



## INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PULSO NO PROCESSO MIG SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA

**Luiz G. Ribeiro**

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - Departamento de Produção

E-Mail: [pos7888gui@zipmail.com.br](mailto:pos7888gui@zipmail.com.br)

**Sebastião C. da Costa**

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - Departamento de Produção

E-Mail: [costa@iem.efei.rmg.br](mailto:costa@iem.efei.rmg.br)

**Resumo.** *Este trabalho tem por finalidade analisar a influência dos parâmetros de pulso, no processo MIG de soldagem, sobre a área de penetração e de reforço do cordão de solda (diluição). Para tal finalidade, utilizou-se o Projeto e Análise de Experimentos, em especial o Planejamento Fatorial Completo em Dois Níveis com replicagem e aleatorização, para planejar e analisar os dados, além do teste t para cálculo de significância dos efeitos.*

**Palavras-chave:** *Projeto de experimentos, Planejamento fatorial, MIG pulsado.*

### 1. INTRODUÇÃO

Dos processos de soldagem, o processo MIG tem se revelado, atualmente, como aquele de maior ascensão no ambiente industrial, decorrente de sua alta produtividade e excelente qualidade dos cordões de solda. Mais recentemente, o modo pulsado de soldagem aumentou, ainda mais, a faixa de utilização do processo, possibilitando a soldagem de chapas finas em todas as posições, através do modo de transferência por *spray*, onde cordões com aspecto mais homogêneo, arcos mais estáveis e pequena formação de respingos são obtidos. Contudo, o grande inconveniente em sua utilização reside na dificuldade em se determinar parâmetros operacionais adequados, devido à complexidade do processo, fato esse que tem feito com que sua adoção pelas empresas não seja ainda maior.

Neste contexto, ferramentas estatísticas vêm sendo utilizadas na tentativa de elucidar certas particularidades deste processo de modo a propiciar sua melhor utilização, em função da manipulação das variáveis envolvidas. Dentre estas ferramentas, o Planejamento de Experimentos tem se destacado, em muito, das demais, por permitir a redução substancial de tempo e dinheiro, fatores decisivos em época de acirrada competição.

Antony *et al.* (1999) citam como vantagens da utilização desta ferramenta: redução do tempo de desenvolvimento do produto, aumento da satisfação do cliente, redução da variabilidade excessiva de desempenho bem como dos custos de desenvolvimento dos produtos e processos, auxílio na determinação de grupos ótimos de fatores, bem como a influência destes sobre uma determinada resposta do sistema, visando, deste modo, melhorar o desempenho, o rendimento, a confiabilidade e a capacidade dos processos.

Para um melhor entendimento do processo MIG pulsado, decidiu-se neste trabalho estudar, o efeito dos parâmetros de pulso do processo MIG num tipo de transferência tipicamente por *spray* sobre as características geométricas do cordão, representadas pelas áreas de penetração,  $S_p$ , e reforço,  $S_r$ , expressas pela diluição do cordão. Para isto foi utilizado como ferramenta o Projeto e Análise de Experimentos, em especial, o Planejamento Fatorial Completo em 2 Níveis.

## 2. O PROCESSO MIG PULSADO

O modo pulsado é hoje, alvo de profundas investigações por parte da comunidade científica, devido as vantagens apresentadas em relação ao processo MIG convencional. Graig (1987), Collard (1988), Kim & Eagar (1993), Davies (1996), Weber (1982) e Dutra (1996) relatam que, através do fornecimento de um fluxo de corrente de alta intensidade, com ondas intermitentes, é possível obter a transferência por *spray* durante os pulsos de alta corrente enquanto se mantém um nível de corrente média abaixo da corrente normal de transição. Desta maneira é possível a obtenção de efeitos desejáveis do modo *spray* com baixos níveis de calor, característica normalmente associadas à transferência por curto-circuito, com baixa produção de respingos e maior estabilidade do arco, além de um controle preciso dos parâmetros operacionais.

Contudo, Davies (1992) e Dutra (1996) nos mostram que, apesar dos benefícios trazidos pela utilização do modo pulsado de transferência por *spray*, a complexa natureza deste processo e o alto grau de habilidade exigida, por parte dos soldadores, na correta seleção dos parâmetros operacionais, têm limitado, de maneira significativa, sua aceitação pelas indústrias de soldagem.

## 3. OS PARÂMETROS DE PULSO

Com a introdução da corrente pulsada, novos parâmetros foram adicionados ao processo MIG convencional. Pode-se observar na “Fig. 1” que a corrente pulsada é uma onda periódica, onde uma corrente de base ( $I_b$ ) se alterna com uma corrente de pico ( $I_p$ ), com seus respectivos tempos de duração ( $t_b$ ) e ( $t_p$ ). Essas grandezas são denominadas de *parâmetros de pulso*. Pode-se, ainda, utilizar parâmetros que são derivados destes, como a corrente média ( $I_m$ ), a frequência de pulso ( $f$ ) e o ciclo ativo ( $DC$ ).

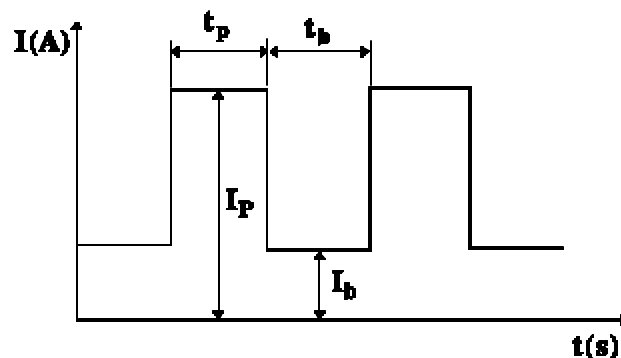


Figura 1 - Esquema de uma onda pulsada e seus componentes.

A corrente de pico deverá ser mantida acima da corrente de transição ( $I_t$ ), de forma a manter uma transferência por *spray*. Uma certa quantidade de energia é necessária durante cada pulso de maneira a promover o destacamento da gota. Trevisan *et al.* (1998) informam que a corrente de pico tem por finalidade garantir a boa fusão e a penetração do cordão.

A corrente de base mantém o arco estável e permite que a área da solda fique mais fria. Nixon & Norrish (1992) informam que, considerações à respeito da instabilidade do arco requerem que a corrente de base seja sempre maior que 25(A). Collard (1988) nos fala que a corrente de base é, provavelmente, o parâmetro de onda menos crítico, embora tenha várias funções além da manutenção do arco elétrico. Controle sobre a poça de solda e a forma da gota podem ser melhorados através de correntes de bases apropriadas. Subramaniam *et al.* (1998) relatam que, destacamentos de gotas no período de base são ótimos para a redução do calor de entrada e para a manutenção da estabilidade do arco, promovendo, assim, a redução de respingos.

A corrente média, dada pela "Eq. (1)", tem a característica, na transferência pulsada, de apresentar baixos níveis de intensidade. Devido à essa característica, esse processo pode ser utilizado na soldagem de chapas finas.

$$I_m = (I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b) / (t_p + t_b) \quad (1)$$

O ciclo ativo ou *Duty Cycle* pode ser definido pela "Eq. (3)", onde, percebe-se a relação entre o tempo de deposição e o tempo total de soldagem. Essa grandeza é normalmente utilizada em substituição aos tempos de pico e de base em alguns experimentos abordados na literatura, devido à menor variabilidade apresentada, o que permite uma maior facilidade quanto à regulação dos parâmetros.

$$DC = [t_p / (t_p + t_b)] \times 100(\%) \quad (2)$$

Desta maneira, optou-se, em nossa análise, pelo estudo da influência das correntes de pico e de base, do ciclo ativo, além do acréscimo da velocidade de alimentação  $v_a$ , por demonstrar efeitos significativos durante os ensaios preliminares, sobre a diluição (D) do cordão de solda, a qual foi definida como a relação entre a área de penetração,  $S_p$ , e a área total da seção transversal do cordão de solda,  $S_t$ , onde a área total é a área de penetração acrescida da área de reforço,  $S_r$ .

$$D = S_p / S_t = S_p / (S_p + S_r) \quad (3)$$

#### 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização do experimento utilizou-se uma fonte transistorizada inversora digitalizada, com imposição de corrente no modo pulsado, a qual possibilitou flexibilidade no ajuste dos parâmetros, associada a um sistema guia com velocidade controlada, permitindo o deslocamento da tocha durante a realização das soldagens. Com o Planejamento Fatorial Completo em Dois Níveis, cada fator assume dois valores, um superior e um inferior, os quais são denominados de níveis. Combinando-se esses níveis entre os fatores obtemos  $2^n$  experimentos, onde  $n$  é o número de fatores analisados. Após definidos os fatores, bem como as respostas a serem analisadas, foram fixados os níveis dos fatores e o valor das demais variáveis mantidas constantes durante o experimento. Os valores adotados para os níveis se encontram na "Tabela 1". O tempo de pico foi mantido constante em 4 ms e o tempo de base oscilou entre os valores de 4 ms e 6 ms de acordo com o duty cycle utilizado.

Tabela 1 - Níveis inferiores e superiores dos fatores em estudo.

Fator	Unidade	Nível Inferior	Nível Superior
Corrente de pico, $I_p$	Amps	280	350
Corrente de base, $I_b$	Amps	70	100
Duty Cycle, DC	%	40	50
Vel.de alim., $V_a$	m/min	5	6

As demais variáveis do processo foram mantidas constantes e seus valores referenciados na literatura, sendo utilizado arame ER 70S-6 (C-0,1% Mn-1,6%) de diâmetro 1,2 mm e material de base de aço ABNT 1045, com dimensões de 120x40x6 mm. Como gás de proteção optou-se em utilizar Argônio puro com a finalidade de referenciar futuros trabalhos, com vazão de 15 l/min e velocidade de soldagem de 40 cm/min. A distância tocha-peça foi de 17.5 mm e o recuo do bico de contato foi de 5 mm.

A seqüência de combinação dos fatores foi definida segundo a ordem padrão OP descrita na “Tabela 2” sendo os experimentos realizados em duplicata e numa seqüência aleatória. A duplicação permite o cálculo do erro experimental, o qual será utilizado, também, no cálculo de significância dos efeitos. A aleatorização permite a aplicação de testes estatísticos de significância e a construção de intervalos de confiança.

Após realizados os ensaios, os corpos de prova foram seccionados e preparados para que as leituras pudessem ser realizadas. Com o auxílio de um projetor de perfis e de um planímetro, registrou-se as respectivas áreas de cada corpo de prova, conforme esquema mostrado na “Fig. 2”. Os resultados obtidos estão contidos na “Tabela 3”.

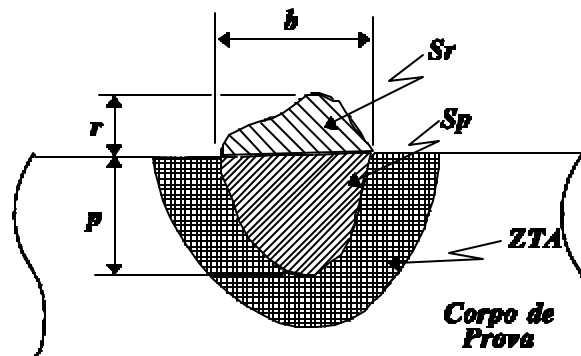


Figura 2 - Representação da área da seção transversal do cordão de solda.

Tabela 2 - Planejamento experimental.

OE1	OE2	OP	Ip	Ib	DC	va	Imédia
-----	-----	-----	Amps	Amps	%	m/min	Amps
5	8	1	280	70	40	5	154
12	3	2	350	70	40	5	182
1	9	3	280	100	40	5	172
4	15	4	350	100	40	5	200
9	13	5	280	70	50	5	140
6	2	6	350	70	50	5	168
15	12	7	280	100	50	5	152
3	7	8	350	100	50	5	180
2	5	9	280	70	40	6	154
10	11	10	350	70	40	6	182
8	1	11	280	100	40	6	172
14	6	12	350	100	40	6	200
11	4	13	280	70	50	6	140
7	10	14	350	70	50	6	168
16	14	15	280	100	50	6	152
13	16	16	350	100	50	6	180

Tabela 3 - Valores obtidos no experimento.

OE1	OE2	OP	Sp1	Sp2	Sr1	Sr2	St1	St2	D1	D2	MÉDIA
-----	-----	-----	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	Mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	%	%	%
5	8	1	0,54	0,49	1,55	1,59	2,09	2,08	25,73	23,56	24,64
12	3	2	0,48	0,50	1,38	1,44	1,86	1,94	25,81	25,77	25,79
1	9	3	0,56	0,57	1,54	1,49	2,10	2,06	26,67	27,78	27,22
4	15	4	0,43	0,40	1,48	1,41	1,91	1,81	21,45	22,23	21,84
9	13	5	0,69	0,67	1,62	1,66	2,31	2,33	29,72	28,76	29,24
6	2	6	0,33	0,34	1,72	1,78	2,05	2,12	15,93	15,84	15,88
15	12	7	0,50	0,55	1,58	1,54	2,08	2,09	24,10	26,21	25,15
3	7	8	0,53	0,60	1,60	1,69	2,18	2,37	24,31	28,75	26,53
2	5	9	0,24	0,24	1,82	1,82	2,05	2,06	11,55	11,41	11,48
10	11	10	0,67	0,70	1,85	1,74	2,52	2,44	26,25	28,54	27,40
8	1	11	0,29	0,66	1,81	1,82	2,10	2,48	13,82	26,43	20,13
14	6	12	0,78	0,75	1,93	1,92	2,71	2,67	28,78	28,09	28,44
11	4	13	0,69	0,74	1,83	1,82	2,53	2,56	27,33	28,96	28,14
7	10	14	0,64	0,65	1,95	1,76	2,59	2,41	24,62	26,79	25,70
16	14	15	0,84	0,80	1,80	1,66	2,64	2,46	31,66	32,52	32,09
13	16	16	0,75	0,64	1,90	1,58	2,65	2,22	28,30	28,83	28,57

## 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a análise dos resultados utilizou-se o algoritmo proposto por Neto *et al.* (1995). Esse método fornece os valores para os efeitos principais e de interação. Para o cálculo do erro experimental foi utilizado o método da variância. Esses valores são mostrados na “Tabela 4”.

Após calculado os efeitos principais e de interação, bem como o erro experimental, deve-se, então, realizar o teste de significância dos efeitos. Optando-se em analisar apenas interações de 1ª e 2ª ordens, ferramentas computacionais utilizadas definem 20 graus de liberdade para o experimento, onde o valor de t correspondente é  $t = 2,08647$ , para um nível de significância de 95%. Multiplicando esse valor pelo erro experimental dos efeitos, obtém-se, assim, o intervalo de confiança do experimento. Desta forma:  $2,09 * (-1,271) > \text{SIGN.} > 2,09 * 1,271$

$$\text{SIGNIFICÂNCIA} > |2,652| \quad (4)$$

Para essa condição, foram considerados significativos os efeitos: DC,  $I_p * DC$ ,  $I_p * v_a$  e  $DC * v_a$ .

De acordo com os resultados nota-se que a diluição média, segundo a “Tabela 4”, se situou próxima dos 25%. O valor máximo de diluição, aproximadamente 32%, foi obtido para os valores de  $I_p = 280A$ ,  $I_b = 100A$ ,  $DC = 50\%$  e  $v_a = 6m/min$ , resultando numa corrente média de 190 A e seu valor mínimo, aproximadamente 11,5%, foi obtido para os valores de  $I_p = 280$ ,  $I_b = 70$ ,  $DC = 40\%$  e  $v_a = 6m/min$ , com corrente média de 154 A. Percebe-se que para esses dois extremos, a corrente de pico e a velocidade do arame permaneceram constantes enquanto o ciclo ativo e a corrente de base foram reduzidas com a redução da diluição. Esperava-se, ainda, obter máxima diluição para o máximo valor de corrente de pico, com  $I_p = 350A$ , fato esse não ocorrido. Nesses dois casos, a corrente média permaneceu num patamar bem abaixo da corrente de pico, situação essa que justifica a utilização desse modo de transferência para soldagem de chapas finas.

Tabela 4 - Efeitos dos fatores principais e de interação.

Fatores	Efeitos
Média	24,901 ± 0,635
$I_p$	0,249 ± 1,271
$I_b$	2,688 ± 1,271
DC	3,025 ± 1,271
$v_a$	0,683 ± 1,271
$I_p.I_b$	-0,084 ± 1,271
$I_p.DC$	-4,763 ± 1,271
$I_p.v_a$	4,286 ± 1,271
$I_b.DC$	0,654 ± 1,271
$I_b.v_a$	1,436 ± 1,271
$DC.v_a$	3,742 ± 1,271
$I_p.I_b.DC$	3,496 ± 1,271
$I_p.I_b.v_a$	-2,090 ± 1,271
$I_p.DC.v_a$	-2,784 ± 1,271
$I_b.DC.v_a$	-1,375 ± 1,271
$I_p.I_b.DC.v_a$	-1,864 ± 1,271

Com relação ao efeito da corrente de base nota-se que o seu efeito se mostrou muito próximo do valor limite de significância. Isto pode induzir a dúvidas quanto à significância ou não desse efeito, devido ao fato de que a leitura de cada resposta foi obtida através da

média de várias leituras. Uma interpretação errônea em apenas uma dessas leituras pode alterar tanto o valor dos efeitos quanto o valor do próprio intervalo de significância.

Utilizou-se um gráfico de probabilidade normal para análise dos resíduos. Percebe-se que esses resíduos se situam numa linha reta e centrados próximo de zero, ou seja, os resíduos estão de acordo com a linha normal, não necessitando, portanto de qualquer tipo de transformação. Essa análise indica, ainda, que não há problemas quanto à aleatoriedade dos dados.

Analisando-se os gráficos dos efeitos principais e de interação entre os fatores, obtidos mediante modelo computacional adequado, percebe-se que, pretendendo-se aumentar a diluição acima de 32,09% ou reduzi-la abaixo de 11,48% deve-se manter a velocidade de alimentação no seu nível superior,  $v_a(+)$  e a corrente de pico no seu nível inferior  $I_p(-)$  reduzindo a corrente de base e o ciclo ativo, simultaneamente ou não, para promover redução da diluição ou aumentando ambos, também simultaneamente ou não, a fim de promover aumento. O ciclo ativo se mostrou como o parâmetro mais influente tanto no que se refere ao seu efeito isolado quanto nas interações com a corrente de pico e velocidade de alimentação sendo, portanto o mais sensível à variação.

Considerando-se a amplitude de variação do comprimento do arco neste trabalho, em nenhum momento se percebeu curto-circuito entre a tocha de soldagem e o metal de base.

## 6. CONCLUSÕES

A utilização da técnica projeto e análise de experimentos se mostrou extremamente interessante no que se refere a análise dos parâmetros de pulso para o processo MIG. Tais análises dos efeitos permitem uma melhor compreensão de suas influências dentro de uma determinada resposta do sistema, sendo no caso a diluição. Nota-se que pelos resultados que é possível maximizar a diluição de um cordão de solda, trabalhando num modo de transferência tipicamente por spray, sem que necessariamente se despenda grande quantidade de energia para o material de base, possibilitando desta forma a soldagem de chapas de menores espessuras, fato esse comprovado pela reduzida corrente média obtida no experimento. Tal conhecimento da influência dos parâmetros permite um melhor controle da penetração do cordão, conseguindo assim uma ampliação do conhecimento que envolve o assunto e a extensão da faixa de aplicação do processo.

## REFERÊNCIAS

- Antony, J., 1999, Reducing manufacturing process variability using experimental design: a case study, Integrated Manufacturing system. 10/3, pp. 162-169.
- Collard, J.F., 1988, Adaptive pulsed GMAW control: The Digipulse system, Welding Journal, november, pp. 35-38.
- Davies, A.C., 1996, The science and practice of welding. V.2. The practice of welding, Cambridge University Press, Tenth edition.
- Du Pin, J. C., Neto, A., 1998, Efeito dos parâmetros de pulso sobre a geometria do cordão de solda em soldagem de chapa fina de aço inox AISI 304 pelo processo TIG pulsado, Revista Soldagem e Inspeção, ano 4, nº6, pp. 9-16.
- Dutra, J.C., 1996, Manual da fonte de soldagem Inversal 450. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Graig, E., 1987, A unique mode of GMAW transfer, Welding Journal, September, pp.51-56.
- Kim, S. & Eagar, W., 1993, Metal transfer in pulsed current gas metal arc welding, Welding Journal, July, pp.379-387.

- Lambert, J.A., 1989, Assessment of the pulsed GMA technique for tube attachment welding, *Welding Journal*, February, pp.35-43.
- Neto, B.B., Scarmínio, I.S., Bruns, R.E.,1995, Planejamento e otimização de experimentos. Campinas: Editora da Universidade Estadual de Campinas.
- Nixon, J.H. & Norrish, J., 1988, Determination of pulsed MIG process parameters, *Synergic MIG Supplement*. from *Welding & Metal Fabrication*, pp. 4-7.
- Subramaniam, S., White, D.R., Jones, J.E. & Lyons, D., 1998, Droplet transfer in pulsed gas metal arc welding of aluminum, *Welding Journal*, November, pp. 458-464.
- Weber, J., 1982, Pulsed GMAW a plus for Midwestern metalworker, *Welding Journal*, November, pp.51-52.

## **THE INFLUENCE OF PULSE PARAMETERS IN THE GMAW PULSED PROCESS ON DE GEOMETRY OF THE WELD BEAD**

***Abstract.** This paper has the aim to analyse the influence of pulse parameters on the dilution of weld bead. of the GMAW proces For this purpose the design of experiments technique was used with the application of the complete factorial design at two levels. All testes were replicated and randomized, and the t test was used to the analysis o f the significant effects influence.*

***Keywords:** Design of experiments, Factorial planning, GMAW pulsed process.*