

CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICA DE ARCOS TIG

Louriel Oliveira Vilarinho

Prof. Dr., Laboratório para o Desenvolvimento de Processos de Soldagem - LAPROSOLDA, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Campus Santa Mônica, 38400-902, e-mail vilarinho@mecanica.ufu.br.

Américo Scotti

Prof. PhD., Laboratório para o Desenvolvimento de Processos de Soldagem - LAPROSOLDA, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Campus Santa Mônica, 38400-902, e-mail ascotti@mecanica.ufu.br.

Resumo: *O conhecimento dos efeitos do gás de proteção sob o desempenho do processo de soldagem (medido por exemplo através da sua eficiência térmica) é de suma importância de forma a prover índices para a seleção de um gás ou mistura. Isto pode ser feito experimentalmente, entretanto, muitas das vezes, a experimentação pode se tornar onerosa, visto a necessidade de equipamentos e consumíveis. Assim, o desenvolvimento de modelos numéricos confiáveis é de grande importância, de forma a ser possível simular diferentes condições de soldagem. Dessa forma, é descrito neste trabalho a metodologia para simulação numérica de arcos TIG através do desenvolvimento de um programa totalmente nacional possibilitando caracterizar numericamente arcos TIG com base nos campos de temperatura, velocidade, tensão e corrente em três diferentes níveis de corrente 40, 70 e 100 A. Esses campos foram validados com dados experimentais e reafirmam a simulação numérica como uma importante ferramenta para o estudo e seleção prática de gases de proteção em soldagem.*

Palavras-chave: *soldagem, modelamento numérico, volumes finitos e plasma.*

1. INTRODUÇÃO

A aplicação prática de uma determinada mistura utilizada como gás de proteção em soldagem passa pelo desenvolvimento e seleção dos seus componentes e quantidades. Misturas contendo gases como Ar, He, CO₂, O₂ e N₂ são comuns em soldagem, sendo empregadas para atribuir propriedades desejáveis, como por exemplo, o aumento da eficiência térmica, o que implica na otimização do processo. Como então avaliar tais misturas? O método mais direto e intuitivo é produzir diferentes misturas e executar soldagens com diferentes parâmetros e avaliar o desempenho da mistura concebida.

Muitas das vezes esta experimentação se torna onerosa, visto a necessidade de equipamentos (fontes de soldagem, misturadores, etc) e consumíveis (gases, eletrodos e chapas) convencionais e equipamentos mais sofisticados (espectrômetro, sondas de Langmuir, etc)⁽¹⁾. Assim, o desenvolvimento de modelos numéricos confiáveis é de grande importância, de tal forma a ser possível simular diferentes condições de soldagem (corrente, comprimento do arco, etc).

A modelagem do arco plasma é de grande complexidade, uma vez que se trata de um problema com acoplamentos hidrodinâmico, térmico, magnético e elétrico. Além disso, o problema não é linear, onde as propriedades físicas (densidade, viscosidade, entalpia, etc.) dependem fortemente da temperatura. O modelo matemático preponderantemente utilizado nas pesquisas numéricas foi apresentado por Hsu & Pfender⁽²⁾ que resolveram o sistema de equações diferenciais acopladas

utilizando o Método dos Volumes Finitos. Os modelos matemáticos utilizados em trabalhos sucessores são semelhantes e todos tratam o arco de plasma como estável, laminar e estacionário.

A formulação matemática do plasma do arco de soldagem baseia-se nas equações de conservação da massa, conservação da quantidade de movimento (Navier-Stokes), conservação da energia e conservação da tensão elétrica (corrente). O domínio do arco para soldagem TIG sobre chapa resfriada está esquematizado na Figura 1, cujas condições de contorno estão apresentadas na Tabela 1. A formulação matemática está apresentada nas Equações 1 a 5. Como hipóteses simplificativas do modelo, considera-se que o arco é axis-simétrico, está em regime estacionário e no estado de equilíbrio termodinâmico local (LTE). Além disso, o escoamento é assumido laminar e o plasma considerado opticamente fino (a perda por radiação é dada por volume unitário).

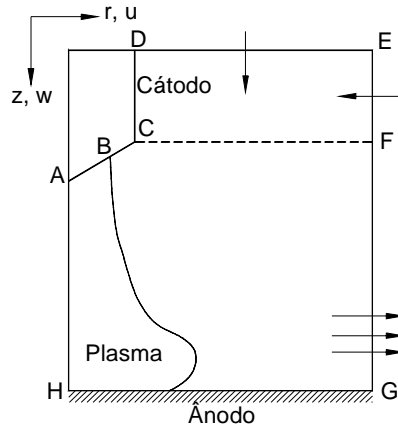


Figura 1 – O domínio computacional para o arco.

Tabela 1 – Condições de contorno utilizadas.

Figura 1	u	w	T	Φ
AB	0	0	T=3000K	$J_c = \frac{I}{\pi R_c^2}$
BC	0	0	T=3000K	$\partial\Phi / \partial z = 0$
CD	0	0	T=3000K	$\partial\Phi / \partial r = 0$
DE	0	constante	T=1000K	$\partial\Phi / \partial z = 0$
EF	$\partial(\rho u) / \partial r = 0$	$\partial w / \partial r = 0$	T=1000K	$\partial\Phi / \partial r = 0$
FG	$\partial(\rho u) / \partial r = 0$	$\partial w / \partial r = 0$	$\partial T / \partial r = 0$	$\partial\Phi / \partial r = 0$
GH	0	0	T=1000K	constante
HA	0	$\partial w / \partial r = 0$	$\partial T / \partial r = 0$	$\partial\Phi / \partial r = 0$

u é a componente da velocidade na direção r; w é a componente da velocidade na direção z;
T é a temperatura das partículas (elétrons e íons); Φ é a tensão elétrica.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r u)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r u^2)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \left[\frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \mu \frac{2u}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right) \right) \right] - J_z B_\theta, \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r u w)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right) \right) + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] + J_r B_\theta; \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho u h_p)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho w h_p)}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{k}{C_p} r \frac{\partial h_p}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial h_p}{\partial z} \right) + \frac{J_z^2 + J_r^2}{\sigma_e} - S_R + \frac{5}{2} \frac{k_B}{e} \left(\frac{J_r}{C_p} \frac{\partial h_p}{\partial r} + \frac{J_z}{C_p} \frac{\partial h_p}{\partial z} \right); \quad (4)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\sigma_e r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma_e \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) = 0; \quad (5)$$

onde, ρ é a densidade do plasma; P é a pressão; h_p é a entalpia do plasma; μ é a viscosidade do plasma; J_r é a densidade de corrente na direção r ; J_z é a densidade de corrente na direção z ; B_θ é o campo magnético auto-induzido; μ_0 é a permeabilidade magnética do espaço livre; C_p é o calor específico; k é a condutividade térmica; σ_e é a condutividade elétrica; S_R representa a perda por radiação devido à alta temperatura e “e” é a carga elementar do elétron.

As principais limitações encontradas nos trabalhos da literatura referem-se ao fato de que as simulações foram conduzidas utilizando-se para altas correntes de soldagem (acima de 100 A), não existindo uma investigação maior para baixas correntes e foram executadas através de programas comerciais (Phoenics®⁽³⁾). Em termos de Brasil, não existe um programa proprietário nacional desenvolvido dentro de universidades brasileiras. Mesmo o trabalho de Silveira Neto & Xuefeng⁽⁴⁾ foi conduzido utilizando-se o código Phoenics®. Dessa forma, este artigo trata da caracterização numérica de arcos TIG na faixa de 40 a 100 A (avaliando-se portanto baixas correntes), onde o programa desenvolvido é totalmente nacional.

2. PROCEDIMENTO NUMÉRICO

As Equações 1 a 5 foram discretizadas utilizando a técnica Volumes Finitos no domínio do problema⁽¹⁾ apresentado na Figura 1. Utilizou-se o algoritmo SIMPLE e esquema centrado de segunda ordem. Utilizou-se a malha mais fina (90x90) até agora utilizada na literatura (Kim et al.⁽⁵⁾ utilizaram 50x50). Deve-se ressaltar que uma malha inicial de 60x60 foi testada e aumentando-se o número de nós, verificou-se que a diferença no campo de temperatura entre a malha de 90x90 e a de 80x80 foi menor que 0,5%, ou seja, a solução passou a ser independente da malha.

Os sistemas de equações algébricas foram resolvidos iterativamente através do algoritmo de Stone (SIP - Strongly Implicit Procedure). As equações da quantidade de movimento, da energia e da tensão elétrica foram resolvidas no domínio AEFLHIJKBA, sendo que as células do cátodo (ABCDEA) são desativadas para as equações da quantidade de movimento e energia. A lógica do programa construído e implementado em Fortran 4.0, “Plasma.exe”, está representada na Figura 2.

O critério de convergência adotado foi de 0,1% para os máximos valores de temperatura e velocidade. Com relação aos valores iniciais de u , w , T e Φ , adotou-se as mesmas condições mostradas na Tabela 1. Deve-se ressaltar algumas características importantes nesta estimativa inicial. Variou-se o valor da velocidade axial w imposta no contorno DE (Figura 1) na faixa de 1,0 a 5,0 m/s e não foi verificada mudança no campo de velocidade. Variou-se também a temperatura de entrada do gás numa faixa de 1000 a 3000 K e não se notou grandes diferenças no campo de temperatura. Adotou-se, semelhantemente a outros autores, $w_{DE} = 2,0$ m/s e $T_{DE} = 1000$ K.

Os parâmetros utilizados nas simulações foram 45 A/mm² de densidade de corrente na mancha catódica para arcos menores que 4 mm e 65 A/mm² para arcos a partir de 4 mm⁽⁶⁾. Como fatores de subrelaxação, adotou-se 0,1 a 0,6 para a pressão e velocidade, 0,1 a 0,3 para a entalpia e 0,3 como fator de subrelaxação para a tensão elétrica.

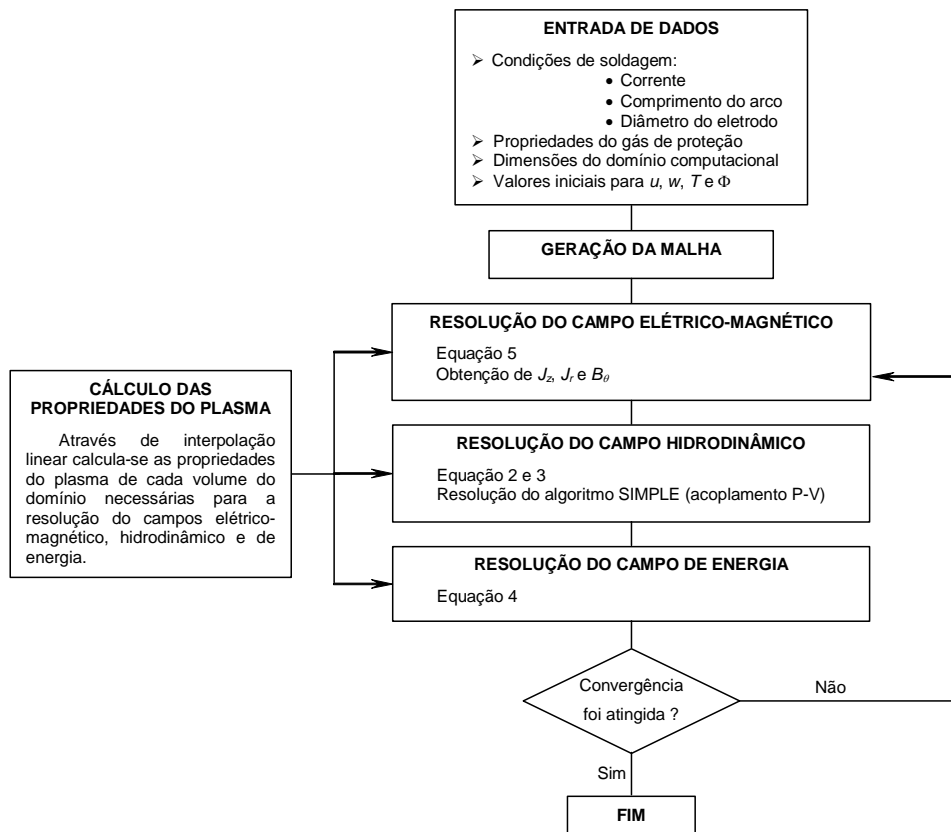


Figura 2. Lógica do programa “Plasma.exe”.

Simulou-se as condições mostradas na Tabela 2. As simulações SIM01 a SIM03 referem-se ao estudo para verificação da influência da corrente nas propriedades do jato de plasma (temperatura, velocidade, distribuição de tensão e corrente), enquanto que a simulação SIM04 foi utilizada para validação do campo de velocidade. O perfil de temperatura já foi validado anteriormente em um outro trabalho⁽⁷⁾. Os valores das propriedades físicas do gás de proteção (Tabela 3) foram retirados de Murphy⁽⁸⁾ e se referem ao Ar puro, que será estudado inicialmente devido à sua grande utilização. A simulação de outros tipos de misturas é possível, bastando calcular as propriedades do gás.

Tabela 2. Simulações propostas (Ar puro)

Simulação	Comprimento do arco - L_a [mm]	Corrente [A]
SIM01	4	40
SIM02	4	70
SIM03	4	100
SIM04	5	200

Tabela 3. Propriedades termodinâmicas e de transporte para o Ar⁽⁸⁾.

T [K]	h [J/kg]	ρ [kg/m ³]	μ [kg/m·s]	k [W/m·K]	C_p [J/kg·K]	σ_e [1/Ω·m]	S_R [W/m ³]
275	1.42E5	1.783	2.10E-5	0.0164	520	0	0
1000	5.2E5	0.487	5.35E-5	0.0427	520	0	0
2000	1.04E6	0.243	8.07E-5	0.0692	520	0	0
3000	1.56E6	0.162	1.13E-4	0.0938	520	0	0
4000	2.08E6	0.122	1.46E-4	0.118	520	0	0
5000	2.6E6	0.0976	1.82E-4	0.143	520	0	0
6000	3.13E6	0.0814	2.06E-4	0.165	521	0	0
7000	3.66E6	0.0697	2.29E-4	0.197	542	377	0
8000	4.25E6	0.0609	2.51E-4	0.258	633	1010	0
9000	5.01E6	0.0539	2.69E-4	0.383	902	1920	4.0E6
10000	6.23E6	0.0478	2.80E-4	0.588	1530	2980	1.0E8
11000	8.36E6	0.0421	2.71E-4	0.913	2730	4150	3.16E8
12000	1.21E7	0.0363	2.31E-4	1.48	4690	5320	1.0E9
13000	1.8E7	0.0303	1.69E-4	1.72	7230	6450	3.16E9
14000	2.6E7	0.0248	1.09E-4	2.08	9390	7580	1.0E10
15000	3.57E7	0.0203	6.66E-5	2.2	9310	8430	2.0E10
16000	4.39E7	0.0173	4.07E-5	2.12	7070	9290	2.5E10
17000	4.97E7	0.0154	2.97E-5	2.06	4630	9940	2.61E10
18000	5.36E7	0.0141	2.51E-5	2.11	3110	10600	2.73E10
19000	5.64E7	0.0131	2.36E-5	2.25	2550	11200	2.86E10
20000	5.91E7	0.0123	2.33E-5	2.44	2780	11800	2.99E10
21000	6.24E7	0.0115	2.31E-5	2.67	3830	12300	3.0E10
22000	6.72E7	0.0107	2.21E-5	2.93	5790	12900	3.0E10
23000	7.4E7	0.00992	2.00E-5	3.19	8350	13500	3.0E10
24000	8.38E7	0.00906	1.71E-5	3.46	10800	14100	3.0E10
25000	9.54E7	0.00823	1.43E-5	3.72	12300	14700	3.0E10

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 3 e 4 trazem os campos de temperatura, velocidade, tensão e corrente obtidos para as simulações SIM01, SIM02 e SIM03. Em um trabalho anterior⁽⁷⁾, validou-se o campo de temperatura através de espectroscopia óptica de emissão e o Método de Fowler-Milne. Ressalta-se que a diferença média entre as temperaturas numéricas e experimentais foi de 13,4 %.

Com relação ao campo de velocidade, Snyder & Bentley⁽⁹⁾, utilizando-se a técnica de espalhamento Thomson, mediram a velocidade do jato de plasma em 350 ± 40 m/s a uma posição de 1,2 mm abaixo da ponta do eletrodo em um arco de Ar puro a 200 A como sendo. Como forma de comparação, a simulação SIM04 foi conduzida em condições similares e obteve a velocidade do plasma na mesma posição como sendo 389.5 m/s. Assim, é possível concluir que o campo de velocidade é realístico.

Uma importante verificação a ser feita refere-se à suposição do escoamento como sendo laminar. O número de Reynolds ($Re = w \cdot L_a \cdot \rho / \mu$) para a situação mais crítica simulada (SIM04 – $w = 389,5$ m/s; $L_a = 5$ mm; $\rho = 1.73 \cdot 10^{-2}$ Kg/m³ e $\mu = 4.07 \cdot 10^{-5}$ Kg/m·s) foi calculado em 827,8. Wendelstorf et al.⁽¹⁰⁾ afirmam que a transição do regime laminar-turbulento acontece no arco de soldagem TIG para valores de Re acima de 500. Assim, a suposição de um escoamento laminar não é válida, a princípio, para arcos de alta corrente (acima de 200 A). Já para o arco de 100 A, o valor calculado para o Re foi de 495,5 (simulação SIM09 – $w = 238,9$ m/s; $L_a = 4$ mm; $\rho = 1.54 \cdot 10^{-2}$ Kg/m³ e $\mu = 2,97 \cdot 10^{-5}$ Kg/m·s) Esta característica de transição confere ao arco TIG de Ar puro e 100 A características peculiares com relação à distribuição de cargas (principalmente por sua

localização na curva de característica estática do arco). Este arco em particular está sendo objeto de um número maior de análises⁽¹¹⁾.

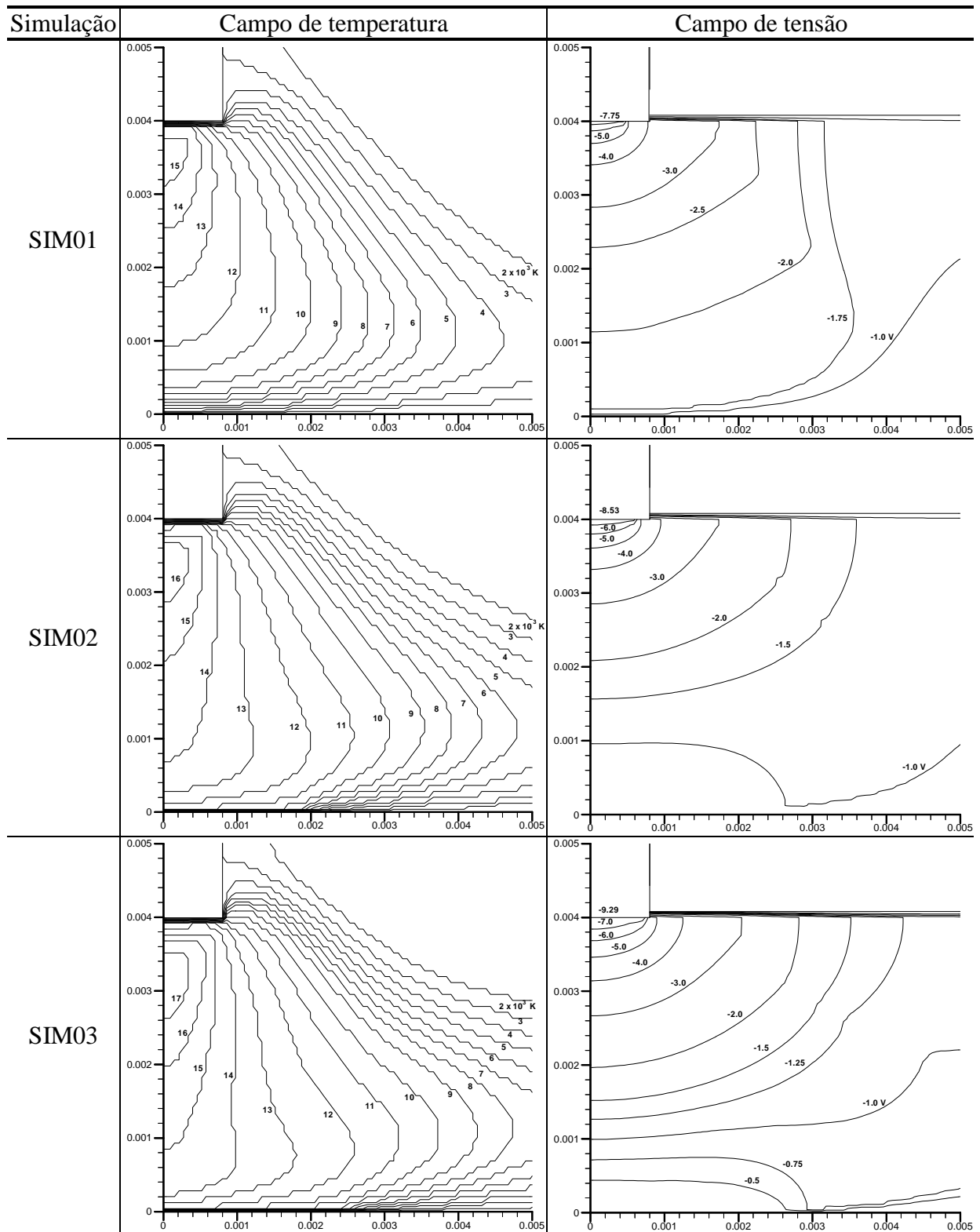


Figura 3. Campos de temperatura e tensão para as simulações SIM01, SIM02 e SIM03.

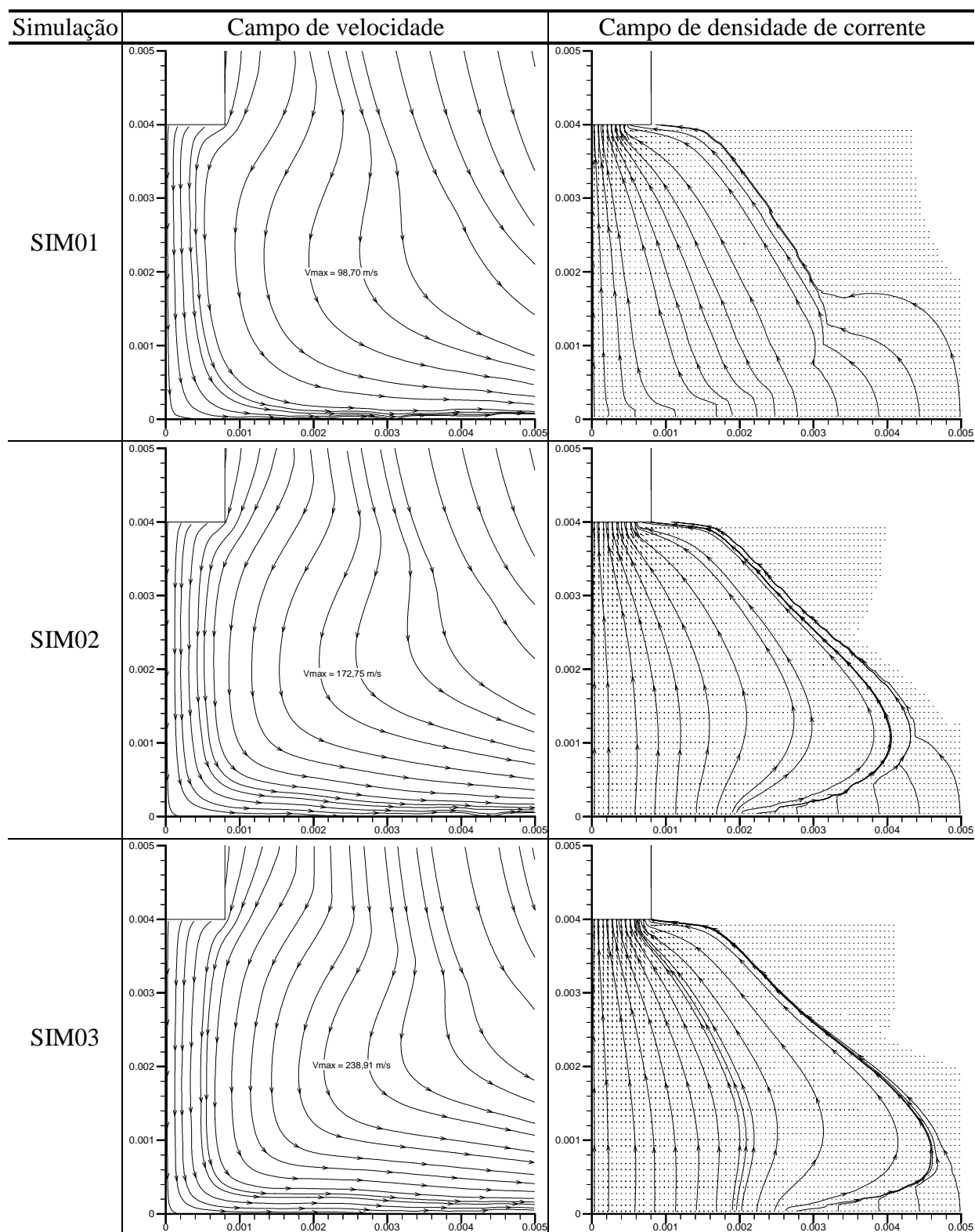


Figura 4. Campos de velocidade e distribuição de corrente para as simulações SIM01 a SIM03.

Já a validação do campo de tensão e corrente ainda está sendo conduzida utilizando-se a técnica conhecida como sondas de Langmuir⁽¹²⁾. Com relação à queda de tensão total, os valores numéricos obtidos foram comparados com valores experimentais⁽¹⁾ e apresentaram um desvio médio de 5.1 % (Tabela 4).

É possível ainda calcular a distribuição axial de tensão, como, por exemplo, mostrado na Figura 5 para a simulação SIM03. Nesta figura, aparece a curva numérica e o perfil “esperado” ou

“tradicional” para a queda de tensão total no arco de soldagem e suas componentes: queda de tensão catódica, na coluna de plasma e anódica. Esta possibilidade de traçar tais curvas pode ser encarada como uma valiosa ferramenta para calcular a eficiência de fusão do ânodo em função de mistura de gases, uma vez que experimentalmente⁽¹³⁾ esta medição é complexa e onerosa. Em princípio, misturas que proporcionem uma maior queda de tensão anódica levaria a uma maior capacidade de transferência de calor para a peça.

Tabela 4. Comparação entre quedas de tensão numéricas e experimentais⁽¹⁾.

Simulação	L_a [mm]	$I_{experimental}$ [A]	$V_{experimental}$ [V]	$I_{numérico}$ [A]	$V_{numérico}$ [V]	Erro [%]
SIM01	4	40	10.3	40	9.42	-8.6
SIM02	4	70	10.8	70	10.30	-4.7
SIM03	4	100	10.9	100	11.13	2.1

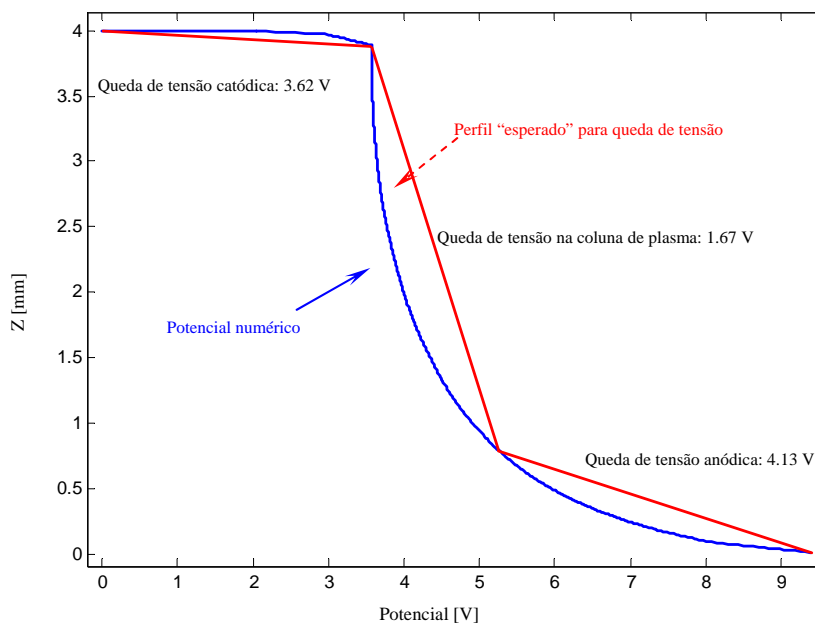


Figura 5. Perfil numérico da queda de tensão axial no centro do arco (simulação SIM03).

4. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Foram apresentados os campos de temperatura, velocidade, tensão e corrente existentes em arcos TIG com atmosfera de Ar, para uma faixa de corrente entre 40-200 A. Os valores encontrados estão dentro do observado experimentalmente na literatura. Neste sentido, é possível concluir que o programa desenvolvido foi validado positivamente através do confronto com resultados experimentais e é uma poderosa ferramenta para estudo de gases de proteção em soldagem, sendo possível o cálculo dos campos de temperatura, velocidade, tensão e corrente. Melhores resultados podem ser obtidos e mais estudos podem ser conduzidos ao se incorporar o modelo da ponta do eletrodo.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Francisco J. de Souza (Universidade Federal de Uberlândia) e ao Dr. Carlo Fanara (Cranfield University) por suas contribuições a este trabalho.

6. REFERÊNCIAS

1. VILARINHO, L. O. **Development of Experimental and Numerical Techniques for TIG Arc Characterisation**. 2003. 218 f. Tese de doutorado – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2003.
2. HSU, K. C. and PFENDER, E. Two-Temperature Modeling of the Free-Burning, High-Intensity Arc. **J. Appl. Phys.**, 54(8), 1983, pp. 4359-4366.
3. CHAM, **Phoenics® - commercial software**. Bakery House, 40, High Street, Wimbledon Village, London, SW19 5AU, UK.
4. SILVEIRA NETO, A. e XUEFENG, Y. Mathematical Modelling of the Collision of a Plasma Jet Against a Flat Plate. **Anais do 8th Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences**, Porto Alegre, 2000. v.1. p.1 - 8
5. KIM, W-H.; FAN, H. G.; NA, S-J. A Mathematical Model of Gas Tungsten Arc Welding Considering the Cathode and the Free Surface of the Weld Pool. **Metallurgical and Materials Transactions B**, 28B, August, 1997, pp. 679-686.
6. CHOO, R. T. C., SZEKELY, J. and WESTHOFF, R. C. On the Calculation of the Free Surface Temperature of Gas-Tungsten-Arc Weld Pools from First Principles: Part I. Modeling the Welding Arc. **Metallurgical Transactions B**, 23B, June, 1992, pp. 357-369.
7. SOUZA, F. J.; VILARINHO, L. O. e DANTAS, N. O. Determinação Numérico-Experimental do Campo de Temperatura em Soldagem TIG a Baixas Correntes. **Anais do II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – Conem**, João Pessoa/ PB, 2002, CPB1045.
8. MURPHY, A. B. and ARUNDELL, C.J. Transport Coefficients of Argon-air, Nitrogen, Oxygen, Argon-Nitrogen, and Argon-Oxygen Plasmas. **Plasma Chem. Plasma Process.**, 14(4), 1994, pp. 451-490.
9. SNYDER, S. C. and BENTLEY R. E. A Measurement of Axial Velocity and Temperature in a Free-burning Arc using Thomson Scattering. **J. Phys. D: Appl. Phys.**, 29, 1996, pp. 3045-3049.
10. WENDELSTORF, J., DECKER, I., WOHLFAHRT, H. and SIMON, G. TIG and Plasma Arc Modelling: a Survey. **Mathematical Modelling of Weld Phenomena 3**, The Institute of Materials, 1997, pp. 848-897.
11. FANARA, C. **Laminar-turbulent Transition in TIG Arcs**. Mensagem recebida por <vilarinho@mecanica.ufu.br> em 12 de Junho de 2004.
12. VILARINHO, L. O.; FANARA, C. and SCOTTI, A. Comparison of Optical and Electrical Temperatures in Atmospheric Pressure (TIG) Arcs. **Anais do 17th International Congress of Mechanical Engineering – Cobem**, SP, 2003, Artigo COB03-0471.
13. VILARINHO, L. O.; FANARA, C. and SCOTTI, A. Determination of the Anode Voltage Fall in TIG Arcs by using a Modified Split-Anode Detector. **Anais do III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – Conem**, Belém/PA, 2004, Artigo 21070.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

NUMERICAL CHARACTERIZATION OF TIG ARCS

Louriel Oliveira Vilarinho

Lecturer, Dr. Mech. Eng., Laboratory for Welding Processes Development - LAPROSOLDA, Federal University of Uberlândia - UFU, Campus Santa Mônica, 38400-902, e-mail vilarinho@mecanica.ufu.br.

Américo Scotti

Lecturer, PhD. Mech. Eng., Laboratory for Welding Processes Development - LAPROSOLDA, Federal University of Uberlândia - UFU, Campus Santa Mônica, 38400-902, e-mail ascotti@mecanica.ufu.br.

Abstract: *The knowledge of shielding gas effects on the welding process performance (such as its thermal efficiency) is a very important feature to provide indexes for shielding gas or mixture selection. This task can be done experimentally. However, experimentation is often an expensive approach. Thus, the development of reliable numerical models is extremely important, in order to simulate different welding conditions. Therefore, the methodology for TIG arc numerical simulation is described in this work through the development of a complete national software that allows characterizing TIG arcs basing on the temperature, velocity, voltage and current fields at three current levels (40, 70 and 100 A). The numerical results were validated with experimental data and underline the numerical simulation as an important tool for the study and practical selection of shielding gases in welding.*

Keywords: *welding, numerical modeling, finite volumes and plasma.*