

MODELAMENTO ESTATÍSTICO PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO TIG COM ONDA RETANGULAR EM SOLDAGEM DO ALUMÍNIO

André Luis Gonçalves Costa

FEMEC – UFU Campus Santa Mônica – Uberlândia

algcosta@mecanica.ufu.br

Sadek C. Absi Alfaro

ENM – UnB Campus Universitário Darcy Ribeiro – Brasília

sadek@unb.br

Resumo: *As principais características aplicativas do alumínio e suas ligas, como material de engenharia, são devidas à sua baixa densidade e à sua alta resistência a corrosão, além de apresentar excelente condutividade térmica e elétrica e uma relativamente alta resistência à tração quanto na forma ligada. Sua boa resistência à corrosão em água, óleo e muitos dos produtos químicos é devida a uma fina camada de óxido (Al_2O_3), que se forma rapidamente na sua superfície. O uso do processo de solda em alumínio e suas ligas é freqüente em todos campos estruturais, mas especialmente naqueles que necessitam de baixo peso e boa resistência à corrosão. Produtos bem sucedidos são: carcaças de foguetes aeroespaciais, corpos e cabines de caminhões, carrocerias de ônibus, pontes de pedestre, tanques de armazenagem, oleodutos, tubulações para transportar certas substâncias químicas, vaso de pressão, navios petroleiros, transportando cargas aquecidas ou sujeitas à limpeza com vapor, etc.*

O estudo de soldagem de alumínio e suas ligas com o processo TIG CA com onda retangular ainda carece de um grande esforço para que suas variáveis possam ser explicadas através de modelos estatísticos ou matemáticos. Com o objetivo de analisar as relação entre as variáveis de entrada (corrente de soldagem, velocidade de soldagem, tempo de permanência em CC+ e CC- num determinado ciclo) com as variáveis de saída (geometria do cordão de solda - penetração e largura da solda -, limpeza catódica e estabilidade do arco elétrico) desta versão do processo TIG, utilizou-se de métodos estatísticos (análise de regressão linear múltipla) para relacionar as variáveis de saída com as de entrada, construindo um modelo estatístico que possibilitou indicar as melhores condições de soldagem para a área de trabalho envolvida nesse projeto.

Palavras-chave: Soldagem, TIG, Alumínio, Modelamento estatístico

1. INTRODUÇÃO

Atualmente união em alumínio por meio de soldagem tem expandido-se muito devido ao grande desenvolvimento tecnológico existente nesta área, com novas gerações de equipamentos que lançam mão dos processos alcançados no campo da eletrônica, transformando equipamentos de soldagem anteriores de volumosos e de difícil operação, em volumes compactos de fácil operação e controle (PÓVOA, 1991).

As principais características do alumínio, como material de engenharia, é devido à baixa densidade e também a sua resistência a corrosão, além de apresentar excelente condutividade térmica e elétrica. A densidade do alumínio (7.95 g/cm^3) é cerca de 1/3 da densidade do aço. Sua boa resistência à corrosão em água, óleo e muitos produtos químicos é devida a uma fina camada de óxido (Al_2O_3), que se forma rapidamente na sua superfície (SCOTTI, 1993). As aplicações do alumínio soldado são encontradas em todos campos estruturais, mas especialmente naqueles que necessitam de baixo peso e boa resistência a corrosão (SAUDERS, 1989). As indústrias

aeronáutica, naval e de transporte são, entre outras, os exemplos das que mais utilizam o alumínio soldado (SAUDERS, 1989 e SCOTTI, 1993). Produtos bem sucedidos são: carcaças de foguetes aeroespaciais, corpos e cabines de caminhões, carrocerias de ônibus, pontes de pedestre, tanques de

armazenagem, oleodutos, tubulações para transportar certas substâncias químicas, vaso de pressão, navios petroleiros, transportando cargas aquecidas ou sujeitas à limpeza com vapor, etc. Uma das principais ligas desenvolvidas especialmente para aplicações sobre tensão por períodos prolongados e temperaturas de serviços de 65 °C é a liga Al – Mg 3 – Mn (5454) (POVOA, 1991).

A camada delgada de óxido que se forma rapidamente na superfície do Al serve de proteção para o metal, e torna-se um grande obstáculo no processo de soldagem pelo arco elétrico, pois seu ponto de fusão é 2050 °C, o que obriga a remoção desta camada por um processo químico ou mecânico (escovação e limpeza com algum solvente que não produza gases tóxicos durante o processo de soldagem), para que o processo de soldagem possa ser realizado de forma satisfatória (PÖVOA, 1991).

Mesmo com o uso dos artifícios anteriores de limpeza, a porcentagem de soldas rejeitadas é alta, tendo a necessidade do uso de uma limpeza catódica proporcionada pelo uso de uma fonte de soldagem que gera corrente alternada (CA) (BARHORST, 1995)

Com o avanço das tecnologias dos processos e das fontes de soldagens, o alumínio e suas ligas tornaram-se materiais facilmente soldáveis (SAUDERS, 1989), principalmente com o desenvolvimento de fontes de soldagem que geram ondas retangulares com polaridade variável, que aparentemente supera os problemas causados pela CA com onda senoidal. O primeiro propósito dessa forma de onda é a redução do tempo de transição entre as polaridades, o que elimina a utilização do sinal de alta frequência sobreposta à corrente alternada senoidal para que o arco não se apague na região de transição da polaridade negativa para a positiva. O segundo propósito do uso da onda retangular é o aumento da eficiência térmica do processo pela maior duração do período com polaridade negativa à custa do período com polaridade positiva. Na verdade, o período de polaridade positiva é selecionado adequadamente para limpeza do óxido (limpeza catódica), permitindo longo tempo de transferência de calor no ciclo com polaridade negativa. Essa abordagem é pretendida para aumentar a fusão do metal (penetração) e para reduzir o desgaste do eletrodo, fatores que melhoram a produtividade do processo. Dessa forma, a correta denominação do processo deve ser “TIG CA com Onda Retangular Assimétrica” (SCOTTI, REIS, 1999).

Apesar das evidentes vantagens da onda retangular, há poucas informações sobre a regulação dos parâmetros da onda retangular. Muitas lacunas ainda necessitam ser preenchidas para melhor entendimento dos fenômenos que governam o processo, tais como: a influência do tipo de eletrodo de tungstênio, a influência da superfície a ser soldada e um maior conhecimento a respeito da limpeza catódica.

2. PROCEDIMENTO

Para realizar os testes de soldagem, foram utilizadas barras extrudadas de alumínio 6063 (Al – Mg) com dimensões de 200 mm de comprimento, 117 mm de largura e 3,2 mm de espessura (3/8”).

O eletrodo utilizado foi um eletrodo de Tungstênio (W) puro de diâmetro de 3,2 mm. O apontamento do eletrodo foi realizado utilizando um esmeril, este apontamento permite um arco mais estável e rígido quando trabalha menores densidades de corrente, porém o eletrodo de W puro para o processo de CA tende a fundir a ponte se tornando hemisférico. A tab. 1 mostra a faixa de operação para o eletrodo utilizado nos experimentos.

Tabela 1 – Faixas de utilização de eletrodos no processo TIG (Notas de aula do PJ)

Diâmetro do eletrodo (mm)	Corrente de Soldagem (A)			
	CA		CC	
	W	WTh	W/WTh	W/WTh
3.2	100 – 165	140 – 220	200 – 275	25 – 40
Identificação	W – Eletrodo de tungstênio WTh – Eletrodo de tungstênio torinado			

O planejamento de experimente utilizado para realizar os testes foi o fatorial design “misto” ($3^1 \times 2^2$) num total de 12 testes (tab. 2), os valores nominais dos testes estão listados na tab. 3. As réplicas (num total de 6 testes) Tab. 4.

Tabela. 2 - Planejamento experimental Fatorial design misto $3^1 \times 2^2$

FATORIAL DESIGN $3^1 \times 2^2$					
Nº DO EXP	ORDEM	CORRENTE	VELOC	t_{cc+}	OBS
1	5	-1	-1	-1	and05
2	8	0	+1	-1	and08
3	10	+1	-1	+1	and10
4	12	-1	+1	+1	and12
5	7	0	-1	-1	and07
6	2	+1	+1	-1	and02
7	4	-1	-1	+1	and04
8	1	0	+1	+1	and01
9	6	+1	-1	-1	and06
10	9	-1	+1	-1	and09
11	3	0	-1	+1	and03
12	11	+1	+1	+1	and11

Tabela 3 – Valores nominais das variáveis de entrada dos testes.

Corrente [A]		Velocidade de soldagem [cm/mim]		Tempo de polaridade inversa (t_{cc+}) [ms]	
145	-1	19	-1	2	-1
155	0	-	-	-	-
165	+1	25	+1	5	+1

Tabela. 4 – Planejamento de experimento para réplicas.

Nº DO EXP	ORDEM	CORRENTE	VELOC	t_{cc+}	OBS
1	1	+1	-1	+1	and13
2	2	0	+1	+1	and14
3	3	-1	+1	-1	and15
4	4	+1	+1	-1	and16
5	5	-1	-1	+1	and17
6	6	0	-1	-1	and18

Os testes de validação foram utilizados um planejamento de experimento fatorial design 2^3 , os valores nominais destes experimentos estão descritos na tab. 5, num de total de 8 testes conforme a tab. 6. A escolha dos valores para os testes de validação seguiu-se de forma semelhante aos dos da réplica, só que desta vez, escolheu-se valores para os níveis de corrente central dentro do fatorial design principal.

Tabela. 5 – Valores nominais das variáveis de entrada dos testes de validação do modelo estatístico.

Corrente [A]		Velocidade de soldagem [cm/mim]		Tempo de polaridade inversa (t_{cc+}) [ms]	
150	-1	19	-1	2	-1
160	+1	25	+1	5	+1

Tabela. 6 – Planejamento de experimento para testes de validação do modelo.

FATORIAL DESIGN 2^3					
Nº DO EXP	ORDEM	CORRENTE	VELOC	t_{cc+}	OBS
1	3	-1	-1	-1	and21
2	6	0	+1	-1	and24
3	4	+1	-1	+1	and22
4	7	-1	+1	+1	and25
5	8	0	-1	-1	and26
6	1	+1	+1	-1	and19
7	2	-1	-1	+1	and20
8	5	0	+1	+1	and23

Após cada teste o gabarito foi resfriado até a temperatura ambiente para garantir uma uniformidade na temperatura inicial do CP.

Os CP's soldados foram preparados metalográfico para fazer macrografia do cordão de solda. Nesta macrografia foram analisadas a largura (L_f), penetração (P) e a largura da limpeza catódica (clean) conforme representada no esquema da fig. 1.

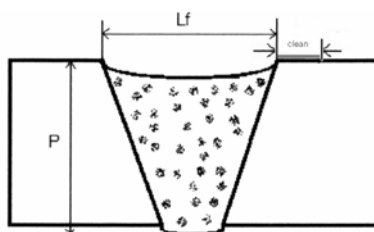


Figura. 1 – Esquema de análise do cordão de solda

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para resultados de penetração maior que a espessura da chapa (penetração total) esses foram descartados, pois em regiões onde a penetração é quase total e total o comportamento do processo deixa de ser linear em relação à intensidade de corrente.

A partir dos resultados encontrados experimentalmente foram montados modelos de regressão linear múltipla para:

- 1) RAZÃO DE ESTABILIDADE DO ARCO ELÉTRICO;
- 2) LARGURA DO CORDÃO DE SOLDA;

- 3) LIMPEZA CATÓDICA;
- 4) PENETRAÇÃO DA SOLDA.

3.1. DISCURÇÃO DOS RESULTADOS

3.1.1. Análise de Regressão Linear Múltipla da Variável Resposta Razão de Estabilidade do Arco Elétrica (RAZÃO).

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que o modelo de regressão linear para a variável resposta razão de estabilidade do arco elétrico possui uma distribuição normal para os resíduos o que não fere a suposição do modelo.

Embora os resíduos (erros) tenham uma distribuição normal, para valores inferiores a uma razão de 80% de arco aberto, o modelo fere a suposição de média zero para os erros, apresentando uma tendência, fugindo de uma distribuição aleatória e de uma média zero para os resíduos desses valores, indicando a não linearidade desse modelo nessa faixa de valores.

Para valores onde o modelo segue a suposição de média zero para os resíduos, o modelo de regressão linear é dependente somente da variável de entrada Tempo de permanência na polaridade CC- (eletrodo negativo). Segundo o modelo quanto maior o tempo de permanência na polaridade inversa mais estável será o arco elétrico. A Eq. 1 para essa análise segue-se abaixo:

$$\text{RAZÃO} = 11,472 + 0,985 \times \text{TNEGPER} \quad (1)$$

Este resultado já era esperado, uma vez que, quanto maior o período de permanência na polaridade negativa à custa de um menor período na polaridade positiva, menor será a limpeza catódica, e já que, a alumina apesar de atrapalhar na soldagem devido ao seu alto ponto de fusão, ela ajuda na estabilidade do arco elétrico quando da reigitação do arco na inversão de polaridade.

3.1.2. Análise de Regressão Linear Múltipla para a Variável Resposta Largura do Cordão de Solda (LARG).

Após à análise dos resultados obtidos no tratamentos estatístico dos valores das variáveis de entrada, para a variável resposta Largura do Cordão de Solda (LARG), tem-se o seguinte modelo de regressão linear múltipla para essa variável resposta:

$$\text{LARG} = -9,175 + 0,121 \times \text{CORRENTE} - 0,181 \times \text{VELOC} \quad (2)$$

A análise de variância indica um valor de correlação F um pouco maior para o modelo onde apenas a variável de entrada Corrente era linearmente dependente da variável resposta Largura do Cordão de Solda, como as diferença entres os valores de F é muito pequena decidiu-se utilizar o modelo mais completo onde a variável resposta é explicada por duas variáveis de entrada. Como o gráfico de distribuição normal para os resíduos aproxima-se de uma reta e o gráfico de dispersão dos resíduos tem média zero e apresenta uma aleatoriedade, isso indica que o modelo não fere as suposições feitas para que esse seja um modelo de regressão linear múltipla.

3.1.3. Análise de Regressão Linear Múltipla para a Variável Resposta Largura da Limpeza Catódica (CLEAN).

O gráfico de distribuição normal para resíduos da variável resposta CLEAN aproxima-se de uma reta, não ferindo a hipótese de distribuição normal para resíduo para essa variável. O gráfico de dispersão de resíduos tem média zero para os resíduos e não apresenta nenhum tipo de configuração

o que assegura uma aleatoriedade não ferindo a suposição de média zero para os resíduos. Logo o modelo de regressão linear múltipla para essa variável é valido e dado pela Eq. 3 que está descrita abaixo:

$$\text{CLEAN} = 23.536 - 0,153 * \text{TNEGPCRC} - 0,08 * \text{CORRENTE} + 0,230 * \text{VELOC} \quad (3)$$

3.1.4. Análise de Regressão Linear Múltipla para a Variável Resposta Penetração da Solda.

De acordo com os resultados obtidos pela análise dos valores experimentais para penetração pode-se dizer que a suposição de distribuição normal é válida, porém a suposição de média zero para os resíduos não é obedecida, como mostrada no gráfico de dispersão de resíduos para essa variável. Observa-se no gráfico de resíduo indica que o modelo deve ser ajustado e que provavelmente fuja da condição de linearidade, para maiores esclarecimentos serão necessários maiores números de experimentos que possam dizer o comportamento desta variável resposta em relação as variáveis de entrada.

Para valores de penetração acima de 2,5 mm o modelo deixa de ser linear, o que já era esperado, pois o escoamento de calor deixa de ser linear com a corrente. A quantidade de material para que se possa escoar o calor por condução fica muito pequeno, o que torna a passagem de quase penetração total para penetração total uma “explosão”. A equação para onde o modelo é válido é dada pela Eq.4.

$$\text{PENET} = - 6,752 + 0,07 * \text{CORRENTE} - 0,104 * \text{VELOC} \quad (4)$$

4. CONCLUSÃO

- a. Para a variável resposta RAZÃO de estabilidade do arco, tem-se que realizar um maior estudo sobre essa variável, realizando maiores experimento para que possa chegar a uma conclusão de que realmente esta variável é linearmente dependente do tempo de permanência nas polaridades direta e inversa do processo;
- b. Para a variável resposta LARG (Largura do cordão de solda) obteve-se bons resultados que indicam que essa variável é linearmente dependente das variáveis independentes corrente de soldagem e velocidade de soldagem.
- c. Para a variável resposta CLEAN (Largura da limpeza catódica) obteve-se um resultado razoável, onde as variáveis de entrada tempo de permanência na polaridade negativa, corrente de soldagem e velocidade de soldagem exercem um dependencia linear sobre essa.
- d. Já para a variável resposta penetração não se chegou a um resultado conclusivo indicando a necessidade de maiores estudos para explicar essa variável.

5. SUGESTÕES DE NOVOS TRABALHOS

- a. Estudo sobre a influência do tempo de permanência na polaridade inversa sobre a instabilidade do arco elétrico.
- b. Estudo da aplicação deste processo na fabricação de carrocerias de veículos automotores (estrutura de carrocerias de ônibus e caminhões), analisando as propriedades mecânicas das juntas soldadas.
- c. Estudo da região de transição de quase penetração total e de penetração total, onde o processo deixa de ser linear.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARHOSTS, S., “*THE CATHODIC ETCHING TECHNIQUE FOR AUTOMATED ALUMINUM TUBE WELDING*”, Welding Journal, May 1985.
- JONSOSEN, M. R., “*BUILDERS MAKE WAVE IN ALUMINUM YACHT WORLD*”, Welding Journal, October 1992.
- MODENESI, P. J., “*NOTAS DE AULA DA DISCIPLINA EMT 019 – SOLDAGEM I*”, Curso de eng. Metalúrgica, depto de Eng. Metalúrgica e de Materiais – UFMG, Belo Horizonte – MG, 1997.
- MONTGOMERY, D. C., “*DESIGN AND ANALYSIS OF EXPERIMENTS*”, 4ª Edição, 1996.
- PATTON, W. J., “*THE SCIENCE AND PRACTICE OF WELDING*”, New Dersy, 1967.
- POVOA, A. A., “*CURSO DE SOLDAGEM DO ALUMÍNIO*”, ABAL, Dezembro de 1991.
- SCOTTI, A., DUTRA, J. C., FERRARESI, V. A., “*THE INFLUENCE OF PARAMETER, SETTING ON CATHODIC SELF-ETCHING DURING ALUMINUM WELDING*”, www.mecanica.ufu.br/.
- SCOTTI, A., REIS, R. A., “*PARAMETER OPTIMIZATION OF AC RECTANGULAR WAVE OUTPUTS FOR ALUMINUM COLD WIRE GTAW*”, www.mecanica.ufu.br/.
- SCOTTI, A., DUTRA, J. C., SANCHES, H. A., “*O EFEITO DOS PARÂMETROS DE AJUSTE NA ESTABILIDADE E GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA TIG COM ONDA RETANGULAR*”, www.mecanica.ufu.br/.
- “*THE PROCEDURE HANDBOOK OF ARC WELDING*”, LINCOLN ELECTRIC COMPANY, Cleveland, Ohio, 20ª edição.
- WERKEMA, M. C. C. , AGUIAR, S., “*ANÁLISE DE REGRESSÃO: COMO ENTENDER O RELACIONAMENTO ENTRE AS VARIÁVEIS DE UM PROCESSO*”, Série Ferramenta da Qualidade, Vol. 7, Belo Horizonte – MG, 1996.
- WERKEMA, M. C. C. , AGUIAR, S., “*OTIMIZAÇÃO ESTATÍSTICA DE PROCESSO: COMO DETERMINAR A CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO DE UM PROCESSO QUE LEVA AO ALCANCE DE UMA META DE MELHORIA*”, Série Ferramenta da Qualidade, Vol. 9, Belo Horizonte – MG, 1996.

STATISTICAL PATTERN FOR OPTIMIZATION OF THE PROCESS TIG WITH RECTANGULAR WAVE IN ALUMINUM WELDING

André Luis Gonçalves Costa

FEMEC – UFU Campus Santa Mônica – Uberlândia

algcosta@mecanica.ufu.br

Abstract: The main characteristics operational of the aluminum and its alloy, as engineering material, they are due to its low density and its high corrosion resistance, high thermal and electric conductivity and a relatively high tensile strength in the form of aluminum alloy. Its good corrosion resistance in water, oil and many of the chemical products are owed to a fine oxide layer (Al_2O_3), that is formed quickly in its surface. The use of the process of it welds in aluminum and its alloys it is frequent in all structural fields, but especially in those that need low weight and good corrosion resistance. Products well happened they are: carcasses of aerospace rockets, bodies and cabins of trucks, bus chassis, pedestrian's bridges, storage tanks, pipelines, pipin to transport certain chemical substances, pressure vase, oil ships, transporting warm loads or subject to the cleaning with steam, etc.

The study of aluminum welding and its alloys with the process TIG AC with rectangular wave still lack of a great effort so that its variables can be explained through statistical or mathematical models. With the objective of analyzing them relationship among the input variables (welding current, welding speed, time of permanence in CC+ and CC - in a certain cycle) with the output variables (geometry of the weld fillet - penetration and weld width -, cathode cleaning and stability of the electric arch) of this version of the process TIG, it was used of statistical methods (analysis of multiple lineal regression) to relate the output variables with the one of input, building a statistical model that facilitated to indicate the best welding conditions for the work area involved in that project.

Keywords: *Welding, TIG, Aluminum*, statistical model