE. Bolsistas PIBIC. e-mail: marialuizammelo@hotmail.com

<sup>2</sup>Professor - Doutor – Engenharia Mecânica - UFPE. e-mail: cano.oliveira@gmail.com

<sup>3</sup>Professor - Mestre – Mecânica - IFPE. e-mail: rodrigoferreira@recife.ifpe.edu.br

<sup>4</sup>Professor - Doutor – Mecânica - IFPE. e-mail: pabloguimaraes@recife.ifpe.edu.br

**Resumo:** Este artigo tem por finalidade fornecer o campo de temperatura, os ciclos térmicos e a repartição térmica, os quais foram obtidos através de uma simulação computacional de uma soldagem pelo processo Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), sem material de adição, de uma peça de aço inoxidável AISI 304 com 60×50 e 3 mm de espessura. Para a simulação foi utilizado um aplicativo comercial baseado no método dos elementos finitos (MEF), na qual foi aderida a fonte de calor analítica de dupla elipsoide proposta por Goldak, para modelar o aporte de calor. Foram levadas em consideração as variações das propriedades termo físicas em função da temperatura, os diferentes mecanismos de troca de calor (convecção e radiação) e a transitoriedade e rapidez do processo de soldagem.

**Palavras-chave:** campo de temperatura, ciclos térmicos, repartição térmica, simulação computacional

### 1. INTRODUÇÃO

O uso de modelos de simulação baseados em métodos numéricos é de bastante importância, visto que, pode ser utilizado para prever o campo de temperatura na união conjunta de um aço. Nos processos de soldagem a arco, o aporte de energia ocorre numa área localizada atingindo temperaturas bem acima da temperatura de fusão do material de base. As elevadas diferenças de temperatura que existem entre a área de aplicação de calor e áreas adjacentes à mesma, juntamente com uma boa condutividade térmica que os materiais a serem soldados apresentam, originarão um importante fluxo térmico que condiciona as estruturas e propriedades resultantes, tanto no cordão de solda, como nas áreas adjacentes. Ao se analisar o efeito nocivo que o ciclo de soldagem térmica pode ter sobre a soldagem, o interesse não se concentra, necessariamente, na zona de fusão ou cordão de solda, mas especialmente na área próxima a ele, designada Zona Termicamente Afetada (ZTA), que geralmente tem um grau mais elevado de fragilidade nas suas propriedades mecânicas do que o próprio cordão de solda.

O conhecimento da evolução da temperatura na vizinhança do cordão de soldagem durante o processo da soldagem é vital para determinar o grau de fragilidade na ZTA e para estabelecer estratégias para minimizar estes efeitos térmicos por pré-aquecimento do material de base, tratamentos térmicos. Além disso, conhecendo-se o campo de temperatura é possível determinar a evolução da temperatura em diversos pontos da peça, devido à soldagem, os gráficos que demonstram essa curva são chamados de ciclos térmicos. O ciclo térmico de soldagem determina, em grande parte, as alterações estruturais que uma dada região do material pode sofrer devido ao processo de soldagem. Ou seja, eles alteram a microestrutura e/ou propriedades da região não fundida do metal base, zona termicamente afetada, próxima à poça de fusão. De acordo com o tipo de metal que está sendo soldado, os efeitos do ciclo térmico poderão ser os mais variados. A Repartição Térmica também é de grande importância quando se trata de alteração de microestruturas. Ela está associada basicamente à extensão da zona afetada pelo calor. Esta, por sua vez, é determinada pela mínima temperatura (TZAC), que afeta a microestrutura e/ou as propriedades do metal de base. (E. J. MARTÍNEZ-CONESA, M. ESTREMS e V. MIGUEL. 2010)

Esse trabalho tem por objetivo mostrar os resultados de uma simulação computacional de uma soldagem pelo processo GTAW onde foram obtidos o campo de temperatura, os ciclos térmicos e a repartição térmica de uma chapa de aço inoxidável, vista a importância desses.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

A simulação da soldagem foi realizada por meio de um software comercial baseado no método dos elementos finitos (MEF). Foi utilizada a fonte de calor Goldak onde a distribuição do calor é considerada Gaussiana dada pelas Equações 1 e 2 (GOLDAK, J.A, AKHLAGHI, M., 2005) e duplo elipsoide que, descreve o comportamento da geração de calor à frente e atrás do arco de solda sendo descrito por semieixos,  $a$ ,  $b$ ,  $c_f$  e  $c_b$  como mostrado na Figura 1 onde foram usados como parâmetros geométricos obtidos na literatura  $a$  igual a 0,0025 m,  $c_f$  igual a 0,001 m,  $c_b$  igual a 0,004m,  $b$ , igual a 0,003m e parâmetros da repartição de energia antes e após a tocha  $f_f$ : 0,6;  $f_b$ : 1,4. Para que houvesse o deslocamento da fonte foi desenvolvida uma sub-rotina em Fortran do tipo DFLUX permitindo determinar a posição da tocha em função do tempo.

$$q_f(x, y, z) = f_f \frac{6\sqrt{3}nUI}{abc_f\pi\sqrt{\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \exp\left(\frac{-3z^2}{c_f^2}\right) \quad (1)$$

$$q_b(x, y, z) = f_b \frac{6\sqrt{3}nUI}{abc_b\pi\sqrt{\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \exp\left(\frac{-3z^2}{c_b^2}\right) \quad (2)$$

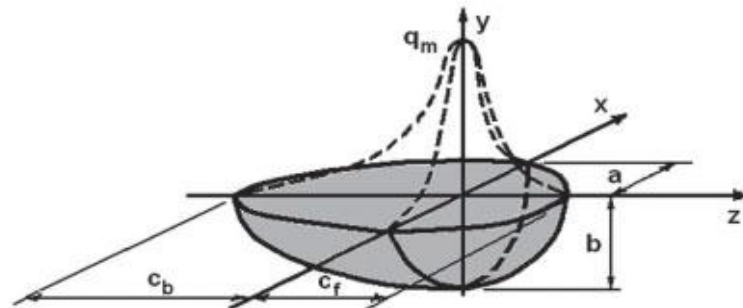


Figura 1- Modelo da fonte de calor duplo elipsoide. ( POZO-MOREJÓN, J.A; CRUZ-CRESPO, A.; DÍAZ-CEPRE, E;2011)

Foi utilizado o processo de soldagem GTAW sem material de adição, com uma corrente de 17 A, tensão de 110 V e rendimento de 80% numa velocidade constante de 0,001 m/s e de duração de 50 s. A placa a ser soldada foi construída com 60×50 e 3 mm de espessura, dividida em elementos do tipo DC3D8 contínuos e 3D, de formulação linear totalizando 18.788 elementos, cada um possui 8 nós, havendo um maior refinamento na ZTA com a finalidade de obter uma maior precisão nas variações de temperatura ao longo da soldagem.

Foram levados em consideração na elaboração do modelo as propriedades termo físicas do AISI 304 (Tabela 1), calor latente de 290.000 kJ/kg e a temperatura solidus e liquidus, 1399 e 1454 °C, respectivamente. Além das condições de contorno térmicas - convecção e radiação - a temperatura ambiente, que foi considerada 25 °C, a emissividade 0,35, coeficiente de convecção 130 W/m<sup>2</sup> e a constante de Stefan-Boltzmann 5,67x10<sup>-8</sup>W/m<sup>2</sup>k<sup>4</sup>. Essas condições foram aplicadas apenas na parte superior e nas laterais da placa excluindo a parte inferior que fica apoiada a mesa durante a soldagem. Foi utilizada apenas uma condição de contorno mecânico, pois a placa foi presa através de um furo de 4 mm de diâmetro engastado, conforme mostrado na Figura 2.

Tabela 1. Propriedades Termofísicas do Aço AISI 304: calor específico ( $c_p$ ), massa específica ( $\rho$ ) e condutividade térmica ( $k$ ) em função da temperatura.

T (°C)	$c_p$ (J/kg°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$k$ (W/m°C)
27	447	7900	15,2
127	515	7859	16,6
327	557	7774	19,8
527	582	7685	22,6
727	611	7582	25,4
927	640	7521	28,0

Fonte: (INCROPERA E DE WITT, 2003).

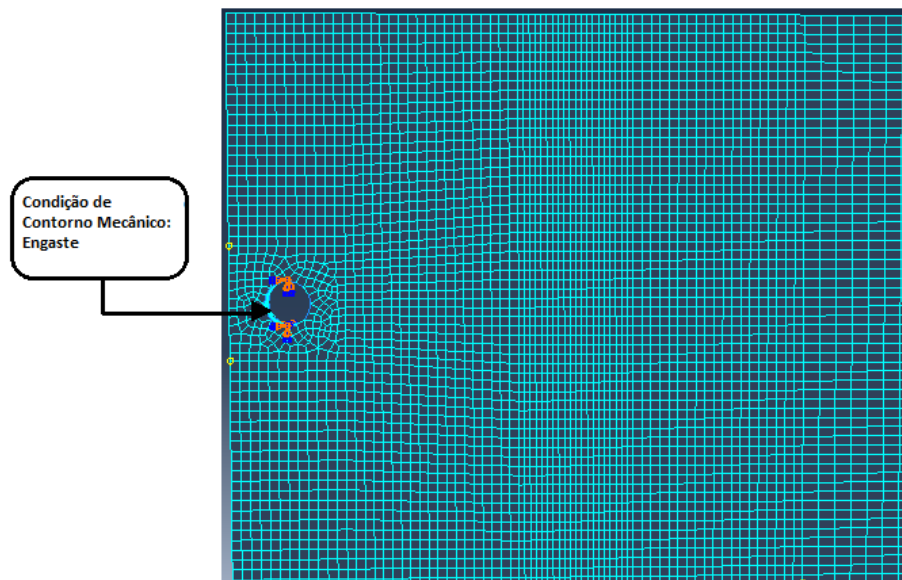


Figura 2- Engaste do furo na placa.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A soldagem virtual teve duração de 50 s. Podemos observar o avanço da temperatura decorrente da mudança da cor da peça, que é mostrada ao lado da placa com legenda da cor com a sua correspondente temperatura, na medida em que a tocha está passando como mostrado nas Figuras 3, 4, 5 e 6. É válido ressaltar na Figura 5, por causa de uma melhor visibilidade, o formato elipsoide da fonte de calor utilizada.

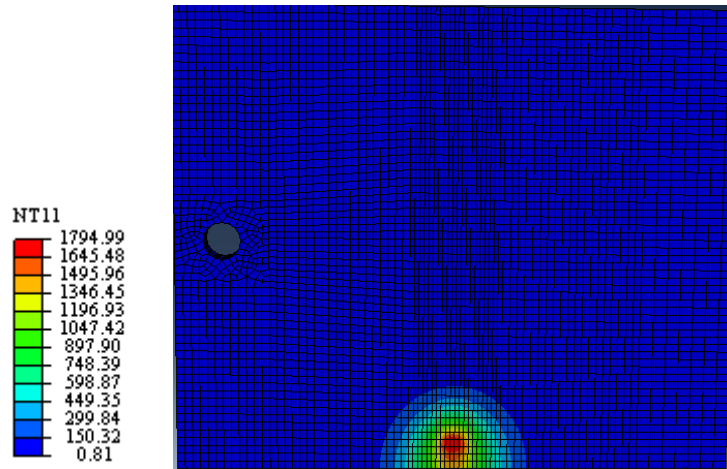


Figura 3- Evolução do Campo de Temperatura [°C] em função do tempo de 3s.

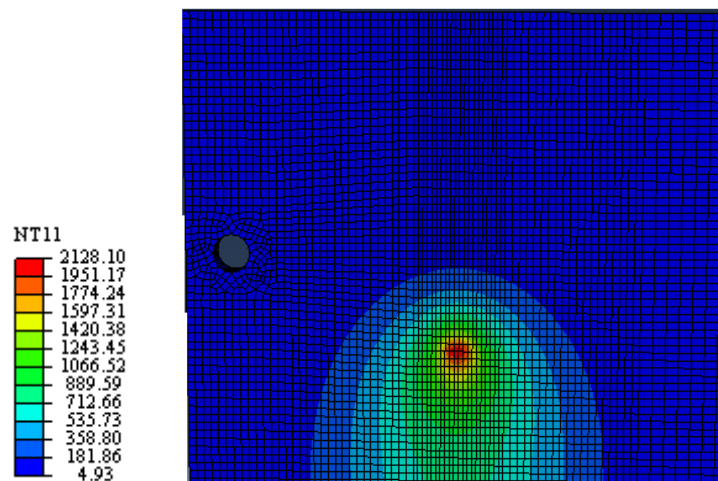


Figura 4- Evolução do Campo de Temperatura [°C] em função do tempo de 15s.

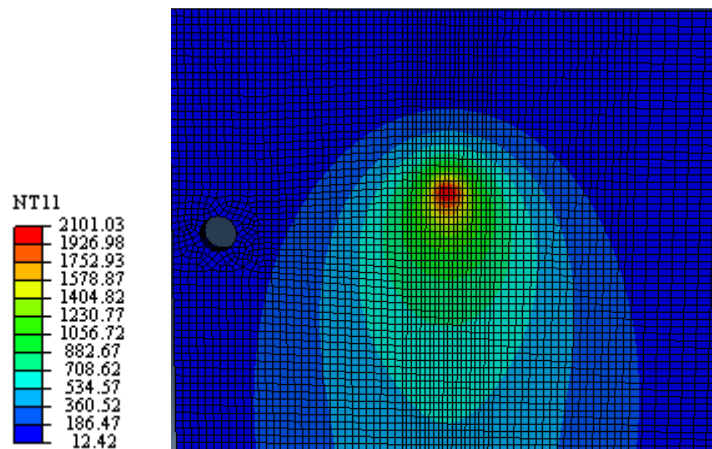


Figura 5- Evolução do Campo de Temperatura [°C] em função do tempo de 30s

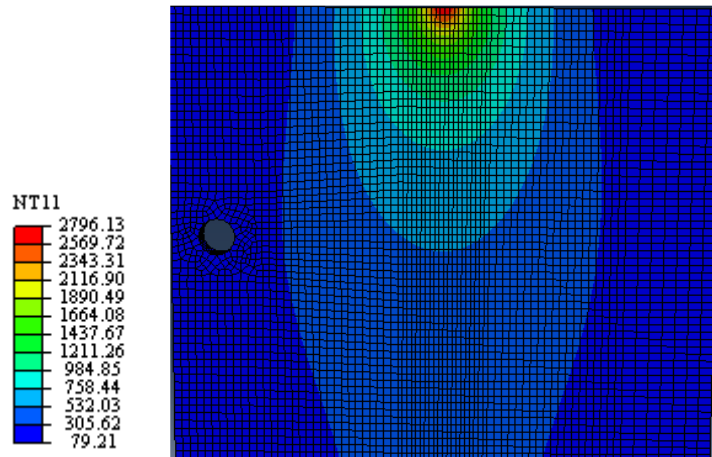


Figura 6- Evolução do Campo de Temperatura [°C] em função do tempo de 50s.

Com a obtenção do campo de temperatura foram gerados os gráficos dos ciclos térmicos, que partiu de um ponto central da linha de solda se afastando dela na horizontal de 0,5 mm em 0,5 mm. Na Figura 7 está representado o gráfico de uma comparação entre alguns dos ciclos obtidos, foram utilizados nessa comparação o ponto central, o ponto a 3,5 mm do centro, o ponto de 7 mm do centro e o ponto a 10,5 mm do centro, os quais indicam a máxima temperatura de 2171,15 °C; 1067,95 °C, 623,60 °C e 385,66 °C, respectivamente.

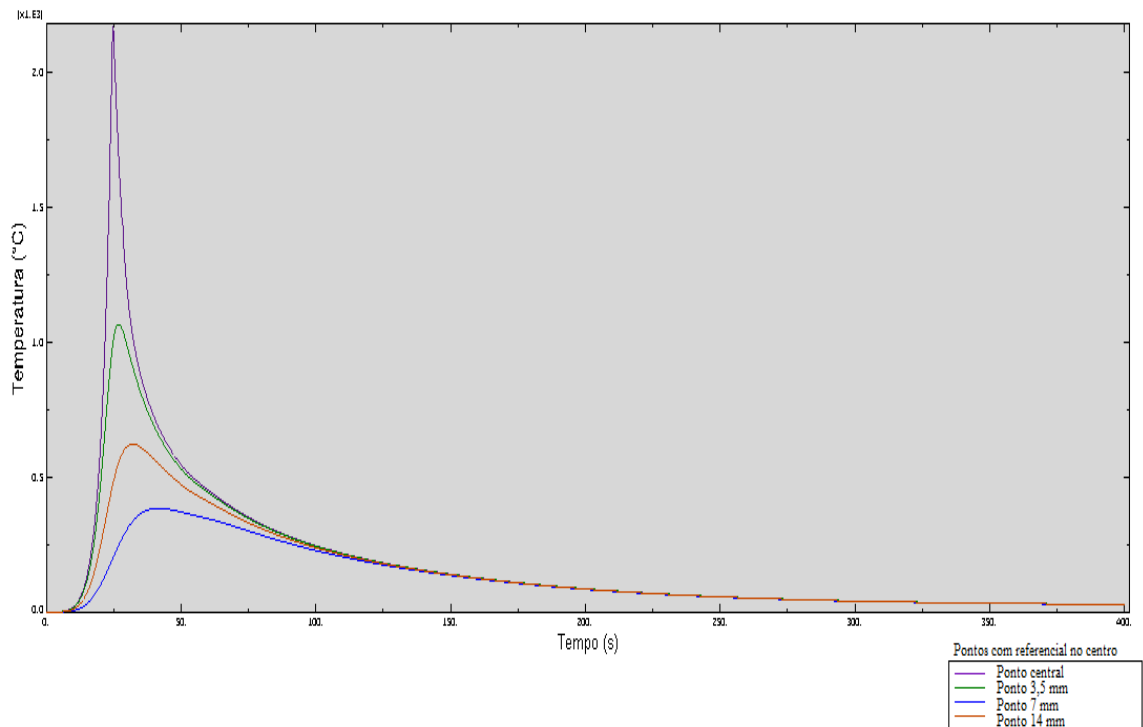


Figura 7- Comparativo de ciclos térmicos de soldagem.

Ao gerar esse gráfico, observou-se individualmente, como previsto, que as curvas a partir de um ponto inicial do gráfico aumentaram na vertical, dependendo da sua localização em relação à provável ZTA, até atingir a temperatura de pico ( $T_p$ ), temperatura máxima. Após atingir essa temperatura, ou seja, depois da passagem da tocha, a temperatura começa a resfriar naquele determinado ponto e por consequência a curva começa a descer até se estabilizar ao atingir a temperatura ambiente.

Comparando-os constatou que à medida que há um distanciamento da linha de solda a  $T_p$  diminui havendo uma menor incidência na propagação do calor.

Após a obtenção dos ciclos térmicos foram utilizadas as máximas temperaturas de cada ciclo térmico em função das distâncias de cada ponto para traçar o gráfico da repartição térmica. A temperatura máxima atingida na curva do gráfico existente na Figura 8 foi de 2172,99 °C. O gráfico atendeu às expectativas quando podemos perceber que do centro do cordão de solda, onde a temperatura atinge seu ápice, para esquerda da peça e para a direita o comportamento da curva é semelhante. Através dos ciclos térmicos sofridos em cada ponto do material soldado pode-se determinar as transformações microestruturais e conseqüentemente as propriedades esperadas para uma junta. A determinação do campo de temperaturas em uma junta soldada é de grande importância para análises futuras das tensões residuais.

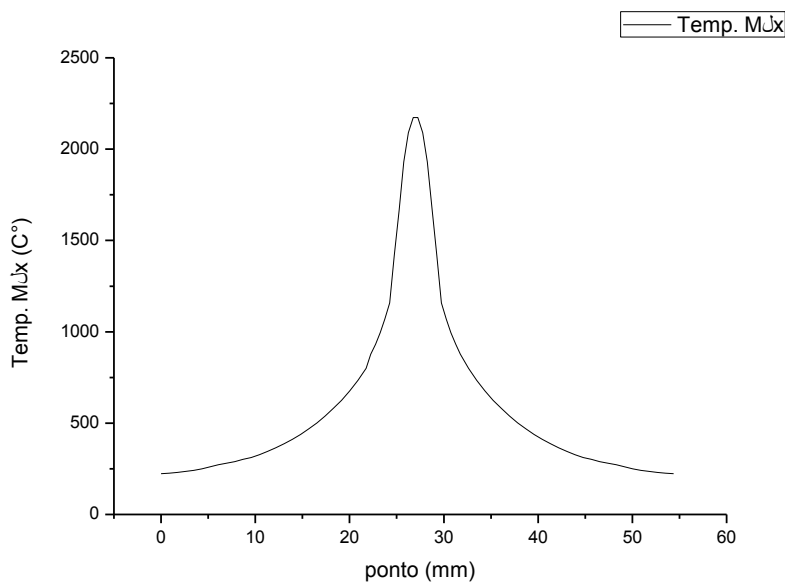


Figura 8-Gráfico da repartição térmica a partir de um ponto central do cordão de solda.

## 6. CONCLUSÕES

O estudo do campo de temperatura propicia o conhecimento dos ciclos térmicos que é de bastante importância, pois produz na zona termicamente afetada (ZTA) para aços, tanto durante o aquecimento como durante o resfriamento, várias alterações estruturais que afetam significativamente as propriedades mecânicas do material. Além dos problemas metalúrgicos causados pelos ciclos térmicos durante a soldagem, outros fenômenos podem provocar efeitos danosos como a ocorrência de deformações plásticas e, conseqüentemente, o aparecimento de tensões residuais na junta soldada e suas adjacências. Informações sobre o ciclo térmico são necessárias para a obtenção da repartição térmica, a partir da qual pode-se obter a largura da ZTA. Com os dados obtidos da repartição térmica é possível um futuro estudo das tensões residuais.

## REFERÊNCIAS

GOLDAK, J.A.; AKHLAGHI, M. **Computational Welding Mechanics**, Spring, New York, 2005. 30-35 p.

INCROPERA, F.P.; DE WITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 5ª edição, Rio de Janeiro, Brasil, 2003. 494 p.



POZO-MOREJÓN, J.A.; CRUZ-CRESPO, A.; DÍAZ-CEPRE, E. **Análisis térmico de soldadura GTAW sobre placa de acero AISI 316L empleando el método de elementos finitos**, Las Villas, Cuba, 2011.

E. J. MARTÍNEZ-CONESA; M. ESTREMS; V. MIGUEL. **Desarrollo de un modelo matemático de diferencias finitas para el análisis del campo de temperaturas en la soldadura por arco de chapas finas de acero inoxidable**, Espanha. *In*: REVISTA DE METALURGIA, 46 (6) NOVIEMBRE-DICIEMBRE, 511-519, 2010. Disponível em: < <http://www.periodicos.capes.gov.br/> > Acesso em: 6 jul 2012.