

# METODOLOGIA PARA ANÁLISE CINEMÁTICA DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO MIG/MAG

**Carlos Eduardo Aguiar Lima Rodrigues**

LAPROSOLDA/UFU, Campus Santa Mônica, Av João Naves S/N, Bloco 1O  
ceduardo@mecanica.ufu.br

**Temístocles de Sousa Luz**

LAPROSOLDA/UFU, Campus Santa Mônica, Av João Naves S/N, Bloco 1O,  
tsluz@mecanica.ufu.br

**Américo Scotti**

LAPROSOLDA/UFU, Campus Santa Mônica, Av João Naves S/N, Bloco 1O;  
ascotti@mecanica.ufu.br

**Resumo:** O presente estudo visa avaliar uma ferramenta digital de análises de imagens, o Optimas MA®, para o melhor conhecimento e entendimento do processo de soldagem MIG/MAG. Muitos esforços têm sido feitos para ampliar o conhecimento dos modos de transferência metálica neste processo de soldagem. Diversos institutos no exterior publicaram modelos e simulações de diversos modos de transferência metálica, sobretudo da transferência gótica, que têm permitido um grande avanço na soldagem, com diversos melhoramentos nos processos. Contudo, devido à dificuldade de retratar fielmente alguns fenômenos conhecidos, e ao não conhecimento prático de algumas características desse modo de transferência, como a aceleração das gotas durante a transferência, esses modelos precisam de diversas simplificações para ser viabilizados. Isto enfatiza a importância da análise experimental da transferência metálica. Então, neste estudo preliminar, procurou-se avaliar a influência do comprimento do arco de soldagem sobre os aspectos cinemáticos da transferência metálica gótica. Para tanto, foram feitas filmagens em câmera de alta velocidade, e utilizando-se a ferramenta Optimas MA® levantou-se curvas temporais da posição da gota, através das quais mediu-se a velocidade de chegada da gota à poça de fusão e a aceleração média da gota em todo o percurso. Os resultados mostraram que a ferramenta citada é adequada à esta avaliação, e que, nas condições dadas, o comprimento do arco influenciou a velocidade de chegada da gota na poça de fusão.

**Palavras-chave:** MIG/MAG, Transferência metálica, Análise de imagens.

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem MIG/MAG usa um arame-eletrodo de metal consumível, alimentado continuamente em direção à poça de fusão, que, ao conduzir a corrente de soldagem, se funde devido ao calor gerado na conexão do arco elétrico com sua ponta, e, em menor intensidade, ao calor por efeito Joule ao longo do seu comprimento energizado. A transferência metálica do eletrodo para a peça de trabalho neste processo de soldagem vem sendo muito estudada por diversos pesquisadores, e os resultados desses estudos já podem ser vistos nos equipamentos mais modernos, bem como em novas técnicas de monitoramento já disponibilizadas em escala industrial.

Dando continuidade à ampliação e ao aprofundamento do estudo da transferência metálica, o Laprosolda/UFU vem lançando novas ferramentas (Miranda, 2003), aprimorando outras (Vilarinho et al, 2000) e aproveitando outras, como é o caso do Optimas MA 1.4. O objetivo geral dessas iniciativas, que vem sendo alcançado com relativo êxito, é a maior compreensão dos mecanismos de transferência metálica, bem como do comportamento dos elementos envolvidos, para aprimorar os equipamentos existentes e também desenvolver equipamentos de soldagem inéditos.

O programa Optimas MA 1.4 é um conjunto de instruções (macro) que utiliza as funções do programa Optimas 6.2 para analisar uma seqüência de imagens, determinando parâmetros como distância, velocidades e aceleração de determinados pontos, regiões ou retas de interesse.

Nesse estudo preliminar, procurou-se, em algumas situações de soldagem, utilizar o Optimas MA 1.4 para medir as características cinéticas das gotas em transferência, como a aceleração durante a transferência, a velocidade de chegada, e a aceleração de chegada da gota à poça de fusão. Assim sendo, avaliou-se tanto a ferramenta Optimas MA 1.4, como o efeito do comprimento do arco de soldagem sobre as características medidas.

## 2. METODOLOGIA

Na determinação do procedimento experimental, partiu-se do princípio de mudar o menor número de variáveis possível. Assim, procurou-se encontrar parâmetros que permitissem comprimentos de arcos diferentes, com a mesma corrente de soldagem, para então medir as características cinéticas das gotas em transferência, pelo uso do Optimas MA 1.4.

### 2.1. Determinação dos parâmetros de soldagem

Utilizando-se uma fonte de soldagem eletrônica, arame de aço da classe AWS ER70S-6 Ø1,0 mm, gás de proteção Ar + 5%O<sub>2</sub>, e chapas de teste de aço baixo-carbono, procurou-se variar a tensão de soldagem ( $U_{REF}$ ) mantendo a corrente de soldagem ( $I_{MED}$ ) constante. Para chegar a esse objetivo, pode-se variar a  $U_{REF}$  e ajustar a corrente pela distância-bico-de-contato-peça (DBCP) ou pela velocidade de alimentação do arame ( $V_A$ ). Um exemplo dessa adequação é mostrado na Fig. (1). Utilizando-se uma fonte de soldagem do tipo tensão constante, ao se aumentar a característica estática da fonte (CEF) de CEF<sub>1</sub> para CEF<sub>2</sub>, a tensão de soldagem vai de  $U_1$  para  $U_2$  e a corrente de soldagem vai de  $I_1$  para  $I_2$ , ou seja, o ponto de trabalho passa de A ( $I_1, U_1$ ) para B ( $I_2, U_2$ ). Caso haja interesse em manter a mesma corrente de soldagem, ou seja, que o ponto de trabalho seja o ponto C ( $I_1, U_2$ ) essa adequação pode ser feita de duas maneiras: reduzindo-se  $V_A$  ou aumentando-se a DBCP.

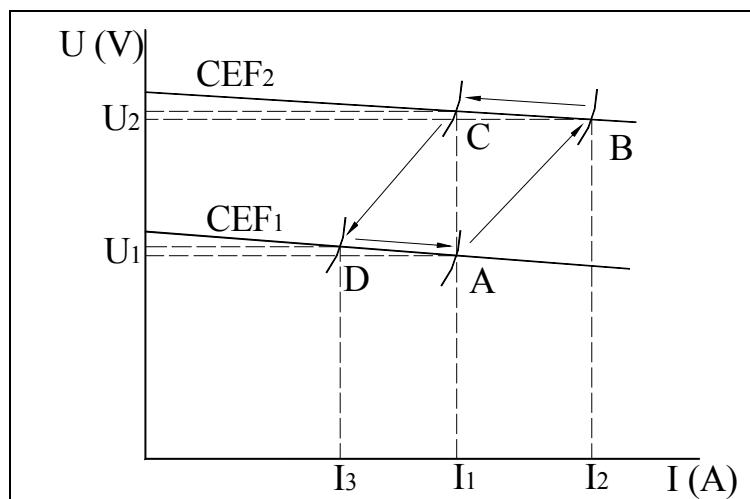


Figura 1. Exemplo de adequação dos parâmetros de soldagem.

A adequação dos valores de corrente através do aumento da velocidade de alimentação ( $V_A$ ) ou da DBCP é justificada analiticamente pela equação do consumo do arame-eletrodo na soldagem MIG/MAG (Eq. (01)).

$$C = \alpha I + \beta \rho \frac{\ell}{A} I^2 \quad (01)$$

Onde “C” é o consumo, “I” é a intensidade de corrente, “ $\rho$ ” é a resistividade elétrica do arame, “ $\ell$ ” é o comprimento energizado de arame, “A” é a área da seção transversal do arame, e “ $\alpha$ ” e “ $\beta$ ” são constantes dependentes dos consumíveis e do processo, como o gás de proteção e os materiais do eletrodo e da peça de trabalho. Então ao se aumentar a tensão de soldagem ( $U_{REF}$ ), há uma redução do comprimento “ $\ell$ ” de arame energizado, como visto na mudança de A para B na Fig. (2). Para uma mesma velocidade de alimentação, ou seja, um mesmo consumo, isso demanda uma corrente de soldagem (I) maior, devido à redução do aproveitamento do efeito Joule para fusão do arame. Assim, para manter a mesma corrente da situação A, reduz-se  $V_A$ , reduzindo-se também o consumo de eletrodo. Uma outra alternativa é, partindo do mesmo princípio, repor a redução do comprimento “ $\ell$ ” de eletrodo energizado através do aumento da distância-bico-de-contato-peça (DBCP), como mostrado na mudança de B para C na Fig. (2). A Figura (2) caracteriza exatamente a mudança dos pontos de trabalho na Fig. (1) utilizando-se o aumento da DBCP para adequar o valor da corrente de soldagem com um comprimento de arco maior. Como não é fixa a proporção direta entre  $U_{REF}$  e o comprimento do arco de soldagem, são realizados vários testes para a determinação da DBCP ou da nova  $V_A$  que propiciará a ocorrência do ponto de trabalho C.

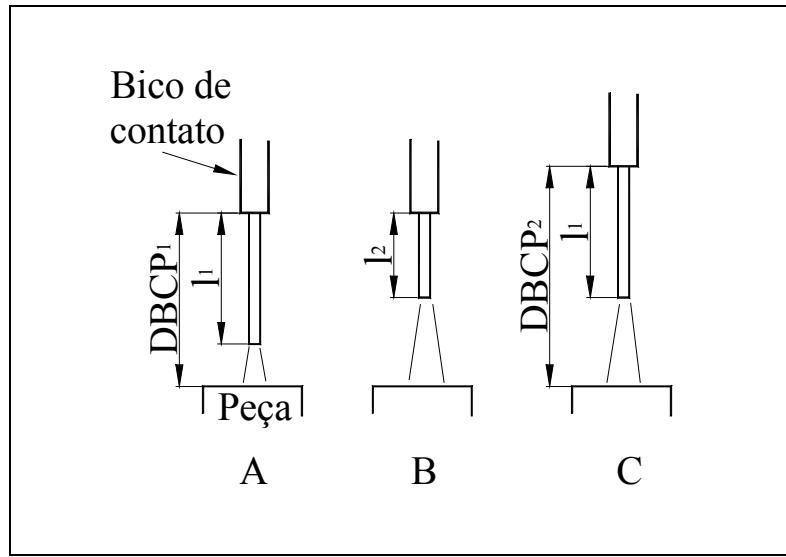


Figura 2. Visualização prática da adequação do valor da corrente de soldagem pela DBCP.

## 2.2. Filmagem em alta velocidade das condições determinadas

Determinados os parâmetros de soldagem a serem estudados, utilizou-se um canhão laser, um sistema óptico e uma câmera para filmagens em alta velocidade, para a realização de filmagens pela técnica da shadowgrafía (Vilarinho et al, 2000). O sistema citado é mostrado na Fig. (3).

## 2.3. Medição das características cinemáticas das gotas em transferência

O Optimas MA 1.4 é um programa de análises de imagens com recursos para análise cinemática de elementos nas imagens que são determinados pelo usuário. Sua destinação primária é a análise de “crash-tests” para o meio automobilístico, porém, percebeu-se diversas possíveis aplicações do

mesmo, uma delas na análise das filmagens em alta velocidade da transferência metálica.

Sua utilização baseada na localização de “alvos” numa seqüência de imagens TIF, como mostrado na Fig. (4), com posterior cálculo das propriedades cinemáticas pelo programa. O programa se limita à localização de, no máximo, 3 “alvos” por vez. Os dados fornecidos pelo programa são salvos em tabelas que podem ser tratadas em planilhas eletrônicas comerciais.

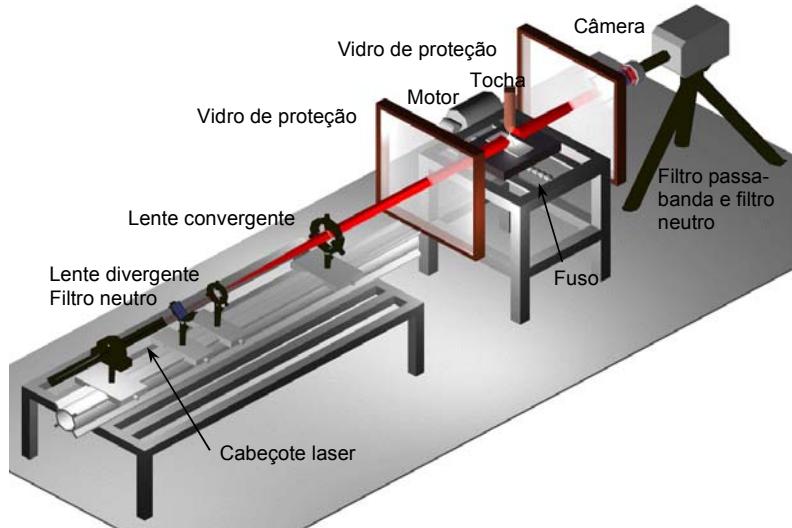


Figura 3. Técnica de filmagem Shadowgrafía. (Vilarinho, 2000)

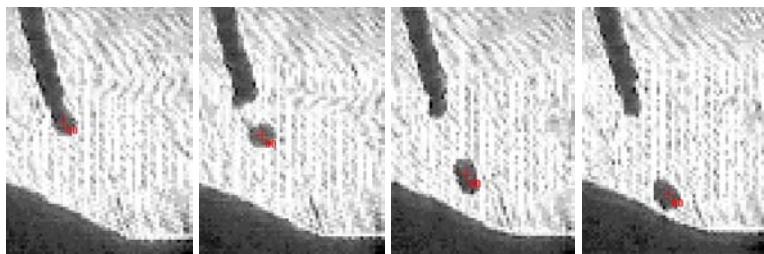


Figura 4. Seqüência de localização de alvos nas imagens de transferência metálica.

De posse das tabelas fornecidas pelo programa, são geradas as curvas do tipo posição versus tempo, como a mostrada na Fig. (5). Naturalmente, o coeficiente angular da primeira derivada da equação  $x(t)$  mostrada representa a aceleração média da gota em transferência. Os últimos pontos são utilizados para a determinação da velocidade de chegada e da aceleração de chegada da gota à poça de fusão.

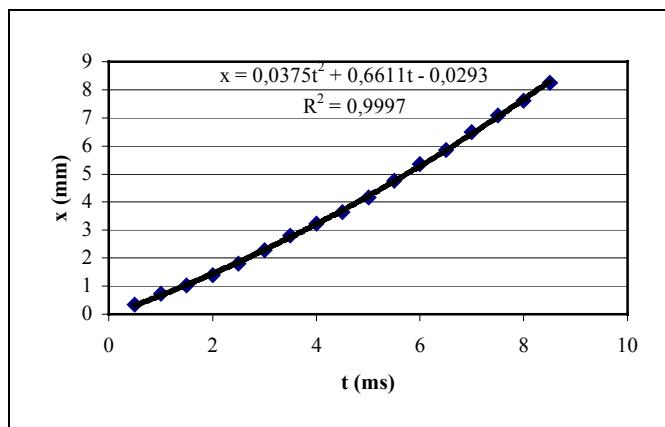


Figura 5. Curva posição versus tempo de uma gota em transferência.

### 3. RESULTADOS OBTIDOS

A Tabela (1) apresenta os parâmetros de soldagem obtidos nos ensaios a serem analisados. A Figura (6) mostra um apanhado de nove gotas em um dos ensaios realizados, sendo três no início do ensaio, três no meio e três no final. Observa-se, pela Fig. (6) que o comportamento das gotas é bastante semelhante, independente da posição no ensaio.

A análise estatística dos experimentos foi feita com base no teste de hipóteses pela distribuição t de Student. Foram consideradas diferentes as médias que obtiveram nível de significância igual ou inferior a 5%. A Figura (7) mostra o maior e o menor comprimentos de arco utilizados. O efeito do comprimento do arco de soldagem sobre a velocidade de chegada da gota à poça de fusão ( $V_{CHEGADA}$ ) é mostrado na Fig. (8). Note-se que apenas esses experimentos não fornecem embasamento experimental suficiente para afirmar que a tensão de soldagem afeta, de uma maneira geral, a velocidade de chegada da gota à poça de fusão.

Tabela 1. Parâmetros de soldagem utilizados

Teste	$V_a$ (m/min)	$U_{ref}(V)$	$U_{med}$ (V)	I (A)	DBCP (mm)	Filme	Gás	$\emptyset$ (mm)	Vazão (l/min)
1	10	35	32,9	222		25	sc03698		
5 ( $V_a$ )	<b>12</b>	32	29,9	224		25	sc03701		
11 ( $V_a$ )	<b>10</b>	36	34,2	227		25	sc03702	Ar + 5%O <sub>2</sub>	1
12	10	37	35	225	<b>27,4</b>	sc03704			15
8	10	32	29,4	215	<b>20,8</b>	sc03705			

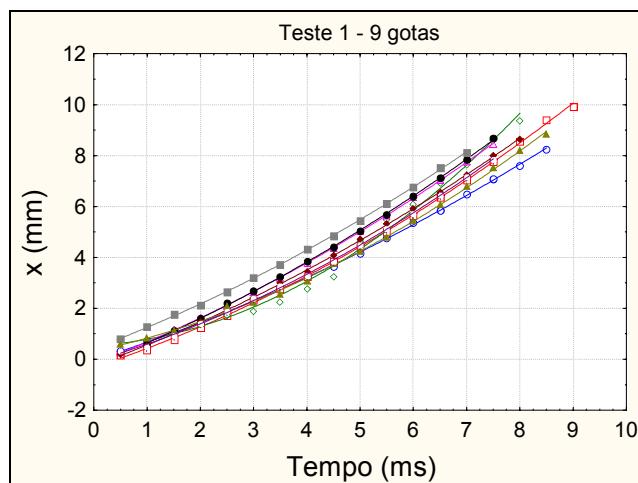


Figura 6. Sobreposição de nove curvas posição versus tempo correspondentes a nove gotas.

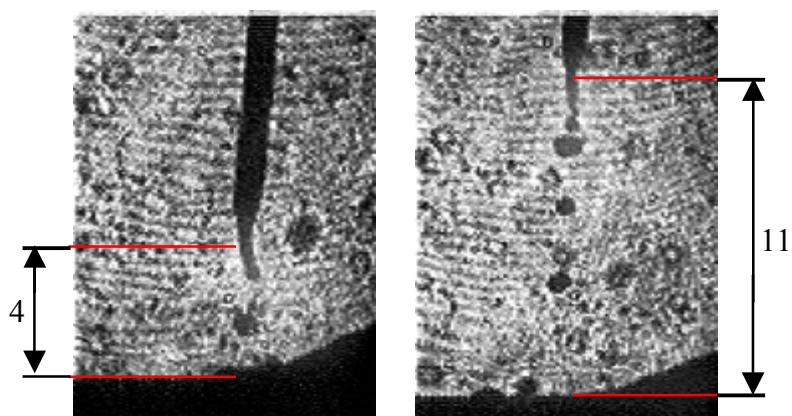


Figura 7. Comprimentos de arco (em mm) correspondentes à menor e à maior tensões utilizadas.

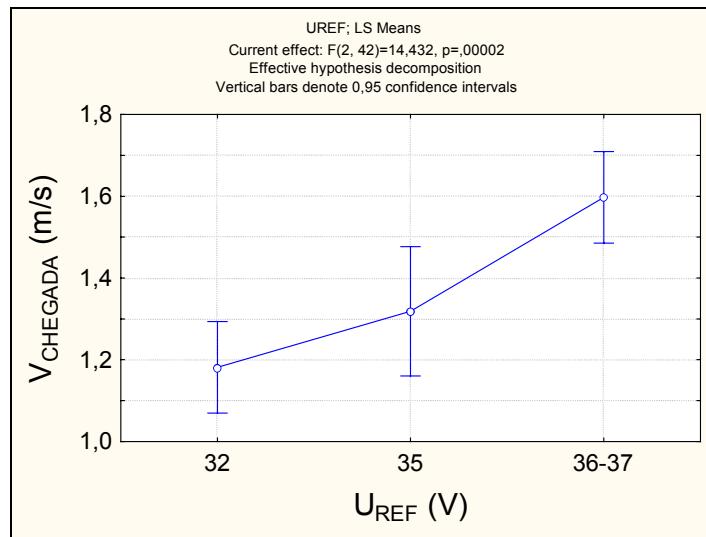


Figura 8. Efeito da tensão de soldagem sobre a velocidade de chegada da gota à poça de fusão.

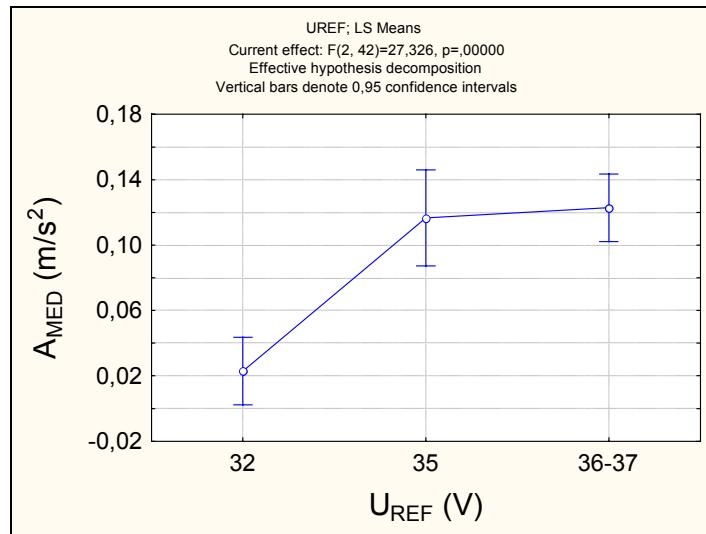


Figura 9. Efeito da tensão de soldagem sobre a aceleração média durante a transferência.

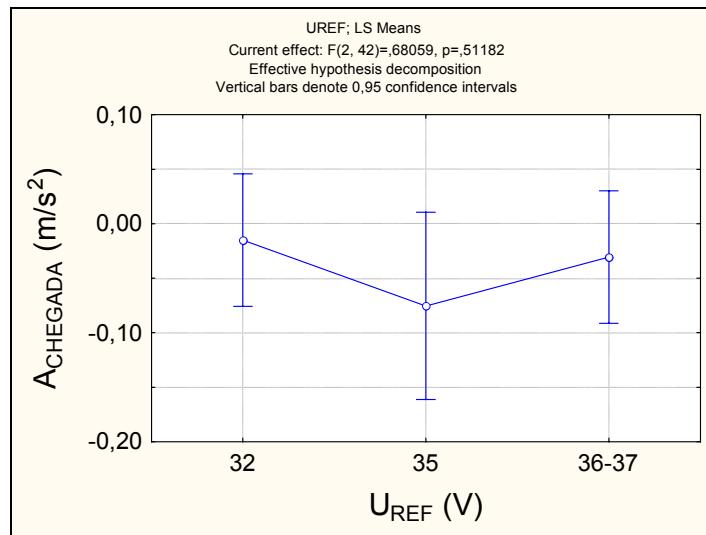


Figura 10. Efeito da tensão de soldagem sobre a aceleração de chegada à poça de fusão.

Para que se possa afirmar que a velocidade de chegada, a aceleração média das gotas durante a transferência e a aceleração de chegada da gota à poça de fusão são afetados ou não pelo comprimento do arco de soldagem, necessita-se avaliar as em outros níveis de corrente média. No entanto, com esses experimentos pode-se afirmar que a ferramenta utilizada é adequada a essa avaliação.

Nessas condições, pode-se observar que  $V_{CHE}$  (Fig. (8)) é afetada pela tensão (comprimento) do arco, o que poderia acarretar variações na penetração, devidas a mudanças no momentum das gotas, com conseqüente variação na capacidade das gotas de chegar até o fundo da poça, ajudando a mistura convectiva. Isso pode ser comprovado a partir de medições que serão feitas como continuidade deste estudo. Na Figura (9), a aceleração média apresenta uma tendência de saturação com o aumento do comprimento do arco. A Figura (10) mostra que a aceleração de chegada das gotas, apesar de não apresentar efeito significativo do aumento do comprimento do arco, tende a ser negativa. Isso pode ser atribuído à interferência de fluxos de vapores metálicos, porém esses experimentos são apenas um indício, e não uma comprovação desse fenômeno. No entanto, do ponto de vista experimental, considera-se eficiente a ferramenta utilizada no levantamento destes dados, o programa Optimas MA 1.4.

#### 4. CONCLUSÃO

Com base nas medições realizadas e no tratamento dos dados colhidos, conclui-se que:

- A ferramenta apresentada, o programa Optimas MA 1.4, é adequada à avaliação cinemática da transferência metálica.
- Os resultados dão indícios de que a velocidade de chegada da gota à poça de fusão e sua aceleração média durante a trajetória são afetados pelo comprimento do arco de soldagem.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a:

- Eng. Ruham Pablo Reis, por sua contribuição à pesquisa;
- Prof. Dr. Louriel Vilarinho, por sua contribuição à pesquisa;
- Laprosolda/UFU pela infraestrutura e equipamentos indispensáveis à pesquisa;
- CNPq, CAPES e FAPEMIG, pelo suporte financeiro.

#### 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Miranda, H. C. de; Ferraresi V. A. 2003 Identificação da Transferência Metálica na Soldagem MIG/MAG Pulsada de Aço Inoxidável a Partir de um Sensor Óptico Anais do II COBEF, CD-ROM.

Vilarinho, L. O., Bálsamo, P.S.S., Vilela, M. & Scotti, A.; 2000, Development of an Experimental Technique for Studying Metal Transfer in Welding: Synchronized Shadowgraphy, The Int. Journal for the Joining of Materials, vol 12, no. 1, The European Institute for Joining of Materials (JOM), Denmark, pp1-12.

# METHODOLOGY FOR ANALYSIS OF THE KINETIC BEHAVIOR IN MIG/MAG METAL TRANSFER

**Carlos Eduardo Aguiar Lima Rodrigues**

POSMEC/UFU/Laprosolda, Campus Santa Mônica, Av João Naves S/N, Bloco 1O  
ceduardo@mecanica.ufu.br

**Temístocles de Sousa Luz**

POSMEC/UFU/Laprosolda, Campus Santa Mônica, Av João Naves S/N, Bloco 1O  
tsluz@mecanica.ufu.br

**Américo Scotti**

UFU/Faculdade de Engenharia Mecânica/Laprosolda, Campus Santa Mônica, Av João Naves S/N, Bloco 1O;  
ascotti@mecanica.ufu.br

**Abstract:** This paper presents an evaluation of a digital analyzer software, the Optimas MA® for the better knowledge and comprehension of MIG/MAG welding process. Various researches have been made to expand the knowledge about metal transfer modes in this process. Several internationals institutes published models and simulations of some kinds of transfer modes, especially in the spray mode, and this have been allowed a great advance in welding processes. Although, due to the difficulty of recant faithfully some phenomena acquaintances, and the no practical knowledge of some characteristics of this transfer mode, like drop acceleration during the transference, these models needs many simplifications for its accomplishment. This put emphasis on the importance of the experimental analysis of the transfer modes. Then, on this first study, has been tried to evaluate the arc welding length influence on kinetic behavior of the spray transfer mode. Therefore, movies was made with a high-speed camera, and it was used the tool Optimas MA® to trace curves of the drop position versus time, which made possible the measure of drop arrived speed to weld pool and the average acceleration of the drop at the whole passage. The results showed the tool cited is adjusted to this evaluation, and that, on the given conditions, the arc length had influenced the drop arrived speed to the weld pool.

**Key-words:** GMAW, Transfer modes, Images analysis.