

# OTIMIZAÇÃO DE UM PROCESSO DE SOLDAGEM VIA CUSTOS DA NÃO QUALIDADE

**Davi Sampaio Correia**

Universidade Federal do Espírito Santo, Campus de Goiabeiras, DEM, Vitória, ES, Brasil, CEP 29060-970, davi\_correia@yahoo.com.br

**Valtair Antonio Ferraresi**

Universidade Federal de Uberlândia, FEMEC, Campus Santa Mônica, Uberlândia, MG, Brasil, CEP 38400-902, valtairf@mecanica.ufu.br

**Resumo.** Os custos da não qualidade são a perda financeira sofrida pelo usuário sempre que uma variável de resposta desvia-se do seu valor alvo ou apresenta variabilidade em torno deste. A redução destes é conseguida através de uma metodologia de otimização composta de cinco etapas: identificação do problema, planejamento de experimentos, modelagem das variáveis de resposta, definição de uma função objetivo e otimização. Neste trabalho, aplicou-se com sucesso esta metodologia na otimização do processo de soldagem MAG (aço comum e junta de topo).

**Palavras chave:** Otimização Experimental, MAG, Modelagem, Qualidade.

## 1. INTRODUÇÃO

A qualidade de um produto soldado pode ser avaliada por várias características (ou respostas), tais como penetração, largura e reforço de cordão. Estas características são controladas por diversos parâmetros de soldagem e o ajuste adequado destes é essencial para a obtenção de uma boa qualidade final. Entretanto, as relações entre os parâmetros e as respostas são geralmente desconhecidas, o que traz a necessidade de uma metodologia de otimização experimental.

O engenheiro de qualidade envolvido em otimização de processos geralmente está interessado em atingir três objetivos: minimizar desvios do alvo, maximizar a robustez a variabilidade e maximizar a robustez à oscilações dos parâmetros do processo.

Os alvos são os valores ideais para cada resposta. Minimizar desvios do alvo significa produzir unidades com respostas o mais próximo possível dos valores ideais. A variabilidade é causada pelo efeito de fatores não controláveis, tais como a temperatura ambiente. Maximizar a robustez a variabilidade significa produzir unidades relativamente insensíveis a estes fatores.

Os parâmetros do processo podem, durante a fase de produção, sofrer variações devido a, por exemplo, mudanças de operadores. Desta forma, é desejável também desenvolver robustez às oscilações nos parâmetros do processo. Isto significa que, quando os parâmetros do processo sofrem pequenos desvios dos seus valores ótimos pré-fixados, as características de qualidade do produto não irão se deteriorar de forma pronunciada.

Os três objetivos citados são conflitantes na maioria das vezes. Ribeiro and Elsayed (1995) propuseram a seguinte metodologia de cinco passos que permite conciliá-los:

- 1) Identificação do problema: listar os parâmetros do processo e as respostas de interesse. Para estas últimas, definir os alvos e as prioridades. A definição correta dos alvos é fundamental: eles precisam estar em harmonia com as necessidades dos clientes.

2) Projeto experimental: estudar o problema e escolher o planejamento experimental adequado para a coleta de dados de média e variância. Os níveis dos parâmetros do processo precisam ser escolhidos com cuidado, de forma a investigar apropriadamente a região experimental.

3) Modelagem das respostas: construir modelos de média e variância para cada resposta. Estes modelos individuais ajudam o engenheiro a entender importantes fatos sobre o processo em estudo. Barbutta (1998) propôs um método iterativo para a construção de modelos de média e variância de forma simultânea. Inicialmente, o modelo da variância é construído com uma estatística obtida de dados da variância calculada e do erro quadrado (tirado do modelo da média). Em seguida, o modelo da média é recalculado utilizando os valores da estatística da variância como pesos para achar os novos parâmetros de regressão, numa técnica conhecida como Mínimos Quadrados Generalizados (MQG). Esta técnica é uma variação dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), comumente usados em problemas de regressão. O procedimento de modelagem é repetido pelo menos duas vezes ou então finalizado por análise do erro residual e do índice  $R^2$ .

4) Definição da Função Objetivo: utilizar uma modificação da função de perda de Taguchi (Phadke, 1989), criada para quantificar os custos da não qualidade. A Equação (1) apresenta a função proposta.

$$Z(i) = \sum_{j=1}^Q w_j \left[ (Y_j^m - T_j)^2 + (\sigma_{Y_j}^m)^2 + \sum_{k=1}^P (\sigma_{X_k}^m)^2 \cdot \left( \frac{\partial Y_j^m}{\partial X_k} \right)^2 \right] \quad (1)$$

sendo que:

$Z(i)$  é a função objetivo que deve ser minimizada, isto é, quanto menor a função, maior a qualidade do processo. Para cada ajuste de parâmetros (tratamento “i”), um valor de  $Z$  pode ser obtido;

$w_j$  são pesos que levam em consideração a escala e a importância relativa de cada resposta.  $Q$  é o número total de respostas;

$T_j$  é o alvo, ou valor ideal, para cada respostas “j”;

$Y_j^m$  é o valor predito de média para cada resposta “j”;

$\sigma_{Y_j}^m$  é a variância predita para cada resposta “j”;

$\sigma_{X_k}^m$  é a estimativa de desvio padrão para cada fator controlável “k”.

A função objetivo  $Z$  tem basicamente três termos, que relacionam-se com os objetivos de qualidade anteriormente mencionados. O primeiro trata de desvios dos valores alvo. Já os outros dois tratam da redução da variabilidade devido à duas causas: fatores não controláveis e oscilações nos parâmetros de controle. Entretanto, a Eq. (1) apresenta seus resultados em valores adimensionais, que só tem valor comparativo.

Caten (1995), em um estudo de otimização para uma indústria química, propôs um método para encontrar uma constante que transforme os valores adimensionais da função  $Z$  em valores monetários. A empresa em questão oferece aos seus clientes duas categorias de produtos classificadas de acordo com a qualidade e com preços diferenciados de venda. O valor da perda  $Z$  para um produto da categoria A (alta qualidade) é de 64 unidades de perda. Considerando os mesmos valores alvo da categoria A, o valor de  $Z$  para um produto da categoria B (baixa qualidade) é de 179 unidades de perda.

O preço de venda do produto da categoria A é de R\$1,42/kg e o do produto B é de R\$1,07/kg. Desta forma, a constante de proporcionalidade  $K$  é definida como sendo a razão entre a diferença de preço e a diferença de qualidade. Uma vez calculada esta constante, os custos monetários são encontrados através da multiplicação da função  $Z$  pela constante.

Além da vantagem imediata de se colocar os custos da não qualidade em uma base mais compreensível, a monetarização destes custos permite que o engenheiro adicione à função Z os custos operacionais do processo. Assim, é possível fazer uma otimização que encontre o melhor compromisso entre qualidade e custos do processo.

5) Otimização: minimizar numericamente a função objetivo construída no passo anterior. O menor valor de Z conseguido apresenta os ajustes dos fatores controláveis que promovem a maior qualidade (dentro da região experimental investigada).

O objetivo deste artigo é demonstrar a viabilidade do procedimento descrito no campo da soldagem. Mais precisamente, otimizar três variáveis (velocidade de soldagem, folga entre chapas e distância bico de contato peça) em uma aplicação envolvendo o processo MAG. Estas variáveis foram escolhidas devido à sua grande probabilidade de flutuação em uma linha produção real, gerando desta forma custos da não qualidade. A busca do ótimo foi guiada pela minimização da função Z, a qual levou em consideração as seguintes respostas: rendimento de deposição, penetração, largura e reforço de cordão.

## **2.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

O processo de soldagem MAG é facilmente encontrado em indústrias cujos produtos requeiram união de metais em larga escala. Ele estabelece um arco elétrico entre um eletrodo metálico contínuo e a poça de fusão, sob a proteção de uma cortina gasosa fornecida à parte. O calor do arco derrete a superfície do metal de base e a ponta do eletrodo. O metal derretido do eletrodo é então transferido através do arco para a peça, onde se transforma no cordão de solda.

Os experimentos relativos à otimização foram obtidos com um equipamento de soldagem automático (fonte eletromagnética, cabeçote de alimentação e sistema de translado), tendo sido os sinais elétricos do arco monitorados (tensão e corrente). As peças soldadas foram fabricadas com duas chapas de aço comum de 9,5 mm de espessura, 150 mm de comprimento e 50 mm de largura. A junta utilizada foi a de topo e esta foi preenchida através de dois passes (com as mesmas condições de soldagem). O arame eletrodo utilizado foi o AWS ER70S-6, com 1,2 mm de diâmetro e a proteção gasosa foi garantida por uma vazão de 13 l/min de CO<sub>2</sub>. O eletrodo foi mantido a um ângulo de 90 graus da peça soldada.

### **2.1 Identificação do Problema**

Os alvos e as importâncias relativas escolhidos para as respostas foram: rendimento (100% e 3), penetração (5,5 mm e 5), largura (9,0 mm e 1) e reforço (2,0 mm e 1). Destaca-se que as importâncias foram escolhidas dentro da faixa de um (baixa importância) a cinco (alta importância). Já as faixas de investigação de cada variável independente pode ser vista abaixo:

Velocidade de soldagem (Vsol) – 45 a 55 cm/min;  
Folga entre chapas (FOLGA) – 1,8 a 2,2 mm;  
Distância bico de contato peça (DBCP) – 12 a 20 mm.

Maiores detalhes sobre estes valores podem ser vistos em Correia (2003).

### **2.2 Projeto Experimental**

As variáveis independentes selecionadas foram acomodadas em um projeto experimental do tipo factorial completo 2<sup>3</sup> (três fatores a dois níveis), acrescido de um ponto central. Cada ensaio foi realizado três vezes, a fim de ser possível a modelagem da variabilidade.

A Tabela (1) apresenta a matriz experimental ensaiada, com as variáveis independentes em seus níveis reais e codificados (montgomery, 1997). Vale notar que os testes não foram feitos na ordem da Tab. (1), e sim de forma aleatória. Age-se deste modo para distribuir uniformemente o efeito de fatores não controláveis. O subscrito "c" ao lado da abreviação da variável significa que estão sendo usados valores codificados.

Tabela 1. Matriz Experimental do estudo de não qualidade

Ensaio	Níveis Reais			Níveis Codificados		
	Vsol (cm/min)	FOLGA (mm)	DBCP (mm)	Vsol <sub>c</sub>	FOLGA <sub>c</sub>	DBCP <sub>c</sub>
1	55	2,2	20	1	1	1
2	55	2,2	12	1	1	-1
3	55	1,8	20	1	-1	1
4	55	1,8	12	1	-1	-1
5	45	2,2	20	-1	1	1
6	45	2,2	12	-1	1	-1
7	45	1,8	20	-1	-1	1
8	45	1,8	12	-1	-1	-1
9	50	2,0	16	0	0	0

A análise dos corpos de prova obtidos após a soldagem começou com uma inspeção visual. Foi constatado que todas as 9 condições de parâmetros testadas produziram cordões de solda de bom aspecto e sem a presença de descontinuidades visíveis. A Tabela (2) apresenta os resultados de rendimento, penetração, largura e reforço para as condições apresentadas na Tab. (1). Para cada condição de teste, mostram-se os valores das respostas encontrados nas três repetições.

Tabela 2. Resultados experimentais

	Rendimento (%)			Penetração (mm)			Largura (mm)			Reforço (mm)		
<b>1</b>	87,0	88,4	87,6	6,5	6,6	6,0	6,5	7,2	7,2	0,3	0,7	0,6
<b>2</b>	91,2	90,7	92,1	7,0	6,6	6,4	6,5	6,9	7,5	0,5	0,8	0,5
<b>3</b>	91,9	92,7	91,3	5,6	6,0	5,8	8,3	8,1	7,9	0,9	1,3	1,2
<b>4</b>	87,7	89,2	88,5	6,1	6,3	6,3	6,5	7,3	7,0	0,9	1,2	1,3
<b>5</b>	80,2	79,1	79,4	7,0	6,6	6,7	7,4	8,0	7,5	1,0	1,3	0,9
<b>6</b>	90,8	91,8	92,0	7,3	7,6	7,0	8,0	8,5	8,5	0,9	1,1	1,2
<b>7</b>	87,2	88,6	87,1	5,5	5,5	5,0	7,9	8,2	8,0	1,2	1,5	1,2
<b>8</b>	91,0	91,3	92,0	6,0	5,6	5,8	8,7	9,0	9,1	1,6	1,6	1,7
<b>9</b>	88,1	87,7	87,9	6,3	6,1	6,3	7,4	7,6	6,8	1,0	1,0	0,8

### 2.3 Modelagem das Respostas

Antes de aplicar a técnica de modelagem de Barbetta (1998), os dados apresentados na Tab. (2) devem ser transformados para uma faixa de -1 a +1 para cada resposta. A razão para este procedimento é a seguinte. A função Z a ser otimizada é composta de 4 blocos (relativos às 4 respostas), cada um composto por uma Eq. (1) preenchida com os dados correspondentes. Cada bloco tem 5 funções, sendo cada uma destas funções referentes a um objetivo da não qualidade: minimizar desvios do alvo (uma função), maximizar robustez a variabilidade (uma função) e maximizar a robustez às oscilações dos parâmetros do processo (três funções, relativas a Vsol, FOLGA e DBCP).

Conforme visto na introdução, os blocos são multiplicados por pesos e estes pesos têm um duplo propósito: evitar que respostas de maior escala “dominem” o processo de otimização e fornecer uma hierarquia relativas as respostas. Entretanto pode ocorrer que dentro de cada bloco existam termos com escalas diferentes e aí os pesos citados não têm efeito nenhum. Por exemplo, dentro do bloco da penetração, o termo relativo ao desvio de alvo pode ser substancialmente maior que o termo relativo à variância. Neste caso, o algoritmo de otimização pode “esquecer” o termo da variância e se “concentrar” apenas no desvio do alvo, durante a busca do ótimo. Em outras palavras, a otimização pode ser efetuada com bases apenas em média (geralmente maiores) e ignorando os outros efeitos (Osyczka , 1984).

Uma maneira de se evitar esta situação é normalizando os dados das respostas para a faixa de -1 a +1. O algoritmo usado para esta transformação pode ser visto na Eq. (2).

$$nv = 2 * (ac - \text{minvr}) / (\text{maxvr} - \text{minvr}) - 1 \quad (2)$$

Sendo que: nv (valor normalizado), ac (valor real), minvr (mínimo valor da faixa real) e maxvr (máximo valor da faixa real).

## 2.4 Definição da Função Objetivo

A função objetivo utilizada na otimização do processo MAG foi baseada na Eq. (1) e sua completa caracterização necessita, além dos modelos de média e variância, dos pesos “w” e das estimativas “σ”. Os pesos foram definidos no item 2.1 e os valores de “σ” estão relacionados com a expectativa de flutuação para cada parâmetro em uma linha de produção real. Inicialmente, assume-se um coeficiente de variação (CV) para cada parâmetro. Então calcula-se a estimativa correspondente “σ” da forma mostrada abaixo (considerou-se CV’s de 10% para a Vsol e para a FOLGA e 25% para a DBCP).



$$CV_{Vsol} = 10\% \quad \sigma_{Vsol} = (0,1 * 50) / 5 = 1.$$

$$CV_{FOLGA} = 10\% \quad \sigma_{FOLGA} = (0,1 * 2) / 0,2 = 1.$$

$$CV_{DBCP} = 25\% \quad \sigma_{DBCP} = (0,25 * 16) / 4 = 1.$$

Em que:

$\sigma_{Vsol}$  - estimativa do desvio padrão da velocidade de soldagem;

$\sigma_{FOLGA}$  - estimativa do desvio padrão da distância entre chapas do corpo de prova;

$\sigma_{DBCP}$  - estimativa do desvio padrão da distância bico de contato-peça.

Finalmente, todos os modelos, pesos, estimativas e derivadas parciais (obtidas dos modelos) foram incluídas na Eq. (1).

## 2.5 Otimização

A minimização da função objetivo obtida no item anterior foi feita através da técnica de “simulated annealing”. O menor valor encontrado para a função foi de 4,7 e os valores de ajuste correspondentes são: Vsol 55 cm/min, FOLGA 1,8 mm e DBCP 20,0 mm.

### 3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Após a definição dos melhores ajustes para o processo MAG, é também importante saber como a qualidade varia em função de flutuações dos parâmetros. Em outras palavras, se ter uma idéia da sensibilidade do processo. Isto porque em qualquer linha de produção, por mais controlada que seja, sempre existirão variações accidentais que podem corromper os ajustes ótimos. E dependendo da situação, pode ser necessária a mudança do ajuste ótimo para minimizar o problema.

A análise de sensibilidade é feita mantendo-se dois dos parâmetros constantes em seus valores ótimos e calculando-se a função Z para toda a faixa experimental do parâmetro restante. A Figura (1) apresenta um gráfico gerado com esta técnica. No caso, a FOLGA foi variada e este foi o parâmetro mais influente na qualidade.

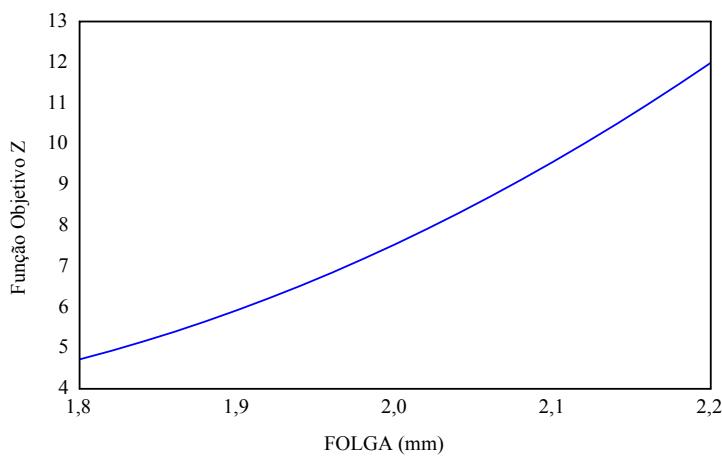


Figura (1) – Efeito da FOLGA sobre a Função Objetivo Z

Vê-se na Fig. (1) que o valor de 1,8 mm encontrado como ótimo está no final da faixa experimental investigada (e considera-se que valores abaixo de 1,8 mm provocam retrabalho de cordão). No caso de uma implementação em indústria, ou este valor teria de ser muito controlado, ou teria de ser adotado um valor mais alto.

Uma outra maneira de se analisar a sensibilidade da função objetivo é através da divisão das mesmas em vários Z's intermediários, cada um referente aos diversos objetivos envolvidos na função. A Tabela (3) apresenta os valores parciais de Z e suas correspondentes percentagens, sendo que a discriminação das componentes é explicada a seguir:

Za - referente ao desvio do valor alvo da resposta;

Zb - referente à variância da resposta;

Zc - referente à influência de flutuações da variável Vsol na resposta;

Zd - referente à influência de flutuações da variável FOLGA na resposta;

Ze - referente à influência de flutuações da variável DBCP na resposta.

Tabela 3. Discriminação das diversas componentes da função objetivo Z

Z's	Parcela de Z	% de Z	Z's	Parcela de Z	% de Z
Za (rendimento)	1,8	37,1	Za (largura)	0,8	16,7
Zb (rendimento)	0,0	0,0	Zb (largura)	0,0	0,0
Zc (rendimento)	0,1	3,0	Zc (largura)	0,0	0,4
Zd (rendimento)	0,1	3,0	Zd (largura)	0,1	1,9
Ze (rendimento)	0,1	2,1	Ze (largura)	0,1	2,1
Za (penetração)	0,3	6,1	Za (reforço)	0,7	15,3
Zb (penetração)	0,0	0,2	Zb (reforço)	0,0	0,0
Zc (penetração)	0,2	3,8	Zc (reforço)	0,0	0,6
Zd (penetração)	0,2	4,0	Zd (reforço)	0,1	1,9
Ze (penetração)	0,1	1,7	Ze (reforço)	0,0	0,0
			<b>Total</b>	<b>4,7</b>	<b>100,0</b>

De acordo com a Tabela (3), tem-se que aproximadamente 75% do valor final de Z vem das contribuições de apenas quatro termos, todos eles relativos á médias: Za (rendimento), Za (penetração), Za (largura) e Za (reforço). Isto mostra que, de um modo geral, a função conseguiu tratar de forma adequada as oscilações de ruído e fatores de controle, tendo problemas quanto a levar as respostas até os alvos escolhidos. A Tabela (4) apresenta os resultados finais obtidos para as respostas avaliadas com as condições ótimas encontradas.

Tabela 4. Alvos e respostas atingidas para o processo MAG

	Importância (0 a 5)	Alvo	Resposta
Rendimento (%)	3	100	92
Penetração (mm)	5	5,5	5,8
Largura (mm)	1	9,0	8,1
Reforço (mm)	1	2,0	1,1

Nota-se na Tab. (4) que o rendimento apresentou um bom valor, considerando que um alvo de 100 % é impossível de ser atingido com o processo MAG (este valor só foi escolhido como meta para fins de otimização). Quanto à largura e ao reforço, seus valores ficaram relativamente longe dos alvos, principalmente o reforço, mas vale destacar que isto não acarretaria problemas em termos de segurança para a aplicação envolvida. Aqui há duas soluções possíveis, ou os alvos são revistos, ou continua-se a otimização em novas regiões experimentais. Optou-se pela primeira opção em virtude da empresa envolvida neste trabalho ter escolhido inicialmente os alvos com base nos resultados obtidos com seu antigo processo de soldagem, o eletrodo revestido, e não com base em requisitos de projeto. Desta forma, os valores de resposta obtidos com o MAG satisfazem plenamente a qualidade da empresa, mesmo sendo diferentes dos obtidos com o eletrodo revestido. Outro ponto a considerar é que os desvios de alvo tanto da largura como do reforço só aconteceram devido à baixa importância dada a estas respostas.

## **4. CONCLUSÕES**

A metodologia proposta fornece uma maneira efetiva de otimizar processos de soldagem. Além disso, como apresenta uma valor para a qualidade, torna possível a comparação de processos numa base numérica que não a de custos.

No caso do processo MAG, a metodologia foi eficaz em identificar os ajustes de parâmetros mais adequados com relação aos alvos previamente definidos.

## **5. REFERÊNCIAS**

- Barbetta, P. A., 1998, "Construção de Modelos para Médias e Variâncias na Otimização Experimental de Produtos e Processos", Tese de Doutorado, Universidade de Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.
- Caten, C. S., 1995, "Método de Otimização de Produtos e Processos Medidos por Múltiplas Características de Qualidade", Dissertação de Mestrado, Universidade de Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
- Correia, D. S., 2003, "Seleção de Processo de Soldagem Utilizando uma Metodologia Baseada nos Custos da Não Qualidade", Tese de Doutorado, Universidade de Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.
- Montgomery, D. C., 1997, "Design and Analysis of Experiments", John Wiley, 4<sup>th</sup> Edition, USA.
- Ostyczka, A., 1984, "Multicriterion Optimization in Engineering", 1984, Ellis Horwood Limited, England.
- Phadke, M. S., 1989, "Quality Engineering Using Robust Design", Prentice Hall, USA.
- Ribeiro, J. L. and Elsayed, E. A., 1995, "A Case Study on Process Optimization Using the Gradient Loss Function", International Journal of Production Research, Vol. 33, Nr. 12, pp. 3233-3248.

## **WELDING PROCESS OPTIMIZATION USING THE NON QUALITY COSTS**

### **Davi Sampaio Correia**

Universidade Federal do Espírito Santo, Campus de Goiabeiras, DEM, Vitória, ES, Brazil, CEP 29060-970, davi\_correia@yahoo.com.br

### **Valtair Antonio Ferraresi**

Universidade Federal de Uberlândia, FEMEC, Campus Santa Mônica, Uberlândia, MG, Brazil, CEP 38400-902, valtairf@mecanica.ufu.br

**Abstract.** *The non quality costs are the financial loss suffered by the client every time a response variable drifts away from its target value or presents variability. Their reduction is achieved by an optimization methodology composed of five steps: problem identification, experimental design, response modeling, objective function definition and optimization. In this work, this methodology, was successfully applied in the MAG welding of plain steel, 9,5 mm thick, butt joint.*

**Keywords:** *Experimental optimization, GMAW, Modeling, Quality.*