

OTIMIZAÇÃO DO CÁLCULO DE VARIÁVEIS NO PROCESSO MIG PULSADO

Louriel Oliveira Vilarinho

Sezimária F. P. Saramago

Paulo S. S. Bálsamo

Américo Scotti

Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Santa Mônica, CEP: 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil, E-mail: *saramago@ufu.br*

Resumo

O objetivo deste trabalho é validar o algoritmo de seleção de variáveis do processo pulsado, proposto por Bálsamo et al (1999). Para esta finalidade, os resultados obtidos pelo mesmo são comparados com os calculados através de um programa de otimização seqüencial utilizando o pacote comercial DOT. Assim, implementou-se as equações propostas por Bálsamo em linguagem Fortran, simulando, através de um Projeto Fatorial Completo, algumas possibilidades: o tipo de eletrodo (alumínio ou aço inoxidável), a forma de onda retangular ou trapezoidal para a corrente e alguns métodos de otimização seqüenciais. Os resultados foram obtidos através da minimização de uma função objetivo que relaciona o diâmetro da gota com o diâmetro do eletrodo, trabalhando com as variáveis de projeto: corrente de base, tempo de base, diâmetro da gota e velocidade de alimentação. O programa desenvolvido por Bálsamo et al (1999) é uma nova concepção para comando sinérgico baseada em modelos não lineares. Para efeitos práticos, representa uma importante contribuição, uma vez que possibilita o controle em tempo real de uma fonte de soldagem. Desta forma, justifica-se a necessidade de validação do processo através da utilização de métodos clássicos de otimização.

Palavras-chave: Otimização, Soldagem, MIG Pulsado, Comando Sinérgico

1. INTRODUÇÃO

O processo MIG pulsado vem ganhando cada vez mais espaço dentro da soldagem MIG/MAG, por superar suas limitações quanto ao controle da transferência metálica (Nixon & Norrish, 1988). Entretanto, juntamente com as vantagens deste processo, vieram também as dificuldades no ajuste de suas variáveis. A correta seleção destas variáveis deve respeitar duas premissas importantes. A primeira premissa deve-se ao fato da estabilidade do arco demandar uma única gota se transferindo ao fim de cada pulso, também conhecida como UGPP (uma gota por pulso). A outra premissa, correntemente citada na literatura (Rajasekaran et al, 1998 e Nixon & Norrish, 1988), refere-se à necessidade da gota possuir o diâmetro igual ao do eletrodo. Entretanto, para outros autores (Subramaniam et al, 1998 e Alcan, 1993), o diâmetro da gota, representado por seu volume, pode variar dentro de uma determinada faixa. Deve-se tomar cuidado apenas para não se ter um diâmetro (volume) muito grande, o que implicaria numa transferência globular ou mesmo num curto-circuito.

Devido à grande complexidade em se ajustar todas as variáveis do processo, que de uma forma geral são interdependentes e que devem respeitar estas duas premissas principais, surgiu o chamado comando sinérgico, como uma metodologia para selecionar as variáveis do processo pulsado. Comando sinérgico é definido em soldagem como *"qualquer sistema*

(malha aberta ou fechada) pelo qual um parâmetro de pulso é modificado de tal forma que uma condição de equilíbrio (UGPP) é mantida sobre uma faixa de velocidade de alimentação do arame (ou níveis de corrente média)” (Nixon & Norrish, 1988).

Os comandos sinérgicos comercialmente utilizados baseiam-se em modelos lineares entre a velocidade de alimentação e a corrente média e na suposição de que os parâmetros de base não influenciam a transferência. A partir de determinadas constantes obtidas experimentalmente, o comando sinérgico calcula, por meio de algoritmos, as variáveis do processo. Entretanto, normalmente, se faz necessário um ajuste fino na velocidade de alimentação, pois como o modelo é simplificado, não se consegue calcular os parâmetros de pulso para conseguir um comprimento de arco desejado. Além de adotar um modelo linear para expressar a relação entre a corrente média e a velocidade de alimentação, os comandos sinérgicos comerciais não levam em conta o formato real da onda de corrente obtida, assumindo um modelo perfeitamente retangular.

Frente à dificuldade de ajuste das variáveis do processo MIG pulsado e das limitações dos comandos sinérgicos comerciais, propõe-se, neste trabalho, otimizar o cálculo (seleção) das variáveis do processo através de modelos mais realistas (não lineares) de forma a se conseguir satisfazer às duas principais premissas do processo, e comparar o resultado final (ótimo obtido) com o resultado obtido pelo algoritmo proposto por Bálamo et al (1999), de forma a validá-lo. Para esta finalidade, os resultados obtidos pelo mesmo são comparados com os calculados através de um programa de otimização seqüencial utilizando o pacote comercial DOT (Vanderplaats, 1984). Assim, implementou-se as equações propostas por Bálamo em linguagem Fortran, simulando, através de um Projeto Fatorial Completo, algumas possibilidades: o tipo de eletrodo (alumínio ou aço inoxidável), a forma de onda retangular ou trapezoidal para a corrente e alguns métodos de otimização seqüenciais. Os resultados foram obtidos através da minimização de uma função objetivo que relaciona o diâmetro da gota com o diâmetro do eletrodo, trabalhando com as variáveis de projeto: corrente de base, tempo de base, diâmetro da gota e velocidade de alimentação. O programa desenvolvido por Bálamo et al (1999) é uma nova concepção para comando sinérgico baseada nos modelos não lineares. Para efeitos práticos, representa uma importante contribuição, uma vez que possibilita o controle em tempo real de uma fonte de soldagem. Desta forma, justifica-se a necessidade de validação do processo através da utilização de métodos clássicos de otimização.

2. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

De acordo com a primeira premissa, para a correta seleção das variáveis do processo, a estabilidade do arco demanda uma única gota se transferindo ao fim de cada pulso (UGPP - uma gota por pulso), como mostrado esquematicamente na Figura 1. Nesta figura, também é mostrada a forma de onda da corrente e suas componentes de pico (I_p e t_p) e de base (I_b e t_b), cujo modelo matemático é expresso pelas Equações 1 e 2. Nesta premissa, a transferência deve ocorrer ao fim do pulso independente de I_b e t_b , ou seja, ignora-se o efeito dos parâmetros de base, cuja função é manter o arco aceso, promover o aquecimento do eletrodo e promover a limpeza catódica (Nixon & Norrish, 1988), como comprovado por Vilarinho & Scotti (1999).

$$I_m = \frac{I_p t_p + I_b t_b}{T} \quad (1)$$

$$T = t_b + t_p, \quad (2)$$

onde, I_m é a corrente média [A]; T é o período de pulsação [s]; I_p é a corrente de pico [A]; t_p é o tempo de pico [s]; I_b é a corrente de base [A]; t_b é o tempo de base [s].

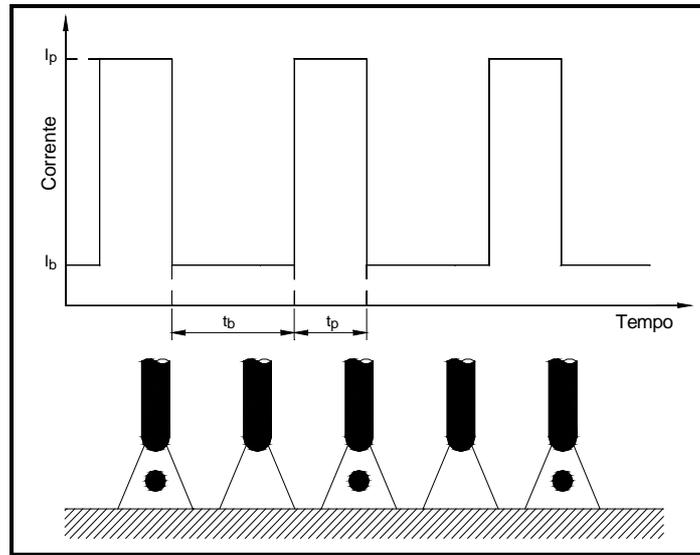


Figura 1. Transferência pulsada (Nixon & Norrish, 1988).

O modelo matemático para a segunda premissa, conforme Figura 2, é obtido através da suposição de igualdade entre o volume da gota de metal fundente e da ponta parcialmente fundida do eletrodo:

$$d_g = \sqrt[3]{1,5 (t_p + t_b) d_e^2 V_{alim}} , \quad (3)$$

onde, d_g é o diâmetro da gota [mm]; d_e é o diâmetro do eletrodo [mm]; V_{alim} é a velocidade de alimentação [mm/s].

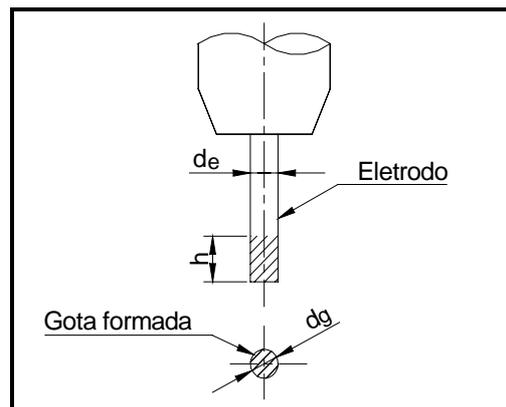


Figura 2. Modelo para a relação entre o volume da gota e da ponta fundida do arame.

Os comandos sinérgicos comerciais, além de adotarem um modelo linear para expressar a relação entre a corrente média e a velocidade de alimentação, não levam em conta o formato real da onda de corrente obtida, assumindo um modelo perfeitamente retangular como mostrado na Figura 1. Bálamo et al (1999) demonstraram que o modelo que melhor expressa a forma de onda da corrente é o modelo trapezoidal mostrado na Figura 3. Neste modelo, a corrente média passa a ser representada pela Equação 4.

$$I_m = \frac{\frac{t_1(I_p - I_b)}{2} + t_2(I_p - I_b) + \frac{t_3(I_p - I_b)}{2} + I_b(t_p + t_b)}{(t_p + t_b)}, \quad (4)$$

onde, t_1 , t_2 e t_3 estão definidos na Figura 3 e valem $t_1 = 0.05t_p$; $t_2 = t_p - t_1$; $t_3 = t_1$, como proposto por Bálamo et al (1999).

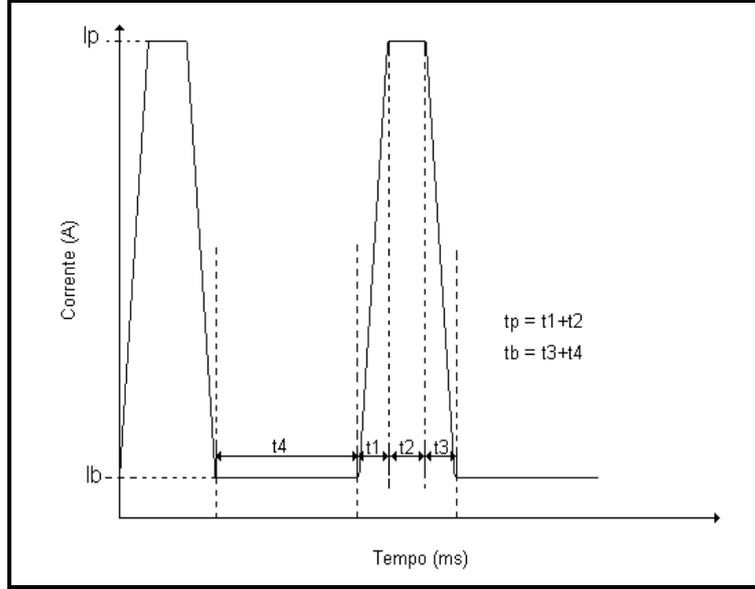


Figura 3. Modelo trapezoidal para a onda de corrente pulsada (Bálamo et al, 1999).

Os principais modelos existentes para representar a relação entre a velocidade de alimentação e a corrente média e que não são lineares estão representados nas Equações 5 e 6, demonstradas por Bálamo et al (1999) e que correspondem, respectivamente, ao formato de onda perfeitamente retangular e trapezoidal.

$$V_{alim_retangular} = \alpha I_m + \frac{\beta \ell (I_p^2 t_p + I_b^2 t_b)}{(t_p + t_b)}. \quad (5)$$

$$V_{alim_trapezoidal} = \alpha I_m + \beta \ell \left\{ I_m^2 + \frac{(I_p - I_b)^2 t_p t_b}{(t_p + t_b)^2} - \frac{(I_p - I_b)^3}{3(t_p + t_b) S_1} \right\}, \quad (6)$$

onde, I_m é a corrente média [A]; α e β são constantes experimentais; ℓ é o comprimento do eletrodo [mm]; S_1 é uma constante que depende da dinâmica da fonte [A/s].

3. METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para se conseguir a primeira premissa do processo pulsado, basta obter I_p e t_p experimentalmente para uma dada condição de UGPP e mantê-los fixos. Para conseguir a segunda premissa, definir-se-á a função objetivo a ser minimizada como mostrado na Equação 7, onde o seu mínimo global é zero, obtido quando o diâmetro da gota for igual ao diâmetro do eletrodo.

$$F = \left(\frac{d_g}{d_e} - 1 \right)^2. \quad (7)$$

A estratégia a ser seguida para o cálculo da função objetivo é mostrada no fluxograma da Figura 4 e baseia-se nos modelos apresentados anteriormente. Neste cálculo, existem quatro restrições laterais. A primeira refere-se ao fato de que I_b deve possuir um valor mínimo, o que é necessário para manter o arco aceso. Adotou-se 20 A com base em resultados experimentais (Vilarinho & Scotti, 1999). Entretanto, este valor varia em função do material e do diâmetro do eletrodo. I_b deve, ainda, possuir um valor máximo que é igual a corrente de pico, pois, caso contrário, deixa de ser base e passa a ser pico:

$$20 \leq I_b \leq I_p. \quad (8)$$

O tempo de base deve ser maior que o de pico, de tal forma reduzir ao máximo a energia do processo, mas deve ser inferior a $30,0 \cdot 10^{-3} s$, pois acima deste valor pode causar a fadiga visual e mesmo epilepsia em indivíduos susceptíveis (Nixon & Norrish, 1988), assim:

$$t_p \leq t_b \leq 0,030. \quad (9)$$

A velocidade de alimentação deve ser maior que zero, mas menor que 250 mm/s, o que é um valor prático, ou seja:

$$0 \leq V_{alim} \leq 250. \quad (10)$$

O diâmetro da gota deve ser maior que zero e menor que duas vezes o diâmetro do eletrodo. Este valor foi assumido levando-se em conta que o diâmetro da gota deve ser o mais próximo do eletrodo:

$$0 \leq d_g \leq 2 d_e. \quad (11)$$

Para assegurar que o valor calculado para a corrente de base (I_b) obedeça o mínimo estipulado pela restrição lateral (20 A), inclui-se a seguinte restrição de desigualdade:

$$I_b - 20 \geq 0. \quad (12)$$

Para implementação deste problema, utilizou-se o programa comercial DOT (Vanderplaats, 1984), cuja linguagem é o Fortran. Sendo o vetor das variáveis de projeto definido por $X = [I_b, t_b, V_{alim}, d_g]$. A estimativa inicial (X^0) foi escolhida por experiência prática e definida como $X^0 = [50 A ; 0,010 s ; 80 mm/s ; 1,0 mm$ (alumínio) ou $1,2 mm$ (aço inoxidável)].

O planejamento das simulações a serem executadas foi realizado obedecendo uma matriz de Planejamento Fatorial Completo, considerando-se três variáveis em dois níveis: dois materiais a serem estudados (ER 4043 - 1,0 mm e ER 308LSi - 1,2 mm); dois modelos para a velocidade de alimentação (retangular e trapezoidal); dois métodos de otimização com restrição: um direto (Método das Direções Viáveis - MDV) e um indireto (Método do Multiplicador de Lagrange Aumentado - MMLA).

Utilizando-se estas três variáveis em dois níveis, obteve-se oito simulações computacionais a serem realizadas, como mostrado na Tabela 1.

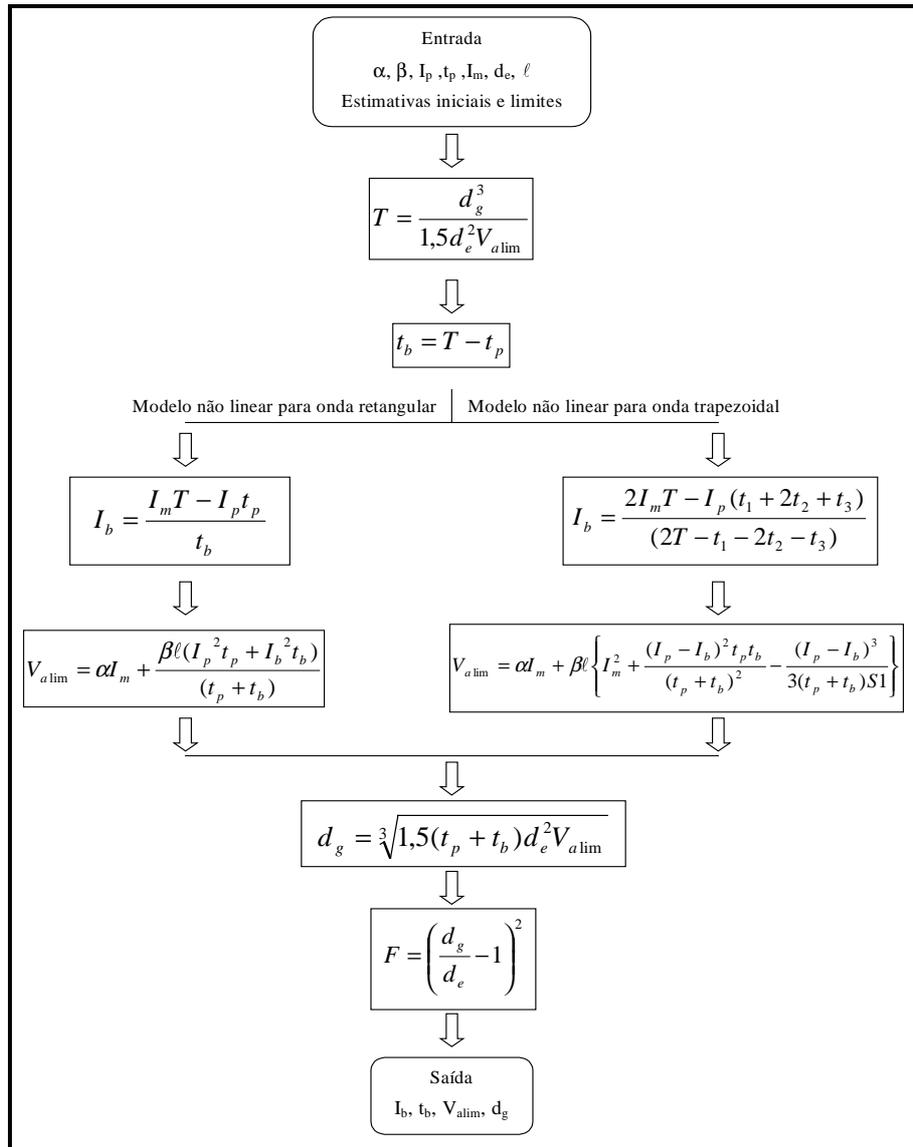


Figura 4. Fluxograma para cálculos das variáveis e da função objetivo.

Tabela 1. Simulações propostas.

Simulação	Material	Modelo	Método
1	Alumínio	Retangular	MDV
2			MMLA
3		Trapezoidal	MDV
4			MMLA
5	Aço Inoxidável	Retangular	MDV
6			MMLA
7		Trapezoidal	MDV
8			MMLA

Os dados experimentais de entrada do programa foram obtidos nos trabalhos de Bálamo & Scotti (1999) e Vilarinho & Scotti (1999), sendo mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores experimentais para implementação do programa.

Material (eletrodo)	α [mm.s ⁻¹ .A ⁻¹]	β [A ⁻² .s ⁻¹]	ℓ [mm]	I_p [A]	t_p [10 ⁻³ s]	I_m ^{III} [A]	d_e [mm]
Alumínio (ER 4043) ^I	1,11.10 ⁻⁴	2,97.10 ⁻⁵	10	198	2,25	40	1,0
Aço inoxidável (ER 308LSi) ^{II}	0,3497	7,80.10 ⁻⁵	15	285	5,63	80	1,2

^I Valores experimentais retirados do trabalho de Vilarinho & Scotti (1999).

^{II} Valores experimentais retirados do trabalho de Bálamo & Scotti (1999).

^{III} Valores mais críticos para o cálculo das variáveis do processo pelo algoritmo de Bálamo et al (1999).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com as oito simulações são mostrados na Tabela 3, onde são apresentados os valores calculados de I_b , t_b , V_{alim} e d_g , bem como o valor final e o número de avaliações da função objetivo. Na última coluna desta tabela é mostrada a corrente média obtida através da utilização da Equação 1.

Em relação a escolha do método de otimização a ser empregado, a princípio, tanto o MDV, quanto o MMLA podem ser utilizados, pois os valores encontrados foram muito próximos e as diferenças obtidas não são possíveis de serem ajustadas manualmente numa fonte de soldagem. Quanto ao número de avaliações da função objetivo, o MMLA necessitou de um menor número de chamadas, o que representa uma grande vantagem para sua utilização. Contudo, pela simulação 8, tem-se que o mínimo obtido não conduz ao valor da corrente média de entrada (80 A). Assim, o Método das Direções Viáveis (MDV) é o que deve ser utilizado para a solução deste problema.

Tabela 3. Resultados obtidos a partir das simulações efetuadas.

Simul.	I_b [A]	t_b [10 ⁻³ s]	V_{alim} [mm/s]	d_g [mm]	Função objetivo	Avaliações da função	I_m [A]
1	19,9976	17,7728	45,8138	1,11225	1,26011E-02	63	40,00
2	20,0000	17,7743	45,8134	1,11230	1,26091E-02	46	40,00
3	19,9977	17,7730	45,7962	1,11211	1,25697E-02	89	40,00
4	20,0000	17,7750	45,7961	1,11215	1,25779E-02	42	40,00
5	19,9974	19,2350	49,8556	1,38863	2,47081E-02	49	80,00
6	20,0000	19,2343	49,8541	1,38865	2,47074E-02	66	80,00
7	20,0003	19,2359	49,5449	1,38575	2,39609E-02	46	80,00
8	20,0000	12,0045	57,9593	1,30211	7,24015E-03	26	104,60

Com relação às diferenças entre os dois modelos apresentados para forma da onda, estas se mostraram muito pequenas. Como o modelo retangular necessita de um menor número de operações matemáticas, o que demanda um menor tempo computacional, este é o que deverá ser empregado. Esta igualdade entre os modelos deve-se às peculiaridades das constantes experimentais envolvidas, já que o eletrodo de alumínio apresenta baixa resistividade elétrica e o eletrodo de aço inoxidável apresenta um diâmetro relativamente grande, o que torna o valor da constante β (Equações 5 e 6) insignificante frente à constante α . Assim, os dois modelos aproximam-se bastante.

Os valores obtidos a partir das simulações efetuadas foram comparados com os resultados advindos do programa desenvolvido por Bálamo et al (1999), mostrados na Tabela 4, que é

uma nova concepção para comando sinérgico baseada nos modelos não lineares apresentados. Como os valores encontrados foram praticamente os mesmos, as simulações realizadas, num programa comercial como o DOT, serviram para comprovar o programa construído. Para efeitos práticos, o programa de Bálamo et al é o que deve ser utilizado, por possibilitar o controle em tempo real de uma fonte de soldagem.

Tabela 4. Resultados obtidos pelo programa de Bálamo et al (1999).

Material	I_m [A]	Modelo	I_b [A]	t_b [10^{-3} s]	d_g [mm]	V_{alim} [mm/s]
Alumínio ER 4043 - 1,0 mm	40	Retangular	20,000	17,775	1,1123	45,817
		Trapezoidal	20,000	17,775	1,1122	45,800
Aço Inoxidável ER 408LSi - 1,2 mm	80	Retangular	20,000	19,236	1,3886	49,855
		Trapezoidal	20,000	19,236	1,3858	49,545

5. CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que o algoritmo proposto por Bálamo et al (1999) é válido para cálculo das variáveis do processo MIG pulsado. Além disso, o modelo retangular para a forma da onda é o que deve ser utilizado no lugar do modelo trapezoidal, para os eletrodos estudados. O programa comercial DOT encontrou o ótimo respeitando as restrições impostas e o Método das Direções Viáveis (MDV) é o mais adequado para a aplicação neste tipo de problema. A imposição de uma restrição de desigualdade para a corrente de base mostrou-se eficiente para modelar o problema, fazendo com que as restrições laterais fossem totalmente obedecidas.

O método de otimização seqüencial validou os resultados obtidos através do algoritmo de seleção de variáveis do processo pulsado, proposto por Bálamo et al (1999).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcan, 1993, “Manual de Soldagem”, 1ª edição, São Paulo, 133p.
- Balsamo, P.S.S. e Scotti, A., 1999, “Implementação de um Sistema Sinérgico Não Linear na Soldagem de Aço Inoxidável Através do MIG-Pulsado”, III Seminário do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, pp. 205-210.
- Balsamo, P.S.S., Vilarinho, L. O. e Scotti, A., 1999, “Proposta de uma nova Concepção Sinérgica para Soldagem MIG Pulsado de Aço Inoxidável”, VI Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável, São Paulo, pp. 135-151.
- Nixon, J.H. e Norrish, J., 1988, “Determination of Pulsed MIG Process Parameters”, Welding and Metal Fabrication, pp. 1-20.
- Rajasekaran, et al, 1998, “Droplet Detachment and Plate Fusion Characteristics in Pulsed Current GMAW”, Welding Journal, June, pp. 254-s-269-s.
- Subramaniam, S. et al, 1998, “Droplet Transfer in Pulsed Gas Metal Arc Welding of Aluminum”, Welding Journal, November, pp. 458s-464s.
- Vanderplaats, G. N., 1984, “Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications”, McGraw Hill, 333p.
- Vilarinho, L. O. e Scotti, A., 1999, “Avaliação de Comandos Sinérgicos para a Soldagem MIG Pulsado de Alumínio”, III Seminário do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, pp. 82-87.