

(Mathematical Modeling of GMA Welding - Free Flight Transfer)

Ivan José de Santana¹, Paulo J. Modenesi²

¹CEFET MG, DEMAT, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, ivansan@deii.cefetmg.br

²Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, modenesi@demet.ufmg.br

Resumo

Este artigo descreve a concepção e validação de um modelo matemático direcionado à soldagem GMAW. O modelo permite a predição de alguns parâmetros de soldagem, assim como o comportamento do processo em condições operacionais de transferência metálica por vôo livre. Este modelo foi baseado em um conjunto de equações, que descrevem as características operacionais da fonte de energia, as quedas de tensão que ocorrem no arco elétrico e nos componentes do circuito de soldagem, e em um balanço de energia na ponta do arame. A validação do modelo envolveu testes de soldagem mecanizada em corpos-de-prova de aço baixo carbono, com monitoração da corrente, tensão, comprimento de arco e velocidade de alimentação de arame. O modelo mostrou-se capaz de prever, em diferentes situações, com erros inferiores a 10%, os valores médios de alguns parâmetros fundamentais no processo de soldagem GMAW (valores médios de corrente, tensão e comprimento de arco elétrico), assim como, o comportamento destes na ocorrência de mudanças operacionais.

Palavras-chave: Soldagem MIG/MAG, Simulação numérica, Modelagem matemática, Parâmetros de soldagem.

Abstract: *This paper describes the conception and validation of a mathematical model applied to GMA welding. This model allows predicting some welding parameters as well as process behavior for operation with free flight transfer mode. This model was based on a set of equations that describes the power source characteristics, the voltage drop along the electric arc, the welding circuit and the energy balance on the wire tip. The model validation was performed by comparing its results to experimental welding trials. In this test specimen steel of low carbon was used and the parameters welding current and voltage, speed of wire feeding and arc length were monitored. The results have shown that the model is able to correctly predict how different parameters change with alterations in wire feed, in different situations. Furthermore, welding current and voltage e arc length value were predicted with a least error lower than 10%.*

Key-words: MIG/MAG welding, Numerical simulation, Mathematical modeling, Welding parameters.

1. Introdução

O processo de soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding) é muito utilizado industrialmente, podendo ser aplicado em materiais ferrosos e não ferrosos. Isto se deve principalmente à sua versatilidade, produtividade relativamente elevada, confiabilidade e facilidade de utilização e automatização [1-3]. 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 estas [3-4]. 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. Assim, a criação de ferramentas capazes de prever de forma confiável os parâmetros e o comportamento operacional do processo possibilitaria a melhoria da qualidade do produto final, a maior segurança operacional e a diminuição do custo de fabricação,

além de permitir um melhor entendimento da influência de cada variável no processo.

Nesse sentido, nos últimos 20 anos, um grande número de modelos matemáticos foi desenvolvido para antever diferentes aspectos deste processo. Vários destes foram elaborados para prever aspectos geométricos do cordão, propriedades mecânicas e tensões residuais da junta e comportamento da poça de fusão [5-13]. Outros tantos foram desenvolvidos para, em conjunto com a monitoração de parâmetros do processo, permitir o seu controle, assim como inferir a qualidade do cordão e a formação de descontinuidades [14-17]. Este desenvolvimento foi fortemente motivado e direcionado para a otimização a utilização robotizada ou mecanizada. Uma abordagem que não pode ser omitida envolve a simulação de detalhes do processo como a formação da gota fundida na ponta do eletrodo, seu destacamento, seu deslocamento através do arco e a sua interação com a poça de fusão [18-23]. Trabalhos de modelagem foram, também, conduzidos para prever valores e/ou comportamento de alguns parâmetros operacionais do processo a partir de condições específicas e pré-determinadas [24]. Vários destes foram desenvolvidos para modelar parte do circuito de soldagem

(Recebido em 16/05/2011; Texto final em 21/08/2011).

ou características do processo, como a velocidade de fusão do arame [25-26], a transferência de calor neste [27] ou a emissão de fumos [28].

Finalmente, um número reduzido enfoca o processo de uma forma mais abrangente. Nesta linha, Xu et al. [29] trabalharam em um modelo matemático dinâmico que simula o circuito elétrico e o comportamento operacional do processo GMAW em relação ao modo de transferência metálica. Este modelo permitiu prever oscilogramas de tensão e corrente, valores de frequência de curtos-circuitos e a transição entre a transferência por curto-circuito para a por vôo livre. Choi et al. [30] propuseram um modelo matemático elaborado a partir de equações que descrevem o circuito de soldagem, um balanço de energia na ponta do eletrodo e o arco elétrico (equação de Ayrton modificada). O modelo incorpora a evolução do volume e destacamento da gota na ponta do eletrodo, utilizando o modelo de balanço de forças e a teoria de instabilidade de Pinch. Os resultados apresentados revelaram valores de frequência de curtos-circuitos similares aos experimentais. Porém, os valores máximos e mínimos de corrente e tensão simulados apresentam maior diferença em relação aos experimentais, principalmente os referentes à corrente.

Terasaki e Simpson [31] desenvolveram um modelo matemático similar, utilizando, como dados de entrada, valores fixos de 200 μH para a indutância; 8,0 $\text{m}\Omega$ para a resistência parasita (resistência de cabos e conexões); 1,5 $\text{m}\Omega$ para a resistência elétrica entre o bico de contato e o arame-eletrodo e 0,011 Ω para a resistência do arame após o bico de contato. O modelo apresentado, assim como os outros já citados, não simula o aparecimento de curtos-circuitos de curta duração (sem transferência de metal). Os resultados apresentados referentes à comparação entre os valores de frequência de curtos-circuitos simulados e experimentais em relação à tensão em vazio apresentaram uma diferença menor do que aqueles obtidos por Xu et al. [29].

O presente trabalho descreve o desenvolvimento e validação de um modelo matemático, baseado em proposições similares às usadas por Xu et al. [29], Choi, B., et al. [30] e Terasaki e Simpson [31]. O modelo aqui desenvolvido é bastante simples, não incorporando variações dos parâmetros de soldagem com o tempo, mas podendo ser resolvido com poucos recursos computacionais, por exemplo, através de uma pequena planilha eletrônica. Este modelo pode calcular os valores médios de corrente e tensão de soldagem, estimar o comprimento médio de arco e a influência de características do equipamento de soldagem em condições de soldagem sem a ocorrência de curtos-circuitos.

2. Desenvolvimento do Modelo

Considerou-se o arco elétrico dividido em três regiões distintas: as regiões de queda anódica e catódica e a coluna do arco, que corresponde à maior parte deste [20, 32]. De acordo com essa descrição, a tensão total do arco elétrico foi representada por meio da Equação 1 [33].

$$U_{Tarc} = EL_a + U_{ac} \quad (1)$$

Nesta equação, U_{Tarc} é a queda de tensão total no arco [V], “ E ” é o campo elétrico na coluna do arco [V/mm], L_a é o comprimento do arco [mm] e U_{ac} é a soma das quedas de tensão anódica e catódica [V].

Considerando a Figura 1, que representa esquematicamente um circuito elétrico típico do processo de soldagem GMAW, e aplicando a Equação 1, a tensão do circuito U_{circ} ou tensão de soldagem, poderia ser determinada pela Equação 2.

$$U_{circ} = I(R_p + R_b + \rho_a S / A) + E(h - S) + U_{ac} \quad (2)$$

Em que: “ I ” é a corrente de soldagem [A], ρ_a é a resistividade elétrica média do eletrodo [$\Omega \text{ mm}$] e “ A ” é a área da seção transversal do arame [mm^2].

Em uma primeira aproximação, considerando o sistema operando de forma estacionária sem variações bruscas de corrente (por exemplo, em uma condição estável com transferência metálica por voo livre), a saída da fonte, representada por suas curvas características, pode ser descrita pela Equação 3 [34].

$$U_{circ} = U_0 - IM \quad (3)$$

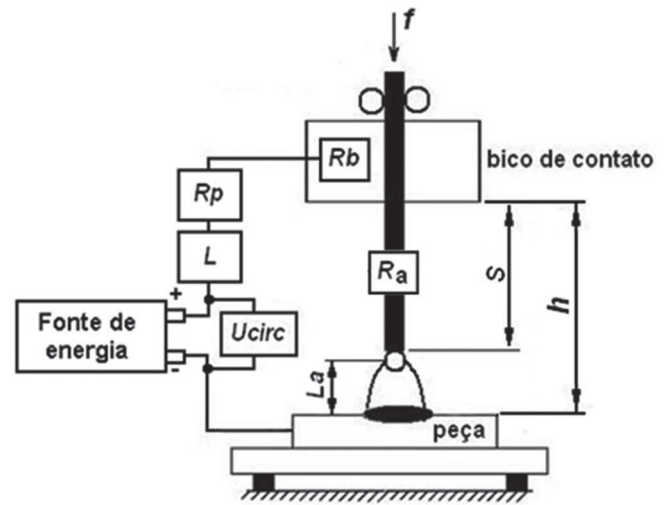


Figura 1- Circuito elétrico do processo GMAW: U_{circ} - tensão do circuito, “ L ” - indutância, R_p - resistência parasita, R_b - resistência entre o bico de contato e o arame, R_a - resistência do eletrodo, “ S ” - comprimento do eletrodo, “ h ” - distância entre o bico de contato e a peça e L_a - comprimento do arco.

Em que U_0 é a tensão em vazio da fonte [V] e “ M ” é o coeficiente angular da curva característica da fonte (slope da fonte) [V/A]. Manipulando-se as Equações 2 e 3, chega-se a:

$$S = \frac{U_0 - U_{ac} - MI - Eh - I(R_p + R_b)}{\left(\frac{\rho_a S}{A} I - E\right)} \quad (4)$$

Na forma mais usual de operação na 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 do arame depende da

energia fornecida na forma de calor, gerada, principalmente, pelo arco elétrico e pelo efeito Joule decorrente do fluxo de corrente elétrica. Esta velocidade pode ser estimada pela Equação 5, que considera o efeito destas duas fontes de calor [26, 35-36].

$$W = \alpha I + \beta SI^2 \quad (5)$$

Em que: “ α ” [mm/sA] e “ β ” [1/sA²] são coeficientes relacionados com o aquecimento pelo arco elétrico e por efeito Joule, respectivamente.

Considerando a manutenção de um equilíbrio entre as velocidades de alimentação (“ f ”) e de fusão (“ W ”) de forma que, em qualquer condição operacional, seus valores instantâneos possam ser momentaneamente diferentes, mas que, na média, dentro de um período adequado de tempo, sejam iguais e manipulando-se a Equação 5, que representa um balanço de energia na ponta do arame, chega-se à Equação 6.

$$S = \frac{f - \alpha I}{\beta I^2} \quad (6)$$

Igualando as Equações 4 e 6, obtém-se uma equação polinomial de terceiro grau que representa a inter-relação entre as diversas variáveis do processo:

$$I^3 B_1 - I^2 B_2 + I B_3 - B_4 = 0 \quad (7)$$

Os termos B_1 (βM), B_2 ($\beta(U_0 - U_{ac} - Eh - I(R_p + R_b) + \rho\alpha/A)$, B_3 ($\rho f/A + E\alpha$), e B_4 (Ef) da equação 7 estão relacionados com características do arame, da fonte, do arco elétrico e do processo.

Com a solução da Equação 7, que será pormenorizada no Item 2.3, pode-se simular o valor da corrente de soldagem. De posse deste valor e utilizando o valor da tensão em vazio e do *slope* da fonte, dados de entrada, obtém-se a o valor da tensão de soldagem pela Equação 3. Por fim, o comprimento do arco elétrico pode ser estimado utilizando a Equação 8.

$$L_a = h - \frac{f - \alpha I}{\beta I^2} \quad (8)$$

3. Procedimento Experimental

3.1. Procedimentos para Obtenção dos Dados de Entrada

A solução da Equação 7 exige o conhecimento de seus dados de entrada, incluindo aqueles referentes ao arco elétrico (U_{ac} e “ E ”), ao equipamento (R_p , R_b e “ M ”), ao arame (ρ_a) e à fusão do eletrodo (“ α ” e “ β ”). Os valores de alguns destes foram tirados de informações na literatura e outros foram medidos experimentalmente.

Valores da soma das quedas anódica e catódica (U_{ac}) foram estimados a partir de oscilogramas de tensão de testes de soldagem com transferência metálica por curtos-circuitos. Para esta determinação (Fig. 2a), usou-se a diferença entre a tensão no ponto 01, imediatamente antes do início de um curto-circuito e a do ponto 02, imediatamente após o estabelecimento do curto-

circuito. Como, no ponto 01, o comprimento de arco é próximo de zero, a queda de tensão na coluna do arco possa ser desprezada e a diferença entre as tensões nos pontos indicados seria uma estimativa de U_{ac} [37, 38]. Com base nessa premissa, valores de U_{ac} foram obtidos com um programa de análise de sinais de soldagem desenvolvido por um dos autores (programa SINAL). Este programa permite calcular, para dados de tensão, um vetor de diferenças ($\Delta U_i = U_{i+N} - U_i$, com $N = 2$ neste trabalho), figura 2b. Nestes dados, os picos negativos correspondem à variação de tensão no início do curto-circuito e, portanto, são uma estimativa de U_{ac} . Outra rotina do programa SINAL permite estimar o valor médio destes picos em um dado teste. Para isto é necessário definir um valor de corte (Fig. 2b). No presente trabalho, com base em testes preliminares, foi usado um valor de corte igual a -15 V. Maiores detalhes deste procedimento podem ser encontrados na referência 38.

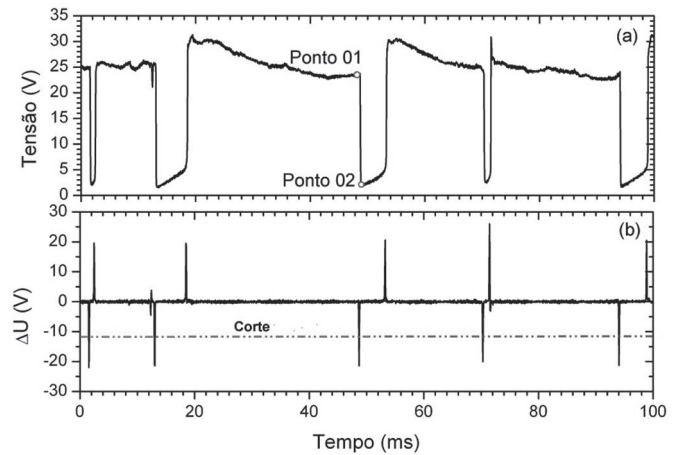


Figura 2 - Representação esquemática do procedimento para determinar o valor de U_{ac} . (a) Oscilograma de tensão e (b) diferenças de tensão obtidas pelo programa SINAL e indicação do limite de corte.

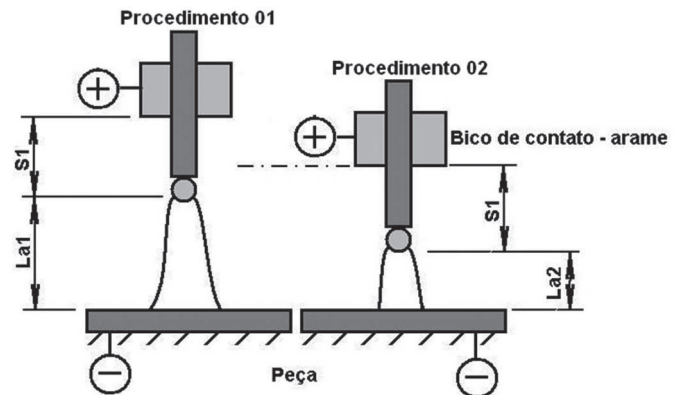


Figura 3 - Desenho esquemático do procedimento experimental para determinar o valor do campo elétrico.

O valor médio do campo elétrico na coluna do arco foi determinado utilizando duas condições distintas de soldagem de tal forma que houvesse uma variação no comprimento de arco entre os procedimentos (Fig. 3) (variou-se os valores de

“ h ” e U_0). Adicionalmente, os mesmos modos de transferência metálica e valores médios de comprimento do eletrodo (“ S ”, Fig. 3) e de corrente de soldagem aproximadamente iguais foram mantidos nestes testes. Supõe-se, ainda, que as quedas de tensão anódica e catódica e as resistências elétricas do bico de contato e parasitas mantêm-se sejam iguais nos dois procedimentos de soldagem.

Após os testes, valores médios de resistência elétrica do circuito foram determinados através dos valores de corrente e tensão e a resistência média por comprimento da coluna do arco foi calculada, Equação 9:

$$R_E = \frac{(R_1 - \frac{\rho S_1}{A}) - (R_2 - \frac{\rho S_2}{A})}{L_{a1} - L_{a2}} \quad (9)$$

Em que R_E é resistência elétrica média específica da coluna do arco [Ohm/mm], R_1 e R_2 são os valores médios de resistências elétricas do circuito [Ohm], ρ é a resistividade elétrica média do eletrodo [Ohm.mm], S_1 e S_2 são os comprimentos do eletrodo [mm], A é a área da seção transversal do arame [mm²] e L_{a1} e L_{a2} são os comprimentos do arco elétrico [mm] medidos durante os testes (item 2.3). *Observação: Os índices 1 e 2 referem-se, respectivamente, aos procedimentos 01 e 02.*

Os termos correspondentes à resistência do arame-eletrodo ($\rho S/A$) entram na equação para levar em consideração qualquer diferença entre os valores de comprimento de arame-eletrodo energizado (S_1 e S_2). Com o valor de resistência média específica da coluna, determina-se o valor do campo elétrico médio do arco por meio da Equação 10:

$$E = \frac{R_E L_{a1} I_1 - R_E L_{a2} I_2}{L_{a1} - L_{a2}} \quad (10)$$

Em que E é o campo elétrico médio do arco [V/mm] e I_1 e I_2 são as correntes médias de soldagem [A].

A inclinação da curva características da fonte de soldagem (*slope da fonte*) foi determinada a partir de valores de corrente e tensão coletados em uma montagem ligada à fonte que permitia variar a resistência elétrica pela posição de placas de aço inoxidável em uma solução salina (Fig. 4). Experimentos foram realizados para diferentes valores de tensão em vazio da fonte e a inclinação obtida pelo ajuste, por regressão linear, de retas para cada conjunto de medidas relativo a uma dada tensão em vazio. O valor do slope da fonte pode, também, ser obtido a partir de testes de soldagem [3].

A resistividade média do eletrodo foi determinada em experimentos de soldagem com transferência metálica por curtos-circuitos. A partir de dados destes testes, a variação da resistência elétrica de soldagem foi calculada com o programa SINAL (Fig. 5a). Neste oscilograma, os períodos de curto-circuito correspondem aos momentos em que a resistência elétrica apresenta seus menores valores. Valores de resistência correspondentes às duas condições (de arco e de curto-circuito) foram separados em um gráfico de resistência em função da corrente de soldagem (Fig. 5b). Nestes gráficos, a resistência média durante os períodos de curto-circuito (R_{cc}) foi calculada considerando os valores de resistência inferiores a 0,05 Ω . A

resistência de curto-circuito foi usada para estimar a resistência elétrica do eletrodo do eletrodo (R_a) através da Equação 11, que considera a gota preza na ponta do arame como parte do eletrodo (Fig.6).

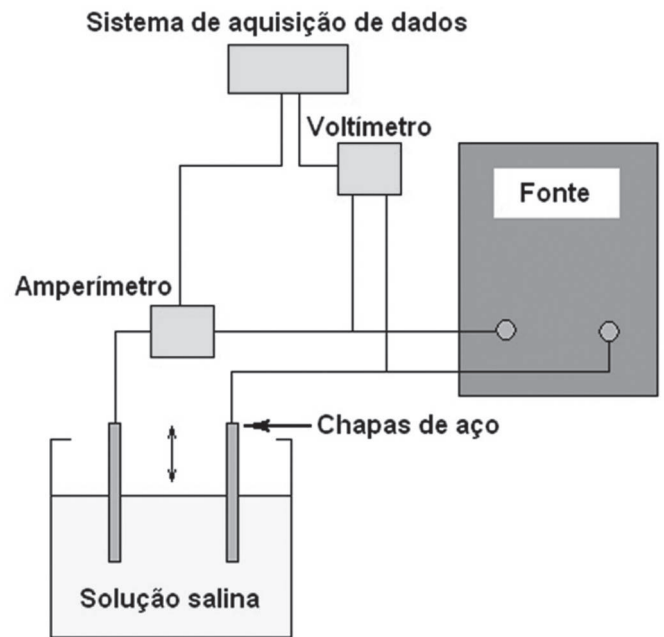


Figura 4 - Desenho esquemático do aparato para a determinação das curvas características da fonte.

$$R_a = R_c - (R_p + R_b) \quad (11)$$

Em que R_a é a resistência elétrica do eletrodo [Ω], R_{cc} é a resistência elétrica medida durante os períodos de curto-circuito [Ω], R_p é a resistência parasita [Ω] e R_b é a resistência de contato entre o arame e o bico de contato [Ω]. Com o valor médio de resistência elétrica do eletrodo, calcula-se a sua resistividade elétrica média com a Equação 12.

$$\rho = \frac{R_a A}{S} \quad (12)$$

Em que A é a área da seção transversal [mm²] e S é o comprimento do eletrodo [mm],

Para determinar experimentalmente os valores dos coeficientes α e β foi realizada uma série de testes de soldagem com transferência metálica por vôo livre, durante os quais os valores de comprimento de arco, corrente e tensão de soldagem e velocidade de alimentação foram monitorados, utilizando os equipamentos e procedimentos descritos no item 2.3. De posse dos valores de velocidade de alimentação (considerado $f = W$), comprimento do eletrodo e das correntes média e eficaz, os valores dos coeficientes alfa e beta foram, então, obtidos ajustando estes dados por regressão linear à Equação 13 com o programa MINITAB.

$$w = \alpha I + \beta S I_{eficaz}^2 \quad (13)$$

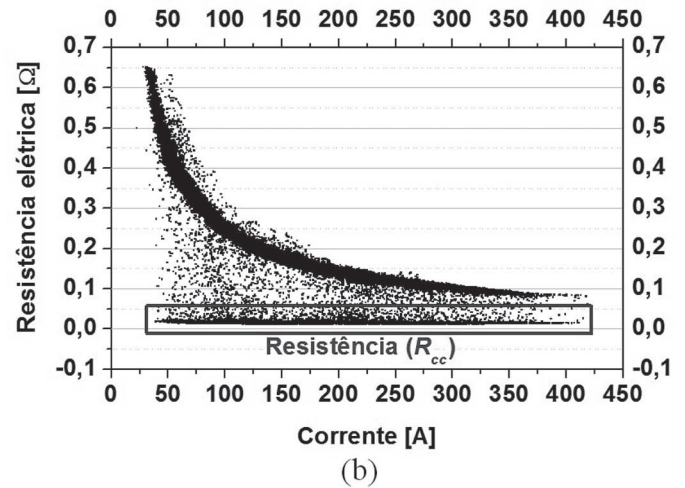
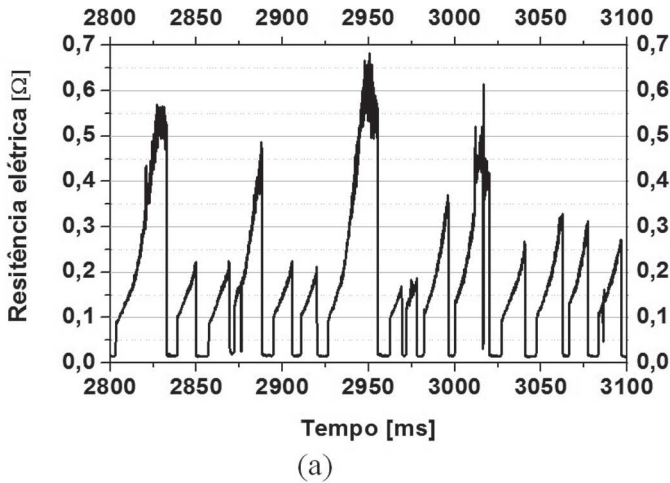


Figura 5 - (a) Exemplo de oscilograma de resistência elétrica durante a transferência metálica por curtos-circuitos, gás de proteção Ar-25%CO₂, (b) desenho esquemático da obtenção da resistência elétrica durante os períodos de curto-circuito.

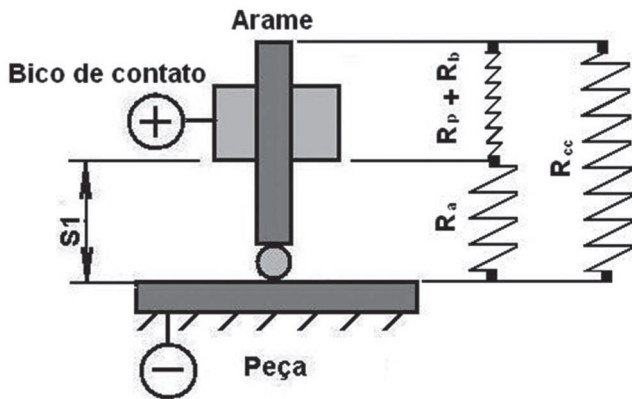


Figura 6 - Desenho esquemático das resistências elétricas verificadas durante o curto-circuito.

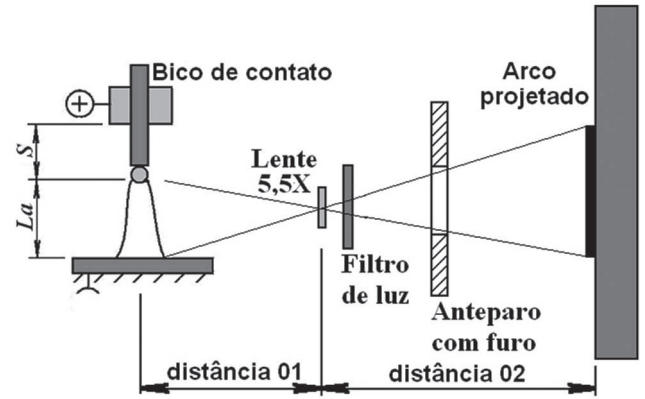


Figura 7 - Desenho esquemático do procedimento para medição do comprimento de arco elétrico.

3.2. Validação do modelo

Testes de soldagem foram realizados em corpos-de-prova de aço baixo de carbono (16x30x500 mm), com proteção gasosa de Ar-2%O₂ e arame de aço carbono (AWS ER70S6) de 1,2 mm de diâmetro. Utilizou-se, nestes testes, uma fonte de tensão constante convencional (VI400 da White Martins) e um sistema mecanizado que permite o deslocamento da peça com uma velocidade definida enquanto a tocha permanece fixa.

Os parâmetros elétricos de soldagem foram monitorados durante os experimentos com um sistema digital de aquisição de dados ligado a sensor de corrente por efeito Hall e a um divisor de tensão (para a monitoração da corrente de soldagem. A aquisição de dados e posterior análise destes foram feitas com o programa SINAL. A velocidade de alimentação do arame durante os testes foi monitorada com um equipamento específico (MVA – 1 da IMC Soldagem). O comprimento do arco elétrico foi medido em uma projeção de sua imagem com o auxílio de uma lente (ampliação de 5,5 vezes) e um filtro (Nº 10) para redução de sua intensidade (Figura 7).

Como relatado no item 2.1, o modelo matemático consiste, basicamente, na resolução das Equações 3, 7 e 8. Com esta finalidade, construiu-se uma planilha eletrônica utilizando os recursos do Microsoft Office Excel 2007, que, dentre outras coisas, após a inserção de dados de entrada (velocidade de alimentação (" f "), distância entre o bico de contato e a peça (" h "), diâmetro do arame; tensão em vazio (U_0), etc) possibilita a resolução dessas equações pelo método das aproximações sucessivas ou método de iteração linear (utilizou-se 10 iterações, o que possibilita a convergência dos resultados). As Tabelas 1 e 4 mostram os valores de alguns dos parâmetros de entrada usados.

A validação do modelo foi realizada comparando dados obtidos em testes experimentais com dados simulados (valores médios de corrente, tensão e comprimento de arco). Para obtenção dos dados experimentais foram definidos e realizados dois grupos de testes distintos, que serão descritos a seguir:

(01) No primeiro grupo, foram utilizados quatro diferentes valores de velocidade de alimentação (Tab. 2) mantendo-se os valores de vazão de gás de proteção (17 L/min - Ar-2%O₂), distância entre o bico de contato e a peça (18 mm),

Tabela 1 - Parâmetros de entrada utilizados na Equação 7.

Dados	Valor/unidade	Observações
Resistência parasita - R_p	0,0015 W	Literatura
Resistência entre bico e arame-eletrodo - R_b	0,0015 W	Literatura

Tabela 2 - Parâmetros de soldagem para validação do modelo estático, transferência globular.

Parâmetros	Condição 01	Condição 02	Condição 03	Condição 04
" f " [m/min]	4,5	5,0	5,5	6,0
Velocidade de soldagem [cm/min]	25,0	28,0	31,0	34,0

Tabela 3 - Parâmetros de soldagem para validação do modelo estático, transferência spray.

Parâmetros	Condição 01	Condição 02	Condição 03	Condição 04
" f " [m/min]	7,0	8,0	9,0	10,0
Velocidade de soldagem [cm/min]	40,0	45,0	50,0	55,0

Tabela 4 - Parâmetros de entrada utilizados na Equação 7, obtidos a partir dos procedimentos relatados no item 2.1.

Dados	Valor/unidade	Observações
Queda de tensão anódica e catódica - U_{ac}	20 V	Valor experimental
Campo elétrico do arco - E	0,7 V/mm	Valor experimental
Slope da fonte - M	0,039 V/A	Valor experimental
Resistividade do arame-eletrodo - ρ_a	1000 $\mu\Omega$ mm	Valor experimental
Coefficiente alfa - α	0,305 mm/sA	Valor experimental
Coefficiente beta - β	$6,6 \times 10^{-5}$ 1/sA ²	Valor experimental

Tabela 5 - Resistividade do arame-eletrodo (aço carbono), diferentes autores.

Autores	Resistividade [$\mu\Omega$.mm]	Observação
Choi <i>et al.</i> [30]	Não utilizado	Valor fixo para resistência do arame-eletrodo (0,001 Ω).
Terasaki e Simpson [31]	Não utilizado	Valor fixo para resistência do arame-eletrodo (0,001 Ω).
Xu e Simpson [29]	940	Valor fixo.

Tabela 6 - Coeficientes " α " e " β ", diferentes autores.

Diâmetro do arame [mm]	Coefficiente α [mm/s.A]	Coefficiente β [1/s.A ²]	Fonte
1,2	0,28	$8,1 \times 10^{-5}$	Lesnewich [38]
1,2	0,23	8×10^{-5}	Halmoy [39]
1,2	0,28 - 0,31	$6,6 \times 10^{-5}$ - $7,11 \times 10^{-5}$	Waszink <i>et al.</i> [40]
1,2	0,310	$4,78 \times 10^{-5}$	Fujimura <i>et al.</i> [41]
1,2 (Globular)	0,2940	$4,6081 \times 10^{-5}$	Choi, B., <i>et al.</i> [30]
1,2 (spray)	0,2383	$4,6 \times 10^{-5}$	Choi, B., <i>et al.</i> [30]

tensão em vazio (37 V) e indutância (180 $\mu\text{Vs/A}$) constantes. Esses parâmetros visavam obter em todos os testes o modo de transferência metálica globular.

(02) No segundo grupo, foram utilizados quatro diferentes valores de velocidade de alimentação (Tab. 3) mantendo-se, também, os valores de vazão de gás de proteção (17 L/min - Ar-2%O₂), distância entre o bico de contato e a peça (18 mm), tensão em vazio (41 V) e indutância (180 $\mu\text{V.s/A}$) constantes. Esses parâmetros visavam obter em todos os testes o modo de transferência metálica *spray*.

Para cada condição de soldagem foram realizados cinco experimentos no intuito de minimizar a influência de erros aleatórios e possibilitar o cálculo da incerteza dos resultados experimentais para uma probabilidade de 95%.

Na tentativa de minimizar a variação na altura do cordão de solda entre os testes, o que poderia influenciar no procedimento de medição do comprimento de arco, foram utilizados diferentes valores de velocidade de soldagem, como pode ser observado nas Tabelas 2 e 3.

4. Resultados e Discussão

4.1 Dados de Entrada Para o Modelo

A Tabela 4 exibe os resultados obtidos (dados de entrada para a resolução da Equação 7) a partir dos procedimentos relatados no item 2.2.

Scotti e Ponomarev [3] afirmam que para fontes convencionais, ditas de tensão constante, o valor do *slope* deve ser menor que 70 mV/A. Choi B., *et al.* [30] utilizaram no seu trabalhos 5mV/A, para representar o *slope* da fonte. Portanto, de acordo com esses autores o valor encontrado (39 mV/A) é coerente (em termos de sua ordem de grandeza) para a fonte analisada.

Para exemplificar o que vem sendo adotado por outros autores em relação ao valor da resistência do arame-eletrodo (aço carbono) nos procedimentos de simulação numérica do

processo GMAW a Tabela 5 exibe alguns procedimentos ou valor de resistividade.

A Tabela 6 mostra valores experimentais de “ α ” e “ β ” encontrados na literatura para arames de aço carbono no processo GMAW. Percebe-se, novamente, que o valor encontrado é coerente (em termos de sua ordem de grandeza) com dados da literatura.

4.2. Validação do Modelo

A Figura 8 possibilita comparar os valores médios de corrente de soldagem experimentais com os simulados em função da velocidade de alimentação, com o processo operando em transferência metálica globular e *spray*, respectivamente (os parâmetros de soldagem estão descrito no item 2.3).

Nos dois casos, como esperado, a corrente média de soldagem aumentou com o aumento da velocidade de alimentação, o que possibilitou manter o equilíbrio dessa variável com a velocidade de fusão do arame-eletrodo. Observa-se que os valores experimentais e os obtidos por simulação (de corrente média) relacionam-se com a velocidade de alimentação de forma similar.

Percebe-se na Figura 8a que os valores de corrente obtidos por simulação apresentam pequena diferença em relação aos dados experimentais, exibindo valores inferiores a estes. Contudo, a diferença média entre os valores experimentais e simulados é de 6,2% e a diferença máxima é de 7,8%, o que representa valores próximos a 10 A.

Observando a Figura 8b, transferência *spray*, verifica-se que os valores simulados, novamente, exibem pequena diferença em relação aos experimentais, exibindo valores inferiores a estes. A diferença média entre os valores foi de 5,1% e a diferença máxima de 6,8%, o que representa valores próximos a 10 A.

A Figura 9 exibe os valores de tensão experimentais e simulados em função da velocidade de alimentação. Como esperado, a tensão referente aos dados experimentais diminuiu com o aumento da velocidade de alimentação e a mesma

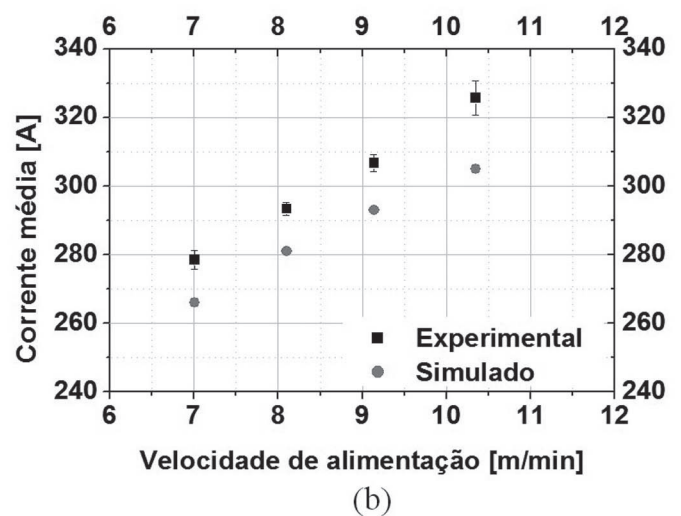
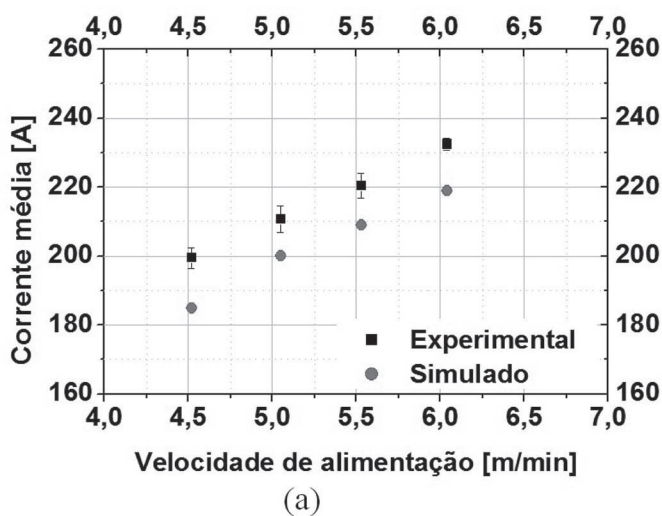


Figura 8 - Valores médios de corrente, simulados e experimentais, em função da velocidade de alimentação: (a) transferência globular e (b) *spray*.

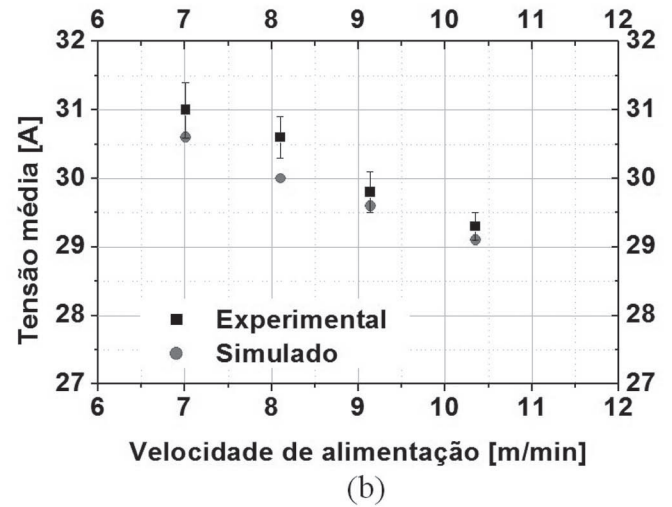
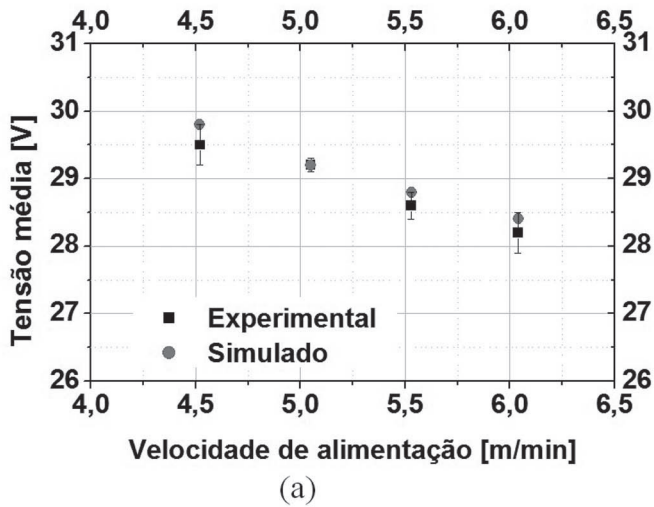


Figura 9 - Valores médios de tensão, simulados e experimentais, em função da velocidade de alimentação: (a) transferência globular e (b) *spray*.

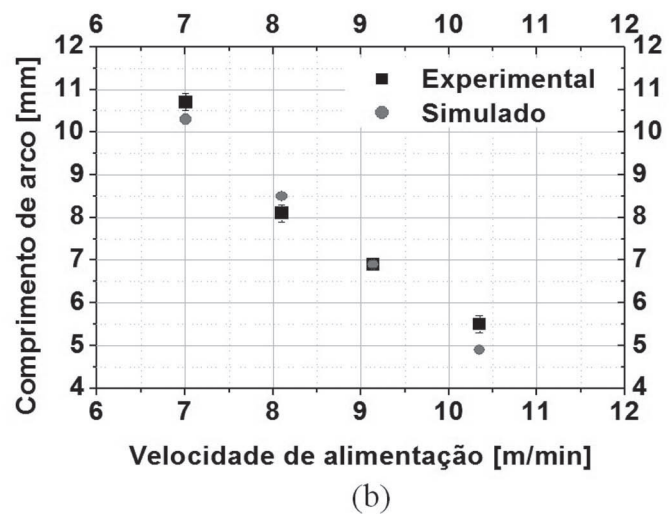
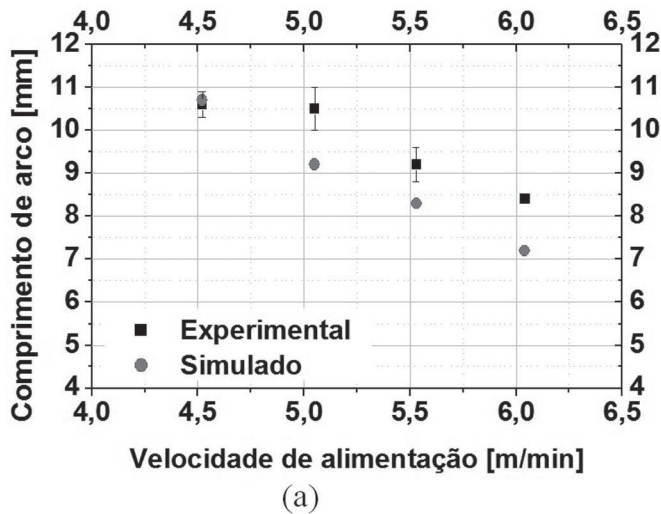


Figura 10 - Valores de comprimento de arco, simulados e experimentais em função da velocidade de alimentação: (a) transferência globular e (b) *spray*.

tendência é reproduzida pelos dados obtidos pela simulação.

Percebe-se que os valores de tensão obtidos por simulação estão muito próximos aos obtidos experimentalmente. A diferença média entre os valores experimentais e simulados, com o processo operando com transferência globular, é de 0,7%, e a diferença máxima é de 1,1%, o que representa valores próximos a 0,5 V (Fig. 9 a). Na situação com transferência *spray*, a diferença média entre os valores experimentais e simulados é de 1,1%, e a diferença máxima é de 1,9%, o que representa valores, novamente, próximos à 0,5 V (Fig. 9b).

Os resultados apresentados no trabalho de Choi et al. [30], referentes à transferência globular, revelam, para uma única situação específica de soldagem, uma diferença entre os valores experimentais e simulados de corrente média de aproximadamente 3,2% (7 A) e 4% na tensão média (1 V). Em relação a transferência por *spray* os resultados apresentam

uma diferença de aproximadamente 1%, na corrente média (3,5 A), e 7,3%, na tensão média (2,4 V). Já no trabalho de Xu et al. [29], para os resultados referentes à transferência por *spray*, percebe-se uma diferença nos valores de tensão média de aproximadamente 1 V. Analisando esses dados, verifica-se que as diferenças encontradas entre os valores de corrente e tensão experimentais e simulados, mesmo aplicando o modelo aqui apresentado em uma ampla faixa de velocidades de alimentação, são semelhantes àquelas obtidas nos trabalhos apresentados por estes autores.

A Figura 10 exhibe as relações obtidas entre os valores de comprimento de arco experimentais e simulados em função da velocidade de alimentação, em transferência metálica globular e *spray*, respectivamente.

Pode-se observar que os valores de comprimento do arco, tanto os experimentais quanto os simulados, tendem a reduzir

com o aumento da velocidade de alimentação, o que é a tendência esperada. Para os testes com transferência globular (Fig. 10a), a diferença média entre os valores experimentais e simulados é de 10,5% e a diferença máxima é de 17,0%, o que representa valores inferiores a 1,5 mm. Em parte, essa diferença pode ser compreendida considerando que o comprimento do arco é, entre os parâmetros usados para caracterizar o processo, aquele de maior dificuldade para ser medido. Esta dificuldade é ainda maior com processo operando em transferência globular, pois nesta circunstância ocorrem variações mais acentuadas no comprimento e forma do arco elétrico.

Para os testes com transferência *spray* (Fig. 10b), a diferença média entre os valores experimentais e simulados é de 2,7%, e a diferença máxima é de 4,0%. Observando ponto a ponto, percebe-se que a diferença entre os valores são menores do que na condição anterior, globular. Um dos motivos pode ser a menor dificuldade para se medir esse parâmetro nesta circunstância, pois há menos oscilações e como observado por Choi *et al.* [30] o efeito da gota de metal fundido na ponta do arame parece ser desprezível nesta circunstância, devido ao pequeno tamanho da gota e a alta frequência de destacamento.

Diante dos resultados, concluiu-se que o modelo estático (que necessita de poucos recursos computacionais e apresenta baixíssimo tempo de processamento), mesmo com todas as limitações e simplificações, apresenta resultados relativamente bons em relação a dados apresentados na literatura (Xu *et al.* [29] e Choi *et al.*[30]) quando aplicado em situações com transferência metálica globular e *spray*.

5. Conclusões

Os resultados do presente trabalho permitiram concluir que:

- A comparação entre os dados obtidos referentes às situações em que se verifica transferência metálica globular e por *spray* permite inferir que o fato do modelo não incorporar a gota (metal líquido) e seu comportamento na ponta do arame-eletrodo não influenciou negativamente os valores dos dados simulados.
- Os resultados sugerem que o modelo proposto, de maneira geral, esta bem fundamentado e que os dados simulados possibilitam a previsão de características importantes do processo GMAW (diferença entre os valores simulados e experimentais de aproximada de 7% nos valores de corrente (10 A) e tensão (1 V) e de 1 mm no comprimento de arco). Portanto, acredita-se que este possa facilitar a operacionalização do processo e o melhor entendimento da influência de suas variáveis.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem a colaboração e sugestões dos Professores Alexandre Queiroz Bracarense e Eduardo José Lima II. 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.

7. Referências Bibliográficas

- [1] CARY, H. B.. Modern welding technology. 4 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998.780p.
- [2] ASM. Gas-metal arc welding. Welding Handbook. 2.ed., v.6, 1994. p. 569-581.
- [3] SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.. Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho. São Paulo: Editora Artliber, 2008. 284p.
- [4] BINGUL, Z.; COOK, G. E.. A real time prediction model of electrode extension for GMAW. IEEE/ASME Transactions On Mechatronics, vol. 11, n. 1, February, p.47-54, 2006.
- [5] WAHAB, M. A.; PAINTER, M. J.. Numerical models of gas metal arc welds using experimentally determined weld pool shapes as the representation of the welding heat source. Int. J. Pres. Ves. &Piping, p. 153-159, may, 1997.
- [6] FAN, H. G.; KOVACEVIC, R.. Dynamic analysis of globular metal transfer in gas metal arc welding a comparison of numerical and experimental results. IOP Publishing Ltd., p. 2929-2941, 1998.
- [7] FAN, H. G.; KOVACEVIC, R.. Droplet formation, detachment, and impingement on the molten pool in Gas Metal Arc Welding. Metallurgical and Materials Transactions B, p. 791-801, 1999.
- [8] BHADESHIA, H. K. D. H..Complex weldment properties: trends in predictive power. 6th International Conference on Trends in Welding Research, ASM International, Atlanta, Georgia, USA, 2002.
- [9] BHADESHIA, H. K. D. H.; FRANCIS, J. A.; STONE, H. J.; KUNDU, S.; ROGGE, R. B.; WITHERS, P. J.; KARLSSON, L.. Transformation Plasticity in Steel Weld Metals. 10th International Aachen welding Conference, 22 à 25 October 2007.
- [10] WANG. Y.; TSAI, H. L.. Impingement of filler droplets and weld pool dynamics during gas metal arc welding process. International Journal of Heat and Mass Transfer 44, p. 2067-2080, 2001.
- [11] YAMAMOTO, T.; OHJI, F.; MIYASAKA, F.; TSUJI, Y.. Mathematical modeling of metal active gas arc welding. Science and Technology of Welding and Joining, p. 260- 264, 2002.
- [12] KIM, I. S.; SON, J. S.; PARK, C. E.; KIM, I. J.; KIM, H. H.. An investigation into an intelligent system for predicting bead geometry in GMA welding process. Journal of Materials Processing Technology, p. 113-118, 2005.
- [13] CHO, M. H.; LIM, Y. C.; FARSON, D. F.. Simulation of weld pool dynamics in the stationary pulsed gas metal arc welding process and final weld shape. Welding Research Supplement, p. 271-283, December, 2006.
- [14] ADOLFSSON S.; BAHRAMI, A.; BOLMSJO, G.; CLAESSION, I.. On-Line Quality Monitoring in short-Circuit Gas Metal Arc Welding. Welding Research Supplement, p.59-73, february,1999.
- [15] QUINN, T. P.; SMITH, C.; McCOWAN, C. N.; BLACHOWIAK, E.; MADIGAN, R. B.. Arc sensing for defect in constant-voltage gas metal ac welding. Welding Research supplement, p. 322-328, 1999.
- [16] WU, C. S.; POLTE, T.; REHFELDT, D.. A fuzzy logic

system for process monitoring and quality evaluation in GMAW. *Welding Research Supplement*, p. 33-38, February 2001.

[17] HUANCA CAYO, E., ABSI ALFARO, S. C. Detecção de perturbações em soldadura baseado em el monitoreo de la acústica aerotransportada del proceso MIG / MAG, *Soldagem & Inspeção*, 14 (2), p. 176-183, Abr./Jun. 2009.

[18] KIM, Y. S.; EAGAR, T. W.. Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding. *Welding Research Supplement*, p. 269-278, 1993.

[19] NENCHINSKY, V. A.. Size and shape of the liquid droplet at the molten tip of an arc electrode. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 27, p. 1433 - 1442, 1994.

[20] HAIDAR, J.; LOWKE J. J.. Predictions of metal droplet formation in arc welding. IOP Publishing Ltd, p. 2951-2960, 1996.

[21] HAIDAR, J.. An analysis of the formation of metal droplets in arc welding. IOP Publishing Ltd, p. 1233-1244, 1998(a).

[22] HAIDAR, J.; LOWKE J. J.. Predictions of metal droplet formation in gas metal arc welding II. *Journal Of Applied Physics*. v. 84, p. 3530-3540, October 1998(b).

[23] CHOI, S K.; YOO, C. D.; KIM Y. S.. Dimensional analysis of metal transfer in GMA welding. IOP Publishing Ltd, p. 326-334, 1999.

[24] MURRAY P. E.. Selecting parameters for GMAW using dimensional analysis. *Welding Journal*, p. 125-131, 2002.

[25] SUBAN, M.; TUSEK, J.. Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used. *Journal of Materials Processing Technology*, p. 185-192, 2001.

[26] MODENESI, P. J.; REIS, R. I.. A model for melting rate phenomena in GMA welding. *Journal of Materials Processing Technology*, p. 199-205, 2007.

[27] KIM, Y. S.; MCELIGOT D. M.; EAGAR T. W.. Analyses of electrode heat transfer in gas metal arc welding. *Welding Research Supplement*, p. 20-31, 1991.

[28] REDDING, C. J.. Fume model for gas metal arc welding. *Welding Journal*, p. 95-103, 2002.

[29] XU, P.; RADOS, M.; SIMPSON, S. W.. Circuit simulation for gas metal arc welding. *Science and Technology of welding and Joining*, p. 341-346, 1999.

[30] CHOI, B. J. H.; LEE, J. Y.; YOO, C. D.. Simulation of dynamic behavior in a GMAW system. *Welding Journal*, p. 239-245, October, 2001.

[31] TERASAKI, H.; SIMPSON, S. W.. Circuit simulation for gas metal arc welding system. *The 47th International Midwest Symposium on Circuits and System*, University of Sydney, p. 387-390, 2006.

[32] LANCASTER, J. F.. The physics of welding. *Phys. Technol.* v.15, p. 73 - 89, 1984.

[33] BINGUL, Z.; COOK, G. E.. A real time prediction model of electrode extension for GMAW. *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, vol. 11, n. 1, February, p.47-54, 2006.

[34] JILUAN P.. *Arc welding control*. 1. ed. Cambridge England: Woodhead Publishing Limited, 2003. 603p.

[35] LESNEWICH, A.. Control of melting rate and metal transfer. parts I & II. *Welding Journal*, p. 343-353 e 418-425, 1958.

[36] FUJIMURA, H; IDE, E.; INOUE H.. Estimation of contact

tip-workpiece distance in gas shielded metal arc welding. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, p. 311-316, 1988.

[37] PONOMAREV, V., et al.. Arc welding process statistical analysis. Methodical approaches, analysis conceptions, experiences. *The International Conference on the Joining of Materials*; Helsing/or; Denmark; 12-14 May 1997. p. 456-461, 1997.

[38] MODENESI, P. J., COSTA, M. C. M. S., SANTANA, I. J., BERGANHOLI, J. P. P. Estudo de alguns parâmetros básicos da soldagem GMAW com transferência por curto-circuito, *Soldagem & Inspeção*, 16 (1), p. 12-21, Jan./Mar. 2011.

[39] HALMOY, E.. Wire melting rate, droplet temperature, and effective anode melting potential. *Arc Physics and Weld Pool Behavior Intl. Conf.* London. UK, May, 1979.

[40] WASZINK, J. H.; VAN DEN HEUVEL, G. J. P. M.. Heat generation and heat flow in filler metal in GMAW. *Welding Journal*, vol.61, p. 269-282, November, 1982.

[41] FUJIMURA, H; IDE, E.; INOUE H.. Estimation of contact tip-workpiece distance in gas shielded metal arc welding. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, p. 311-316, 1988.