

OTIMIZAÇÃO DA REMOÇÃO DO REVESTIMENTO NA PRÉ-SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA DO AÇO MANGANÊS-BORO GALVANNEALED

Robson Raimundo Cardoso Ribeiro - robsonrcr@unifei.edu.br

Marcos Cirilo dos Santos - marcos.cirilo@unifei.edu.br

Anderson Paulo de Paiva - andersonppaiva@unifei.edu.br

José Henrique de Freitas Gomes - ze_henriquefg@unifei.edu.br

Palavras-chave: Método *burn-zinc*, Metodologia de Superfície de Resposta, Otimização Multiobjetivo.

1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem a ponto por resistência elétrica (SPRE) diferencia-se dos demais processos de soldagem devido às suas características de alta velocidade, facilidade de automação, ausência de material de adição e baixo custo operacional, sendo amplamente utilizado na indústria automotiva para a construção de estruturas veiculares. Entretanto, a introdução do aço 22MnB5 *Galvannealed* (22MnB5-GA), amplamente usado em componentes veiculares devido à sua alta resistência mecânica (DEMIRKAYA *et al.*, 2013), impôs novos desafios à SPRE. A presença da camada *Galvannealed* eleva a resistividade elétrica na interface de contato, aumentando a geração de calor e reduzindo a faixa operacional de corrente durante a soldagem.

Estudos apontam que a combinação de alta resistividade e resistência mecânica do substrato provoca expulsão de material, desgaste acelerado dos eletrodos e formação de falhas interfaciais, comprometendo o desempenho mecânico da junta soldada. Para contornar essas dificuldades, Nascimento e Scotti (2010), Kim *et al.* (2014) e Cheon *et al.* (2019), argumentam que deve haver a remoção do revestimento antes da SPRE, por meio de uma técnica denominada *burn-zinc*. Neste sentido, este estudo teve como objetivo otimizar a etapa de *burn-zinc* na SPRE do aço 22MnB5-GA, buscando maximizar a área de contato sem revestimento (AC) e minimizar o teor residual de zinco (ZR) na interface de união. Para isso, foi adotada

uma otimização multiobjetivo, combinando a Metodologia de Superfície de Resposta (*RSM*) e o método de Interseção Normal à Fronteira (*NBI*). As variáveis de controle avaliadas foram: pressão dos eletrodos (*PE*), tempos de pré-pressão 1 e 2 (*TPp₁*, *TPp₂*) e corrente de pré-aquecimento (*IPaqu*).

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Referencial teórico

a) *Burn-zinc*

Segundo Kimchi e Phillips (2017), a soldagem a ponto por resistência do aço 22MnB5-GA estampado a quente produz expulsão antes que a largura da lentilha de solda alcance dimensões mínimas aceitáveis. Para Nascimento e Scotti (2010) e Kim *et al.* (2014), a técnica mais comum para minimizar os problemas causados pela presença do zinco durante a soldagem a ponto de aços revestidos é o *Burn-zinc*.

O conceito básico consiste em aplicar uma corrente inicial, que, pode ser de alta ou baixa intensidade a depender do tipo de revestimento, por um curto período, o que, promove a fusão do revestimento e devido à pressão dos eletrodos o revestimento é espremido para fora da área de contato a ser soldada, antes do fluxo da corrente efetiva de solda. O método destina-se principalmente a fundir a camada de revestimento e facilitar sua remoção antes da formação do ponto de solda. Esta técnica possibilita que a corrente de soldagem seja mais uniforme, pois o contato na interface de contato se dará diretamente nos aços sem revestimento e, com isso, a formação da lente de solda ocorrerá de forma mais uniforme.

b) Metodologia de Superfície de Resposta

A Metodologia de Superfície de Resposta (*RSM*) pode ser definida como um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas utilizadas para desenvolver, melhorar e otimizar processos (MONTGOMERY, 2017). Portanto, a *RSM* envolve a elaboração de um delineamento experimental para orientar, de forma mais assertiva, por meio de um número reduzido de experimentos, a obtenção de dados reais do processo (MONTGOMERY, 2017). Se o espaço experimental for uma região de curvatura, o

processo pode ser ajustado por um polinômio de segunda ordem, conforme apresentado na Equação (1):

$$\hat{y}(\mathbf{X}) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \dots + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

Na Equação (1), $\hat{y}(\mathbf{X})$ representa a resposta de interesse, x_i são os parâmetros de entrada, $\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ são os coeficientes a serem estimados, k é o número de parâmetros de entrada e ε é o erro observado na resposta.

Geralmente em um estudo de superfície de resposta normalmente é utilizado o Arranjo Composto Central (CCD). O CCD para k fatores é uma matriz composta por três grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo (2^k); um grupo de pontos axiais ($2k$); e um conjunto de pontos centrais (n_c). O número de pontos axiais em um CCD é igual ao dobro do número de fatores e representa seus valores extremos (MONTGOMERY, 2017). As análises de coeficientes como R^2 e R^2 ajustado, obtidos por meio da Análise de variância (ANOVA), são um indicativo para o ajuste do modelo (MONTGOMERY, 2017).

c) Método da Interseção Normal à Fronteira

O método *NBI* foi desenvolvido por Das e Dennis (1998), para superar as deficiências apresentadas pelos métodos de soma ponderada, como sua incapacidade de encontrar uma distribuição de soluções Pareto-ótimas uniforme quando o problema multiobjetivo não é convexo.

A principal contribuição do método *NBI* é a construção de uma Fronteira de Pareto com diferentes soluções ótimas equidistantes (DAS E DENNIS, 1998). Por esta razão, o *NBI* torna-se uma opção muito útil na otimização de processos industriais multiobjetivos. Conforme Das e Dennis (1998), o método *NBI* pode ser expresso conforme a Equação 2.

$$\max_{\mathbf{X}, t} t$$

$$\text{s.a.: } \bar{\Phi}\beta + t\hat{n} = \bar{F}(\mathbf{X})$$

$$h(\mathbf{X}) = 0$$

$$g(\mathbf{X}) \leq 0$$

$$\mathbf{x} \in \Omega$$

(2)

Onde: $\bar{\Phi}$ representa a matriz Pay-off normalizada, β é o vetor de pesos, t representa um escalar que é perpendicular à linha da utopia, $\hat{n}$ é o vetor normalizado unitário, $\bar{F}(\mathbf{X})$ é o vetor das funções objetivo normalizadas e $h(\mathbf{X})$ e $g(\mathbf{X})$ representam restrições de igualdade e desigualdade, respectivamente.

2.2 Metodologia

O método aplicado foi a experimentação. Os experimentos foram planejados segundo um CCD, totalizando 31 ensaios. O valor do parâmetro α adotado foi de 2. Os níveis das variáveis foram definidos com base em ensaios preliminares e são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Níveis dos parâmetros para o arranjo CCD

Parâmetro de burn-zinc	Notação	Níveis				
		-2	-1	0	+1	+2
Pressão do eletrodo [bar]	PE	4,6	4,9	5,2	5,5	5,8
Tempo de pré-pressão 1 [ciclos*]	TPp ₁	25	30	35	40	45
Tempo de pré-pressão 2 [ciclos*]	TPp ₂	30	40	50	60	70
Corrente de pré-aquecimento [A]	IPaqu	2400	2640	2880	3120	3360

* 1 ciclo = 16,67 ms (1/60 s)

Fonte: Autores

Foram utilizadas chapas de 1 mm do aço 22MnB5-GA. A resposta AC foi analisada por um microscópio óptico *Olympus® SZ61*, e processadas no software *ImageJ®*, para determinação dos valores. A Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) foi utilizada para quantificar o teor de zinco residual (ZR). A diferença entre o

teor inicial ($\approx 93,9$ wt.% de Zn) e o medido após o tratamento foi considerada como porcentagem de remoção.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As respostas AC e ZR foram expressas em função do conjunto das variáveis de controle PE, TPp_1 , TPp_2 e IPaqu, utilizando modelos quadráticos de segunda ordem. Os coeficientes foram estimados pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS) no *software Minitab®*, e chegou-se às seguintes expressões:

$$\begin{aligned} AC = & 2,8395 + 0,0850 PE + 0,1603 TPp_1 + 0,2612 TPp_2 + 0,5760 IPaqu \\ & + 0,0184 PE^2 \\ & - 0,0986 TPp_1^2 - 0,0199 IPaqu^2 - 0,0166 PE \cdot TPp_1 + 0,0222 TPp_1 \cdot IPaqu \\ & + 0,0681 TPp_2 \cdot IPaqu \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} ZR = & 0,1866 - 0,0057 PE + 0,0055 TPp_1 - 0,0114 TPp_2 + 0,0039 IPaqu + 0,0188 PE^2 \\ & + 0,0051 TPp_1^2 + 0,0155 IPaqu^2 + 0,0167 PE \cdot TPp_1 - 0,0119 PE \cdot TPp_2 \\ & + 0,0133 PE \cdot IPaqu - 0,0141 TPp_1 \cdot TPp_2 + 0,0048 TPp_2 \cdot IPaqu \end{aligned} \quad (4)$$

Os modelos apresentados nas Equações (3) e (4), apresentara ajustes (R^2 ajustados) de 99,01% para AC e 81,61%, indicando uma elevada capacidade de representação dos dados. Definida as funções matemáticas, aplicou-se o *NBI*, implementado via o suplemento *Solver* do *Microsoft Excel®*. Neste trabalho, o problema pode ser expresso conforme a Equação (5):

Minimizar $\overline{AC}(\mathbf{x})$

Sujeito a: $g_j(\mathbf{x}) = \overline{AC}(\mathbf{x}) - \overline{ZR}(\mathbf{x}) + 2w - 1$

$$g_j(\mathbf{x}) \geq 0 \quad (5)$$

$$PE^2 + TPp_1^2 + TPp_2^2 + IPaqu^2 \leq 4$$

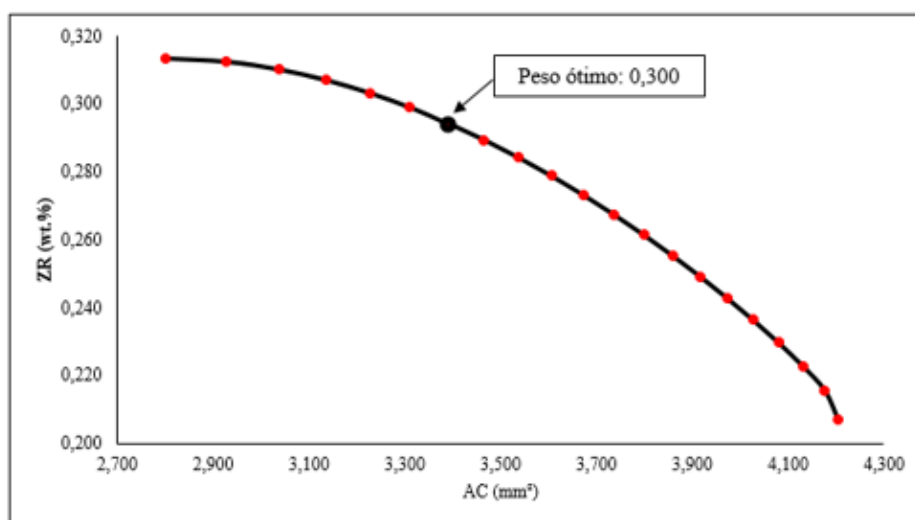
$$0 \leq w \leq 1$$

Onde: w corresponde ao peso adotado

$\overline{AC}(\mathbf{x})$ e $\overline{ZR}(\mathbf{x})$ são as funções objetivo normalizadas pela Equação (5)

Finalizada a modelagem matemática, realizou-se a otimização. Foram obtidos 21 pontos ótimos, conforme mostrado na Figura 1. O ponto ótimo, destacado na Figura 1, foi escolhido por apresentar um valor de ZR não muito inferior em comparação aos pontos com maiores índices de ZR, além de uma AC com valor intermediário. A Tabela 2 apresenta os resultados ótimos para o ponto escolhido.

Figura 1. Fronteira de Pareto



Fonte: Autores

Tabela 2. Parâmetros ótimos para o processo de burn-zinc do aço 22MnB5 Galvannealed

	Parâmetros de burn-zinc				AC	ZR
	PE	TPp1	TPp2	Ipaqu		
Resultado ótimo	5,65	38,90	38,87	3.308,4	3,390	0,294
Unidade	bar	ciclos	ciclos	A	mm ²	(wt.%)

Fonte: Autores

Posterior à escolha do ponto ótimo da fronteira de Pareto, testes de confirmação foram conduzidos. Para isto, aplicou-se o teste *Power and Sample Size / 1-Sample t* com a finalidade de identificar a quantidade ideal de experimentos. Desta forma o tamanho da amostra definido para AC foi de duas amostras, enquanto o teste definiu três amostras para ZR. Três experimentos de confirmação foram realizados. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3. Os resultados mostram que os

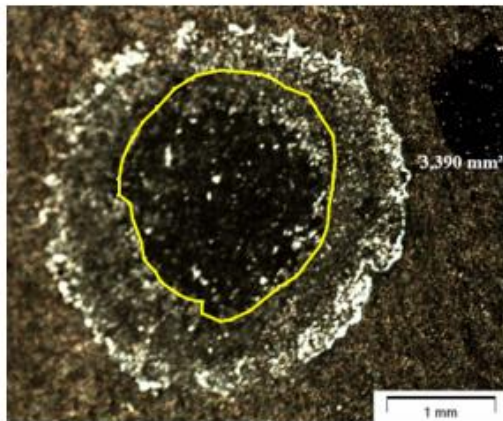
resultados ótimos se aproximam dos resultados previstos. As Figuras 2 e 3 mostram os resultados de um dos experimentos de confirmação para AC e ZR.

Tabela 3. Resultados dos experimentos de confirmação

Experimento	Área de contato (mm ²)	Zinco removido (wt.%)
1	3,390	0,297
2	3,395	0,277
3	3,394	0,270
Média	3,393	0,281
Valor previsto	3,390	0,294

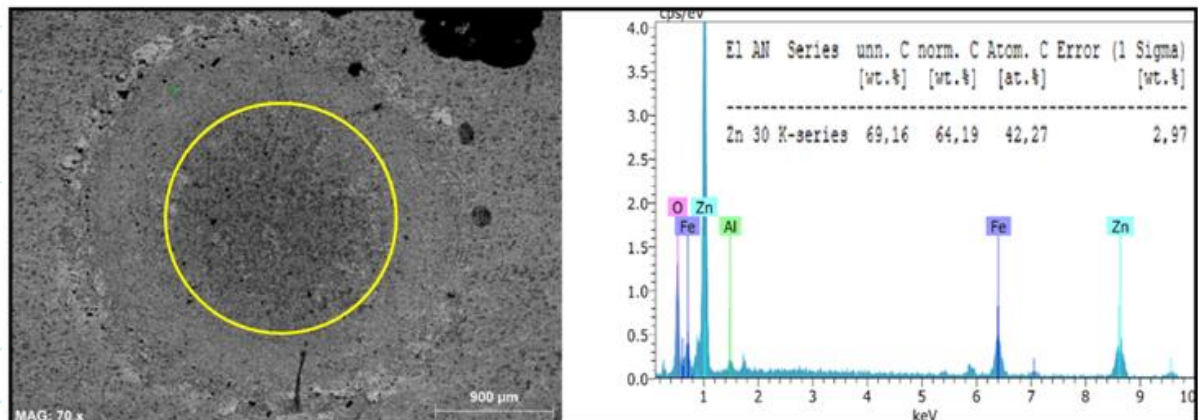
Fonte: Autores

Figura 2. Resultado do experimento de confirmação para AC



Fonte: Autores

Figura 3. Resultado do experimento de confirmação para ZR



Fonte: Autores

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo resultou nas seguintes conclusões principais:

- Os modelos desenvolvidos apresentaram R^2 ajustado de 99,01% para AC e 81,61% para ZR, demonstrando que são representações confiáveis das respostas;
- O método *NBI* permitiu a construção de uma fronteira de Pareto que flexibiliza a escolha de parâmetros conforme a prioridade do processo:
 - ✓ maior ZR para evitar trincas por fragilização por metal líquido;
 - ✓ maior AC para evitar expulsão de material na soldagem subsequente.
- A configuração ótima determinada foi $PE = 5,65$ bar, $TPp_1 = 38,90$ ciclos, $TPp_2 = 38,87$ ciclos e $IP_{aqu} = 3.308,4$ A, resultando em $AC = 3,39$ mm² e $ZR = 0,294$ wt. %.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e CAPES, pelo subsídio da bolsa de estudo e a promoção deste evento.

REFERÊNCIAS

- CHEON JY, VIJAYAN V, MURGUN S, PARK YD, KIM JH, YU JY, JI C. **Optimization of pulsed current in resistance spot welding of Zn-coated hot-stamped boron steels**. J. mech. sci. technol. 2019;33(4):1615–1621. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0313-2>.
- DAS I, DENNIS JE. **Normal-boundary intersection: a new method for generating the Pareto surface in nonlinear multicriteria optimization problems**. SIAM J. optim. 1998;8(3):631–657.
- DEMIRKAYA S, DARENDELILER H, GOKLER MI, AYHANER M. **Analysis of hot forming of a sheet metal component made of advanced high strength steel**. AIP conf. proc. 2013;1567.
- KIMCHI, M.; PHILLIPS, D. H. **Resistance Spot Welding Fundamentals and Applications for the Automotive Industry**. EUA: Morgan e Claypool Publishers, 2017. 115 p.
- KIM YG, KIM IJ, KIM JS, CHUNG Y, CHOI DY. **Evaluation of surface crack in resistance spot welds of Zn-coated steel**. Mater. trans. 2014;55(1):171-175.
- MONTGOMERY, D.C., 2017. **Design and Analysis of Experiments**, eighth ed. John Wiley & Sons, Inc.
- MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response Surface Methodology – Process and Product Optimization Using Designed Experiments**. 3ª Edição, Nova Jersey, EUA: Wiley, 2009. 1247p.



IEPG SUMMIT'25

*Pensando o futuro com inteligência
artificial e consciência social*

NASCIMENTO VC, SCOTTI A. **Metodologia para parametrizar e avaliar a técnica da “Burn-zinc” no processo de soldagem a ponto por resistência.** Soldag. insp. 2010;15(1):11-21.



Inatel

