

# AVALIAÇÃO DE UM PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO UTILIZANDO UM PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL EM 3 NÍVEIS

**Márcio de Andrade Batista**

Eng.MSc.Universidade Federal de Uberlândia (Laprosolda), Campus Santa Mônica.

[engandrade10@gmail.com](mailto:engandrade10@gmail.com)

**Vinicius C. do Nascimento**

Eng.Universidade Federal de Uberlândia (Laprosolda), Campus Santa Mônica.

[vcnascimento@hotmail.com](mailto:vcnascimento@hotmail.com)

**Louriel O. Vilarinho**

Prof. Dr.Universidade Federal de Uberlândia (Laprosolda), Campus Santa Mônica.

[vilarinho@mecanica.ufu.br](mailto:vilarinho@mecanica.ufu.br)

**Resumo.** *O presente trabalho teve como objetivo estudar os seguintes parâmetros envolvidos no processo de soldagem a ponto por resistência: Tempo de soldagem, Intensidade de corrente e Intensidade de Força aplicada na ponta do eletrodo, utilizando-se um planejamento composto central em três níveis. A técnica de planejamento visou mostrar como os fatores estes três parâmetros influenciaram o diâmetro do ponto de soldagem. Uma das vantagens do Planejamento Composto Central (PCC) é que, por serem formados com três partes distintas, pode-se construí-los seqüencialmente, conforme a necessidade. Se a análise estiver acontecendo em uma região da superfície de resposta em que a curvatura não é importante, então não se precisa de um modelo quadrático, e pode-se ter uma análise significativa com apenas a parte fatorial do planejamento, com a qual pode-se ajustar um modelo linear e em seguida deslocar-se para a região de interesse da superfície de resposta. O PCC foi utilizado para verificar a existência de uma possível curvatura da função objetivo, ou seja, verificar a existência de termos não lineares no modelo de regressão, onde utilizou-se os ensaios dos pontos axiais e pôde-se testar a significância das curvaturas produzidas. Quando as variáveis críticas não são conhecidas é necessário aplicar um experimento varredura (screen experiment), que visa exatamente determinar quais são as variáveis mais importantes e que resultam em um melhor desempenho do processo. Com isso pôde-se concluir que em uma soldagem a ponto por resistência, a intensidade da corrente teve a maior importância para a dimensão do ponto formado no processo de soldagem.*

**Palavras Chave.** *Soldagem a ponto; Planejamento experimental; PCC.*

## 1. INTRODUÇÃO

Para o aperfeiçoamento de qualquer processo nas diversas áreas de pesquisa é necessária a realização de vários experimentos que formarão uma base do conhecimento sobre o assunto tratado, porém antes da realização dos mesmos torna-se imprescindível fazer um bom planejamento, com isso, segundo Calado e Montgomery ET al. [1], pode-se reduzir o tempo do processo, reduzir o custo operacional, melhorar o rendimento do processo, determinar parâmetros que melhor influenciam o desempenho dos produtos, entre outros.

Em Soldagem a Ponto por Resistência (SPR), ocorrem dificuldades na identificação dos principais fatores envolvidos no processo que irão interferir diretamente no ponto de solda realizado, como por exemplo, valores de corrente, força da pinça, tempo (ciclo) da corrente, tempo de subida da corrente, tempo de descida da corrente, vazão da água de resfriamento do eletrodo, dimensões da chapa (espessura), material e acabamento (conformação, revestimento, etc) da chapa entre outros.

O presente trabalho apresenta a utilização de três diferentes tipos de planejamento aplicado à Soldagem a Ponto por Resistência, levando em consideração os três principais parâmetros envolvidos no processo de união: a corrente, força da pinça, tempo (ciclo) de corrente e utilizando como resposta o diâmetro do ponto de soldagem realizado, visando a maximização a melhor configuração possível, para junção das chapas.

O primeiro planejamento, chamado Planejamento Fatorial ( $2^3$ ) em dois níveis com três fatores (três parâmetros de soldagem escolhidos) e que de acordo com Calado e Montgomery ET al [1] serve para os estágios iniciais de um trabalho experimental, quando existem muitas variáveis a serem determinadas. Este planejamento permite a combinação das variáveis em dois níveis, sendo possível analisar uma única variável interagindo com as demais variáveis em questão.

O segundo planejamento é o denominado Planejamento Composto Central (PCC) e que segundo AURES [2], é sem dúvida o mais popular planejamento de segunda ordem. Foi introduzido por Box e Wilson (1951).

De modo geral, um PCC para  $k$  fatores, devidamente codificados como  $(x_1, x_2, \dots, x_k)$ , é formado de três partes:

- 1 – Uma parte fatorial (ou cúbica);
- 2 – Uma parte axial (ou em estrela);
- 3 – Um total de números de ensaios realizados no ponto central.

O terceiro e último planejamento empregado nesse trabalho é o denominado função *Desirability* ou função Desejabilidade, onde os parâmetros de soldagem envolvidos são otimizados simultaneamente, obtendo-se assim uma resposta otimizada global do diâmetro do ponto de solda.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos ensaios, chapas de aço ABNT 1020, de dimensões: 20 mm de largura por 150 mm de comprimento e por 3/16” de espessura, foram preparadas para a realização dos pontos de solda. Suas superfícies foram limpas, isentas de óleos, graxas e poeiras, sendo também eliminadas as rebarbas de suas arestas.

Após as condições experimentais propostas pelos planejamentos estatísticos terem seus parâmetros definidos e ajustados no equipamento de soldagem, as chapas e a pinça foram dispostas e posicionadas conforme Figura 1.

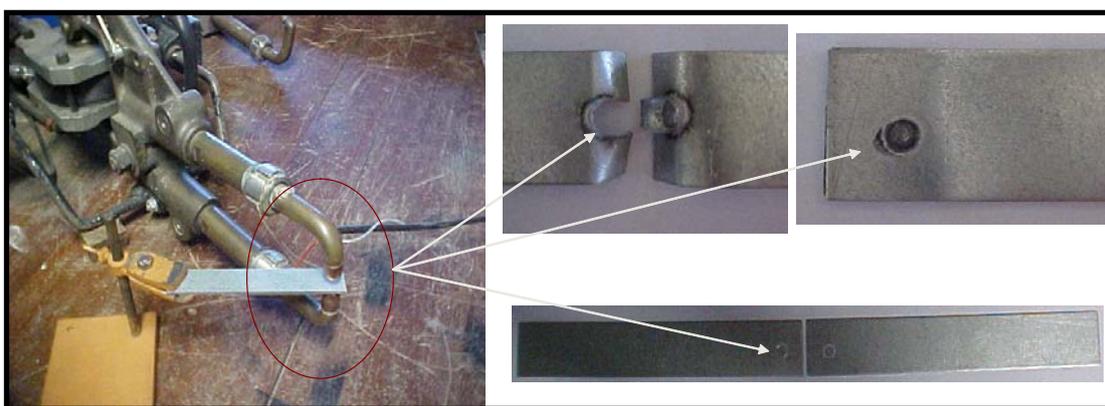


Figura 1 – Disposição das chapas para a realização dos pontos de solda.

As condições experimentais utilizadas nos ensaios são apresentadas a seguir na Tabela 1. Após a realização dos pontos de solda, as chapas foram separadas por ação mecânica e o diâmetro do ponto de solda foi quantificado conforme proposto pelas normas técnicas (AWS-SAED8-9M).

Seus valores foram tabulados e submetidos à análise estatística no *software* comercial *Statistica* 6.0<sup>®</sup>.

Tabela 1 – Níveis de operação para os planejamentos estatísticos propostos: PCC

Parâmetros	Níveis de operação dos planejamentos				
	- $\alpha$	- 1	0	+1	+ $\alpha$
Tempo da corrente (ciclos)	19,8	26,0	35,0	44,0	50,1
Força da pinça (kN)	2,0	2,80	4,00	5,20	6,0
Faixa de Corrente (kA)	2,0	3,0	4,50	6,0	7,0

A análise para otimização de parâmetros foi realizada via função *Desirability* e é apresentada na Figura 6, bem como o valor de *Desirability* global.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios foram realizados em ordem aleatória, conforme metodologia proposta por Barros ET al [3] e os resultados do diâmetro final de cada ensaio é apresentado como a média das três replicas realizadas.

Na Tabela 2, são apresentados os resultados obtidos tanto no planejamento tipo 2 níveis como no PCC. Cabe destacar que o objeto dos planejamentos foi identificar uma região experimental e/ou um ponto experimental que apresentasse o melhor valor possível de diâmetro.

Tabela 2- Resultados obtidos nos planejamentos com a média das três replicas realizadas.

Ensaio	Tempo da corrente	Pressão da pinça	Faixa de Corrente	Diâmetro médio
1	35,0	4,0	4,5	1,44
2	35,0	4,0	4,5	1,40
3	44,0	2,8	3,0	* 0
4	26,0	2,8	3,0	* 0
5	26,0	5,2	3,0	* 0
6	26,0	5,2	6,0	4,10
7	44,0	5,2	6,0	4,78
8	26,0	2,8	6,0	4,89
9	44,0	2,8	6,0	5,25
10	44,0	5,2	3,0	* 0
11	19,8	4,0	4,5	* 0
12	50,1	4,0	4,5	2,05
13	35,0	6,0	4,5	* 0
14	35,0	2,0	4,5	3,5
15	35,0	4,0	2,0	* 0
16	35,0	4,0	7,0	4,75

\* Os valores iguais a 0 são valores onde não ocorreu a união das chapas.

Em alguns ensaios os níveis de operação dos fatores não apresentaram uma combinação adequada e assim não foi possível realizar a união das chapas. Nessas condições experimentais a ausência do ponto de solda foi admitida com valor igual à zero.

Para os planejamentos propostos, foi possível identificar com um nível de confiança de 95%, que apenas os valores de correntes apresentam significância estatística, dentro do intervalo de confiança estudado. Tanto o PCC, quanto o planejamento 2<sup>3</sup>, apresentaram valores de coeficiente de correlação superior a 99%, mostrando assim uma capacidade do modelo estatístico em prever valores de diâmetro dentro da região avaliada e apresentada na Figura 2. Destaca-se ainda na Figura 2 que os valores de diâmetro menores que zero regiões experimentais proibitivas, não existindo sentido físico em valores de diâmetro negativos.

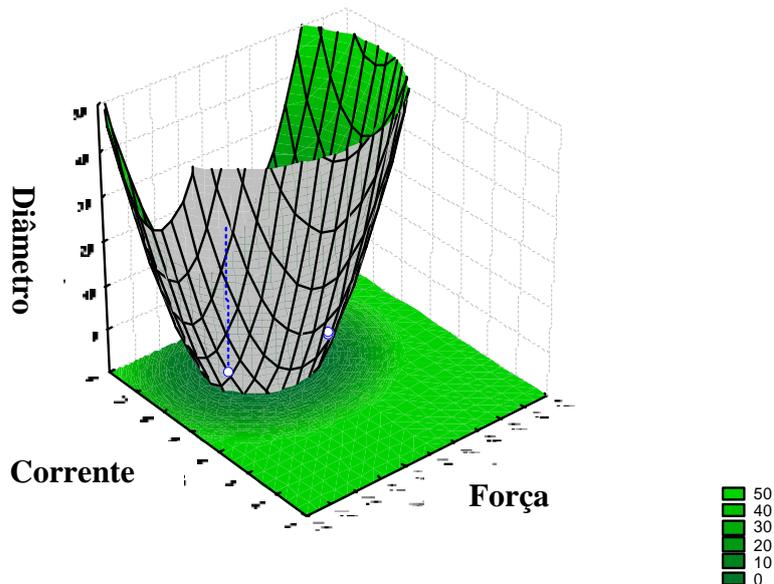


Figura 2 - Superfície da região de estudo para o planejamento PCC

Para uma melhor visualização dos valores numéricos (Ver Tabela2), a Figura 3 mostra a curva de nível da Figura 2, onde os pontos destacados em preto mostram os ensaios realizados. O de número 1 foi o maior diâmetro obtido na faixa de estudo.

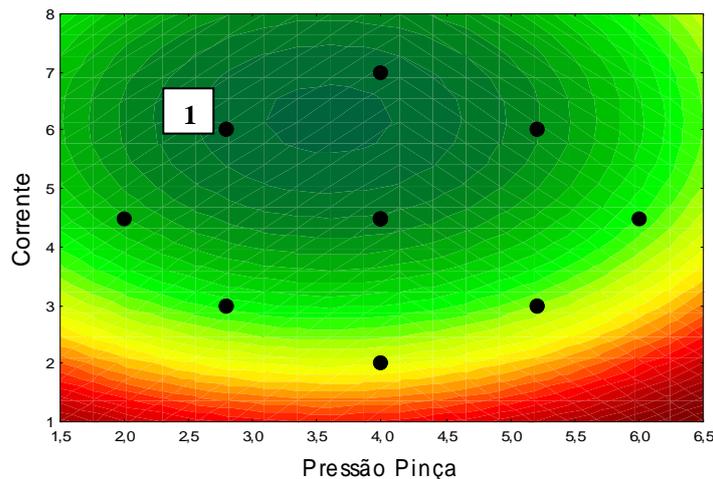


Figura 3 - Curva de nível da região de estudo para o planejamento PCC.

A Figura 4 mostra o gráfico de Pareto para o planejamento tipo PCC, onde os índices L e Q entre parêntese são os efeitos Lineares e Quadráticos para os ensaios, respectivamente. Pela análise de Pareto, é possível verificar que efeitos quadráticos da pressão da pinça, corrente e ciclo, foram os mais significativos na região de estudo e com efeitos lineares a corrente teve o maior efeito entre todos.

Para verificar a distribuição normal dos resíduos e garantir a não existência de erros experimentais sistemáticos, foi plotado o gráfico de valores normais esperados em função do valor residual, conforme mostrado na Figura 5.

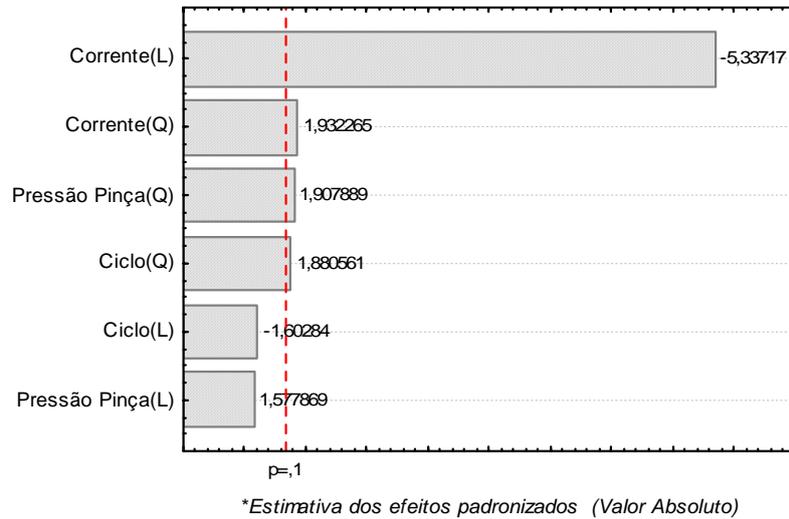


Figura 4 – Gráfico de Pareto e os efeitos Lineares e quadráticos.

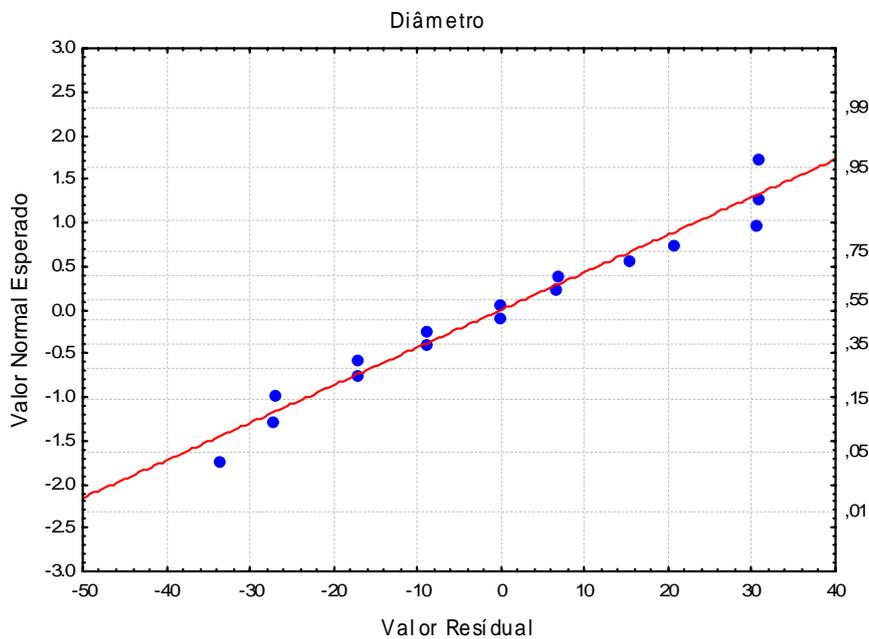


Figura 5 - Distribuição Normal dos resíduos para os ensaios realizados

Para verificar quais os valores otimizados dos fatores em estudo foi realizado um estudo via função *Desirability* e foi possível verificar que para obter-se o máximo valor da *Desirability* global igual a um, temos que operar os fatores ciclo, pressão da pinça e corrente, em: 22,073 ciclos , 6 kN e 7 kA, respectivamente (Figura 6).

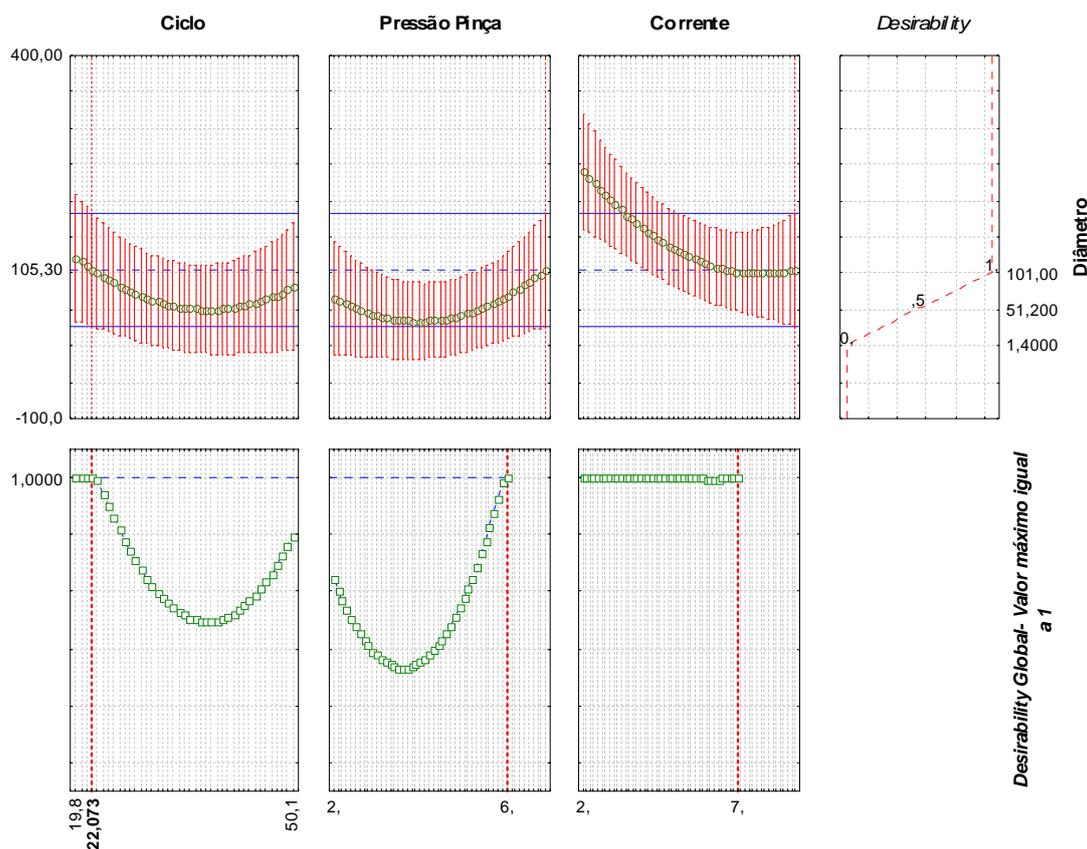


Figura 6 - Perfil para valores preditos e Desirability global para os ensaios realizados.

#### 4. CONCLUSÃO

De modo geral as principais conclusões que foram obtidas a partir dos ensaios experimentais foram:

- Não se verificou interação entre os fatores (parâmetros de soldagem) estudados, Corrente, Tempo de Solda e Pressão da Pinça;
- A análise de Pareto identificou como fator mais relevante no processo de formação do ponto de solda, o fator Corrente;
- Tantos os efeitos lineares e quadráticos da corrente foram significativos no nível de confiança de 90%;
- A função Desirability identificou como valores ótimos para os parâmetros de formação do ponto de solda: ciclo (Tempo de Solda), força da pinça e corrente, em 22,073 ciclos, 6 KN e 7 KA, respectivamente.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

[1] CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C. (2003) Planejamento de Experimentos Usando o Statistica. 1ª Edição, Rio de Janeiro, 260p.

[2] AURES, J. E. V. (2006) Estudo da Formação, Geometria e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistência: uma Abordagem Estatística. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília.

[3] BARROS NETO, B., SCARMINIO, I. S. e BRUNS, R. E. (2002) *Como Fazer Experimentos*. 2º edição, Unicamp, 412 p.

[4] 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.

[5] GUEDES, J. B. P., (2004). *Uma Contribuição ao Estudo da Soldabilidade de Aços Galvanizados pelo Processo Solda a Ponto por Resistência*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG.

## **ASSESSMENT OF RESISTANCE SPOT WELDING PROCESS BY USING A CENTRAL COMPOSITE DESIGN WITH 3 LEVELS**

**Márcio de Andrade Batista**

Eng. MSc, Universidade Federal de Uberlândia (Laprosolda), Campus Santa Mônica.  
[engandrade10@gmail.com](mailto:engandrade10@gmail.com)

**Vinicius C. do Nascimento**

Eng. Universidade Federal de Uberlândia (Laprosolda), Campus Santa Mônica.  
[vcnascimento@hotmail.com](mailto:vcnascimento@hotmail.com)

**Louriel O. Vilarinho**

Prof. Dr. Universidade Federal de Uberlândia (Laprosolda), Campus Santa Mônica.  
[vilarinho@mecanica.ufu.br](mailto:vilarinho@mecanica.ufu.br)

**Abstract.** *This work aims to study the following parameters from the Resistance Welding Process (RSW): Welding time, Current intensity and Force applied on the electrode tip, by using a Central Composite Design (CCD) with three levels. This design technique aimed to show how these three parameters influences the spot diameter. One of the advantages of the CCD is that it can be built sequentially according to certain needs, since it is formed by three distinct parts. If the analysis happens in a specific region of the response surface, where the curvature is not important, than the whole quadratic model is no longer necessary and the factorial part of the design can provide a significative analysis. Therefore a linear model can be adjusted and a forward movement in the interest region of the surface response can be made. The CCD has been used to assess the existence of a possible curvature in the objective function, i.e., to assess the presence of non-linear terms in the regression model by using the axial points to verify the curvature significance. When the critical variables are not known, it is necessary to apply a screen experiment that aims to determine which variables are the most important an result in a better process performance. It can be concluded that in a RSW, the welding current has the most importance for the spot size.*

**Keywords.** *Resistance Spot Welding; Experimental Design; CCD.*