ANÁLISE DE PARÂMETROS E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM COM ELETRODO TUBULAR, ANALISANDO CARACTERÍSTICAS DE GEOMETRIA DO CORDÃO¹

Lucilene de Oliveira Rodrigues² Sebastião Carlos da Costa³

Resumo

O processo com eletrodo tubular (FCAW) tem crescido em utilização nos últimos tempos em função de suas características de alta taxa de deposição associado à adequadas propriedades mecânicas da junta soldada. Entretanto, muitos aspectos ainda permanecem obscuros com relação a uma maior utilização deste processo. Desta forma, este trabalho tem por finalidade, a análise e otimização dos parâmetros de soldagem: tensão, velocidade de alimentação do arame e distância bico de contato peça, em um processo com arame tubular com proteção gasosa, sobre a penetração e o índice de convexidade da solda. Através de técnicas estatísticas, desenvolveu-se o modelamento matemático e posterior otimização das respostas. Em função dos resultados obtidos, observou-se forte influência da velocidade de alimentação do arame no processo, seguido pela tensão e com menos intensidade pela distância bico de contato se sontato peça. Testes posteriores mostraram uma adequada previsão dos resultados dos matemáticos frente aos resultados reais.

Palavras-chave: FCAW; RSM; Soldagem; Otimização.

ANALYSIS OF PARAMETERS AND OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF WELDING WITH TUBULAR ELECTRODE, ANALYZING CHARACTERISTIC OF GEOMETRY OF THE CORDÃO

Abstract

The process with tubular electrode (FCAW) has grown in use in the last times in function of its characteristics of high rate of deposition associated with the adjusted mechanical properties of the joint welded. However, many aspects still remain obscure with regard to a bigger use of this process. So, this work has for purpose, the analysis and optimization of the welding parameters: tension, speed of feeding of the wire and distance contact peak, in a process with tubular wire with gaseous protection, on the penetration and the index of convexity of the weld. Through statistical techniques, the mathematical model was developed and subsequent optimization of the answers. In function of the results, strong influence of the speed of feeding of the wire in the process was observed, followed for the tension and with little intensity for the distance contact peak.

Key words: FCAW; RSM; Welding; Optimization.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Mestre em Engenharia Mecânica, Doutoranda em Engenharia Mecânica, UNIFEI

³ Doutor em Engenharia Mecânica, Professor titular, UNIFEI

INTRODUÇÃO

Hoje em dia, onde a competição no mercado cresce ano a ano, e palavras como qualidade e produtividade, vêm se tornando cada vez mais familiares no ramo empresarial, o aprimoramento de produtos e processos produtivos tem sido cada vez mais importante para manter empresas competitivas no mercado.

Em função do desenvolvimento dos processos de fabricação e da engenharia de materiais, os processos de soldagem passaram por grande avanço tecnológico no desenvolvimento de novos consumíveis, de fontes eletrônicas mais modernas e dos processos propriamente ditos. Todo esse interesse se deve a alta versatilidade dos processos de soldagem, sendo este considerado atualmente o método mais importante de união de metais na construção de peças e estruturas.

Dentre os processos de união, o processo com arame tubular (FCAW - Flux Cored Arc Welding), após vários anos de pesquisa, alcançou o nível de desenvolvimento adequado às estruturas, devido à sua capacidade de obter um resultado de solda com melhores propriedades mecânicas. Embora existam processos de soldagem de maior produtividade disponíveis, tais como arco submerso e processos robotizados, o arame tubular oferece ao usuário um processo mais flexível com aumentos reais em produtividade e qualidade, com um mínimo de capital investido. Como nem sempre processos mais modernos estão ao alcance de todos, uma pesquisa simplificada pode ter alto valor prático e fazer com que pequenas mudanças gerem grandes resultados.

Estudos realizados, mostram que o processo de soldagem com arame tubular reúne várias das necessidades atuais, com respeito a alta produtividade, boa qualidade e baixo custo.⁽¹⁾ Trata-se de um processo que consiste em alimentar continuamente o arame para a poça de fusão, sendo este protegido pela decomposição dos ingredientes do fluxo interno, no caso de eletrodos autoprotegidos, ou ainda, protegido pelo fluxo interno e pelo gás de proteção, no caso de eletrodos protegidos. Neste último caso, gases como CO₂ puro ou misturas de gases são comumente utilizados. Na soldagem com eletrodos tubulares protegidos, a tolerância para a variação de parâmetros do arco, é maior quando comparada com a soldagem com eletrodos autoprotegidos.⁽¹⁾ A soldagem com proteção gasosa possibilita a obtenção de um melhor nível de resistência mecânica e melhor tenacidade com uma maior taxa de deposição.⁽²⁾ A mudança de um gás de proteção para outro, de CO₂ para uma mistura de deste com argônio, por exemplo, muda sensivelmente as características geométricas do cordão.⁽³⁾

Dentre os parâmetros do processo, o comprimento livre do arame (stick-out) tem influência significativa no aspecto econômico e geometria do cordão.⁽³⁾ Devido ao efeito Joule, incrementos da distância bico de contato peça e alimentação do arame, para um nível de corrente fixo, produz em consequência, aumentos da taxa de deposição e reflexos na convexidade do cordão e penetração da solda.⁽³⁾ Tais aspectos, cruciais para uma melhor utilização do processo, nem sempre estão muito bem definidos.

Estudos sobre a influência dos principais parâmetros, bem como a intercorrelação entre os mesmos e reflexos nas características da solda, se tornam importantes. Assim, o desenvolvimento de modelos matemáticos se tornam contribuições importantes para uma melhor compreensão dos processos e, conseqüentemente, de uma melhor utilização industrial dos mesmos. Sob este aspecto, a utilização de métodos estatísticos, tem se tornado cada vez mais freqüentes na soldagem, e dentre estes a técnica de metodologia de superfície de respostas (RSM – Response Surface

Methodology) tem sido aplicadas com sucesso nos processos automáticos de soldagem. Estudiosos desenvolveram modelos matemáticos, na previsão e otimização do volume de um cordão de solda, para o processo de arco submerso, utilizando para isso, a metodologia da superfície de resposta (RSM).⁽⁴⁾ Esta metodologia foi também utilizada com sucesso no setor automobilístico.⁽⁵⁾ A RSM foi introduzida por Box na década de 50 e tem sido utilizada com grande sucesso na modelagem de diversos processos industriais.⁽⁶⁾

O presente trabalho, apresenta os resultados de uma análise de parâmetros, modelagem e otimização de um processo de soldagem com eletrodo tubular AWS E71T-1, utilizando como gás de proteção o CO₂ puro, e variando-se a distância bico de contato peça (DBCP), a tensão e a velocidade de alimentação do arame. Os resultados foram processados pelo software comercial Minitab, utilizando a Metodologia da Superfície de Resposta.

MATERIAS E MÉTODOS

Para a realização dos experimentos utilizou-se uma fonte transistorizada com comando digital, associado a um sistema guia com velocidade controlada, permitindo o deslocamento da tocha durante a realização das soldagens. O banco de ensaios pode ser visto na Figura 1, onde (1) é a tocha de soldagem, (2) o corpo de prova, (3) sistema com velocidade controlada, (4) fonte, (5) alimentador do arame, (6) tacômetro, (7) cilindro de gás de proteção, (8) sistema de aquisição de dados e finalmente, (9) regulador de vazão. A sequência de realização dos experimentos foi delineado de acordo com metodologia de superfície de respostas (RSM). Para a fixação dos parâmetros procurou-se condições que gerassem transferências por spray. A Tabela 1 apresenta os parâmetros de controle do processo, bem como os seus níveis correspondentes. A Tabela 2 apresenta a sequência experimental, gerada a partir da Tabela 1, a qual consistiu de 20 testes, sendo os 8 primeiros testes, um fatorial completo dos três parâmetros estudados nos níveis +1 e -1 (2³ fatoriais) somados de 6 pontos centrais (center-points) e 6 pontos estrela (star-points).

As soldagens foram realizadas em testes de simples de deposição (BOP), sobre chapas de aço ABNT 1045, com dimensões de 75mmx50mmx9mm, polaridade reversa (CC+), utilizando arame AWS E71T-1, diâmetro 1,2 mm, velocidade de soldagem de 50 cm/min e proteção gasosa de CO_2 com vazão de 15 l/min. A tocha de soldagem foi mantida na inclinação de 70°, sentido "puxando", pois em testes preliminares esta condição se mostrou mais adequada com relação a penetração obtida.

Após executada a solda, os corpos de prova foram seccionados em dois locais para diminuir o erro, já que o cordão não se manteve uniforme em toda a sua extensão. Posterioremente, os mesmos foram polidos e atacados quimicamente, com uma solução de Nital 4%, sendo a penetração da solda (p) determinada através do auxílio de um projetor de perfil com aumento de 20x.

O índice de convexidade foi definido segundo a Equação (1), sendo *r* o valor do reforço e *b* o valor da largura do cordão.

$$IC = \frac{r}{b} \tag{1}$$

Como metodologia de análise foi utilizada uma superfície de resposta, com seis pontos centrais, para modelamento e otimização das respostas requeridas. Esta metodologia, permite avaliar como as respostas são afetadas quando as variáveis de entrada são ajustadas fora da região de interesse, saber quais combinações das variáveis de entrada afetam a resposta, saber quais valores destas variáveis terão a resposta desejada (maximizada ou minimizada) e qual a superfície de resposta mais próxima deste ótimo.

A equação que representa a superfície de resposta, segundo B.B.Neto,⁽⁷⁾ é descrita conforme a equação (2) a seguir, sendo Y a resposta e x_k os parâmetros analisados e suas interações.

$$Y = f(x_1, x_2, ..., x_k) + \varepsilon$$
 (2)



Figura 1. Banco de ensaios utilizado para os experimentos.

Parâmetros de	Unidade	Níveis					
soldagem		-2	-1	0	+1	+2	
Tensão (V)	V	26,6	29,0	32,50	36,0	38,4	
Valim (va)	m/min	8,6	10,0	12,0	14,0	15,4	
DBCP (d)	mm	13,3	15,0	17,5	20,0	21,7	

Tabela 1. Parâmetros de controle do processo e seus níveis.

RESULTADOS

A matriz de experimento e os resultados obtidos dos ensaios podem ser vistos na Tabela 2.

Obtidos os resultados do experimento, procedeu-se ao desenvolvimento dos modelos matemáticos. As respostas foram expressas segundo equação 2, e no presente caso assumiu a forma da equação (3):

$$Y = b_0 + b_1 V + b_2 va + b_3 d + b_{11} V^2 + b_{22} va^2 + b_{33} d^2 + b_{12} V^* va + b_{13} V^* d + b_{23} va^* d$$
(3)

Através da análise de regressão, foram determinados, a partir dos resultados obtidos que constam na Tabela 2, os coeficientes do modelo através do software Minitab.

		Resultados			
I	Matriz de	Experiment	os	obt	idos
OP	V	va	d	р	IC
*	V	m/min	mm	mm	%
1	29,0	10,0	15,0	1,89	32,10
2	36,0	10,0	15,0	1,93	21,68
3	29,0	14,0	15,0	2,40	55,49
4	36,0	14,0	15,0	2,88	26,10
5	29,0	10,0	20,0	1,55	29,58
6	36,0	10,0	20,0	1,94	25,52
7	29,0	14,0	20,0	1,91	50,57
8	36,0	14,0	20,0	2,85	24,70
9	26,6	12,0	17,5	1,90	50,00
10	38,4	12,0	17,5	2,40	23,80
11	32,5	8,6	17,5	1,60	32,94
12	32,5	15,4	17,5	3,40	44,21
13	32,5	12,0	13,3	2,80	25,05
14	32,5	12,0	21,7	1,90	23,75
15	32,5	12,0	17,5	1,90	27,27
16	32,5	12,0	17,5	2,28	24,91
17	32,5	12,0	17,5	2,30	26,85
18	32,5	12,0	17,5	2,15	26,79
19	32,5	12,0	17,5	2,30	25,06
20	32,5	12,0	17,5	2,35	27,15

 Tabela 2. Resultados obtidos dos ensaios.

Com a análise de variância (ANOVA), verificou-se a adequação do modelo a um nível de significância de 5%; caso os P_{values} da regressão sejam menores que 0,05, o modelo está adequado e não é necessário obter o modelo reduzido. Porém, mesmo sendo este valor menor que 0,05, pode-se buscar um modelo mais conciso para cada modelo gerado, visando somente uma simplificação. Para estimar os coeficientes destes modelos, empregou-se o método dos mínimos quadrados,⁽⁷⁾ listados na Tabela 3.

Pode-se observar na Tabela 3, que para o índice de convexidade, nenhum dos coeficientes do modelo completo foram eliminados, pois fazendo isto, a confiabilidade do modelo diminui, o que não é o objetivo. Assim os coeficientes do modelo completo para esta resposta foram mantidos.

Coeficiente	Parâmetros	p (mm)	IC(%)					
b ₀	Livre	5,97864	260,39					
b ₁	V	-0,155847	-15,3706					
b ₂	va	-0,363772	4,13008					
b ₃	d	-0,0692286	1,91817					
b ₁₁	V^2	*	0,296282					
b ₂₂	va ²	*	1,05541					
b ₃₃	d ²	*	-0,126394					
b ₁₂	V*va	0,0176786	-0,728214					
b ₁₃	V*d	*	0,141143					
b ₂₃	va [*] d	*	-0,191					
Observação: * coeficiente eliminado								

Tabela 3. Coeficientes do modelo matemático

)bservação: * coeficiente eliminado

Em função destes coeficientes, determinaram-se os modelos matemáticos para cada resposta, bem como os valores do coeficiente de correlação ($R^2 e R^2_{adi}$), que expressam a confiabilidade do modelo e o P_{value} da regressão que indica a adequação deste modelo, sendo os mesmos apresentados na Tabela 4.

Resposta	Modelo Matemático Completo	R ² , %	R ² (adj),%	P _{value}				
р	5,97864 - 0,155847*V - 0,363772*Va - 0,0692286*d + 0,0176786*V*Va	83,7	79,3	0,000				
IC	260,39 - 15,3706*V + 4,13008*Va + 1,91817*d + 0,296282*V ² + 1,05541*Va ² - 0,126394*d ² - 0,728214*V*Va + 0,141143*V*d - 0,191*Va*d	98,3	96,8	0,000				

Tabela 4. Modelos matemáticos reduzidos, seus respectivos R² e Puetro da regressão

De acordo com os resultados da Tabela 4, utilizando um nível de significância de 5%, observa-se que os modelos desenvolvidos para a penetração e índice de convexidade estão adequados. Da mesma forma, considerando a análise de significância de cada parâmetro do modelo, bem como de suas interações, a Tabela 5 mostra os resultados gerados.

Respostas\										
Parâmetros	Livre	V	Va	d	V^2	va²	d ²	V*va	V*d	va*d
р	0,000	0,007	0,000	0,014	0,328	0,281	0,837	0,137	0,216	0,763
IC	0,000	0,000	0,000	0,315	0,000	0,000	0,133	0,000	0,086	0,172

Tabela 5 Análise de significância dos parâmetros do modelo

DISCUSSÃO

Muito embora tenha se procurado neste trabalho, o modo de transferência por spray, percebeu-se das aquisições, que as características dinâmicas da tensão oscilaram entre os modos mostrados na Figura 2. Notou-se que apesar dos mesmos não representarem um modo tipicamente spray, entretanto se aproximaram muito deste, sendo assim, considerados como tal.



Figura 2. Comparação de oscilogramas de tensão.

Através do modelo reduzido proposto para a penetração, verifica-se que a velocidade de alimentação do arame, a tensão e a distância bico de contato peça, influenciam na penetração, sendo o segundo com maior intensidade (Tabela 5).

Observa-se na Figura 3, que o aumento da tensão de 29 até 32,5V, causou um aumento significativo da penetração e para os demais valores, a penetração teve pouca alteração. É importante lembrar que valores excessivamente altos de tensão podem causar defeitos superficiais no cordão, como porosidades alongadas,⁽⁵⁾ fato este também verificado no decorrer deste trabalho. O aumento da velocidade de alimentação do arame causou um aumento significativo na penetração, resultado inverso e menos significativo ao da distância bico de contato peça. A Figura 3 confirma visivelmente a maior significância da velocidade de alimentação na penetração da solda.



Figura 3. Efeitos dos parâmetros principais na penetração.

Através do modelo mostrado na Tabela 4 e confirmados pela Figura 4, observou-se que os parâmetros individuais que mais influenciaram no índice de convexidade foram a tensão e a velocidade de alimentação do arame. Os termos quadráticos da tensão e da velocidade de alimentação do arame, como também da interação destes dois parâmetros, exerceram uma influência significativa nesta resposta, Tabela 5.

Os efeitos dos parâmetros individuais, Figura 4, mostraram que aumentando o valor da tensão, tem-se uma diminuição do índice de convexidade, devido a um maior espalhamento do arco. Já para a velocidade de alimentação do arame tem-se o inverso, ou seja, um aumento no índice de convexidade foi verificado, a partir de 10 m/min, resultado este esperado em função da maior concentração do arco.

Na análise da interação V*Va, Figura 5, observou-se que houve um decréscimo no índice de convexidade para velocidades de alimentação do arame, iguais e superiores a 12m/min, com o aumento a tensão. Todavia, para as velocidades de 3,4 e 10 m/min, ao passar pelo ponto central o resultado se inverteu, porém com pouca intensidade.



Figura 4. Efeitos dos parâmetros principais no índice de convexidade.



Figura 5. Efeito da interação V*Va no índice de convexidade, d=17,5mm.

Como a intenção foi a otimização das duas respostas, tem-se que encontrar valores para os dados de entrada, que satisfaçam as duas respostas simultaneamente. Para isso, foi idealizado através do software Minitab, uma superfície de contorno para a determinação de uma região, cuja combinação de fatores de entrada, retornem um resultado satisfatório para as respostas em questão. A superfície de contorno da Figura 6, fornece uma região onde as combinações, tensão e velocidade de alimentação do arame (fatores mais significativos), resultam em valores satisfatórios de penetração e de índice de convexidade, de acordo com uma faixa aceitável pré-determinada, ou seja, penetração de 1,9 a 3,5 mm, e índice de convexidade de 22 a 30%.

Para a confirmação da validade desta "região operacional" mais adequada, foram realizados testes de comprovação, que estão listados na Tabela 6. Observou-se que o recurso da superfície de contorno, se mostrou eficaz para determinação de combinações de parâmetros, segundo a região gerada, obtendo um resultado satisfatório de acordo com o esperado nas equações da Tabela 4. Os valores relacionados com o índice 1, referem-se aos resultados simulados no Response Optimizer, recurso do software Minitab.

Os erros evidenciados foram relativamente pequenos (maior erro 6,03%), sendo estes provavelmente oriundos de erros experimentais dos ensaios.



Figura 6. Superfície de contorno para as respostas penetração e índice de convexidade

Encoioc	Parâmetros de entrada Resultados obtidos								
Elisaius	V	va	d	р	p1	Erro	IC	IC1	Erro
*	(V)	(m/min)	(mm)	(mm)	(mm)	%	%	%	%
1	34	12	20	2,12	2,17	2,3	24,4	24,6	0,81
2	32	12	20	2,08	2,01	3,48	23,4	22,7	3,44
3	36	14	20	2,72	2,88	5,56	26,6	26,1	1,84
4	30	11	13,4	2,18	2,32	6,03	31,3	30,3	3,00

Tabela 6. Ensaios de confirmação.

CONCLUSÕES

A utilização da técnica projeto e análise de experimento, mostrou-se extremamente interessante, no que se refere à análise de parâmetros do processo FCAW, obtendo resultados confiáveis com poucos experimentos. A utilização da metodologia da superfície de reposta, para o desenvolvimento de modelos se mostrou eficaz, fato este validado pela confirmação dos resultados. O desenvolvimento de gráficos de superfície de contorno mostra ser de grande utilidade para a utilização do processo, visto que se tem uma maior flexibilidade para as combinações dos parâmetros de acordo com necessidades específicas. Foi observado que a melhor condição dos parâmetros analisados foi obtida com valores de tensão aproximadamente de 32,5 V, associado a uma velocidade de alimentação do arame de 12 m/min e uma distância bico de contato peça de 20 mm.

Agradecimentos

Gostaria de manifestar meus agradecimentos, ao Departamento de Engenharia Mecânica da UNIFEI e ao CNPQ, por ter dado apoio à realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 R.L. Jones, An Evaluation of The Production Welding Aspects of Flux-Coreds Wires, The Welding Institute, pp. 1-9, 1982.
- 2 C.A.M. Mota, Níquel e Manganês como Controladores da Tenacidade na Soldagem com Arames Tubulares Autoprotegidos, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil, 1997.
- 3 P.F. Jesualdo, Estudo da Geometria do Cordão de Solda Usando CO₂ e Mistura de AR e CO₂ na Soldagem com Arame Tubular AWS E71T-1, Memória do Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, pp. 25-29, Out. 2000.
- 4 V. Gunaraj e N. Murugan, Prediction and Optimization of Weld Bead Volume for the Submerged Arc Process-Part 1, Welding Journal, pp.286-294, Out. 2000.
- 5 L.P.N Junior, Otimização de um Processo de Solda MIG/MAG para Aplicação na Indústria Automobilística através da Utilização da Técnica do Projeto e Análise de Experimentos, Dissetação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, 2003.
- 6 W.R. Araujo, Comparação entre Soldagem Robotizada com Eletrodo Sólido e Metal-Cored – A Ocorrência do Finger, Dissetação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2004.
- 7 B.B. Neto; I.S. Scarminio e R.E. Bruns, Planejamento e Otimização de Experimentos, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil, 1995.