

## MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW – MODELO ESTÁTICO

Ivan José de Santana , ivansan@deii.cefetmg.br<sup>1</sup>  
Paulo José Modenesi, modenesi@demet.ufmg.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CEFET MG, Avenida Amazonas 5253, 30.480-000, Belo Horizonte, MG

<sup>2</sup> UFMG, Rua Espírito Santo 35, 30.160-030, Belo Horizonte, MG

**Resumo:** Este trabalho descreve a concepção e validação de um modelo matemático direcionado à soldagem GMAW, objetivando a predição de alguns parâmetros de soldagem, assim como, o comportamento do processo para uma situação específica por meio de simulação. O modelo é baseado em um conjunto de equações que descrevem os diferentes componentes do circuito elétrico e as características operacionais deste processo, e tem aplicabilidade direta em operações caracterizadas pela observação de arco aberto, ou seja, sem a ocorrência de curtos-circuitos. No presente trabalho, é apresentada uma versão inicial deste modelo que não incorpora aspectos dinâmicos do processo. A validação do modelo envolveu testes de soldagem mecanizada em corpos-de-prova de aço baixo carbono, com monitoração da corrente, tensão e comprimento de arco. Os testes foram conduzidos na tentativa de averiguar-se a influência de diferentes parâmetros do processo, e os dados obtidos experimentalmente foram comparados com os previstos pelo modelo. O modelo mostrou-se capaz de prever, com divergência aproximada de 4%, os valores médios de alguns parâmetros fundamentais no processo de soldagem GMAW (corrente, tensão e comprimento de arco elétrico), assim como, o comportamento destes na ocorrência de mudanças operacionais.

**Palavras-chave:** Soldagem GMAW, Simulação numérica, Modelagem matemática

### 1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding) é um dos mais utilizados industrialmente, tanto para a fabricação de peças como na montagem de conjuntos mecânicos, podendo ser aplicado em materiais ferrosos e não ferrosos (Cary, 1998; AMS, 1994). Isto se deve principalmente à sua versatilidade, produtividade relativamente elevada, confiabilidade e facilidade de utilização e automatização (Bingul *et al.*, 2006; Ngo *et al.*, 2007). Vários modos de transferência metálica, tais como: curto-circuito, globular, globular repellido e spray (ou goticular) podem ser obtidos pelo ajuste adequado das condições de operação (Kin *et al.*, 1993; Praveen, *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2003). Os principais parâmetros responsáveis pela definição do modo de transferência e condições operacionais são o nível de corrente elétrica, sua polaridade, diâmetro e composição do eletrodo, comprimento do eletrodo e composição do gás de proteção (Lesnewich, 1958).

O processo oferece certa dificuldade associada à definição correta dos parâmetros de soldagem, principalmente devido ao número relativamente alto de variáveis e, sobretudo, a uma forte inter-relação entre essas (Cary, 1998; Bingul *et al.*, 2006; Choi *et al.*, 2001). É possível determinar os parâmetros de soldagem mais adequados para uma situação específica por meio de testes experimentais, porém este procedimento geralmente consome recursos e tempo de forma a comprometer a relação custo/benefício. Portanto, a criação de ferramentas capazes de prever e ou controlar de forma confiável as variáveis do processo possibilitaria a melhoria da qualidade do produto final, a segurança operacional, a diminuição do custo de fabricação e o melhor entendimento da influência de cada variável (Bingul *et al.*, 2006; Terasaki *et al.*, 2006).

Neste sentido, o presente trabalho foi realizado com o propósito de desenvolver e validar um modelo matemático capaz de simular o comportamento do processo de soldagem GMAW, particularmente em seus aspectos elétricos e operacionais em condições de arco aberto. O modelo incorpora equações que descrevem o comportamento da fonte de energia, o arco elétrico, o balanço térmico na ponta do eletrodo e outros componentes do circuito de soldagem. A validação envolveu testes de soldagem mecanizada em corpos-de-prova de aço baixo carbono em condições de arco aberto com monitoração da corrente, tensão e comprimento de arco. Os testes foram conduzidos para obtenção de dados experimentais que possibilitassem a comparação com os previstos pelo modelo, além, da tentativa de averiguar-se a influência da variação da velocidade de alimentação e distância entre bico de contato e corpo-de-prova nos aspectos operacionais do processo.

## 2. DESENVOLVIMENTO

### 2.1. Modelo Matemático

Para fins de entendimento, o arco elétrico é geralmente dividido em três regiões distintas: (1) região anódica e (2) catódica, que correspondem a finas camadas existentes na transição entre os eletrodos (arame e peça) e o arco elétrico, e a (3) coluna do arco que corresponde à maior parte deste (Bingul *et al.*, 2006; Guile, 1970; Haidar *et al.*, 1996; Lancaster, 1984).

De acordo com essa descrição, a tensão total do arco elétrico poderia ser determinada por meio da Eq. (1) (Bingul *et al.*, 2006).

$$VT_{arc} = V_{cp} + V_c + V_a \quad (1)$$

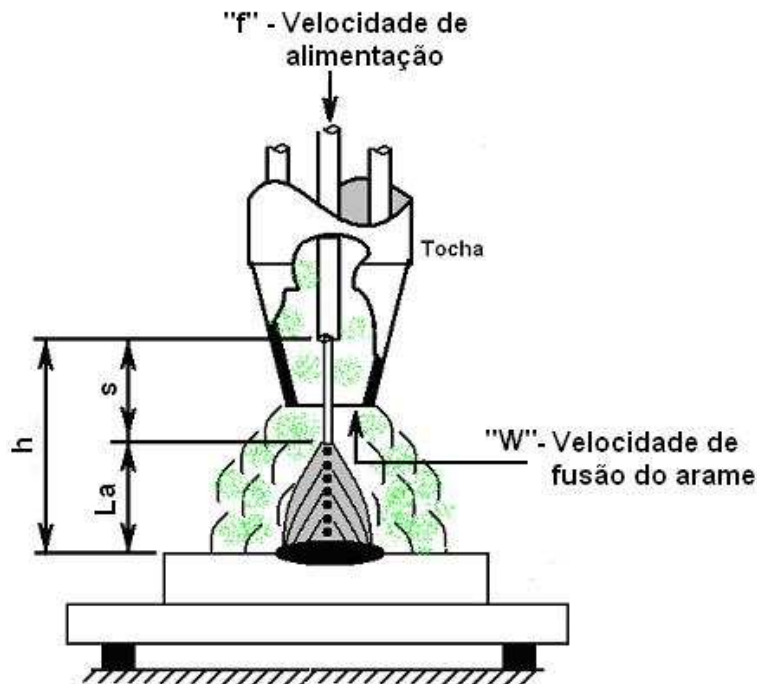
Em que:  $V_{cp}$  é a queda de tensão na coluna do arco (V), que corresponde ao valor do campo elétrico na coluna,  $E$ , multiplicado pelo comprimento de arco ( $L_a$ ),  $V_c$  é a queda de tensão catódica (V),  $V_a$  é a queda de tensão anódica (V) e  $VT_{arc}$ , queda de tensão total no arco (V).

Os equipamentos utilizados na soldagem a arco são usualmente classificados de acordo com a sua curva característica em fontes de corrente constante ou de tensão constante (Cary, 1998; AMS, 1994), embora, para os equipamentos mais modernos, essa separação possa não mais ter sentido. Em uma primeira aproximação, e considerando o sistema estático, ou seja, sem variações bruscas de corrente elétrica (processo operando em soldagem com o arco aberto, isto é, com transferência metálica globular ou spray), estas curvas podem ser descritas, na sua faixa de operação, pela Eq. (2) (Modenesi, 2007).

$$V_{circ} = V_0 - MI \quad (2)$$

Em que:  $V_{circ}$  é a tensão elétrica disponibilizada pelo equipamento (V),  $V_0$  é a tensão em vazio da fonte (V),  $M$  é a inclinação ("slope") da fonte (V/A) e  $I$  é a corrente elétrica (A).

A Figura 1 mostra, de forma esquemática, algumas das variáveis que determinam o comportamento operacional do processo de soldagem GMAW quando este está operando com transferência metálica com arco aberto.



**Figura 1 - Variáveis do processo de soldagem GMAW: h - distância entre o bico de contato e a peça;  $L_a$  - comprimento do arco; s - distância entre o bico de contato e o arco; f - velocidade alimentação; W - velocidade de fusão.**

De acordo com Terasaki *et al.* (2006), no processo GMAW, as velocidades de alimentação ( $f$ ) e de fusão ( $W$ ) do eletrodo, o comprimento do eletrodo ( $s$ ), o comprimento de arco ( $L_a$ ), a distância entre o bico de contato e a peça ( $h$ ), corrente de soldagem ( $I$ ) e tensão de soldagem ( $V$ ) estão todas relacionadas uma vez que o comportamento operacional deste pode ser representado pela Eq. (3).

$$\frac{dL_a}{dt} = W - f \quad (3)$$

Em que:  $L_a$  é o comprimento do arco (mm), que depende da tensão de soldagem,  $t$  é o tempo (s),  $W$  é a velocidade de fusão do arame (mm/s) e  $f$  é a velocidade de alimentação do arame (mm/s).

Nos sistemas usuais para a soldagem GMAW, a velocidade de alimentação é um dado de entrada, ou seja, é uma variável pré-determinada para a realização de um procedimento de soldagem. Já a velocidade de fusão depende da energia fornecida na forma de calor ao arame, principalmente pelo arco elétrico e pelo efeito Joule decorrente do fluxo de corrente elétrica pelo próprio arame. Esta velocidade pode ser representada por uma expressão que considera o efeito destas duas fontes de aquecimento, Eq. (4), (Choi *et al.*, 2001; Fujimura *et al.* 1987):

$$W = \alpha I + \beta s I^2 \quad (4)$$

Na Equação (4) o coeficiente  $\alpha$ , junto com a corrente, representa a contribuição do aquecimento do eletrodo pelo arco. Na soldagem GMAW com o eletrodo ligado ao terminal positivo da fonte, este coeficiente parece depender principalmente da composição química do eletrodo. Alguns resultados experimentais indicam que este coeficiente pode ser considerado, em uma primeira aproximação, independente da corrente de soldagem, composição do gás de proteção (Lesnewich, 1958), do comprimento e tensão do arco (Nunes, 1982), condições superficiais do arame, geometria da junta (Matumoto *et al.* 1980) e da pressão do ambiente circunvizinho, e seu valor pode ser estimado pela Eq. (5).

$$\alpha = \frac{k_A}{\rho A (\Delta H_{total})} \quad (5)$$

O parâmetro  $k_A$  é usualmente considerado como uma constante. Um modelo simples relaciona este parâmetro com a temperatura do plasma ( $k$ ), queda de tensão na região anódica ( $V$ ) e da função termiônica de trabalho ( $V$ ) (Lancaster, 1984).  $\rho$  é a densidade do arame ( $\text{kg/m}^3$ ),  $A$  é a área da seção transversal do arame ( $\text{m}^2$ ) e  $\Delta H_{total}$  é a entalpia total contida no metal de adição no momento em que este é destacado do eletrodo ( $\text{J/kg}$ ). Este termo é composto pela entalpia necessária para o aquecimento do metal de adição até a sua temperatura de fusão, fundi-lo, aquecer o metal líquido até a temperatura de destacamento e vaporizar uma parcela do material.

O segundo termo da equação (4), que contém o coeficiente  $\beta$ , representa a contribuição do efeito Joule na fusão do arame. Este coeficiente pode ser representado pela Eq. (6).

$$\beta = \frac{k_j}{\rho A^2 (\Delta H_{total})} \quad (6)$$

Em que:  $k_j$  é a resistividade elétrica do arame, propriedade que depende particularmente da composição química, nível de encruamento e temperatura ( $\Omega\text{m}$ ) do material.

A Figura 2 representa, de maneira esquemática, um circuito elétrico típico do processo de soldagem GMAW com os seus principais componentes.

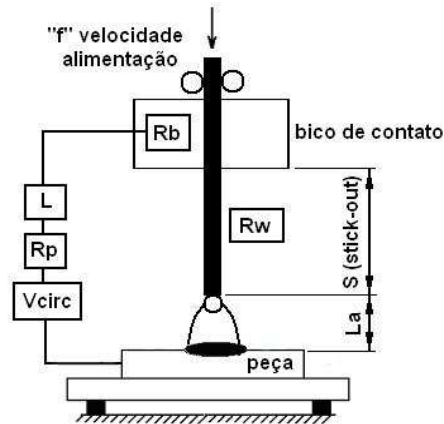


Figura 2 - Circuito elétrico do processo de soldagem GMAW:  $R_b$  - resistência entre bico de contato e arame,  $V_{circ}$  - tensão do circuito,  $R_p$  - resistência parasita,  $R_w$  - resistividade elétrica do arame dividida pela área de sua seção transversal.

Pode-se considerar que este circuito é composto principalmente por (1) um termo indutivo ( $L$ ) em grande parte determinado pela fonte de soldagem, (2) uma queda de tensão devido à resistência parasita ( $R_p$ ), correspondendo às resistências de contato e outras não determinadas, (3) uma queda de tensão devido à resistência entre bico de contato e arame ( $R_b$ ), (4) uma queda de tensão provocada pela resistência elétrica do eletrodo ( $s.R_w$ ), e, por fim, (5) as quedas de tensão no arco elétrico, devidas às regiões: anódica ( $V_a$ ), coluna do arco ( $E.L_a$ ) e catódica ( $V_c$ ) (Ngo *et al.*, 2007; Choi *et al.*, 2001; Terasaki *et al.*, 2006).

Considerando o processo de soldagem GMAW operando com arco aberto sem mudanças apreciáveis nas condições operacionais, as equações que descrevem os diversos termos citados acima podem ser resolvidas considerando condições estacionárias independentes do tempo. Estas correspondem a uma condição em que a velocidade de fusão se mantém idêntica à velocidade de alimentação, não ocorrendo variações de comprimento do arco e das outras variáveis de soldagem. Portanto, considerando o circuito elétrico mostrado na Fig. (2), as Eq. (1, 2 e 4), que representam respectivamente o arco elétrico, a fonte de energia, a velocidade de fusão do eletrodo, e as considerações geométricas apresentadas na Fig. (1), obtém-se uma equação polinomial de terceiro grau que representa a inter-relação entre as diversas variáveis do processo, Eq. (7).

$$I^3 B1 - I^2 B2 + IB3 - B4 = 0 \quad (7)$$

Em que:  $I$  é a corrente de soldagem (A), e as constantes  $B1$  ( $\beta M$ ),  $B2$  ( $\beta(V_0 - V_{ac} - Eh - I(R_p + R_b) + R_w \alpha)$ ),  $B3$  ( $R_w f + E \alpha$ ), e  $B4$  ( $Ef$ ) são constantes provenientes das características do arco, da fonte de energia, balanço térmico na ponta do eletrodo e características operacionais.

Através de uma manipulação simples, esta equação pode ser representada de forma a permitir uma solução numérica por interações.

## 2.2 Materiais e Métodos

Os experimentos de soldagem foram realizados em corpos-de-prova de aço baixo de carbono (16x30x500 mm), com proteção gasosa a base de argônio (Ar-15%CO<sub>2</sub>-2%O<sub>2</sub>) e arame de aço carbono de 1,2 mm de diâmetro (AWS ER70S6). Utilizou-se, para a deposição dos cordões de solda, uma fonte de tensão constante convencional (White Martins - modelo VI-400), com alimentador de arame (modelo SAWM-25) e um sistema mecanizado que permite o deslocamento da peça com uma velocidade definida enquanto a tocha permanece imóvel.

Os parâmetros elétricos de soldagem foram monitorados durante os experimentos com a utilização de um microcomputador equipado com uma placa de aquisição de dados (PCL-818H), sensor de corrente por efeito Hall e componentes auxiliares para o condicionamento dos sinais de corrente e tensão de soldagem. Um programa desenvolvido no LABSEND/UFMG foi usado para controlar a aquisição de dados e posterior análise dos mesmos.

Mensurou-se o comprimento do arco elétrico projetando-se a sua imagem com o auxílio de uma lente (ampliação de 5,5 vezes) e filtros de luz em um anteparo fixo a uma distância predeterminada (Reis, 2004).

Para a validação do modelo foram realizados dois procedimentos: (1) variou-se a velocidade de alimentação do arame entre 75 e 108 mm/s (4,5 e 6,5 m/min) mantendo os outros parâmetros como a vazão de gás de proteção (12L/min), sendo a distância entre bico de contato e peça (25,5 mm) e a tensão em vazio (40,1 V) mantidas constantes; (2) variou-se a distância entre o bico de contato e peça entre 16 e 25 mm mantendo os outros parâmetros, como a velocidade de alimentação (91,7 mm/s), vazão de gás de proteção (12 L/min) e tensão em vazio (40 V) constantes.

Para cada condição de soldagem foram realizados quatro experimentos no intuito de minimizar a influência de erros aleatórios e possibilitar o cálculo da incerteza dos resultados experimentais (Gonçalves, 2007).

Os valores simulados de corrente de soldagem foram calculados com a aplicação da Eq. (7) de forma interativa em uma planilha eletrônica. A tabela 1 mostra os valores de alguns dos parâmetros usados durante este cálculo.

**Tabela 1 - Valores de alguns dados utilizadas na Eq. (7).**

Dados	Símbolo	Valor/unidade	Observações
Queda de tensão anódica e catódica	$V_{ac}$	16,5V	(Modenesi, 2007)
Resistência parasita	$R_p$	0,008Ω	(Terasaki <i>et al.</i> , 2006)
Resistência do bico de contato	$R_b$	0,0015Ω	(Terasaki <i>et al.</i> , 2006)
Campo elétrico do arco.	$E$	1,25V/mm	(Modenesi, 2007)
Slope, inclinação da fonte	$M$	0,039V/A	Valor experimental.
Tensão em vazio	$V_0$	40,1V	Dado de entrada
Distância entre bico de contato e peça	$h$	25,5; 25; 22; 19 e 16mm	Dado de entrada
Resistividade do arame dividida pela área da seção transversal.	$R_w$	8,84x10 <sup>-4</sup> Ω/mm	(Reis, 2004)
Contribuição do aquecimento anódico na fusão do arame.	$\alpha$	0,2872mm/As	Valor calculado: Eq. (2.5)
Contribuição do efeito Joule na fusão do arame	$\beta$	5,06x10 <sup>-5</sup> (A <sup>2</sup> s) <sup>-1</sup>	Valor calculado: Eq. (2.6)

A partir dos valores de corrente calculados pela Eq. (7), os valores de tensão de soldagem foram calculados por meio da Eq. (2).

Para o cálculo do comprimento de arco, os valores de corrente obtidos pela Eq. (7) foram utilizados na Eq. (4), após esta ser manipulada isolando-se o termo “S” (isto é, o comprimento do eletrodo) e aplicando a relação geométrica mostrada na Fig. (1).

Como uma forma de minimizar a variação na altura da poça de fusão durante os testes experimentais, utilizou-se mais de uma velocidade de deslocamento do corpo-de-prova (200, 250 e 300 mm/min), o que possibilita um controle da taxa de deposição de metal, ou seja, quanto maior a velocidade de alimentação maior deveria ser a velocidade de deslocamento. Este procedimento visa minimizar uma possível influência nos parâmetros operacionais e no procedimento de medição do comprimento do arco elétrico.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras (3) e (4) mostram as relações obtidas no primeiro procedimento de validação, entre os valores de corrente elétrica, tensão e comprimento de arco simulados e experimentais, em função da velocidade de alimentação.

Observando a Fig. (3a), percebe-se que os valores de corrente elétrica obtidos por simulação apresentam pequena divergência em relação aos dados experimentais, exibindo valores inferiores a estes. Porém, em todos os casos, a diferença entre os valores medidos e simulados foi sempre inferior a 4,3% e a relação entre a corrente de soldagem e a velocidade foi similar para os dois conjuntos de resultados. Como esperado, em ambos os casos, a corrente aumentou com a velocidade de alimentação de modo a equiparar a velocidade de fusão com essa. De uma forma geral e levando-se em conta o número de variáveis envolvidas e as limitações do presente modelo, os resultados sugerem que este modelo está simulando de uma forma adequada o processo.

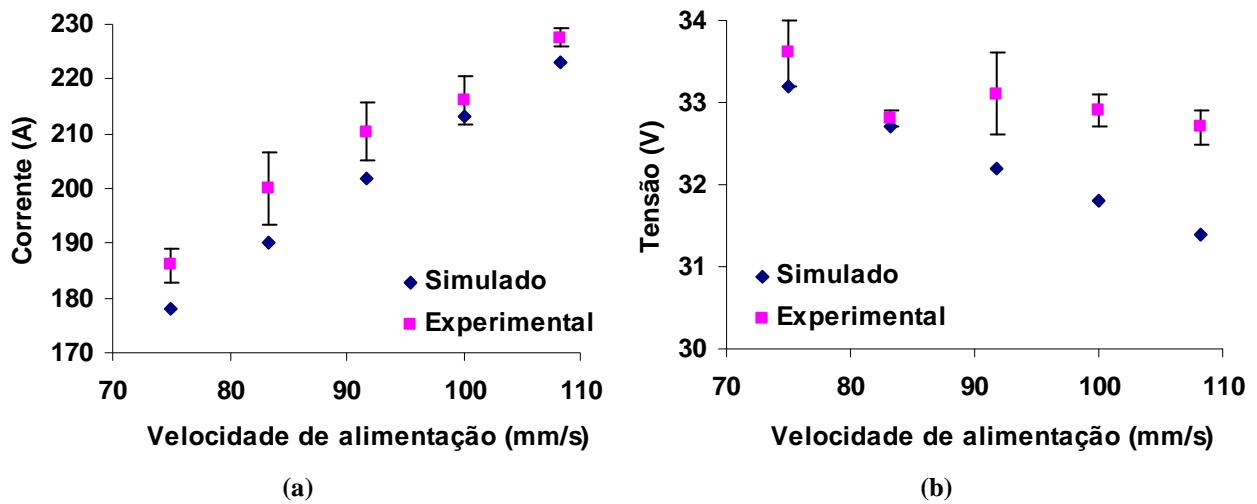


Figura 3 - Valores de (a) corrente elétrica e (b) tensão, simulados e obtidos experimentalmente.

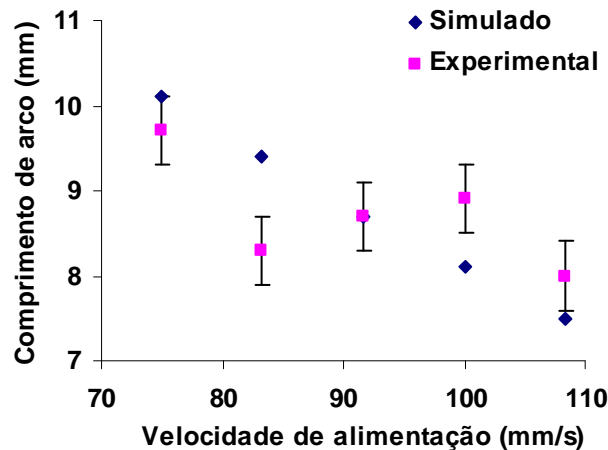


Figura 4 - Valores de comprimento de arco, simulados e obtidos experimentalmente.

Observando a Fig. (3b), nota-se que os valores de tensão elétrica, obtidos por simulação, nos testes com velocidade de alimentação de 75 e 83,3 mm/s apresentam valores próximos aos obtidos experimentalmente (erro máximo de 1,2%), e houve uma diferença maior nos testes com maiores velocidades de alimentação, ficando esta diferença, contudo, inferior a 4,1%, o que representa valores próximos a 1,0 V. Estas diferenças podem estar relacionadas a inúmeras causas incluindo erros experimentais e aos valores de alguns dos dados de entrada, que foram estimados e mantidos constantes para todas as simulações. No entanto, dois fatores podem ter contribuído mais fortemente para esta diferença: (1) indícios de transferência metálica oscilando entre globular e spray, como pode ser observado no oscilograma apresentado na Fig. (5) (Choi *et al.*, 2001), o que causa oscilações relativamente fortes da corrente de soldagem, o que não é considerado no presente modelo, e (2) possível ocorrência de um super aquecimento da tocha utilizada, que é resfriada apenas com o próprio gás de proteção (baixa troca de calor), podendo possibilitar para este modelo uma maior temperatura de pico e maior dificuldade de atingir o equilíbrio térmico no bico de contato, em relação aos modelos com refrigeração à água, o que pode alterar os parâmetros elétricos e operacionais durante os procedimentos de soldagem (Modenesi *et al.*, 1998).

A Figura (4) mostra que tanto os resultados experimentais como os simulados indicam uma tendência para o comprimento do arco se reduzir com o aumento da velocidade de alimentação, o que é a tendência esperada. Contudo, os resultados experimentais sugerem, para valores intermediários de velocidade de alimentação do arame, uma inversão neste comportamento, o que resulta em uma maior diferença entre os valores experimentais e os simulados (atingindo um erro máximo de 13,3% para a velocidade de alimentação de 83,3 mm/s). Parte desta maior divergência pode ser compreendida considerando ser o comprimento do arco, entre os parâmetros usados para caracterizar o processo, aquele de maior dificuldade para ser medido. Em particular, parte dos experimentos realizados foi feita em condições de transferência globular ou próximo da transição entre globular e spray. Estas condições causaram oscilações relativamente grandes no comprimento e na forma do arco, o que aumenta a dificuldade de medição deste, e na corrente de soldagem (o que não é considerado pelo presente modelo), Fig. (5) e (6). Apesar destas dificuldades, em geral, as diferenças entre os comprimentos de arco medidos e simulados ficaram inferiores a 1,0 mm.

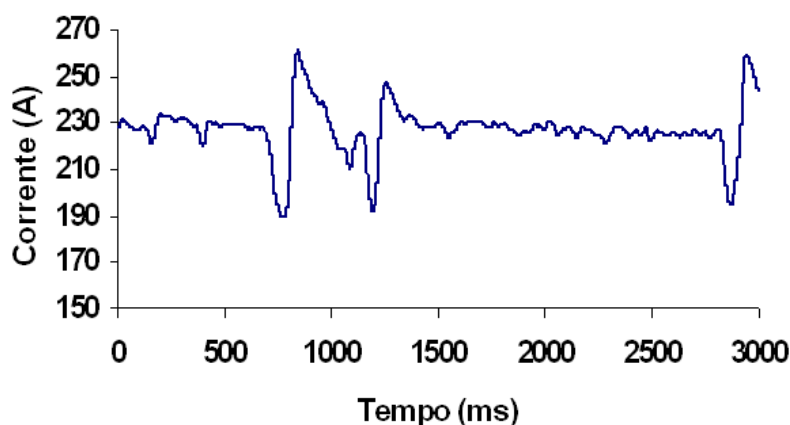


Figura 5 - Oscilograma de corrente, velocidade de alimentação de 108,3mm/s, primeiro experimento.

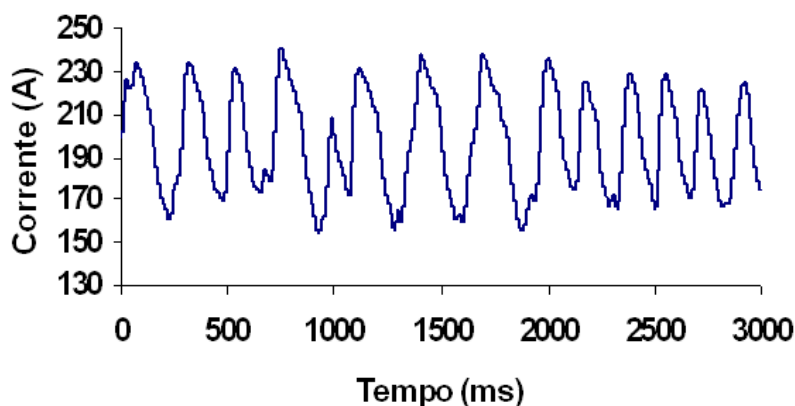


Figura 6 - Oscilograma de corrente, velocidade de alimentação de 83,3mm/s, primeiro experimento.

As Figuras (7) e (8) exibem as relações, obtidas no segundo procedimento de validação, entre os valores de corrente elétrica, tensão e comprimento de arco simulados e experimentais, em função da distância entre o bico de contato e a peça.



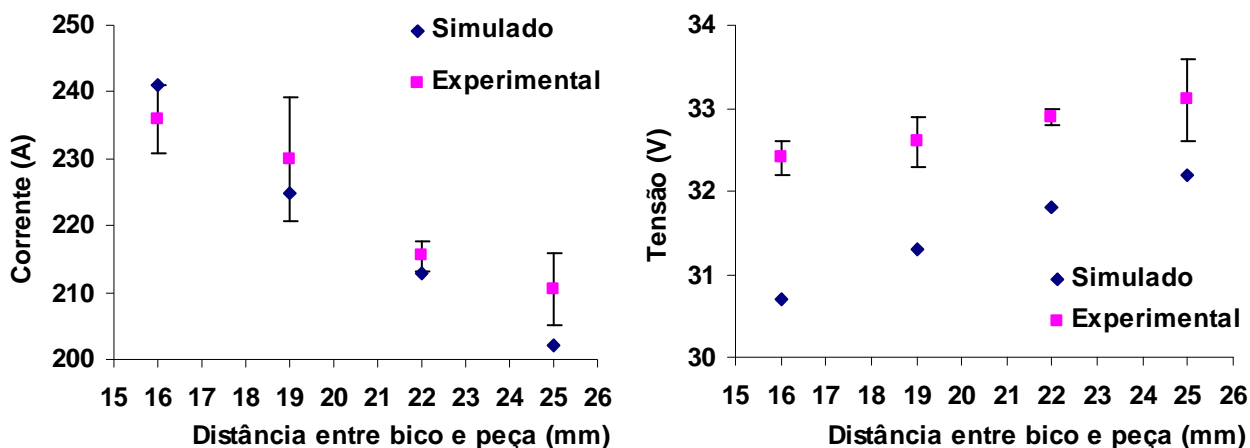


Figura 7 - Valores de (a) corrente e (b) tensão simulados e obtidos experimentalmente.

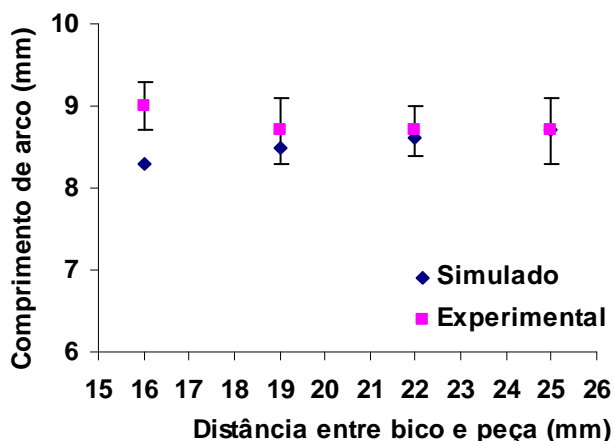


Figura 8 - Valores de comprimento de arco simulados e obtidos experimentalmente.

A Figura (7a) revela, como se esperava, o aumento dos valores de corrente elétrica experimental com a diminuição da distância entre bico de contato e peça, devido à diminuição da resistência elétrica do circuito. Percebe-se, também, que o modelo foi capaz de prever os valores e o comportamento desta variável de forma satisfatória com divergência máxima de 4,0%.

Na Figura (7b), nota-se que os valores de tensão, obtidos por simulação, estão relativamente coerentes aos experimentais, porém se afastam destes à medida que a distância entre bico de contato e peça diminui (erro máximo 4,0%). Acredita-se que parte desta divergência esteja relacionada à proximidade do metal fundido, o que estaria provocando um maior aquecimento da tocha, assim como, um aumento da velocidade de fusão do arame devido à energia fornecida por radiação, conseqüentemente aumentando o comprimento do arco.

A Figura (8) exhibe os valores experimentais de comprimento de arco condizentes com uma fonte de tensão constante, a qual indiferente à variação da distância entre o bico de contato e peça, tenta manter o comprimento de arco constante. Revela, também, que o modelo foi capaz de prever valores condizentes e com o mesmo comportamento, exceto, na situação de menor distância entre bico de contato e peça (erro máximo de 7,8%). Acredita-se, novamente que parte desta divergência esteja relacionada à proximidade da poça de fusão, e que por representar um valor inferior a 1 (um) milímetro não compromete a utilização do modelo proposto para o entendimento do comportamento desta variável.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento e a validação de um modelo estático para representar as características estáticas do processo de soldagem GMAW. Os resultados obtidos permitem colocar as seguintes conclusões:

- A comparação dos resultados do modelo com os experimentais indica que o modelo proposto simula corretamente o comportamento estático do processo GMAW, reproduzindo de forma adequada as variações

observadas experimentalmente da corrente e tensão médias de soldagem e do comprimento do arco em função da velocidade de alimentação de arame e da distância do bico de contato à peça.

- O modelo, na sua forma atual, possibilitou a previsão dos valores da tensão e corrente de soldagem com uma divergência máxima de 4% e, para o comprimento de arco, de 7%. Estas diferenças são similares às encontradas na literatura para outros modelos do processo, tais como, os de Choi *et al* (2001) e Terasaki *et al* (2006).
- O processo de validação indicou que os valores de alguns dados de entrada (como, por exemplo, a resistividade do arame, campo elétrico do arco, valor da queda de tensão anódica e catódica e o *slope* da fonte) necessitam ser ajustados para melhorar o desempenho do modelo. Em particular, uma determinação mais precisa dos valores destes, incluindo a sua variação com as condições de soldagem, pode contribuir significativamente para um melhor desempenho do modelo.
- Verificou-se que fatores não considerados no modelo, como um maior aquecimento da tocha com a diminuição da distância entre bico de contato e peça, podem estar contribuindo para alterações nas condições operacionais da soldagem.
- O modelo proposto, apesar de estar em fase de desenvolvimento, pode ser ferramenta capaz de facilitar o entendimento e determinação mais conveniente dos parâmetros de soldagem do processo GMAW para condições de operação sem curto-circuito ou com fortes variações dos parâmetros operacionais.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração e sugestões dos membros do LRSS/LabSEND/UFMG e, em especial, ao Prof. Alexandre Queiroz Bracarense e ao Sr. Eustáquio Roberto Apolinário. Um dos autores agradece ao CEFET MG pelo apoio ao seu trabalho de pesquisa. Finalmente, agradece-se à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro ao desenvolvimento deste trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMS. "Gas-metal arc welding". Welding Handbook. 2.ed., v.6, 1994. p. 569-581.
- Bingul, Z.; Cook G. E., 2006, "A real time prediction model of electrode extension for GMAW", IEEE/ASME Transactions On Mechatronics, vol. 11, n. 1, february.
- Cary, H.B., 1998, "Modern welding technology", 4. ed. New Jersey: Prentice Hall, 780p.
- Choi, B. J. H.; Lee, J. Y.; Yoo, C. D., 2001, "Simulation of dynamic behavior in a GMAW system", Welding Journal, p. 239-245, outubro.
- Fujimura, H; Ide, E.; Inoue H., 1987, "Estimation of contact tip-workpiece distance in gas shielded metal arc welding", Quarterly Journal of the Japan Welding Society, p. 311-316.
- Gonçalves, A. A., 2007, "Metrologia", Florianópolis: Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, 130p.(Apostila).
- Guile, A. E., 1970, "Arc Cathode and Anode Phenomena", Annual Assembly of the International Institute of Welding.
- Haidar, J.; Lowke, J. J., 1996, "Predictions of metal droplet formation in arc welding", IOP Publishing Ltd, p. 2951-2960.
- Kin, Y. S.; Eagar, T. W., 1993, "Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding", Welding Research Supplement, p. 269-278.
- Lancaster, J. F., 1984, "The physics of welding", Phys. Technol. v.15, p.73 - 89.
- Lesnewich, A., 1958, "Control of melting rate and metal transfer", parts I & II. Welding Journal, p. 343-353s e 418-425.
- Matumoto, J.; *et al.*, 1980, "Some characteristics of electrode melting phenomena in narrow gap MIG-arc welding", Trans. Japan Weld. Soc., p. 3-8.
- Modenesi, P.J., do Carmo A. D., 1998, "Aquecimento do bico de contato na soldagem MIG/MAG", XXIV Encontro Nacional De Tecnologia Da Soldagem, Setembro.
- Modenesi, P.J., 2007, "Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais", Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalurgia da UFMG, 146p.(Apostila).
- Ngo, M. D.; Duy, V. H.; Phuong N. T.; Kim, H. K.; Kim, S. B., 2007, "Development of digital gas metal arc welding system", Journal of Materials Processing Technology, p. 384-391.
- Nunes, J.L., 1982, "Metal transfer investigations with a synergic power supply", 198f. MSc Thesis - Cranfield Institute of Technology.
- Praveen, P.; Yarlagadda P. K. D. V.; Kang, M. J., 2005, "Advancements in pulse gas metal arc welding", Journal of Materials Processing Technology, p. 164-165.
- Reis, R. I., 2004, "Anomalias na velocidade de fusão do eletrodo na soldagem GMAW", 128f. Tese (Doutorado em Metalurgia de Transformação/Soldagem) - Escola de Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, Belo Horizonte.



Terasaki, H.; Simpson, S. W., 2006, "Circuit simulation for gas metal arc welding system", The 47th International Midwest Symposium on Circuits and System, University of Sydney.  
Wang, F.; How, W. K.; Hu, S.J.; Kannatey-Asibu, E.; Schultz, W.W.; Wang, P. C. 2003, "Modeling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding", Journal of Physics D: Applied Physics. April.

## Mathematical Modeling of GMA Welding – Static modeling

Ivan J. de Santana, [ivansan@deii.cefetmg.br](mailto:ivansan@deii.cefetmg.br)<sup>1</sup>

Paulo J. Modenesi, [modenesi@demet.ufmg.br](mailto:modenesi@demet.ufmg.br)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CEFET MG, Avenida Amazonas 5253, Nova Suiça, BH,

<sup>2</sup>UFMG, Rua Espírito Santo 35, 30160-030, Belo Horizonte, MG,

**Abstract:** *This paper describes the development and validation of a mathematical model to describe the GMAW process and to preview some of its variables during welding. This model is based in a set of equations that describe the contribution of the several components of the welding electrical circuit. For the present work, the model does not consider dynamics aspects of the process and, therefore, can not be considered to describe short-circuit welding. Validation of the model was performed by comparing its results to those of experimental welding trials during which the welding current, voltage and arc length were monitored. Results have shown that the model is able to correctly predict how those parameters change with alterations in wire feed rate and contact-tip to workpiece distance. Furthermore, welding current and voltage value were predict with an maximum error of 4%.*

**Key-words:** MIG welding, mathematical modeling, welding parameters.