

# CINEMÁTICA DA GOTA EM TRANSFERÊNCIA NO PROCESSO MAG COM AÇO CARBONO: EFEITO DA CORRENTE E COMPRIMENTO DE ARCO

**Carlos Eduardo Aguiar Lima Rodrigues**

Universidade Federal de Uberlândia, LAPROSOLDA, 38400-902 – Uberlândia – MG – ceduardo@mecanica.ufu.br

**Américo Scotti**

Universidade Federal de Uberlândia, LAPROSOLDA, 38400-902 – Uberlândia – MG – ascotti@mecanica.ufu.br

***Resumo.** O objetivo deste trabalho foi quantificar e avaliar, à luz de modernas técnicas de observação e monitoramento, a influência da corrente e do comprimento do arco sobre aspectos cinemáticos da transferência metálica goticular na soldagem MIG/MAG. Para tanto, foram feitas filmagens em alta velocidade de arcos durante soldagens com eletrodo de aço carbono e proteção de Ar+5%O<sub>2</sub>. Utilizou-se três níveis de corrente e de comprimento de arco. Utilizando-se de ferramentas de análise de imagem, 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 tanto a corrente como o comprimento do arco influenciam significativamente os valores das características cinemáticas das gotas em transferência. O rigor experimental e a repetibilidade indicam que estes resultados poderão facilitar em muito os proponentes de modelos em suas análise de validação, assim como, em si, ajudam o melhor entendimento do processo de soldagem a arco.*

***Palavras - Chave.** Soldagem, MIG/MAG, Transferência metálica, análise de imagens.*

## 1. INTRODUÇÃO

Diversos pesquisadores vêm publicando modelos e simulações de diversos modos de transferência metálica, sobretudo da transferência goticular, o que tem permitido um grande avanço na tecnologia da 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. Avaliando numericamente a soldagem MIG/MAG estacionária, Wang e Tsai (2001) calcularam as dimensões e tamanho da poça de fusão como uma função do tempo. Este estudo, apesar de também levar em consideração o modelamento matemático do momentum das gotas, não verifica experimentalmente seus valores e apresenta, apesar de seu grande valor científico, uma limitação prática: não leva em consideração a translação da poça em uma direção, o que provavelmente provocaria uma mudança substancial nos resultados. Em um outro estudo (Kim et al, 2003), o fluxo de calor e os ciclos térmicos em soldagem foram modelados utilizando um modelo tridimensional, na soldagem MIG/MAG em filete. Neste caso, as gotas metálicas são consideradas fontes volumétricas de calor, mas não se faz registro ou citação de medições de suas características cinemáticas.

Isto enfatiza a importância da análise experimental da transferência metálica, onde o Laprosolda/UFU vem lançando novas ferramentas (Miranda, 2003; Maia, 2001), aprimorando

outras (Vilarinho et al, 2000) e aproveitando outras, como é o caso do Optimas MA 1.4, um software utilizado para o levantamento das trajetórias das gotas em vôo livre. 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. Nesse contexto, se posiciona o objetivo deste trabalho: à luz das avançadas técnicas agora disponíveis, avaliar o efeito dos principais parâmetros da soldagem MIG/MAG, corrente e comprimento do arco, sobre a velocidade de chegada da gota à poça e aceleração média durante a trajetória. Assim, pretende-se fazer uma razoável contribuição tanto aos proponentes de modelos como ao conhecimento e melhor entendimento da transferência metálica no MIG/MAG.

## 2. MATERIAIS E METODOLOGIA

Uma série de soldagens de simples deposição, com diferentes combinações de corrente e comprimento de arco, foram realizadas sobre chapas de aço carbono (300 x 6,35 x 38,1 mm), com um arame-eletrodo da classe ER70S-6 (diâmetro 1,2 mm) e gás de proteção composto de 95% de argônio e 5% de oxigênio (vazão 14 l/min). Para se obter o melhor controle possível dos demais parâmetros de soldagem, optou-se por utilizar uma fonte de soldagem eletrônica no modo corrente constante, o que permite regular de forma independente a corrente de soldagem e a velocidade de alimentação do arame. Neste trabalho, procurou-se usar sempre a mesma velocidade de alimentação, para cada nível de corrente, para evitar a influência do impulso inicial de cada gota nas referidas características cinemáticas. Desta forma, para uma dada regulagem de corrente e com ajuste automático do comprimento de arco desabilitado, foi possível obter diferentes comprimentos de arco através do ajuste da DBCP (distância do bico de contato à peça). Em outras palavras, mantendo-se constantes a velocidade de alimentação do arame e a corrente de soldagem, mantém-se, por consequência, mesmo a diferentes níveis de DBCP, aproximadamente o mesmo comprimento de eletrodo percorrido pela corrente, variando-se, então, os comprimentos de arco desejados.

Regulou-se a corrente de soldagem ( $I_{REG}$ ) em três níveis, como mostra a Tabela 1, de tal forma a obter-se transferência globular estável, transferência goticular ('spray') estável, próxima à corrente de transição, e uma transferência com a corrente de soldagem bem acima da corrente de transição. Os valores de corrente de soldagem e tensão de arco foram monitorados e foram levantadas as características estáticas dos arcos obtidos.

Tabela 1 – Parâmetros de regulagem utilizados na soldagem.

$I_{REG}$ (A)	DBCP (mm)
200	18
	22
	26
250	18
	22
	26
300	18
	22
	26

Para a visualização das transferências e medição de comprimentos de arcos, utilizou-se da técnica de shadowgrafia com filmagem em alta velocidade, a uma frequência de aquisição de 2000 quadros por segundo, com taxa de obturação de 1/24000, minimizando a distorção dos elementos nas imagens. Já para a avaliação das características cinemáticas das gotas em transferência, utilizou-se recursos do programa Optimas MA 1.4®, através da localização de alvos nas imagens obtidas, como ilustra a Figura 1 (cada alvo representa uma gota viajando da ponta do eletrodo à poça de

fusão). Para cada quadro é obtido um vetor posição da gota com relação ao tempo ou distância percorrida pela mesma. Para cada combinação de parâmetros, o comprimento do arco médio foi obtido utilizando-se um programa dedicado (Maia, 2001).

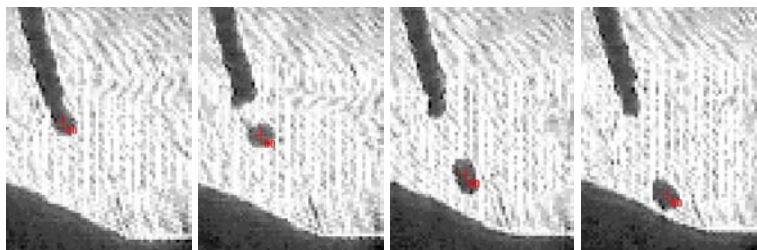


Figura 1 – Seqüência de localização de alvos nas imagens de transferência metálica.

De posse das tabelas fornecidas pelo programa Optimas MA 1.4®, são geradas curvas do tipo posição *versus* tempo, como exemplificado na Figura 2. Naturalmente, o coeficiente angular da primeira derivada da equação  $x(t)$  mostrada representa a aceleração média da gota em transferência. Os últimos pontos (arbitrariamente definidos como 2) são utilizados para a determinação da velocidade de chegada e da aceleração de chegada da gota à poça de fusão.

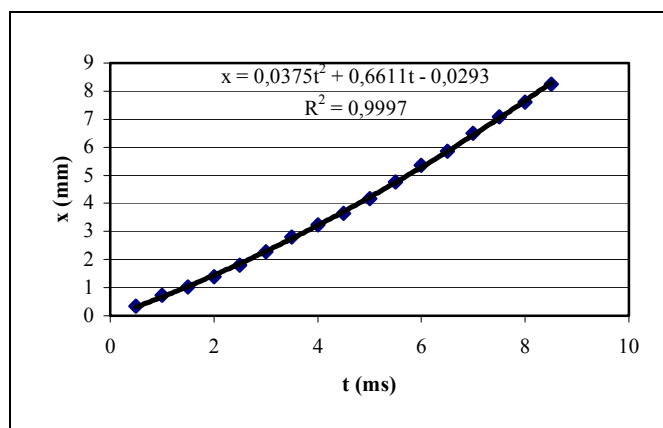


Figura 2 – Curva posição versus tempo de uma gota em transferência.

O número mínimo de gotas (alvos) a serem medidas em cada experimento para se determinar a velocidade média de chegada da gota à poça de fusão ( $V_{CHE}$ ) foi obtido pela aplicação do teste de “Student” (Rodrigues et al, 2004), encontrando-se o número de nove medidas. A aceleração média durante a trajetória ( $A_M$ ), apesar de possuir um comportamento bastante errático, com elevados desvios-padrão, não foi na época avaliada segundo esse critério, adotando-se arbitrariamente, para essa característica cinemática o mesmo número de medições obtido para a velocidade de chegada da gota à poça de fusão.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 apresenta os parâmetros de soldagem monitorados resultantes das combinações de parâmetros de soldagem. A velocidade de soldagem é regulada proporcionalmente à velocidade de alimentação relativa a cada corrente, para garantir o mesmo volume de material depositado por comprimento de solda, minimizando o efeito desta variável.

A Figura 3 ilustra o comportamento da relação  $I \times U$  (característica estática de arcos) para os três níveis de DBCP, sugerindo que os arcos cresceram coerentemente. Na verdade, pela coluna “a” na Tabela 2, atesta-se que a abordagem metodológica proposta neste trabalho para se obter diferentes comprimentos de arco pela variação da distância bico de contato-peça foi bem sucedida. Como se vê, o valor da tensão média do arco ( $U$ ) aumenta com o crescimento da DBCP (aumento

do comprimento do arco), mas observa-se uma variação muito maior da tensão na mudança da DBCP de 18 para 22 mm do que de 22 para 26 mm. Este fato justifica-se pela impossibilidade do volume do arco e/ou da área da região catódica (que são parcelas significantes na composição da tensão total do arco) crescer proporcionalmente com o comprimento do arco. Também se observa um comportamento genericamente atípico para as características estáticas dos arcos; ao se aumentar a corrente de soldagem de 200 para 250 A; há uma tênue queda de tensão ao invés de um constante crescimento da mesma, de forma consistente. Resultados similares haviam sido observados por Costa (2003) e Bingul (1996) e foram atribuídos, dentre outras hipóteses, à diferença no tamanho das gotas na transição globular-goticular (afetando o comprimento real do arco). Como em transferência globular as gotas são bem maiores, acredita-se que estas exercem uma provável contribuição ao maior valor de tensão obtido para as correntes diretamente anteriores à transição em comparação às obtidas um pouco depois da mesma.

Tabela 2 – Parâmetros de soldagem monitorados

Exp.	Valores de Regulagem				Valores Médios		
	$I_{REG}$ (A)	DBCP (mm)	$V_a$ (m/s)	$V_s \times 10^3$ (m/s)	$I_M$ (A)	$U_M$ (V)	$a$ (mm)
A	200	18	0,08	4,8	201	29,8	3,9
B		22	0,08	4,8	200	34,9	9
C		26	0,08	4,8	201	36,6	14,5
D	250	18	0,12	6,8	250	29,4	3,7
E		22	0,12	6,8	248	34,1	9,3
F		26	0,12	6,8	248	36,3	13,2
G	300	18	0,14	8,3	299	33,2	4,7
H		22	0,14	8,3	297	37,4	9,5
I		26	0,14	8,3	297	39,6	12,3

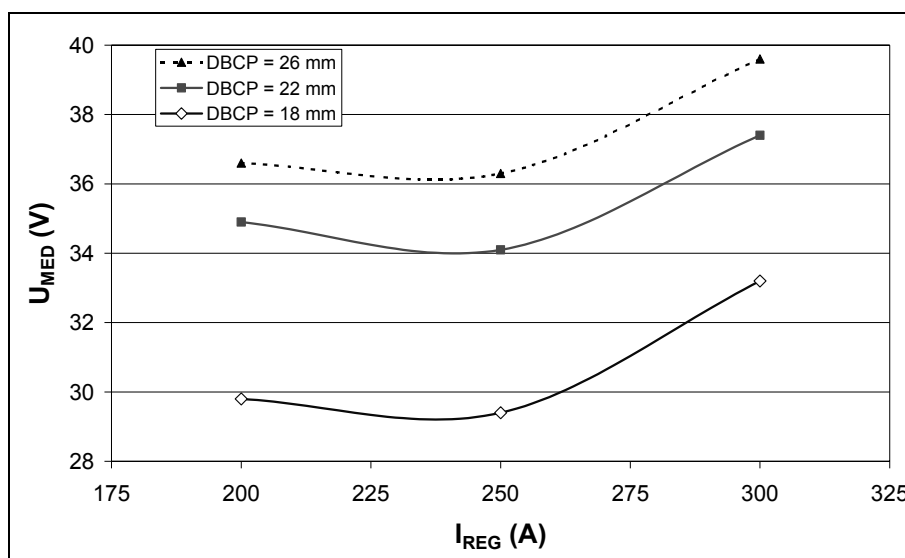


Figura 3 – Características estáticas dos arcos obtidos.

A Figura 4 apresenta uma das curvas das relações posição x tempo de uma das gotas avaliadas, bem como a sua primeira derivada. Como pode ser visto, mesmo que pequena, observa-se alguma dispersão no trajeto de cada gota. Na Figura 5 verifica-se o conjunto de curvas de um mesmo experimento. Nota-se que cada gota viaja de maneira particular no plasma, provocando uma dispersão entre as curvas. Essa pequena dispersão pode ser atribuída ao erro experimental durante o levantamento dessas trajetórias e/ou a razões provenientes da aleatoriedade do fluxo de plasma e da estabilidade físico-química da gota em transferência. Para avaliar o segundo grupo de hipóteses necessitar-se-ia de condições muito sofisticadas para o momento atual. Porém, para se certificar do

efeito do erro experimental, realizou-se um experimento simples, mas bastante elucidativo, onde se pôde observar, através da queda livre ao ar de esferas de dimensões conhecidas, que uma pequena dispersão ocorre sistematicamente em todos os experimentos.

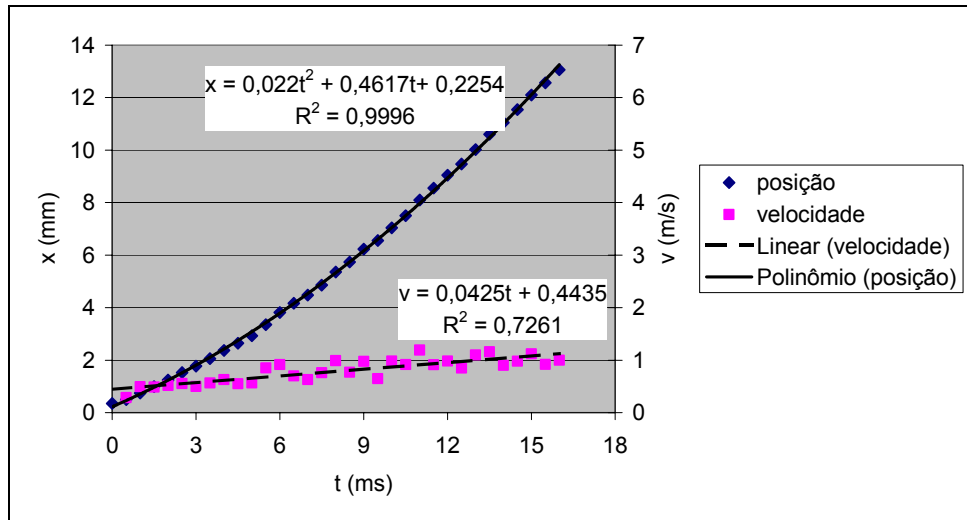


Figura 4 – Relação da velocidade e posição em função do tempo para o experimento C.

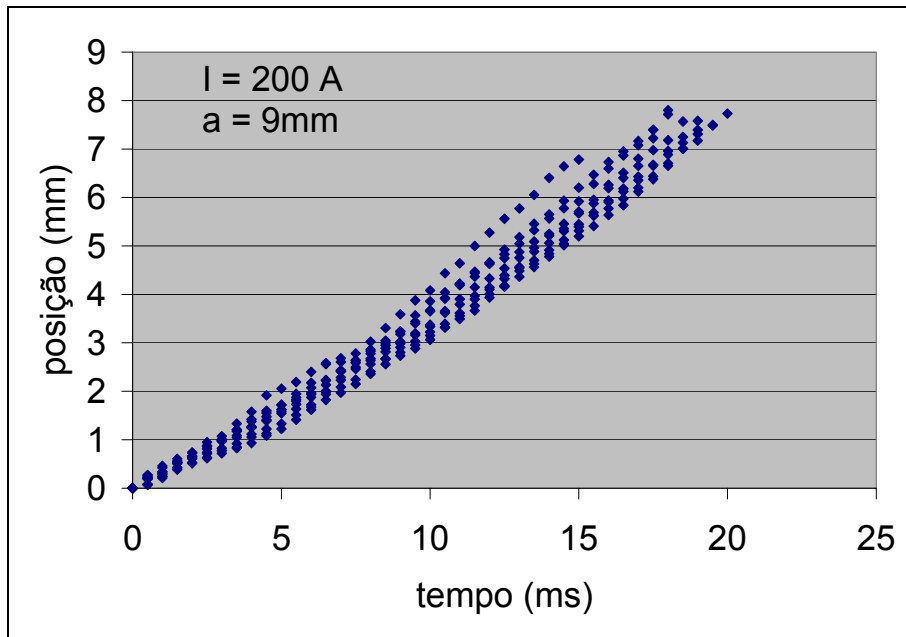


Figura 5 – Sobreposição das curvas obtidas no experimento B ( $I = 200 \text{ A}$ ;  $\text{DBC}P = 22 \text{ mm}$ ), onde “a” é o comprimento aproximado do arco nessa condição.

A Tabela 3 apresenta as medidas de velocidade de chegada ( $V_{\text{CHE}}$ ) obtidas sobre nove trajetórias de gotas em cada experimento, bem como a média obtida. Médias e intervalos de confiança são apresentados na Figura 6, onde se percebe que o aumento do comprimento arco (proporcional à DBCP) implica em aumento da  $V_{\text{CHE}}$ . Este fato é justificável pela cinemática, em que corpos acelerados adquirem maior velocidade se viajarem por uma maior distância. Além disto, as gotas em arcos longos demoram mais tempo até sofrerem a ação de frenagem de vapores metálicos gerados na poça de fusão. Percebe-se também um crescimento de  $V_{\text{CHE}}$  com a corrente (maior velocidade inicial, devido a maior velocidade de alimentação, e maior força de arraste, devido à velocidade do jato de plasma maior), mas que a influência da corrente é dependente de seu valor (houve pouca variação dos valores de 250 e 300 A), fato justificável pelo tipo de transferência (para a corrente menor era globular, passando a goticular em ambas corrente maiores, mesmo que com

gotas sempre menores para maiores valores de corrente). Deve-se chamar atenção para o fato de que a velocidade inicial (= velocidade de alimentação) é sensivelmente menor do que a  $V_{CHE}$  (comparar  $V_a$  na Tabela 3 com  $V_{CHE}$  na Tabela 3). Porém, com o arco mais longo (DBCP = 26), mesmo em altas correntes, percebe-se variação da  $V_{CHE}$ . Acredita-se que em arcos mais longos a força de arraste seja maior, de tal forma a afetar a velocidade com que chegam mesmo gotas pequenas.

Os dados apresentados na Tabela 3 foram submetidos ao teste ANOVA, revelando que as tendências acima são estatisticamente significantes: os parâmetros influenciam na velocidade de chegada da gota à poça de fusão com significância menor que 1%.

Tabela 3 – Velocidade de chegada da gota à poça de fusão: medidas e médias obtidas

Corrente (A)	200			250			300		
DBCP (mm)	18	22	26	18	22	26	18	22	26
<b>Medidas (m/s)</b>	0,59	0,84	0,56	0,49	1,39	1,28	0,93	1,13	1,82
	0,66	0,80	0,92	0,83	1,40	1,40	1,36	1,52	1,84
	0,34	0,49	1,00	1,05	1,62	1,74	1,31	1,13	1,99
	0,27	0,28	0,98	1,12	1,17	1,28	1,17	1,33	1,68
	0,19	0,77	1,06	1,12	0,87	0,76	1,12	1,34	1,84
	0,40	0,64	0,58	1,12	0,95	1,26	0,98	1,14	1,95
	0,80	0,65	0,70	1,12	1,38	1,24	1,05	1,18	1,70
	0,59	0,77	0,78	1,33	0,80	1,56	1,21	1,27	1,60
	0,59	0,66	0,80	1,12	1,70	1,56	1,01	1,55	1,68
<b>Média (m/s)</b>	<b>0,48</b>	<b>0,65</b>	<b>0,82</b>	<b>1,03</b>	<b>1,26</b>	<b>1,34</b>	<b>1,13</b>	<b>1,29</b>	<b>1,79</b>

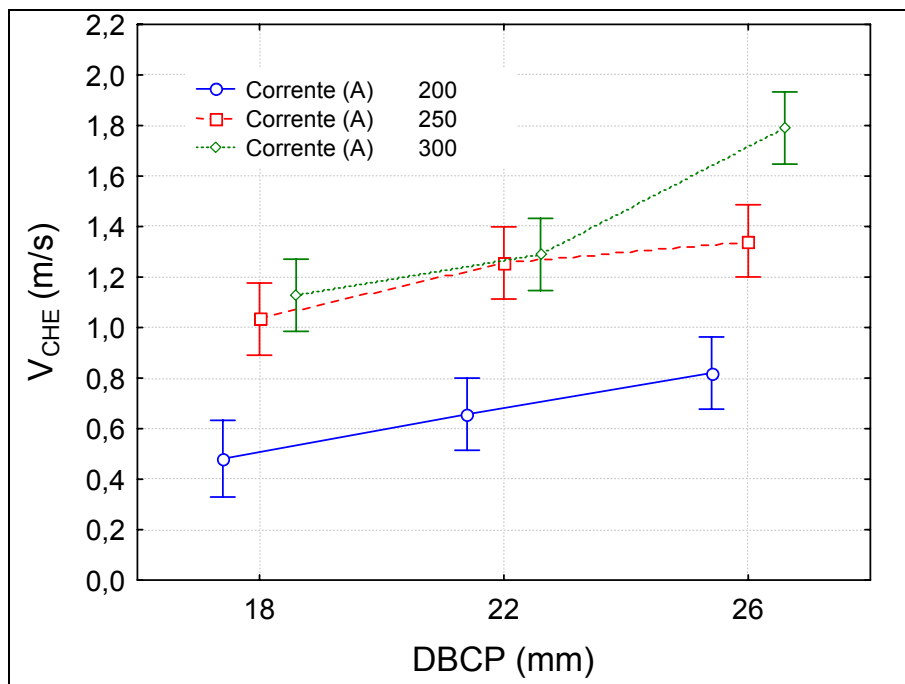


Figura 6 – Efeito da corrente de soldagem e da DBCP (comprimento do arco) sobre  $V_{CHE}$  (as curvas foram deslocadas de suas exatas posições sobre os 3 valores de DBCP para uma melhor visualização, ou seja, evitar sobreposição de pontos).

Os dados para análise do efeito dos parâmetros I e comprimento do arco (proporcional à DBCP) sobre a aceleração média da gota ( $A_{MED}$ ) são apresentados na Tabela 4 e ilustrados pela Figura 7. Ao contrário da análise de  $V_{CHE}$ , para correntes de 200 e 250 A, o comprimento do arco não influencia a aceleração (aceleração constante), mas parece influenciar quando a corrente atinge 300 A (o teste ANOVA forneceu um nível de significância da ordem de 77%). A maior  $V_{CHE}$  das gotas

nos arcos mais longos demonstra ser prioritariamente devido ao efeito da cinemática acima explicado. Para os dois níveis de corrente mais baixos, quanto maior a corrente, maior aceleração média das gotas, fato que justifica a grande diferença entre as  $V_{CHE}$  de suas gotas. Já em 300 A, o comportamento parece ser dependente de outros fatores. Em arco curto (DBCP de 18 e 22 mm), a aceleração é muito pequena (chegando a ser negativa, ou seja, algumas gotas são freadas), o que pode justificar a razão da  $V_{CHE}$  para este arco ser próximo da  $V_{CHE}$  do arco a 250 A. Em arco mais longo (DBCP = 26 mm), a aceleração já assume os mais altos valores, proporcionado a diferença de  $V_{CHE}$  em relação ao mesmo arco a 250 A. A explicação para tal não ficou claro (parece algo como um efeito repulsivo mais pronunciado dos jatos de vapores metálicos quando a corrente é alta e o comprimento do arco é baixo).

Tabela 4 – Aceleração média da gota durante a trajetória: medidas e médias

Corrente (A)	200			250			300		
DBCP (mm)	18	22	26	18	22	26	18	22	26
<b>Medidas</b>	8,4	9,8	34,0	-80,0	193,4	115,6	-42,8	30,0	-111,0
	0,2	15,8	25,6	7,6	46,8	104,6	-153,2	88,0	453,6
	20,4	9,6	32,0	150,0	61,0	39,0	-4,6	-19,6	335,4
	12,6	17,2	19,2	76,0	55,4	50,2	-26,4	56,8	11,6
	39,2	13,2	20,6	34,0	53,6	39,2	-52,0	75,2	-28,8
	-0,4	15,8	34,8	15,4	60,8	54,0	-5,0	-5,6	-23,2
	59,2	15,2	44,0	223,2	95,4	140,2	28,8	66,8	223,0
	14,8	15,6	51,8	141,0	102,8	60,6	90,0	90,8	120,0
	14,8	17,2	17,6	84,8	111,6	66,6	-20,0	89,4	71,6
<b>Média (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>18,8</b>	<b>14,4</b>	<b>31,1</b>	<b>72,4</b>	<b>86,8</b>	<b>74,4</b>	<b>-20,6</b>	<b>52,4</b>	<b>116,9</b>

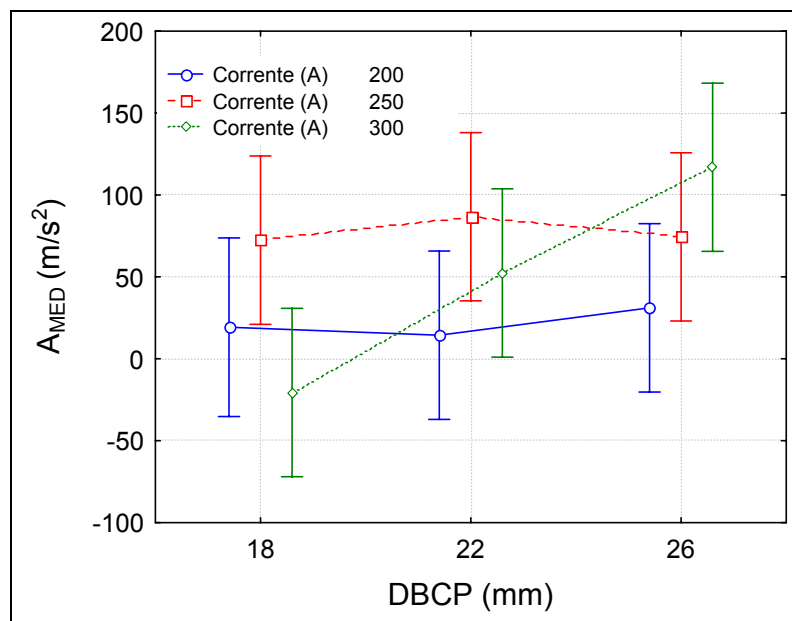


Figura 7 – Efeito da corrente de soldagem e da DBCP (comprimento de arco) sobre  $A_{MED}$ .

#### 4. CONCLUSÃO

Tendo em vista os objetivos do trabalho, e as condições empregadas (soldagem com eletrodos de aço carbono, posição plana, fonte no modo corrente constante, etc.), conclui-se que:

- A corrente de soldagem e o comprimento do arco de soldagem influenciam a velocidade de chegada da gota à poça de fusão: quanto maiores, maior a velocidade de chegada;

- O efeito da corrente de soldagem sobre a velocidade de chegada da gota à poça de fusão é mais pronunciado quando se passa de um corrente com transferência globular para uma corrente com transferência goticular;
- O efeito do comprimento do arco sobre a velocidade de chegada da gota à poça de fusão é pronunciado independentemente do tipo de transferência;
- A influência da corrente e comprimento do arco sobre a aceleração média da gota são interdependentes:
  - O comprimento do arco só afeta a aceleração média das gotas ao maior nível de corrente;
  - A corrente só afeta a aceleração média das gotas quando passa de baixa para média corrente.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Prof. Louriel Oliveira Vilarinho e ao aluno Oreste Guerra Neto, por suas contribuições ao trabalho, ao Laprosolda-UFU e ao Programa de Pós-graduação, pela infraestrutura, e ao CNPq e FAPEMIG, pelo suporte financeiro e bolsa aos autores.

## 6. REFERÊNCIAS

BINGUL, Z., COOK, G. E., BARNETT, R. J., STRAUSS, A. M., WELLS, B. S., 1996, *An Investigation of Constant Potential GMAW Instability Behavior*, ASM-AWS: Trends in Welding Research, Nashville, Tennessee.

COSTA, A. V. da. 2003. *Desenvolvimento de metodologias para a determinação de quedas de tensão em arcos de soldagem*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia. Fevereiro, 2003.

KIM, C.-H., ZHANG, W., DEBROY, T.. 2003. Modeling of temperature field and solidified surface profile during gas-metal arc fillet welding *Journal Of Applied Physics* Volume 94, Number 4. 15 de Agosto de 2003.

MAIA, T. C. G.. 2001. *Utilização de técnicas de processamento digital de imagens no estudo de transferência metálica em soldagem a arco voltaico*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, maio 2001.

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.

RODRIGUES, C. E. A. L., LUZ, T. S., SCOTTI, A., 2004. Metodologia para a análise cinemática da transferência metálica no MIG/MAG. *Anais do III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica CONEM 2004*, Belém-PA, Agosto 2004, 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.

WANG, Y., TSAI, H. L. 2001. Impingement of filler droplets and weld pool dynamics during gas metal arc welding process. *International Journal of Heat and Mass Transfer* (44) pp. 2067-2080



# KINEMATICS OF DROPLETS UNDER TRANSFER IN CARBON STEEL GMAW: EFFECT OF CURRENT AND ARC LENGTH

**Carlos Eduardo Aguiar Lima Rodrigues**

Federal University of Uberlândia, LAPROSOLDA, 38400-902 – Uberlândia – MG –  
ceduardo@mecanica.ufu.br

**Américo Scotti**

Federal University of Uberlândia, LAPROSOLDA, 38400-902 – Uberlândia – MG –  
ascotti@mecanica.ufu.br

***Abstract:** The objective of this work was to quantify and assess, under the light of modern techniques for visualization and monitoring, the influence of the arc length and welding current on the kinetic behavior of the globular and spray transfer mode during GMAW. Therefore, high-speed filming of arcs, obtained with carbon steel electrode and Ar+5%O<sub>2</sub> shielding, was carried out. Three levels of currents and arc lengths were applied. By using image analysis tools, temporal position traces of the droplets were obtained. Measurements of the arrival speeds and average accelerations were reached at the droplet pathway. The results showed that both arc length and welding current have significant influence on the droplet kinematics. It is expected from these results an advance on welding model validations and on the understanding of this process.*

***Key-words:** GMAW, Transfer modes, Images analysis, Drop Velocity and Acceleration.*