

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PULSO EM SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR COM PROTEÇÃO GASOSA

Luciana Márcia de Oliveira

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, email: luciana@unifei.edu.br
Av BPS, bairro Pinheirinho, 1303 – Itajubá, MG, Brasil.

Sebastião Carlos da Costa

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, email: sccosta@unifei.edu.br
Av BPS, bairro Pinheirinho, 1303 – Itajubá, MG, Brasil.

Resumo. *Este trabalho tem por finalidade a análise da influência dos parâmetros de pulso no processo de soldagem com Arame Tubular com proteção gasosa (FCAW), arame AWS E71T-1, sobre a geometria do cordão de solda em um tipo de transferência tipicamente por spray. Como atmosfera protetora foi utilizada uma mistura de Argônio + 25%CO₂, e, como parâmetros, foram analisadas as influências da corrente de pico, corrente de base, tempo de pico, tempo de base e velocidade de alimentação do arame. Como geometria do cordão, foram analisadas a penetração e a convexidade em associação com a qualidade do cordão de solda. O estudo da influência dos parâmetros de pulso na geometria do cordão de solda é de grande interesse industrial, uma vez que determinadas aplicações exigem utilizações de alguns perfis específicos. No entanto, existe uma grande dificuldade em se determinar os parâmetros mais adequados para se obter o perfil de interesse para determinada aplicação. Para execução deste trabalho foram utilizadas ferramentas estatísticas, que permitiram que várias análises fossem realizadas utilizando um pequeno número de experimentos. Com isto foi possível verificar a grande influência da velocidade de alimentação do arame sobre todas as respostas analisadas e encontrar um valor adequado para a velocidade de alimentação que permita que chapas finas sejam soldadas com o modo de transferência por spray.*

Palavras-Chave: Soldagem, Processo Eletrodo Tubular, Corrente Pulsada.

1. INTRODUÇÃO

Diante da busca de se manterem competitivas, cada vez mais, as empresas trabalham na racionalização do trabalho, redução de custos e garantia da qualidade, reduzindo-se a variabilidade dos processos. Por isto, faz-se necessário o desenvolvimento de novas tecnologias, e ou, o melhor aproveitamento das já existentes no setor manufatureiro, a fim de se obter o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis. Para uma produção industrial econômica, com qualidade e rapidez deve-se escolher e configurar de forma correta as variáveis do processo produtivo, garantindo o desenvolvimento de produtos que atendam às qualidades necessárias a um baixo custo e utilizando processos cada vez mais dinâmicos.

Dentro deste contexto, a soldagem vem adquirindo uma importância fundamental, devido, principalmente a evolução da tecnologia em várias áreas, tais como a eletrônica, a informática e a metalurgia, que tem impulsionado o desenvolvimento de vários recursos, como fontes de energia mais modernas, vários softwares, novos materiais e novos consumíveis para soldagem; o que promoveu a ampliação das aplicações industriais dos processos de soldagem automáticos e semi-automáticos como o MIG/MAG, o arco submerso e o arame tubular.

No processo de soldagem com arame tubular, o arco voltaico é estabelecido entre a peça a ser soldada e um arame tubular contínuo, cujo núcleo é preenchido por um fluxo fusível de composição química definida. A mistura deste fluxo pode incluir pó metálico, compostos minerais, sinterizados, compostos químicos, dentre outros. As principais funções cumpridas pelo fluxo são relacionadas à presença e ao teor dos elementos formadores de gás, de escória, dos estabilizadores do arco voltaico, dos desoxidantes e desnitrantes e de elementos de liga. A capa metálica pode ser de aço baixo carbono ou de um material similar àquele que será soldado, como por exemplo, um aço inoxidável⁽¹⁾.

Portanto, a principal característica do processo é a presença do fluxo, que é uma mistura de materiais cuja composição química é projetada para garantir, além das características metalúrgicas, outras características que definem a proposta do consumível. Isto torna este processo de relevante importância tecnológica, uma vez que alia a possibilidade de aumentos consideráveis na taxa de deposição através da alta produtividade dos processos de arame contínuo com as vantagens metalúrgicas dos processos com fluxos.

O processo com eletrodo tubular, a despeito de suas vantagens, apresenta algumas limitações que por vezes dificulta uma maior inserção deste processo no ambiente industrial. Neste sentido, diversas pesquisas têm sido realizadas como forma de melhor adequar o processo a determinadas características específicas da solda, como na melhoria das propriedades mecânicas da solda através de alterações no sistema ligante do fluxo^(1,2,3), na relação fluxo/formação da escória ou de seus reflexos frente a presença de contaminantes^(4,5).

Muitas outras pesquisas têm se concentrado na adequação do processo através da utilização do modo pulsado de soldagem o que permitiria sobrepor algumas dificuldades de utilização do mesmo, principalmente no que se refere à soldagem “fora de posição” ou ainda de chapas finas^(6,7).

De fato o modo pulsado; onde o arco voltaico é mantido com uma corrente de base baixa, enquanto uma corrente de pico, de curta duração, provoca o destacamento da gota, permite soldagens no modo spray com menores imposições de calor à peça. Além disso, o processo Eletrodo tubular em corrente pulsada apresenta outras vantagens como a capacidade de produzir soldas automatizadas com maior estabilidade e produtividade do que quando se utiliza o modo convencional⁽⁸⁾; o maior limite de valores de correntes, que podem ser utilizadas⁽⁶⁾, além da possibilidade de se soldar fora da posição plana⁽²⁾.

No entanto, pouco se tem estudado sobre o processo eletrodo Tubular Pulsado, sendo escassas as fontes de pesquisas. Além disto, neste modo de soldagem são muitos os fatores variáveis responsáveis pela manutenção da operação de soldagem, devido a sua complexa natureza, o que exige um alto grau de habilidade por parte dos soldadores, na correta seleção dos parâmetros operacionais.

Este fato tem motivado as pesquisas sobre a influência dos parâmetros operacionais sobre as características da soldagem com arame tubular. Nascimento et al⁽⁹⁾, por exemplo, realizaram um procedimento experimental para seleção de parâmetros de pulso para soldagem com arame tubular, através do qual desenvolveu um pacote operacional, de acordo com uma velocidade de alimentação do arame de referência e um volume de gota específico. O desenvolvimento desses pacotes operacionais em corrente pulsada para diferentes tipos de metal de adição e em vários diâmetros de eletrodo, é muito importante porque contribui para a formação de um banco de dados que conseqüentemente auxilia na extinção das já mencionadas limitações sofridas pelo processo pulsado.

Com o mesmo intuito, Braga et al⁽⁸⁾, estudaram o efeito da combinação da corrente média com níveis de variação da frequência de pulso e do “stickout” (distância tocha-peça), sobre a estabilidade do arco, as características econômicas do processo e a geometria do cordão de solda. Segundo eles, o aumento do “stickout” proporciona uma redução na estabilidade do arco, um aumento nas taxas de fusão e deposição e uma redução na penetração lateral e de raiz, que pode ser causada pela diminuição da energia de soldagem, e conseqüentemente diminuição da diluição do metal de base, e um aumento na largura do cordão. O aumento da corrente média também ocasiona o crescimento na largura do cordão. Blackman & Norrish⁽¹⁰⁾, afirmam que o efeito da corrente média sobre a geometria do cordão, para soldagem com Eletrodo tubular, é o mesmo que para soldagem com arame sólido. Assim sendo, com o aumento da corrente média, o reforço e a penetração aumentam linearmente e a diluição também aumenta. Portanto, melhores perfis de solda seriam encontrados utilizando-se altas correntes médias, o que, no entanto, na prática, é limitado pela posição de soldagem e energia fornecida ao processo. O efeito da velocidade de soldagem também é o mesmo para ambos os processos (com arame sólido e tubular), porém com limites diferentes. Com o aumento da velocidade de soldagem a penetração aumenta e o reforço diminui

rapidamente. Porém com arames sólidos, isto ocorre até uma velocidade de soldagem limite de 12 cm/min; e com arames tubulares este limite aumenta para 24 cm/min⁽¹⁰⁾.

Portanto, os objetivos deste trabalho são estudar a influência dos parâmetros de pulso, representados pela corrente de pico (I_p), corrente de base (I_b), ciclo ativo, que é a relação entre tempo de deposição e o tempo total de soldagem, e a velocidade de alimentação do arame sobre as características geométricas da solda representadas pela penetração e convexidade do cordão associadas à qualidade superficial dos cordões de solda.

2. MATERIAIS, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS

Para a realização do experimento utilizou-se uma fonte transistorizada inversora com comando digital, modo de soldagem pulsada com imposição de corrente, 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.

Utilizou-se, ainda, o Planejamento Fatorial Fracionado em Dois Níveis, onde cada fator assume um valor superior e um inferior. Combinando-se esses níveis entre todos os fatores obtém-se 2^{n-1} experimentos, onde n é o número de fatores analisados. Os valores assumidos para os níveis encontram-se 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 ciclo ativo (CA) pretendido.

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

Fator	Unidade	Nível Inferior	Nível Superior
Corrente de pico, I_p	A	280	350
Corrente de base, I_b	A	70	100
Ciclo Ativo, CA	%	40	50
Vel.de alim., v	m/min	5	6

A seqüência de combinação dos fatores foi definida segundo a ordem padrão OP descrita na Tabela 2, gerados a partir do software comercial MINITAB, sendo os experimentos realizados com duas replicagens.

As demais variáveis do processo foram mantidas constantes, sendo as soldagens realizadas em CCEP (CC+), utilizando arame AWS E71T-1 de diâmetro 1,2 mm e material de base de aço ABNT 1045, com dimensões de 120x40x6 mm. Como gás de proteção foi utilizada a mistura Argônio + 25%CO₂ com vazão de 15 l/min e velocidade de soldagem de 40 cm/min. A distância tocha-peça foi mantida em 17.5 mm e recuo do bico de contato de 5 mm.

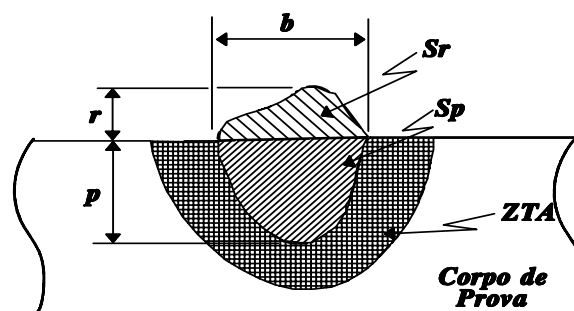


Figura 1. Representação da área da seção transversal do cordão de solda

Realizados os ensaios, os corpos de prova foram avaliados quanto à qualidade visual através de dois profissionais diferentes, considerando como critérios de avaliação o aspecto, o formato e a ausência de irregularidades superficiais do cordão, sendo atribuídas uma nota de 0 a 10 para cada critério em separado e, posteriormente, computado a média de todos os critérios. Findo esta etapa os corpos de prova foram seccionados, polidos e atacados quimicamente com nital 2%. A seguir, com o auxílio de um projetor de perfis e um planímetro, registraram-se as áreas de penetração (S_p) e de

reforço (Sr), bem como a penetração do cordão (p), sua largura (b) e reforço (r), conforme esquema mostrado na Figura 1. De posse dos resultados dos parâmetros acima descritos determinou-se o índice derivativo índice de convexidade, que é dado pela Equação 1. Os resultados obtidos nos experimentos estão contidos na Tabela 2.

$$IC = (r/b) * 100 (\%) \tag{1}$$

Tabela 2. Matriz de experimentação e resultados obtidos.

OP	Ip (A)	Ib (A)	CA (%)	Va (m/min)	P (mm)	IC (%)	Qualidade
1	280	70	40	5	0,6	22,1	9,0
2	350	70	40	6	1,3	19,0	9,0
3	280	100	40	6	1,0	18,2	9,7
4	350	100	40	5	0,7	16,7	5,5
5	280	70	50	6	0,9	10,6	8,5
6	350	70	50	5	1,0	23,8	6,0
7	280	100	50	5	0,9	21,0	3,9
8	350	100	50	6	0,6	17,9	6,5
9	280	70	40	5	0,6	20,7	8,0
10	350	70	40	6	0,7	20,2	9,4
11	280	100	40	6	0,9	15,3	9,0
12	350	100	40	5	0,7	20,5	7,5
13	280	70	50	6	1,1	17,3	9,0
14	350	70	50	5	0,4	25,0	5,0
15	280	100	50	5	0,8	19,8	5,7
16	350	100	50	6	0,8	13,3	7,3

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1. Análise da Penetração

A Figura 2 mostra a influência dos fatores através do Gráfico de Pareto, considerando um nível de significância de 95%. Desta figura pode-se observar que a velocidade de alimentação do arame é o único fator significativo na penetração. Como era de se esperar o seu aumento gera, em consequência, um aumento da penetração em função da provável diminuição do comprimento do arco e uma melhor abrangência do cordão de solda. Observa-se ainda da mesma figura que os outros fatores, bem como suas interações não se mostraram significativos dentro da superfície de estudo. Entretanto, considerando os efeitos principais dos fatores na resposta em questão, mostrados na Figura 3, observa-se que a obtenção de uma maior penetração é possível trabalhando-se com os fatores nos níveis “Ip (-), Ib (+), CA (+) e Va (+)”.

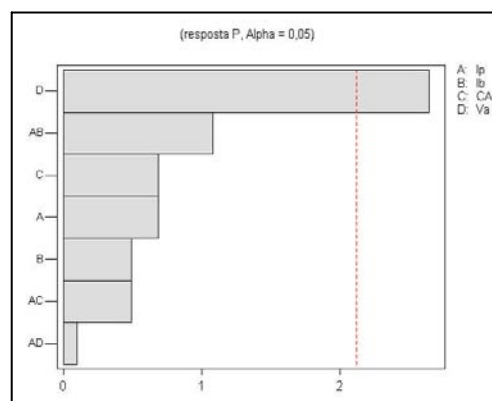


Figura 2. Efeito dos fatores na penetração da solda – Gráfico de Pareto

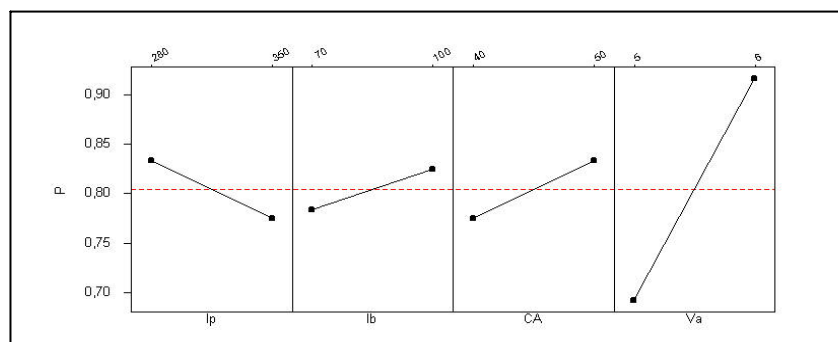


Figura 3. Efeitos principais dos fatores na penetração

3.2. Análise da Convexidade da Solda

De acordo com o gráfico de Pareto da Figura 4, considerando um nível de significância de 95%, a velocidade de alimentação do arame foi novamente, o único fator significativo que influencia na convexidade do cordão. Observa-se ainda que a interação da corrente de pico com a corrente de base praticamente se situaram no limite de significância da resposta, sendo por isto também consideradas significativas para efeitos de análise. Considerando-se os efeitos principais dos fatores na convexidade da solda, Figura 5, observa-se que para o parâmetro significativo velocidade de alimentação a condição que permite a obtenção de um cordão mais plano, foi a de utilização deste fator em seu nível máximo, ou seja, 6 m/min. Entretanto, vale ressaltar que as variações na convexidade do cordão obtidas não mostraram uma grande variação, se situando entre o nível máximo próximo de 20,2% e mínimo de 17,8%.

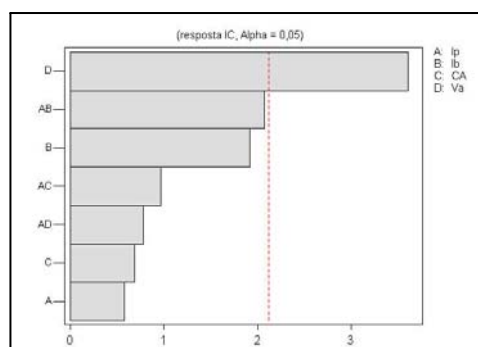


Figura 4. Efeito dos fatores no índice de convexidade – Gráfico de Pareto

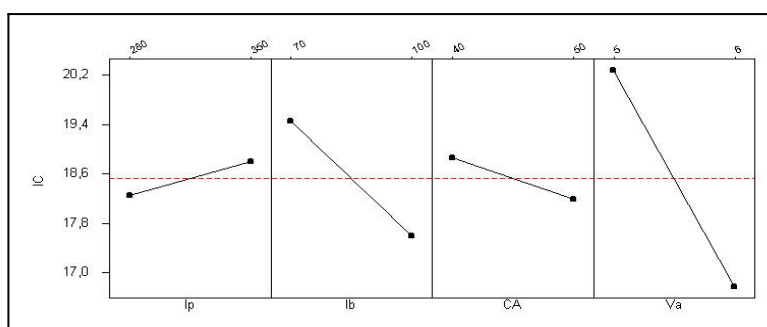


Figura 5. Efeitos principais dos fatores no índice de convexidade

Com relação à interação significativa da corrente de pico com a de base, a Figura 6 apresenta a superfície de contorno referente à influência destes fatores na convexidade do cordão, onde se observa que a obtenção de uma menor convexidade do cordão é favorecida pela utilização da corrente de pico e de base em seus níveis superiores, ou seja 350 A e 100 A respectivamente.

Desta forma, considerando-se estas análises, uma menor convexidade da solda pode ser obtida trabalhando-se com os parâmetros nos níveis “Ip (+), Ib (+), CA (+) e Va (+)”.

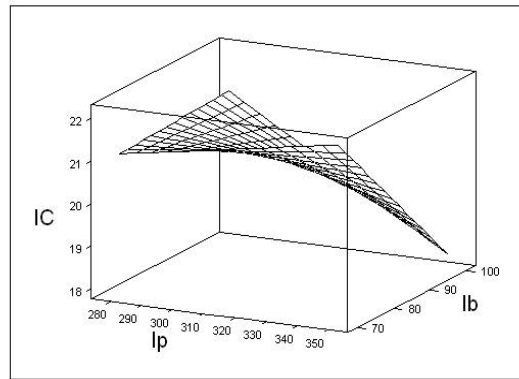


Figura 6. Efeito da interação da corrente de pico e de base na convexidade do cordão.

3.3. Análise da Qualidade Visual do Cordão

A qualidade visual do cordão é uma resposta importante para a adequação do processo. Observou-se dos testes realizados que esta qualidade oscilou de forma bastante significativa, desde cordões com aspecto excelente até cordões de aspecto razoável. Considerando a influência dos elementos, nota-se da Figura 7 que, para um nível de significância de 95%, as análises estatísticas permitiram verificar que os parâmetros velocidade de alimentação do arame, ciclo ativo, corrente de base e de pico são, nesta ordem, aqueles que influenciaram significativamente na qualidade da solda.

Na análise dos efeitos principais de cada parâmetro sobre a resposta analisada (Figura 8), observa-se que a melhor qualidade do cordão pode ser obtida através da seguinte configuração de parâmetros: Ip (-), Ib (-), CA (-) e Va (+).

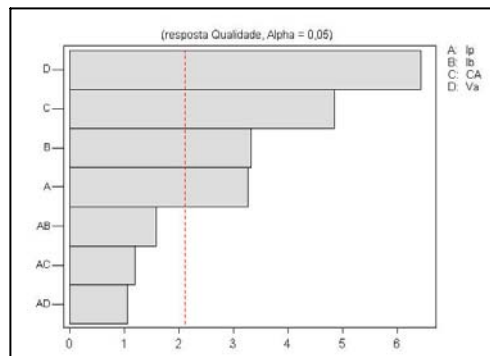


Figura 7. Efeito dos fatores na Qualidade do Cordão – Gráfico de Pareto

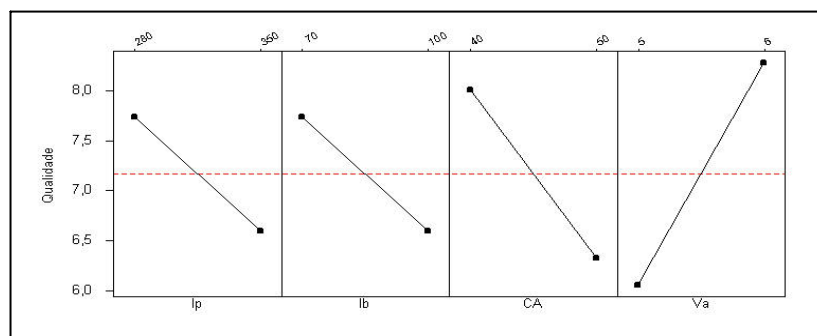


Figura 8. Efeitos principais dos fatores na qualidade do cordão

3.4. Testes Posteriores

Conforme observado, nota-se claramente a grande importância da velocidade de alimentação do arame sobre o processo com eletrodo tubular, sendo a mesma significativa em todas as respostas estudadas. Isto sugere que uma atenção especial seja dedicada à velocidade de alimentação, com o objetivo de se esclarecer vários pontos ainda desconhecidos sobre o comportamento da soldagem com este processo.

Além disso, notou-se que os resultados de penetração obtidos foram relativamente inferiores ao esperado (Tabela 2), notadamente com relação ao processo com arame sólido. Porém, isto pode ter ocorrido em função da fusão do arame tubular apresentar diferenças em relação aos arames sólidos, pois, provavelmente, a taxa de aquecimento da capa metálica do arame tubular deve ser menor devido ao consumo de calor requerido para a fusão do fluxo. Desta forma a energia necessária para fundir o arame tubular é maior do que a necessária para fundir um arame maciço, precisando então, a soldagem com aquele, de níveis de energia maiores.

Portanto, novos testes fizeram-se necessários. Assim, variou-se a corrente média, procurando impor ao processo três níveis de energia, uma baixa, uma média e uma alta, analisando as variações de penetração e também da área total do cordão, cujos resultados encontram-se na Tabela 3; e a velocidade de alimentação do arame, também em três níveis, procurando conhecer um pouco mais a sua influência sobre o processo.

Desta forma, a partir de uma condição considerada a mais adequada, ou seja, aquela que apresentou o melhor resultado combinando-se todas as respostas apresentadas, adicionalmente, nove testes foram realizados e os resultados encontram-se na Tabela 3. É importante ressaltar que os valores da variável Qualidade, encontrados na Tabela 3 referem-se à avaliação da aparência do cordão de solda, que é feita considerando o aspecto, o formato e a ausência de irregularidades superficiais do cordão.

Com os resultados obtidos foram gerados os gráficos das Figuras 9 e 10, que apresentam a variação da penetração e da área total do cordão, respectivamente, em função da variação da corrente média e da velocidade de alimentação do arame.

Através do gráfico da Figura 9 pode-se observar que a condição mais adequada é a de velocidade de alimentação do arame igual a 6 m/min, pois com ela é possível encontrar um valor próximo do máximo encontrado para a penetração soldando com uma corrente média intermediária. Além disso, a qualidade visual do cordão, nesta condição, é satisfatória, conforme pode ser observado na Tabela 3. A mesma análise pode ser feita para a área total (Figura 10), pois é possível chegar próximo ao máximo de área do cordão com esta mesma condição. Este resultado permite que chapas finas sejam soldadas utilizando-se o modo de transferência por spray, como objetiva a soldagem no modo pulsado. Além disso, outro fato interessante a ser observado nestes gráficos, é que tanto a penetração como a área total do cordão, seguem a mesma tendência. Assim, um aumento na penetração indica, necessariamente, um aumento na área total e vice e versa.

Tabela 3. Resultados de Testes Posteriores

Teste	Im (A)	CA (%)	Va (m/min)	P (mm)	St (mm ²)	Qualidade visual
1	190	50	5	0.9	20.0	4
2	190	50	6	1.1	23.4	7
3	190	50	7	1.2	24.2	9
4	172	40	5	0.5	9.9	6
5	172	40	6	1.1	22.0	9
6	172	40	7	1.0	22.1	10
7	160	33	5	1.0	16.6	6
8	160	33	6	1.0	16.1	10
9	160	33	7	0.5	19.2	8

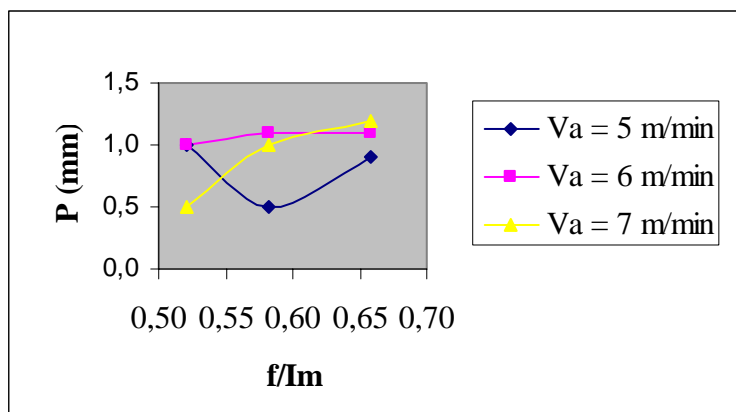


Figura 9. Influência da corrente média e velocidade de alimentação do arame sobre a penetração

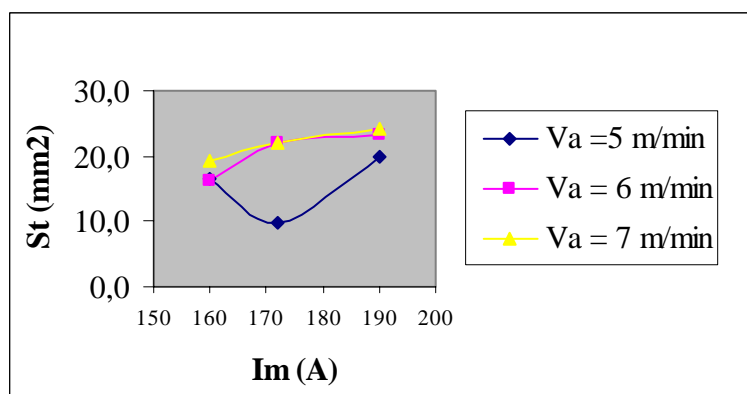


Figura 10. Influência da corrente média e velocidade de alimentação do arame sobre a área total do cordão

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho mostraram que a velocidade de alimentação do arame exerce uma grande influência sobre todas as respostas estudadas, sendo o fator mais significativo para a maioria das respostas.

Verificou-se também que, dentre os valores de velocidade de alimentação analisados, o de 6 m/min foi considerado como o mais adequado. Com esta condição consegue-se uma soldagem com bons resultados de penetração e área do cordão com uma corrente média intermediária, além de fornecer uma qualidade visual do cordão satisfatória. Logo, é possível atender o objetivo da soldagem pulsada, ou seja, soldar chapas de pequenas espessuras utilizando o modo de transferência por spray.

Além disto, notou-se que a penetração e a área do cordão de solda apresentam a mesma tendência de variação com a corrente média.

5. REFERÊNCIAS

1. Mota, C. A. M. **Níquel e Manganês como Controladores da Tenacidade na Soldagem com Arames Tubulares Autoprottegidos**. 1998. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
2. FRENCH, I, E. et al. Special Basic Flux Cored Wire for All-Position Pulsed Welding. **Welding Journal**, v. 76, n. 3, pp. 120s-124s, march. 1997.
3. LEE, H.W. et al. Fatigue Strength Depending on Position of Transverse Cracks in FCAW Process. **Welding Journal**, v. 80, n. 6, pp. 110s-114s, june 2001.

4. BAUNÉ, E. et al. Reconsidering the Basicity of a FCAW Consumable – Part 1: Solidified Slag Composition of a FCAW Consumable as a Basicity Indicator. **Welding Journal**, v. 79. n.3, pp. 57s-65s, march 2000.
5. ATKINS, G. et al. Welding Process Effects in Weldability Testing of Steel. **Welding Journal**, v.81, n.3, pp. 61s-68s, april 2002.
6. FRENCH, I, E. et al. A Comparasion of Pulsed and Conventional Welding with Basic Flux Cored and Metal Cored Welding Wires. **Welding Journal**, v. 74, n. 6, pp. 197s-205s, june1995.
7. MEDEIROS, R.C. et al. Estudo da Aptidão dos Arames Tubulares à Soldagem MIG com Transferência Controlada. **Soldagem & Materiais**, 1(4), pp. 44 – 49, out/dez, 1989.
8. BRAGA, E. M. et al. Uma Contribuição ao Estudo da Soldagem a Arame Tubular Autoprottegido em Corrente Pulsada. In: XXIV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM XI CONGRESSO LATINO-AMERICANO e IBERO-AMERICANO DE SOLDAGEM, 1998, Fortaleza.
9. NASCIMENTO, A. S. et al. Procedimento Experimental para seleção de Parâmetros de Pulso para Soldagem com Arame tubular em Corrente Pulsada. In: COBEF-CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2003, Uberlândia.
10. Blackman, S. t al. Pulsed MIG welding with Gas-Shielded Flux Cored Wires; MIG Synergic Update. **Welding & Metal Fabrication** – Special Supplement, pp. 12-14, April 1998.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF PARAMETERS IN PULSED GAS-SHIELDED FLUX CORED WIRES

Luciana Márcia de Oliveira

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, email: luciana@unifei.edu.br
Av BPS, bairro Pinheirinho, 1303 – Itajubá, MG, Brasil.

Sebastião Carlos da Costa

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, email: sccosta@unifei.edu.br
Av BPS, bairro Pinheirinho, 1303 – Itajubá, MG, Brasil.

Abstract. *This work has the aim to analyse the influence of the pulse parameters in a Gas-Shielded Flux Cored Arc Welding Process (FCAW) with a gas mixture of Ar-25%CO₂ protection on the weld bead geometry in a transference mode typically for spray. The pulse parameters analysed were peak and background current, peak and background time associated with the wire feed rate. The weld bead geometry analysed were the penetration, the convexity and the quality of the weld bead. This study has a great industrial interest since the adequation of the process to a specific application is a time consuming, and mainly difficult to reach without the knowledge of influence of parameters in a particular application. This study has an industrial interest since exists a great difficulty in determining the most adequate parameters to get a suitable profile for a particular application. For execution of this work statistical tools were used and were carried out through a small number of experiments. The results showed that all answers were greatly affected by the wire speed rate, and its influence allowed to get the most adequated wire speed applied to the thin welding plates by the use of spray transfer mode.*

Key-words: *Welding, Flux Cored Arc Welding, Pulsed Current.*