

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA
ELÉTRICA EM REBITES DE ALUMÍNIO

por

Guilherme Baruffi

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, abril de 2022

CIP - Catalogação na Publicação

Baruffi, Guilherme
Análise dos Parâmetros do Processo de Soldagem por
Resistência Elétrica em Rebites de Alumínio /
Guilherme Baruffi. -- 2022.
28 f.
Orientador: Arnaldo Ruben Gonzalez.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2022.

1. Soldagem por Resistência Elétrica. 2. Parâmetros
de Soldagem. 3. Planejamento de Box-Behnken. I. Ruben
Gonzalez, Arnaldo, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Guilherme Baruffi

ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA
ELÉTRICA EM REBITES DE ALUMÍNIO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Porto Alegre, abril de 2022

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, pois sem Ele nada seria possível.
Também aos meus pais, pois graças aos seus esforços e sacrifícios pude chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez, pelos ensinamentos que contribuíram para a execução deste trabalho e para meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

À TDK Electronics do Brasil, pela disponibilidade de espaço e apoio técnico ao projeto.

Ao colaborador José Paulo Rohr, pelo tempo e auxílio na elaboração dos ensaios.

Aos amigos e colegas de trabalho, pelo apoio e suporte no desenvolvimento deste trabalho e durante todo o curso.

À minha família, por sempre me incentivarem a estudar e fornecerem os alicerces necessários para alcançar meus objetivos.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por proporcionar um ensino gratuito e de qualidade.

Baruffi, Guilherme. **Análise dos Parâmetros do Processo de Soldagem por Resistência Elétrica em Rebites de Alumínio**. 2022. 28. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

RESUMO

A soldagem por resistência elétrica é um processo de ampla aplicação industrial, principalmente no setor automotivo, devido às suas principais vantagens de baixo custo operacional, alta produtividade e boa qualidade de solda. Diante disso, um controle de processo das variáveis de trabalho é de suma importância para a fabricação de produtos conformes e redução de refugos na linha de produção. Nessa perspectiva, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito dos parâmetros de processo corrente elétrica, tempo de soldagem e pressão dos eletrodos sobre características de qualidade da solda (Inspeção visual e resistência à tração) e encontrar um conjunto ideal que maximiza estas características. Utilizou-se do planejamento experimental de Box-Behnken como metodologia para gerir ensaios de soldagem em rebites de alumínio e estabelecer os parâmetros mais influentes sobre determinada variável de resposta do processo. Com o auxílio da análise de variância pôde-se concluir que a corrente aplicada é a variável mais significativa, sendo a mais influente sobre as características de qualidade avaliadas. Ao fim, através de ferramentas de otimização determinou-se os valores dos parâmetros corrente de soldagem (I) em 6,79 kA, tempo de aplicação da corrente (T_i) em 3,42 ms e pressão dos eletrodos (P_r) em 0,9 MPa que maximizam a força de tração e a qualidade visual.

PALAVRAS-CHAVE: Soldagem por resistência elétrica, parâmetros de soldagem, planejamento de Box-Behnken, análise de variância.

Baruffi, Guilherme. Analysis of the Parameters of the Electrical Resistance Welding Process in Aluminum Rivets. 2022. 28. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

ABSTRACT

Electric resistance welding is a process of wide industrial application, mainly in the automotive sector, due to its main advantages of low operating cost, high productivity and good weld quality. Therefore, a process control of the work variables is of paramount importance for the manufacture of conforming products and reduction of scraps in the production line. In this perspective, the present work aimed to evaluate the effect of process parameters electric current, welding time and electrode pressure on weld quality characteristics (visual inspection and tensile strength) and to find an ideal set that maximizes these characteristics. The Box-Behnken experimental design was used as a methodology to manage welding tests on aluminum rivets and establish the most influential parameters on a given process response variable. With the help of analysis of variance, it was possible to conclude that the applied current is the most significant variable, being the most influential on the quality characteristics evaluated. Finally, through optimization tools, the values of the optimal set parameters were determined as welding current (I) at 6.79 kA, current application time (T_i) at 3.42 ms and electrode pressure (P_r) at 0.9 MPa that maximize pulling force and visual quality.

KEYWORDS: Electric resistance welding, welding parameters, Box-Behnken design, analysis of variance.

NOMENCLATURA

Símbolos

Q	Energia de fusão	[J]
r	rendimento térmico devido às perdas por energia radiativa e condutiva	[Adimensional]
J	Constante	[J]
I	Corrente de soldagem	[A]
R_T	Resistência elétrica total do circuito	[Ω]
t ou T_i	Tempo de circulação da corrente	[s]
Pr	Pressão dos eletrodos	[Pa]
R^2	Coefficiente de determinação	[Adimensional]

Abreviaturas e acrônimos

DOE	<i>Design of Experiments</i>
RSM	<i>Response Surface Methodology</i>
ZAC	Zona afetada pelo calor
CLP	Controlador lógico programável
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
BBD	Box-Behnken Design
IACS	<i>International Annealed Copper Standard</i>
IQV	Índice de qualidade visual
FT	Força de resistência à tração
ANOVA	Análise de variância

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO.....	2
2.1 SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA	2
2.2 SOLDAGEM DE LIGAS DE ALUMÍNIO	3
2.3 PARÂMETROS E VARIÁVEIS DE PROCESSO	3
2.3.1 RESISTÊNCIA ELÉTRICA.....	4
2.3.2 CORRENTE ELÉTRICA.....	5
2.3.3 TEMPO DE SOLDAGEM	6
2.3.4 ELETRODOS DE SOLDA	7
2.4 BOX-BEHNKEN DESIGN	7
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	8
3.1 MATERIAIS	8
3.2 EQUIPAMENTOS	9
3.3 METODOLOGIA.....	9
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	10
5. CONCLUSÃO	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
APÊNDICE A.....	17
APÊNDICE B.....	18
APÊNDICE C.....	19

1. INTRODUÇÃO

Na manufatura industrial, grande parte dos projetos têm como foco as ações voltadas para melhoria contínua de processos e produtos, especialmente no setor automotivo. A crescente demanda por padrões de qualidade mais rigorosos, visando a mitigação de falhas ao longo da cadeia de fornecimento, faz com que os processos precisem de estrito controle e, ao mesmo tempo, eficiência. Fazer o melhor aproveitamento da matéria-prima, reduzir o consumo de energia e tempo, e gerar menos refugo, enquanto se mantêm um alto padrão de qualidade dos produtos, são os principais critérios foco da melhoria contínua do processo produtivo. Desta forma, o desenvolvimento de métodos confiáveis e robustos são essenciais para manter a competitividade e atender aos principais requisitos das normas automotivas.

No campo dos processos de fabricação, a soldagem é um dos processos amplamente utilizados no setor industrial, tanto na recuperação quanto na fabricação de peças. Um dos processos mais empregados na indústria eletrônica é o da soldagem por resistência elétrica, principalmente devido às suas características de baixa geração de escória e a não necessidade de utilização de metal de adição, além de utilizar equipamentos de solda com custo relativamente baixo quando comparado a outros processos como a soldagem por laser ou fricção (Welding Handbook, 1998). Apesar da relativa simplicidade, as variáveis de operação da soldagem por resistência elétrica devem ser bastante precisas e controladas, a fim de obter-se soldas sem desvios significativos de qualidade e atendendo aos requisitos de projeto. O não atendimento de um parâmetro pode trazer riscos à utilização do produto; por exemplo, o rompimento de uma solda em um componente eletrônico pode causar danos ao circuito o qual compõe, provocando risco de acidentes e comprometendo a segurança de usuários. Em particular, na soldagem do alumínio e suas ligas, que será o objeto de estudo do presente trabalho, quando soldado pelo processo de resistência elétrica deve ter-se um cuidado maior quanto às variáveis de operação, pois comparado aos aços, estas ligas apresentam condutividade elétrica e térmica muito superiores, além de possuírem baixa resistência mecânica (Machado, 1996). Neste âmbito, a pesquisa por parâmetros adequados acaba sendo um dos principais focos de estudo da engenharia industrial nos setores que utilizam métodos de soldagem.

O trabalho de Santos (2013), apresentou uma matriz de ensaios mediante a combinação e variação de parâmetros de soldagem por ponto para chegar em um conjunto otimizado de variáveis, sendo a corrente de soldagem a variável de maior influência em conjunto com um tempo de solda que gerasse maior produtividade. Por outro lado, Da Silva e Da Silva (2008) utilizaram-se do Projeto de Experimentos (*DOE – Design of Experiments*) para o estudo da influência das variáveis de pressão de eletrodo e corrente de soldagem sobre a variável de resposta de resistência de solda, analisando que a pressão é a variável mais influente e obtendo, ao fim, os valores de parâmetros que otimizaram as respostas do processo.

A utilização de planejamento experimental pode ser considerada uma ferramenta de grande utilidade na avaliação de dados. Uma das técnicas mais utilizadas em análises estatísticas é realizada através do experimento de Box-Behnken, cujos princípios se baseiam na metodologia de superfície de resposta (*RSM – Response Surface Methodology*). Tal método possui ampla utilização e é empregado em análises de processos nos quais deseja-se investigar quais variáveis exercem maior influência sobre a resposta de interesse e a partir disso determinar o conjunto ótimo de ajuste de parâmetros (Buenos et al, 2010).

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é avaliar o efeito dos parâmetros de processo de soldagem por resistência elétrica sobre características de qualidade da solda (resistência à tração e inspeção visual). Com isso, pretende-se compreender melhor as limitações e características deste tipo de soldagem, buscando a melhoria contínua do processo de produção.

2. FUNDAMENTAÇÃO

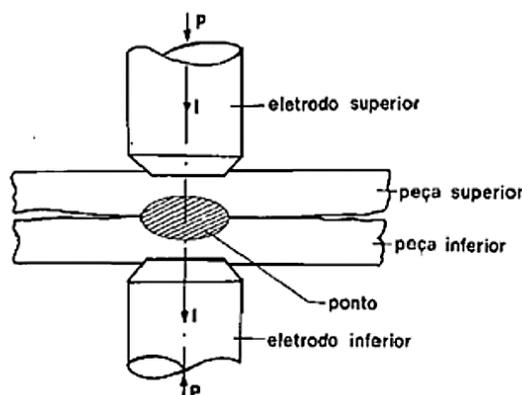
2.1 SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA

De acordo com Santos e Mainier (2006), o processo de soldagem por resistência elétrica tem sido um dos mais utilizados da indústria automobilística das últimas décadas e, atualmente, um dos mais aplicados na união dos mais diversos tipos de peças e conjuntos. O processo tem grande aplicação também na indústria automotiva, no setor de soldagem de carrocerias de automóveis, na indústria eletroeletrônica, na soldagem de subcomponentes eletrônicos e na linha branca, na fabricação de eletrodomésticos.

Este tipo de soldagem compreende uma série de métodos de soldagem cujo princípio básico consiste na passagem de corrente elétrica entre dois eletrodos não consumíveis, os quais realizam a compressão de peças distintas. Como consequência, a interface em contato das peças estará sob a maior resistência elétrica do circuito, levando à maior geração de calor por efeito Joule e, desta forma, a fusão do local e a formação do ponto de solda (Machado, 1996). A compressão aplicada pelos eletrodos às peças deve ser efetuada antes, durante e após a passagem da corrente elétrica, o que permite uma boa zona de contato entre as mesmas, além de garantir que as mesmas estejam unidas durante o resfriamento e solidificação da solda (Magdalena e Silva, 2014). A área de passagem da corrente elétrica e a geometria do ponto de solda são limitadas pelo formato e contorno das faces dos eletrodos (Olson et al, 1983).

A Figura 1 ilustra esquematicamente o princípio do processo de soldagem por resistência elétrica, demonstrando o posicionamento das peças e eletrodos, bem como o ponto de fusão de maior resistência ao centro e o sentido de pressão dos eletrodos.

Figura 1 – Desenho esquemático do processo de soldagem por resistência elétrica, sendo P a pressão dos eletrodos e I a corrente de soldagem. Fonte: Brandi et al, (1992).



A energia necessária Q para realizar a fusão dos materiais e formação do ponto de solda é gerada nos eletrodos e nas peças, e pode ser expressa pela Equação 1, em J.

$$Q = \frac{r}{J} \int_0^t I^2 \cdot R_T \cdot dt \quad (1)$$

Onde:

r = rendimento térmico devido às perdas por energia radiativa e condutiva;

J = constante (4,185 J);

I = corrente de soldagem (A);

R_T = resistência total do circuito (Ω);

t = duração de circulação da corrente (s).

Quando comparado aos processos de soldagem por arco elétrico, o processo de soldagem por resistência elétrica tem como principais vantagens: proporcionar um menor aquecimento às partes que estão sendo unidas, uma vez que a fusão se restringe somente a um pequeno local de maior resistência, não adicionar peso aos produtos soldados, devido à não ter metal de adição, possuir baixa geração de escória e principalmente proporcionar um custo de operação e maquinário reduzido, quando comparado a outros processos como a soldagem por laser ou fricção. Outra vantagem importante é a produtividade do processo, pois é possível realizar um elevado número de soldas em um curto intervalo de tempo garantindo repetitividade.

2.2 SOLDAGEM DE LIGAS DE ALUMÍNIO

Quando associa-se a crescente demanda por padrões de qualidade com o desenvolvimento de produtos robustos na manufatura industrial, a utilização do alumínio e suas ligas, surge como uma alternativa bastante atrativa. O uso destes materiais em substituição, principalmente, aos aços e ferros fundidos, permite a redução de perdas e refugos por corrosão além de diminuir consideravelmente o peso dos componentes, sendo também um dos materiais mais utilizados nos processos de fabricação atuais. (Moreira, 2011).

O alumínio é um metal que apresenta como características: boa resistência à corrosão, alta condutibilidade térmica e elétrica, boa tenacidade e ótima conformabilidade. Quanto às limitações do alumínio, pode-se citar a baixa resistência mecânica e dureza em temperaturas superiores aos 150 °C, as quais podem ser melhoradas pela adição de elementos de liga e a utilização de tratamentos térmicos (Infosolda, 2022).

Na soldagem por resistência elétrica, as características mais relevantes dos materiais a serem soldados são as condutividades térmica e elétrica. As ligas de alumínio, por apresentarem condutividades muito maiores que a dos aços, necessitarão de maior densidade de corrente, além de uma taxa superior de energia. Ademais, a baixa resistência mecânica em altas temperaturas em conjunto com um pequeno intervalo de estado plástico do material, irá implicar em um rígido controle da resistência e pressão dos eletrodos (Machado, 1996).

Outro fator importante a ser analisado no processo de soldagem é a grande contração que ocorre na solidificação destas ligas, o que pode levar à formação de porosidades e trincas. Quando ocorre a mudança de fase do estado líquido para o sólido, a solubilidade do hidrogênio agregado sofre mudanças, o que acaba por gerar uma espécie de espuma durante a solidificação, o que atrelado a uma elevada taxa de resfriamento, pode levar a porosidades e consequentemente, fragilidade da junta soldada. Como tem-se baixas temperatura de fusão e viscosidade do metal fundido, também pode ocorrer da zona afetada pelo calor (ZAC) se fundir e danificar o metal base (Gimenes e Tremonti, 1994).

2.3 PARÂMETROS E VARIÁVEIS DE PROCESSO

A qualidade de um ponto de solda é o resultado de um conjunto de parâmetros de soldagem. Estes parâmetros possuem uma estrita integração entre si, sendo necessária, portanto, uma adequada combinação destes para realizar a solda de acordo com as especificações de projeto. Atualmente, com a evolução da eletrônica nas máquinas de soldagem industriais, os parâmetros de solda são controlados e programados através dos Controladores Lógicos Programáveis (CLP's) dos equipamentos, permitindo uma regulagem mais fina e um retorno imediato, caso algum dos parâmetros esteja fora de especificação (Pinheiro, 2010).

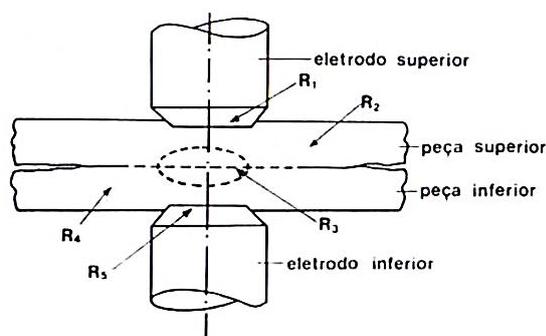
A soldagem por resistência é balizada por três variáveis principais: intensidade de corrente elétrica, tempo de fluxo de corrente e força entre os eletrodos, os quais são aplicados em um ciclo de soldagem. Estas devem ser determinadas de acordo com a resistência elétrica no circuito, material e espessura das peças a serem soldadas. Existem também outros parâmetros que apesar de serem considerados secundários, também exercem influência na qualidade do ponto de solda como a refrigeração e material dos eletrodos, condição do ambiente de soldagem e o acabamento da superfície das peças soldadas.

2.3.1 RESISTÊNCIA ELÉTRICA

A resistência elétrica é um dos mais importantes parâmetros de controle da soldagem, pois é a partir da sua grandeza que são definidos os valores e demandas de outras variáveis envolvidas no processo. A força aplicada pelos eletrodos durante o ciclo de soldagem é o fator determinante na resistência elétrica total do circuito; as superfícies metálicas, mesmo com acabamento e polimento cuidadoso apresentam rugosidades, as quais geram forte influência na resistência de contato das peças. A pressão resultante da força aplicada aos eletrodos acaba por diminuir esta resistência elétrica, aumentando a circulação de corrente nesta interface. Com isso, a quantidade de calor total que é gerada neste local sofre uma diminuição, sendo necessário, neste caso, um aumento na intensidade de corrente aplicada e/ou seu tempo de aplicação (Machado, 1996)

A resistência elétrica total do circuito pode ser definida como a somatória de todas as resistências ao fluxo de corrente elétrica entre os eletrodos conectados ao circuito secundário do transformador da fonte de soldagem e normalmente é compreendida em um conjunto de cinco resistências, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Esquema demonstrativo das resistências elétricas dos componentes no processo de soldagem por resistência elétrica. Fonte: Bracarense, (2000).



Onde, a resistência elétrica total R_T é dada pela Equação 2, em ohms (Ω).

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad (2)$$

Em que, R_1 é a resistência de contato entre o eletrodo e a peça superiores (Ω), R_2 a resistência elétrica da peça superior (Ω), R_3 a resistência de contato entre as peças superior e inferior (Ω), R_4 a resistência elétrica da peça inferior (Ω) e R_5 a resistência de contato entre o eletrodo e a peça inferiores (Ω).

Dentre as cinco resistências envolvidas no processo, a resistência R_3 pode ser considerada a de maior intensidade e também a de maior importância, pois é nesta região de contato que ocorrerá a geração de calor para formar a fusão localizada. As resistências R_1 e R_5 são significativas no caso da utilização de metais com baixa resistividade elétrica. Já as

resistências R_2 e R_4 não exercem influência nos primeiros estágios do ciclo de solda, porém são importantes após os materiais estarem já aquecidos, devido a maior resistência elétrica em função da temperatura. Desta forma, pode-se concluir que as resistências de contato exercem muito mais influência na geração de calor do que as resistências das peças a serem soldadas, durante o ciclo de soldagem por resistência elétrica (Negreiros, 2014).

2.3.2 CORRENTE ELÉTRICA

A corrente elétrica é um parâmetro determinante na qualidade da soldagem. Ela tem um efeito mais significativo na geração de calor no ponto de solda comparado à resistência e tempo, devido à sua influência quadrática, devendo-se, portanto, ter um controle bastante preciso deste parâmetro.

A corrente elétrica utilizada nos processos de soldagem por resistência costuma variar desde 1kA para o caso de soldas de componentes eletrônicos a até níveis superiores à 15 kA para o caso de soldagens de carrocerias no setor automotivo, dependendo da espessura dos materiais. Ela é fornecida pela fonte de alimentação, fluindo primeiramente pelo circuito primário do transformador e após, pelo circuito secundário onde é elevada, chegando-se finalmente à peça de trabalho. Atualmente, as fontes de potência utilizadas nos equipamentos de soldagem por resistência podem ter saídas de CA ou CC, dependendo da máquina e aplicação pretendida, contando com controladores de intensidade de energia que realizam o controle da densidade de corrente fornecida durante o ciclo de solda, de acordo com os parâmetros de soldagem utilizados. A fonte de potência deve fornecer uma intensidade de corrente suficiente a fim de compensar as perdas oriundas das resistências que estão em série com a resistência de contato entre as peças de trabalho, no ponto de fusão (Pinheiro, 2010).

A densidade de corrente de soldagem é caracterizada pela corrente de soldagem que está fluindo por unidade de área onde está sendo aplicada e variações de magnitude na corrente podem alterar o seu valor na interface da solda. Existem limites superior e inferior para a densidade. Abaixo do limite inferior não se tem energia de soldagem o suficiente para realizar a fusão do ponto de contato, devido ao calor gerado ser insuficiente. Por outro lado, acima do limite superior tem-se o aquecimento excessivo das peças de trabalho entre os eletrodos, levando-as à deformação plástica e ocorrendo dos eletrodos penetrarem profundamente nas mesmas. Densidades de corrente muito elevadas em conjunto com altos tempos de solda podem também acarretar na expulsão do material da zona fundida e/ou da interface entre a peça e o eletrodo, fragilizando a solda final e interferindo na qualidade e resistência do produto soldado, além de também diminuir consideravelmente a vida útil dos eletrodos. (Magdalena e Silva, 2014)

A Figura 3 ilustra a imagem de uma solda resultante de uma aplicação excessiva de corrente de soldagem. Nessa figura pode-se perceber salpicos do material fundido ao redor do ponto central de solda.

Figura 3 – Peça soldada com aplicação excessiva de corrente de soldagem. Fonte: Autor



Tal fenômeno da expulsão ou salpico de solda pode ser observado frequentemente nos processos de soldagem por resistência elétrica. A projeção do metal fundido é altamente indesejada e pode resultar na redução da força que suporta o componente final (conjunto soldado), além de interferir nos equipamentos adjacentes devido à sujeira e contaminação

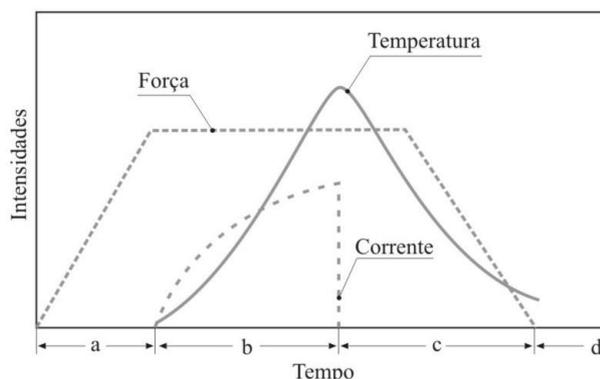
2.3.3 TEMPO DE SOLDAGEM

De acordo com Aures (2006), o tempo de soldagem pode ser definido como o tempo em que a corrente elétrica é fornecida para a realização do ponto de solda. É diretamente proporcional à quantidade de calor gerado, sendo também um dos principais parâmetros do processo de soldagem por resistência elétrica. A qualidade final do ponto de solda é influenciada diretamente pelo controle do tempo de acordo com cada especificação de peça ou material, principalmente em relação à prevenção de falhas em potencial após o ponto de solda gerado (Turetta, 2016). O calor gerado no período deve ser suficiente para produzir soldas com boa resistência mecânica, porém sem o aquecimento em excesso dos eletrodos.

Conforme Machado (1996), a soldagem por resistência elétrica apresenta um ciclo simples, como mostrado na Figura 4, que pode ser dividido em quatro fases:

- a) Fase de Compressão: É o tempo compreendido entre o início da operação até o início da passagem de corrente elétrica. Nesta fase, também há a movimentação dos eletrodos até a posição e aplicação da força de trabalho.
- b) Fase de Soldagem: É a fase em que ocorre a passagem da corrente nos materiais, fundindo o contato entre as peças de trabalho e formando o ponto de solda.
- c) Fase de Manutenção ou Resfriamento: É o intervalo de tempo após a interrupção do fluxo de corrente no qual os eletrodos continuam pressionando as peças de trabalho até a solidificação completa do material do ponto.
- d) Fase de Espera: Na última etapa do ciclo ocorre o afastamento dos eletrodos da peça de trabalho e o intervalo entre uma solda e a próxima.

Figura 4 – Ciclo de soldagem, composto pelas quatro fases: (a) Compressão, (b) Soldagem, (c) Resfriamento e (d) Espera. Fonte: adaptado de Machado (1996).



2.3.4 ELETRODOS DE SOLDA

Os eletrodos de solda desempenham um papel fundamental no processo de soldagem por resistência elétrica, por serem responsáveis pela condução da corrente de soldagem para o material e a conseqüente geração de calor no componente a ser soldado. Os eletrodos necessitam ter uma condutividade elétrica considerável, porém também devem possuir uma dureza adequada e resistência mecânica suficiente para suportar a pressão aplicada pelo sistema neste tipo de soldagem (Pinheiro, 2010). Ligas a base de cobre são as mais utilizadas na fabricação dos eletrodos por conta de serem altamente condutivas térmica e eletricamente, terem uma baixa resistência elétrica de contato e terem elevada resistência mecânica e ao desgaste em altas temperaturas de trabalho (Machado, 1996).

Além do material, a geometria dos eletrodos também é bastante importante, pois a área transversal dos mesmos possui amplo controle sobre a densidade de corrente transferida à peça e a suas conseqüentes forma e tamanho resultantes. Correntes de trabalho altas em conjunto com eletrodos pequenos costumam marcar as peças com o formato das faces dos eletrodos.

Devido à alta temperatura e pressão aos quais são submetidos em trabalho, o tempo de vida útil dos eletrodos é um ponto significativo a ser considerado. Condições como as citadas acabam por alterar as propriedades físicas e mecânicas dos eletrodos, aumentando a resistência elétrica de contato e reduzindo, desta forma, a intensidade de corrente de soldagem, gerando por conseqüência, desvios de qualidade de solda no produto final. Uma das formas mais usuais de minimizar o problema é inserindo um sistema de refrigeração por ciclo fechado na máquina de soldagem, fazendo o fluido passar por galerias dentro dos eletrodos trocando calor e reduzindo sua temperatura (Pinheiro, 2010). Máquinas industriais automáticas de soldagem mais atuais possuem controladores programáveis internos que realizam a contagem dos ciclos de solda, emitindo um alerta de desgaste e substituição do eletrodo.

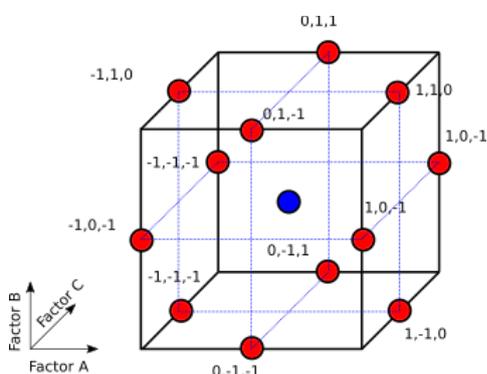
2.4 BOX-BEHNKEN DESIGN

Um apropriado planejamento experimental demanda uma metodologia estatística de otimização que seja capaz de operar simultaneamente com uma combinação de fatores capazes de transmitir os parâmetros que exercem maior influência sobre determinado processo (Ferreira et al., 2007). Em vista disso, no ano de 1960, George E.P. Box e Donald Behnken desenvolveram uma técnica de otimização estatística a qual foi nomeada de Box-Behnken Design (BBD), a qual era capaz de reduzir a quantidade de condições de um

experimento, partindo-se de níveis rotacionais ou semi-rotacionais de planejamento (Gomes, 2013).

Na utilização da metodologia, primeiramente, definem-se os parâmetros controláveis de entrada que exercem influência sobre o processo. Após, realiza-se a distribuição dos fatores em três níveis experimentais: baixo (-1), central (0) e alto (+1) e gera-se uma matriz de experimentos com combinações aleatórias destes fatores. A repetitividade do experimento é testada aleatoriamente através da combinação do ponto central por um número maior de vezes (Hackenhaar, 2016). A técnica de Box-Behnken é muito utilizada em projetos de experimentos devido à particular vantagem de não utilizar, nas combinações de experimentos, conjuntos de todos os fatores em seus níveis mais altos ou mais baixos simultaneamente. Com isso, garante-se uma zona segura de experimentação e evita-se que os experimentos sejam realizados em condições extremas, as quais podem decorrer em resultados insatisfatórios (Ferreira et al., 2007). A Figura 5 ilustra a distribuição dos fatores em torno do ponto central.

Figura 5 - Projeto de experimentos Box-Behnken para três fatores. Fonte: Montgomery (2013)



3. MATERIAIS E MÉTODOS

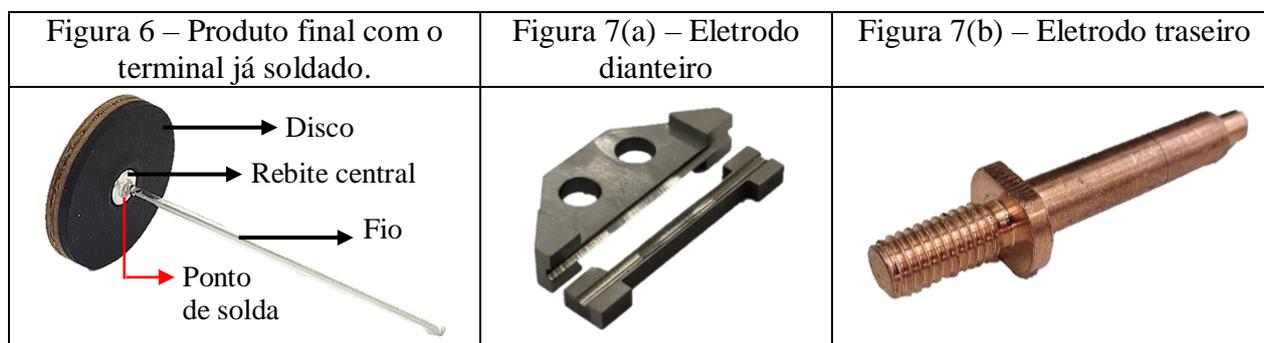
3.1 MATERIAIS

O produto, o qual analisou-se no presente trabalho, é um disco com terminal, subcomponente da construção dos capacitores eletrolíticos de alumínio. A peça é composta por um disco de fenolite com uma camada superficial de borracha, possuindo um núcleo de alumínio e um fio, o qual é soldado no núcleo. A peça, na utilização final do capacitor, deve ser capaz de resistir a vibrações, choques, e diferenças de temperatura, portanto, os requisitos de soldagem dos terminais têm um nível bastante elevado, sendo a peça submetida a inspeções visuais e testes de tração. A Figura 6 ilustra o disco com terminal já soldado e seus componentes.

O rebite central é circular e possui 4 mm de diâmetro e 4,3 mm de espessura, atravessando toda a peça, constituído de alumínio com pureza > 99,92%. O fio é fabricado em cobre e banhado com estanho puro, possuindo seção circular com diâmetro de 1,0 mm e o revestimento de 7 μm de estanho. Possui a tensão de ruptura em torno de 250 N/mm^2 e condutividade de 92% IACS. A figura 6 ilustra o disco com terminal já soldado.

Os eletrodos utilizados nos experimentos podem ser divididos em dois modelos. O que opera em contato com o fio é fabricado em uma liga de 80% tungstênio e 20% cobre, sendo bipartido com um sulco central para poder segurar o fio no momento da solda, chamado de eletrodo dianteiro, ilustrado na Figura 7(a). A Figura 7(b) mostra o eletrodo traseiro que contata com o centro do rebite, na parte de trás do disco, através de uma fita de cobre e é

também fabricado inteiramente em cobre. Utilizaram-se, nos experimentos, eletrodos novos sem qualquer utilização prévia ou desgaste.



Fonte: Autor

3.2 EQUIPAMENTOS

A máquina de solda utilizada nos experimentos foi a ISC-200 DC, de operação automática e soldagem por corrente contínua. Ela permite, em cada programa, a definição dos parâmetros de soldagem bem como seu monitoramento. A tecnologia utilizada se baseia no controle de carga e descarga de um banco de capacitores sobre um transformador de pulso, o qual recebe alta tensão no circuito primário e reduz esta tensão a níveis inferiores a 20 V no circuito secundário, onde estão conectados os eletrodos do equipamento. Este transformador gera elevadas correntes, na ordem de quiloampères, que são utilizadas como parâmetro de verificação de soldagem.

Para a aferição e correta regulagem dos parâmetros de soldagem selecionados, utilizou-se da unidade de medição digital MG3D da marca Miyachi. O aparelho conta com uma precisa medição dos parâmetros de tempo dos ciclos de soldagem, corrente aplicada e resistência elétrica do circuito em sistemas de soldagem por resistência elétrica. Já para o ajuste da pressão dos eletrodos, utilizou-se reguladores de pressão da marca Festo instalados anteriormente aos atuadores pneumáticos.

Na obtenção das variáveis de resposta, utilizou-se de um microscópio eletrônico com ampliação de 32x para as inspeções visuais e um dinamômetro digital calibrado de bancada para a realização dos testes de tração.

3.3 METODOLOGIA

Diante do disposto nos conceitos estudados, os parâmetros de tempo de solda, corrente elétrica de soldagem e pressão dos eletrodos, se destacaram como sendo os mais interferentes no processo de soldagem por resistência elétrica, sendo os escolhidos como as variáveis independentes para a elaboração dos experimentos. Parâmetros relacionados à refrigeração e material dos eletrodos bem como a condição do ambiente de soldagem, embora muito importantes e influentes na qualidade do ponto da solda, não estarão no escopo desta análise, sendo mantidos constantes durante a realização dos experimentos.

O projeto de experimentos de Box-Behnken (BBD) para três fatores e três níveis cada fator (vide Tabela 1) foi aplicado para obtenção da matriz experimental (vide Tabela 2) e na análise de significância das variáveis independentes sobre as respostas Força de Tração resistida da solda e Qualidade de Inspeção Visual, auxiliando na determinação da condição ótima de ajuste de cada um dos parâmetros. No Box-Behnken (BBD) é possível ter tratamento em que todos os fatores utilizados não estejam nos seus níveis máximos ou mínimos ao mesmo tempo (Minitab, 2018).

Tabela 1 – Fatores e níveis experimentais selecionados no planejamento Box-Behnken.

Fonte: Autor

Fatores	Níveis		
	Valor mínimo (-1)	Ponto central (0)	Valor máximo (+1)
Corrente de Soldagem (kA)	5,8	7,0	8,2
Tempo de Soldagem (ms)	2,0	3,5	5,0
Pressão dos Eletrodos (MPa)	0,60	0,75	0,90

A Tabela 2 mostra a matriz experimental obtida, mediante o software *Minitab Statistical 20*, com as combinações dos parâmetros para cada um dos ensaios e a sequência aleatorizada. A primeira coluna refere-se à sequência aleatorizada dos corpos de prova, já a segunda à ordem dos ensaios determinados para a realização do experimento. As linhas grifadas em negrito indicam os três pontos centrais do experimento, onde os parâmetros de soldagem são iguais. A sequência de experimentos foi realizada em ordem aleatória a fim de evitar qualquer tendência devido às flutuações do processo.

As peças soldadas foram avaliadas física e visualmente. A avaliação física resumiu-se em um ensaio de tração de bancada, onde a base do disco é presa em um suporte fixo e o fio preso em uma garra anexa a um dinamômetro digital, o qual exerce uma força até o rompimento da solda, mostrando em seu visor o valor da força de ruptura. Quanto maior a força, melhor a qualidade da solda. Já na avaliação visual, inspecionou-se os pontos de solda dos corpos de prova através de um microscópio eletrônico, buscando-se avaliar o tamanho e uniformidade da poça de fusão, ocorrência de salpicos de metal base ou quaisquer outras discontinuidades na solda. Uma solda de qualidade se designa por uma poça de fusão sem salpicos, uniforme e com um diâmetro de base adequado. Para facilitar a análise dos resultados, decidiu-se por classificar a avaliação visual por uma escala gradual de valores 1 a 5, sendo o valor 1 para uma solda de baixa qualidade e o valor 5 para uma solda de excelente qualidade, exposto no presente trabalho como Índice de Qualidade Visual (IQV). Uma graduação detalhada pode ser analisada no Apêndice A.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos ensaios de tração e da avaliação visual realizada com as amostras do experimento, foi possível analisar e tratar os dados através de técnicas estatísticas, bem como realizar uma avaliação das superfícies de resposta de forma individual e conjunta. A Tabela 2 mostra a matriz experimental do experimento Box-Behnken com as três variáveis controláveis e as respostas obtidas para as características de qualidade da solda de força de tração pelo terminal e avaliação visual, para determinar-se o Índice de Qualidade Visual (IQV).

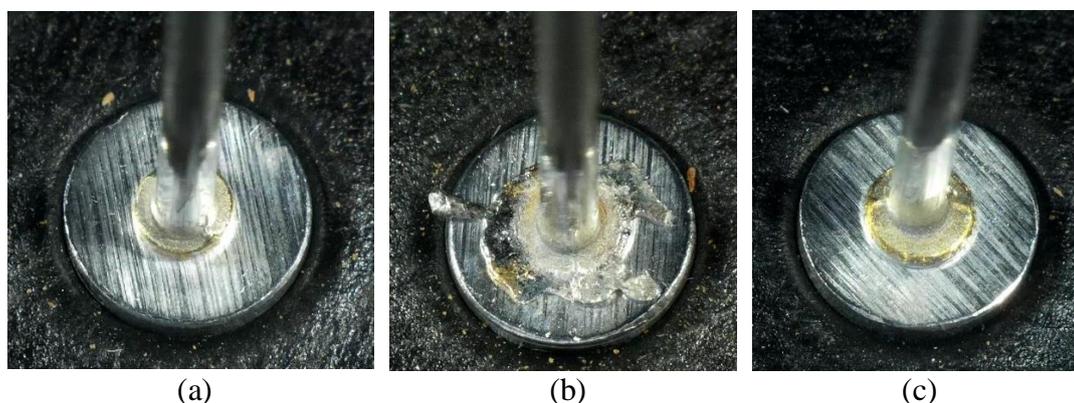
Tabela 2 – Matriz de experimentos Box-Behnken e os resultados obtidos. Fonte: Autor

Ordem Estatística	Ordem do Ensaio	Corrente Soldagem (kA)	Tempo de Soldagem (ms)	Pressão dos Eletrodos (MPa)	Força de Tração Resistida (N)	Índice de Qualidade Visual
8	#1	8,2	3,5	0,90	260	2
12	#2	7,0	5,0	0,90	343	5
4	#3	8,2	5,0	0,75	15	1
7	#4	5,8	3,5	0,90	86	3
9	#5	7,0	2,0	0,60	288	2
5	#6	5,8	3,5	0,60	321	4
1	#7	5,8	2,0	0,75	140	3

2	#8	8,2	2,0	0,75	12	1
6	#9	8,2	3,5	0,60	284	2
10	#10	7,0	5,0	0,60	281	3
15	#11	7,0	3,5	0,75	312	5
13	#12	7,0	3,5	0,75	309	4
3	#13	5,8	5,0	0,75	122	3
11	#14	7,0	2,0	0,90	349	5
14	#15	7,0	3,5	0,75	318	5

Pode-se observar na Tabela 2, uma ampla variação nas respostas dos experimentos, tendo-se índices visuais máximos e mínimos, bem como valores de resistência à tração com grande amplitude. Percebe-se que os ensaios que obtiveram um índice de qualidade visual com valor “1” são os que apresentaram a menor resistência à tração, o que pode ser explicado pela formação de salpicos e rebarbas de metal fundido, o que acabou por fragilizar a junta soldada ou também pelo diâmetro pequeno da base de solda, o que gerou uma pequena área de aderência, não atendendo ao requisito de qualidade. A Figura 8 exibe as imagens ampliadas das amostras dos ensaios 3 e 8 com as causas citadas e do ensaio 11 com a qualidade desejada. As imagens dos resultados de cada ensaio podem ser encontradas no Apêndice C.

Figura 8 – Imagens das amostras experimentadas: (a) Ensaio 3 (Base muito pequena); (b) Ensaio 8 (Rebarbas e salpicos); (c) Ensaio 11 (Qualidade desejada: Base conforme e sem salpicos). Fonte: Autor



Com o auxílio do software *Statistica*®, foi possível realizar uma análise de variância (ANOVA) a partir dos dados coletados para as duas características estudadas. Através da análise pôde-se chegar nos modelos matemáticos utilizando variáveis não escalonadas. As equações de regressão em unidades não codificadas empregando os coeficientes estimados para a força de resistência à tração (FT) e para o índice de qualidade visual (IQV) são apresentadas nas Equações 3 e 4, respectivamente.

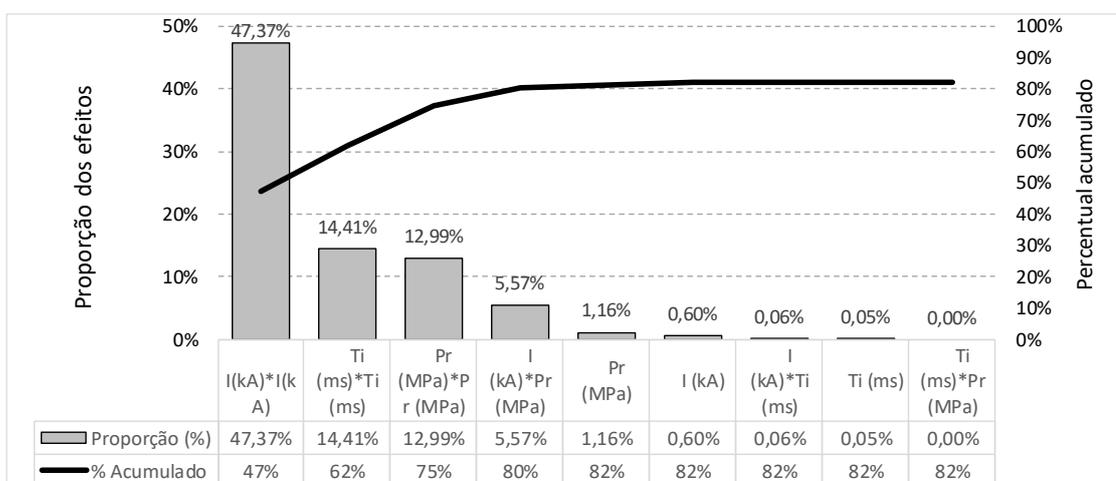
$$\begin{aligned}
 FT \text{ (N)} = & -1672 + 1307 I \text{ (kA)} + 230 Ti \text{ (ms)} - 7760 Pr \text{ (MPa)} - 110,5 I^2 \text{ (kA)} \\
 & - 36,3 Ti^2 \text{ (ms)} + 3728 Pr^2 \text{ (MPa)} + 2,9 I \text{ (kA)} * Ti \text{ (ms)} \\
 & + 293 I \text{ (kA)} * Pr \text{ (MPa)} + 1 Ti \text{ (ms)} * Pr \text{ (MPa)}
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 IQV = & -57,7 + 16,05 I \text{ (kA)} + 3,51 Ti \text{ (ms)} + 3,1 Pr \text{ (MPa)} - 1,273 I^2 \text{ (kA)} \\
 & - 0,370 Ti^2 \text{ (ms)} - 3,7 Pr^2 \text{ (MPa)} - 0,000 I \text{ (kA)} * Ti \text{ (ms)} \\
 & + 1,39 I \text{ (kA)} * Pr \text{ (MPa)} - 1,11 Ti \text{ (ms)} * Pr \text{ (MPa)}
 \end{aligned} \quad (4)$$

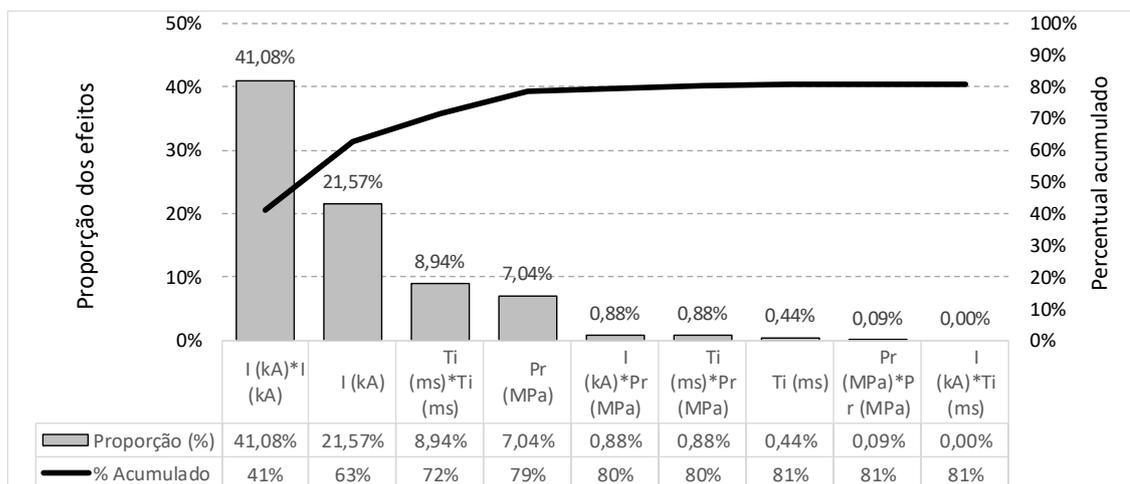
Os coeficientes de determinação (R^2) para os modelos resultaram nos valores de 0,8220 para a força de tração e 0,8093 para o índice de qualidade visual, indicando que os modelos matemáticos são adequados e eficientes para a aplicação nas condições testadas. Os quadros completos de análise de variância sobre as respostas avaliadas podem ser analisados no Apêndice B.

Um dado bastante importante investigado no presente trabalho foi a influência das variáveis sobre as respostas dos experimentos. Através da ANOVA foi possível gerar os gráficos de proporção dos efeitos para as duas características de qualidade analisadas, ambos ilustrados na Figura 9.

Figura 9 – Gráficos de proporção dos efeitos para (a) Força de tração e (b) IQV.



(a)



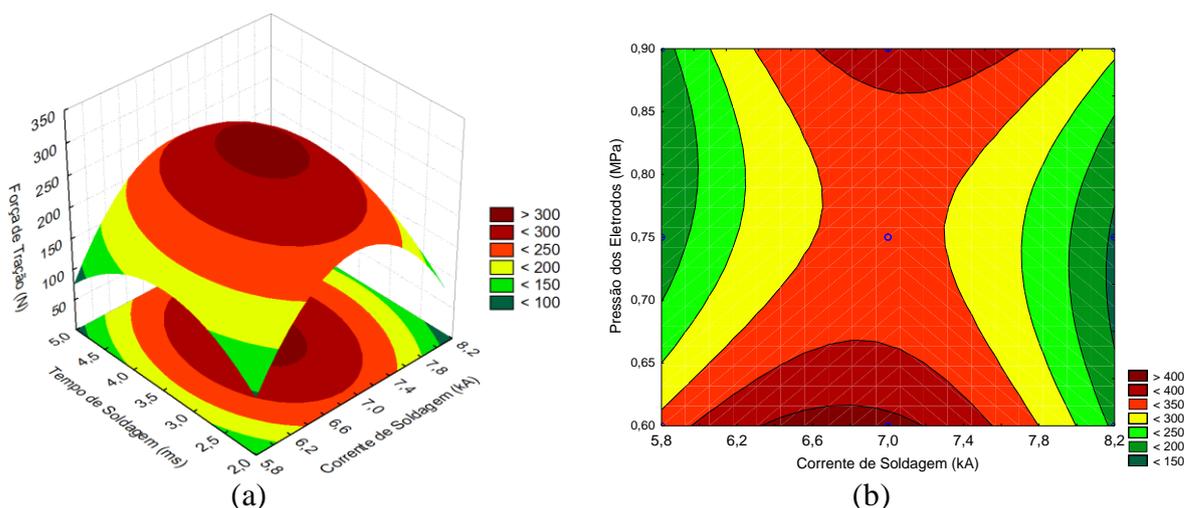
(b)

Pode-se analisar pelos gráficos, que o termo quadrático $I*I$ tem a influência mais significativa para as duas características de qualidade, considerando nível de significância de 0,05. Este é seguido pelos quadráticos $Ti*Ti$ e $Pr*Pr$ para a força de tração e pelo termo linear I e pelo quadrático $Ti*Ti$ para o índice visual, porém com influências menos significativas.

Através da análise de variância também foi possível avaliar o efeito da interação entre as variáveis controláveis sobre as superfícies de respostas. A Figura 10(a) ilustra o gráfico da

superfície de resposta da média das forças de tração em função dos parâmetros I e T_i , mantendo-se constante a pressão dos eletrodos em 0,75 MPa, já a Figura 10(b) ilustra o gráfico de contorno da média das forças de tração em função dos parâmetros I e P_r , mantendo-se constante o tempo de aplicação da corrente de solda em 3,5 ms.

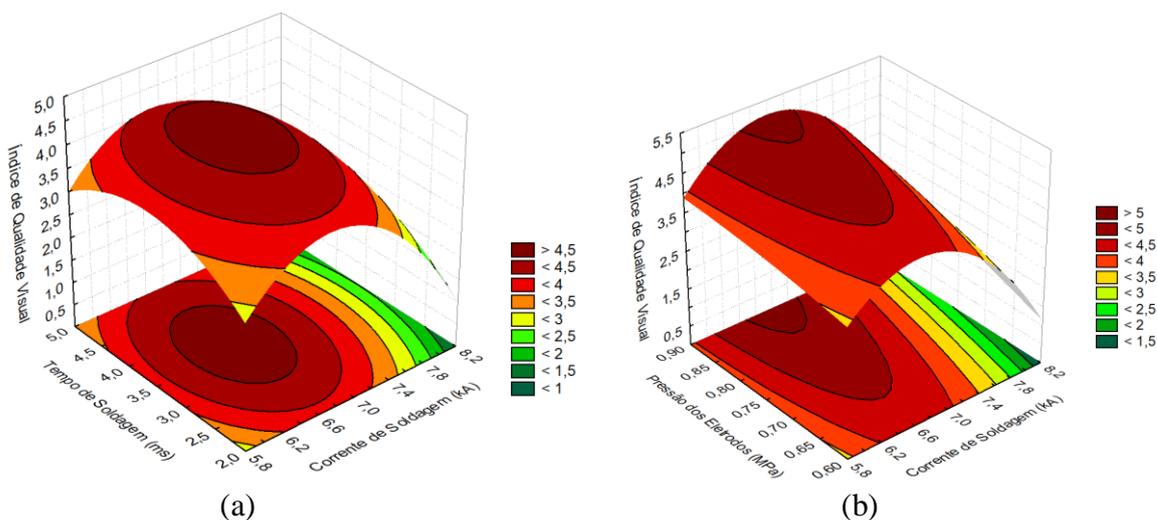
Figura 10 – Gráficos de resposta da média das forças de tração: (a) Superfície para $I \times T_i$, com $P_r = 0,75$ MPa; (b) Contorno para $I \times P_r$, com $T_i = 3,5$ ms.



Pode-se avaliar pela Fig.10(a) que a região de melhor resistência à tração se encontra na superfície oval entre as correntes de 6,6 a 7,2 kA e tempo de aplicação de 3,0 a 4,0 ms. Já pela Fig.10(b), para o tempo de aplicação constante, a melhor região se encontra somente na pressão de 0,6 MPa na faixa de corrente de 6,3 kA a 7,2 kA.

As Figuras 11(a) e 11(b), ilustram respectivamente os gráficos de superfície de resposta do índice de qualidade visual para a relação dos parâmetros de corrente de soldagem por tempo de aplicação, mantendo-se a pressão em 0,75 MPa e dos parâmetros de corrente de soldagem em função da pressão dos eletrodos, mantendo-se constante o tempo de aplicação da corrente de solda em 3,5 ms.

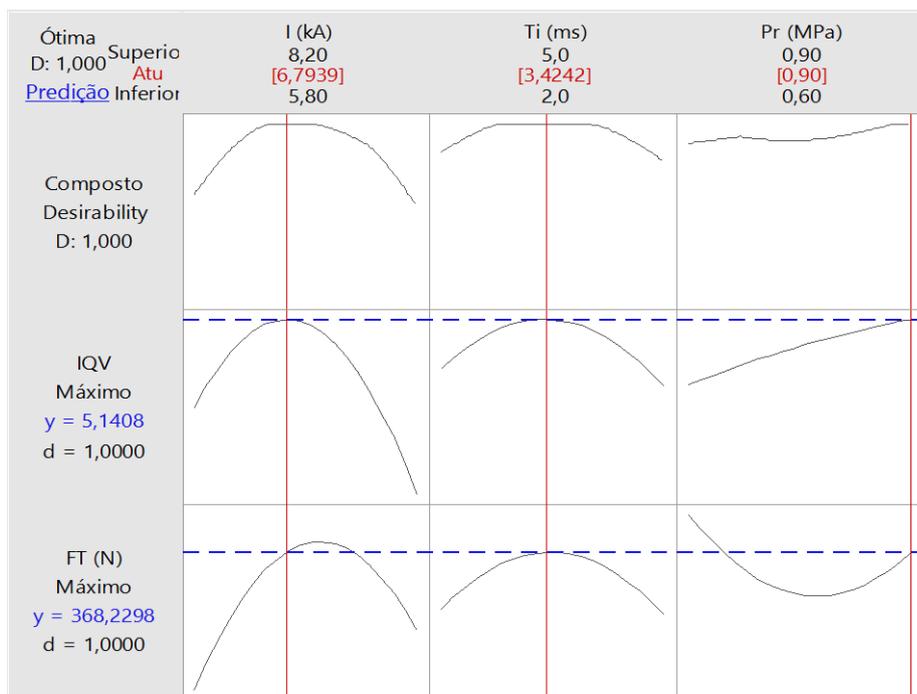
Figura 11 – Gráficos de superfície de resposta para o índice de qualidade visual para os parâmetros: (a) $I \times T_i$, com $P_r = 0,75$ MPa; (b) $I \times P_r$, com $T_i = 3,5$ ms.



Percebe-se pela Fig.11(a) que a região de melhor qualidade visual se encontra entre as correntes de 6,2 a 7,2 kA e tempos de aplicação de 2,5 a 4,5 ms, área essa maior quando comparada à Fig.12(a), demonstrando que mesmo as amostras com ótimo padrão visual não resultaram nas melhores trações. Analisando-se a Fig.11(b), observa-se que a qualidade visual da solda aumenta com o aumento da pressão dos eletrodos, para todos os valores de corrente, estando melhor na faixa de 6,4 a 7,0 kA, na pressão mais alta.

Ademais, pôde-se avaliar o conjunto de fatores que maximizam as respostas das características de qualidade analisadas. Utilizando a ferramenta de otimização pelo método da deseabilidade, do software *Minitab Statistical 20*, foi possível gerar o conjunto de gráficos mostrado na Figura 12, que relaciona os três parâmetros estudados com suas máximas respostas sobre as características de força de tração (FT) e índice de qualidade visual (IQV). Os valores dos parâmetros para essa condição são: corrente de soldagem (I) em 6,79 kA, tempo de aplicação da corrente (Ti) em 3,42 ms e pressão dos eletrodos (Pr) em 0,9 MPa, valores estes que podem ser regulados em máquina para melhoria do processo de soldagem atual.

Figura 12 – Gráficos dos parâmetros que maximizam a força de tração e o IQV.



A validação do conjunto de parâmetros obtidos pelo método acima não pôde ser realizada em tempo hábil, devido a não disponibilidade de maquinário na linha de produção.

5. CONCLUSÃO

No presente trabalho foram avaliados os efeitos dos parâmetros *I*, *Ti* e *Pr* do processo de soldagem por resistência elétrica em solda realizada em subcomponentes de capacitores eletrolíticos sobre a força de tração e inspeção visual, concluindo-se que a corrente de soldagem e o termo quadrático da corrente aplicada têm a influência mais significativa para ambas as características de qualidade, resultando em peças com salpicos e rebarbas de metal solidificado, comprometendo a integridade da solda. As interações de tempo de soldagem e pressão dos eletrodos também representaram parte na proporção dos efeitos. Notou-se ainda

que a qualidade visual da solda aumenta com o aumento da pressão dos eletrodos, para todos os valores de corrente, estando melhor na faixa de 6,4 a 7,0 kA, na pressão mais alta, faixa essa que também compreende a região de melhor resistência à tração para um tempo de soldagem de 3,0 a 4,0 ms e à pressão de 0,75 MPa. Ademais, foi possível determinar o conjunto dos parâmetros que maximizam os resultados, sendo este formado pela corrente de soldagem de 6,79 kA, tempo de soldagem de 3,42 ms e pressão dos eletrodos de 0,9 MPa.

O presente estudo proporciona o desenvolvimento de benefícios para a linha de produção, pois possibilita estabelecer parâmetros a serem controlados, sendo essa uma das premissas principais do setor automotivo, o qual se caracteriza por critérios de qualidade bastante rigorosos. Como ideia para trabalhos futuros acerca do tema, pode-se citar uma análise temporal dos parâmetros estudados a fim de verificar a estabilidade dos mesmos, adicionando o parâmetro de consumo dos eletrodos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AWS. **Welding Handbook, Vol 02: Welding Process, 8^a ed.** American Welding Society. LeJeune Rd, Miami, 1998.

BRACARENSE, A. Q. **Processo de Soldagem por Resistência.** 40f. Monografia de Conclusão de Curso - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.

BRANDI, S.D. **Soldagem por resistência.** In: WAINER, E. *et al.* Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1992.

BUENOS, A. A. et al. **Response Surface Methodology Applied To Measurement Of Stress In Sheets.** VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande, 2010.

DA SILVA, H. A.; DA SILVA, M. B. **Aplicação de um Projeto de Experimentos (DOE) na Soldagem de Tubos de Zircaloy-4.** Rev. Eletrônica Produção & Engenharia, v. 1, n. 1, p. 41-52, set./dez. 2008.

FERREIRA, S. L. C. et al. **Statistical designs and response surface techniques for the optimization of chromatographic systems.** *Journal of chromatography A* 1158.1-2, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.chroma.2007.03.051>>

GIMENES, L.; TREMONTI, M. A. **Influência dos Parâmetros de Soldagem no Formato da Poça de Fusão com Relação à Formação da Macro e Micro estrutura.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação, Departamento de Fabricação da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, Campinas, 1994.

GOMES, S. V. F. **Aplicação do planejamento Box-Behnken na otimização de método de extração de flavonoides usando extração acelerada com solventes (ASE) e quantificação de marcadores químicos por CLAE-DAD-UV em espécies do gênero Passiflora.** Tese de Doutorado. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.

HACKENHAAR, W. **Avaliação da eficiência térmica e de fusão na soldagem MAG em diferentes geometrias de juntas** - Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFRGS, 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/141208>>

INFOSOLDA – **Soldagem do Alumínio e suas Ligas**. 2013. Disponível em: <https://infosolda.com.br/artigos/metalurgia/390-soldagem-do-aluminio-e-suas-ligas> - Acesso em: 17 de fevereiro de 2022.

MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. Editado pelo autor, Porto Alegre, 1996.

MAGDALENA, F. S.; SILVA, V. A. **Análise Simulatória do Processo de Soldagem a Ponto por Resistência em União de Chapas de Aço Baixo Carbono Tipo Intersitial Free**. Projeto final de curso – Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET, Rio de Janeiro, 2014.

MINITAB – **Experimentos de superfície de resposta, centrais compostos e Box-Behnken**. 2018. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/response-surface-designs/response-surface-central-composite-and-box-behnken-designs/> - Acesso em 06 de março de 2022.

MONTGOMERY, D. **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons, Inc. Arizona State University, USA. 8ªEd., 2013.

MOREIRA, P. S. **Efeito da Taxa de Resfriamento e dos Tratamentos Térmicos sobre as Propriedades Mecânicas da Liga Al-Si-Mg (A356.0) Fundida**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, REDEMAT, Ouro Preto, 2011.

NEGREIROS, Y. S. **Estudo da Alteração dos Parâmetros de Solda a Topo por Centelhamento para Aumento de Produção de Bobina a Quente Decapada (BQD)**. Monografia de Conclusão de Curso - Graduação em Eng. Metalúrgica, UFC, Fortaleza, 2014.

OLSON D.L. et al. **ASM handbook. 9th ed.** ASM International. Welding, Brazing and Soldering, vol. 6, Ohio, 1983.

PINHEIRO, H. J. G. **Estudo da Correlação entre a Corrente de “Shunt” e a Feometria do Ponto de Solda em Função do Espessamento, em Chapa de Aço de Baixo Teor de Carbono e Espessura de 0,8 mm**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia Industrial, Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Salvador, 2011.

SANTOS, F.B.; MAINIER, F.B. **Variáveis Relevantes para a Qualidade do Processo de Soldagem de Pontos por Resistência Elétrica Utilizado na Indústria Automobilística**. III Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, Rio de Janeiro, 2006.

SANTOS, W. A. **Estudo da Influência dos Parâmetros de Regulagem na Soldagem por Resistência na Indústria Automobilística**. Trabalho de conclusão de curso – Pós Graduação em Especialização em Engenharia de Soldagem. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2013.

TURETTA, I. **Análise do Desgaste de Eletrodos de Solda por Resistência a Ponto em Função do Número de Pontos Soldados em Chapas Galvanizadas**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2016.

APÊNDICE A

A Tabela 3 expõe os critérios avaliados e considerados na classificação do Índice de Qualidade Visual para análise dos ensaios.

Tabela 3 – Critérios para o Índice de Qualidade Visual

IQV	Descrição	Exemplo
1	Solda com base muito pequena ou com grandes e muitas rebarbas e salpicos	
2	Solda com base pequena ou com poucas rebarbas e salpicos	
3	Solda com base um pouco pequena e/ou com poucas rebarbas	
4	Solda com base conforme e/ou com pequenas rebarbas	
5	Solda com base perfeitamente conforme sem rebarbas ou salpicos	

APÊNDICE B

As Tabelas 4 e 5 exibem os quadros completos de análise de variância (ANOVA) sobre as respostas avaliadas.

Tabela 4 – Análise de variância dos parâmetros *I*, *Ti* e *Pr* sobre a força de tração (FT)

Fonte	GL	Soma quadrados Seq	Contribuição	Soma quadrados (Aj.)	Média quadrados (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	9	164362	82,20%	164362	18262,5	2,57	0,156
I (kA)	1	1200	0,60%	1200	1200,5	0,17	0,698
Ti (ms)	1	98	0,05%	98	98,0	0,01	0,911
Pr (MPa)	1	2312	1,16%	2312	2312,0	0,32	0,593
I (kA)*I (kA)	1	94722	47,37%	93492	93492,1	13,14	0,015
Ti (ms)*Ti (ms)	1	28814	14,41%	24601	24600,5	3,46	0,122
Pr (MPa)*Pr (MPa)	1	25975	12,99%	25975	25975,4	3,65	0,114
(MPa)							
I (kA)*Ti (ms)	1	110	0,06%	110	110,3	0,02	0,906
I (kA)*Pr (MPa)	1	11130	5,57%	11130	11130,2	1,56	0,266
Ti (ms)*Pr (MPa)	1	0	0,00%	0	0,2	0,00	0,996
Erro	5	35581	17,80%	35581	7116,2		
Falta de ajuste	3	35539	17,77%	35539	11846,3	564,11	0,002
Erro puro	2	42	0,02%	42	21,0	*	*
Total	14	199943	100,00%				

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)
84,3576	82,20%	50,17%	568718	0,00%

Tabela 5 – Análise de variância dos parâmetros *I*, *Ti* e *Pr* sobre o Índice de Qualidade Visual (IQV)

Fonte	SQ Seq	GDL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	Contribuição
Modelo	22,9833	9	22,9833	2,5537	2,36	0,179	80,93%
I (kA)	6,1250	1	6,1250	6,1250	5,65	0,063	21,57%
Ti (ms)	0,1250	1	0,1250	0,1250	0,12	0,748	0,44%
Pr (MPa)	2,0000	1	2,0000	2,0000	1,85	0,232	7,04%
I (kA)*I (kA)	11,6679	1	12,4103	12,4103	11,46	0,020	41,08%
Ti (ms)*Ti (ms)	2,5398	1	2,5641	2,5641	2,37	0,185	8,94%
Pr (MPa)*Pr (MPa)	0,0256	1	0,0256	0,0256	0,02	0,884	0,09%
I (kA)*Ti (ms)	0,0000	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000	0,00%
I (kA)*Pr (MPa)	0,2500	1	0,2500	0,2500	0,23	0,651	0,88%
Ti (ms)*Pr (MPa)	0,2500	1	0,2500	0,2500	0,23	0,651	0,88%
Erro	5,4167	5	5,4167	1,0833			19,07%
Falta de ajuste	4,7500	3	4,7500	1,5833	4,75	0,179	16,73%
Erro puro	0,6667	2	0,6667	0,3333	*	*	2,35%
Total	28,4000	14					100,00%

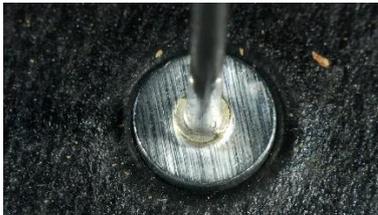
Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)
1,04083	80,93%	46,60%	77,5	0,00%

APÊNDICE C

A Tabela 6 exibe as imagens de todos os ensaios realizados.

Tabela 6 – Imagens de avaliação dos ensaios realizados

Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
		
Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6
		
Ensaio 7	Ensaio 8	Ensaio 9
		
Ensaio 10	Ensaio 11	Ensaio 12
		
Ensaio 13	Ensaio 14	Ensaio 15
		