

# Influência dos Teores de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> na Corrente de Transição Globular-Goticular Utilizando Misturas a Base de Argônio Durante a Soldagem GMAW de Arame ER70S-6

(The Influence of the CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> Content on Globular-Spray Transition Current when Using Argon-Base Blends in GMAW of ER70S-6 Wire)

André Alves de Resende<sup>1</sup>; Flávio Keocheguerians<sup>2</sup>; Louriel Oliveira Vilarinho<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Uberlândia, LAPROSOLDA, Uberlândia/MG, Brasil, aaresende@mecanica.ufu.br

<sup>2</sup> Air Products, São Paulo/SP, Brasil, KEOCHEF2@airproducts.com

<sup>3</sup> Universidade Federal de Uberlândia, LAPROSOLDA, Uberlândia/MG, Brasil, vilarinho@mecanica.ufu.br

## Resumo

A maneira com que o metal é transferido da ponta do eletrodo a poça de fusão afeta a produtividade e a estabilidade do processo MIG/MAG, bem como as características geométricas do cordão de solda obtido. Dentre os modos de transferência metálica, um parâmetro muito importante de se conhecer é o valor da corrente de transição globular-goticular, que ocorre em uma estreita faixa de corrente e altera consideravelmente a frequência e o diâmetro das gotas transferidas, conseqüentemente, a estabilidade do processo. O valor desta corrente de transição foi investigado experimentalmente usando técnicas de filmagem a alta velocidade juntamente com uma nova metodologia proposta para identificação da corrente de transição para misturas binárias e ternárias de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> a base de Ar.

**Palavras-chave:** *Transferência metálica, Corrente de transição, Gases de proteção.*

**Abstract:** *The way in which the metal is transferred from the electrode tip to the weld pool affects the MIG/MAG process productivity and stability, as well as the weld bead geometrical characteristics. Among the modes of metal transfer, a very important parameter to know is the value of globular-spray transition current, which occurs in a narrow band of current and changes considerably the frequency and diameter of the transferred drops, therefore, the process stability. The transition current was experimentally investigated using techniques of at high speed video camera associated with a new proposed methodology for transition current identification applied to binary and ternary mixtures of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> the basis of Ar.*

**Keywords:** *Metal transfer, Transition current, Shielding gases.*

## 1. Introdução

A maneira com que o material é transferido da ponta do eletrodo consumível para a poça de fusão tem grande influência sobre o desempenho do processo MIG/MAG, isto afeta a estabilidade do processo, a geração de respingos, a qualidade da solda e a capacidade de realização de soldas fora da posição plana [1]. Diferentes modos de transferência metálica podem ser observados no processo MIG/MAG e estão associados a fatores, tais como os parâmetros elétricos (tensão, corrente e polaridade), materiais, gases, distância de bico de contato peça (DBCP), características da fonte, etc. [2], que vão determinar a quantidade de calor que é transferido à poça de fusão, o tamanho e o perfil da zona fundida e zona afetada pelo calor, bem como a penetração do cordão de solda. A seleção desses parâmetros

deve ser feita então de maneira que o metal seja transferido de forma adequada e o processo ocorra de forma estável.

Dentre os diferentes modos de transferência metálica, um parâmetro prático de grande importância e uso na tecnologia da soldagem é o valor da corrente de transição globular-goticular, uma vez que o modo de transferência globular possui grande instabilidade e o menor nível de corrente empregado (o que justificaria sua aplicação em chapas finas) pode ser obtido por outros modos de transferência mais estáveis, como o curto-circuito natural e pulsada controlada. Neste sentido é possível encontrar na literatura valores para esta corrente de transição globular-goticular (lembrando que também há a transição goticular-elongamento e elongamento-rotacional) para diferentes materiais e gases de composição binária [3-6]. Entretanto, uma avaliação mais atual se faz necessária com base na técnica de perfilografia (shadowgrafia) sincronizada [7], com uso de recursos computacionais avançados e com parâmetros de identificação do modo de transferência, que contemplem as recentes revisões do IHW [8-10] para definição destes modos de transferência metálica.

Vilarinho [2] fez uma recente revisão da classificação dos

---

(Recebido em 09/04/2008; Texto Final em 22/01/2009).

modos de transferência metálica, englobando as revisões do IIW [8-10] e uso de filmagem em alta velocidade de todos os modos de transferência propostos. Estas filmagens foram conduzidas com o arame utilizado neste trabalho (ER 70S-6) e os aspectos abordados na revisão do trabalho de Vilarinho [2] são aqueles adotados aqui, por entender que são os mais recentes encontrados na literatura.

É possível encontrar na literatura artigos que tratam da influência do gás de proteção na transferência metálica [3-6], onde se apresenta a tendência de aumento da corrente de transição e menor estabilidade da transferência com o aumento do teor de CO<sub>2</sub> na mistura a base de Ar para a soldagem de aços ao carbono. Estes artigos compreendem vários ensaios e procuram lidar com os aspectos fundamentais da transferência. Desta forma, depende-se muito tempo para sua execução e análise. Neste sentido, procurou-se uma metodologia que pudesse averiguar de forma muito específica a transição globular-goticular com um pequeno número de ensaios e de fácil análise. Com relação aos valores das correntes de transição em si, é também possível encontrar valores tabelados [6], mas numa faixa mais estreita de gases de proteção. Assim, a importância do desenvolvimento desta metodologia é ainda mais realçada.

Por fim, outra abordagem existente na literatura seria o cálculo da corrente de transição. Para tanto diferentes modelos foram propostos na literatura, indo desde modelos analíticos mais simples (Teoria do Balanço Estático de Forças [11] e Teoria da Instabilidade Pinch [12, 13]), passando por modelos de média complexidade resolvida (Teoria da Força do Plasma [14], Teoria da Velocidade Crítica [15]) e Teoria do Balanço Dinâmico de Forças [16]) até modelos mais complexos, totalmente computacionais (Método dos Volumes de Fluido [17]). Embora estas abordagens de modelos teóricos tenham contribuído para o melhor entendimento do fenômeno de transferência metálica, estas ainda não conseguem englobar todas as variáveis existentes no sistema experimental, sendo, portanto, limitadas.

## 2. Materiais e Métodos

Um conjunto de experimentos foi proposto e executado, com o intuito de verificar as influências da composição do gás proteção sobre os modos de transferência metálica na soldagem MIG/MAG, e principalmente, na corrente de transição globular-goticular. Na realização de tais experimentos, foram utilizadas uma tocha comercial refrigerada a água e uma fonte eletrônica multiprocessos do tipo chaveada no secundário. A fonte foi programada para trabalhar no modo MIG/MAG tensão constante. Neste modo, regula-se o valor da tensão e da velocidade de alimentação, sendo a corrente de soldagem resultante do balanço térmico na ponta do eletrodo, dependendo, assim, das características do arco e do arame utilizado. A tensão de referência para cada experimento foi ajustada, de tal forma que o comprimento do arco permanecesse em torno de 5 mm (o comprimento do arco era monitorado diretamente na tela de um monitor, que reproduzia as imagens obtidas de filmagens a alta velocidade dos fenômenos que acontecem no arco de solda pela técnica “Perfilográfica”, que será descrita a seguir).

O arame-eletrodo utilizado no ensaio foi da classe AWS ER70S-6, de diâmetro 1,2 mm. Utilizou-se como gás de proteção as misturas à base de argônio, variando-se os teores de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>, com uso de um misturador de gases e de um analisador ternário. Foram realizadas soldagens com misturas binárias (Ar+CO<sub>2</sub> e Ar+O<sub>2</sub>) e misturas ternárias (Ar+CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>), conforme mostrado na Tabela 1. A vazão utilizada em todos os testes foi de 13 l/min e a DBCP foi fixada em 18 mm. Para efeito de comparação, todos os ensaios foram realizados como simples deposição sobre chapa. Os cordões foram confeccionados sobre chapas de aço ao carbono ABNT 1020 e escovado de dimensões 250 x 25,4 x 9,5 mm com uma velocidade de deslocamento da tocha de 40 cm/min.

Tabela 1. Valores ajustados para os experimentos.

Ensaio	Gás de proteção	Velocidade de alimentação [m/min]	Tensão de referência [V]
01	Ar+2%CO <sub>2</sub>	5, 6, 7 e 8	32
02	Ar+8%CO <sub>2</sub>	5, 6, 7 e 8	33
03	Ar+15%CO <sub>2</sub>	6, 7, 8 e 9	37
04	Ar+25%CO <sub>2</sub>	8, 9, 10 e 11	40
05	Ar+35%CO <sub>2</sub>	10, 11, 12 e 13	44
06	Ar+2%O <sub>2</sub>	3, 4, 5 e 6	29
07	Ar+5%O <sub>2</sub>	3, 4, 5,3 e 6	29
08	Ar+8%O <sub>2</sub>	3 a 7	29
09	Ar+13%CO <sub>2</sub> +3%O <sub>2</sub>	6 a 9	38
10	Ar+8%CO <sub>2</sub> +2%O <sub>2</sub>	5 a 8	34

Com o intuito de tornar mais dinâmica a determinação da corrente de transição, a velocidade de alimentação (fonte em modo tensão constante) foi variada em quatro patamares (como nas Figuras 2 a 6 e 8 a 12) durante a soldagem de uma única chapa de teste. Os intervalos de tempo mostrados nas Figuras 2 a 6 e 8 a 12 para cada patamar foram suficientes para a estabilização do arco e da transferência metálica, ambos observados pelos sistema de filmagem. Ressalta-se que foi mantida a tensão de referência para os patamares, onde o comprimento de arco (que pode ser visualizado pelas Figuras 2 a 6 e 8 a 12) variou menos que 1 mm, conforme o critério de medição de comprimento de arco em função da transferência metálica discutido na Ref. [18]. Este menor comprimento de arco foi obtido na transferência por alongamento, que não é objeto de estudo aqui, já que o foco é a transição globular-goticular. Considera-se assim, que se mantendo a transferência em vôo livre entre globular e goticular, o efeito do aquecimento maior (maior comprimento de eletrodo) foi mínimo neste caso.

Além disto, iniciou com uma corrente menor (para reduzir a influência do aquecimento do eletrodo na transferência de um patamar para outro), que proporcionasse uma transferência ainda do tipo globular, mas já próximo ao valor da corrente de transição. Se os experimentos fossem iniciados com uma corrente maior (já no modo goticular) e fosse diminuindo a corrente, quando chegasse ao modo globular, o eletrodo estaria muito aquecido

e poderia influenciar no modo de transferência. Ressalta-se que não foi encontrada na literatura uma metodologia de trabalho como esta, sendo, portanto, inédita. Para todos os experimentos, foi realizada a filmagem sincronizada concomitantemente com a aquisição dos sinais elétricos de corrente e tensão.

Para visualização da transferência metálica e dos fenômenos correlatos, foi utilizada a técnica Perfilográfica com filmagem digital a alta velocidade com uma taxa de aquisição de 2000 quadros por segundo e como luz de fundo, laser He-Ne com comprimento de onda de 632,2  $\mu\text{m}$ . A técnica consiste basicamente em incidir sobre a região de interesse, próximo ao arco de soldagem (pode incluir tocha, eletrodo, gotas, cordão e chapa), um feixe laser e posicionar na seqüência um conjunto de filtros para eliminar parcialmente a luz produzida pelo arco e em seguida uma câmera para filmagem em alta velocidade. O esquema do sistema laser-óptico utilizado esta esquematizado na Figura 1.

Para se permitir visualizar também o arco, é preciso penalizar a definição das gotas em formação e transferência, através da intensidade dos filtros ópticos usados. Para correlacionar a variação da tensão e corrente com a formação e destacamento das gotas, os sinais elétricos (corrente e tensão) serão sincronizados com os quadros de filmagem. Maiores detalhes quanto à técnica de visualização em alta velocidade (Perfilografia) podem ser encontrados em [7].

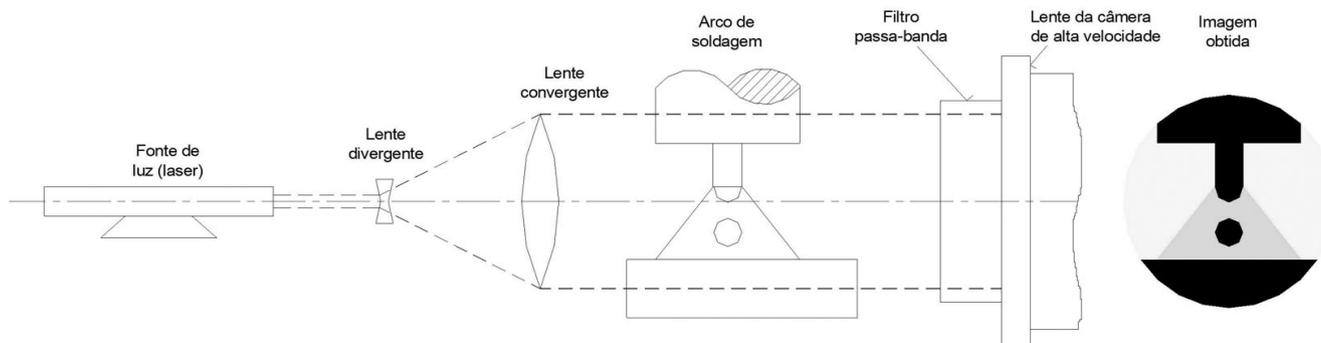


Figura 1. Princípio da Perfilografia aplicada à soldagem [19].

### 3. Resultados e Discussão

Na Tabela 2 têm-se os valores de tensão e corrente médios e RMS monitorados durante os ensaios. Nesta mesma tabela, estão identificadas em **negrito**, para cada experimento, as respectivas correntes de transição globular-goticular. As correntes de transição estão realçadas em **negrito** na Tabela 2, onde a transferência metálica associada ao formato de onde pode ser visualizada para cada ensaio nas Figuras 2 a 6 e 8 a 12. Foi adotada como corrente de transição globular-goticular, a corrente a partir da qual o diâmetro de gota é menor que 1,25 vezes o diâmetro do eletrodo, critério este definido pelo IIW [10]. Assim, o patamar de corrente onde o diâmetro da gota foi menor que 1,25 vezes o diâmetro do eletrodo foi adotado como a transição.

A faixa de corrente de transição apresentada em tabelas na literatura [6] é bastante ampla e engloba os valores aqui obtidos.

Considera-se que esta amplitude de faixa deve-se a tolerâncias de produção na bitola dos arames, na composição dos gases de proteção e na sensibilidade/acuracidade da técnica utilizada. Esta variação intrínseca do processo de soldagem realça ainda mais a importância do trabalho, pois para uma dada condição a determinação da corrente de transição globular-goticular é fácil, rápida e segura de ser alcançada pela metodologia aqui apresentada.

Nos ensaios apresentados nas Figuras 4 a 6 correspondem às misturas binárias a base de  $\text{CO}_2$  ( $\text{Ar}+\text{CO}_2$ ), é possível observar que o aumento do teor de  $\text{CO}_2$  na mistura aumenta o valor da corrente de transição globular-goticular, bem como aumenta as instabilidades do arco e da transferência metálica, refletindo em uma elevação na quantidade de ruídos proporcional ao aumento do teor de  $\text{CO}_2$  na mistura. Para a mistura com 35% de  $\text{CO}_2$ , (correspondente a Figura 6) a transição não ocorreu de forma característica como para as outras porcentagens, o que

pode indicar que existe um limite para a porcentagem de CO<sub>2</sub> para que ocorra a transição globular-gotícular como definido pelo IIW [10]. Na Figura 7, é apresentada uma seqüência de quadros correspondentes à mistura 35% de CO<sub>2</sub>, no qual a gota se destaca da ponta do eletrodo, e na trajetória ate a poça de fusão, ocorre um movimento de rotação da gota que faz com

que ele toque simultaneamente a poça e o eletrodo, provocando uma seqüência de curtos circuitos. Este fenômeno é observado várias vezes ao longo do patamar de 9 m/min de velocidade de alimentação (Figura 6). Esta característica ressalta a dificuldade em se caracterizar o momento da transição globular-gotícular para misturas com maiores teores de CO<sub>2</sub>.

Tabela 2. Valores monitorados para os experimentos.

Valores Monitorados	Ensaio										
	01 (Ar + 2%CO <sub>2</sub> )	02 (Ar + 8%CO <sub>2</sub> )	03 (Ar + 15%CO <sub>2</sub> )	04 (Ar + 25%CO <sub>2</sub> )	05 (Ar + 35%CO <sub>2</sub> )	06 (Ar + 2%O <sub>2</sub> )	07 (Ar + 5%O <sub>2</sub> )	08 (Ar + 8%O <sub>2</sub> )	09 (Ar + 13%CO <sub>2</sub> + 3%O <sub>2</sub> )	10 (Ar + 8%CO <sub>2</sub> + 2%O <sub>2</sub> )	
1	Vmed[V]	29,5	30,2	34,6	37,5	41,2	27,1	27,4	27,4	35,9	31,3
	Vrms[V]	30,3	31,2	34,9	37,6	41,3	27,8	28,0	28,0	36,1	32,2
	Imed [A]	212	207	240	275	321	151	144	144	251	214
	Irms [A]	214	208	240	275	322	156	146	147	252	216
2	Vmed[V]	29,9	30,6	34,5	37,5	41,3	26,8	26,8	26,6	36,0	31,9
	Vrms[V]	30,2	31,3	34,7	37,6	41,3	28,1	27,9	28,1	36,1	32,3
	Imed [A]	246	229	265	295	344	200	183	202	293	244
	Irms [A]	246	230	265	295	344	204	185	204	293	244
3	Vmed[V]	29,8	30,7	34,6	37,5	41,3	26,6	26,6	26,6	35,9	31,8
	Vrms[V]	30,0	30,9	34,7	37,6	41,3	28,1	28,0	28,1	36,0	32,0
	Imed [A]	261	252	281	316	358	235	209	232	305	269
	Irms [A]	261	252	281	316	358	235	210	232	305	269
4	Vmed[V]	29,7	30,7	34,6	37,5	41,3	27,3	26,5	26,9	35,9	31,8
	Vrms[V]	30,0	30,9	34,7	37,6	41,3	27,7	28,0	27,8	36,0	32,0
	Imed [A]	279	274	301	332	374	258	228	246	325	290
	Irms [A]	279	274	301	332	374	258	228	246	325	290

Nota: Os valores em destaques correspondem às correntes de transição. Vmed = Tensão média; Vrms = Tensão rms; Imed = Corrente média e Irms = corrente rms.

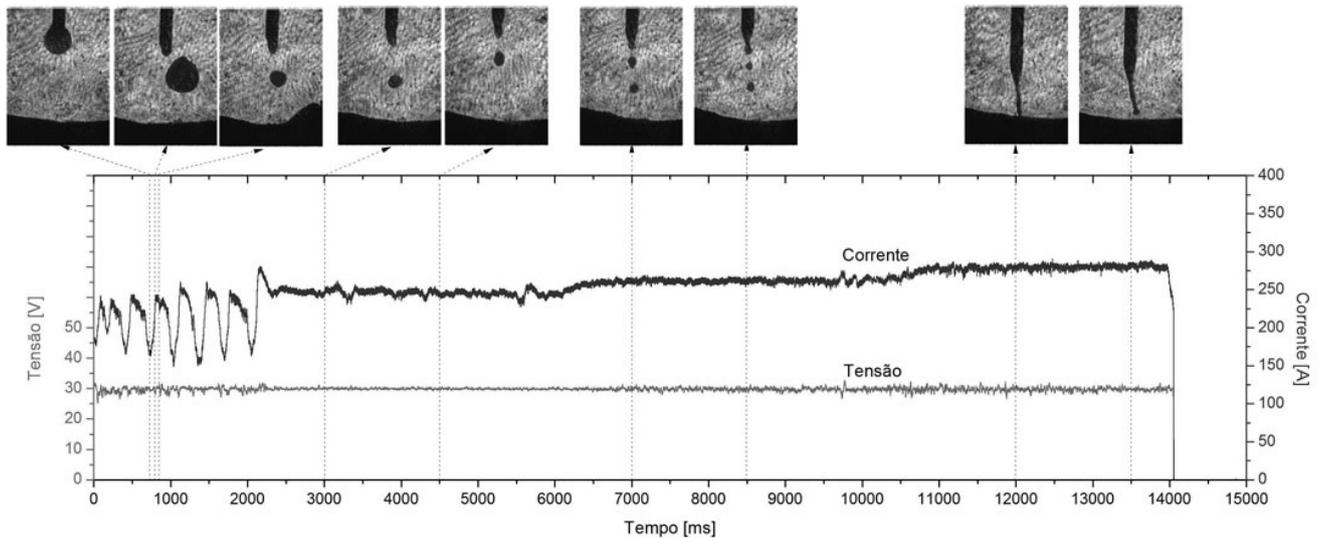


Figura 2. Ensaio 01. Gás de proteção: Ar+2%CO<sub>2</sub>. Tensão de referência 32 V. Transição mostrada no 4º frame.

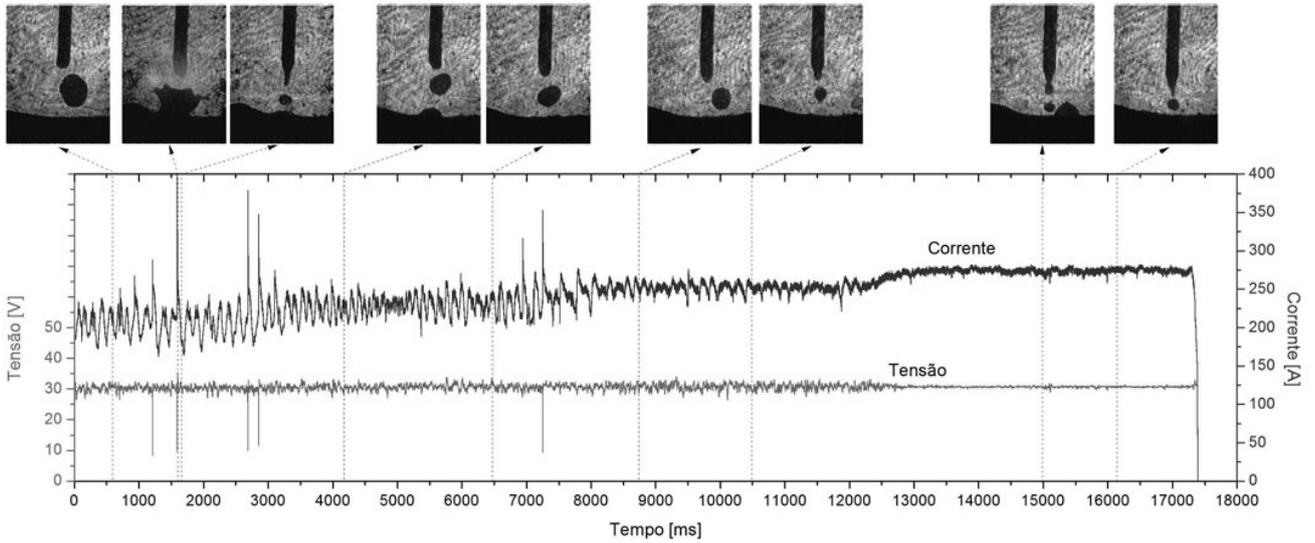


Figura 3. Ensaio 02. Gás de proteção: Ar+8%CO<sub>2</sub>. Tensão de referência 33 V. Transição mostrada no 8º frame.

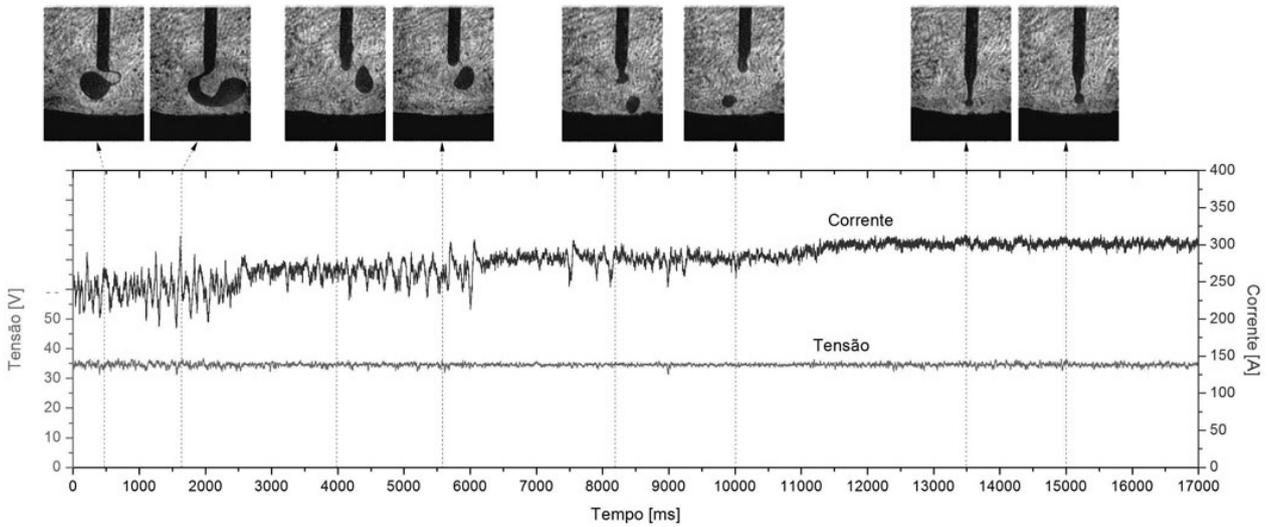


Figura 4. Ensaio 03. Gás de proteção: Ar+15%CO<sub>2</sub>. Tensão de referência 37 V. Transição mostrada no 6º frame.

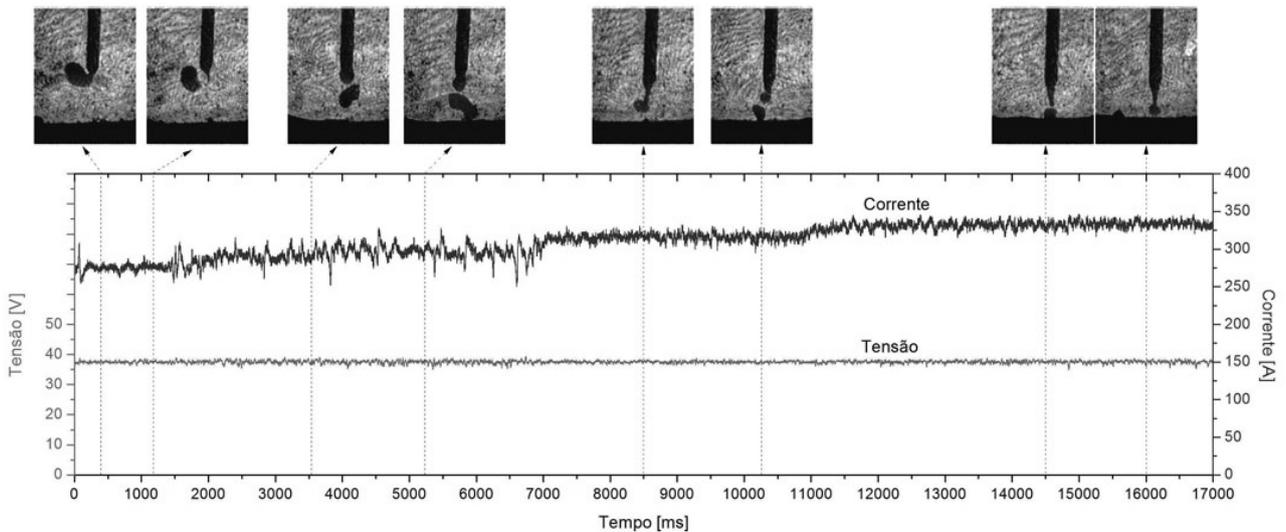


Figura 5. Ensaio 04. Gás de proteção: Ar+25%CO<sub>2</sub>. Tensão de referência 40 V. Transição mostrada no 5º frame.

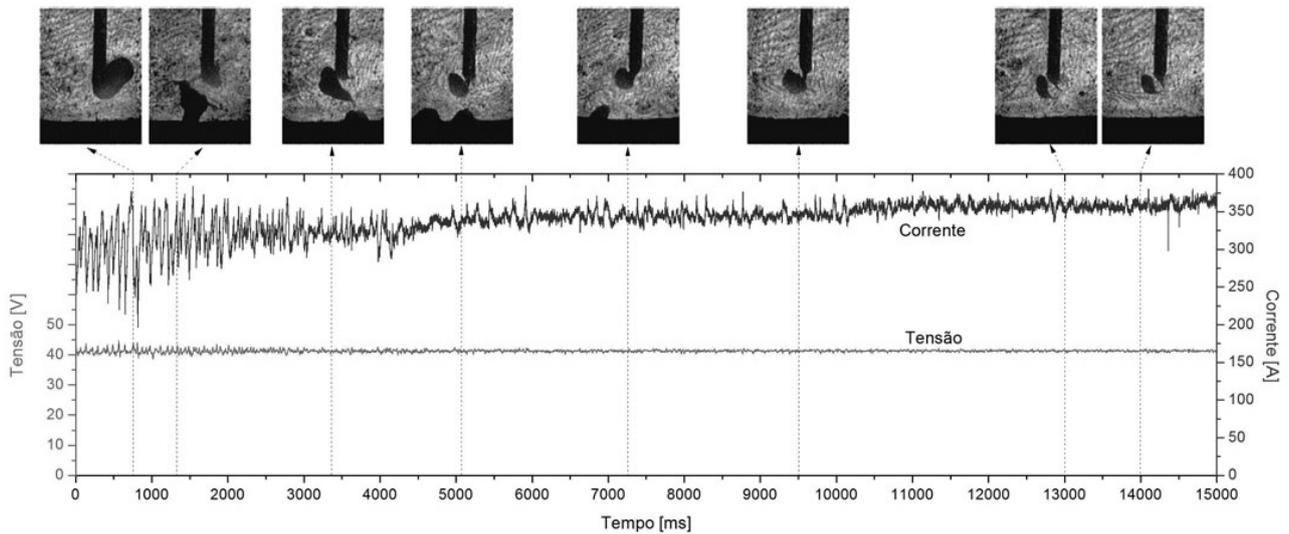


Figura 6. Ensaio 05. Gás de proteção: Ar+35%CO<sub>2</sub>. Tensão de referência 44 V. Transição mostrada no 7º frame.

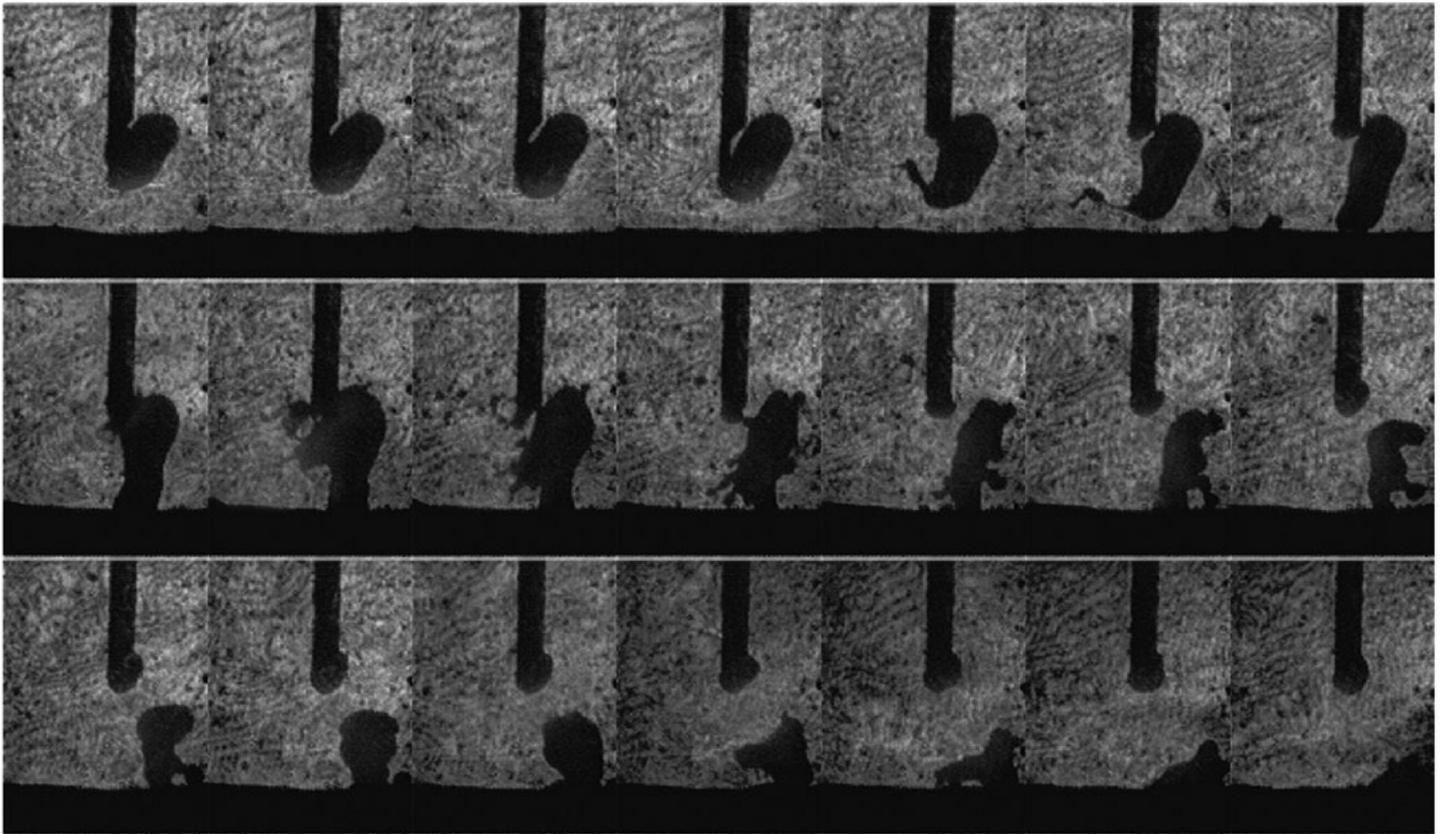


Figura 7. Exemplo de curto-circuito que ocorre entre a gota e o eletrodo (quadros 262 a 282, ou seja, entre os tempos 131 e 141 ms – Figura 6).

Nos ensaios apresentados nas Figuras 8 a 10, correspondentes às misturas binárias a base de O<sub>2</sub> (Ar+O<sub>2</sub>), quando o nível de corrente aproxima da transição, ocorrem instabilidades na transferência e no tamanho da gota, provocando o destacamento de gotas de diâmetro inferior e superior a 1,25 vezes o diâmetro do eletrodo, que é refletido nos oscilogramas, pelos picos de corrente e tensão, no entanto, quando é atingido o valor da transição, a transferência ocorre de maneira estável e a amplitude dos picos de corrente e tensão reduzem consideravelmente.

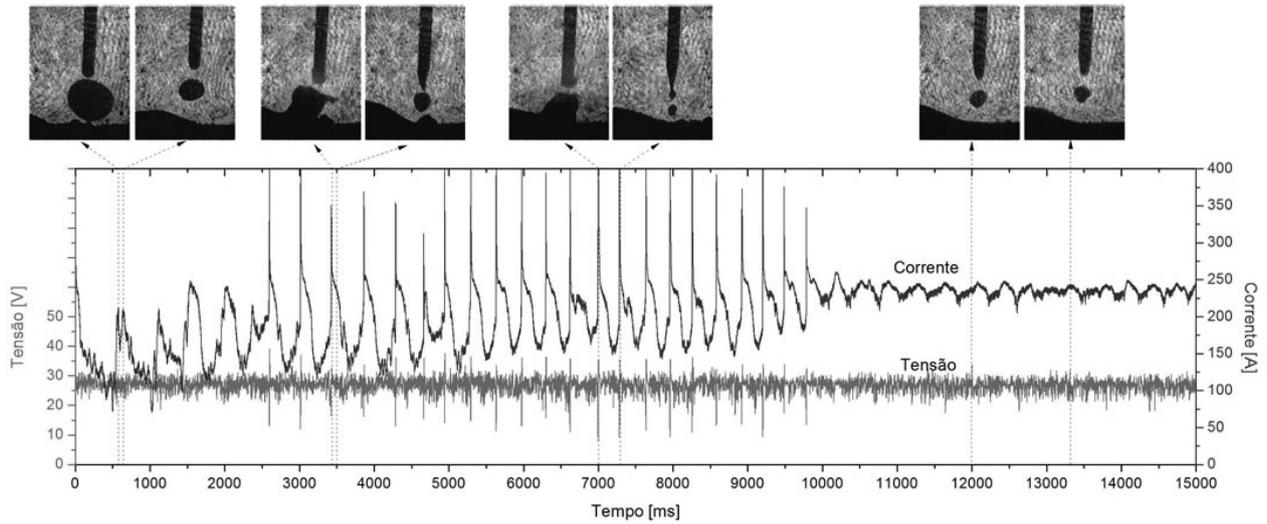


Figura 8. Ensaio 06. Gás de proteção: Ar+2%O<sub>2</sub>. Tensão de referência 29 V. Transição mostrada no 7º frame.

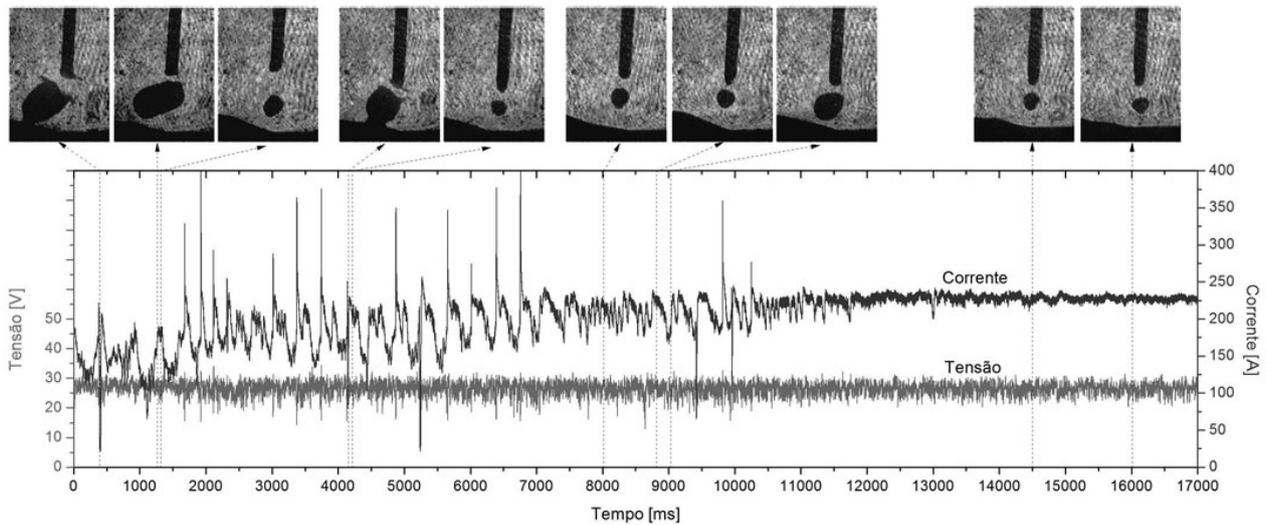


Figura 9. Ensaio 07. Gás de proteção: Ar+5%O<sub>2</sub>. Tensão de referência 29 V. Transição mostrada no 9º frame.

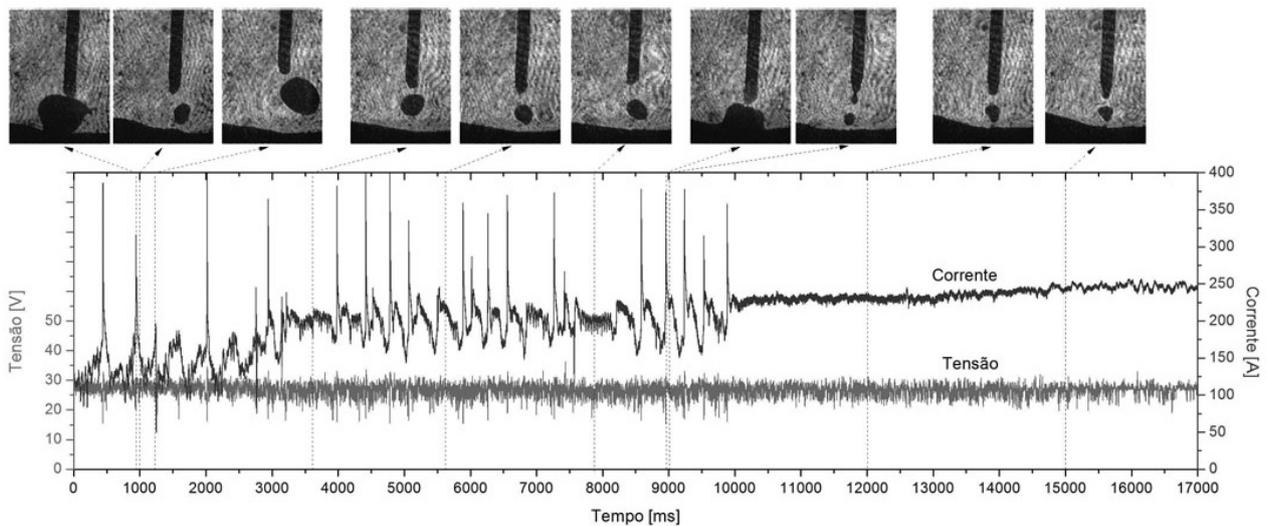


Figura 10. Ensaio 08. Gás de proteção: Ar+8%O<sub>2</sub>. Tensão de referência 29 V. Transição mostrada no 9º frame.

Nos ensaios apresentados nas Figuras 11 e 12, correspondentes às misturas ternárias a base de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> (Ar + CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>), a transição globular-goticular pode ser mais facilmente identificada, se comparada às outras misturas. Mas devido à presença de CO<sub>2</sub>, ainda é possível observar o fenômeno de repulsão da gota, similar ao que ocorreu para a mistura binária a base de CO<sub>2</sub>.

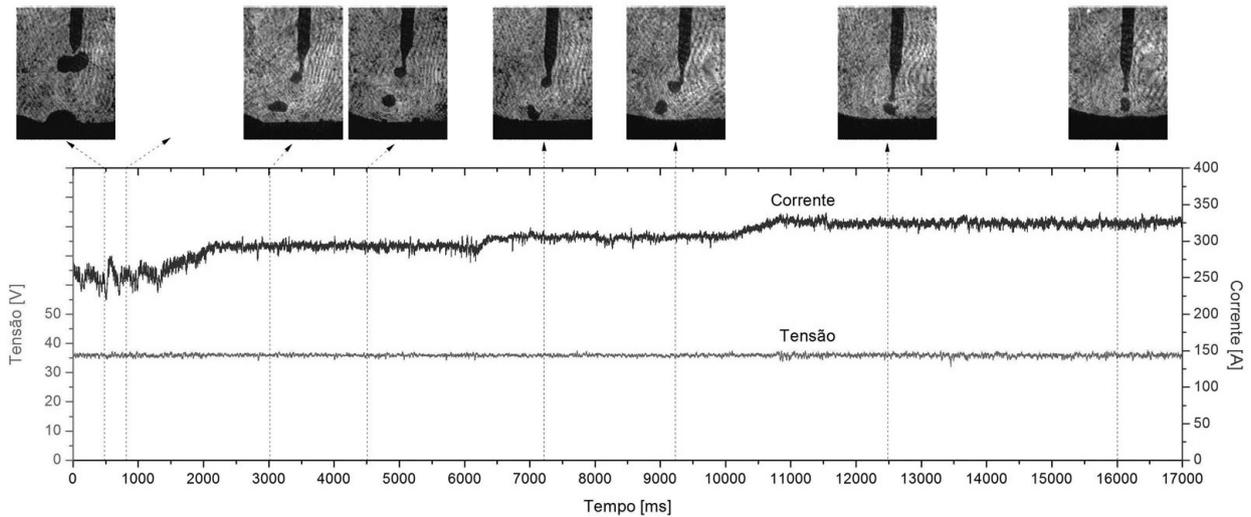


Figura 11. Ensaio 09. Gás de proteção: Ar+13%CO<sub>2</sub>+3%O<sub>2</sub>. Tensão de referência 38 V. Transição mostrada no 3º frame.

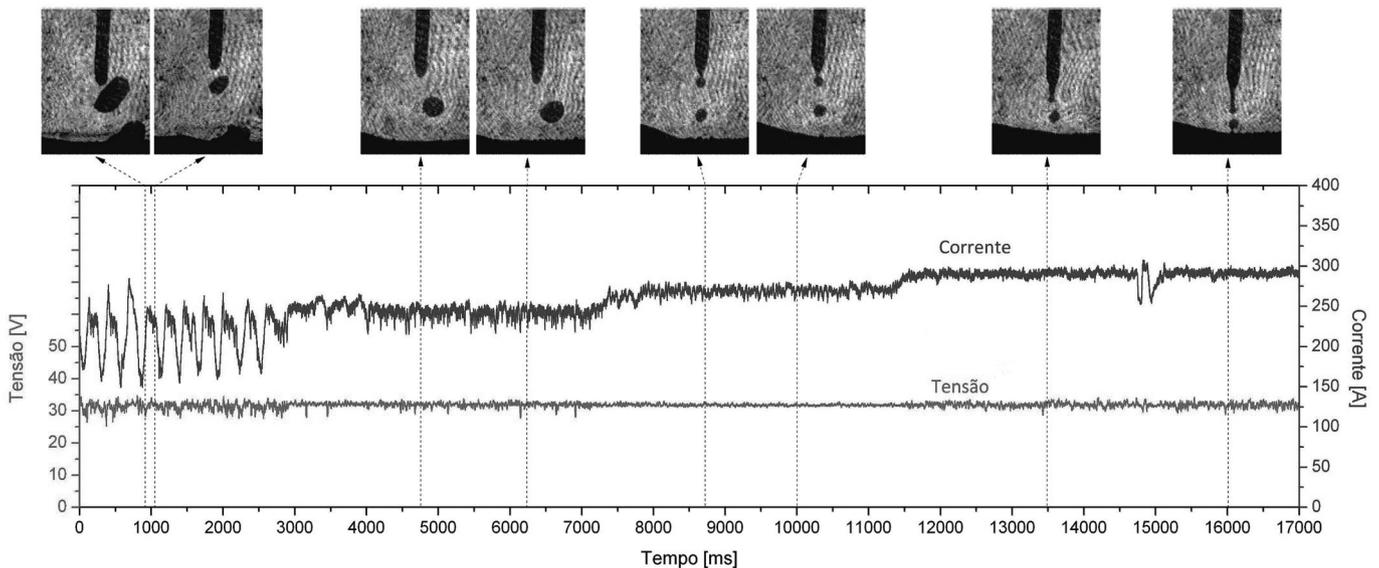


Figura 12. Ensaio 10. Gás de proteção: Ar+8%CO<sub>2</sub>+2%O<sub>2</sub>. Tensão de referência 34 V. Transição mostrada no 5º frame.

Com o objetivo de melhor visualizar a variação da corrente de transição para as diferentes misturas binárias (Ar+CO<sub>2</sub> e Ar+O<sub>2</sub>) ternárias (Ar+CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>), os correspondentes valores em negrito da Tabela 2 foram dispostos na Figura 13.

Os resultados (Figura 13) indicaram que o nível da corrente de transição aumenta com o aumento do teor de CO<sub>2</sub> na mistura binária até 25%, sendo que acima de 35% não foi possível obter um modo claramente goticulado como definido pelo IIW (diâmetro da gota até 1,25 vezes o diâmetro do eletrodo [10]). Pode também ser observada uma tendência de repulsão e distorção da gota, para correntes próximas, mas ainda inferiores a corrente de transição, que se torna mais evidente com o aumento do teor de CO<sub>2</sub>, e para uma mesma mistura, o efeito é reduzido com o aumento da corrente (Figuras 2 a 6).

Para a mistura binária Ar+O<sub>2</sub>, o aumento do teor de O<sub>2</sub> reduz o nível da corrente de transição para teores até 5%. Após este valor, a corrente de transição volta a subir. Já para as misturas ternárias, houve uma boa correlação ao se somar as porcentagens de CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> e comparar o nível da corrente de transição àquele obtido utilizando-se uma mistura binária de valor de porcentagem de mistura equivalente em CO<sub>2</sub>. Já a utilização de um fator de compensação proposto pela literatura (%O<sub>2</sub> = 2\*%CO<sub>2</sub>) [20-21] apresentou uma pior correlação, como mostrado na Figura 13. Esta compensação foi proposta inicialmente na literatura [20] com o objetivo de avaliar efeitos metalúrgicos do gás de proteção no metal de solda, ou seja, ela deve ser utilizada com cuidado. E, no contexto deste trabalho, apresentou limitações da sua aplicação.

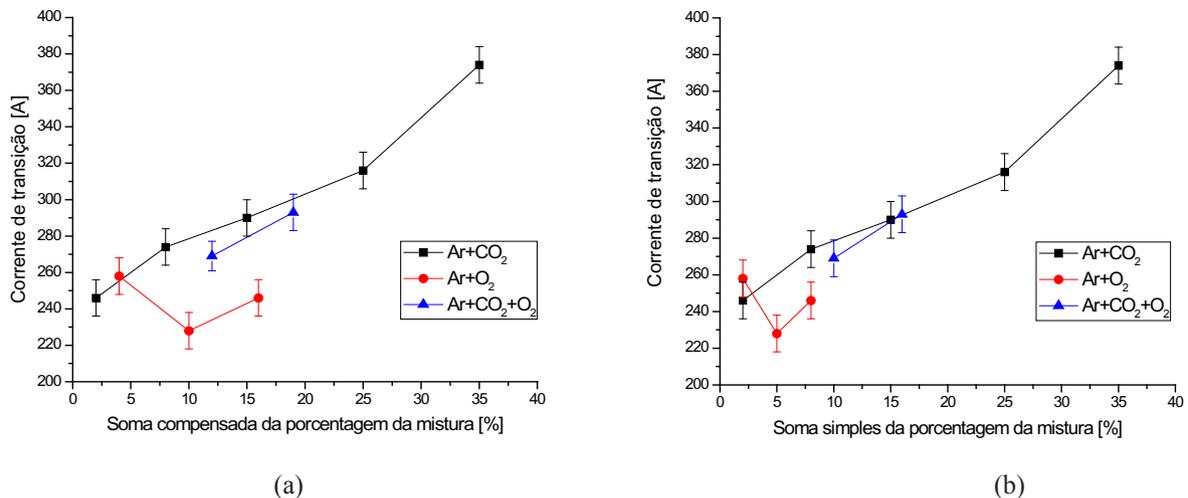


Figura 13. Corrente de transição em função das porcentagens da mistura, como soma compensada (a) e como soma simples (b). Ver texto para maiores detalhes.

#### 4. Conclusões

Com base nos resultados apresentados e dentro da faixa investigada é possível concluir que:

- A metodologia proposta é exequível e se traduz numa facilidade para levantamento e mapeamento dos valores de corrente de transição;
- Misturas binárias com teores de CO<sub>2</sub> de 35% estão num patamar claramente superior ao que é possível obter um modo de transferência claramente goticular, assim como definido pelo IIW [10];
- O fenômeno de repulsão e distorção da gota, que ocorre para correntes próximas, mas ainda inferiores a corrente de transição, que se torna mais evidente com o aumento do teor de CO<sub>2</sub>, e é reduzido com o aumento da corrente;
- Houve uma boa correlação ao se somar as porcentagens de CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> e comparar o nível da corrente de transição àquele obtido utilizando-se uma mistura binária de valor de porcentagem de mistura equivalente em CO<sub>2</sub>.

#### 5. Agradecimentos

Os autores agradecem à AirProducts do Brasil, ao CNPq, à Fapemig e ao Laprosolda/UFU pelo apoio.

#### 6. Referências

- [1] NORRISH, J. *Advanced Welding Process*. IOP Publishing LTD, 1992, 375p.
- [2] VILARINHO, L. O. Modos Fundamentais de Transferência Metálica: Naturais e Controlados. *Revista da Soldagem*, Ano III – n°10, Maio, 2007, pp. 14-19.
- [3] HEALD, P. R. et al. Mapping the Droplet Transfer Modes for an ER100S-1 GMAW Electrode. *Welding Journal*, 1994, pp. 38s-44s.
- [4] SCOTTI, A.; CLARK, D.E. e KENNEY, K. Mapeamento da Transferência Metálica em MIG com Aço Inoxidável. XXIV

CONSOLDA, Fortaleza, 1998, 10p.

- [5] FERRARESI, V.A.; FIGUEIREDO, K.M. and ONG, T.H. Metal Transfer in the Aluminum Gas Metal Arc Welding. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.*, 25(3), 2003, pp. 229-234.
- [6] AWS, *Welding Handbook: Welding Processes*, Vol. 2, 8a Ed., 1996, pp. 116.
- [7] BÁLSAMO, P. S. S. et al. Development of an Experimental Technique for Studying Metal Transfer in Welding: Synchronized Shadowgraphy. *Int. J. for the Joining of Materials*, 12(1), 2000, pp. 48-59.
- [8] PONOMAREV, V.; SCOTTI, A. and SLIVINSKIY, A. Atlas of MIG/MAG Welding Metal Transfer Modes, IIW Doc. XII-1771 to 1775-03, Bucharest, 2003.
- [9] NORRISH, J. A Review of Metal Transfer Classification in Arc Welding, IIW Doc. XII-1769-03, 2003.
- [10] IORDACHESCU, D.; LUCAS, W. and PONOMAREV, V. Reviewing the “Classification of Metal Transfer”. IIW Doc. No. XII-1888-06, 2006, 10p.
- [11] WASZINK, J. H. and GRAAT, L. H. J., Experimental Investigation of the Forces Acting on a Drop of Weld Metal, *Welding Journal*, April, 1983, pp. 108s-116s.
- [12] ALLUM, C.J., Metal Transfer in Arc Welding as a Varicose Instability: I. Varicose Instabilities in a Current-carrying Liquid Cylinder with Surface Charge, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 18, 1985, pp. 1431-1446.
- [13] LOWKE, J.J. Simple Model for the Transition Current from Globular to Spray Transfer in Gas Metal Arc Welding. *Australasian Welding Journal*, 42, First Quarter, 1997, pp. 32-35.
- [14] KIM, Y-S. and EAGAR, T. W., Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding, *Welding Journal*, June, 1993, pp. 269s-278s.
- [15] WASZINK, J. H. and VAN DEN HEUVEL, G. J. P. M., Heat Generation and Heat Flow in the Filler Metal in GMA Welding, *Welding Journal*, August, 1982, pp. 269s-282s.
- [16] CHOI, J. H.; LEE, J. Y. and YOO, C. D., Dynamic Force Balance Model for Metal Transfer Analysis in Arc Welding, J.

Phys. D: Appl. Phys., 34, 2001, pp. 2658-2664.

[17] WANG, F. et al, Modelling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding, J. Phys. D: Appl. Phys., 36, 2003, pp. 1143–1152.

[18] RODRIGUES, C.E.A.L. Avaliação Cinemática e Dinâmica da Transferência Metálica na Soldagem MIG/MAG. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2007, 280p.

[19] VILARINHO, L.O., Desenvolvimento e avaliação de um algoritmo alternativo para soldagem MIG sinérgica de alumínio. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2000. 111p.

[20] STENBACKA, N. and PERSSON, K.-A. Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding. Welding Journal. Nov., 1989, pp. 41-47.

[21] CHILUNG, W. et al. Effects of the arc luminous region shape on metal transfer mode in MIG welding. The 4<sup>th</sup> International Symposium of the Japan Welding Society, Osaka, Nov. 1982, pp. 31-36.