

OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO DA SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA DO AÇO 22MnB5-GALVANNEALED

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

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

Palavras-chave: Aço 22MnB5-Galvannealed, Soldagem a Ponto por Resistência, Otimização multi-objetivo

1 INTRODUÇÃO

Dentre os diversos setores da economia que enfrentam o desafio de mitigar as Mudanças Climáticas, o setor de transportes automotivo (STA) é considerado uma área crítica para a descarbonização (INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM, 2023). Uma estratégia de mitigação geralmente empregada pelas indústrias do STA para superar tal desafio, consiste, na aplicação do conceito de redução de massa veicular (SOOMRO *et al.*, 2023).

Segundo Nadimi, Yadegari e Pouranvari (2023), o sucesso desta estratégia se deve ao desenvolvimento de novos aços, como por exemplo, o aço 22MnB5 *Galvannealed*. Entretanto, novos materiais apresentam inúmeros desafios ao serem integrados aos diversos processos de produção existentes (VIJAYAN *et al.*, 2020). No STA, o processo de união de chapas de aço mais importante é a soldagem, e o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica é responsável por 90% das uniões durante a etapa de montagem dos veículos (LUO *et al.*, 2016).

Deste forma, este trabalho propõe a aplicação do Método dos Polinômios Canônicos de Misturas para otimizar a soldagem a ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5 *Galvannealed*. O objetivo é desenvolver parâmetros de processo que elevem a qualidade dos pontos de solda e a eficiência energética do processo.

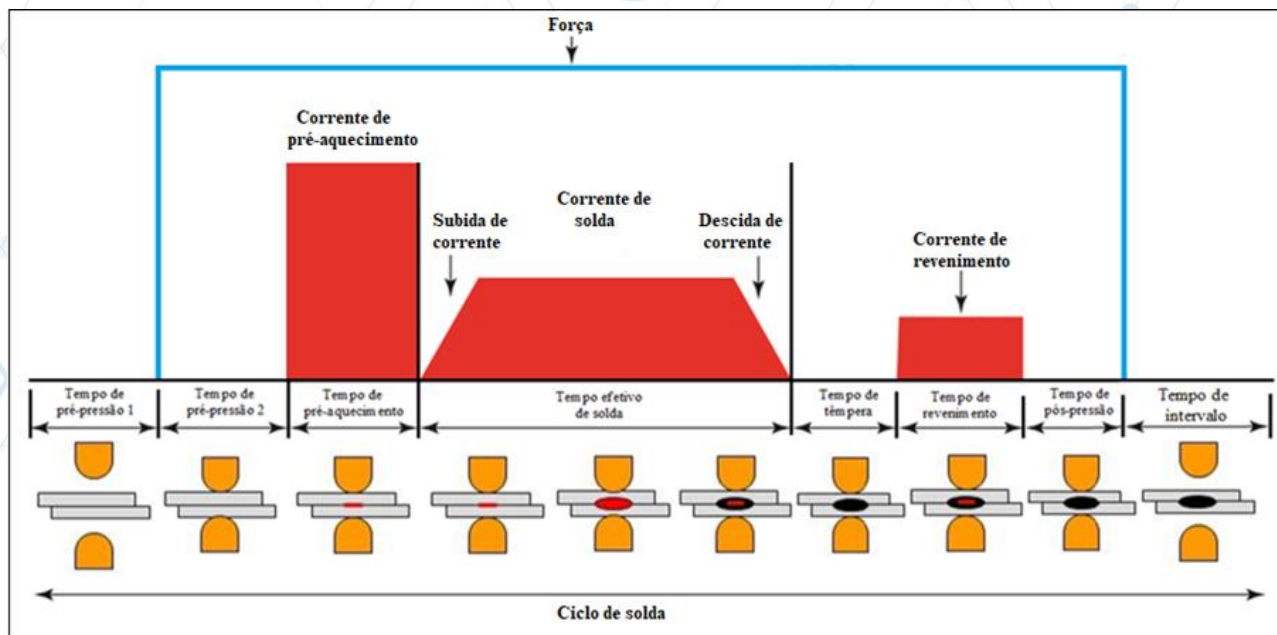
2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Referencial Teórico

a) Processo de soldagem a ponto por resistência elétrica

Segundo Zang e Senkara (2006), o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica-PSPRE, é um processo, em que, a união de peças metálicas é obtida através do calor gerado na junta pela resistência à passagem de uma corrente elétrica, chamado Efeito Joule, e pela aplicação de pressão nas peças, onde, suas superfícies estão sobrepostas ou em contato topo a topo. O PSPRE é um processo relativamente simples e apresenta três fases básicas: tempo de pré-pressão, tempo efetivo de soldagem e tempo de pós-pressão (KIMCHI e PHILLIPS, 2017). Quando tratamentos térmicos de pré e pós-soldagem são necessários, ocorre a inserção de novos parâmetros ao ciclo de solda (HOU, 2016; RIBEIRO *et al.*, 2020). A Tabela 1, a seguir ilustra o ciclo completo do PSPRE.

Figura 1 - Esquema do ciclo do PSPRE.



Fonte: Ribeiro *et al.* (2020)

b) Aço 22MnB5 *galvannealed*

O aço 22MnB5 *galvannealed* é um aço avançado de alta resistência e consiste, em um aço manganês-boro laminado a quente, com revestimento metálico *galvannealed*. A Tabela 1, apresenta sua composição química.

Tabela 1 - Composição química (% em massa) do 22MnB5 galvannealed

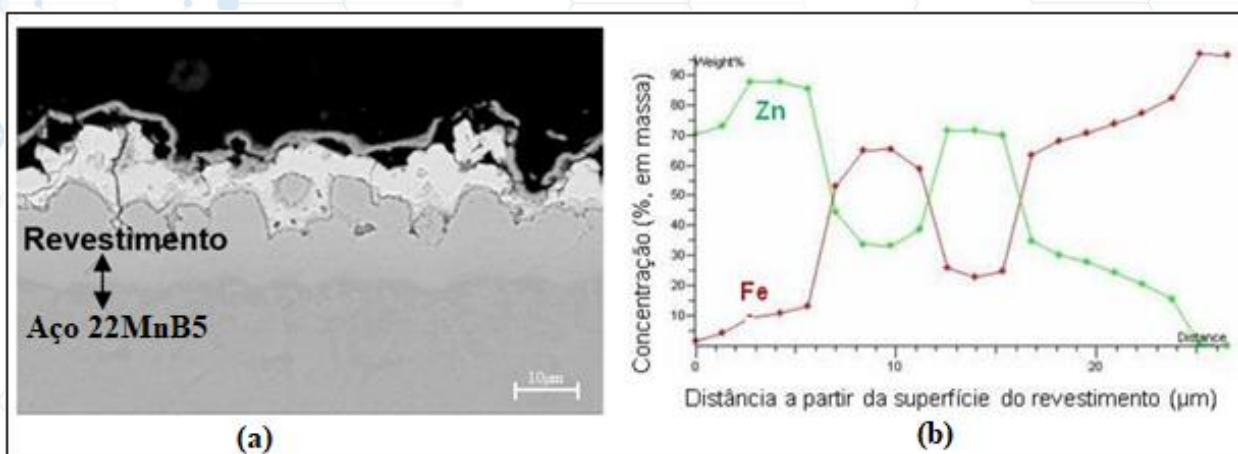
C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Mo	Sn	B	Pb
0,257	0,263	1,274	0,015	0,001	0,047	0,026	0,001	0,004	0,035	0,160	0,019	0,005	0,001	0,021	0,030

Fonte: O autor

Na condição de estampado a quente, o revestimento total é composto por duas camadas distintas. Uma camada de Fe-Zn, com 30% a 40% de Zn com espessura em torno de 18,0 μm . Acima desta camada, existe outra com compostos intermetálicos de Fe-Zn e ilhas de solução sólida de Fe-Zn, com espessuras entre 5 μm e 10 μm (BARBOSA *et al.*, 2016). Quanto a microestrutura, o aço apresenta uma microestrutura martensita (ELLER *et al.*, 2014). As Figuras 2 (a) e 2 (b) mostram, a seção transversal do revestimento *galvannealed* formado sobre o aço 22MnB5 estampado a quente e o perfil de composição química ao longo da seção do revestimento, respectivamente.

Figura 2 (a) – Seção do revestimento *galvannealed* estampado a quente.

Figura 2 (b) – Composição química do revestimento *galvannealed* estampado a quente.



Fonte: Adaptado Barbosa *et al.* (2016)

c) Método dos Polinômios Canônicos de Misturas

O Método dos Polinômios Canônicos de Misturas foi desenvolvido por Gomes (2013) para definir de forma sistemática a ponderação de múltiplas respostas que apresentam diferentes graus de importância em problemas de otimização multi-objetivo. O método pode ser estruturado de acordo com o seguinte procedimento:

Passo 1: formulação do problema de otimização multi-objetivo.

Passo 2: definição do arranjo de misturas e especificação das proporções mínimas e máximas de cada peso.

Passo 3: solução do problema de otimização do Passo 1 para cada condição experimental definida no Passo 2 e cálculo do erro percentual global das respostas Pareto-ótimas através da expressão 1:

$$EPG = \sum_{i=1}^m \left[\frac{y_i^*}{T_i} - 1 \right] \quad (1)$$

Onde: EPG – Erro percentual global das respostas Pareto-ótimas em relação aos alvos

y_i^* – Valores das respostas Pareto-ótimas

T_i – Alvos definidos

m – Número de objetivos

Passo 4: determinação do polinômio canônico de misturas para o erro percentual global, utilizando como fonte de dados os resultados dos cálculos do Passo 3.

Passo 5: identificação dos pesos ótimos através da minimização da função obtida no Passo 4, utilizando, para isso, a expressão 2:

$$\begin{aligned} \text{Min } EPG(\mathbf{w}) &= \sum_{i=1}^m \beta_i w_i + \sum_{i < j}^m \sum \beta_{ij} w_i w_j \\ \text{s. a.: } &\sum_{i=1}^m w_i = 1 \\ &w_i^{\min} \leq w_i \leq w_i^{\max} \end{aligned} \quad (2)$$

Onde: $EPG(\mathbf{w})$ – Polinômio de misturas desenvolvido para o erro percentual global

w_i – Pesos atribuídos

β_i, β_{ij} – Coeficientes estimados no Passo 4

w_i^{\min}, w_i^{\max} – Pesos mínimos e máximos considerados (definidos no Passo 2)

2.2 Método de pesquisa

De acordo com (GIL, 2008) e Martins (2010), o trabalho proposto pode ser classificado como sendo de natureza aplicada, com objetivo explicativo e abordagem quantitativa e metodologia experimental. Agregado a isso, a otimização do objeto de estudo baseia-se em funções objetivo as quais são obtidas a partir de dados coletados pela realização de experimentos. Dentre as técnicas de experimentação existentes, será empregado o Projeto e Análise de Experimentos, pois, de acordo com Montgomery (2013), é um processo de planejamento de experimentos em que dados apropriados possam ser coletados e, posteriormente, analisados através de métodos estatísticos.

2.3 Resultados e Discussão

Os experimentos serão conduzidos no laboratório de soldagem da UNIFEI. E como principal resultado, espera-se obter parâmetros de processo que maximize a área da lentilha, resistência a tração, eficiência energética e paralelamente, minimize o consumo energético e custos de processo. A Tabela 2 e Tabela 3, a seguir apresentam os parâmetros e níveis definidos para alcançar este resultado.

Tabela 2 - Níveis dos parâmetros fixos

Parâmetro	Faixa de trabalho	Unidade
Pressão do eletrodo	5,7	bar
Tempo de pré-pressão 1	50	ciclos
Tempo de pré-pressão 2	58	ciclos
Tempo de pré-aquecimento	1	ciclo
Corrente de pré-aquecimento	5,7(95%)	kA
Corrente de revenimento	3,0 (50%)	kA
Tempo de revenimento	30	ciclos
Tempo de pós-pressão	50	ciclos
Impulsos	1	-

Nota: 100% equivale a 6 kA

Fonte: O autor

Tabela 3 – Faixas operacionais para realização dos experimentos

Parâmetro	Faixa de trabalho	Unidade
Tempo efetivo de solda	6 a 10	ciclos
Corrente efetiva de solda	5100 a 5700 (72% a 78%)	kA
Tempo de têmpera	20 a 40	ciclos
Tempo de subida de corrente	32 a 38	ciclos

Nota: 100% equivale a 6 kA

Fonte: O autor

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Desenvolver parâmetros de processo ótimos que elevem a qualidade das juntas soldadas e a eficiência energética do PSPRE do aço 22MnB5 *galvannealed*, contribuem significativamente para o sucesso das estratégias de mitigação das Mudanças Climáticas.

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

BARBOSA, A. H. A.; ELEUTÉRIO, H. L.; PEREIRA, J. F. B.; CARVALHO, J. L.C. Desenvolvimento de metodologia para caracterização do aço 22MnB5 galvannealed destinado a confirmação a quente. **53º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos**, Rio de Janeiro, Brasil. 2016.

ELLER, T. K.; GREVE, L.; ANDRES, M. T.; MEDRICKY, M.; HATSCHER, A.; MEINDERS, V. T.; VAN DEN BOOGAARD, A. H. Plasticity and fracture modeling of quench-hardenable boron steel with tailored properties. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 214, p. 1211-1227, 2014.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6ª Edição, São Paulo: Atlas, 2008. 220 p.

GOMES, J. H. F. **Método dos polinômios canônicos de misturas para otimização multiobjetivo**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013. 162p.

HOU, J. S-C. **Resistance Spot Welding and In-Process Heat Treatment of Hot Stamped Boron Steel**. Dissertação (Mestrado em Ciências Aplicadas em Engenharia Mecânica), University of Waterloo, Canadá, 2016. 116 p.

ITF, INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM. **ITF transport outlook 2017 (2017)**. Disponível em: < https://www.oecd-ilibrary.org/transport/itf-transport-outlook-2023_b6cc9ad5-en >. Acesso em: 10 de março de 2023.

KIMCHI, M.; PHILLIPS, D. H. **Resistance Spot Welding Fundamentals and Applications for the Automotive Industry**. EUA: Morgan e Claypool Publishers, 2017. 115 p.

LUO, X.; REN, J.; LI, D.; QIN, Y.; XU, P. Macro characteristics of dissimilar high strength steel resistance spot welding joint. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 87, p. 1105-1113, 2016.

MARTINS, R. A. **Abordagens quantitativa e qualitativa**. MIGUEL, P. A. C. (Org). Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. Cap. 3, p.45-61.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8ª Edição, Nova Iorque, EUA: Wiley, 2013. 756 p.

NADIMI, N.; YADEGARI, R.; POURANVARI, M. Resistance Spot Welding of Quenching and Partitioning (Q&P) third-generation Advanced High-Strength Steel: Process-microstructure-performance. **Metallurgical and Materials Transactions A**, V. 54, n. 2, p. 577-589, 2023.

RIBEIRO, R.; ROMÃO, E.L.; LUZ, E.; GOMES, J.H.; COSTA, S. Optimization of the Resistance Spot Welding Process of 22MnB5-Galvannealed Steel Using Response Surface Methodology and Global Criterion Method Based on Principal Components Analysis. **Metals**, n. 10, p. 1338, 2020.

SOOMRO, I. A.; PEDAPATI, S. R.; AWANG, M.; ALAM, M. A. Effects of double pulse welding on microstructure, texture, and fatigue behavior of DP 590 steel resistance spot weld. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 125, n. 1-2, p. 1271-1287, 2023.

VIJAYAN, V.; MURUGAN, S. P.; SON, S. G.; PARK, Y. Metallography and computed tomography analysis of the shrinkage cavity formed in Advanced High-Strength Steel

resistance spot welds. **Materials Performance and Characterization**, v. 9, n. 1, p. 257-266, 2020.

ZHANG, H.; SENKARA, J. **Resistance Welding: Fundamentals and Applications**. EUA: CRC Press Taylor & Francis Group, 2006. 439 p.

