

Uma investigação dos parâmetros de pulso em soldagem com arame tubular

AN INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF PULSE IN WELDING WITH FLUX CORED WIRE

Luciana Márcia de Oliveira
Sebastião Carlos da Costa
Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

RESUMO

O processo de soldagem com eletrodo tubular com corrente pulsada pode ser uma alternativa para a soldagem de chapas finas e, em todas as posições. As dificuldades para sua utilização residem no ajuste dos parâmetros de pulso e sua conseqüente influência na geometria dos cordões. Desta forma, este trabalho tem por finalidade ampliar o conhecimento sobre a influência dos parâmetros corrente de pico, corrente de base, tempo de pico, tempo de base e a velocidade de alimentação do arame no processo de soldagem com Arame Tubular com proteção gasosa (Argônio + 25% CO₂) sobre a penetração e convexidade do cordão de solda. Através da utilização de ferramentas estatísticas foi possível verificar a grande influência da velocidade de alimentação do arame sobre as respostas analisadas. Além disso, obteve-se uma condição que permitiu maximizar as respostas analisadas, e através dela foi possível ajustar as condições inicialmente utilizadas, de modo a investigar um novo conjunto de valores para os parâmetros estudados.

PALAVRAS CHAVE

Soldagem. Processo Eletrodo Tubular. Corrente Pulsada.

ABSTRACT

The pulsed Flux Cored Arc Welding process can be an alternative for welding of thin plates and in positional welding. However, the exploitation of the advantages of pulsed current FCAW process is dependent upon right selection of various pulsed parameters that influence the process. Therefore, this paper has the objective of to enlarge the knowledge on the influence

of the pulse parameters besides the wire speed rate in a Gas-Shielded Flux Cored Arc Welding Process (FCAW) with a gas mixture of Ar-25%CO₂ on the penetration of the weld bead and on the convexity of the weld bead. The results showed that all answers were greatly affected by the wire speed rate. Besides, it was obtained a condition that allowed to maximize the analyzed answers, and through her it was possible to adjust the conditions initially used, in way to investigate a new group of values for the studied parameters.

KEYWORDS

Welding. Flux Cored Arc Welding. Pulsed Current.

INTRODUÇÃO

Atualmente, devido a incessante busca de se manterem competitivas, as indústrias estão interessadas na obtenção de processos de soldagem que conjuguem a versatilidade, produtividade, qualidade e baixos custos.

Nesse contexto, a soldagem com Eletrodo Tubular tem se destacado devido as suas vantagens em relação a outros processos, principalmente no que se refere a sua alta produtividade e excelente qualidade dos cordões.

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

desnitretantes 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 (Mota, 1998).

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 (Mota, 1998; French, 1997; Lee, 2001), na relação fluxo/formação da escória ou de seus reflexos frente a presença de contaminantes (Bauné, 2000; Atkins, 2002).

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 (French, 1995; Medeiros, 1989).

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 (Braga, 1998); o maior limite de valores de correntes, que podem ser utilizadas (French, 1995), além da possibilidade de se soldar fora da posição plana (French, 1997).

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 ma-

nutenção 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 (2003), 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.

Com o mesmo intuito, Braga et al (1998), 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. Blackman e Norrish (1998), 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 poderiam ser gerados utilizando-se altas correntes médias o que, na prática, é limitado pela posição de soldagem e energia fornecida ao processo, bem como os seus reflexos metalúrgicos.

Portanto, o objetivo deste trabalho é ampliar o conhecimento sobre a influência dos parâmetros de pulso, representados pela corrente de pico (I_p), corrente de base (I_b), ciclo ativo, expresso pela relação entre tempo de deposição e o tempo total de soldagem, e a velocidade de alimentação do arame sobre a penetração e convexidade do cordão de solda.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

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, Ip	A	280	350
Corrente de base, Ib	A	70	100
Ciclo Ativo, CA	%	40	50
Vel.de alim., Va	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.

Realizados os ensaios, os corpos de prova foram avaliados quanto à qualidade visual (Q), 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 aumento de 20X avaliou-se a penetração do cordão (p), sua largura (b) e reforço (r). De posse dos resultados dos parâmetros acima descritos determinou-se o índice derivativo relativo à convexidade (IC), determinado pela Eq. 1. Os resultados obtidos nos experimentos estão contidos na Tabela 2.

$$IC = \frac{r}{b} \times 100 \quad (1)$$

Tabela 2. Matriz de experimentação e resultados obtidos

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

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Para avaliar de maneira mais consistente os efeitos dos fatores empregados sobre as respostas observadas, estas foram submetidas à análise de variância. Neste trabalho, considerou-se como critério de análise que um determinado fator de controle afetou estatisticamente uma resposta, quando o nível á obtido for inferior a 5%, ou seja, uma confiabilidade estatística de 95%.

A Tabela 3 mostra os valores do nível á para as respostas referentes aos parâmetros estudados e interações entre parâmetros. Os números em negrito, nesta tabela, indicam que os valores médios das respostas foram estatisticamente afetados pelos fatores de controle conforme critério estabelecido.

Tabela 3. Resultados da análise de variância

Resposta	Fatores						
	Ip	Ib	CA	Va	Ip*Ib	Ip*CA	Ip*Va
P	0,502	0,631	0,502	0,018	0,297	0,631	0,923
IC	0,568	0,073	0,492	0,002	0,055	0,351	0,442

Nota-se pelos resultados a forte influencia da velocidade de alimentação do arame (Va) em todas as respostas. Os outros fatores não influenciaram as respostas com exceção da qualidade do cordão. Com relação às interações nota-se que apenas a convexidade do cordão é influenciada, sendo neste caso considerada afetada pela interação da corrente de pico (Ip) com a de base (Ib), por apresentar o nível á praticamente no limite de significância .

ANÁLISE DA PENETRAÇÃO

A Fig. 1 apresenta os efeitos principais de cada fator analisado sobre a penetração. Nota-se, nessa figu-

ra, que o aumento da alimentação do arame, fator significativo na resposta em questão, promove o aumento de penetração sendo isto provavelmente ocasionado por uma diminuição do comprimento do arco e uma melhor abrangência do cordão de solda. Apesar de outros fatores, bem como suas interações não se mostrarem significativos dentro da superfície de estudo, os resultados sugerem que a manutenção da corrente de pico no nível inferior associado a todos os outros fatores em seus níveis superiores resultará no melhor resultado para a penetração.

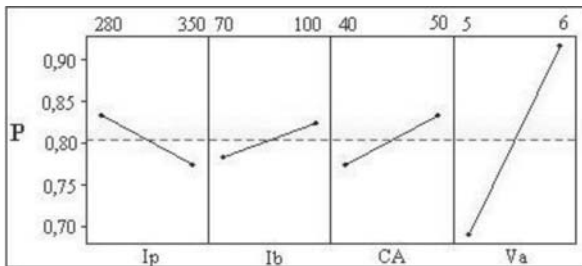


Figura 1. Efeitos principais dos fatores na penetração

ANÁLISE DA CONVEXIDADE DA SOLDA

Considerando-se os efeitos principais dos fatores na convexidade da solda, Fig. 2, observa-se que para o parâmetro significativo alimentação do arame (V_a), a condição que permite a obtenção de um cordão mais plano, foi à de utilização deste fator em seu nível máximo, ou seja, 6 m/min. Entretanto, vale ressaltar que as variações na convexidade do cordão não foram muito grandes, se situando entre os níveis máximo, próximo de 20,2%, e mínimo de 17,8%. Com relação à interação significativa da corrente de pico (I_p) com a de base (I_b), a Fig. 3 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.

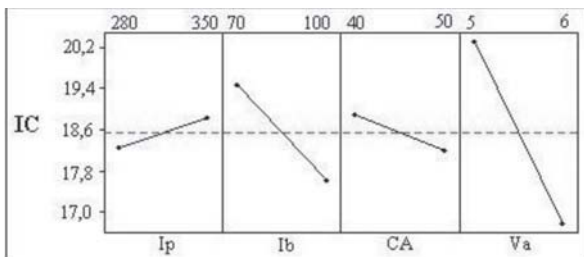


Figura 2. Efeitos principais dos fatores na convexidade do cordão

Desta forma, considerando-se estas análises, os resultados sugerem que uma menor convexidade da solda (resultado desejável) pode ser obtida trabalhando-se com todos parâmetros em seus níveis superiores.

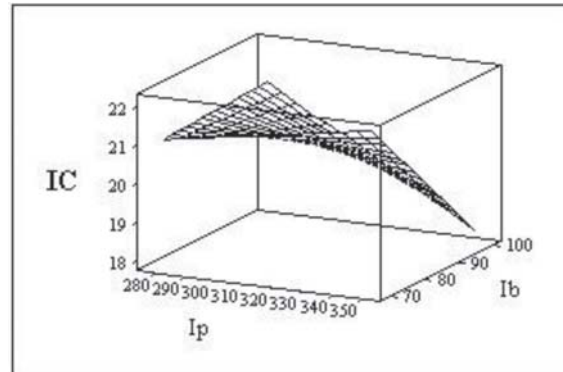


Figura 3. Efeito da interação da corrente de pico e de base na convexidade do cordão

OTIMIZAÇÃO

Para obter um resultado que permita conjugar todos os fatores estudados na obtenção de uma geometria adequada, ou seja, a condição ótima, utilizou-se a ferramenta "Response Optimizer" do software utilizado.

A resposta obtida encontra-se na Tabela 4 e corresponde a condição dos testes 3 e 11 da planilha de ensaios (Tabela 2), cujos resultados aproximam-se dos previstos pelo "Response Optimizer", validando os resultados deste.

Tabela 4. Quadro resumo das respostas obtidas pelo "Response Optimizer"

Condição ótima	Respostas Previstas	Desejabilidade
$I_p = 280$ A	P = 0,93 mm IC = 17,0 %	0,93 1,00
$I_b = 100$ A		
CA = 40%		
$V_a = 6$ m/min	Coefficiente de Desejabilidade Global: 0,99	

TESTES COMPLEMENTARES

Conforme observado, nota-se claramente a grande influência 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, segundo a literatura, a fusão do arame tubular apresenta diferenças em relação aos arames

sólidos. Segundo Wang (1995), a área metálica do arame tubular é muito menor que a do arame maciço (com o mesmo diâmetro).

Portanto, novos testes fizeram-se necessários, com o objetivo de explorar os níveis de energia na soldagem com Eletrodo Tubular. Assim, variou-se a corrente média, procurando impor ao processo três níveis de energia de soldagem, analisando as variações da penetração e do índice de convexidade, cujos resultados encontram-se na Tabela 5; 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 ótima, ou seja, aquela que apresentou o melhor resultado combinando-se todas as respostas apresentadas anteriormente (Tabela 4), adicionalmente, nove testes foram realizados e os resultados encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5. Resultados dos testes complementares

Teste	Ip (A)	Ib (A)	Tp	Tb	Im (A)	CA (%)	Va (m/min)	P (mm)	IC (%)
1	280	100	4	4	190	50	5	0,9	21,0
2	280	100	4	4	190	50	6	1,1	17,7
3	280	100	4	4	190	50	7	1,2	17,3
4	280	100	4	6	172	40	5	0,5	21,9
5	280	100	4	6	172	40	6	1,1	18,2
6	280	100	4	6	172	40	7	1,0	39,6
7	280	100	4	8	160	33	5	1,0	18,4
8	280	100	4	8	160	33	6	1,0	22,2
9	280	100	4	8	160	33	7	0,5	42,9

ANÁLISE DA PENETRAÇÃO

Na Fig. 4, observa-se que há uma tendência de aumento da P com o aumento da Im para as velocidades de alimentação do arame de 6 e 7 m/min. Isto se deve ao aumento da energia que, segundo Mills e Keene (1990) provoca uma maior pressão no arco, determinando um aumento na penetração. Nota-se que, para a Va de 5 m/min, houve uma redução da P com o aumento da Im de 160 A para 172 A. Este resultado não era esperado e sugere-se um estudo mais aprofundado para entendê-lo. Para o aumento de 172 A a 190 A notou-se, novamente, um aumento na penetração, conforme esperado.

Considerando o efeito da Va sobre a P, nota-se que há um aumento da P com a elevação da Va, para a Im mantida em 190 A. Isto ocorre, porque com o aumento da Va, há um aumento do comprimento do arco e da energia gerada, além de que, o maior comprimento do eletrodo provoca um menor comprimento do arco e uma melhor abrangência do cordão. Para a velocidade de 172 A, observa-se um aumento da P com o incremento da Va de 5 para 6 m/min, o que já

era esperado; e uma redução da P com o aumento da Va de 6 para 7 m/min. Para a Im constante em 160 A, observa-se, inicialmente, uma constância no resultado de penetração, seguido de uma diminuição, com o aumento da Va. Esses resultados, no entanto, não são esperados e precisam de estudos mais profundos para serem entendidos.

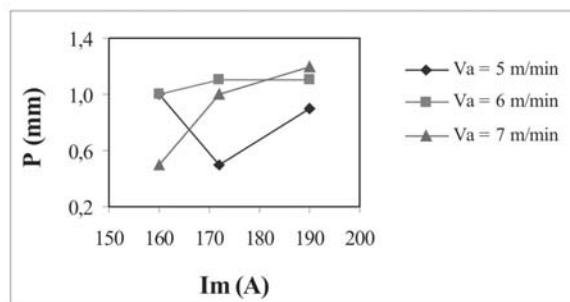


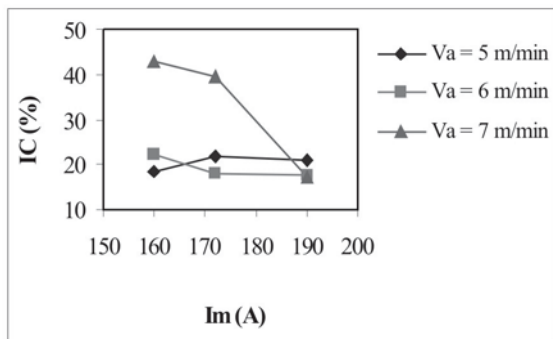
Figura 4 - Efeito da Corrente Média sobre a Penetração

ANÁLISE DA CONVEXIDADE DO CORDÃO

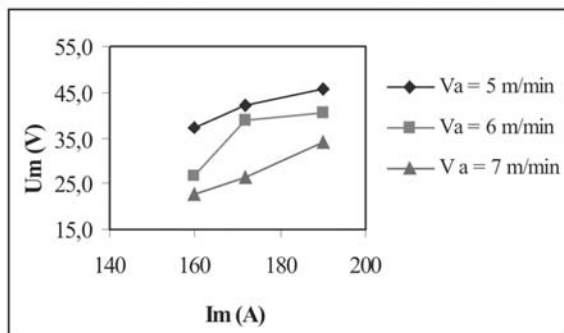
A Fig. 5 (a) mostra o efeito da Im e da Va sobre o IC. Nota-se neste gráfico, que para as velocidades de alimentação do arame de 6 e 7 m/min, há uma redução da convexidade do cordão com o aumento da Im. Isto se justifica pela variação da tensão mostrada na Figura 7 (b). Observa-se que o aumento da Im provoca um aumento na tensão (U_m). Com esse aumento da U_m , há uma redução do comprimento do eletrodo e, conseqüentemente, do efeito Joule, reduzindo a fusão do eletrodo. Além disso, com a tensão maior há também um maior espalhamento do plasma, o que resulta em um cordão mais largo e mais plano. Para a Va de 5 m/min, nota-se um comportamento contrário quando a Im aumenta de 160 A para 172 A. Para o aumento de Im de 172 A para 190 A, com Va de 5 m/min novamente há uma redução do IC, explicado também pelo aumento de tensão observado nesse intervalo, conforme mostra a Fig. 5 (b).

Analisando a variação do IC com o aumento da Va, nota-se na Fig. 5 (a) que para Im de 160 A, o aumento da Va causa um aumento no IC, conforme se esperava. Entretanto, à medida que a Im vai aumentando, este comportamento vai se invertendo, sendo que para a Im de 190 A, o aumento da Va provoca uma redução no IC. Isto acontece, porque com o aumento da Im houve também um aumento da tensão, conforme observado na Fig. 5 (b). Portanto, com o aumento da tensão, há uma redução no efeito Joule, através da diminuição do comprimento do eletrodo, reduzindo a

fusão do mesmo; e ainda há um alargamento do arco fazendo com que o cordão se torne mais largo e menos convexo.



(a)



(b)

Figura 5 – Efeito da variação da corrente média sobre (a) Im (b) Um

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho mostraram que a velocidade de alimentação do arame exerce uma grande influência no processo com eletrodo tubular para as respostas estudadas.

Verificou-se também uma tendência de crescimento da penetração com o aumento da corrente média, principalmente para as velocidades de alimentação de 6 e 7 m/min. Houve também uma tendência de aumento da penetração com o incremento da velocidade de alimentação do arame.

Em relação à convexidade do cordão, observou-se uma tendência de redução com o aumento da corrente média, provavelmente, em consequência, do aumento da tensão com o incremento da corrente média. Verificou-se também, que a variação da velocidade de alimentação do arame, para corrente média de 160 A, provocou um aumento no índice de convexidade; no entanto, com o aumento da corrente média, foi

observado um comportamento contrário, sendo que o aumento da velocidade de alimentação do arame passou a causar uma redução na convexidade do cordão. Isto porém, foi justificado pela variação da tensão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo apoio financeiro através da bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

Atkins, G. et al., 2002. Welding Process Effects in Weldability Testing of Steel. *Welding Journal*, v.81, n.3, pp. 61s-68s.

Bauné, E. et al., 2000. 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.

Blackman, S. et al., 1998. Pulsed MIG Welding with Gas-Shielded Flux Cored Wires; MIG Synergic Update. *Welding & Metal Fabrication – Special Supplement*, pp. 12-14.

Braga, E. M. et al., 1998 Uma Contribuição ao Estudo da Soldagem a Arame Tubular Autoprottegido em Corrente Pulsada. *XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem XI Congresso Latino-Americano e Ibero-Americano de Soldagem*. Fortaleza, pp. 41-46.

French, I. E. et al., 1995. A Comparison of Pulsed and Conventional Welding with Basic Flux Cored and Metal Cored Welding Wires. *Welding Journal*, v. 74, n. 6, pp. 197s-205s.

French, I. E. et al., 1997. Special Basic Flux Cored Wire for All-Position Pulsed Welding. *Welding Journal*, v. 76, n. 3, pp. 120s-124s, march. 1997.

Lee, H.W. et al., 2001. Fatigue Strength Depending on Position of Transverse Cracks in FCAW Process. *Welding Journal*, v. 80, n. 6, pp. 110s-114s.

Medeiros, R.C. et al. Estudo da Aptidão dos Arames Tubulares à Soldagem MIG com Transferência Controlada. *Soldagem & Materiais*, 1(4), pp. 44 – 49.

Miills, K. C., Keene, B. J. (1990), "Factors Affecting Variable Weld Penetration", *International Materials Reviews*, v 35, n 4, pp 185-216.

Mota, C. A. M., 1998. *Níquel e Manganês como Controladores da Tenacidade na Soldagem com Arames Tubulares Autoprotégidos*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Nascimento, A. S. et al., 2003. Procedimento Experimental para seleção de Parâmetros de Pulso para Soldagem com

Arame tubular em Corrente Pulsada. COBEF-Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia, pp. 51-56.

Wang., 1995. Flux Arc Welding: Arc Signals, processing and Metal Transfer Characteristics. *Welding Journal*, pp. 369s-377s.