



MAPAS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA NA SOLDAGEM MIG DE ALUMÍNIO

Kléber Mendes de Figueiredo

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Eng. de Mat., Aeronáutica e Automobilística, klebermf@sc.usp.br – São Carlos, SP, Brasil

Valtair Antonio Ferraresi

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, LAPROSOLDA, valtairf@mecanica.ufu.br – C. P. 593, Uberlândia, MG, Brasil

Resumo. *Dentre os processos de soldagem do alumínio, o MIG pode ser automatizado com facilidade, possui alta produtividade e grande versatilidade quanto ao tipo e espessura dos materiais empregados em soldagem. A possibilidade de mudar o modo de transferência para se adequar às diferentes espessuras, tipos de juntas, entre outros, é um outro atrativo importante. Entretanto, pouco se conhece sobre os modos de transferência da soldagem MIG de alumínio. Desta forma, neste trabalho é proposto um estudo sobre os modos de transferência metálica na soldagem do alumínio. O objetivo deste estudo foi gerar mapas que identifiquem os modos de transferência metálica e suas respectivas regiões em função do gás de proteção e do diâmetro do eletrodo. A soldagem foi realizada em chapa de alumínio na posição plana, utilizando uma fonte eletrônica no modo de tensão constante, variando-se a tensão e a velocidade de alimentação do eletrodo. Foram feitos estudos utilizando-se eletrodo de 1,0 mm com Ar e com uma mistura Ar + 25% He e eletrodo de 1,2 mm com Ar. A metodologia utilizada foi a da Shadowgrafia por laser conjugado com filmadora de alta velocidade. Assim, foi possível traçar mapas onde determinou-se quatro modos de transferência metálica e as respectivas faixas de transição.*

Palavras-chave: *Soldagem MIG, Alumínio, Transferência metálica, Corrente de transição, Taxa de fusão*

1. INTRODUÇÃO

Dentre os processos de soldagem do alumínio, o MIG pode ser automatizado com facilidade, possui alta produtividade e grande versatilidade quanto ao tipo e espessura dos materiais empregados em soldagem. A forma com que a gota é transferida do eletrodo para a poça de fusão (modos de transferência metálica) é importante, pois determina a estabilidade

do processo de soldagem MIG e conseqüentemente a qualidade do cordão de solda. (Norrish & Richardson, 1988). De uma forma simplificada, a literatura corrente considera a existência de três formas básicas de transferência metálica: curto-circuito, globular e *spray* (que nesse trabalho é chamado de goticular) (AWS, 1991).

Outro fator importante na soldagem é o consumo de eletrodo (taxa de fusão). Mudando o consumo obtém-se diferentes modos de transferência metálica e, tendo-se a geometria da junta, pode-se calcular a quantidade de passes necessários para a completa realização da solda, prevendo-se a corrente de trabalho, conseqüentemente a velocidade de alimentação do arame eletrodo, que irá auxiliar no ajuste da fonte. Experimentalmente constata-se que os principais fatores que influenciam no consumo do eletrodo são os calores gerados no mesmo por efeito Joule e na sua conexão com o arco. (Quites & Dutra, 1979). Lesnewich (1958) propôs a seguinte equação para o consumo do eletrodo (*TF*):

$$TF = \alpha I + \beta l I^2 \quad (1);$$

onde *l* é o comprimento do eletrodo, *I* é a corrente, a constante α caracteriza as reações que ocorrem na conexão eletrodo-arco, sendo uma função do tipo de gás de proteção, tipo de eletrodo e polaridade utilizada. Já a constante β está relacionada com a queda de tensão no eletrodo, representando o efeito Joule, sendo, portanto, influenciada pelas características do eletrodo, ou seja, pelo diâmetro, comprimento e material. Estas constantes α e β são determinadas experimentalmente.

O objetivo deste trabalho é mapear os modos de transferência metálica na soldagem MIG de alumínio, variando o tipo de gás de proteção e diâmetro de eletrodo. Foram também determinadas as constantes α e β da equação de consumo para verificar a influência dos parâmetros de soldagem (gás de proteção e diâmetro do eletrodo) no consumo.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As soldagens foram realizadas na posição plana, utilizando uma fonte eletrônica no modo de tensão constante. Foram realizados testes variando a tensão de referência e a velocidade de alimentação do arame eletrodo (conseqüentemente a corrente). Foram mantidos constantes para todos os testes a vazão de gás em 15 l/min, distância bico de contato peça igual a 15 mm e inclinação da tocha em 10° na posição empurrando o cordão de solda. Os corpos de prova foram confeccionados em chapa de alumínio, com especificação ABNT 5052 (liga Al-Mg) e espessura de $\frac{1}{4}$ " (6,35 mm). Foram utilizados arames eletrodo com diâmetros de 1,0 mm e 1,2 mm, com especificação AWS ER-4043 (liga Al-Si). Com o diâmetro de 1,0 mm foram feitos testes utilizando gás argônio comercialmente puro e uma mistura de argônio com 25 % de hélio e com o eletrodo de 1,2 mm foi utilizado apenas o gás argônio comercialmente puro.

Um sistema de Shadowgrafia por laser e uma câmara de vídeo de alta velocidade (2000 quadros/s) foram utilizados com o intuito de se determinar o diâmetro e o modo de transferência das gotas (Vilarinho, 2000).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos testes realizados estão apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3. Com as análises realizadas nas imagens e nos valores de tensão e corrente adquiridos durante a soldagem, foi possível detectar 4 (quatro) modos de transferência metálica, indicados também nas tabelas: Curto-circuito (CC), Globular (GL), Goticular (GT) e Globular/Curto-circuito (GL-CC). Maiores detalhes sobre os modos de transferência podem ser encontrados no trabalho de Figueiredo & Ferraresi (2000).

De acordo com a referência, no modo de transferência globular o diâmetro das gotas deve ser maior que o diâmetro do eletrodo. Como não é especificado um tamanho mínimo de gota para determinar a transição entre o modo globular e goticular, as observações dos filmes e dos oscilogramas de tensão e corrente mostraram que é possível adotar que o modo globular ocorre para gotas que excedem o diâmetro médio do eletrodo em 15%. Desta forma, as gotas com diâmetro médio menores que este valor foram consideradas como sendo transferência goticular. Neste modo de transferência não se conseguiu gotas com diâmetro médio menor do que o diâmetro do arame eletrodo.

Tabela 1 – Resultados dos testes com gás argônio e eletrodo de 1,0 mm

N ^o	U _r	V _{alim}	I _m	D _{gota}	Modtrans.
1	16	7,0	69	2,16	GL-CC
2	16	9,0	114	1,59	GL-CC
3	16	11,0	141	1,39	CC
4	18	7,0	93	2,12	GL-CC
5	18	9,0	125	1,60	GL-CC
6	18	11,0	126	1,70	CC
7	20	8,0	117	1,59	##
8	20	12,0	169	1,07	CC
9	20	14,0	182	1,21	CC
10	22	8,0	128	1,43	GL
11	22	10,0	146	1,15	##
12	24	13,0	200	1,08	GT
13	24	11,0	174	1,07	GT
14	24	10,0	153	1,12	GT
15	24	8,0	128	1,28	GL
16	26	14,0	209	1,09	GT
17	26	12,0	179	1,07	GT
18	26	16,0	231	1,00	GT
19	28	16,0	235	1,07	GT
20	28	18,0	254	1,03	GT
21	20	10,0	143	1,51	CC
22	22	12,0	168	1,37	CC
23	22	13,0	178	1,37	CC
24	24	14,0	193	1,22	CC
25	24	9,0	144	1,28	GL
26	25	14,0	216	1,12	GT
27	18	8,0	112	1,74	##

28	20	9,0	132	1,44	##
29	20	11,0	154	1,23	CC
30	21	9,0	134	1,53	##
31	22	11,0	161	1,34	CC
32	23	13,0	182	1,19	CC

Tabela 2 – Resultados dos testes com mistura de Ar + 25% He e eletrodo de 1,0 mm

N ^o	U _r	V _{alim}	I _m	D _{gota}	Modtrans
1	20	12,0	137	1,23	CC
2	20	8,0	112	1,78	GL
3	22	10,0	141	1,27	##
4	22	8,0	93	1,75	GL
5	22	7,0	92	1,63	GL
6	24	12,0	164	1,10	GT
7	26	10,0	144	1,24	GL
8	26	12,0	166	1,20	GT/GL
9	26	14,0	182	1,02	GT
10	26	16,0	187	1,09	GT
11	28	16,0	208	1,03	GT
12	28	14,0	197	1,04	GT
13	28	18,0	221	0,99	GT
14	28	12,0	156	1,18	GL
15	20	6,0	58	2,91	GL-CC
16	22	12,0	147	1,28	##
17	24	14,0	174	1,08	GT
18	24	10,0	134	1,18	GL

Onde: N^o = número do teste; U_r = tensão de referência [V]; V_{alim} = velocidade de alimentação do arame [m/min]; I_m =

corrente média [A]; D_{gota} = diâmetro médio da gota [mm]; Modtrans = modo de transferência metálica, CC = curto-circuito, GL = globular, GT = goticular, GL-CC = globular/curto-circuito e ## - Indica que, nesse teste, ocorreu mais de

um modo de transferência e de forma aleatória.

Scotti et al. (1999) comentam que no modo de transferência globular/curto-circuito, a gota tem formação globular concluindo a sua transferência com curto-circuito, isto também foi observado neste trabalho. Para maiores detalhes ver o trabalho de Figueiredo & Ferraresi (2000).

Além dos modos de transferência citados acima, foram encontradas soldagens onde ocorreram transferências com estes modos combinando entre si de forma aleatória, ou seja, havia uma alternância entre os modos de transferência, não estáveis.

Tabela 3 – Resultados dos testes com gás argônio e eletrodo de 1,2 mm

N ^o	U _r [V]	V _{alim}	I _m	D _{gota}	Modtrans
1	20	8,0	175	1,40	CC
2	20	6,0	120	1,86	GL-CC
3	20	5,0	109	1,83	GL
4	22	8,0	175	1,37	CC
5	22	6,0	130	1,47	GL
6	22	5,0	113	1,58	GL
7	24	8,0	178	1,19	GT
8	24	10,0	227	1,22	GT
9	24	6,0	135	1,36	GL
10	18	8,0	163	1,55	CC
11	18	6,0	129	2,06	GL-CC
12	18	4,0	73	2,48	GL
13	18	5,0	82	3,15	GL-CC
14	18	7,0	120	1,83	GL-CC
15	19	6,0	125	1,85	##
16	20	7,0	146	1,67	CC
17	21	6,0	128	1,65	GL
18	22	7,0	152	1,36	##
19	23	8,0	168	1,32	GT
20	23	9,0	186	1,37	CC
21	24	7,0	155	1,38	GL
22	25	9,0	197	1,21	GT

Onde: N^o = número do teste; U_r = tensão de referência [V]; V_{alim} = velocidade de alimentação do arame [m/min]; I_m = corrente média [A]; D_{gota} = diâmetro médio da gota [mm]; Modtrans = modo de transferência metálica, CC = curto-circuito, GL = globular, GT = goticular, GL-CC = globular/curto-circuito e ## - Indica que, nesse teste, ocorreu mais de um modo de transferência e de forma aleatória.

Com os resultados apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3 foi possível determinar a corrente de transição globular/goticular. Para os testes com Ar puro e diâmetros de 1,0 mm essa corrente ficou entre 146 e 152 A. Com a mistura de Ar + 25% He a corrente de transição ficou entre 156 e 164 A, com um crescimento em relação ao Ar puro. Este aumento está, provavelmente, relacionado com a mudança na condutividade térmica e do potencial de ionização do gás de proteção.

Para o conjunto eletrodo de 1,2 mm e gás Ar comercialmente puro, a corrente de transição ficou entre 155 e 168 A, maior que a do eletrodo de 1,0 mm, como esperado. O aumento na faixa de corrente de transição pode ser explicado pelo fato da necessidade de se ter uma maior densidade de corrente, para que o arco possa atingir a temperatura necessária a fim de que a fusão do eletrodo ocorra.

As Figuras 1, 2 e 3 mostram os gráficos com os pares de tensão de referência e velocidade de alimentação do arame utilizados nos testes. As regiões I e II são regiões onde não foi possível realizar testes devido a queima de bico de contato e da instabilidade do processo de soldagem.

Comparando a Figura 1 com a 2, mudança de Ar puro para Ar + 25% He, verifica-se um aumento na região do modo de transferência globular, tanto em termos de velocidade de alimentação com em termos de tensão média de soldagem. No modo goticular ocorreu somente um deslocamento da região para maior velocidade de alimentação sem alterar a tensão média de soldagem. Estas diferenças entre os resultados estão provavelmente ligadas ao potencial de ionização e condutividade térmica, maiores na mistura Ar + 25% He.

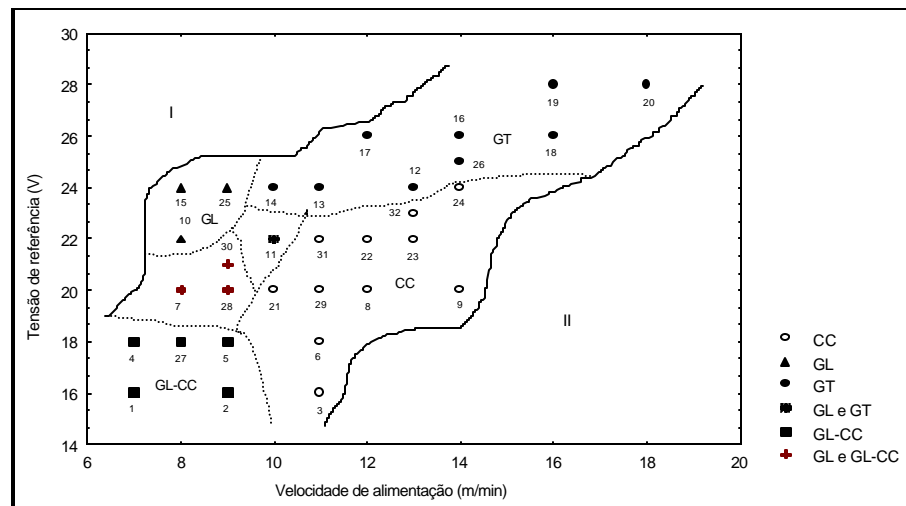


Figura 1 – Gráfico de tensão de referência com a velocidade de alimentação do eletrodo utilizando eletrodo de 1,0 mm e Ar comercialmente puro.

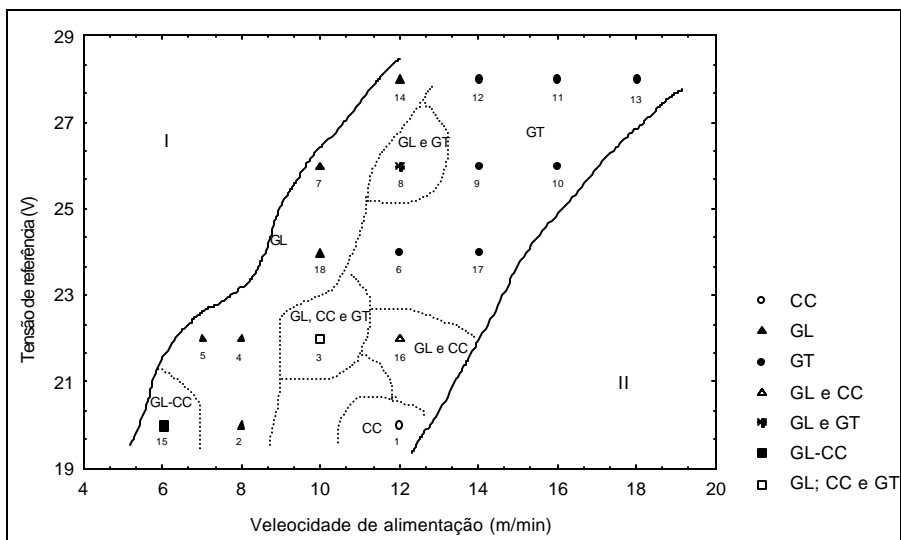


Figura 2 – Gráfico de tensão de referência com a velocidade de alimentação do eletrodo utilizando eletrodo de 1,0 mm e mistura de gases (Ar + 25% He).

Comparando-se a Figura 3 com a 1, com a mudança no diâmetro do eletrodo de 1,0 mm para 1,2 mm, verifica-se um sensível aumento na região do modo de transferência globular, ou seja, ela ocorre numa faixa de velocidade de alimentação do eletrodo (corrente de soldagem) maior dentro do mapa de transferência. Nos outros modos de transferência as mudanças de região não foram muito significantes.

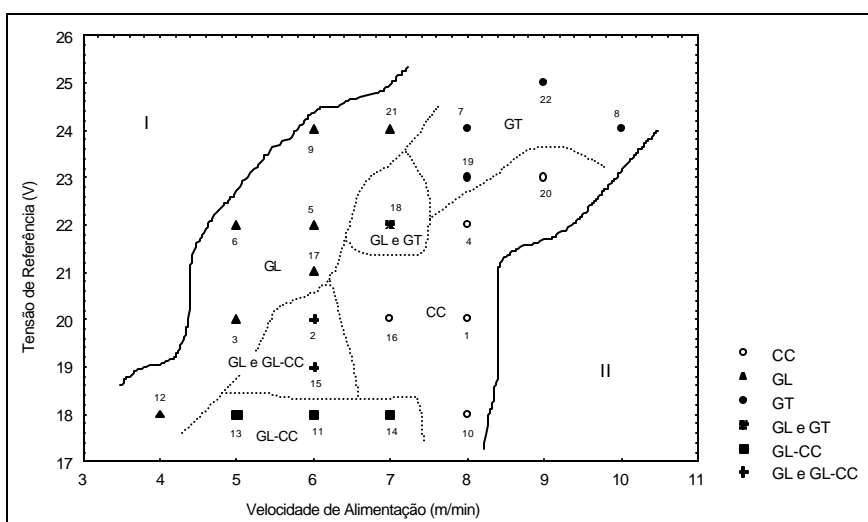


Figura 3 – Gráfico de tensão de referência com a velocidade de alimentação do eletrodo utilizando eletrodo de 1,2 mm e gás argônio comercialmente puro.

Para prever a velocidade de alimentação e, conseqüentemente o consumo do eletrodo utilizando a Equação 1, determinou-se as constantes α e β utilizando os dados apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3 e fazendo uso de um programa de estatística (regressão não linear - método de estimação Quasi-Newton). Os valores de α e β encontrados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores das constantes α e β

Tipo de gás	Diâmetro eletrodo	α	β	α	β
-------------	-------------------	----------	---------	----------	---------

	[mm]	[m.s ⁻¹ .A ⁻¹]	[s ⁻¹ .A ⁻²]	[kg.h ⁻¹ .A ⁻¹]	[kg.m ⁻¹ .h ⁻¹ .A ⁻²]
Ar	1.0	11,32.10 ⁻⁴	1,4.10 ⁻⁵	3,46.10 ⁻²	4,27.10 ⁻⁴
Ar + 25%He	1.0	12,04.10 ⁻⁴	5,1.10 ⁻⁵	3,68.10 ⁻²	1,56.10 ⁻³
Ar	1.2	8,2.10 ⁻⁴	-2,0.10 ⁻⁵	3,61.10 ⁻²	-8,79.10 ⁻⁴

Observa-se que, para o conjunto eletrodo de 1,2 mm e gás argônio, o valor de β tem o sinal negativo. Isso enfatiza a baixa resistividade elétrica do alumínio. Entretanto, espera-se que o valor mínimo seja zero e não um valor negativo. Scotti et al.(1999), citando outros autores, dissertam sobre os cuidados que se deve ter na interpretação dos coeficientes obtidos através de uma regressão: "ocasionalmente o analista experimenta uma aparente contradição da intuição ou da teoria quando um ou mais dos coeficientes de regressão parecem ter o sinal "errado". Razões para isto podem incluir uma pequena faixa de fatores, não inclusão de fatores importantes no modelo e a presença de multicolinearidade". Com isso, foi adotado o valor de β como sendo zero nos casos de valor negativo.

A Figura 4 mostra o consumo de eletrodo em kg/h em função da corrente em ampères. Nela verifica-se que para correntes até aproximadamente 80 A o consumo em kg/h é praticamente igual para as três situações. Acima desta corrente verifica-se um aumento no consumo quando se utiliza a mistura Ar + 25% He com eletrodo de 1,0 mm e, a partir da corrente de 160 A, verifica-se uma diminuição no consumo para o conjunto Ar - eletrodo de 1,2 mm, para os mesmos valores de corrente, quando comparado com o conjunto Ar - eletrodo de 1,0 mm.

Os fenômenos citados acima devem ocorrer porque no caso da mistura Ar + 25% He, o seu potencial de ionização é maior do que o do Ar puro, gerando, assim, um arco mais quente e temperaturas mais altas. Já no caso do gás Ar com eletrodo de 1,2 mm, este tem uma densidade de corrente mais baixa, gerando uma temperatura menor. Estas colocações explicam as diferenças encontradas nos valores de α e β , para os diferentes conjuntos, tendo em vista que estas constantes são afetadas, dentre outros fatores, pelo diâmetro do eletrodo e o tipo de gás de proteção.

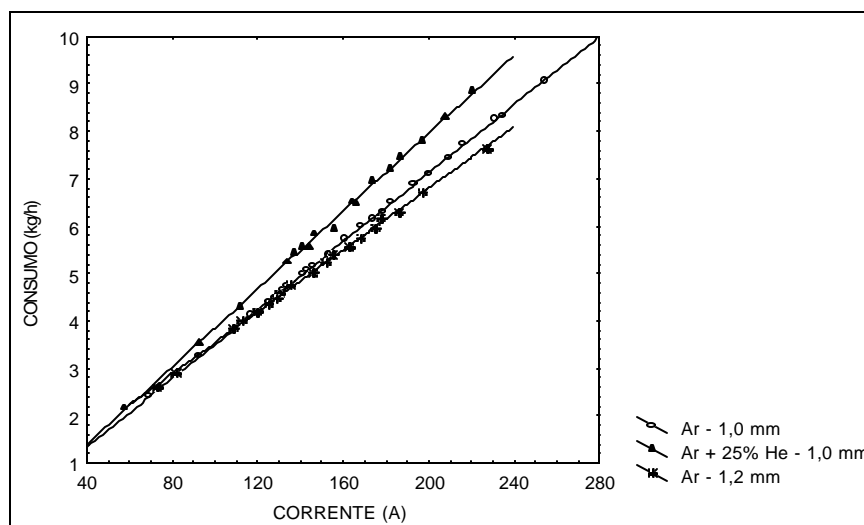


Figura 4 – Gráfico do consumo de eletrodo em kg/h com a corrente em A

4. CONCLUSÕES

Foram encontrados 4 modos de transferência metálica na soldagem MIG de alumínio, que são: curto-circuito, globular, goticular e globular/curto-circuito.

Com a mudança de gás de proteção de argônio comercialmente puro para argônio com 25% de hélio, pode-se concluir que: a região de transferência globular aumentou tanto em termos de velocidade de alimentação do arame eletrodo (corrente de soldagem) como em termos de tensão média de soldagem. No modo goticular ocorreu somente um deslocamento da região para maiores velocidades de alimentação (corrente de soldagem) sem aumento na tensão média de soldagem. Outro fato observado foi a elevação na corrente de transição globular/goticular.

Com a mudança do diâmetro do eletrodo de 1,0 mm para 1,2 mm, conclui-se que ocorreu uma ampliação na região de modo de transferência globular. Outro fato também observado foi o aumento da corrente de transição globular/goticular.

Verificou-se uma dependência do consumo em relação ao tipo de gás e ao diâmetro do eletrodo.

Agradecimentos

Agradecemos à FAPEMIG e ao PADCT III - CEMAT pelo suporte financeiro, e à White Martins pelo fornecimento de gases.

REFERÊNCIAS

- AWS, 1991, Welding Handbook, Welding Processes, American Welding Society, vol. 2, 8ª edição, USA.
- Figueiredo, K. M. & Ferraresi, V. A., 2000, “Influência do tipo de gás de proteção nos modos de transferência metálica na soldagem MIG de alumínio”, In: Anais do XXVI ENTS, 03 a 06 de setembro, Curitiba, Paraná, Brasil.
- Lesnewich, A., 1958, "Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc Welding: Part I - Control of Electrode Melting Rate", Welding Journal, August, pp. 343s-353s.
- Norrish, J. & Richardson, I.F., 1988, “Back to Basics: Metal Transfer Mechanisms”, Welding & Metal Fabrication, jan.-fev., pp. 17-22.
- Quites, A.M. e Dutra, J.C., 1979, "Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico", EDEME, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.
- Scotti, A.; Clark, D.E. & Kenney, K., 1999, “Mapeamento da Transferência Metálica em MIG com Aço Inoxidável”, In: Anais do VI Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável, 04 e 05 de maio, São Paulo, Brasil.
- Vilarinho, L.O., 2000, “Desenvolvimento e Avaliação de um Algoritmo Alternativo para Soldagem MIG Sinérgica de Alumínio”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia, 01 de Fevereiro.

MAPS OF METAL TRANSFER IN THE ALUMINUM MIG WELDING

Abstract. *Among the aluminum welding processes, the MIG process can be easily made self-operating, it has high productivity and great versatility regarding the material type and thickness in welding. The possibility to change the transfer mode to adapt to different thickness, joints types, among other aspects, another important and attractive feature. However, little is known about the transfer modes in the aluminum MIG welding. For this reason, in this study an analysis about the metal transfer modes in the aluminum welding was proposed. The objective of this study was to generate maps that could identify the metal transfer modes and their regions due to the shielding gas and the wire diameter. The experimental procedure was the execution of welding in aluminum plate in a flat position with the electronic source in a constant voltage and with variation of the voltage as well as the wire feed speed. Studies with wire of 1.0 mm and pure Ar and mixture Ar + 25% He and wire of 1.2 mm with pure Ar were carried out. The methodology used was the laser Shadowgraphy combined with high speed recording machine. Therefore, it was possible to design the maps when four metal transfer modes and their respective transition zones were determined.*

Keywords: *MIG welding, Aluminum, Metal transfer, Transition current, Melting rate*