

OTIMIZAÇÃO DE UM PROCESSO DE SOLDA MIG / MAG EM UMA INDÚSTRIA FABRICANTE DE RODAS PESADAS EM AÇO DE BAIXA LIGA.

Luciano Pinho Nilo Júnior.

Universidade Federal de Itajubá – Av. BPS, 1303 – Caixa Postal 50 – 37500-903 – Itajubá-MG
lucianopinho@maxioncr.com.br

Sebastião Carlos da Costa.

Universidade Federal de Itajubá – Av. BPS, 1303 – Caixa Postal 50 – 37500-903 – Itajubá-MG
sccosta@unifei.edu.br

***Resumo:** O presente trabalho tem por finalidade a proposição de um modelo matemático de otimização de um processo de solda MIG / MAG em uma indústria fabricante de rodas pesadas em aço de baixa liga para caminhões e ônibus. A otimização do processo foi obtida através da utilização da técnica Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). Foram realizadas 31 corridas de soldagem utilizando como corpos de prova rodas padrão para pneu sem câmara, cujo formato atualmente é o mais utilizado no mercado interno e externo. Através da revisão bibliográfica e características e restrições pertinentes ao processo, bem como os objetivos finais de aumento da qualidade do cordão com diminuição do tempo de ciclo e quantidade gasta de arame de solda, foram determinados os parâmetros de entrada: voltagem, corrente, ângulo longitudinal e velocidade de soldagem. As respostas principais, baseando-se nas especificações internas do cordão de solda e também em aspectos econômicos, foram penetração no aro e no disco. Através do modelo obtido, observou-se que, de uma forma geral, todos os parâmetros de entrada apresentam, isoladamente ou interados, influência significativa nas respostas e foi possível determinar a otimização do processo como um todo, levando-se em consideração aspectos técnicos e econômicos.*

***Palavras-chave:** Soldagem, Processo MIG / MAG, DOE, Indústria automobilística*

1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, as empresas vêm buscando continuamente a melhoria dos processos, tanto em termos de capacidade quanto nos aspectos econômicos. Desta forma, há a necessidade de um conhecimento total destes processos, a fim de se tomar decisões que viabilizem tais objetivos. Segundo Neto et al⁽¹⁾ muitas vezes, a falta de planejamento é a causa do insucesso de uma investigação, e no entanto raros são os pesquisadores que pensam em estatística antes de realizar seus experimentos. Em geral eles costumam achar que a análise dos seus dados, não importa como tenham sido obtidos, eventualmente levará sua pesquisa a um bom termo. Havendo dificuldades, pensam eles, basta recorrer a um entendimento nessas coisas que o problema estará resolvido. Sendo assim, através da utilização da técnica do Projeto e Análise de Experimentos, há a aplicação de um método de pesquisa que permite a utilização de ferramentas estatísticas, o que fará com que o processo seja melhor entendido e as melhorias desejadas sejam viabilizadas.

Uma das áreas que vem sendo bastante explorada a utilização da técnica do Projeto e Análise de Experimentos é a soldagem. Diversos trabalhos, como os de Neto e Guimarães⁽²⁾, na área de TIG pulsado, Gunaraj e Murugan⁽³⁾ na área de arco submerso e Ribeiro⁽⁴⁾ no processo de solda MIG apresentaram ótimos resultados com a aplicação da técnica.

Uma das maiores aplicações dos processos de soldagem acontece nas indústrias automobilística e de auto-peças. Em diversos casos, a solda é considerada como uma característica especial do produto, ou seja, qualquer deficiência da mesma pode levar a um acidente em campo, com possibilidades de vítimas fatais. Um exemplo é a indústria fabricante de rodas de aço para caminhões e ônibus, onde a solda de ligação do aro com o disco (Figura 1) é característica crítica, e apresenta controle e especificações diferenciados. Para tanto, diversas normas técnicas internacionais devem ser observadas entre as quais se destacam ALAPA⁽⁵⁾, TRA⁽⁶⁾, ETRTO⁽⁷⁾.

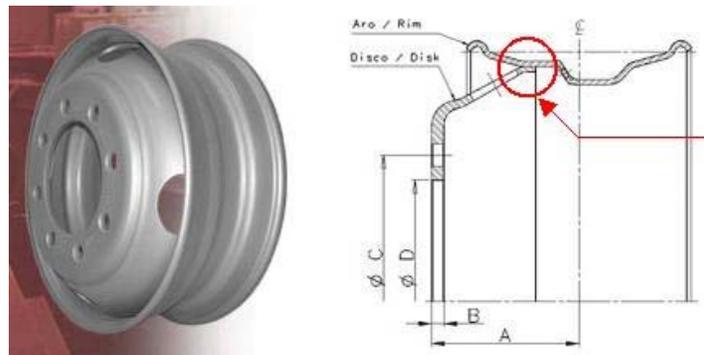


Figura 1. Roda para pneu sem câmara – visão geral e corte do perfil

Dentre os aspectos relacionados à soldagem de componentes, uma das dificuldades se refere ao controle dos parâmetros no sentido de se atender a qualidade e especificações técnicas exigidas. Desta forma o presente trabalho vem propor uma melhoria de um processo de soldagem MIG/MAG em uma indústria fabricante de rodas pesadas de aço baixa liga através da aplicação da técnica do Projeto e Análise de Experimentos, baseando-se na técnica de Metodologia de Superfície de Resposta (RSM).

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido em uma estação de soldagem convencional automática MIG / MAG Soltronic, com unidade de controle HOBART HMC-410 e retificador tipo tensão constante, modelo RC-650 RVS. As mesmas utilizaram aros e discos com parâmetros de geometria e composição química do material (SAE 1008 / 1010 – conforme norma SAE J403⁽⁸⁾). Devido a restrições do equipamento e baseados no conhecimento de mais de 50 anos na fabricação de rodas, bem como em diversos trabalhos e na literatura existente, os seguintes parâmetros foram selecionados para análise: tensão, corrente, velocidade de soldagem e ângulo longitudinal da tocha. As faixas de variação também foram determinadas da mesma forma. Os demais parâmetros foram mantidos constantes, sendo os principais: diâmetro do arame (1,6 mm), mistura de gases (80% Ar + 20% CO₂), polaridade (positiva) e distância da tocha à peça (20 mm). Além disso, cuidados como a temperatura inicial de soldagem também foram controlados. A Tabela 1 mostra os parâmetros de soldagem e os níveis de análise.

As respostas escolhidas, também baseadas em especificações internas, foram a penetração no aro (Pa) e no disco (Pd), que são as principais responsáveis pela resistência do cordão de solda a esforços. A obtenção das respostas foi realizada através de 01 macrografia retirada do centro da secção soldada (cada seção com aproximadamente 200 mm), ataque de Nital (15%) e utilização de um microscópio óptico OLYMPUS SZ-CVT, com câmera de vídeo diretamente ligada a um microcomputador, com

aumento de 06 vezes. A medição dos valores de penetração e ângulo foi realizada com auxílio do software IMAGE PRO PLUS versão 4.1.

Tabela 1. Parâmetros do experimento e faixas de variação

Parâmetro	Níveis				
	-2	-1	0	1	2
Tensão (V) – V	26	28	30	32	34
Corrente (A) – I	300	340	380	420	460
Velocidade (%) – Vs	17	19	21	23	25
Ângulo (°) – AL	11	12	13	14	15

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos nas 31 corridas do experimento, cujo seqüenciamento foi gerado a partir da aplicação da metodologia estatística MSR

Tabela 2. Resultados obtidos no experimento

Corrida	Parâmetros				Respostas		Corrida	Parâmetros				Respostas	
	V	I	Vs	AL	Pa (mm)	Pd (mm)		V	I	Vs	AL	Pa (mm)	Pd (mm)
1	28	340	19	12	2,13	1,53	17	26	380	21	13	1,96	0,98
2	32	340	19	12	2,14	1,87	18	34	380	21	13	2,47	1,28
3	28	420	19	12	3,92	2,33	19	30	300	21	13	0,85	0,55
4	32	420	19	12	3,57	1,36	20	30	460	21	13	3,19	1,91
5	28	340	23	12	1,36	1,70	21	30	380	17	13	1,91	0,94
6	32	340	23	12	2,08	0,94	22	30	380	25	13	2,42	1,36
7	28	420	23	12	1,96	2,21	23	30	380	21	11	2,81	1,19
8	32	420	23	12	2,72	1,99	24	30	380	21	15	2,25	1,20
9	28	340	19	14	1,49	1,32	25	30	380	21	13	2,42	1,28
10	32	340	19	14	2,04	0,98	26	30	380	21	13	2,55	0,81
11	28	420	19	14	2,38	2,04	27	30	380	21	13	2,54	0,89
12	32	420	19	14	4,59	1,83	28	30	380	21	13	2,85	0,97
13	28	340	23	14	1,96	1,23	29	30	380	21	13	2,89	1,19
14	32	340	23	14	2,21	1,24	30	30	380	21	13	2,76	1,18
15	28	420	23	14	2,59	1,66	31	30	380	21	13	2,55	1,23
16	32	420	23	14	3,28	1,65							

Através da análise de regressão e do método ANOVA, foram determinados, com o auxílio do software estatístico MINITAB, os modelos matemáticos reduzidos, para melhor adequação, bem como a probabilidade P (P_{value}), onde a mesma é verificada através da comparação com o fator F para 14 graus de liberdade e 95% de nível de significância. Para adequação do modelo, o valor de P_{value} deve ser menor que 0,05. Além dos modelos e probabilidades, também foram determinados os valores de R^2 ajustado, que representa a porcentagem de variação explicada pelo modelo, bem como o erro padrão (E) esperado para os modelos. A Tabela 3 apresenta um resumo dos resultados obtidos.

Tabela 3. Modelos matemáticos e análises estatísticas para Pa e Pd

Resposta	Modelo Matemático Reduzido	R^2	P	E
Pa	$29,8979 - 0,917917 * V + 0,0759063 * I - 0,251667 * V_S - 4,50604 * A_L + 0,080 * V * A_L - 0,00290625 * I * V_S + 0,099375 * V_S * A_L$	68,1%	0,000	0,415
Pd	$57,1827 - 1,32848 * V - 0,0456436 * I - 0,955521 * V_S - 2,75054 * A_L + 0,0215997 * V^2 + 0,0000696243 * I^2 + 0,102649 * A_L^2 + 0,0228497 * V_S^2$	37,9%	0,013	0,345

3.1. Efeitos dos Parâmetros de Entrada na Penetração no Aro (Pa)

Pelo modelo reduzido, verifica-se que todos os parâmetros mostraram-se significativos, além de algumas interações. A Figura 2 mostra a influência da tensão, intensidade de corrente, velocidade de soldagem e inclinação da tocha na penetração do aro. Observa-se que com relação a tensão do arco, Figura 2(a), aumentando-se a tensão causa, em consequência, aumento na penetração do aro, sendo esta relação linear positiva. O comportamento da corrente, Figura 2(b), é semelhante ao da tensão porém com efeito mais significativo na penetração no aro. Isto pode ser verificado através da análise dos coeficientes. No entanto para a velocidade de soldagem, Figura 2(c), tem-se o efeito inverso da tensão e corrente. O aumento da velocidade de soldagem causa uma diminuição da penetração no aro, sendo este efeito também linear. Em relação ao ângulo longitudinal, o aumento do mesmo causa uma leve tendência de diminuição dos valores de penetração para as condições estabelecidas na Figura 2(d). Porém, observa-se que este efeito é bem menos significativo que os parâmetros anteriores, como esperado.

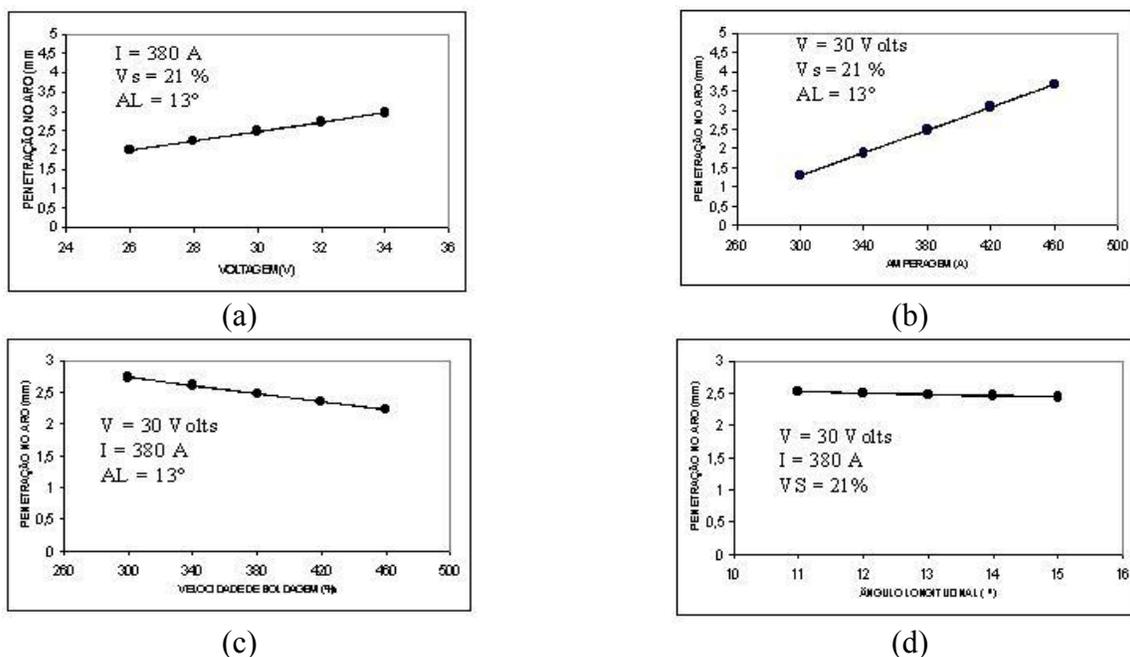


Figura 2. Efeitos dos parâmetros em Penetração do Aro (Pa): (a) V; (b) I; (c) Vs; (d) AL

Em princípio, como se pretende maximizar a penetração do aro, porém para níveis próximos a 30% da espessura da chapa (aproximadamente 2,0mm), observando apenas os efeitos individuais dos parâmetros, sugere-se que a combinação ideal para tal seja de utilizar-se a tensão no nível intermediário, associado a uma corrente também no nível intermediário e uma velocidade em seu nível mínimo. Porém, no caso desta velocidade o aspecto de produtividade é afetado, já que o interessante seria trabalhar com o máximo de velocidade, objetivando um menor tempo de ciclo. Há que se considerar ainda o aspecto prático desta condição, já que muitas vezes o incremento da corrente exige em contrapartida o aumento da velocidade de soldagem para garantir a qualidade do cordão. Com relação ao ângulo longitudinal, sugere-se que o mesmo seja mantido em seu nível mínimo.

Em relação às interações significativas, as Figuras 3(a), 3(b) e 3(c) mostram os efeitos de $V \times A_L$, $I \times V_s$ e $V_s \times A_L$ respectivamente, na penetração no Aro (P_a).

Considerando a interação da corrente com a velocidade de soldagem (Figura 3(a)), observa-se que para uma máxima corrente do processo a utilização de uma baixa velocidade maximiza a penetração, porém diminui a produtividade do sistema, já que o ciclo da operação torna-se maior. Por outro lado, a utilização de uma alta velocidade de soldagem diminui a penetração do aro, o que não é o objetivo.

Desta forma, uma melhor solução é a utilização de uma velocidade média de 21%, sendo tal nível reforçado através da interação desta variável (V_s) com o ângulo da tocha (Figura 3(b)). Observa-se que para o nível de velocidade intermediário, independentemente da inclinação da tocha, a penetração do aro permanece praticamente constante. Porém, observando o gráfico e a superfície de resposta da interação tensão e ângulo da tocha (Figura 3(c)), nota-se que a maior penetração no aro é obtida com a utilização da tensão e ângulo da tocha em seus níveis máximos.

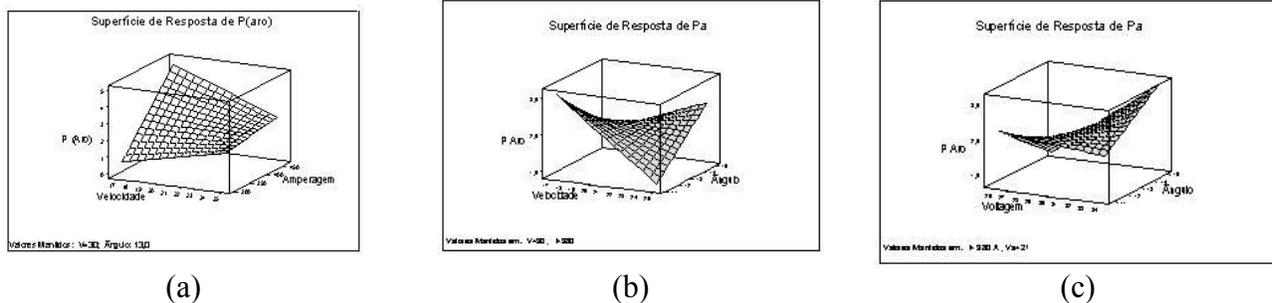


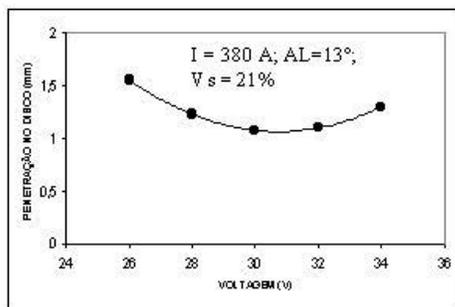
Figura 3. Efeitos dos parâmetros nas interações: $I \times V_s$ (a); $V_s \times A_L$ (b); $V \times A_L$ (c)

Considerando todos estes aspectos, a combinação dos parâmetros no níveis “ $I(0)$, $V(0)$, $vs(0)$, $A_L(+2)$ ” parece ser a mais adequada no que tange à penetração do aro para valores próximos a 2 mm (evitando fragilizar a estrutura) e produtividade da solda.

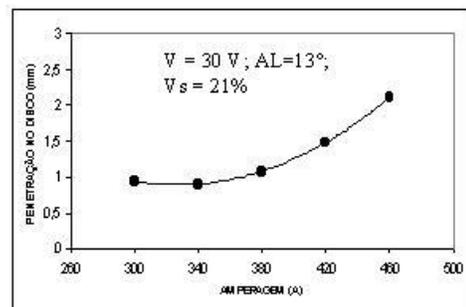
3.2. Efeitos dos Parâmetros de Entrada na Penetração no Disco (Pd)

Pelo modelo, é possível identificar que os parâmetros tensão, corrente, velocidade de soldagem e ângulo longitudinal influenciam na penetração do disco, tanto em termos lineares quanto quadráticos.

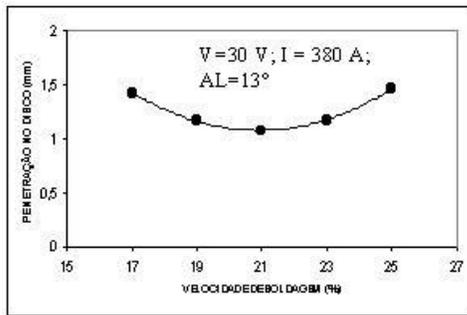
Analisando os efeitos individuais dos parâmetros observa-se que o aumento da tensão causa diminuição da penetração do disco (Figura 4(a)), diferentemente dos resultados obtidos para a penetração no aro. Este fato pode ser explicado pela abrangência do cordão, já que quanto maior a tensão, maior também é será o comprimento do arco e a abertura do mesmo, sendo que esta abertura causa um efeito maior no aro. Quanto ao pequeno acréscimo da penetração do disco observado no final da curva, este pode ser explicado por uma imprecisão do modelo estabelecido. O efeito da corrente, visto na Figura 4(b), mostra que correntes maiores causam maiores penetrações, conforme já esperado, e o efeito da abrangência do cordão não apresenta influência para este caso. Para a velocidade de soldagem (Figura 4(c)), o aumento da velocidade provoca uma diminuição da penetração do disco, como esperado. Da mesma forma, o pequeno acréscimo da penetração do disco nas velocidades maiores pode ser explicado por uma imprecisão do modelo. O efeito do ângulo longitudinal, visto na Figura 4(d), mostra que o aumento do ângulo longitudinal causa diminuição da penetração do disco. Este efeito pode ser explicado pelo posicionamento da tocha, já que quanto maior o ângulo maior é a aproximação da tocha na chapa do aro. Também para este caso, o pequeno aumento no final da curva é explicado por uma imprecisão do modelo.



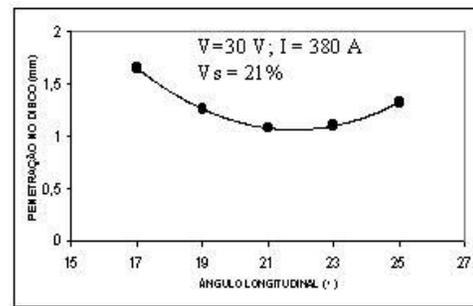
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4. Efeitos dos parâmetros em Penetração do Disco (Pd): (a) V; (b) I; (c) Vs; (d) AL

Em princípio, como se pretende neste caso também maximizar a penetração no disco associado a uma boa produtividade do cordão, sugere-se destes efeitos dos parâmetros que a tensão para este caso deve ser mantida no mínimo, associado a uma velocidade máxima e ângulo longitudinal no mínimo. A corrente, por sua vez, deve ser ajustada no nível máximo. Como a penetração no disco deve ser associada à penetração no aro, considerando os efeitos dos parâmetros no comportamento da soldagem no aro, há a indicação de que as condições estipuladas neste caso podem ser perfeitamente aplicáveis ao disco, sem prejuízo de sua qualidade. Desta forma ambos os casos seriam atendidos.

Considerando todos estes aspectos, sugere-se que para que a penetração do disco e produtividade da solda sejam beneficiados em conjunção com a penetração do aro a seguinte combinação dos parâmetros nos níveis “I(0), V(0), vs(0), AL(+2)” deva ser implementada.

4. CONCLUSÕES

Através dos modelos matemáticos, pode-se determinar os parâmetros ideais de soldagem, bem como a variação dos mesmos objetivando ganhos de produtividade. As análises estatísticas mostraram que os modelos são confiáveis.

5. REFERÊNCIAS

1. NETO, B.B.; SCARMÍNIO, I.S; BRUNS, R.E.. **Planejamento e otimização de experimentos**. Campinas: Editora da Universidade Estadual de Campinas, 1995.
2. NETO, J.C.P.A. ; GUIMARÃES, A.S. **Efeito dos parâmetros de pulso sobre a geometria do cordão de solda em soldagem de chapa fina de aço inox AISI 304 pelo processo TIG pulsado**. Soldagem & Inspeção – Suplemento Técnico, pp. 9-16, 2000.
3. GUNARAJ, V. ; MURUGAN, N. **Prediction and optimization of weld bead volume for the submerged arc process – Part 1**. Welding Journal, pp. 286s-294s, October 2000.
4. RIBEIRO, L.G. **Efeito dos parâmetros de pulso no processo MIG sobre a qualidade e produtividade do cordão de solda**. Dissertação de Mestrado. EFEI, 2002.
5. ALAPA – Associação Latino Americana de Pneus e Aros: **Manual de Normas Técnicas**. 2003.
6. ETRTO – The European Tyre and Rim Technical Organisation: **Standards Manual**. 2003.
7. TRA – The Tire and Rim Association: **Year Book**. 2003.
8. JIS-D-4103: **Automobile parts – Disc wheels performance requirements and marking**. 1998.