

## ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE JUNTA SOLDADA POR TIG PARA APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE DUPLA CALHA EM TUBOS DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA

**Maicon Maia Lemos, maiconlemons@gmail.com<sup>1</sup>**  
**Paloma Pereira da Silva Coelho, palomapscoelho@gmail.com<sup>1</sup>**  
**Ricardo Alexandre Amar de Aguiar, raaguiar@cefet-rj.br<sup>1</sup>**  
**Hector Reynaldo Meneses Costa, hectorey@gmail.com<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica CEFET/RJ.

**Resumo:** *Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento da zona termicamente afetada (ZTA) em uma junta de topo feita através do processo de soldagem TIG em um tubo de aço de alta resistência API 5L X-60 usando a técnica da dupla calha (luva). Após a execução da solda em um passe único de raiz, foram realizados exames macrográficos e por microscopia ótica. Em seguida, foram feitas simulações numéricas utilizando um modelo de elementos finitos. Foram comparados resultados experimentais e numéricos, para analisar a distribuição de temperaturas na região da solda e a largura (profundidade) da ZTA. O objetivo de estudar a ZTA através do seu ciclo térmico é que nesta região existe a possibilidade de formação de zonas frágeis devido às altas temperaturas do processo. Os resultados obtidos na comparação entre o modelo numérico e experimental da largura (profundidade) da zona termicamente afetada apresentaram um erro de aproximadamente 7%, o que confirma a aceitabilidade do estudo.*

**Palavras-chave:** *Soldagem, Distribuição de Temperatura, Elementos Finitos*

### 1. INTRODUÇÃO

Soldagem é o processo de união de materiais (principalmente metais) mais importante na área industrial sendo utilizada na fabricação ou recuperação de peças, equipamentos e estruturas. É aplicada desde pequenos componentes eletrônicos até em grandes estruturas e equipamentos (pontes, navios, plataformas). Existem diversos tipos de processos de soldagem, sendo necessário escolher o mais adequado para cada projeto de acordo com suas características específicas, Bang et al, 2002. .

Segundo Ferandez et al (2003) dentre as vantagens do processo de soldagem pode-se citar a eficiência e integridade elevada das juntas, possibilidade de ser aplicada em diversos projetos (graças a grande variedade de processos), aplicável a diversos materiais, juntas isentas de vazamentos, possibilidade de operação manual ou semi-automática em alguns processos, sem limitação de espessura, redução do tempo de fabricação e um custo razoável.

Dentre as desvantagens destacam-se a alteração da microestrutura e de propriedades da peça (podendo ocasionar trincas e outros tipos de falhas), o surgimento de distorções ou tensões residuais e a exigência de mão de obra qualificada.

A escolha adequada do processo de soldagem a ser utilizado em uma determinada situação dependerá basicamente de fatores como: o tipo, a geometria, a localização e a posição da junta a ser soldada no equipamento; a penetração desejada para o cordão de solda; a posição de soldagem (característica fundamental a ser analisada); a espessura do material a ser soldado; a natureza do material; e o custo financeiro.

Para uma maior produtividade com manutenção da qualidade, o ideal é observar os requisitos do projeto e determinar quais são os mais rigorosos e, conseqüentemente, exigem maior controle. Nesses, aplica-se processos de soldagem de qualidade elevada. Em projetos de menor responsabilidade aplica-se um processo mais simples e, por conseqüência, mais barato.

Neste trabalho, o processo utilizado para a soldagem da amostra foi o TIG. Neste processo o arco é gerado entre a peça e um eletrodo de tungstênio, não consumível, fundindo as partes a serem soldadas, com auxílio, ou não, de materiais de adição. A proteção contra a contaminação pela atmosfera, do arco e da poça de fusão, é feita por uma nuvem de gás inerte ou mistura de gases inertes.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Material

Ao utilizar-se um aço de alta resistência, procurou-se garantir uma ductilidade conveniente e alto limite de resistência à tração, além disso, estes materiais apresentam excelente soldabilidade e uma ótima resistência à corrosão, maior do que os aços estruturais convencionais. Neste trabalho, foi utilizado um aço com classificação API 5L X – 60, para o tubo e a dupla calha (luva).

A composição química do material em estudo foi obtida conforme análise por espectrometria de emissão óptica e é apresentada abaixo na Tab. (1).

**Tabela 1. Composição Química do aço X – 60.**

Elemento	%	Elemento	%
Alumínio	0.016	Manganês	1.39
Carbono	0.107	Molibdênio	0.047
Cobre	0.008	Nióbio	0.019
Cromo	0.024	Níquel	0.015
Enxofre	0.007	Silício	0.176
Fósforo	0.018	Titânio	0.019
Vanádio	0.042		

### 2.2. Processo de Soldagem

O processo utilizado na soldagem foi o TIG. O gás de proteção utilizado foi o Argônio e o eletrodo tinha como composição química Tungstênio com 2% de tório. A voltagem utilizada no processo de soldagem foi de 23 V e a corrente de 120 A. A velocidade de deslocamento da solda foi de 0,004 m/s.

A eficiência da transferência de energia do arco foi considerada de 75%. A existência da eficiência do arco está relacionada com as diversas perdas de calor inerentes aos processos de soldagem, ou seja, nem toda a energia elétrica é transferida para a peça em forma de calor. A eficiência é função de cada processo.

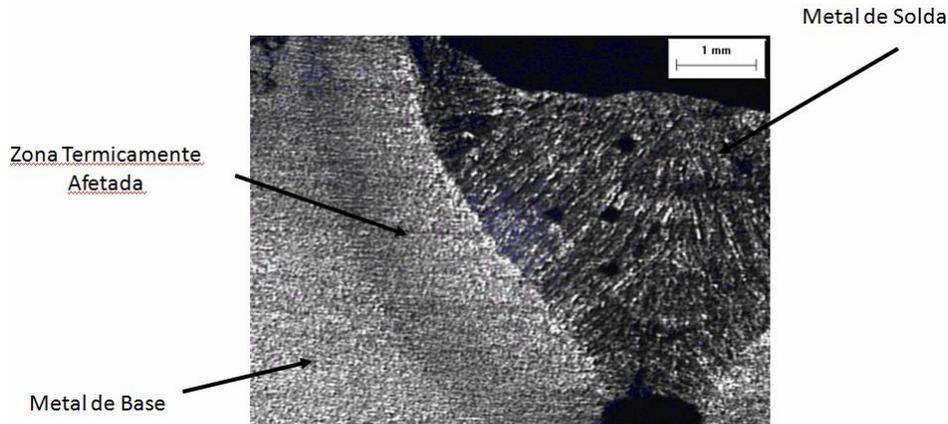
O aporte de calor foi 517,5 kJ/m. A Eq. (1) fornece a definição do aporte de calor:

$$H = (\eta \times V \times I) / v_d \quad (1)$$

onde H é o aporte de calor,  $\eta$  é a eficiência da transferência de calor no processo (para soldagem TIG varia de 0,7 a 0,8), V é a voltagem, I é a corrente e  $v_d$  é a velocidade de deslocamento da solda.

### 2.3. Análise Metalográfica

Na análise ao microscópio foi possível diferenciar as características estruturais dos constituintes do metal de base, da zona termicamente afetada e do metal de solda somente da solda de topo da dupla calha. Neste trabalho não foi considerada a solda de filete da dupla calha. Os resultados e imagens foram obtidos através do programa Image-Pro. Detalhes das principais regiões da junta soldada analisada no trabalho são mostradas na Fig. (1).



**Figura 1. Detalhe das regiões de metal de solda, zona termicamente afetada e metal de base. Aumento de 12,5 x. Ataque Nital 2%.**

A microestrutura encontrada no metal de solda é ferrítica e pode ser observada na Fig. (2). No metal de base a microestrutura tem como característica a presença de ferrita e perlita que são demonstradas na Fig. (3).

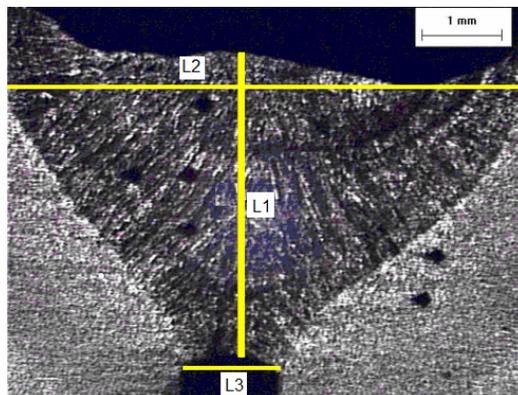


**Figura 2. Visualização da microestrutura do metal de solda.**



**Figura 3. Visualização da microestrutura do metal de base.**

A seguir são apresentadas a micrografia, Fig. 4 e as dimensões do metal de solda. Foi utilizado o programa Image Pro para realizar as medições. Os resultados dessa medição estão na Tab. (2), sendo realizada 5 medições e obtida a média. Tais valores foram utilizados como referência no desenvolvimento do modelo numérico.



**Figura 4. Principais dimensões da junta soldada.**

**Tabela 2. Valores obtidos no Image-Pro para as dimensões da junta soldada.**

Traço	Medição	Valor Médio (mm)
L1 ( Penetração da solda)	Comprimento	3,81
L2 ( Largura no topo)	Comprimento	6,52
L3 ( Largura na raiz)	Comprimento	1,22

A Fig. (5) a seguir apresenta a imagem e medições da zona termicamente afetada fornecidas pelo programa Image Pro. Foram realizadas cinco medições dessa região objetivando a elaboração e futura comparação com o modelo numérico. Os valores encontrados são apresentados na Tab. (3).

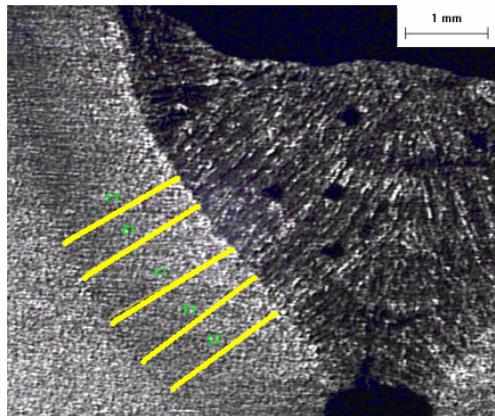


Figura 5. Medições da ZTA.

Tabela 3. Valores obtidos no Image-Pro para as dimensões da ZTA.

Traço	Medição	Valor (mm)
L1	Comprimento	1,68
L2	Comprimento	1,48
L3	Comprimento	1,51
L4	Comprimento	1,61
L5	Comprimento	1,57
Valor Médio	Comprimento	1,57

## 2.4. Modelo Adotado para a Fonte de Calor

Devido aos vários problemas que podem ocorrer nos processos de soldagem faz-se necessário um estudo preciso do ciclo térmico envolvido durante a soldagem. Surgiram diversas teorias para explicar o fenômeno, dentre elas pode ser citada a teoria de Rosenthal para fontes de calor móveis. O estudo de Rosenthal considera uma fonte pontual, linear e plana. Para regiões aonde as temperaturas chegam a 20% do ponto de fusão do material essa análise é bem válida, porém em regiões onde as temperaturas são elevadas, como na poça de fusão, por exemplo, a análise é falha.

Usando uma distribuição gaussiana radial Pavelic (1969) criou um modelo de fonte de calor distribuída, depositada na superfície do material. Esse modelo passa a ser menos errôneo do que o modelo de Rosenthal, pois assume uma fonte distribuída numa superfície, ao invés de pontual como sugeriu Rosenthal (Fig. (6)).

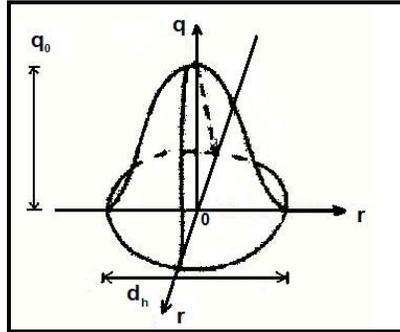


Figura 6. Modelo proposto por Pavelic.

O modelo proposto por Goldak (1984), porém, assume uma distribuição de densidade de potência em um duplo elipsóide tridimensional não simétrico para uma fonte de calor de soldagem móvel baseada na distribuição gaussiana de potência, como pode ser verificado na Fig. (7).

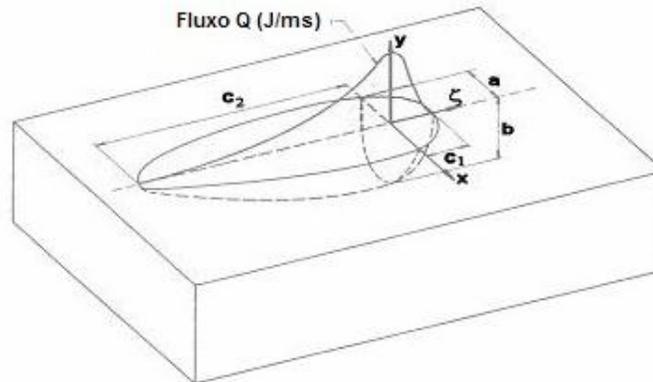


Figura 7. Modelo de duplo elipsóide de Goldak

Esse estudo assume duas fontes elípticas combinadas representadas pela Eq. (2):

$$q(x,y,z,t) = \frac{6\sqrt{3}fQ}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-3(x/a)^2} e^{-3(y/b)^2} e^{-(z/c)^2} \quad (2)$$

Onde, a, b e c (c=c1 dentro do quadrante da frente e c=c2 dentro do quadrante de trás) são os semi-eixos da distribuição gaussiana da densidade de potência em um elipsóide com centro (0,0,0) e paralelo aos eixos de coordenada x, y, zeta. A coordenada zeta = v(tau-t), onde v é a velocidade da fonte de calor, t é o tempo e o tau é o fator de atraso necessário para definir a fonte no instante t = 0. f é a fração de calor (f=f0 no quadrante frontal e f=f1 no quadrante traseiro) e Q = etaVI é o aporte térmico, onde eta é a eficiência da fonte de calor, V é a voltagem e I é a corrente.

Baseado no modelo de Goldak foi elaborado um modelo 2D para a solda de topo analisada neste trabalho. O pacote comercial utilizado para a realização da análise foi o Ansys (2005). O resultado dessa simulação será comparado com o modelo experimental desenvolvido. As dimensões e valores de parâmetros de soldagem foram baseadas em trabalhos de Hector et al. (2004), Silva (2003) e Tavares (2006).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Modelo Numérico

Para o estudo da zona termicamente afetada e da distribuição de temperatura na peça, foi desenvolvido um modelo numérico bidimensional de elementos finitos. A geometria é composta por uma seção da junta de topo soldada em passe único para união das duas partes da dupla calha. A geometria foi feita com os valores médios obtidos na análise por microscopia e apresentados na seção anterior.

O pacote comercial utilizado para a realização da análise foi o Ansys. O modelo adotado utiliza elementos bidimensionais com quatro nós. Este elemento permite o estudo da análise térmica transiente. A malha utilizada foi escolhida com base em uma análise de convergência e está representada na Fig. (8). As condições de contorno estão na Fig. (9). O modelo desenvolvido levou em consideração a fonte de calor sendo aplicada no centro geométrico da peça.

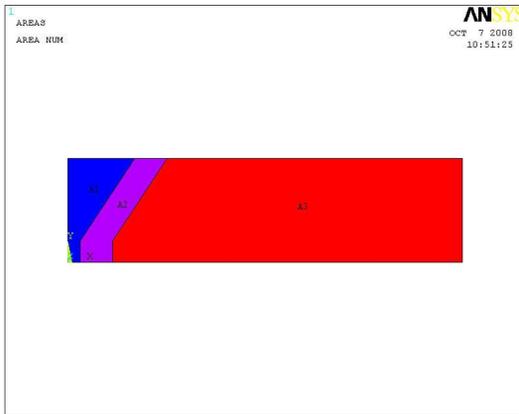


Figura 8. Geometria usada no modelo numérico.

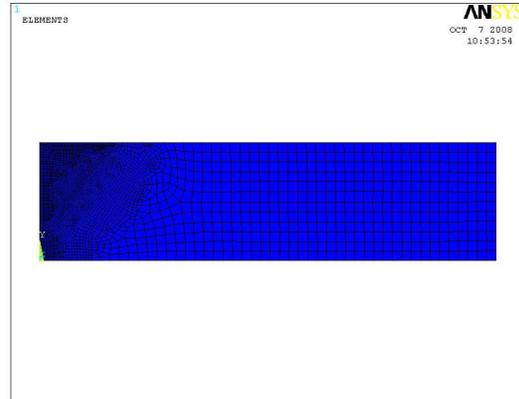


Figura 9. Malha usada no modelo numérico

A simulação realizada permite diferenciar a ZTA e a zona fundida devido a distribuição de temperaturas. Essa análise e determinação de temperaturas são fundamentais para que seja eficaz qualquer conclusão sobre a eficiência da soldagem.

Os resultados que serão apresentados abaixo nas Fig. (10) e (11) referem-se ao instante no qual a distribuição de temperaturas na peça é maior, ou seja, referem-se ao momento mais crítico da soldagem em termos de temperatura. A temperatura de pico neste instante de tempo corresponde a valores entre 2124 e 2380°C, aproximadamente.

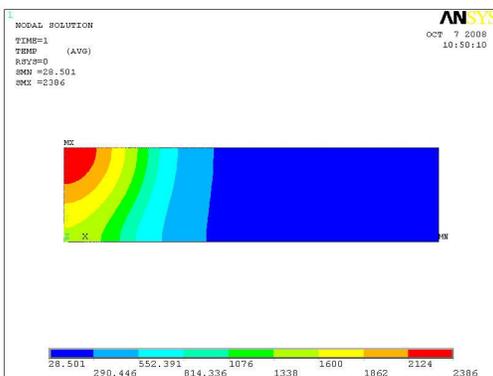


Figura 10. Distribuição de temperaturas na peça no tempo mais crítico.

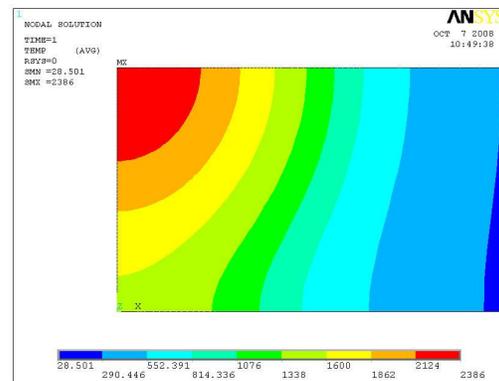


Figura 11. Detalhe da distribuição de temperaturas na peça no tempo mais crítico.

O resultado obtido para os valores da zona termicamente afetada na análise por elementos finitos é mostrado nas Tab. (4). Essas medições foram realizadas com a utilização de um próprio recurso do programa que permite calcular a distância entre dois pontos escolhidos pelo usuário. Dessa forma, foram feitas quatro medições e calculado o valor médio entre elas.

Tabela 4. Valores obtidos por simulação numérica para a zona termicamente afetada.

Medição	Valor (mm)
Comprimento	1.70
Comprimento	1.64
Comprimento	1.75
Comprimento	1.65
Valor Médio	1.69

### 3.2. Comparação entre os Resultados da Análise Metalográfica e a Análise por Elementos Finitos

A Fig. (12) apresenta uma comparação entre os modelos experimental (do lado esquerdo) e numérico (do lado direito). Na imagem do modelo numérico, a parte central na cor cinza está representando o metal de solda que foi depositado através do processo de soldagem.

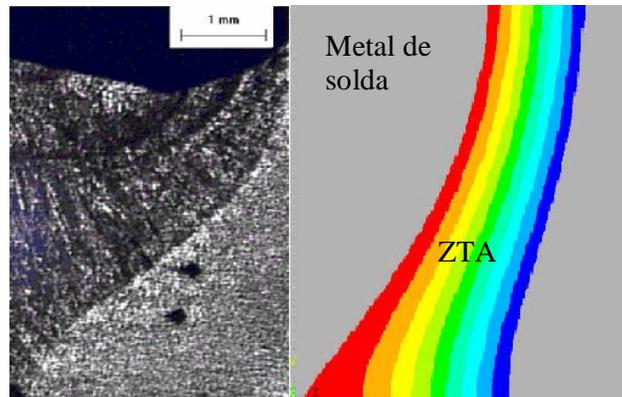


Figura 12. Comparação entre o modelo experimental e numérico.

A comparação entre os dois modelos apresenta um erro percentual calculado de acordo com a Eq. (3):

$$\varepsilon (\%) = [(C_{ef} - C_m) / C_m] * 100 \quad (3)$$

Onde  $C_{ef}$  representa o comprimento encontrado através do método de elementos finitos e  $C_m$  representa o comprimento encontrado através da metalografia.

O erro calculado é igual a **6.94%** para predição da região da ZTA. Este erro se deve ao fato de que a geometria na simulação numérica era aproximada e ao próprio erro que existe de medição no processo de microscopia inerente ao operador. Os valores de a, b e c da distribuição gaussiana na equação de Goldak também foram estimados o que também pode acarretar um distanciamento dos valores reais.

A avaliação por simulação numérica se torna importante tendo em vista a possibilidade de avaliar o efeito de processo de soldagem em materiais sem a necessidade de interromper uma linha de produção, por exemplo. É importante ter uma predição e controle da ZTA, assim como a distribuição de temperatura ao longo da junta soldada. Através da simulação numérica com modelos acoplados é possível avaliar outros parâmetros como o nível de tensões residual e deformação e estudar outros tipos de processos de soldagem.

## 4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos por microscopia ótica quando comparados com os da simulação numérica demonstraram estar próximos confirmando assim, a aceitabilidade do estudo, possibilitando sua aplicação em diversas condições de soldagem.

A metodologia proposta permite prever a dimensão da ZTA e a distribuição de temperatura nas regiões da junta soldada a partir da análise dos resultados obtidos através da simulação numérica.

## **5.REFERÊNCIAS**

- Ansys, 2005, “Ansys Manual”, Release 9, Ansys Inc.
- Bang, I.W., Son, Y.P., OH, K.H., Kim, Y.P. and Kim, W.S., 2002, “Numerical Simulation of Sleeve Repairs Welding of In-Service Gas Pipelines”, *Welding Journal*, pp. 273s–282s
- Baptista, A.L.B., 2000, *O Ensaio Metalográfico no Controle da Qualidade*, UFF / EEIMVR – Laboratório de Metalgrafia.
- Costa, H.R.M., Pacheco, P.M.C.L., Aguiar, R.A.A., Guimarães, J., e Cunha, J.C.C. 2004, “Avaliação do Efeito de Parâmetros de Soldagem Através de Simulação Numérica em Tubos de Alta Resistência”, *IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Recife.
- Fernandes, J.L., Pacheco, P.M.C.L., Kenedi, P.P., Carvalho, M.L.M., 2003, “Analysis of The Influence of Residual Stresses in the Fatigues Life of Welded Plates Using the Finite Element Method”, *VII Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos*, Florianópolis.
- Goldak, J., Chakravarti, A. and Bibby, M., 1984, “A New Finite Element Model for Welding Heat Sources”, *Metallurgical Transactions B*, Volume 15B, June 1984, pp. 299–305.
- Pavelic, Z., Tanbakuchi, R., Uyehara, O.A. and Meyers, P.S., 1969, *Welding Journal Research Supplement*, Vol. 48, pp. 295s–305s.
- Silva, M.A., 2003, *Avaliação da Soldagem Circunferencial em Tubo de Alta Resistência Para Dutos*, Tese de Mestrado, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE / UFRJ, 69p.
- Tavares, L.T., 2006, *Análise da distribuição de temperatura Durante o processo de Soldagem de Placas de Aço: Experimento e Simulações Numéricas*, Projeto Final, Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET-RJ, 47p.

## STUDY OF BEHAVIOR OF BUTT JOINT WELDED FOR TIG FOR APPLICATION OF SLEEVE TECHNIQUE IN HIGH-STRENGTH STEEL PIPES

Maicon Maia Lemos, maiconlemos@gmail.com<sup>1</sup>  
Paloma Pereira da Silva Coelho, palomapscoelho@gmail.com<sup>1</sup>  
Ricardo Alexandre Amar de Aguiar, raaguiar@cefet-rj.br<sup>1</sup>  
Hector Reynaldo Meneses Costa, hectorey@gmail.com<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica CEFET/RJ.

**Abstract.** *This work has the objective to study the Heat Affect Zone (HAZ) from a TIG butt joint welded in a tube using API-5L-X60 steel using sleeve technique. After the welding process, examinations were conducted by optical microscopy analysis on the butt welding joint. Then, a finite element model was developed. The propose of evaluation was compare the size of HAZ and predict temperatures distributions in the butt welding joint. Welding process promotes HAZ that can affect significantly the structural integrity of a mechanical component caused by localized intensive heat input. Numerical and experimental results indicate a divergence of 7%. In conclusion, the proposed methodology can be used as a powerful tool to study the effects of welding parameters.*

**Keywords:** *Welding, Temperature Distribution, Finite Element*