OTIMIZAÇÃO NO PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA NO POLO DE DUAS RODAS ATRAVÉS DO MÉTODO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Thiago Batista de Oliveira [1] (thiagooliveira.0360@gmail.com), Jeniffer Brito de Andrade [1] (jenifferandrade91@gmail.com), Rubelmar Maia de Azevedo Cruz Neto [2] (rcruzneto@uea.edu.br), João D'Anuzio Lima de Azevedo [2] (jdlazevedo@uea.edu.br)

[1] Centro Universitário Luterano de Manaus (CEULM-ULBRA)

[2] Universidade do Estado do Amazonas (UEA); Departamento de Engenharia Mecânica

RESUMO: *A utilização da modelagem e simulação para análise e otimização de problemas de processos tem se tornado cada vez mais importante devido ao crescimento e a complexidade dos sistemas e custos computacionais menores. A partir dessas otimizações de processos as indústrias obtém produtos de alta qualidade, custo menores com retrabalhos e maiores margens de lucros. Diante deste contexto, o presente trabalho apresenta a otimização de parâmetros técnicos do processo de soldagem a ponto de uma indústria do polo de duas rodas. E para isso foi realizado um planejamento fatorial completo e uma triagem das variáveis além dos ensaios de tração. Em seguida aplicou-se a metodologia de superfície de resposta (MSR) com o auxílio do software Minitab®. Os resultados mostraram que através do planejamento fatorial foi possível realizar de forma ordenada as análises das variáveis que influenciam o processo, os efeitos e resposta se mostraram não lineares. O diagrama de Pareto mostrou que o fenômeno depende exclusivamente da corrente elétrica de modo não linear. A corrente possui uma significância acima de 90% nos testes realizados. A metodologia de Superfície de resposta (MSR) trouxe uma análise detalhada de cada parâmetro, de forma individual e combinada.*

PALAVRAS-CHAVE: *solda ponto, otimização, variáveis*

OPTIMIZATION OF THE RESISTANCE POINT WELDING PROCESS ON THE TWO-WHEEL POLE THROUGH THE RESPONSE SURFACE METHOD

ABSTRACT: *The use of modeling and simulation for analysis and optimization of process problems has become increasingly important due to the growth and complexity of systems and lower computational costs. From these process optimizations, industries obtain high quality products, lower costs with rework and higher profit margins. Given this context, the present work presents the optimization of technical parameters of the spot welding process of a two-wheel pole industry. And for that, a complete factorial design and a screening of the variables were carried out.111 Then, the response surface methodology (MSR) was applied with the help of Minitab® software to determine the best parameters for the process. The results showed that through the factorial design, it was possible to carry out the analyzes of the variables that influence the process in an orderly way, the effects and response were non-linear. From the Pareto diagrams, the phenomenon depends exclusively on the electric current in a non-linear way. The current has a significance above 90% in the tests performed. The Response Surface (MSR) methodology brought a detailed analysis of each parameter, individually and combined*

KEYWORDS: *spot welding, optimization, variables*

1. INTRODUÇÃO

A soldagem é o processo de união de metais mais utilizado industrialmente. Este método de união juntamente com a brasagem tem importante aplicação desde a indústria microeletrônica até a fabricação de navios e outras estruturas simples, como grades e portões, assim como em componentes encontrados em aplicações com elevado grau de responsabilidade, como nas indústrias química, petrolífera e nuclear e também na criação de peças de artesanato, joias e de outros objetos de arte (Marques *et al.* 2009).

Esse processo também é muito utilizado na indústria automobilística principalmente na fabricação de peças internas como chassis, garfos e tanques de combustíveis de motos e carros, pois oferece alta produtividade e tem um custo operacional baixo quando comparado com outras técnicas de soldagem (Christofoletti, 2013).

Na soldagem por resistência elétrica as peças a serem soldadas são pressionadas uma contra outra, por meio de eletrodos não consumíveis, onde passa uma alta corrente que produz segundo a lei de Joule uma quantidade de calor proporcional ao tempo, resistência elétrica e intensidade de corrente que deverá ser suficiente para permitir que a região de contato entre as peças a serem soldadas atinja o ponto de fusão (Bracarense, 2000).

Apesar desse processo de soldagem ser muito utilizado na indústria em algum momento ele vai apresentar problemas mecânicos, erros operacionais e erros de parâmetros técnicos que vão ocasionar falhas em pontos de união nas peças impactando na qualidade do produto final.

As falhas de parametrização técnica que ocorrem no processo produtivo podem ser evitadas através de uma otimização que permita uma estabilização. Essa otimização pode ser realizada a partir de modelagens e simulações de parâmetros de entrada no processo de solda. Determinando a parametrização mais adequada de entrada é possível garantir a qualidade da solda da peça final.

A metodologia de superfícies de respostas (MSR) vem sendo muito aplicada devido sua eficiência, poder de modelagem e capacidade de exploração dos sistemas estudados. A MSR é uma combinação de técnicas de planejamento e experimentos, análise de regressão e métodos de otimização que se baseia no ajuste de modelos matemáticos empíricos aos dados experimentais obtidos segundo uma determinada matriz experimental com o objetivo de descrever o comportamento destes dados e fazer previsões estatisticamente válidas (Hanrahan e Lu, 2006).

1.1 Objetivos

Este artigo descreve a otimização de parâmetros técnicos do processo de soldagem a ponto de uma indústria do polo de duas rodas utilizando a ferramenta de superfície de resposta (MSR). Para alcançar esse objetivo foi realizado primeiramente um planejamento fatorial com as variáveis de entrada para obter os resultados de saída. Em seguida foi realizada uma triagem das variáveis que

mais influenciavam nos resultados de resistência a tração. Após o delineamento foi utilizado um modelo matemático utilizando os resultados anteriores para obtenção das medições gerais dos experimentos. Com as medições estabelecidas utilizou-se a metodologia de superfície de resposta (MSR) e o auxílio do software Minitab® para determinar os melhores parâmetros para o processo. Para validação dos dados foi realizado os ensaios de tração.

1.2 Justificativa

A principal vantagem da metodologia de superfície de resposta é que seus resultados são resistentes aos impactos de condições não ideais, como erros aleatórios e pontos influentes porque a metodologia é robusta. Após o ajuste do modelo aos dados é possível estimar a sensibilidade da resposta aos fatores, além de determinar os níveis dos fatores nos quais as respostas é ótima (Cecon e Silva, 2011). A utilização da modelagem e simulação para análise e otimização de problemas de processos tem se tornado cada vez mais importante devido ao crescimento e a complexidade dos sistemas e custos computacionais menores (Secchi,1995). Sendo assim, a otimização pode satisfazer o competitivo mercado com produtos de alta qualidade, diminuindo custo com retrabalhos e aumentando a margem de lucros das empresas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida com base no processo de soldagem por pontos de uma indústria do polo de duas que acontece através de uma linha de produção sequencial. As peças estampadas são posicionadas em uma esteira em cima de uma bancada onde cada operador é responsável por uma etapa do processo. Cada ponteadeira (máquina de solda a ponto) é programada através de uma "folha de processo" elaborada pela equipe de engenharia industrial. Nessa folha de processo contém os valores de parâmetros que são imputados em cada máquina que devem ser seguidos pelos operadores.

2.1 Fatores (variáveis de entrada)

Os fatores de entrada no processo de soldagem a ponto foram escolhidos com base nos parâmetros que já se utiliza nesta indústria conforme descritos na Tabela 1.

TABELA 1. Parâmetros de entrada atuais e variados na ponteadeira.

Parâmetros de Entrada	Parâmetros atuais	Parâmetros variados
Corrente (kA)	7,0 ± 0,1	6 e 8
Tempo de solda (ms)	15	12 e 16
Força do eletrodo (kgf)	200	180 e 200

Fonte: Autor (2022).

Esses fatores influenciam diretamente no resultado de resistência a tração da soldagem por pontos. Se um desses fatores oscilar ou ser mal atribuído ao processo, a qualidade da soldagem apresentará desvios como trincas, quebras e rupturas na junção soldada. A corrente de solda é a força elétrica que aquece os materiais no momento da soldagem, caso apresente um valor muito alto ou baixo, pode acarretar uma solda frágil ou até mesmo deformação no material em um caso de alto valor da corrente.

O tempo de solda é o momento em que os eletrodos estão em contato com as peças que estão sendo soldadas. Se o tempo for muito curto, pode levar a uma soldagem de baixa fusão, em outras palavras, pode não realizar a "liga" necessária para a fusão dos materiais envolvidos. Por fim, o último fator escolhido para esse estudo, foi a Força dos Eletrodos, que é pressão realizada entre os eletrodos e as peças. A pressão deve ser bem calculada, pois se muito alta nos leva ao problema de indentação, que é uma deformação de relevo na peça devido a uma pressão excessiva dos eletrodos.

2.2 Planejamento fatorial 2^3

Para determinar a influência das variáveis de entrada do processo sobre as variáveis de saída foi escolhido o planejamento fatorial completo, onde 3 são as variáveis controladas pelo experimento e 2 é o número de níveis.

Após essa determinação foi elaborada uma tabela no programa Excel ® dispondo a quantidade dos experimentos com os parâmetros de corrente de solda, tempo de solda e força dos eletrodos. A variável de saída do sistema a ser otimizada é a resistência à tração.

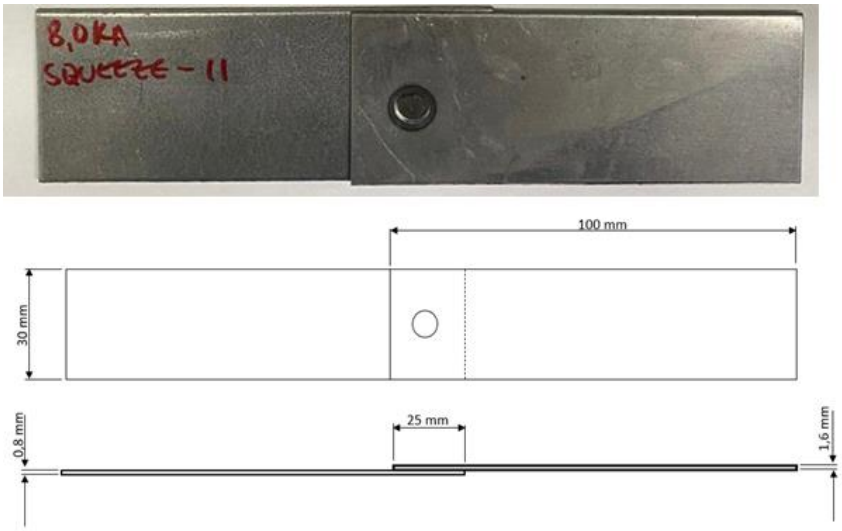
O modelo matemático utilizado para obtenção das medições gerais dos experimentos está escrito na Equação 1.

$$y = A + B + C + AB + AC + BC + AC + \in \quad (1)$$

2.3 Teste de soldagem

Com base no planejamento fatorial completo e a quantidade de experimentos estabelecidos os testes de soldagem foram iniciados na ponteadeira. No qual utilizou-se duas chapas de aço galvanizado sendo uma com espessura de 0.8 e a outra de 1,6 mm com dimensões de 100x30 conforme mostrado na Figura 1.

FIGURA 1. Amostra padronizada.



Fonte: Autor (2022).

2.4 Ensaio de tração

A fim de entender o efeito das variáveis de processo na qualidade da solda e controlar o processo de soldagem foi realizado o teste de tração com o objetivo de obter os resultados de resistência à tração nos corpos de prova. O equipamento utilizado foi o dinamômetro da marca Shimadzu modelo AG-IS 100 kN. Os resultados obtidos serão comparados com o padrão de 2000 Newton conforme padrão estabelecido pela indústria.

2.5 Metodologia de superfície de resposta (MSR)

Para o tratamento dos dados foi utilizada a metodologia de superfície de resposta (MSR) que une técnicas matemáticas e estatísticas para modelar e analisar os problemas nos quais a variável resposta é influenciada por vários fatores, tendo como objetivo a otimização dessa resposta. A técnica aplicada foi à análise de regressão que modela e investiga a relação entre dois ou mais atributos (variáveis aleatórias). Ela permite construir um modelo matemático que represente dois atributos X e Y. Nesse estudo foi utilizada a regressão múltipla, onde existe apenas uma variável de saída (*y*) e várias de entrada como, por exemplo: y = *f* (*X1, X2..., Xp).*

2.6 Software estatístico Minitab®

O software estatístico Minitab® foi utilizado em conjunto com o MSR para relacionar de forma eficiente e rápida um conjunto de respostas. Essa ferramenta usa estatística básica, análises de regressão que elabora estudos estatísticos descritivos, aplicando testes de hipóteses conferindo

intervalos de confiança e testes de normalidade, além disso, oferece gráficos visuais a fim de aumentar a concepção de efeitos em experimentos, bem como respostas e fatoriais em geral.

3. RESULTADOS

3.1 Planejamento fatorial e os ensaios de tração

A partir do planejamento fatorial 2^3 foi possível verificar os efeitos das variações dos parâmetros assim como os resultados dos ensaios de tração conforme a Tabela 2.

TABELA 2. Matriz do planejamento fatorial 2^3 com pontos centrais.

Nº exp.	*Corrente I - (kA)*	*Codificado*	*Tempo t - (ms)*	*Codificado*	*Força do eletrodo (kgf)*	*Codificado*	*Resistência á tração (N)*
1	6	(-1)	12 (-1)	(-1)	180 (-1)	(-1)	2270
2	8	(1)	12 (-1)	(-1)	180 (-1)	(-1)	3364
3	6	(-1)	16 (1)	(1)	180 (-1)	(-1)	2631
4	8	(1)	16 (1)	(1)	180 (-1)	(-1)	3443
5	6	(-1)	12 (-1)	(-1)	200 (1)	(1)	2989
6	8	(1)	12 (-1)	(-1)	200 (1)	(1)	3515
7	6	(-1)	16 (1)	(1)	200 (1)	(1)	2625
8	8	(1)	16 (1)	(1)	200 (1)	(1)	3554
9	7	0	14	0	190	0	4339
10	7	0	14	0	190	0	4332
11	7	0	14	0	190	0	4302

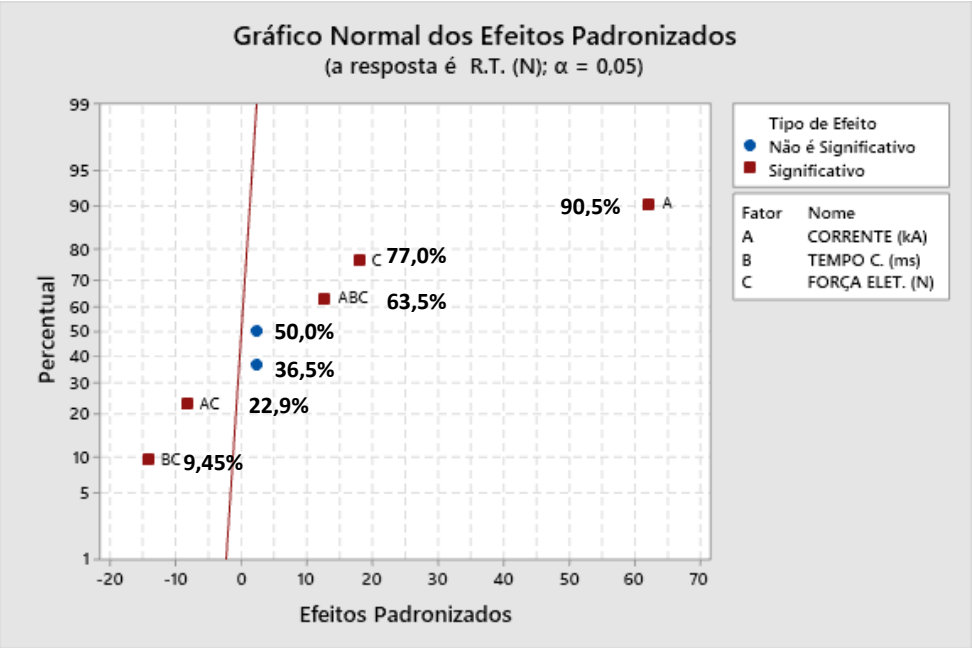
Fonte: Autor (2022).

Como resultado dos ensaios de tração verificou-se que todas as amostras ficaram acima do valor estabelecido de 2000 Newtons. Sendo o menor valor encontrado 2270 N. Além disso, foi observado que todas as peças usadas para a amostragem foram unidas pelo processo de soldagem. O planejamento fatorial possibilitou que não houvesse repetição de nenhuma combinação de parâmetros. E o ponto central do planejamento fatorial 2^3 foi analisado três vezes para encontrar os maiores valores de resistência à tração.

3.2 Aplicação do método de superfície de resposta

A aplicação do método de superfície de resposta aprofundou as relações entre as variáveis, descrevendo como elas afetam as respostas e determinam as inter-relações entre as variáveis e seus efeitos combinados. A Figura 2 mostra o gráfico gerado pelo software Minitab®.

FIGURA 2. Efeitos padronizados de significância.



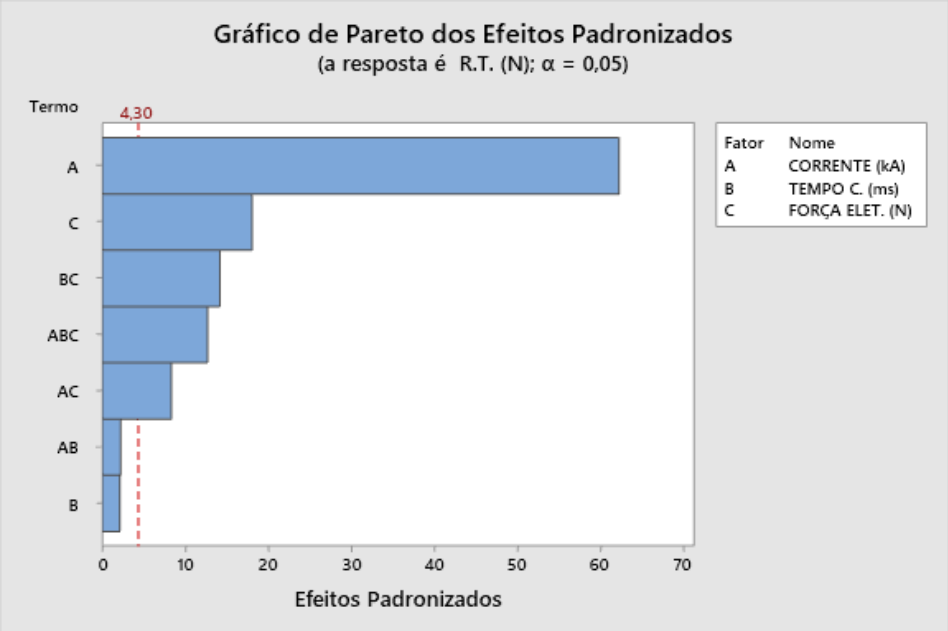
Fonte: Autor (2022).

O gráfico mostra a sequência das variáveis que mais influenciam nas análises:(A) = corrente (kA) → Percentual de 90,5% de influência no resultado, (C) = força do eletrodo (N) → Percentual de 77% de influência no resultado e (ABC) = corrente, tempo, força (interações)→ Percentual de 63,5% de influência.

Já as que menos influenciam são:(AC) = corrente, força do eletrodo (interações)→ Percentual de 22,9% de influência e (BC) = tempo, força eletrodo (interações) → Percentual de 9,45% de influência.

Analisando o gráfico de Pareto da Figura 3 percebe-se que a corrente é a variável que mais influência no planejamento em busca do parâmetro otimizado. O planejamento fatorial nos traz as seguintes análises: o tempo (B) é a variável que menos influencia na casa acima dos 50% de significância.

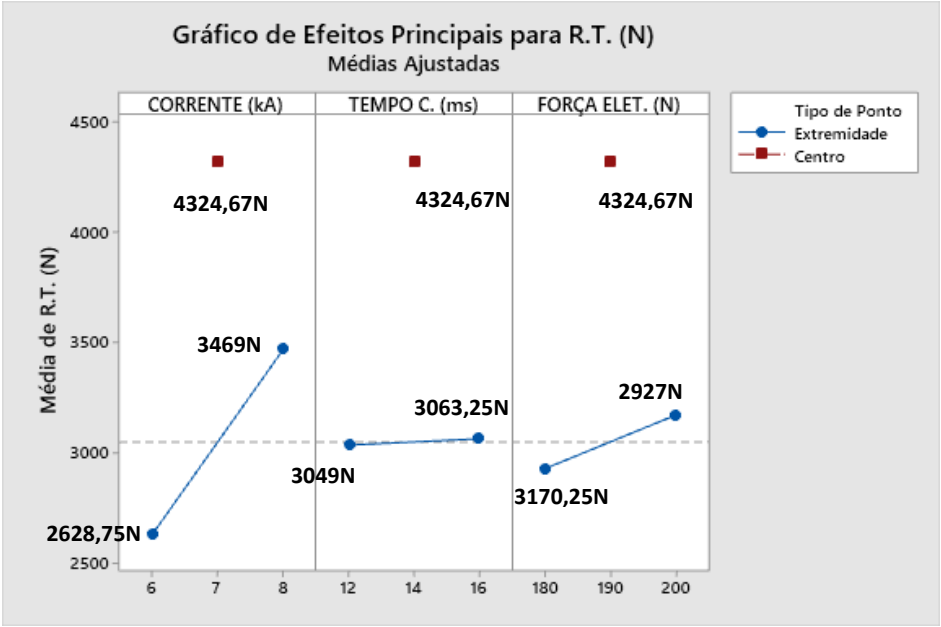
FIGURA 3. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados.



Fonte: Autor (2022).

Avaliando o gráfico da Figura 4 sobre os efeitos padronizados de resistência a tração, de imediato percebe-se uma não-linearidade nos resultados máximo e mínimo. Os valores centrais obtiveram as maiores médias de resistência à tração em relação aos pontos máximo e mínimo. Os pontos centrais entram como foco no planejamento fatorial a partir da análise de que foi obtido os maiores valores de resistência mecânica.

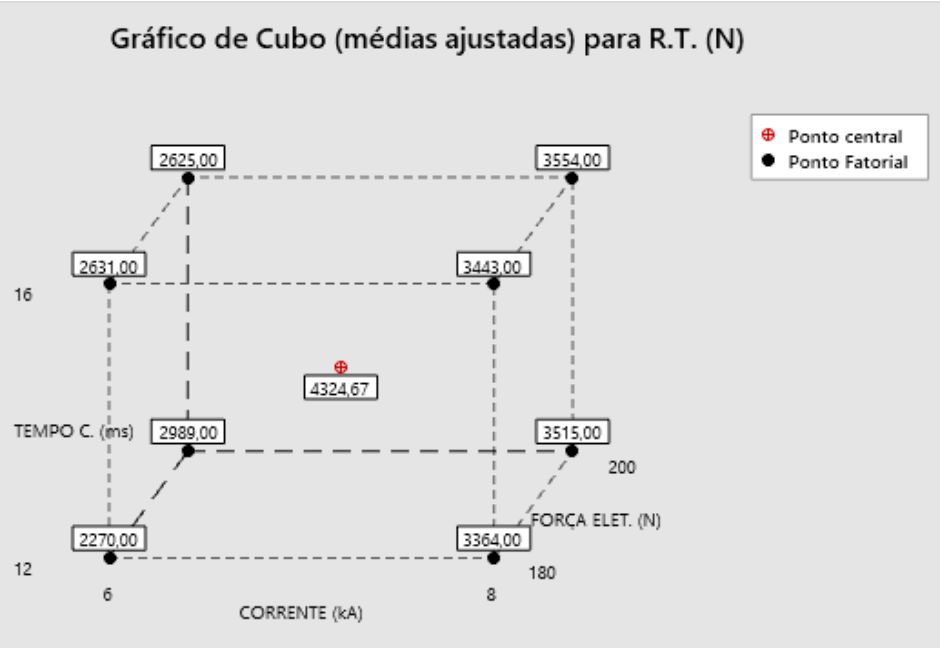
FIGURA 4. Efeitos padronizados resistência à tração.



Fonte: Autor (2022).

Portanto, esse planejamento permitiu estimar 3 efeitos principais, 3 efeitos de interações de segunda ordem, podendo utilizar uma representação geométrica (um cubo), onde cada dimensão representa um fator conforme observado na Figura 5.

FIGURA 5. Representação geométrica resistência à tração.



Fonte: Autor (2022).

A solução do planejamento fatorial aplicando a metodologia de superfície de resposta demostrou que o valor otimizado se encontra próximo dos pontos centrais das variáveis conforme visto na Tabela 3.

TABELA 3. Resultados dos parâmetros otimizados pelo MSR.

Solução	Corrente (kA)	Tempo (ms)	Força (N)	Resistência á Tração (N)
1	7	14	190	4324,67

Fonte: Autor (2022).

3.3 Delineamento Minitab®

A partir do planejamento fatorial 2^3 foi possível verificar os efeitos das variações dos parâmetros. Nesta etapa final, foi feito pontos compostos com base na solução da tabela 4.

TABELA 4. Matriz do planejamento com ponto central composto.

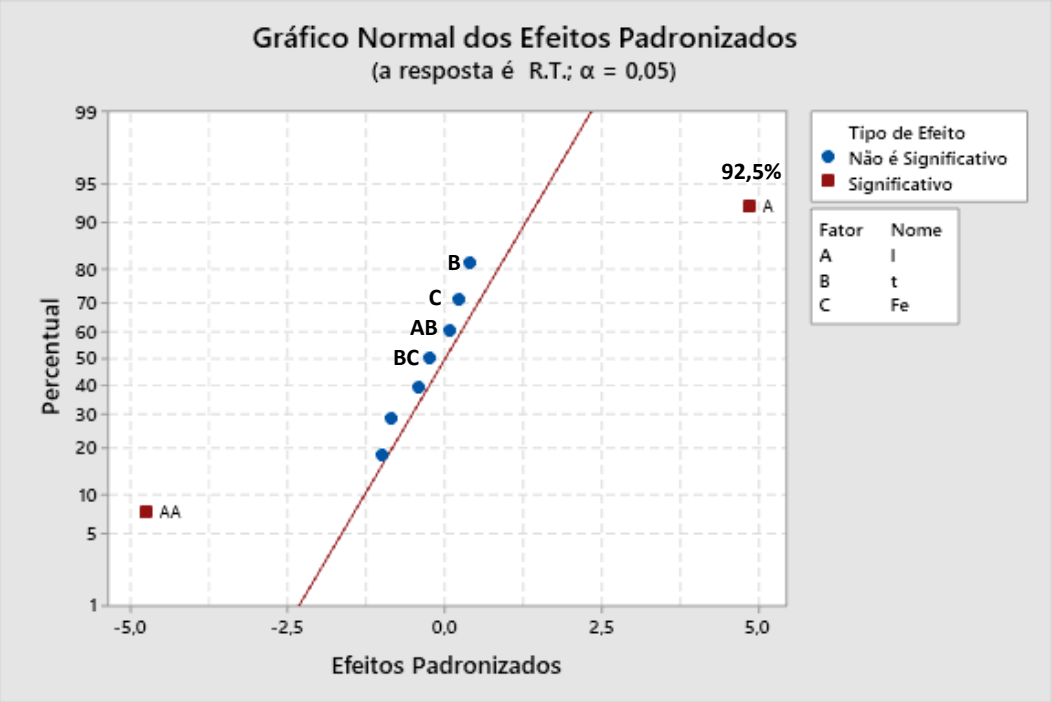
Nº exp.	Corrente I - (kA)	Tempo t - (ms)	Força do eletrodo (kgf)	Resultado de Resistência a tração (N)
1	6	12	180	**2270**
2	8	12	180	**3364**
3	6	16	180	**2631**
4	8	16	180	**3443**
5	6	12	200	**2989**
6	8	12	200	**3515**
7	6	16	200	**2625**
8	8	16	200	**3554**
9	5,3	14	190	50
10	8,68	14	190	**4642**
11	7	10,6	190	**3853**
12	7	17,3	190	**4301**
13	7	14	173,2	**4295**
14	7	14	206,8	**3995**
15	7	14	190	**4339**
16	7	14	190	**4332**
17	7	14	190	**4303**
18	7	14	190	**4267**
19	7	14	190	**4220**
20	7	14	190	**4258**

Fonte: Autor (2022).

Analisando os resultados após os testes de tração chegou-se as seguintes conclusões: os experimentos 9 e 10 tiveram resultados altamente opostos devido a variação somente da corrente elétrica, os experimentos 11 e 12 tiveram resultados com significância próximas, alterando apenas o tempo de solda e os experimentos 13 e 14 tiveram resultados similares aos experimentos 11 e 12, alterando apenas a força dos eletrodos.

Analisando os efeitos de cada fenômeno a Corrente Elétrica (A) é a variável mais significante em relação aos demais parâmetros: tempo (B) e força de solda (C). O MSR reforça o que os resultados da primeira rodada nos trouxe uma significância acima de 90%, o planejamento fatorial Corrente (A) de 90,5% e MSR Corrente (A) – 92,5% conforme mostrado na Figura 5 dos efeitos padronizados de significância.

FIGURA 5. Efeitos padronizados de significância.



Fonte: Autor (2022).

A solução final aplicando a metodologia de superfície de resposta demostrou os seguintes valores otimizados conforme descritos na Tabela 6.

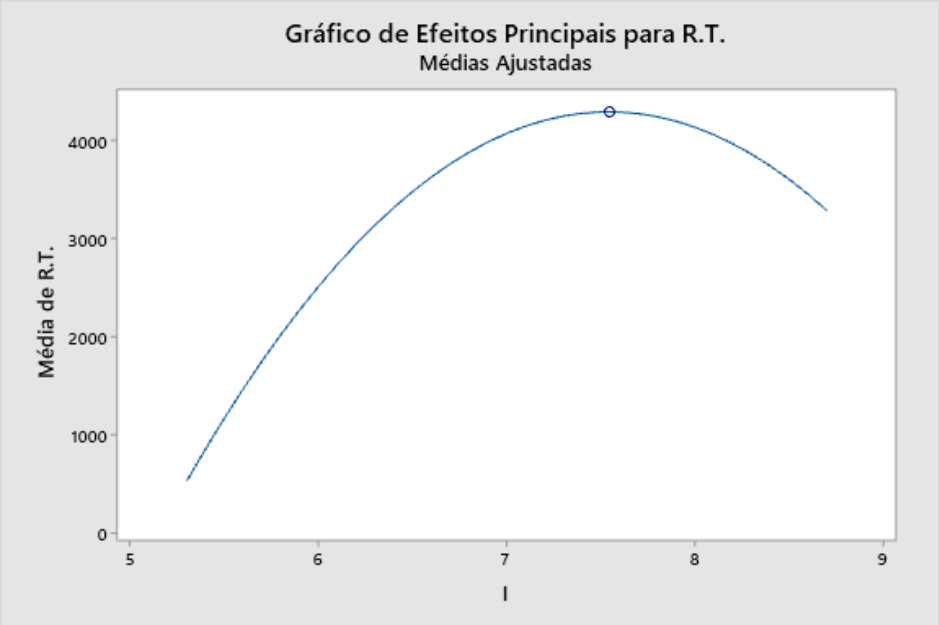
TABELA 6. Resultado dos parâmetros otimizados pelo MSR.

Solução	Corrente (kA)	Tempo (ms)	Força (N)	Resistência á Tração (N)
2	7,5	14,4	189,5	4520,68

Fonte: Autor (2022).

Portanto verificou-se através do MSR que o valor obtido na Solução 2 foi de aproximadamente 4520,7 N de resistência à tração, e a Solução 1 de aproximadamente 4324,7 N demostrando uma diferença de 196,0 N. A Figura 6 mostra os efeitos principais do fenômeno corrente tendo como melhor valor de resistência a tração 4520,7 N obtido pela solução 2.

FIGURA 6. Gráfico de efeitos principais do fenômeno corrente.



Fonte: Autor (2022).

4. CONCLUSÕES

Portanto conclui-se que através do planejamento fatorial foi possível realizar de forma ordenada as análises das variáveis que mais influenciam o processo de soldagem. Além disso, os efeitos e resposta do planejamento fatorial se mostraram não lineares.

E com a aplicação do método de superfície de resposta (MSR) observou-se pelos diagramas de Pareto que o fenômeno depende exclusivamente da corrente elétrica de modo não linear, ou seja, quadrática. E que a corrente possui uma significância acima de 90% nos testes realizados. A variação de apenas 1 kA (Quilo- Ampere) é o suficiente para alterar significativamente os resultados do processo.

A metodologia de Superfície de resposta (MSR) trouxe uma análise detalhada de cada parâmetro de forma individual e combinada, mostrando a possibilidade de visualizar logo no início do planejamento que o parâmetro Tempo (B) não é tão significativo para o processo.

E por fim através desse processo de otimização foi possível verificar que aplicando a solução 2 com uma corrente de 7,5±0,1 kA, tempo de solda de 14,4 milissegundos e força do eletrodo de 189,5 kgf, foi possível chegar a 4520,7 N de resistência de solda à ponto, sendo um ganho de 190 N em relação a resistência atual.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

BRACARENSE, A. Q. Processo de soldagem por resistência. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 1 p., 2000.

CECON, P. R.; SILVA, A. R. Introdução à metodologia de superfícies de resposta. Universidade Federal de Viçosa,Minas Gerais, Brasil, 3 p.,2011.

CHRISTOFOLETTI, G. M. Soldagem por pontos: Avaliação dos parâmetros de soldagem e das propriedades mecânicas da junta soldada. Trabalho de conclusão em Engenharia de Materiais-Centro Federal de Educação Tecnológica, 12 p.,2013.

HANRAHAN, G.; LU, K. Application of Factorial and Response Surface Methodology in Modern Experimental Design and Optimization. Critical Reviews in Analytical Chemistry v. 36, 141,151. 2006.

MARQUES, P. V.; MODENESI P. J; BRACARENSE, A.Q. Soldagem-fundamentos e tecnologia. Editora UFMG, Belo Horizonte, Brasil, 17 p., 2009.

SECCHI, A. R. Modelagem e Simulação de Processos- Parte I: Introdução. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil, 8 p. 1995.