



IMPLEMENTAÇÃO DO PROCESSO MIG PULSADO PARA SOLDAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL DE COMPONENTE AUTOMOTIVO – PARTE 1

Moisés L. Lagares Jr.

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica

mllagares@mecanica.ufu.br - Uberlândia, MG, Brasil

Américo Scotti

Pesquisador do CTR - White Martins Gases Industriais e Universidade Federal de Uberlândia

yco@praxair.com – Duque de Caxias, RJ, Brasil

***Resumo.** Neste trabalho é apresentada a primeira parte de uma metodologia para implementação do processo MIG pulsado na cadeia produtiva de uma indústria de autopeças, como meio de minimizar os efeitos dos respingos. Para tanto, o trabalho faz uma análise do desempenho de quatro combinações de dois gases comerciais com dois tipos de arames, quando soldado em junta de materiais dissimilares e com formato não convencional. Para cada combinação, foram feitos testes para determinação do mapa operacional da região de uma gota por pulso, bem como das constantes presentes na equação de previsão de consumo do processo MIG/MAG. Também foram abordados e discutidos os efeitos do gás e arame na queda de tensão total (eletrodo mais arco de soldagem) e no consumo. Os resultados mostraram que a junta modifica as condições otimizadas nos equipamentos comerciais, justificando a não adequabilidade dos mesmos se usados sem uma seleção correta de parâmetros. Pôde-se também verificar que cada combinação de gás e arame proporciona características específicas de consumo e tensão de arco, o que provavelmente afetará o desempenho do processo (a ser analisado na parte 2).*

***Palavras-chave:** Soldagem, MIG pulsado, produtividade, aço inoxidável, autopeças*

1. INTRODUÇÃO

A indústria de manufatura de autopeças utiliza principalmente o processo MIG/MAG, na forma robotizado ou automatizado e, em raras exceções, na forma semi-automática. Como exemplo de automatização do processo de soldagem (e objeto de estudo deste trabalho), destaca-se a soldagem MIG com transferência por curto-circuito na fabricação de “manifolds” de aço inoxidável (tubulação de escape de gases do motor) para motores do automóvel. Todo o processo de soldagem do “manifold” é automatizado e é feito por um sistema especialmente desenvolvido para este fim. Esta prática, entretanto, pode apresentar altos níveis de respingos, o que interfere negativamente na qualidade final da peça soldada e demanda a operação de limpeza.

Uma solução encontrada para diminuição do nível de respingos foi o uso do processo MIG pulsado. Algumas vantagens deste processo estão na transferência “spray” (goticular)

muito bem controlada, diminuindo acentuadamente o nível de respingos, e na corrente média baixa, o que permite a soldagem de chapas finas e em posições desfavoráveis. Entretanto, o uso otimizado do processo MIG pulsado requer uma combinação de parâmetros bem particular a cada caso. Casos específicos como o da soldagem deste “manifold” (altíssimas velocidades de soldagem, junta dissimilar e formato de difícil acesso) não têm especificações de parâmetros fornecidos pelos fabricantes de equipamentos ou consumíveis.

Desta forma, neste trabalho procura-se desenvolver uma metodologia para determinação dos parâmetros otimizados de soldagem MIG pulsado, visando à implementação do processo na cadeia produtiva da referida Indústria.

2. METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O processo MIG pulsado tem como premissas a transferência de uma gota a cada pulso de corrente (*UGPP*), com diâmetro de gota próximo ao diâmetro do eletrodo (Allum, 1985). Para se conseguir conformidade com tais premissas, é necessário determinar algumas constantes paramétricas que alimentem as rotinas para cálculos dos parâmetros de ajuste para soldagem. Um dos primeiros a ser determinado é o par corrente de pulso (*I_p*) e tempo de pulso (*t_p*) que forneça *UGPP*. Na verdade, o par *I_p* e *t_p* é uma família de valores, para os quais o *I_p* é um valor acima do da corrente de transição do eletrodo (diâmetro e material) para um dado gás e o *t_p* representa o tempo necessário para que a transferência ocorra. Afim de se determinar o par adequado para cada combinação de gás, um levantamento de pares de *I_p* e *t_p* foi feito fixando-se a *I_p* em 295 A (comum aos dois tipos de arames e gases) e variando-se o *t_p* de 1,7 a 6,6 ms (os valores de *I_b* e *t_b* são mantidos invariáveis). Para se determinar em quais pares ocorrem *UGPP*, utilizou-se uma técnica conhecida como shadowgrafia sincronizada (Bálsamo et al., 2000a), na qual uma câmera de vídeo de alta velocidade (2000 quadros/s) filma a projeção do eletrodo e peça durante a soldagem, através do uso de um laser e um conjunto de filtros. Um programa de computador sincroniza as imagens com os sinais de corrente e tensão, podendo-se garantir o momento do destacamento das gotas.

Como dito, a determinação dos parâmetros de pulso é dependente da junta. A junta a ser soldada (tal como ocorre na Indústria) constitui-se de um tubo encaixado ao furo de uma flange. A solda é feita no interior da flange, o que impede a filmagem do arco elétrico. Não sendo possível realizar a solda nas mesmas condições da junta real, propôs-se uma junta similar, como mostrada na Fig. 1. Esta junta é constituída de uma chapa de aço inoxidável AISI 409 (1,5 x 52 x 150 mm) sobreposta a uma chapa de aço ABNT 1020 (10 x 62 x 150 mm). Conforme a figura, as chapas são posicionadas de modo que na região de solda mantenha a mesma dimensão da junta real. Sendo assim esta junta pode ser considerada com sendo uma junta similar à da Indústria, de raio infinito. Todas as soldas foram realizadas neste tipo de junta.

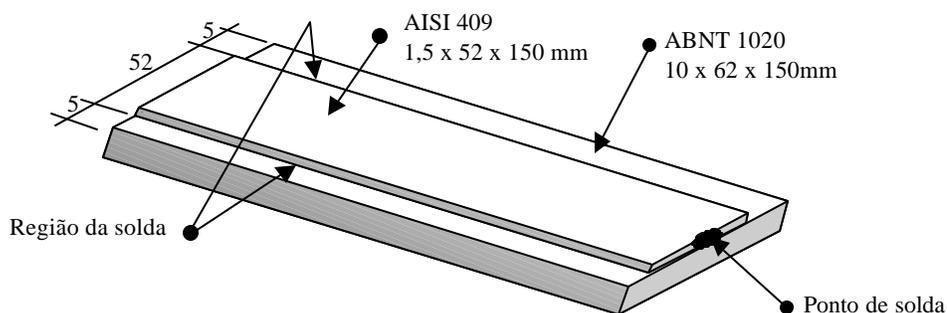


Figura 1 - Esquema com dimensões em milímetros do corpo de prova utilizado.

Os consumíveis utilizados nos experimentos estão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1- Caracterização dos consumíveis relacionados a cada ensaio.

Ensaio	Gás (componentes básicos)	Material de adição (classe AWS)	Diâmetro do arame (mm)
F3	Ar + 2% O ₂	ER 308LSi	1,2
F4	Ar + 2% O ₂	ER 430	1,2
S3	Ar + 3% CO ₂ + 2% N ₂	ER 308LSi	1,2
S4	Ar + 3% CO ₂ + 2% N ₂	ER 430	1,2

Outros valores paramétricos importantes de serem determinados são os coeficientes da equação genérica de consumo ($Valim = \alpha \cdot I_m + \beta \cdot I_{ef}^2$). A partir do I_p e tp determinados, variações de I_b e tb foram impostas para varrer uma faixa maior de corrente média para um cálculo mais robusto dos coeficientes **a** e **b**. Tais coeficientes foram, então, estimados por um pacote computacional de estatística através do método de estimação não linear “Quasi Newton” (em função do comprimento do eletrodo e das correntes média e eficaz).

Finalmente, o efeito das combinações dos gases/eletrodos sobre alguns aspectos operacionais, tais como tensão de arco e consumo foram verificados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

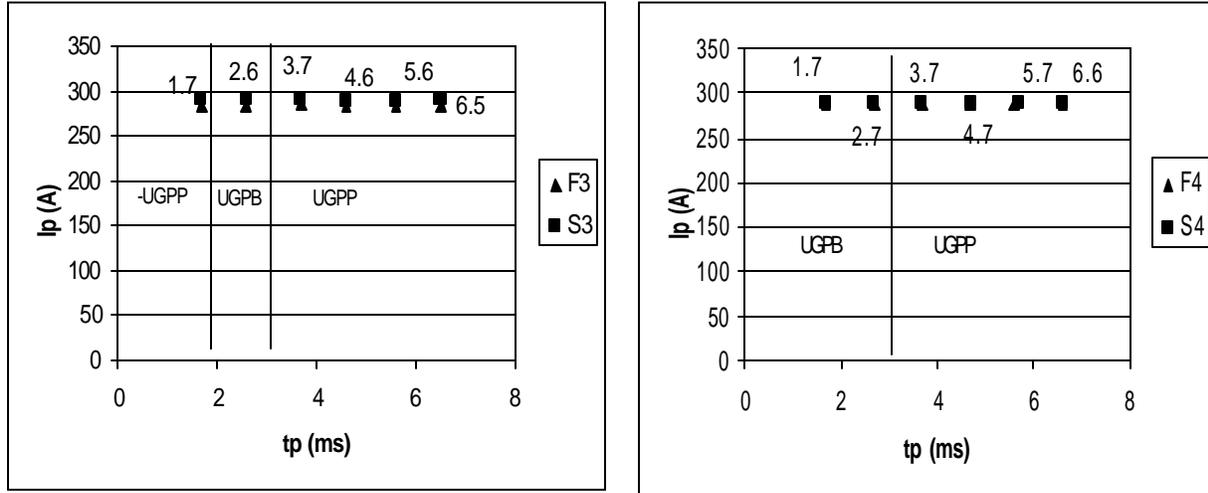
3.1 Levantamento do mapa da região de UGPP para as quatro combinações e determinação das constantes **a** e **b**

Analisando as Figuras 2 (a) e (b), observa-se que as regiões de *UGPP* não se alteram em função dos gases. Nos dois gráficos, uma mudança do gás *F* para o *S*, mantendo o mesmo arame, não implicou na mudança de faixas das regiões de *UGPP*. O parâmetro responsável pela mudança na região de uma gota por base (*UGPB*) seria o arame. Comparando os dois gráficos, verifica-se que, enquanto para o menor tp de 1,7 ms o arame ER430 ainda não apresenta a região de menos de *UGPP*, esta região já está presente para o ER308LSi a 1,7 ms. Isto quer dizer que o arame de aço ER308LSi desloca a região de menos de *UGPP* para a direita. Contudo, ainda não se pode afirmar que os dois arames possuem a mesma região de *UGPP*. Para delimitar tal região com maior precisão, mais ensaios entre os valores de 2,7 e 3,7 ms teriam que ser realizados.

A Tabela 2 mostra resultados obtidos por Bálamo (2000b) que trabalhou com combinações muito similares. Comparando o mapa da Figura 2 (a) (para o gás *F*) com os dados de Bálamo (2000b), que também soldou com o mesmo gás e mesmo arame usados neste trabalho, e com o mesmo equipamento ($I_p = 284$ A ligeiramente menor), observa-se que o tp mínimo encontrado por ele foi de 4,7 ms, enquanto neste trabalho encontrou-se $tp = 3,7$ ms. Este resultado sugere o efeitos de alguma variável não controlada.

Pela Tabela 3, observa-se que Bálamo (2000b), Richardson et al. (1994) e Santos (1986) obtiveram valores próximos para as constantes **a** e **b** quando soldando sob condições semelhantes. Comparando tais dados com os deste trabalho, nota-se que os valores de **a** e **b** encontrados, para a combinação *F3*, são bastante diferentes. Como a constante **a** representa a influência no consumo gerada pelas condições existentes na região anódica e a constante **b** representa a influência no consumo gerada pelo tipo de eletrodo (diâmetro e resistividade), e como o gás e eletrodo são os mesmos, valores mais próximos eram esperados. Pode-se, entretanto, sugerir que a explicação para tal fato (assim como a diferença de tp) se baseia no fato do uso de soldagem de materiais dissimilares, sendo um deles um aço carbono comum, o

qual poderia estar gerando vapores metálicos que estão interferindo no consumo e, conseqüentemente, nas constantes. Além disso, no caso deste trabalho, foi usado junta, enquanto nos demais as soldagens foram feitas por simples deposição sobre chapa.



(a)

(b)

Figura 2 - Mapa da região de *UGPP* para as quatro combinações de gases. Em (a) usando o arame ER308LSi, enquanto em (b) usou-se o arame ER430. O *tp* está legendando cada ponto

Tabela 2 - Comparação de resultados de *tp* referente ao limite inferior da região de *UGPP* para *Ip* comparativamente a dados da literatura (*le* é o comprimento de arco médio)

	<i>Ip</i> (A)	<i>tp</i> (ms)	<i>le</i> (mm)	<i>DBCP</i> (mm)	Gás	Arame-eletrodo	Diâmetro (mm)
Medido	290	3,7	11	15	Ar + 2%O ₂	ER 308LSi	1,2
Bálsamo	285	4,7	15	20	Ar + 2%O ₂	ER 308LSi	1,2

Tabela 3 - Constantes **a** e **b** determinadas neste trabalho e comparadas com dados de outros autores

	α (mm.A ⁻¹ .s ⁻¹)	β (*10 ⁻⁵) (A ⁻² .s ⁻¹)	Arame	Material de Base	Gás	ϕ elet. (mm)	<i>le</i> (mm)
Bálsamo	0,3497	7,8	ER 308LSi	304L	Ar+2%O ₂	1,2	15
Richardson	0,36	7,8	304	304L	Ar+1,5%O ₂	1,2	15
Santos	0,35	5,63	ER 308L	304L	Ar+2% O ₂	1,2	15
F3	0,472129	1,8	ER 308LSi	409 (inox) + 1020 (aço-carbono)	Ar+2% O ₂	1,2	11
F4	0,393536	3,0	ER 430	409 (inox) + 1020 (aço-carbono)	Ar+2% O ₂	1,2	11
S3	0,375010	4,3	ER 308LSi	409 (inox) + 1020 (aço-carbono)	Ar+CO ₂ +N ₂	1,2	11
S4	0,402881	2.6	ER 430	409 (inox) + 1020 (aço-carbono)	Ar+CO ₂ +N ₂	1,2	11

As discordância entre os valores de tp , a e b deste trabalho e da literatura reforçam a idéia de que não se pode usar diretamente as condições de ajustes de um equipamento comercial quando as condições de soldagem são muito distintas, o que leva a sair da condição ideal de estabilidade da corrente pulsada.

3.2 Efeito da combinação gás/eletrodo sobre a tensão do arco

Os gráficos da Fig. 3 mostram o comportamento da tensão média do arco de soldagem em função da corrente média para as quatro combinações de gases e arames. Como todas as soldas foram feitas procurando-se manter um comprimento de eletrodo de aproximadamente 4 mm (medido pela técnica de “shadowgrafia” descrita no item 2), na verdade as curvas da Fig. 3 mostram a tendência da característica estática do arco para cada combinação de gás e arame. Observa-se um comportamento já esperado, onde, à medida que a corrente aumenta, a tensão também aumenta. Isso pode ser explicado pelo fato de que, à medida que a corrente se eleva, a queda de tensão em um mesmo comprimento de eletrodo aumenta (aumento da resistividade). Além disto, o perímetro do arco também aumenta e pode, conseqüentemente, aumentar a área de troca de calor do arco com o meio ambiente (maior desionização); uma maior tensão é requerida para manter a estabilidade do arco, mesmo que o número de choques (intensidade de corrente) também aumente.

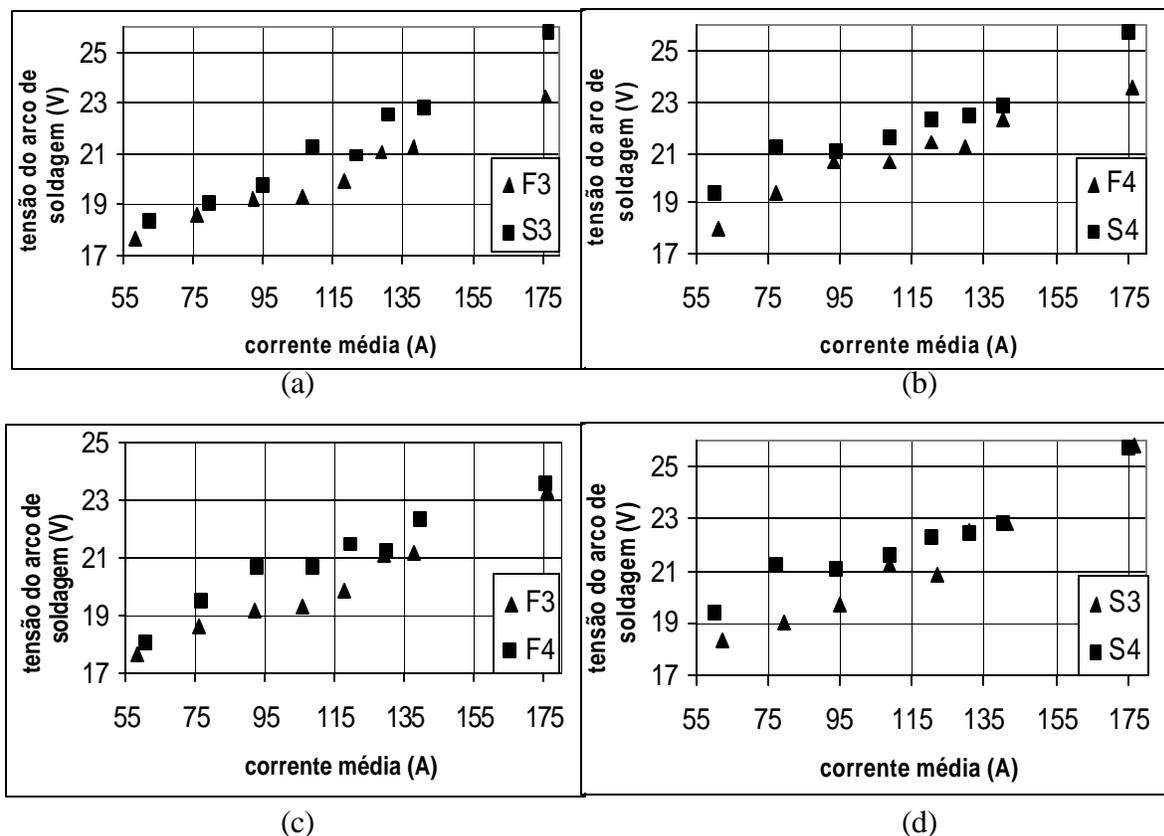


Figura 3 - Tensão do arco de soldagem em função da corrente média para as quatro combinações de gases e arames. A letra F corresponde à mistura de gás Argônio com 2% de Oxigênio e S refere-se à mistura Argônio com CO_2 e N_2 . O dígito 3 representa o arame da classe AWS ER 308LSi (austenítico) e o dígito 4, o da classe AWS ER 430 (ferrítico).

Fazendo-se, agora, uma comparação entre as curvas, observa-se que, para um mesmo tipo de arame, o gás *S* sempre apresenta maior tensão média do que o *F*, para qualquer nível de corrente (Fig. 3 (a) e (b)). Isso poderia ser explicado pela presença do dióxido de carbono e nitrogênio em *S*. Como estes gases possuem alta capacidade específica de calor, maior energia seria transferida por este gás com relação ao *F*. Visto que o comprimento de arco é o mesmo para os dois gases ($4,2^{\pm 0,5}$ mm), maior tensão é necessária para que ocorra a compensação da energia transferida a mais por *S*, de forma a manter um arco estável.

Analisando o efeito do arame para um mesmo tipo de gás, nota-se que o consumível ferrítico proporciona uma maior tensão total (DU_t) com relação ao austenítico (Fig. 3 (c) e 3 (d)). Como mostra a Fig. 4, esta tensão é composta da queda de tensão no arco (DU_a) mais a queda de tensão no eletrodo (DU_e), sendo que esta última depende da resistividade elétrica ao longo do eletrodo. Considerando que o comprimento de arco, em todas as condições, é aproximadamente o mesmo e que se esteja estabelecendo uma comparação sob a ação do mesmo gás, tal comportamento parece contraditório, pois a resistência elétrica do aço austenítico é tradicionalmente considerada maior do que a do ferrítico. Sendo assim, espera-se uma queda de tensão no eletrodo maior no aço austenítico.

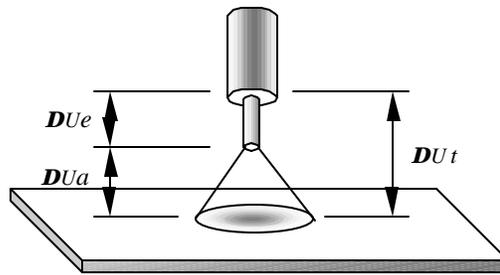


Figura 4 - Discretização das quedas de tensão que ocorrem durante a soldagem $DU_t = DU_e + DU_a$ (DU_t = queda de tensão total, DU_e = queda de tensão no eletrodo, DU_a = queda de tensão no arco de soldagem)

Ainda não se tem uma explicação para esse comportamento, mas, em uma primeira tentativa, pode-se relacionar tal fenômeno com os vapores produzidos por cada tipo de arame. Tais vapores influenciariam o arco elétrico de tal sorte que a queda de tensão no arco de um arame ferrítico seja maior que em um austenítico. Outra explicação adicional estaria na real resistividade elétrica do eletrodo. Com o aumento da temperatura do mesmo, pode estar ocorrendo mudança de fase alotrópica no material do eletrodo, o que, conseqüentemente, muda a sua resistividade. Uma prova de que isso possa estar ocorrendo é encontrada nos diagramas ternários de fases (ASM, 1973). Analisando os diagramas tem-se que:

- Para o aço austenítico ER 308LSi (liga Fe-Cr-Ni):
 - à 650°C \Rightarrow presença das fases **g**+ **s**, onde **g** é austenita e **s** é um precipitado de forma CrFe;
 - à 1100°C \Rightarrow presença das fases **a**+ **g** onde **a** é ferrita;
 - à 1400°C \Rightarrow presença somente da fase **a**.
- Para o aço ferrítico ER 430 (liga C-Cr-Fe):
 - à qualquer temperatura, sempre ocorre a presença de **a**.

Observa-se que a altas temperaturas os dois aços apresentam estrutura ferrítica (**a**). Desta forma, não deveria haver diferença de resistividade entre eles. Não havendo diferença de resistividade e lembrando que os gases e os comprimentos de arco são os mesmos, esperaria-se que as DU_t para os dois arames seriam as mesmas. Assim, as duas explicações propostas podem ser usadas para justificar os valores encontrados de tensão do arco.

3.3 Efeito da combinação gás/eletrodo sobre o consumo

As Figuras 5 (a) e (b) mostram a influência do gás no consumo de eletrodo. Observa-se que o gás não possui influência significativa no consumo quando o arame utilizado é o ER430 (Fig. 5 (a)). Este comportamento já foi verificado por Quites et al. (1979) na soldagem com eletrodos ER 70-S3 e ER 70-S6; soldando com Ar (e posteriormente CO₂) não foi observado variação no consumo para o mesmo arame. Entretanto, ao se soldar usando o arame ER308LSi, o consumo mostrou variar com a mudança de gás. À uma corrente de 106 A, o consumo referente ao gás *F* supera o *S* em aproximadamente 9%.

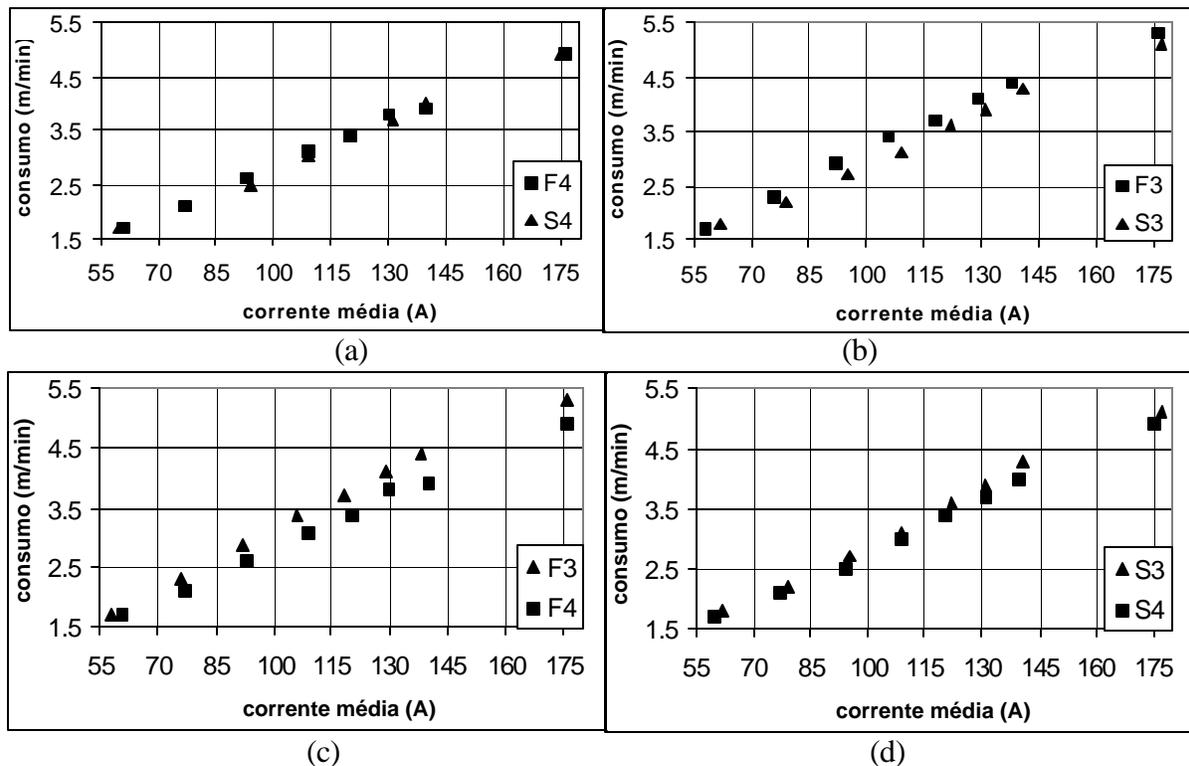


Figura 5 - Consumo em função da corrente média para as quatro combinações gás/arame.

Analisando agora a influência do eletrodo para um mesmo tipo de gás, nota-se que o consumo varia sob o arco do gás *F*. Na Fig. 5 (c), observa-se que, à medida que a corrente aumenta, a variação no consumo também aumenta para o gás *F*. A uma corrente de 140 A, tem-se a máxima variação, de aproximadamente 11%. Nesta configuração, o eletrodo austenítico apresenta o maior consumo, como era de se esperar. Entretanto, o mesmo par de eletrodos soldados sob o arco do gás *S*, não apresentou variação do consumo (Fig. 5 (d)). Apesar de ser um resultado não esperado, Quites et al. (1979) também encontrou resultados semelhantes, onde, para uma atmosfera de CO₂, houve variação no consumo quando variou-se o tipo de eletrodo, não havendo variação quando a atmosfera foi mudada para Ar.

Acredita-se que o efeito dos elementos de liga estão se sobressaindo (com relação ao consumo) sobre a resistividade dos eletrodos. Ao usar o gás *F* (com características oxidantes devido a presença de O₂), talvez o Si (ou até mesmo o Ni, ambos presentes no eletrodo austenítico) queima-se no arco, reduzindo a tensão do mesmo, mas aumentando o aquecimento na região anódica (maior consumo). Isso explicaria o porquê do consumo ser maior para o eletrodo austenítico com gás *F* (Fig. 5 (c)), mesmo sendo a queda de tensão total maior para o ferrítico (Fig. 3 (c)). O mesmo efeito do decréscimo da queda de tensão no arco devido elementos de liga presentes no eletrodo austenítico pode estar acontecendo quando

soldando sob o gás *S*, explicando a maior queda de tensão para o ferrítico, observada na Fig. 3 (d). Entretanto, o gás *S*, que possui características redutoras mais marcantes que o *F* (devido a presença de N_2 que pode estar neutralizando o efeito oxidante do CO_2), agiria sobre a região catódica (e não a anódica), o que leva a um balanceamento no consumo, conforme visto na Fig. 5 (d).

4. CONCLUSÕES

Dentro dos limites deste trabalho, pode-se concluir que:

1. Nem o gás, nem o arame, influenciaram no posicionamento da região de UGPP;
2. As constantes ***a*** e ***b*** foram diferentes para cada combinação arame/gás, mas sem mostrar qualquer correlação entre o arame ou o gás e as referidas constantes (a interação dos parâmetros parece ser mais importante);
3. Apesar de pequenas, existem variações de tensão do arco e consumo referentes à certas mudanças de gás e arame, mostrando que, não somente o tipo de arame, mas também o gás, influenciam no consumo e na queda de tensão total do eletrodo e arco de soldagem;
4. Tanto para o arame ER 308LSi, quanto para o ER 430, o gás *S*, apresentou maior queda de tensão total (eletrodo mais arco de soldagem);
5. Para um mesmo tipo de gás (*F* ou *S*), o arame ferrítico (ER 430) apresentou maior queda de tensão total;
6. O gás *F* ofereceu maior consumo de eletrodo que o *S* quando soldando com arame austenítico, mas apresentam consumos similares quando soldando com eletrodo ferrítico;
7. Não existe uma relação direta e simples entre queda de tensão total e consumo de eletrodo;
8. Existe um efeito da junta (forma, posição e composição) sobre as condições otimizadas dos parâmetros de pulsação do processo MIG, justificando a não adequabilidade de equipamentos comerciais se usados sem seleção correta de parâmetros.

REFERÊNCIAS

- Allum, C. J., 1985, Recent developments in pulsed gas metal arc welding, *Welding for Challenging Environments*, october, pp. 1-10.
- Bálsamo, P. S. S., Vilarinho, L. O., Vilela, M. & Scotti, A., 2000a, Development of an Experimental Technique for Studying Metal Transfer in Welding: Synchronized Shadowgraphy, *The Int. Journal for the Joining of Materials*, vol , no. , The European Institute for Joining of Materials (JOM), Denmark, pp. (ISSN0905-6866)
- Bálsamo, P. S. S., 2000b, Desenvolvimento de um sistema sinérgico não linear para soldagem MIG pulsado de aço inoxidável, tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 204 pp.
- ASM, 1973, *Metals Handbook*, American Society for Metals, vol. 8.
- Quites, A. M., Dutra, J. C. and Mira, F. M., 1979, Variação do consumo de material de adição em soldagem MIG/MAG em função da corrente e da composição química do eletrodo, *V COBEM*, pp. B-045-B054.
- Richardson, I. M., Bucknall, P. W. and Stares, I., 1994, The influence of power source dynamics on wire melting rate in pulsed GMA welding, *Welding Journal*, february, pp. 32-s-37-s.
- Santos, J. O., 1986, Controlled transfer MIG welding of stainless steel, PhD tesis, Cranfield Institute Tecnology, Cranfield, UK, 169 pp.

IMPLEMENTATION OF THE PULSED MIG PROCESS FOR STAINLESS STEEL WELDING OF AUTO-PARTS – PART 1

***Abstract.** In his work is presented a first part of a proposed methodology for implementing the pulsed MIG process in the production chain of an auto-part manufacturing plant, as a way of minimizing spattering detrimental effects. A performance evaluation of four combinations between two commercial gases and two wire compositions were checked by welding a geometrically non-conventional joint made of dissimilar materials. For each combination, a series of experiments were carried out to determine an operational envelope for having one-droplet-per pulse and the constants of the fusion rate predicting equation. The effects of gases and wires on arc voltage and fusion rate were discussed. The results showed that the given joint modifies the optimized conditions of commercial equipment, what justifies the incorrectness of using these equipment without a proper parameter selection. It was also verified that each gas/wire combination provides distinct fusion rate and arc voltage characteristics. This particularity might affect the process performance (to be analyzed in part 2).*

***Keywords:** Welding, pulsed MIG, productivity, stainless steel, auto-parts*