

## **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NA GEOMETRIA E RESISTÊNCIA MECÂNICA DO PONTO NA SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA UTILIZANDO PLANEJAMENTO ROBUSTO**

**José Enrique Vargas**

Doutorando no Convênio UFU-UnB (Laprosolda-Graco) em Pós-graduação em Engenharia Mecânica  
jevargas@hotmail.com

**Sadek C. Absi Alfaro**

Prof. Dr., Universidade de Brasília, Graco, Campus Darcy Ribeiro, 70910-900  
sadek@unb.br

**Louriel O. Vilarinho**

Prof. Dr., Universidade Federal de Uberlândia, Campus Santa Mônica, Bloco 1M, 38400-032

**Resumo:** O processo de Soldagem a Ponto por Resistência (RSW) é largamente empregado na indústria automobilística, pois possui uma alta produtividade (mais de 20 pontos/minuto) e boa qualidade. Entretanto, a introdução de aços galvanizados nas linhas de produção trouxe dificuldades para o correto ajuste dos parâmetros de soldagem. Desta forma, este trabalho apresenta um estudo detalhado da influência dos principais parâmetros do processo (Tempo de subida, Tempo de corrente, Tempo de descida, Força do eletrodo e Vazão de água) na geometria e resistência do ponto/lentilha de solda em chapas galvanizadas. Para tanto, é proposto um planejamento experimental robusto (Taguchi) com os fatores acima mencionados, sendo avaliada a robustez do sistema (análise do tipo redução do nível sinal/ruído) com relação ao diâmetro, indentação e resistência mecânica do ponto (respostas). A diferencia deste trabalho para os demais reside no fato de que ao invés de manter um nível de corrente fixo, como tradicionalmente é feito, manteve-se a energia do processo (corrente x tempo) fixa. Conclui-se que é possível obter parâmetros robustos para o sistema, onde o parâmetro com maior significância estatística foi: o Tempo de corrente.

**Palavras-chave:** Soldagem a Ponto por Resistência, Técnicas Estatísticas, Planejamento Robusto.

### **1. INTRODUÇÃO**

Soldagem a Ponto por Resistência (Resistance Spot Welding) é um dos processos de soldagem mais utilizados na indústria automotiva, devido à sua simplicidade, rapidez, facilidade na operação, alta produtividade (mais de 20 pontos/minuto), aparatos simples para a execução e a facilidade para adaptar este processo a uma linha de fabricação automatizada. Neste processo as peças são unidas por pontos de solda formados pela fusão localizada de metal, entre os eletrodos, devido ao calor gerado pela resistência do material à passagem de corrente (efeito Joule, dado pelo produto da corrente e resistência:  $I^2R$ ) (Rivet, 1984). Os parâmetros do processo tais como: Tempo de subida, Tempo de corrente, Tempo de descida, Força do eletrodo e Vazão de água, responsáveis da realização de um ponto de solda de qualidade estão sendo otimizados com a finalidade de obter uma maior faixa de condições de soldagem aceitáveis. Também o monitoramento dinâmico da Corrente de soldagem, Força do eletrodo, Tensão e o deslocamento da lente de solda, está sendo utilizado para analisar o processo da formação da lente e a influência das características do material neste processo (Gedeon et. all, 1984).

A introdução de aços galvanizados na linha de produção, visando a redução de custos, trouxe consigo uma maior dificuldade para o ajuste dos parâmetros, toda vez que este tipo de aços têm uma

capa de revestimento de zinco o qual tem um ponto de fusão mais baixo que o do aço.

Devido à quantidade de parâmetros e a variabilidade de níveis utilizados na realização do ponto de solda, Planejamentos Fatoriais podem ser empregados com a finalidade de reduzir o número de ensaios ou testes, e métodos estatísticos podem ser utilizados para estudar e/ou analisar os efeitos das variáveis de influência do processo sendo que todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável são investigadas (Barros Neto et al, 2002 e Phadke, 1989).

O Planejamento Robusto (Taguchi) é uma alternativa na medição da qualidade da resposta, neste caso, características do ponto de solda: Indentação, Diâmetro do Ponto e Resistência Mecânica. Fatores denominados “Ruídos” (temperatura, umidade, poeira, etc) causam desvios e resultam em perda de qualidade do produto. A aplicação de técnicas estatísticas na análise da resposta, permite identificar os parâmetros ótimos do projeto os quais minimizam ou mesmo eliminam a influência dos fatores ruído no desempenho do produto. Com o método Taguchi pretende-se obter produtos robustos (pontos de solda) o suficiente para assegurar alta qualidade a despeito de flutuações que venham ocorrer no processo produtivo (Phadke, 1989).

Para a realização do ponto de solda, uma quantidade de Energia é utilizada (Energia = corrente x tempo). Tradicionalmente nas pesquisas em soldagem a ponto, a corrente é ajustada em um valor fixo. Neste trabalho, diferentemente das pesquisas tradicionais, será utilizado o Método da Energia, no qual a Energia empregada para a realização de um ponto de solda será mantida constante.

A resistência na peça de trabalho em um processo de soldagem a ponto varia com o tempo, podendo ser calculada somente ponto a ponto pelos parâmetros tensão e corrente em um dado instante de tempo, devido à dinâmica do processo (Weber, G. and Preß, H., 1994). Para facilitar a análise da medição da resistência, é utilizada a energia em função da resistência: Energia Específica, como mostrado na Equação 1.

$$E_{esp} = \frac{E}{R} = I_{rms}^2 \times T_s \quad (1)$$

onde  $E_{esp}$  é a energia específica, E é a energia gerada por Efeito Joule, R é a resistência elétrica do sistema,  $I_{rms}$  é o valor rms da corrente de soldagem e  $T_s$  é o tempo de soldagem.

Foram utilizadas chapas com duas espessuras: 1,2 mm e 2,0 mm, com a finalidade de analisar as respostas em três configurações diferentes de chapas a serem soldadas. Ensaios preliminares foram realizados com o intuito de conhecer os envelopes de trabalho: valores entre os quais a solda é efetivada, com os quais se encontrarão os valores da corrente de soldagem a utilizar em cada ensaio (a ser definidos no Planejamento Robusto) para cada configuração de chapa.

Espera-se que com este método encontrar os parâmetros de maior influência na resposta, os quais proporcionarão uma maior robustez ao processo, obtendo uma maior qualidade, na medida em que diminuem os efeitos dos ruídos.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho foi utilizada uma máquina de solda composta por um transformador de manufatura Soltronic HT75 2 MF, 440 V, 75 kVA, 170 A no circuito primário e um controlador de manufatura Fase Saldatura com máximo de potência nominal de 54 kVA. Foi usado um equipamento de pressão pneumática com valores de 2 a 6 kN, com uma corrente de soldagem no circuito secundário que varia de 2 a 6 kA e com um máximo de 100 ciclos de solda. As capas de eletrodos utilizadas são do tipo esférica, com diâmetro externo de 16 mm, Classe A, Grupo 2, dureza de 75 HRb e 75% IACS e o sistema de refrigeração por água. O material utilizado nas chapas foi aço galvanizado por imersão a quente, que proporcionam maior faixa de soldabilidade (Gedeon et. al, 1984), com duas espessuras diferentes: 1,2 mm e 2,0 mm de espessura, sendo utilizadas três configurações diferentes de chapas: A (2,0 – 2,0), B (2,0 – 1,2) e C (1,2 – 1,2).

Ensaios preliminares foram efetuados com a finalidade de achar os envelopes operacionais de

trabalho os quais mostram os limites entre os quais o ponto de solda é efetivado. Os limites foram considerados aceitáveis segundo o seguinte critério: o valor mais baixo aceitável é aquele quando a união das chapas é conseguida, e o valor máximo aceitável é um valor abaixo do valor de expulsão do material, sabendo que a expulsão é altamente indesejável para termos de qualidade de solda (Senkara, J. et all, 2004).

Os envelopes de trabalho encontrados são mostrados na Figura 1. O centróide de cada envelope foi considerado como o ponto ótimo de Energia, a qual é mantida constante para todos os ensaios ou corridas em cada configuração de chapa.

Para a execução dos ensaios, o método Taguchi fornece o planejamento L'16, que é composto por 16 ensaios com um número máximo de 5 fatores em 4 níveis. Como os níveis, neste caso, são 3 foi utilizada a técnica "dummy level", segundo Phadke (1989), a qual permite incrementar mais um nível repetindo-se o valor onde se precisa maior informação. O planejamento L'16 com os fatores e níveis a utilizar, em ordem padrão, é mostrada na Tabela 1. Ressalta-se que, para reduzir erros sistemáticos, ordem aleatória foi ser adotada.

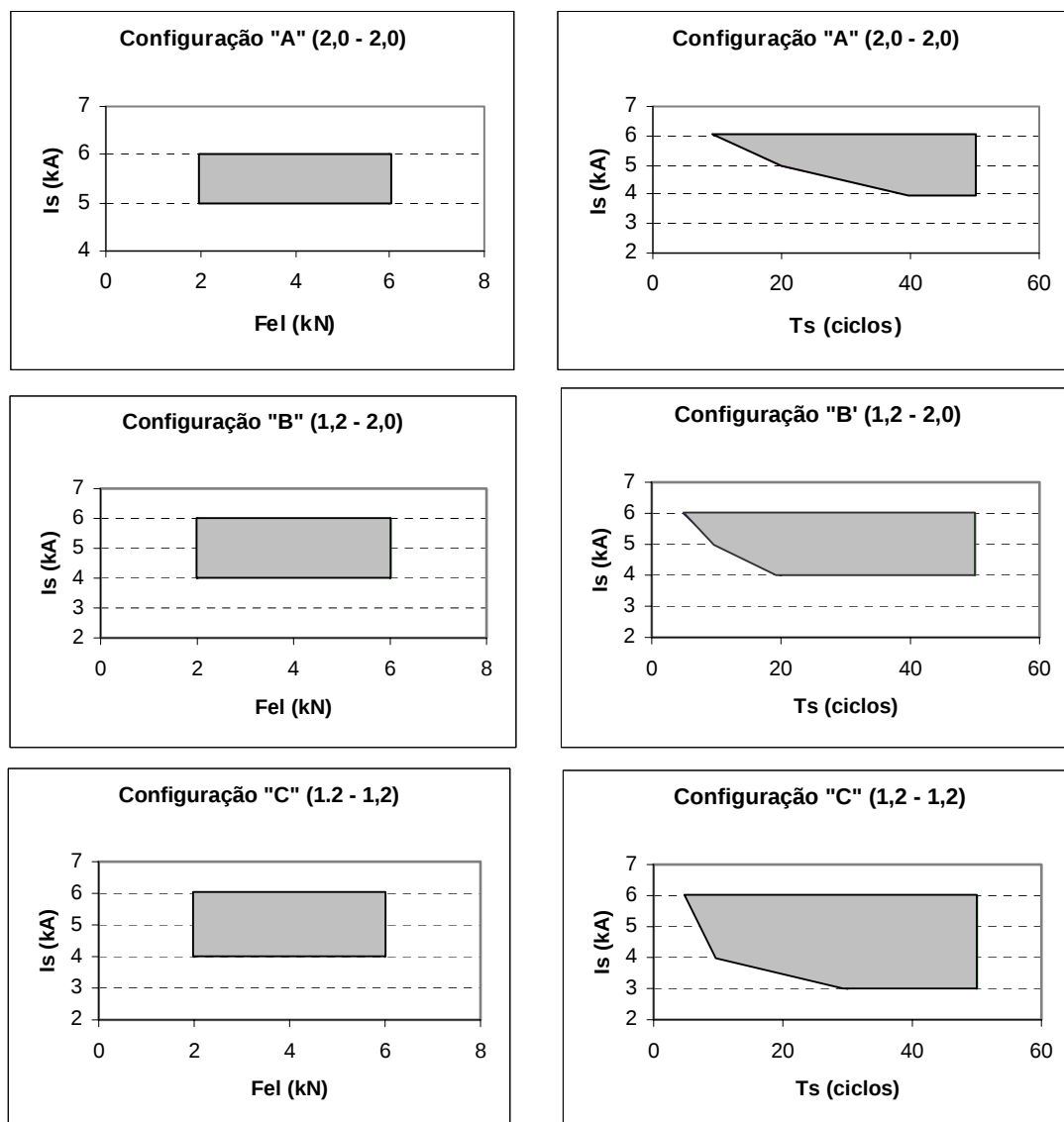


Figura 1. Envelopes operacionais para os parâmetros ( $Fel - Irms$ ) e ( $Ts - Irms$ ).

Tabela 1. Tabela L'16 do Planejamento robusto (Taguchi)

| <b>Fatores<br/>Ensaio</b> | <b>T<sub>sub</sub><br/>(ciclos)</b> | <b>T<sub>cor</sub><br/>(ciclos)</b> | <b>T<sub>des</sub><br/>(ciclos)</b> | <b>F<sub>el</sub><br/>(kN)</b> | <b>V<sub>az</sub><br/>(l/seg)</b> |
|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 1                         | 0                                   | 20                                  | 0                                   | 2                              | 0,03                              |
| 2                         | 0                                   | 35                                  | 3                                   | 4                              | 0,043                             |
| 3                         | 0                                   | 50                                  | 6                                   | 6                              | 0,06                              |
| 4                         | 0                                   | 35                                  | 3                                   | 4                              | 0,06                              |
| 5                         | 3                                   | 20                                  | 3                                   | 6                              | 0,06                              |
| 6                         | 3                                   | 35                                  | 0                                   | 4                              | 0,06                              |
| 7                         | 3                                   | 50                                  | 3                                   | 2                              | 0,043                             |
| 8                         | 3                                   | 35                                  | 6                                   | 4                              | 0,03                              |
| 9                         | 6                                   | 20                                  | 6                                   | 4                              | 0,043                             |
| 10                        | 6                                   | 35                                  | 3                                   | 6                              | 0,03                              |
| 11                        | 6                                   | 50                                  | 0                                   | 4                              | 0,06                              |
| 12                        | 6                                   | 35                                  | 3                                   | 2                              | 0,06                              |
| 13                        | 3                                   | 20                                  | 3                                   | 4                              | 0,06                              |
| 14                        | 3                                   | 35                                  | 6                                   | 2                              | 0,06                              |
| 15                        | 3                                   | 50                                  | 3                                   | 4                              | 0,03                              |
| 16                        | 3                                   | 35                                  | 0                                   | 6                              | 0,043                             |

A partir da Equação 2, encontrou-se os valores da corrente de soldagem a serem utilizadas em cada corrida segundo a Tabela 1 de planejamento fatorial, sendo que  $T_s = T_{sub} + T_{cor} + T_{des}$ . Cabe ressaltar que pelas limitações da máquina, foi utilizado somente o 80% do valor da Energia para não ultrapassar os valores dos limites das correntes de soldagem a serem utilizadas.

$$I_{rms} = \left[ \frac{E_{esp}}{T_s} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Após a realização das corridas, foi medida a profundidade de indentação com um relógio comparador. Logo as chapas foram dobradas, segundo procedimento especificado na literatura segundo a Norma: AWS/SAE D8.9M (2002), para a realização dos ensaios de tração/rasgamento (Poweel et al, 1996). Foi utilizada uma máquina MTS (Material Test System) com uma força máxima de tração de 100 kN, al qual fornece o gráfico e o valor da resistência mecânica do teste de arrancamento. Posteriormente foi medido o diâmetro do ponto de solda com um paquímetro (AWS/SAE D8.9M, 2002). As Figuras 2, 3 e 4 mostram as formas de medições realizadas.

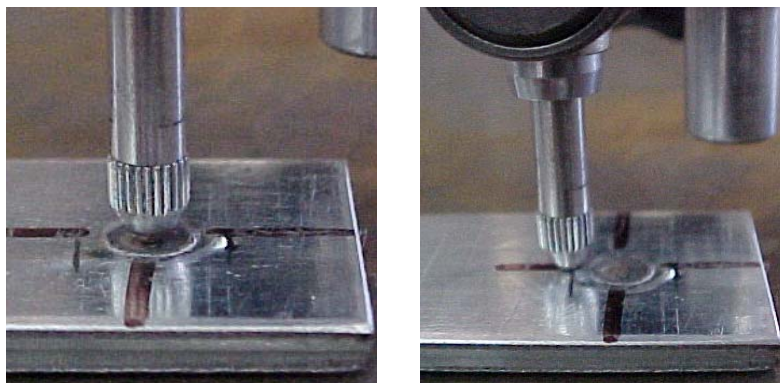


Figura 2. Medição da Profundidade da Indentação.

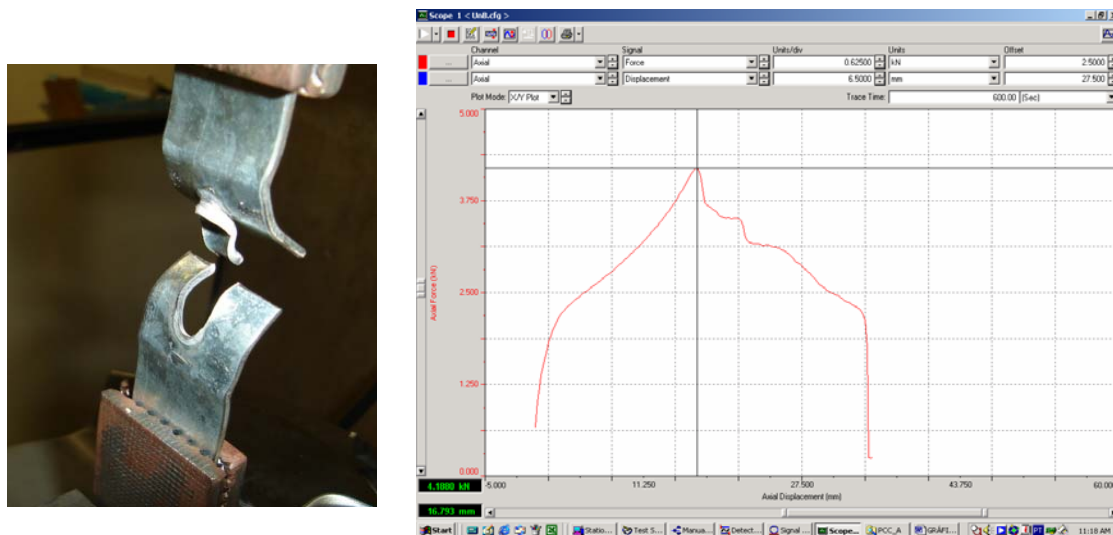


Figura 3. Teste de Tração/Rasgamento e o gráfico com o valor da Resistência Mecânica.

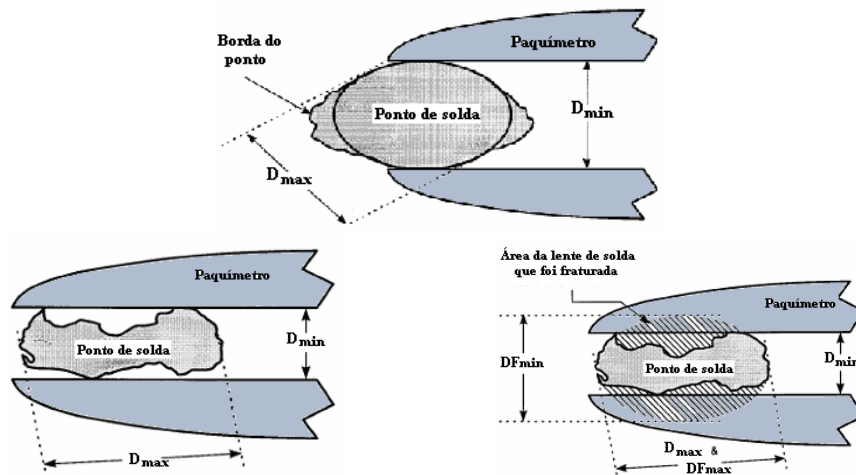


Figura 4. Métodos de medição do Diâmetro do ponto de solda.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para analisar as repostas e executar os cálculos foi utilizado um software comercial – Statística®. Os gráficos apresentados são os gráficos das médias fornecidos pelo programa os quais apresentam importante informação sobre o efeito de cada fator e sua significância estatística no processo. A idéia de significância ou não é adotada com base nas linhas tracejadas dos gráficos que representam duas vezes o desvio-padrão dos resultados, procedimento comum no Taguchi (Phadke, 1989).

#### 3.1. Indentação

Na análise da indentação, pode-se ver pelas Figuras 5, 6 e 7 (configurações: A, B e C respectivamente) que somente o Tempo de corrente ( $T_{cor}$ ) foi significativo e teve uma tendência negativa (quando maior, menor a resposta, neste caso indentação). Isto sugere que o menor  $T_{cor}$  possível deve ser empregado, mantendo-se a mesma energia do processo. Esta observação remete à literatura técnica, que tradicionalmente informa os usuários do Processo de Soldagem a Ponto por Resistência que utilizem o menor tempo possível para a soldagem e a maior corrente disponível (lembrar que para manter a mesma energia, um menor tempo implica em uma maior corrente). Desta forma, os resultados aqui obtidos de forma criteriosa e com metodologia científica confirmam

a literatura técnica do assunto.

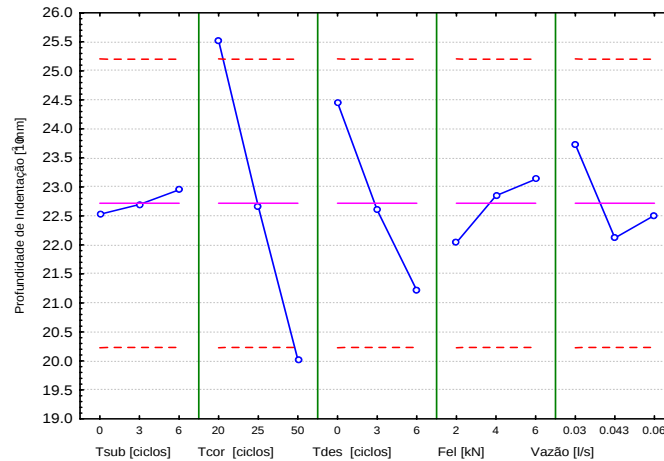


Figura 5. Efeito dos fatores sobre a indentação da configuração A.

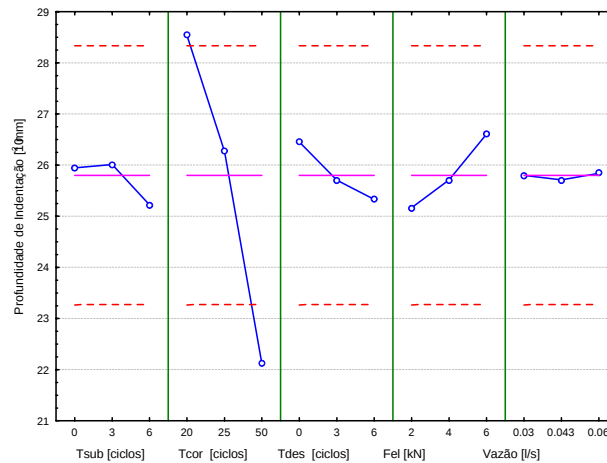


Figura 6. Efeito dos fatores sobre a indentação da configuração B.

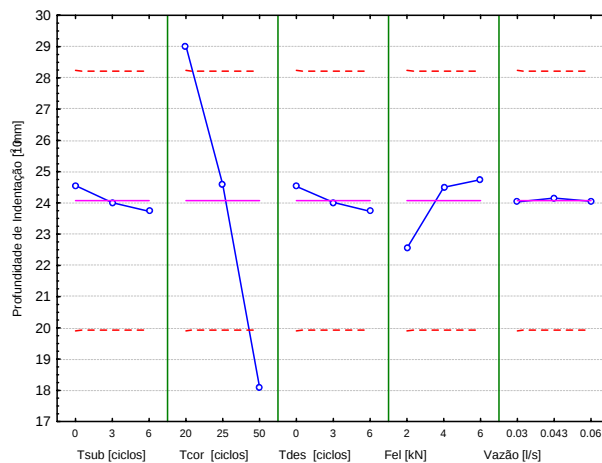


Figura 7. Efeito dos fatores sobre a indentação da configuração C.

### 3.2. Diâmetro do Ponto

Pela análise do gráfico de médias das Figuras 8, 9 e 10 (configurações A, B e C) é possível afirmar que o único fator que afeta significativamente o diâmetro do ponto de solda é Tempo de corrente ( $T_{cor}$ ), possuindo um efeito negativo. Este resultado remete às considerações e análises previamente feitas para a indentação, ou seja, para uma mesma energia de soldagem, o menor

tempo possível deve ser utilizado, o que implica na utilização de uma maior corrente de soldagem. Confirmando, assim, mais uma vez, a literatura técnica.

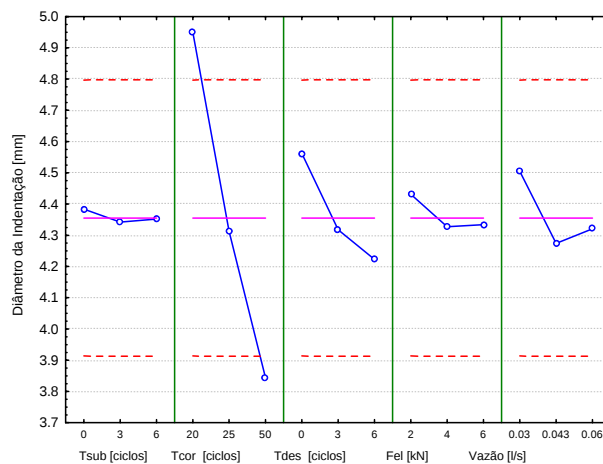


Figura 8. Efeito dos fatores sobre o diâmetro do ponto para a configuração A.

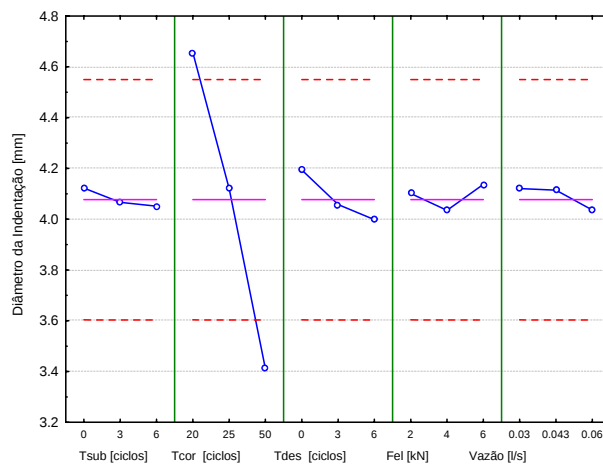


Figura 9. Efeito dos fatores sobre o diâmetro do ponto para a configuração B.

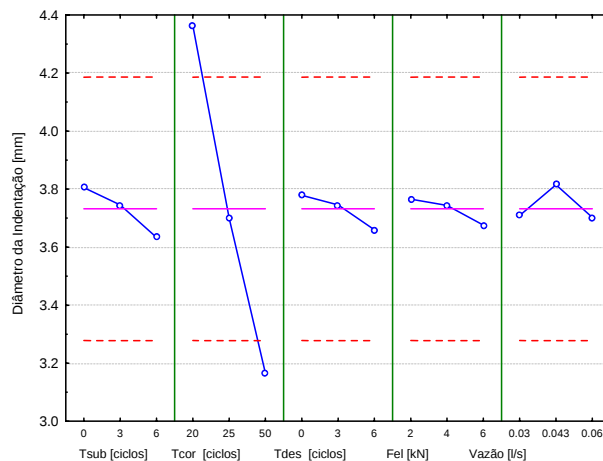


Figura 10. Efeito dos fatores sobre o diâmetro do ponto para a configuração C.

### 3.3. Resistência Mecânica

Pelas Figuras 11, 12, e 13 (configurações A, B e C), somente o  $T_{cor}$  foi significativo e com efeito negativo sobre a resistência mecânica. Semelhantemente aos casos estudados para a indentação e diâmetro do ponto. Neste sentido, quanto menor o tempo de corrente menor será o

efeito, proporcionando assim, soldas mais resistentes.

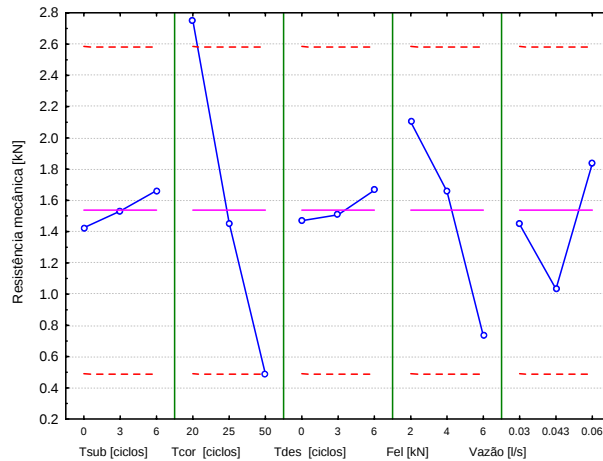


Figura 11. Efeito dos fatores sobre a resistência mecânica para a configuração A.

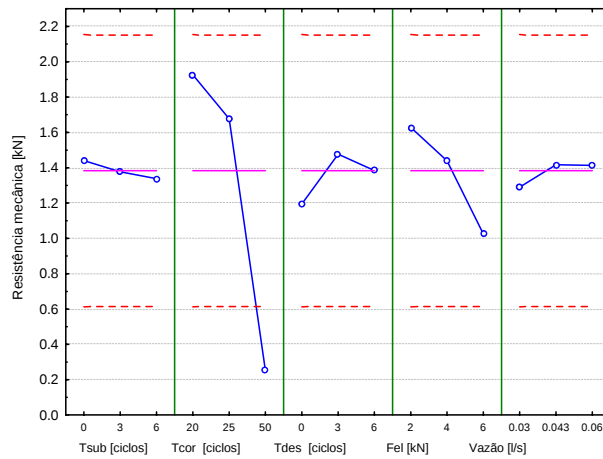


Figura 12. Efeito dos fatores sobre a resistência mecânica para a configuração B.

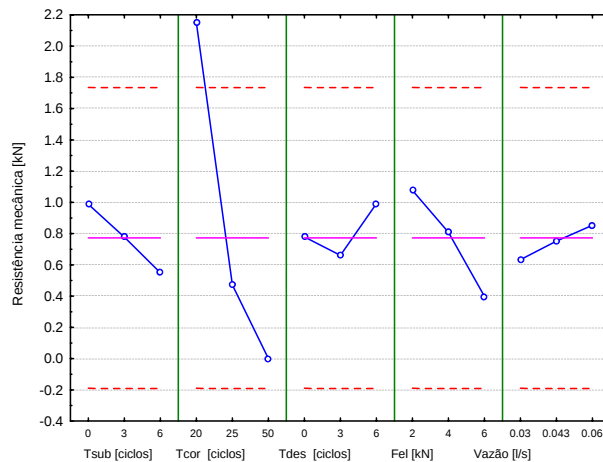


Figura 13. Efeito dos fatores sobre a resistência mecânica para a configuração C.

Nos gráficos das respostas (médias) apresentados, pode-se verificar que na indentação, diâmetro do ponto e resistência mecânica, o Tempo de corrente (Tcor) é o fator mais significativo para as três configurações de chapas galvanizadas estudadas. Este fator mostra ainda uma tendência negativa no processo, isto é, quando maior o valor do fator, menor é a resposta. Isto está explicado pela forma da análise do projeto: Método da Energia, onde a energia específica foi mantida constante. Para manter a energia específica constante (Equação 1) duas abordagens qualitativas podem ser seguidas:

a) Maior corrente de soldagem e menor tempo de corrente;

b) Menor corrente de soldagem e maior tempo de corrente.

Pelos resultados obtidos, a primeira opção se mostrou a melhor. Isto pode ser explicado pelo fato de que se alta corrente é aplicada em um tempo curto, o calor é concentrado no ponto de aplicação da corrente sem dar lugar à transferência de calor ao resto da peça, logo maior resposta será obtida. Como afirmado anteriormente, isto se verifica como na literatura prática de aplicação deste processo, que altas correntes e tempos curtos devem ser utilizados na soldagem a ponto por resistência.

#### **4. CONCLUSÕES**

O Planejamento Robusto (Taguchi) mostrou-se capaz de prever os efeitos dos parâmetros do processo sobre as respostas analisadas, onde se verificou que o tempo de corrente ( $T_{cor}$ ) é o fator mais significativo para as três configurações de chapas galvanizadas estudadas. Este fator mostra ainda uma tendência negativa no processo, isto quer dizer, quando maior o valor do fator, menor é a resposta. Isto está explicado pela forma da análise do projeto, Energia constante.

De forma metodológica e criteriosa, obteve-se, em conformidade com a literatura técnica, que altas correntes e tempos curtos devem ser utilizados na soldagem a ponto por resistência, para melhor robustez do processo.

#### **5. AGRADECIMENTOS**

Os autores gostariam agradecer ao CNPq, ao LAPROSOLDA, ao GRACO e aos programas de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UnB e da UFU.

#### **6. REFERÊNCIAS**

- AWS/SAE D8.9M, 2002, "Recommended Practices for Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials". International Standard Book Number: 0-87171-672-0. American Welding Society. 550 N. W. LeJeune Road, Miami, Florida 33126, Printed in the U.S.A.
- Barros Neto, B.; Scarminio, I.S. and Bruns, R.E., 2002, "Como Fazer Experimentos". 2º edição, Unicamp, 412p.
- Gedeon, S.A.; Schrock, D.; LaPointe, J., and Eagar, T. W., 1984, "Metallurgical and Process Variables Affecting the Resistance Spot Weldability of Galvanized Sheet Steels". Society of Automotive Engineers, Inc., pp. 1 – 9.
- Phadke, M. S., 1989, "Quality Engineering Using Robust Design". Prentice Hall, USA, 334p.
- Powell, H.J.; Westgate, S.A. and Wiemer, K., 1996, "A practical guide to process and quality control for resistance spot welding". The Welding Institute, Report nº 569/1996.
- Rivet, R. M., 1984, "Simple monitoring devices for resistance welding", The Welding Institute Research Bulletin, March, pp. 74 – 78.
- Senkara, J.; Zhang, H. and Hu, S. J., 2004, "Expulsion Prediction in Resistance Spot Welding", Welding Journal, 123s to 132s.
- Weber, G. and Preß, H., 1994, "Description of the electrical processes in the secondary circuit of resistance welding equipment", Welding in the World. Vol. 33, Nº 1, pp. 8-13.

#### **7. DIREITOS AUTORAIS**

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## ASSESSMENT OF GEOMETRY AND MECHANICAL RESISTANCE OF SPOT WELDS VIA ROBUST DESIGN

### **José Enrique Vargas Aures**

Dr. Candidate at University of Brasilia (GRACO) and Federal University of Uberlândia (LAPROSOLDA)  
jevargas@hotmail.com

### **Sadek C. Absi Alfaro**

Ph.D. Full Professor, University of Brasilia - DF, GRACO, Campus Darcy Ribeiro, 70910-900  
sadek@unb.br

### **Louriel O. Vilarinho**

Dr. Associate Professor, Federal University of Uberlândia - MG, LAPROSOLDA, Campus Santa Mônica, Bloco 1M, 38400-032  
vilarinho@mecanica.ufu.br

**Abstract:** *The Resistance Spot Welding (RSW) process is widely used in the automotive industry due to its high productivity (over 20 spots/minute) and good quality. However, the introduction of galvanized steel in the productions lines brought some difficulties concerning the correct welding parameter adjustment. Thus, this work aims to present a detailed study of the influence of the main process parameters (upslope, current and downslope times, electrode force and water flow) on the geometry and mechanical resistance of the spot in galvanized steel. For that, an experimental robust planning is considered (Taguchi) with the factors above mentioned, assessing the system robustness (analysis of the type reduction of the level signal/noise) whit regard to the diameter, indentation and resistance mechanics of the point (answers). The difference of this work from others is that instead of keeping a fixed current level as traditionally it is done, the process energy is kept the same (current versus time). It is concluded that is possible to achieve robust parameters for the system, where the parameter with statistic significance was the current time.*

**Keywords:** *Resistance Spot Welding, Statistical Techniques, Robust Design*