

# ANÁLISE TÉRMICA DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG EM UM DUTO EM OPERAÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO NUMÉRICO DE VOLUMES FINITOS

Theo Martins de A. Paiva<sup>1</sup>, Jakson Gomes de O. Júnior<sup>1</sup>, Francisco Edson N. Fraga<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Engenharias – Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)  
Mossoró – RN – Brazil

Theo\_martins\_alencar@hotmail.com, jakson117@live.com,  
nfraga@ufersa.edu.br

**Abstract.** *The aim of this work is the modeling and simulation of the autogenous TIG welding process in an AISI 1020 steel duct with water flowing through the finite volume numerical method for the determination of temperature transient fields at the which material is subject. Through the simulation of the in service welding process it was possible to determine the transient temperature fields to which the material is subjected, this result serves as a basis for the prediction of the actual behavior of the duct when submitted to welding, with that data, it was possible to notice the forced cooling wich the duct is subjected.*

**Resumo.** *Este trabalho tem como objetivo a modelagem e simulação do processo de soldagem TIG autógeno em um duto de aço AISI 1020, com água escoando em seu interior, através do método numérico de volumes finitos, para a determinação dos campos transiente de temperaturas ao qual o material está sujeito. Através da simulação do processo de soldagem em carga foi possível determinar os campos transientes de temperatura a que o material está sujeito, tal resultado serve como base para a predição do comportamento real do duto quando submetido a soldagem, de posse desses dados foi possível notar o rápido resfriamento forçado a que o duto está sujeito.*

## 1. Introdução

O processo de soldagem de duto em operação, ou soldagem em carga, consiste em realizar reparos nas paredes de uma tubulação que apresente algum defeito, como a redução da espessura da parede devido a corrosão, sem que seja necessário interromper o funcionamento do Sistema ao qual o duto pertence [OLIVEIRA, 2016]. Este tipo de intervenção de manutenção apresenta não só vantagens técnicas como fazer um reparo mais pontual e assim evitando a troca de uma porção de tubulação, mas também vantagens econômicas, pois evita a interrupção da operação para a realização do reparo, não gerando perdas devido a paralização do processo.

O processo de soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (*Gas Tungsten Arc Welding - GTAW*), ou soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*), como é mais conhecido, é definido como sendo o processo de soldagem no qual a união de peças se dá através do arco formado entre um eletrodo de tungstênio não consumível e a peça, a poça de fusão do material causada pelo arco elétrico é protegida de contaminações da atmosfera por um gás inerte, geralmente argônio, ou mistura de gases inertes [MARQUES, 2011].

A análise térmica de um processo de soldagem pode ser feita através de métodos analíticos, que simplificam o processo ao desconsiderar as variações das propriedades físicas do material que dependem da temperatura, ou por meio de métodos numéricos, que mesmo apresentando simplificações, podem simular a variação de fatores termofísicos do material e a ocorrência de fenômenos como a convecção e a radiação, que influenciam na quantidade de calor transferida para a peça durante a soldagem.

A soldagem é um fenômeno altamente transiente [MELO, 2016], onde as variáveis termofísicas, como a condutividade e o calor específico, variam devido a temperatura e a quantidade de calor transferido para a peça, logo, simulações numéricas que levem essas mudanças em consideração são cada vez mais utilizadas para a análise térmica do processo de soldagem [BEZERRA, 2006].

A simulação de um processo de soldagem em carga consiste em aliar duas áreas de simulação de engenharia, a primeira é a simulação da distribuição de calor sobre o material devido a passagem da fonte de calor da solda, a segunda é fluidodinâmica computacional, que consiste em simular o comportamento de um determinado fluido em certas condições. Ao aliar esses dois campos, este trabalho busca obter os resultados de temperatura de um determinado material sujeito a dois fenômenos altamente transientes, a soldagem e o resfriamento forçado devido ao escoamento de um fluido.

Com base no que foi exposto, o presente trabalho tem como objetivo a análise dos campos transientes de temperatura de um duto em operação que sofre o processo de soldagem em carga. Para tanto, será feita uma análise numérica utilizando o método de volumes finitos (MVF), levando em consideração a variação de parâmetros termofísicos do material soldado. A simulação da soldagem de duto em operação será realizada em uma tubulação com uma polegada de diâmetro e 3,2 mm de espessura de parede, com água escoando em seu interior. O processo será simulado no software ANSYS® Fluent 19.0. Para a representação da distribuição de energia da solda na simulação, foi escolhida a fonte de calor analítica volumétrica hemisférica (Gaussiana).

## **2. Fontes analíticas de calor**

As fontes analíticas de calor são funções matemáticas que representam aproximações para a distribuição de temperatura em uma peça submetida a soldagem [PARRE, 2011]. Para a obtenção de simulações confiáveis das condições térmicas que o processo de solda impõe sobre uma peça, a escolha de um modelo de fonte analítica de calor apropriada é de fundamental importância [SOUZA, 2016].

As fontes de calor se dividem em fontes pontuais, superficiais e volumétricas. Para processos de soldagem com penetrações mais altas no material e com grande quantidade de energia térmica transferida, as fontes de calor volumétricas são mais precisas, pois as fontes pontuais não adaptam muito bem um processo de soldagem com cordão de solda e as superficiais não representam bem a penetração da poça de fusão [MASCARENHAS, 2005].

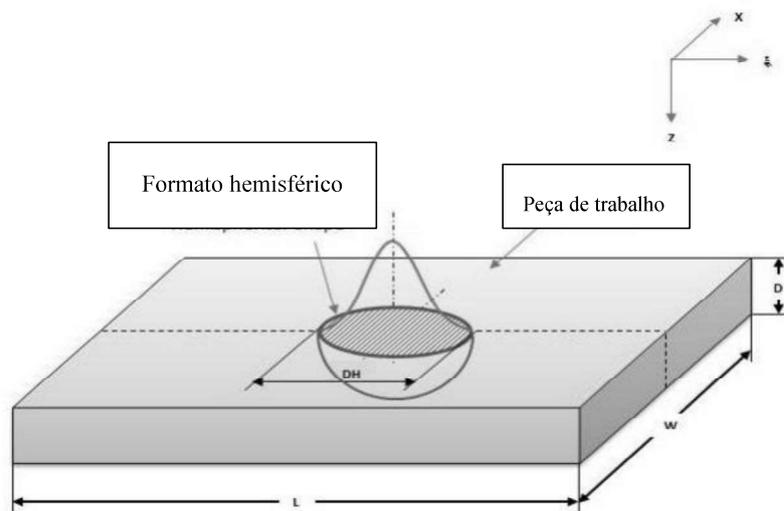
### **2.1 Fonte de calor volumétrica – Hemisférica (Gaussiana)**

A fonte de calor analítica volumétrica hemisférica representa a distribuição de energia sobre a forma de uma curva gaussiana e a distribuição do calor na peça com o formato de

um hemisfério de diâmetro DH [MASCARENHAS, 2005], conforme mostra a Figura 1. Essa fonte analítica de calor é descrita através da Equação 1:

$$q(x, y, \xi) = \frac{6\sqrt{3}Q}{c^3\pi\sqrt{\pi}} e^{-3x^2/c^2} e^{-3y^2/c^2} e^{-3\xi^2/c^2} \quad (1)$$

Onde, “Q” representa a taxa de entrada de energia (W), o termo “c” é o raio característico da distribuição do fluxo de calor (m), “v” é a velocidade de soldagem usada no processo (m.s<sup>-1</sup>), “t” indica o tempo (s) e “ξ” é a coordenada Z da fonte de calor ao longo do tempo tal que  $\xi = z + (v.t)$ .



**Figura 1. Distribuição de energia da fonte hemisférica.**

**Fonte: Adaptado de Parre, 2011**

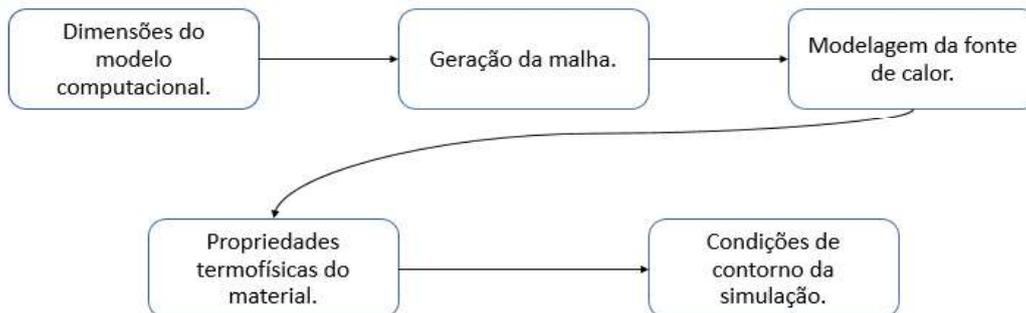
A taxa de entrada de energia Q, para um processo de soldagem, é definida através da seguinte equação:

$$Q = \eta IV \quad (2)$$

Em que “η” é a eficiência do processo de soldagem, em porcentagem, I é a corrente utilizada no processo de soldagem (A) e V é a tensão utilizada (V).

### 3. Metodologia

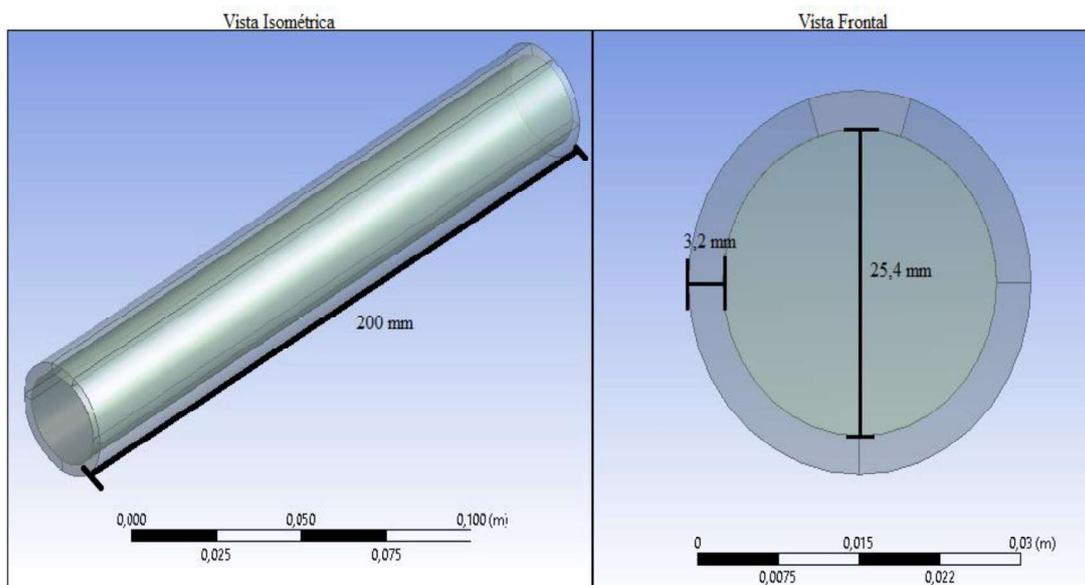
A simulação do processo de soldagem em operação foi realizada no software ANSYS® Fluent 19.0. Para a sua realização, primeiramente foram definidas as dimensões do modelo, para logo após a geração da malha e a modelagem da fonte de calor. Ainda foi necessária a definição das propriedades termofísicas do material e as condições de contorno da simulação. Todo esse processo está demonstrado no fluxograma apresentado na Figura 2, após o término das simulações os resultados foram obtidos através do plugin CFD post processor do ANSYS:



**Figura 2: Fluxograma da simulação.**

### 3.1 Dimensões do modelo computacional

Para a simulação, o modelo utilizado nesse trabalho foi um duto de 1” de diâmetro (25,4mm), 3,2mm de espessura de parede e um comprimento de 200mm, a criação da peça foi feita através dos softwares SolidWorks® 2015 e Design Modeler®. O modelo consiste em três corpos, um constituído por um segmento de arco no qual será inserida a fonte de calor, o segundo com o restante do duto e um terceiro corpo que representa o fluido no interior da tubulação. O duto utilizado na simulação é mostrado na Figura 3.



**Figura 3: Modelo computacional utilizado.**

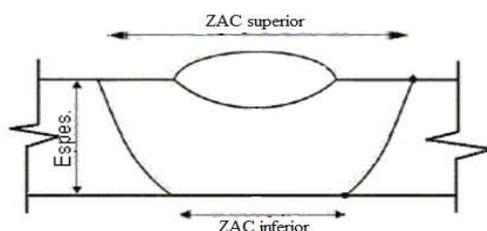
### 3.2 Geração da malha

A malha para o problema a ser simulado, foi gerada a partir de uma geometria hexaédrica, por reduzir o número de nós necessários, e não estruturada, pela facilidade na construção. Para garantir uma boa aproximação dos resultados, foi utilizado o método de convergência de malhas através do parâmetro  $h_i$  apresentado por [Ferro, 2009], que consiste em refinar a malha cada vez mais e comparar o valor de alguma variável da simulação de cada malha até que mesmo com o refino da malha não haja variação no valor analisado. Para o problema a malha gerada conta com 1505522 nós.

### 3.3 Modelagem da fonte de calor para o problema

A fonte de calor escolhida para a simulação foi a fonte volumétrica hemisférica (Gaussiana), cuja função que a descreve foi apresentada na Equação 1. Para o seu ajuste, é preciso definir o raio característico da distribuição de calor, representado pelo termo “c”, na Equação 1.

Para a determinação desse parâmetro, “c”, foi utilizado o método experimental proposto por [MASCARENHAS, 2005], que consiste na realização de soldagens preliminares na parede do duto, sem o fluido, para analisar o aporte térmico do processo do processo. Os dados utilizados foram retirados de [PÉREZ, 2011], que faz esse tipo de ensaio para dutos de aço AISI 1020 de 3,2mm de espessura de parede, porém utiliza a soldagem com eletrodo revestido. Como o processo de solda ocorre em um material fino, a ZAC (Zona Afetada pelo Calor) possui duas medias, a ZAC superior e a inferior, como mostra a Figura 4. O parâmetro “c” da Equação 1 foi determinado como sendo aproximadamente 4 mm que corresponde à metade do comprimento da ZAC superior para um processo de soldagem com uma condição de energia similar a utilizada na simulação, processo EANA05 apresentado em [PÉREZ, 2011].



**Figura 4: Representação da ZAC do processo de soldagem em material fino.**

**Fonte: adaptado de Mascarenhas, 2005**

As condições de soldagem utilizadas na simulação estão apresentadas na seguinte tabela:

**Tabela 1: Parâmetros de soldagem utilizados na simulação.**

Eficiência do processo	Tensão do arco (V)	Corrente utilizada (A)	Velocidade de soldagem ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
0,75	10	155	2

A fonte analítica de calor volumétrica hemisférica foi inserida na simulação através de uma *user defined function* (UDF), que consiste em um código em linguagem de programação C++, que utiliza funções macro próprias do software e que após ser criado é inserido no solver do ANSYS® Fluent.

### 3.4 Propriedades termofísicas do material

O material utilizado no duto foi o aço AISI 1020, um aço de baixo teor de carbono. Para a determinação das propriedades termofísicas do material que variam em função da temperatura, foi utilizado um recurso próprio do ANSYS® Fluent, que permite que as características do material que é simulado sejam definidas através de funções polinomiais cuja variável independente pode ser a temperatura, esse recurso, polynomial fit, é acessado na própria aba de definição do material.

As funções polinomiais que definem as propriedades de calor específico e condutividade térmica, foram definidas através de uma interpolação polinomial feita através do software Matlab®, com base nos dados apresentados em [SOUZA, 2016], para o calor específico (C) foi gerado um polinômio de quarta ordem, e para a condutividade térmica (K), um de sétima ordem.

Para simular o fluido que escoar dentro da tubulação, foi utilizada a água. Na simulação utilizou-se o próprio material padrão presente no ANSYS para a água. O escoamento do fluido foi definido a partir da vazão mássica que entra na tubulação, foi definida uma vazão mássica de  $0,5(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$  na direção normal à direção do escoamento, foi considerada uma saída sem diferença de pressão. O modelo de turbulência escolhido para a simulação foi o  $\kappa - \varepsilon$ , que por ser um modelo de apenas duas equações, gera uma economia de recursos computacionais.

#### 4. Resultados e discussões

Os resultados gráficos da simulação juntamente com todos os dados a respeito dos campos transientes de temperatura, foram obtidos através do plugin CFD-post processor do próprio software ANSYS.

##### 4.1 Campos transientes de temperatura

A formação dos campos transientes de temperatura na parede superior do tubo pode ser vista com relação ao tempo do processo de soldagem na Figura 5. Nela está representado o procedimento em cinco diferentes estágios, em três deles a fonte analítica de calor ainda está iniciando a entrada no material e nas duas últimas, toda a fonte já se encontra sobre o material. É possível notar a formação das isothermas em formato hemisférico, característica da fonte de calor utilizada.

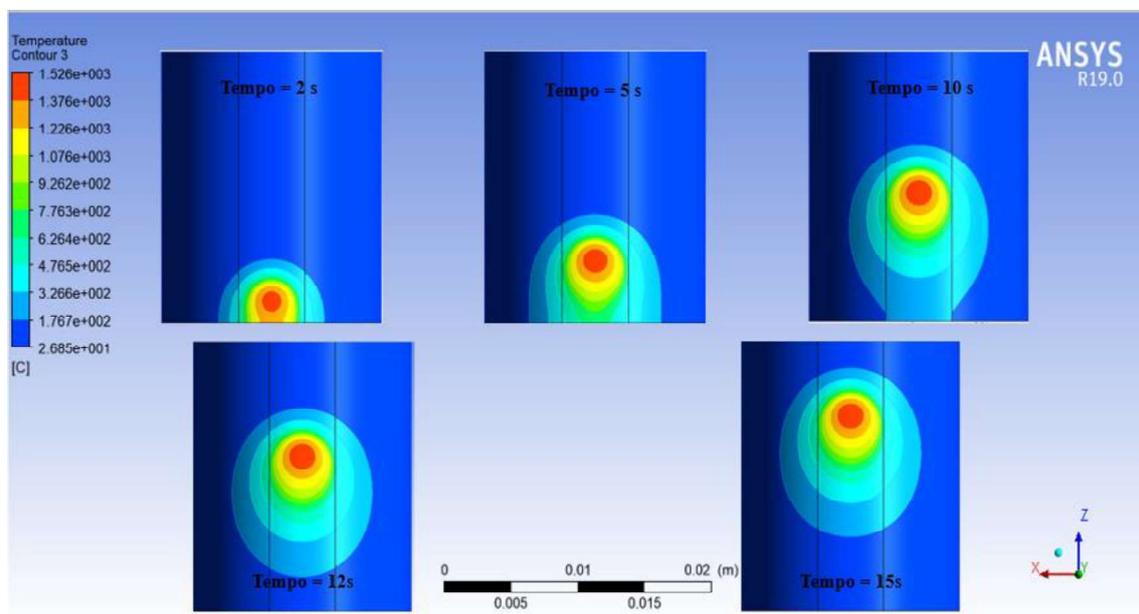


Figura 5: Formação dos campos transientes de temperatura com relação ao tempo.

As partes compreendidas pela isoterma vermelha na Figura 5, representam as áreas fundidas, pois sua temperatura supera a de fusão do material,  $1500^{\circ}\text{C}$  [SOUZA, 2016]. Um fato a ser notado sobre este resultado é o resfriamento forçado da parte do

material onde a fonte de calor já passou, logo após a sua passagem a temperatura da peça já volta a faixa dos 26°C, esse efeito é visível na comparação da imagem entre 10 e 15 s.

Como o ajuste da fonte de calor analítica volumétrica hemisférica foi feito através de dados obtidos de um processo de soldagem diferente com níveis de energia similares, os valores obtidos para a caracterização dos campos transientes de temperatura podem apresentar erros. Outra fonte de erros é a aproximação feita para os comportamentos das variáveis termofísicas do material e a consideração de densidade constante.

## 5. Conclusões

O estudo dos efeitos do processo de soldagem em operação para um duto de aço baixo carbono com água escoando em seu interior, obteve êxito em sua determinação através da simulação computacional, porém, devido ao tempo de desenvolvimento deste trabalho, não foi possível a realização de ensaios experimentais que pudessem validar a simulação e verificar a sua precisão.

Com base na pesquisa que levou a realização deste artigo, os trabalhos que abordam a simulação de soldagem, geralmente, trazem simulações de processos de soldagem em chapas, sem levar em consideração o efeito de algum fluido escoando sobre a peça, como os trabalhos realizados por Bezerra (2016), Parre (2011) e Souza (2016), que são referências para este trabalho. A contribuição deste artigo está justamente em simular um processo onde a soldagem acontece em um elemento com fluido escoando em seu interior, isto é, a soldagem em carga, um processo altamente utilizado na indústria.

As simplificações do modelo, como já discutido nos resultados e discussões, podem ter ocasionado incertezas. O ajuste da fonte analítica de calor ter sido feito utilizando dados de um processo com algumas diferenças do proposto pode ter causado erros que poderiam ter sido evitados apenas com a realização de uma macrografia sobre um duto que passou pelo processo de soldagem nas condições propostas para a simulação, porém a falta de recursos e tempo de desenvolvimento acabou por limitar o trabalho.

## Referências

- BEZERRA, A. C. “Simulação numérica da soldagem com aplicação à caracterização do comportamento dinâmico de estruturas soldadas”. 2006. 232p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.
- FERRO, Luís Morão Cabral. “Estudo experimental numérico e experimental do escoamento numa turbina hidráulica axial”. 2009. 297 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.
- MARQUES, P. V. et al. “Soldagem fundamentos e tecnologias”. 3 ed. Belo horizonte: editora UFMG, 2011.
- MASCARENHAS, L. A. B. “Estudo da aplicação do processo TIG alimentado para soldagem em operação”. 2005. 106p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- MELO, R. L. F; “Obtenção numérica e experimental do campo de temperatura na soldagem TIG do aço AISI 304”. 2016. 85p. Projeto de conclusão de curso (Graduação

- em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2016.
- PARRE, M. D. “Heat and fluid flow modeling in twin-wire welding”. 2011. 65p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Indian Institute of Technology Hyderabad, Índia, 2011.
- PÉREZ, G. E. G. “Estabelecimento de critérios para evitar a perfuração na soldagem de tubulações em operação de pequena espessura”. 2005. 102p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- OLIVEIRA, J. F. M; “Análise e reparo em dutos corroídos. Um estudo de caso para reparo por dupla calha”. 2016. 128p. Monografia (Especialização em Engenharia de Dutos) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- 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.