

METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA: UMA FERRAMENTA PARA PREVER A RESISTÊNCIA MECÂNICA DE JUNTAS SOLDADAS PELO PROCESSO DE FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA *

Carlos Alfredo Gracioli Aita¹
Tonilson de Souza Rosendo²
Marco Antônio Durlo Tier³

Resumo

A modelagem de superfície de resposta pode ser empregada para prever comportamento de fenômenos mecânicos em juntas soldadas pelo processo de fricção e mistura mecânica (FSSW). O uso de técnicas como análise de regressão permite coletar resultados em intervalos não estudados com uma confiabilidade grande com auxílio dos modelos matemáticos empíricos. O processo de soldagem FSSW consiste em uma ferramenta em rotação, a qual, mergulha na direção de uma junta sobreposta realizando assim a soldagem. O objetivo desse trabalho é encontrar uma equação que descreva o processo de soldagem, dentro do intervalo de parâmetros estudados, com coeficiente de regressão maior que 90%. Nesse trabalho utilizou-se um fatorial completo (3^2) para estudar o intervalo de parâmetros selecionados. As juntas foram soldadas e submetidas a ensaios de cisalhamento. Os dados foram tratados e submetidos aos métodos matemáticos empíricos para busca de uma equação de regressão. Foi possível encontrar coeficientes de regressão com mais de 95% mostrando um ótimo ajuste da curva.

Palavras-chave: Equação de regressão; FSSW; Superfície de resposta.

RESPONSE SURFACE METHODOLOGY: A TOOL TO PREDICT SHEAR STRENGTH IN WELDED JOINTS FOR FRICTION STIR SPOT WELDING PROCESS

Abstract

Response surface modeling can be used to predict mechanical phenomena in joints welded by process friction stir spot welding (FSSW). The use of techniques, such as, regression analysis led us to collect results at intervals not studied with great reliability with assistance of empirical mathematical models. The FSSW welding process consists in a rotational tool, which plunges onto sheets in overlapping joint configuration, executing the welding. The objective of this work is to find an equation that describes the welding process, within the range of parameters studied, with regression coefficient greater than 90%. In this work, full factorial (3^2) was used to study the range of parameters selected. The joints were welded and subjected to shear tests. The data were treated and submitted to empirical mathematical methods to search a regression equation. It was possible to find regression coefficients with more than 95% showing a good fit of the curve

Keywords: Regression Equation; FSSW, Response Surface

¹ Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia, Professor do Ensino Básico Técnico e Tecnológico, Instituto Federal de Santa Catarina, Xanxerê, Santa Catarina, Brasil.

² Engenheiro Industrial Mecânico, Doutor em Ciência dos Materiais, Professor Adjunto do Magistério Superior, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, Rio Grande do Sul, Brasil.

³ Engenheiro Mecânico, Doutor em Ciência dos Materiais, Professor Adjunto do Magistério Superior, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, Rio Grande do Sul, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com aumento da performance de equipamentos e máquinas levam a substituição de materiais tradicionais por ligas leves, principalmente nas indústrias do setor transportes. A utilização de ligas leves, e conseqüentemente a massa da estrutura, levam a diminuição do consumo de combustível ajudando no controle das emissões de poluentes que se tornou um critério importante na escolha de materiais para a indústria dos setores de transporte. A utilização de ligas de leves, está substituindo as ligas de aço, diminuindo o peso dos veículos automotores e conseqüentemente aumentando a eficiência [1-3].

A baixa soldabilidade das ligas leves é um fator que dificulta a utilização das mesmas em estruturas mecânicas. Os métodos de união convencional, como por exemplo soldagem a arco elétrico, não são indicados para esses materiais. O método de soldagem, o qual, está tendo grande destaque para soldagem desses materiais é a soldagem no estado sólido, aonde permite-se, virtualmente, a soldagem de qualquer material que apresente plasticidade [4,5].

1.1 Soldagem no Estado Sólido

Atualmente o processo de soldagem no estado sólido mais conhecido e difundido, é a soldagem por fricção e mistura mecânica (FSW), a qual busca a produção de cordões de solda. Sua primeira patente é de 1991, e o FSW é aplicável a diversas situações e produtos. Como por exemplo, a indústria aeronáutica, especialmente nas uniões de ligas de alumínio, as quais tem seu desempenho prejudicado quando soldado por métodos convencionais de soldagem (que utilizam fusão dos materiais) [6,7].

O processo de soldagem Friction Stir Spot Welding - FSSW é uma derivação do processo FSW, patenteado em 2001, no Japão e destina-se à obtenção de juntas sobrepostas por ponto de soldagem [8]. A ferramenta de soldagem, no FSSW, é semelhante à do FSW. A diferença entre os processos é que no FSSW, diferentemente do FSW, não há movimento de translação da ferramenta, a qual, apenas penetra nas chapas dispostas de forma sobreposta e retorna a sua posição inicial. É típico desse processo a penetração da ferramenta durar poucos segundos [8]. A soldagem FSSW está substituindo os processos convencionais de soldagem ponto, como por exemplo a soldagem ponto por resistência elétrica (RSW) e rebitagem [9].

O processo RSW, tem como desvantagens, o elevado consumo de energia elétrica e inconsistências relacionada a fusão dos materiais [3]. A rebitagem convencional, assim como, por auto aprisionamento, que são alternativas para soldagem RSW, apresentam como desvantagem aumento da massa da estrutura sendo este mais um ponto favorável ao FSSW [2].

Ilustra-se na figura 1, de maneira simplificada e esquemática, o processo de soldagem FSSW o qual consiste em três fases distintas: (1) início da rotação da ferramenta, (2) penetração (entrada da ferramenta) e (3) retirada (saída).

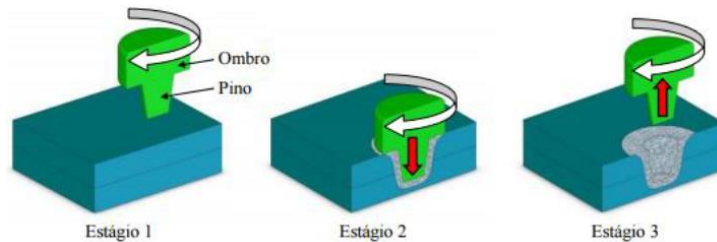


Figura 1. Estágios da soldagem FSSW [10]

Na fase 1 a ferramenta inicia o movimento de rotação com uma velocidade pré-estabelecida, em torno do seu próprio eixo, e a mesma é posicionada próximo à superfície da chapa superior. A fase 2 é representada pela penetração da ferramenta, em rotação, na junta sobreposta até a geometria chamada de “ombro” atingir a profundidade escolhida na chapa superior. Na fase 3 a ferramenta regressa ao início do processo, provocando uma pequena cavidade (furo) na parte central do botão de solda, com a forma de parte da ferramenta de soldagem. Entre o término da fase 2 e início da fase 3, às vezes, mantém-se a ferramenta em rotação no final do curso de penetração esse período é chamado de tempo de permanência (ou *dwell time*).

A rotação do pino da ferramenta gera o calor de fricção causando a mistura dos materiais das chapas nas direções circunferencial e axial. O ombro da ferramenta, pressiona a chapa superior, formando um anel e assim restringindo o fluxo de material, que tende a “fugir” do local de soldagem [4].

1.2 Metodologia de Superfície de Resposta

Metodologia de superfície de resposta (MSR) é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas usadas para desenvolvimento e otimização de processos. Essa técnica tem grande importância no desenvolvimento e formulação de novos produtos, assim como no aperfeiçoamento de produtos já existentes.[11]

Essa metodologia consegue aproximar uma resposta (y) que depende das variáveis de entrada ($X_1, X_2, X_3 \dots$) através de uma equação matemática como mostrado na Equação 1:

$$y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (1)$$

A resposta (y) desse experimento é uma função das variáveis de entrada, porém na maioria das vezes, cada experimento tem uma grande quantidade de variáveis de entrada. O fato de termos muitas variáveis de entrada dificulta o equacionamento da resposta (saída)[11,12].

Usualmente um polinômio de baixa ordem tem grande eficiência para modelar um experimento com poucas variáveis independentes, em muitos casos, polinômios de primeira, segunda ou terceira ordem.

Relações empíricas para prever a tensão de cisalhamento de juntas soldadas pelo processo FSSW em ligas de alumínio usando MSR foram utilizadas por [13]. Modelos empíricos matemáticos usando MSR para analisar os efeitos de parâmetros do processo FSSW na tensão de cisalhamento para ligas de alumínio foram estudados por [6,10]. A otimização usando MSR é uma importante e confiável técnica para otimizar a tensão de cisalhamento [13]. Foi possível encontrar correlação entre as variáveis de entrada e saída com coeficiente de determinação maior que 90%[10].

1.3 Objetivo do Trabalho

O objetivo desse trabalho é buscar através da metodologia de superfície de resposta, modelos matemáticos que descrevam, com confiabilidade, o processo de soldagem FSSW da liga AA6060-T5.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais

Nesse trabalho foram utilizadas barras chatas de alumínio AA6060-T5 de 25 x 100 x 3,2mm para produção dos corpos de prova (CP) na configuração de juntas sobrepostas, como mostrado na figura 2. A sobreposição da junta foi de 25mm e a solda foi realizada no centro da sobreposição.

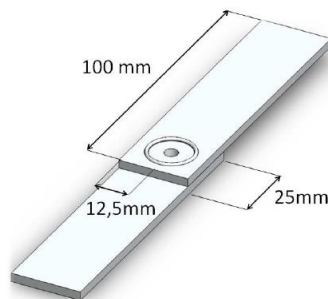


Figura 2. Representação esquemática de uma junta soldada

A liga AA6060-T5 foi submetida a uma análise química em espectrômetro para validar a composição química da liga como mostrado na tabela 1.

Tabela 1. Composição química da liga AA6060-T5

Concentração dos elementos (% em peso)									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros	Al
0,45	0,19	0,06	0,08	0,53	0,003	0,01	0,03	0,02	98,62

2.2 Métodos

Para realização das soldagens utilizou-se um centro de usinagem CNC Romi® D800, com um suporte adaptado para realizar as soldagens. A ferramenta para soldagem foi fabricada em aço M2 e submetida a têmpera e posteriormente a dois revenidos. A profundidade total de penetração da ferramenta na soldagem foi de 94% da espessura das chapas combinadas.

Após ensaios preliminares, definiu-se os parâmetros e os níveis para esse estudo. Dois parâmetros foram selecionados: Velocidade de Rotação (VR) e Tempo de permanência (TP), os intervalos estão mostrados na tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de soldagem

Parâmetros	Símbolos	Níveis		
		1	2	3
Velocidade de rotação [RPM]	VR	1500	2000	2500
Tempo de permanência [s]	TP	0	2	4

Utilizou-se como técnica para planejamento dos experimentos um fatorial completo 3^2 (dois parâmetros em 3 níveis). A tabela 3 mostra as combinações para o experimento realizado. Para cada combinação 3 amostras foram soldadas. O ensaio mecânico de cisalhamento foi realizado em uma máquina universal de ensaios Shimadzu AGS-X 5kN, com uma velocidade de ensaio de 0,5mm/min.

Tabela 3. Tabela das combinações para os experimentos

Experimento	Nomenclatura	Velocidade de Rotação (RPM)	Tempo de permanência(s)
1	1500/0	1500	0
2	1500/2	1500	2
3	1500/4	1500	4
4	2000/0	2000	0
5	2000/2	2000	2
6	2000/4	2000	4
7	2500/0	2500	0
8	2500/2	2500	2
9	2500/4	2500	4

Para o equacionamento matemático dos experimentos utilizou-se conceitos de modelagem de superfície de resposta e o software Excel. Com base nos resultados dos ensaios de cisalhamento e nas variáveis de entrada formulou-se equações e analisou-se seus resultados com a determinação do Coeficiente de determinação (R^2) e com o resumo de ajuste do modelo à curva.

2.3 Resultados e discussão

A tabela 4, mostra a carga média proveniente da resistência mecânica das juntas no ensaio de cisalhamento e seus respectivos desvios padrão. Nota-se uma melhora no desempenho mecânico para amostras com tempo de permanência maiores e com menores velocidades de rotação.

Tabela 4. Resultados do ensaio de cisalhamento

Experimento	Parâmetros		Carga média [N]	Desvio padrão [N]
	VR (RPM)	TP (s)		
1	1500	0	941,7	63,6
2	1500	2	2410,1	136,0
3	1500	4	2470,2	101,3
4	2000	0	1247,5	41,9
5	2000	2	1955,2	78,3
6	2000	4	2016,2	83,3
7	2500	0	1153,4	41,0
8	2500	2	1738,1	128,6
9	2500	4	1696,6	50,0

Com base nos resultados obtidos via ensaio de cisalhamento das juntas soldadas, buscou-se métodos analíticos (matemáticos) para descrever o comportamento dessas juntas.

Através da metodologia de superfície de resposta se investigou se um ajuste linear conseguiria descrever esse experimento. A equação 2, mostra a resistência ao cisalhamento (R) em relação as variáveis VR e TP sem considerar a possível interação entre elas.

$$R = 2086 - 0,411 VR + 236,7 TP \quad (2)$$

Tabela 5. Resumo do modelo da equação 2

S	R²	R² ajustado
349,327	68,58%	58,11%

Para um ajuste confiável da equação ao experimento necessita-se um R² (coeficiente de determinação) , no mínimo de 90%. Então nesse trabalho buscou-se refinar mais as equações para uma aproximação do valor desejado.

Na equação 3, foi adicionada a interação entre as variáveis de primeira ordem (TP*VR). Na tabela 6 é mostrado o resumo do modelo para a equação 3, houve uma pequena melhora nos valores de R² e R² ajustado, porém, não foram suficientes para atingir os 90%.

$$R = 1100 + 0,081 VR + 729 TP - 0,246 VR*TP \quad (3)$$

Tabela 6. Resumo do modelo da equação 3

S	R²	R² ajustado
312,874	79%	66,4%

Nesse cenário, se faz necessário buscar uma aproximação com polinômios de segunda ordem (grau 2). Na equação 4 é mostrada a equação com termos em 2º ordem. Na tabela 7 é mostrado os resultados para o ajuste dessa equação ao modelo.

$$R = 880 + 0,16 VR + 1176 TP - 0,000019 VR^2 - 111,7 TP^2 - 0,2463 VR*TP \quad (4)$$

Tabela 7. Resumo do modelo da equação 4

S	R²	R² ajustado
173,247	96,14%	89,7%

O crescimento do R² foi muito significativo com uma aproximação quadrática, porém olhando para o modelo (equação 4) observa-se que os termos VR e VR² estão acompanhados de um coeficiente muito pequeno. Para tentar melhorar o R² ajustado e diminuir o tamanho da equação 4, exclui-se os termos VR e VR² e busca-se um novo modelo mostrado na equação 5.

$$R = 1114,2 + 1127 TP - 111,7 TP^2 - 0,2219 VR*TP \quad (5)$$

Tabela 8. Resumo do modelo da equação 5

S	R²	R² ajustado
173,247	95,96%	93,54%

Com a equação 5, obteve-se um resultado satisfatório em relação ao R^2 e ao R^2 ajustado, mostrando que o modelo se ajustou bem aos dados do experimento. Essa metodologia para achar a equação que descreve o experimento foi utilizada por [6,10,13]

Para esse modelo ,equação 5, plotou-se a superfície de resposta mostrada na figura 3. Nela pode-se observar rapidamente, que maiores valores de carga são encontrados em soldas realizadas com menores velocidades de rotação e maiores tempo de permanência. Em maiores velocidades de rotação, o melhor valor para resistência ao cisalhamento não se deu no maior tempo de permanência.

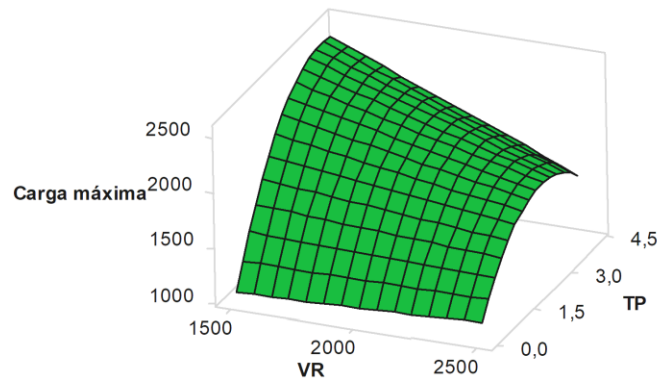


Figura 3. Superfície de resposta para equação 5

Em termos estatísticos, a quantidade de pontos (combinações de soldagem) foi relativamente pequena nesse experimento (apenas nove). Em experimentos com um maior número de pontos a equação tenderia a ser mais homogênea e poderia proporcionar um melhor mapeamento do intervalo estudado resultando em uma equação com menor erro e um melhor R^2 , principalmente nos primeiros pontos. De qualquer modo, o modelo previsto foi considerado satisfatório. A confecção de um modelo empírico pode trazer economia durante a seleção de parâmetros, porém sempre são necessários testes de confirmação.

A tabela 9 compara o teste experimental com os resultados calculados através do modelo analítico. Observa-se um erro menor que 10% na maioria das combinações, porém ,na combinação 1 tem-se um erro considerável (18%), isso deve-se a esse ponto ser o início da superfície de resposta, aonde tem-se os piores resultados pois a equação não se ajusta perfeitamente a curva.

Tabela 9. Erro da equação comparado com os resultados experimentais

Combinação	Parâmetros		Carga média experimental fatorial completo [N]	Carga calculada através do modelo para fatorial completo [N]	Erro
	VR (RPM)	TP (s)			
1	1500	0	941,7	1114,2	-18%
2	1500	2	2410,1	2255,7	6%
3	1500	4	2470,2	2503,6	-1%
4	2000	0	1247,5	1114,2	11%
5	2000	2	1955,2	2033,8	-4%
6	2000	4	2016,2	2059,8	-2%
7	2500	0	1153,4	1114,2	3%
8	2500	2	1738,1	1811,9	-4%
9	2500	4	1696,6	1616,0	5%

3 CONCLUSÃO

- Os maiores valores de carga são encontrados em soldas realizadas com menores velocidades de rotação e maiores tempo de permanência.
- Em maiores velocidades de rotação, o melhor valor para resistência ao cisalhamento não se deu no maior tempo de permanência.
- A previsão da resistência ao cisalhamento de juntas soldadas pelo processo FSSW em liga AA6060 T-5, se mostrou satisfatório.
- Obteve-se uma equação simples, (de segunda ordem), a qual, descreveu o experimento com R^2 de aproximadamente 96% e R^2 ajustado de 94%.

Agradecimentos

Ao Instituto Federal de Santa Catarina - Xanxerê e à Universidade Federal do Pampa – Alegrete pelo apoio durante a execução desse trabalho.

REFERÊNCIAS

1. Badarinarayan H, Shi Y, Li X, Okamoto K. Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminum 5754-O sheets. Int J Mach Tools Manuf. 2009;
2. Patel V V., Sejani DJ, Patel NJ, Vora JJ, Gadhvi BJ, Padodara NR, et al. Effect of Tool Rotation Speed on Friction Stir Spot Welded AA5052-H32 and AA6082-T6 Dissimilar Aluminum Alloys. Metallogr Microstruct Anal. 2016;
3. Mitlin D, Radmilovic V, Pan T, Chen J, Feng Z, Santella ML. Structure-properties relations in spot friction welded (also known as friction stir spot welded) 6111 aluminum. Mater Sci Eng A. 2006;
4. Lathabai S, Painter MJ, Cantin GMD, Tyagi VK. Friction spot joining of an extruded Al-Mg-Si alloy. Scr Mater. 2006;
5. Bilici MK. Application of Taguchi approach to optimize friction stir spot welding parameters of polypropylene. Mater Des. 2012;

6. Muhammad N, Manurung YHP, Hafidzi M, Abas SK, Tham G, Haruman E. Optimization and modeling of spot welding parameters with simultaneous multiple response consideration using multi-objective Taguchi method and RSM. J Mech Sci Technol. 2012;
7. Buffa G, Campanile G, Fratini L, Prisco A. Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties. Mater Sci Eng A. 2009;
8. Gerlich a., Avramovic-Cingara G, North TH. The Influence of Processing Parameters on Microstructure of Al 5754 Friction Stir Spot Welds. Mater Sci Forum. 2006;
9. Rosendo T, Tier M, Mazzaferro J, Mazzaferro C, Strohaecker TR, Dos Santos JF. Mechanical performance of AA6181 refill friction spot welds under Lap shear tensile loading. Fatigue Fract Eng Mater Struct. 2015;
10. Tier MD, Rosendo TS, Dos Santos JF, Huber N, Mazzaferro JA, Mazzaferro CP, et al. The influence of refill FSSW parameters on the microstructure and shear strength of 5042 aluminium welds. J Mater Process Technol. 2013;
11. Myers RH, Montgomery DC, Anderson-Cook CM. Response surface methodology. Process and product optimization using designed experiments. John Wiley & Sons, Inc. 2009.
12. Benício de BN, Scarminio SI, Bruns RE. Como fazer experimentos. Como fazer experimentos. 2001.
13. Elatharasan G, Kumar VSS. An experimental analysis and optimization of process parameter on friction stir welding of AA 6061-T6 aluminum alloy using RSM. 2013;64:1227–34.