

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ARCO ELÉTRICO TIG: EFEITO DOS PARÂMETROS SOBRE A VOLTAGEM, TEMPERATURA E VELOCIDADE DO PLASMA

Camila Pereira Lisboa, cl001526@fahor.com.br¹

Enoque Pinto de Oliveira Júnior, ej001426@fahor.com.br¹

Valtair de Jesus Alves, valtair@fahor.com.br¹

Richard Thomas Lermen, richard@fahor.com.br¹

¹Faculdade Horizontina - FAHOR, Avenida dos Ipês, 565, CEP 98920-000, Horizontina, RS, Brasil

Resumo: O presente artigo teve como objetivo a realização do modelamento numérico do arco elétrico TIG com software COMSOL. Através deste modelamento foi determinado a influência de diferentes distâncias entre a peça e o eletrodo e a intensidade de corrente elétrica sobre o potencial elétrico, temperatura e velocidade do plasma. Também foram comparadas as geometrias do arco elétrico da simulação com imagens obtidas experimentalmente do arco elétrico. Os resultados mostraram que as isotermas do modelo são semelhantes às obtidas experimentalmente; o potencial elétrico aumenta com o aumento da distância entre o eletrodo e a peça (anodo) e o aumento da intensidade de corrente elétrica; A velocidade axial aumenta com o aumento da intensidade de corrente elétrica, pois aumentando a densidade de corrente elétrica o campo magnético induzido também aumenta e consequentemente a força de Lorentz, responsável pela aceleração do gás ionizado, também aumenta; A temperatura do plasma aumenta com o aumento da intensidade de corrente elétrica, pois maior energia elétrica é transformada em calor (efeito Joule).

Palavras-chave: Arco elétrico TIG, COMSOL, Temperatura; Potencial elétrico, Campo de Velocidade.

INTRODUÇÃO

O arco elétrico em soldagem compreende uma região relativamente pequena do espaço ($\sim 100 \text{ mm}^3$) caracterizada por elevadas temperaturas ($\sim 20.000\text{K}$), forte radiação luminosa e ultravioleta, fluxo intenso de matéria e elevados gradientes de propriedades físicas. O arco elétrico é um exemplo de plasma (assim como o núcleo do sol, o interior de lâmpadas fluorescentes, chamas e a ionosfera) (VILARINHO, 2009). O plasma pode ser definido com um gás ionizado composto por elétrons, íons e átomos neutros, ou seja, um conjunto quase-neutro de partículas que satisfazem certos critérios (Choudhuri, 1998). Um dos primeiros artigos que descrevem a física de plasma aplicada na soldagem foi a revisão bibliográfica de Spraragen e Lengyel (1943), em seguida por Rollason (1960), Jackson (1960), Quigley (1977), Jone e Fang (1980), Lancaster (1986) e Boulos, Fauchais e Pfender (1994), nas décadas de 70 e 80 e início dos anos 90, respectivamente. Mais recentemente, com os avanços na tecnologia de uma forma geral (informática, aquisição de dados, filmagem e tratamento de imagens digitais), há os estudos realizados por Wendelstorf et. al. (1997), Murphy (2001), Benilov (2002) e Vilarinho (2005).

A compreensão dos processos de soldagem a arco elétrico precisa do conhecimento da física do plasma, pois um melhor entendimento dos mecanismos físicos que regem esses processos de soldagem pode ser traduzido em maiores níveis de consistência e produtividade destes processos.

O objetivo deste trabalho foi realizar um modelamento matemático do arco elétrico TIG com software COMSOL. Através deste modelamento foi determinado a influência de diferentes distâncias entre a peça e o eletrodo e a intensidade de corrente elétrica sobre o potencial elétrico, temperatura e velocidade do gás. Também foram comparadas as geometrias do arco elétrico da simulação com imagens obtidas experimentalmente do arco elétrico.

1.1 Modelo do Arco Elétrico

O modelamento matemático do arco elétrico necessita de uma abordagem de conceitos físicos incluindo mecânica dos fluidos, transferência de calor e eletromagnetismo (Magnetoelctrodinâmico). As equações de conservação são altamente acopladas, por um lado implicitamente, porque todas as propriedades termodinâmicas e coeficientes de transporte dependem fortemente da temperatura (MURPHY et. al., 2009) e, por outro lado explicitamente, porque o fluxo de plasma depende das forças eletromagnéticas (Força de Lorentz), a temperatura depende do efeito Joule e o campo elétrico depende do valor e gradiente de temperatura.

O modelo foi construído assumindo as seguintes premissas: o dispositivo possui geometria simétrica, consequentemente, pode ser descrito em 2D com coordenadas cilíndricas; o fluxo de gás é laminar não isotérmico e em

regime permanente; considera-se a entrada e a circulação do gás argônio à pressão atmosférica; o plasma formado está em equilíbrio termodinâmico local, isto é, os elétrons e as partículas pesadas tem a mesma temperatura; as propriedades termodinâmicas e os coeficientes de transportes dependem somente da temperatura; foi considerada a perda por emissão de radiação; e os efeitos da gravidade, a erosão do eletrodo e a mancha anódica não foram considerados.

1.2 Modelo Teórico

A coluna positiva de um arco elétrico é simulada considerando o fluxo, a transferência de energia e fenômenos eletromagnéticos. É uma abordagem multifísica com equações altamente acopladas (MURPHY et. al., 2009), (HSU, K.C. TEMADI, K., PFENDER, E., 1983). O campo de velocidade pode ser obtido a partir de Navier-Stokes, o qual pode ser escrito:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho v v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r u v) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}\left(2\eta \frac{\partial v}{\partial z}\right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r\eta \frac{\partial v}{\partial r} + r\eta \frac{\partial u}{\partial z}\right) + j_r B_\theta \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho v u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r u u) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z}\left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} + \eta \frac{\partial v}{\partial r}\right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(2r\mu \frac{\partial u}{\partial r}\right) - j_z B_\theta \quad (2)$$

onde η é a viscosidade, j_z e j_r são, respectivamente, os componentes do vetor densidade de corrente elétrica axial e radial, B_θ é o campo magnético induzido na direção azimutal, u e v são, respectivamente, os componentes de velocidade axial e radial, ρ é a densidade, e p é a pressão.

O campo de temperatura é deduzida a partir da equação do calor:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho C_p v T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r C_p u T) = \frac{\partial}{\partial z}\left(k \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r k \frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{j_z^2 + j_r^2}{\sigma} - 4\pi \epsilon_N \quad (3)$$

onde k é a condutividade térmica, C_p é o calor específico à pressão constante, σ é a condutividade elétrica e ϵ_N é o coeficiente de emissividade. Os últimos dois termos da equação correspondem ao termo de aquecimento Joule e as perdas por radiação.

A densidade da corrente e o campo elétrico são deduzidas a partir da conservação da corrente elétrica pela Eq. (4):

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(\sigma r \frac{\partial \varphi}{\partial r}\right) = 0 \quad (4)$$

onde φ é o potencial elétrico.

A componente azimutal campo magnético induzido, B_θ , é deduzido a partir dos componentes de potenciais magnéticos, sendo μ_0 permeabilidade no vácuo:

$$B_\theta = \frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r} \quad (5)$$

e

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r \frac{\partial A_z}{\partial r}\right) + \mu_0 j_z = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 A_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r \frac{\partial A_r}{\partial r}\right) - \frac{A_r}{r^2} + \mu_0 j_r = 0 \quad (7)$$

1.3 Domínio computacional e condições de contorno

O domínio computacional é esboçado na Figura 1, onde as condições simétricas são definidas no centro (AB).

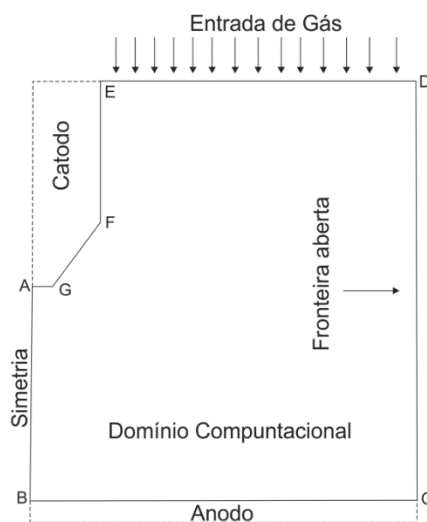


Figura 1 – Domínio Computacional

EFGA e BC são definidas como paredes sem deslizamento. A temperatura da ponta do catodo (AG) bem como da linha FG foi de 3000 K. Um terminal com intensidade de corrente de 50 A, 100 A e 150 A foi estabelecido em GA. A linha BC simula a superfície do anodo com potencial elétrico zero (terra) e com temperatura de 1000K. O gás argônio é injetado normalmente através da linha DE com fluxo de 10l/min e temperatura de 293 K. A linha CD é definida como sendo uma fronteira aberta com temperatura de 293 K. Uma temperatura de 1000 K foi estabelecida para a linha EF. Finalmente a condição de isolante magnético foi adicionado em todas as fronteiras, para o cálculo de potencial magnético.

As principais dimensões do domínio computacional foram: AB – 2,0 mm, 4,0 mm e 6,0 mm; BC – 10 mm; CD – 6 mm, 8 mm e 10 mm; e DE – 8,8 mm.

O modelo no COMSOL foi desenvolvido utilizando os seguintes módulos: Corrente elétrica (ec), fluxo não-isotérmico (nitf) e campos magnéticos (mf). As propriedades termodinâmicas (densidade e calor específico) e os coeficientes de transportes (condutividade térmica, condutividade elétrica, viscosidade e perdas por radiação), os quais são dependentes da temperatura, foram obtidas pela literatura (Savas e Ceyhun, 2011). A malha utilizada possui 2450 elementos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos experimentos foi utilizada uma bancada experimental contendo uma fonte soldagem TIG de corrente contínua, um anodo de cobre refrigerado e sistema de fixação da tocha TIG. O eletrodo de tungstênio AWS ETh-2 com 2,4 mm de diâmetro e ângulo na ponta de 60° foi utilizado. Os seguintes parâmetros de soldagem foram utilizados: intensidade de correntes elétrica de 50 A, 100 A e 150 A; vazão do gás de 10 l/min; e distância entre o anodo e o eletrodo negativo TIG de 2 mm, 4 mm e 6 mm.

2.1 Dimensões do arco elétrico TIG

As imagens do arco elétrico TIG para determinação da geometria do arco foram adquiridas através de uma câmara CCD com dois filtros AWS números 10 e 6 fixados em frente à lente. As imagens dos arcos elétricos foram convertidas em matrizes com elementos óticos individuais, onde o nível de cinza (“gray level”) foi determinado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 mostra as imagens obtidas experimentalmente do arco elétrico TIG e a sequência do tratamento com o software MATLAB. A Figura 2(a) mostra as imagens obtidas com uma câmara CCD e utilizando filtros AWS número 12 e 6 simultaneamente. A Figura 2(b) expõe as imagens processadas em tons de cinza com 8 bits. A Figura 2(c) apresenta as imagens com a representação das isoterma e as Figuras 2(d – e) apresentam, de duas formas, as linhas de contorno das isoterma.

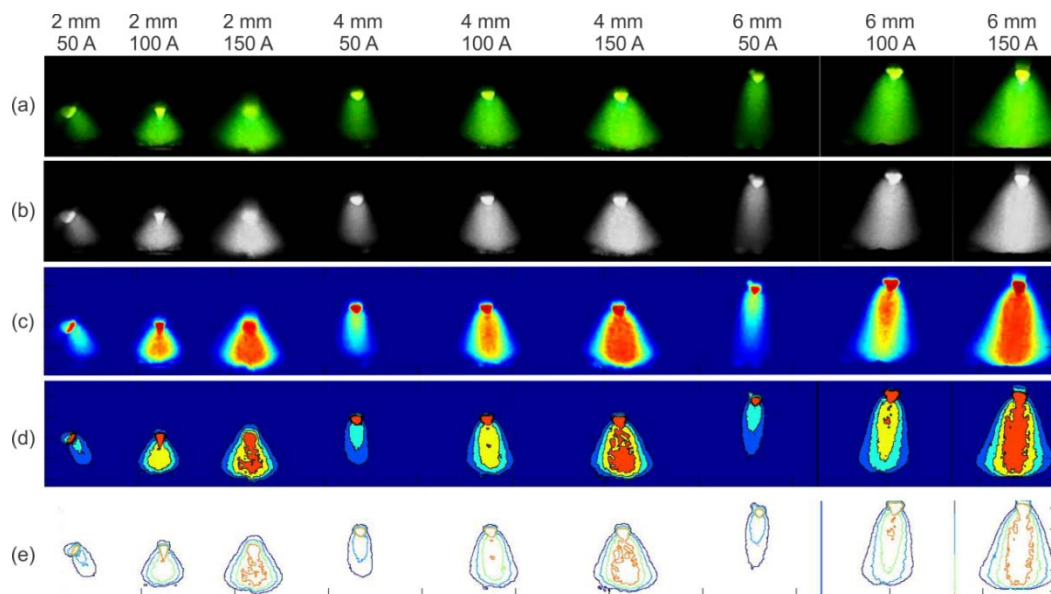


Figura 2. (a) Imagens coletadas experimentalmente com câmera CCD e filtros acoplados; (b) imagens processadas em tons de cinza 8 bits; (c) imagens representando as isotermas; e (d – e) linhas de contornos das isotermas.

A Figura 3 mostra uma combinação de imagens obtidas experimentalmente com as obtidas na simulação com o COMSOL. Observa-se que as linhas de contorno, as quais podem ser aproximadamente consideradas como as isotermas do arco elétrico TIG, são semelhantes entre o modelo e o experimental.

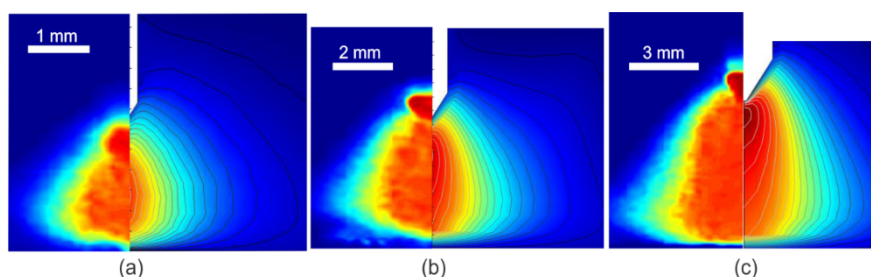


Figura 3. Comparação das isotermas obtidas experimentalmente com as do modelamento matemático.

A Figura 4 mostra imagens obtidas do campo de temperatura, utilizando uma distância de 2 mm da ponta do eletrodo até a peça. Na Figura 4(a) foi considerada uma intensidade de corrente de 50 A, na Figura 4(b) 100 A, e na Figura 4(c), 150 A. Com as imagens, foi possível observar que se a intensidade de corrente aumentar, a temperatura também aumenta.

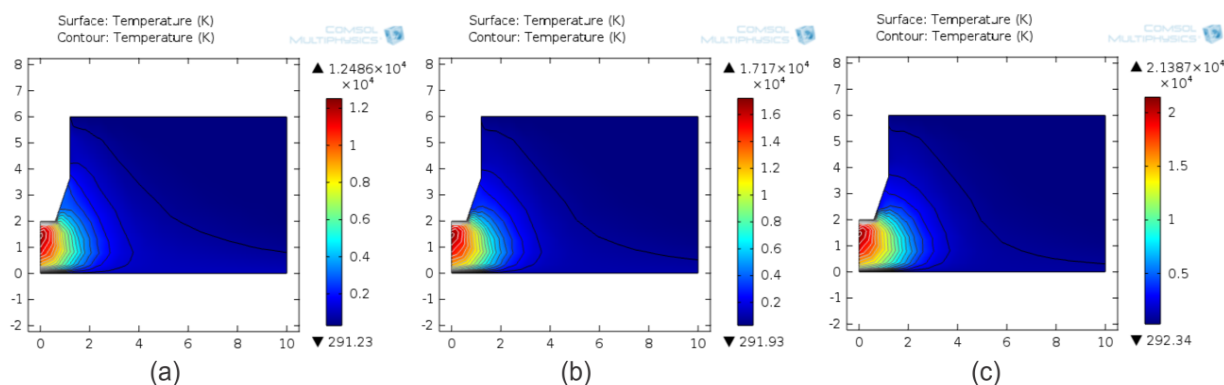


Figura 4. Campo de temperatura para seguintes condições: distância de 2 mm entre a ponta do eletrodo e a peça, intensidade de corrente de (a) 50 A, (b) 100 A e (c) 150 A.

A Figura 5 apresenta o campo de velocidade do fluxo de gás ionizado, considerando 2 mm de distância entre a peça e a ponta do eletrodo. Foi utilizada intensidade de corrente de 50 A (Figura 5(a)), 100 A (Figura 5(b)) e 150 A (Figura 5(c)). Observou-se que com o aumento da intensidade de corrente também há um aumento de velocidade.

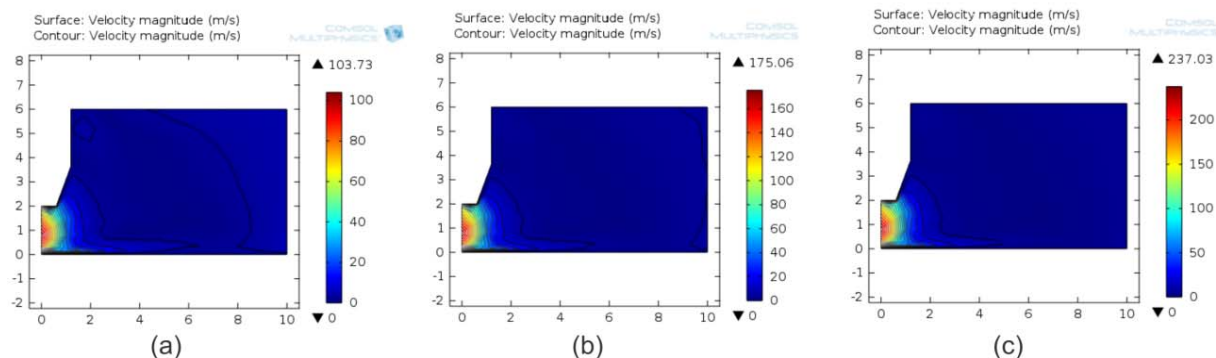


Figura 5. Campo de velocidade para seguintes condições: distância de 2 mm entre a ponta do eletrodo e a peça, intensidade de corrente de (a) 50 A, (b) 100 A e (c) 150 A.

A Figura 6 apresenta o gráfico da velocidade axial para as intensidades de corrente e distância da ponta do eletrodo até a peça utilizadas anteriormente.

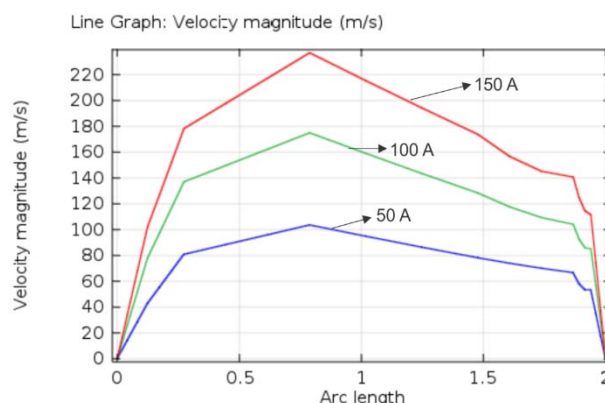


Figura 6. Velocidade axial para diferentes intensidade de corrente elétrica e distância entre os eletrodos de 2 mm.

Figura 7 mostra o potencial elétrico, utilizando uma distância de 2 mm entre a peça e a ponta do eletrodo e mais as seguintes condições: a Figura 7(a) utilizando uma intensidade de corrente de 50 A, a Figura 7(b) com 100 A e a Figura 7(c) com 150 A. Foi observado que o potencial elétrico aumentou conforme aumento da intensidade da corrente elétrica.

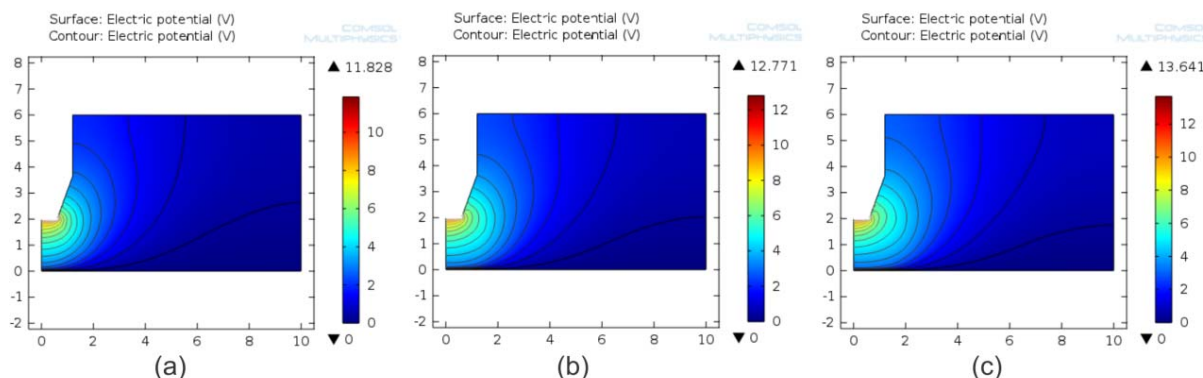


Figura 7. Potencial elétrico para seguintes condições: distância de 2 mm entre a ponta do eletrodo e a peça, intensidade de corrente de (a) 50 A, (b) 100 A e (c) 150 A.

A Figura 8 mostra imagens do campo de temperatura, utilizando uma distância de 4 mm da ponta do eletrodo até a peça. Na Figura 8(a) foi considerada uma intensidade de corrente de 50 A, na Figura 8(b) 100 A, e na Figura 8(c), 150 A. Para essa distância, também ocorreu um aumento da temperatura conforme aumento da intensidade de corrente elétrica.

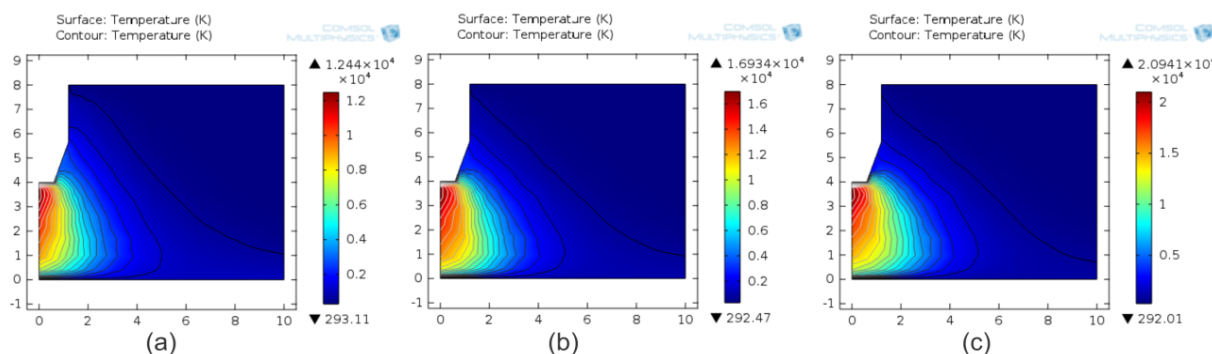


Figura 8. Campo de temperatura para seguintes condições: distância de 4 mm entre a ponta do eletrodo e a peça, intensidade de corrente de (a) 50 A, (b) 100 A e (c) 150 A.

A Figura 9 mostra o campo de velocidade do gás ionizado, considerando 4 mm de distância entre a peça e a ponta do eletrodo. Foi utilizada intensidade de corrente de 50 A (Figura 9(a)), 100 A (Figura 9(b)) e 150 A (Figura 9(c)). Observou-se que com o aumento da intensidade de corrente também há um aumento da velocidade.

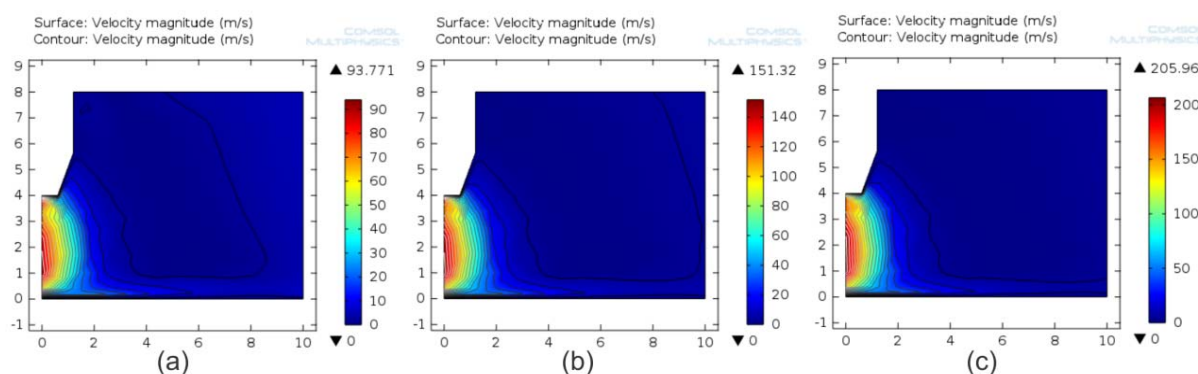


Figura 9. Campo de velocidade para seguintes condições: distância de 4 mm entre a ponta do eletrodo e a peça, intensidade de corrente de (a) 50 A, (b) 100 A e (c) 150 A.

A Figura 10 apresenta o gráfico da velocidade axial para a distância de 4mm e as intensidades de corrente utilizadas.

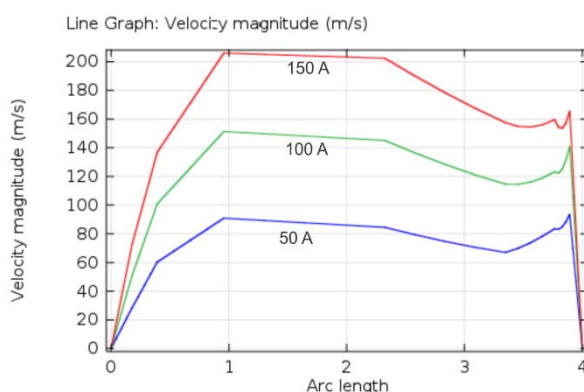


Figura 10. Velocidade axial para diferentes intensidade de corrente elétrica e distância entre os eletrodos de 4 mm.

A Figura 11 mostra o potencial elétrico, utilizando uma distância de 4 mm entre a peça e a ponta do eletrodo e mais as seguintes condições: a Figura 11(a) utilizando uma intensidade de corrente de 50 A, a Figura 11(b) com 100 A e a

Figura 11(c) com 150 A. Foi observado que, para essa distância, o potencial elétrico aumentou conforme aumento da intensidade da corrente elétrica.

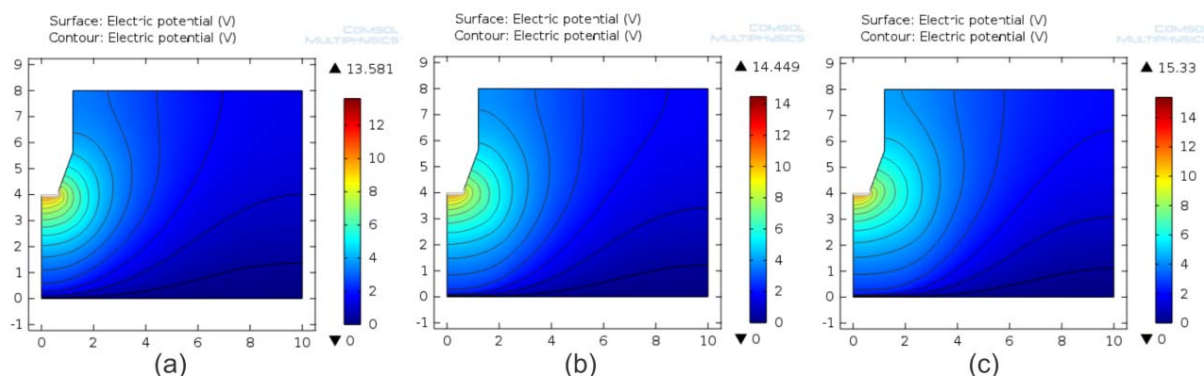


Figura 11. Potencial elétrico para seguintes condições: distância de 4 mm entre a ponta do eletrodo e a peça, intensidade de corrente de (a) 50 A, (b) 100 A e (c) 150 A.

A Figura 12 mostra imagens do campo de temperatura, utilizando uma distância de 6 mm da ponta do eletrodo até a peça. Na Figura 12(a) foi considerada uma intensidade de corrente de 50 A, na Figura 12(b) 100 A, e na Figura 12(c), 50 A. Para essa distância, também ocorreu um aumento da temperatura conforme aumento da intensidade de corrente elétrica.

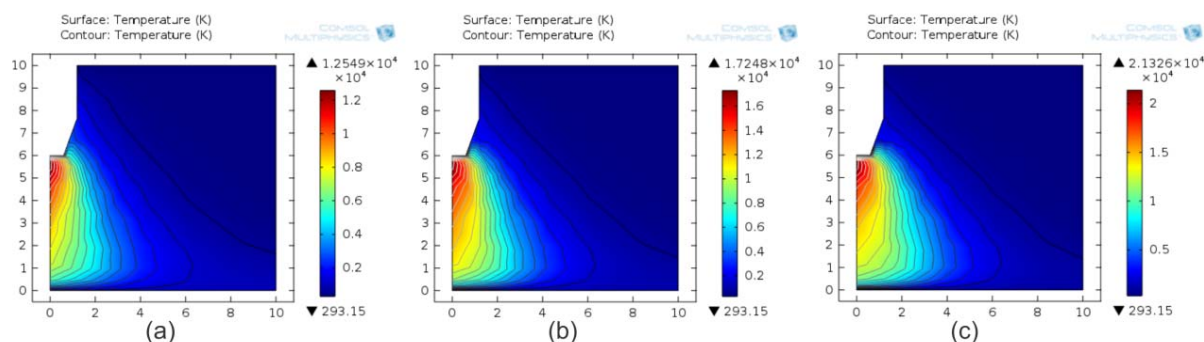


Figura 12. Campo de temperatura para seguintes condições: distância de 6 mm entre a ponta do eletrodo e a peça, intensidade de corrente de (a) 50 A, (b) 100 A e (c) 150 A.

A Figura 13 apresenta o campo de velocidade do gás ionizado, considerando 6 mm de distância entre a peça e a ponta do eletrodo. Foi utilizada intensidade de corrente de 50 A (Figura 13(a)), 100 A (Figura 13(b)) e 150 A (Figura 13(c)). Observou-se que com o aumento da intensidade de corrente também há um aumento da velocidade.

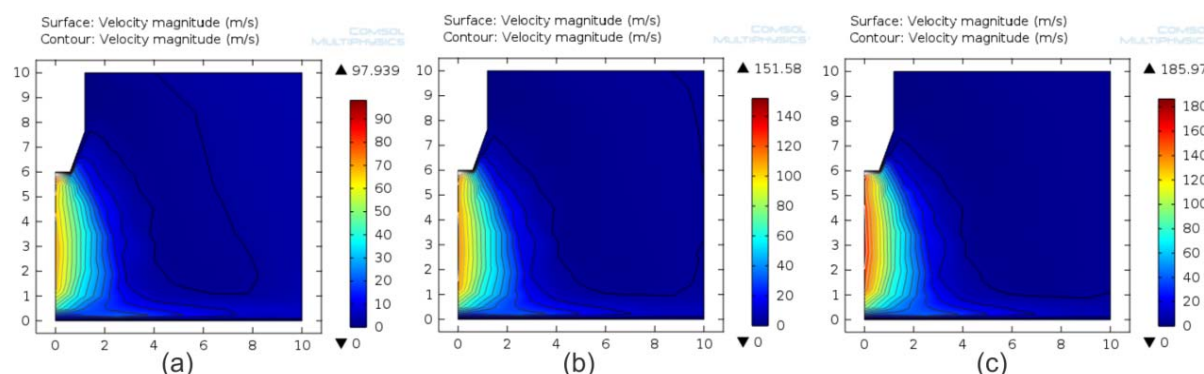


Figura 13. Campo de velocidade para seguintes condições: distância de 6 mm entre a ponta do eletrodo e a peça, intensidade de corrente de (a) 50 A, (b) 100 A e (c) 150 A.

A Figura 14 apresenta o gráfico da velocidade axial para a distância de 6mm e as intensidades de corrente utilizadas.

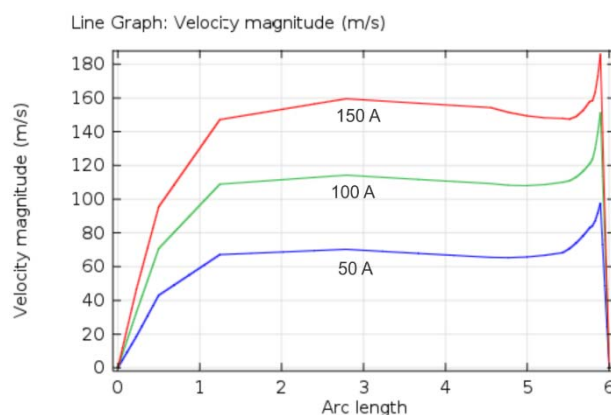


Figura 14. Velocidade axial para diferentes intensidade de corrente elétrica e distância entre os eletrodos de 6 mm.

A Figura 15 mostra o potencial elétrico, utilizando uma distância de 4 mm entre a peça e a ponta do eletrodo e mais as seguintes condições: a Figura 15(a) utilizando uma intensidade de corrente de 50 A, a Figura 15(b) com 100 A e a Figura 15(c) com 150 A. Foi observado que o potencial elétrico aumentou conforme aumento da intensidade da corrente elétrica.

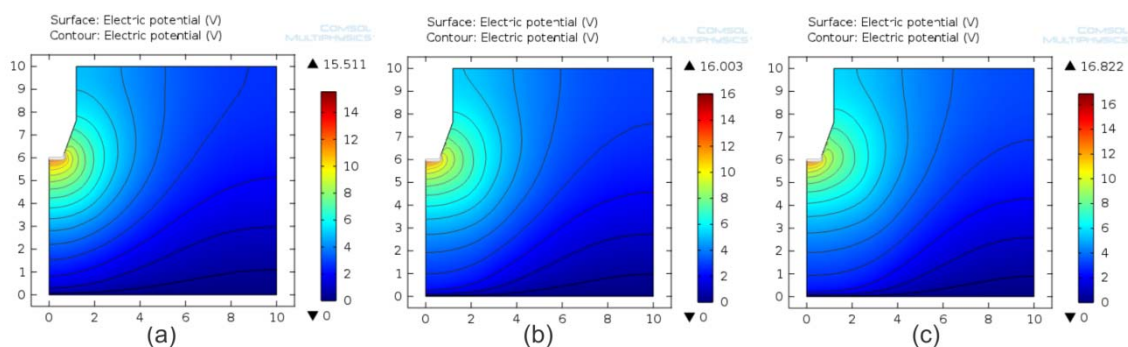


Figura 15. Potencial elétrico para seguintes condições: distância de 6 mm entre a ponta do eletrodo e a peça, intensidade de corrente de (a) 50 A, (b) 100 A e (c) 150 A.

4. CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um modelo matemático utilizando COMSOL que descreve os campos de temperatura, velocidade e potencial elétrico com valores condizentes ao experimento apresentados pela literatura. Através dos resultados obtidos no modelamento e experimento foi possível ver que as isotermas do modelo são semelhantes às isotermas determinadas experimentalmente.

Pode-se concluir que:

- O potencial elétrico aumenta com o aumento da distância entre o eletrodo e a peça (anodo) e o aumento da intensidade de corrente elétrica;
- A velocidade axial aumenta com o aumento da intensidade de corrente elétrica, pois aumentando a densidade de corrente elétrica a o campo magnético induzido também aumenta e consequentemente a força de Lorentz, responsável pela aceleração do gás, também aumenta.
- A temperatura aumenta com o aumento da intensidade de corrente elétrica, pois maior energia elétrica é transformada em calor (efeito Joule). Além disso a temperatura, com o aumento da distância da ponta do eletrodo até a peça, não sofreu uma variação significativa.



**4ª Semana Internacional de
Engenharia e Economia FAHOR**
Horizontina - RS - Brasil
5 a 7 de Novembro de 2014



5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas da UFRGS pela disponibilização do software COMSOL na realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- BENILOV, M.S. Theory and modelling of arc cathodes. *Plasma Sources Sci. Technol.*, v.11, n. 3A, p. A49-A54, 2002.
- BOULOS, M.I., P. FAUCHAIS, and E. PFENDER. *Thermal Plasmas: Fundamentals and Applications.*, Plenum Press, 1994. 452 p.
- CHOUDHURI, A.R. *The Physics of Fluids and Plasmas: an Introduction for Astrophysicist.* Cambridge University Press, 1998. 427 p.
- HSU, K.C., ETEMADI, K., PFENDER, E. Study of the free-burning high-intensity argon arc, *J. Appl. Phys.*, 54, 1293, 1983.
- JACKSON, C.E. The Science of Arc Welding. Part I – Definition of Arc. *Welding Journal*, p. 129s-140s, 1960, April.
- JACKSON, C.E. The Science of Arc Welding. Part II – Consumable-electrode Welding Arc. *Welding Journal*, p. 177s-190s, 1960, May.
- JACKSON, C.E. The Science of Arc Welding. Part III – What the Arc Does. *Welding Journal*, p. 225s-230s, 1960, June.
- JONES, G.R. and M.T.C. FANG. The Physics of High-power Arcs. *Rep. Prog. Phys.*, v.43, p. 1415-1465, 1980.
- LANCASTER, J.F. *The Physics of Welding.* Pergamon Press & IIW, 1986. 340 p.
- MURPHY, A.B. Thermal Plasmas in Gas Mixtures. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, v.34, p. R151-R173, 2001.
- MURPHY, A.B., et al., Modelling of thermal plasmas for arc welding: the role of the shielding gas properties and of metal vapour, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 42, 194006, 2009.
- QUIGLEY, M.B.C. Physics of the Welding Arc. *Welding and Metal Fabrication*, p. 619-626, 1977, December.
- ROLLASON, E.C. The Electric Arc in Welding. *British Welding Journal*, p. 71-72, 1960, February.
- SAVAS, A. e CEYHUN, V. Finite element analysis of GYAW arc under different shielding gases. *Computational Materials Science*, 51, p. 53-71, 2011.
- SPRARAGEN, W. and B.A. LENGYEL. Physics of the Arc and the Transfer of Metal in Arc Welding. *Welding Journal*, p. 2s-42s, 1943, January.
- VILARINHO, L.O. Welding Arc Modelling: a Survey. *Soldagem & Inspeção*, v.10, n. 1, p. 38-46, 2005.
- VILARINHO, L. O., O arco TIG a 100 A e Argônio Puro é um Arco Especial?. *Soldagem e Inspeção*, São Paulo, Vol. 14, No. 4, p.353-357, 2009.
- WENDELSTORF, J., et al., TIG and Plasma Arc Modelling: a Survey, in *Mathematical Modelling of Weld Phenomena* 3. 1997, The Institute of Materials. p. 848-897.

RESPONSABILIDADE AUTORMAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

NUMERICAL MODELING OF A TIG ELECTRIC ARC

Camila Pereira Lisboa, cl001526@fahor.com.br
Enoque Pinto de Oliveira Júnior, ej001426@fahor.com.br
Valtair de Jesus Alves, valtair@fahor.com.br
Richard Thomas Lermen, richard@fahor.com.br

¹Horizontina College- FAHOR, Avenida dos Ipês, 565, CEP 98920-000, Horizontina, RS, Brazil



**4ª Semana Internacional de
Engenharia e Economia FAHOR**
Horizontina - RS - Brasil
5 a 7 de Novembro de 2014



Abstract: This study aimed to the realization of numerical modeling of the TIG arc with COMSOL software. Through this numerical modeling was given the influence of different distances, between the workpiece and electrode, and the electric current intensity on the electric potential, temperature field and plasma velocity. Also was compared the geometries of electric arc simulation with images obtained experimentally. The overall result showed that the isotherms of the model were similar to those obtained experimentally; the electric potential increases with increasing distance between the electrode and the workpiece (anode) and increasing the intensity of electric current; The axial speed increases with the increase of the electric current intensity, because increasing the electric current density the induced magnetic field also increases and, consequently, the Lorentz force, responsible for accelerating the ionized gas, also increases; The temperature of the plasma increases with the increase of the electric current intensity as greater electrical energy is transformed into heat (Joule effect).

Keywords: *arc TIG, COMSOL, Numeric modelling, Temperature, Voltage, Velocity field.*