

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Helio Maciel Junior

**USO DO PLANEJAMENTO E ANÁLISE DE
EXPERIMENTOS NO DESENVOLVIMENTO DE
UM PROCESSO DE SOLDA POR RESISTÊNCIA
ELÉTRICA DE PEQUENA ESCALA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia de Produção

Orientador: Prof. João Batista Turrioni, Dr.

Co-orientador: Prof. Sebastião Carlos da Costa, Dr.

Outubro de 2011

Itajubá

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Cristiane Carpinteiro- CRB_6/1702

M152u

Maciel Junior, Helio

Uso do planejamento e análise de experimentos no desenvolvimento de um processo de solda por resistência elétrica de pequena escala, planejamentos fatoriais. / por Helio Maciel Júnior. – Itajubá (MG): [s.n.], 2011. 66p.; il

Orientador: Prof. Dr. João Batista Turrioni.

Coorientador: Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, 2011.

1. Solda por resistência elétrica de pequena escala. 2. Planejamento de experimentos. 3. União de cabos de cobre multifilares. I. Turrioni, João Batista, orient. II. Costa, Sebastião Carlos da, coorient. III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

Dedico este trabalho à meus pais,
Helio Maciel e Elza Helena Silva Maciel
Sem os quais jamais chegaria ao ponto de desenvolver este trabalho
Agradeço imensamente a dedicação e amor de toda uma vida

AGRADECIMENTO

Primeiramente a Deus pela oportunidade de desenvolver este trabalho e por me dado sabedoria e força para a conclusão do mesmo. Tudo posso naquele que me fortalece. Obrigado meu Deus.

Aos meus pais, Helio Maciel e Elza Helena S. Maciel pelo apoio verdadeiro e entusiasmo constante ao desenvolvimento deste trabalho.

À Grasieli Valentim Rocha pelas inúmeras revisões gramáticas durante a escrita do texto.

À Marcelo Machado Fernandes, amigo e companheiro de pesquisa. Essencial ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos do laboratório de Validações.

À Universidade Federal de Itajubá, especialmente o departamento de Engenharia de Produção, pela oportunidade de capacitação.

Ao Prof. João Batista Turrioni pelo direcionamento e orientação deste trabalho e por acreditar deste o início no sucesso desta empreitada.

Ao Prof. Sebastião Carlos da Costa, por seu incrível talento à motivação e orientação, o que foi absolutamente decisivo a conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos e familiares, que direta e indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um processo de solda por resistência elétrica de pequena escala. Este desenvolvimento foi realizado em parceria com uma empresa do setor de autopeças. O desenvolvimento permitiu a união de cabos de cobre multifilares a terminais metálicos de latão, ambos de pequenas dimensões. O principal objetivo foi identificar os fatores de controle que mais influenciavam o processo e também criar um modelo matemático que correlacionassem os fatores de entrada com as variáveis de resposta. Dentre os vários fatores que envolvem o processo, foram analisados a corrente, tempo de solda, pressão e tempo de pré-pressão. Para a condução dos estudos utilizou-se técnicas de planejamento e análise de experimentos. Nas fases iniciais foram utilizados planejamentos fatoriais 2^n e metodologia de superfície de resposta na fase de otimização. Foi possível identificar que os fatores mais significativos para o processo são o tempo e a corrente de solda. A pressão mostrou-se menos significativa, porém ela deve ser ajustada num ponto intermediário, não podendo ser muito baixa, fazendo com que se tenha uma área inadequada de contato, nem muito elevada provocando a expulsão do material fundido. Após a otimização, realizou-se um teste confirmatório utilizando os níveis encontrados no modelo de otimização. O processo apresentou uma capacidade (Cpk) de 2,18.

Palavras-chave: Solda por resistência elétrica de pequena escala, planejamento de experimentos, planejamentos fatoriais, metodologia de superfície de resposta.

ABSTRACT

This work presents a small scale resistance welding process development. The development was done in cooperation with a auto parts industry. The development allowed joining copper wire cables to brass electrical terminals, both by small dimensions. The main objective was to identify the controllable factors with more influence in the process and also build a mathematic model to correlate inputs controllable factors with output variables. By the many process factors, were analyzed the current, welding time, pressure and pre-pressure time. To conduct the studies was used the Design of Experiments techniques. During the initial phases was used 2ⁿ Factorial designs and in the optimization phase the response surface methodology. Was identified the main factors are the current and welding time. The pressure presented less significant but it needs to be set in a intermediate point, reduced pressures don't allow a adequate contact area, and excessive pressures causes a melt material expulsion. After the optimization, was performed a confirmatory study using the factors levels find out by optimization model. The process presented a capability (Cpk) at 2,18.

Key-words: Small Scale Resistance Welding (SSRW), Designs of Experiments (DOE), Factorial Designs, Response Surface Mythology (RSM).

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

α → Nível de significância

β → Coeficientes do polinômio

ε → Erro experimental

AC – Corrente Alternada, do inglês – Alternate Current.

ANOVA – Análise de Variância, do inglês – Analyze of Variance

CTE - Coeficiente de Expansão Térmica

Cpk – Índice da capacidade do processo

DC – Descarga Capacitiva

DOE – Planejamento de Experimentos, do inglês - *Design of Experiments*

kVA – Kilovolt – Amper

OFAT – Um Fator Por Vez, do inglês - *One Factor at the Time*

PROCONVE - Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores

RB- Resistência do corpo, do inglês - Resistance Bulk.

RC- Resistência de contato

SSRW – Solda à Resistência de Pequena Escala, do inglês - *Small Scale Resistance Welding*

ZTA – Zona Termicamente Afetada

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Metodologia de pesquisa.	5
Figura 2.1- Interações entre fenômenos elétrico, térmico, metalúrgico e mecânicos.	7
Figura 2.2 - Esquema das resistividades em um conjunto de solda.	8
Figura 2.3 - Esquema de uma máquina de solda por resistência elétrica	11
Figura 2.4 – Geometria dos eletrodos.....	15
Figura 2.5 - Programa básico de solda.	18
Figura 2.6 - Formas de disposição dos eletrodos.	21
Figura 2.7: Sequencia de testes para validação de resistividade elétrica.....	23
Figura 2.8 - Fatores componentes de um processo.....	27
Figura 2.9 - Representação gráfica de um Central Composite Design.....	31
Figura 2.10 - Superfície de resposta tridimensional plana	32
Figura 2.11 - Superfície de resposta tridimensional não plana.....	32
Figura 3.1 - Cabo de cobre multifilar (7 filamentos- diâmetro de 0,35mm).	34
Figura 3.2 - Terminal e cabo multifilar.	34
Figura 3.3 – Fatores de controle	38
Figura 3.4 - Geometria do eletrodo <i>versus</i> área de contato	40
Figura 3.5 - Configuração de montagem dos eletrodos.....	41
Figura 3.6 - Gráfico linear dos efeitos principais (Primeiro Experimento).....	46
Figura 3.7 - Gráfico linear dos efeitos principais com ponto central (segundo experimento) .	52
Figura 3.8 – Gráfico das interações dos fatores.....	53
Figura 3.9 - Efeitos principais dos fatores -corrente e tempo- na resistência da conexão soldada.....	57
Figura 3.10 - Efeito da corrente e tempo na resistência da solda.	58
Figura 3.11 - Gráfico de contorno.	59
Figura 3.12 - Análise de capacidade do processo.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Autores versus fatores do processo de solda por resistência elétrica	36
Tabela 3.2 - Classificação da dificuldade de controle dos parâmetros de entrada.	37
Tabela 3.3 - Níveis de testes dos fatores de controle (Primeiro DOE).....	42
Tabela 3.4 – Matriz Experimental (Fatorial Completo e 1 replicação).....	43
Tabela 3.5 - Resultados do teste de tração (Primeira rodada)	44
Tabela 3.6 – Efeitos Estimados e coeficientes para tração (Primeiro DOE).....	45
Tabela 3.7 - Fatores e níveis de testes dos fatores (Segundo DOE).....	48
Tabela 3.8 - Matriz experimental (Fatorial Completo, 1 replicação e 1 ponto central).	49
Tabela 3.9 - Resultados do teste de tração (segundo experimento).....	50
Tabela 3.10- Efeitos Estimados e coeficientes para tração (segundo experimento)	51
Tabela 3.11 - Fatores e níveis de testes dos fatores (terceiro experimento).....	55
Tabela 3.12 - Matriz experimental (Superfície de Resposta)	55
Tabela 3.13- Efeitos Estimados e coeficientes para tração (terceiro experimento).....	56
Tabela 3.14 - Otimização realizada.	58

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Justificativas do trabalho	3
1.4 Método de pesquisa	4
1.5 Estrutura do trabalho	5
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	6
2.1 Características do Processo de solda por resistência elétrica	6
2.2 Princípios do Processo.....	6
2.3 Características da Soldagem por Resistência Elétrica.....	9
2.4 Equipamentos de Solda por Resistência Elétrica	11
2.4.1 Sistemas elétricos	11
2.4.2 Sistemas Mecânicos.....	13
2.4.3 Sistemas de Controle	16
2.5 Solda por Resistência Elétrica de Pequena Dimensão	16
2.6 Fatores de Controle do Processo de Solda por Resistência Elétrica.....	18
2.7 Validação do Processo.....	21
2.7 Projeto e Análise de Experimentos.....	24
2.7.1 Planejamento e análise de experimentos no desenvolvimento de projetos	24
2.7.2 Conceitos básicos de projeto e análise de experimentos	26
2.7.3 Etapas para a condução do experimento.....	28
2.7.4 Planejamentos Fatoriais 2 ⁿ	29
2.7.5 Método da Superfície de Resposta	29
3. PESQUISA EXPERIMENTAL	33
3.1 Introdução	33
3.2 A empresa	33
3.3 Objeto de estudo	33
3.4 Desenvolvimento da Pesquisa Experimental.....	34
3.4.1 Definição dos objetivos do primeiro experimento.	35
3.4.2 Levantamento dos fatores de controle do primeiro experimento.	35
3.4.3 Seleção dos fatores de controle.	36
3.4.4 Adequação do equipamento e demais fatores de controle.....	39
3.4.5 Seleção dos níveis dos fatores de controle	41
3.4.6 Seleção da variável de resposta para o experimento inicial	42
3.4.7 Seleção da matriz experimental.....	42
3.4.8 Seleção da matriz experimental.....	42
3.4.9 Processamento das amostras.....	43
3.4.10 Análise dos resultados	44
3.4.11 Interpretação dos Resultados	47
3.5 Segunda Rodada Experimental.....	47
3.5.1 Definição do objetivo do experimento	47
3.5.2 Seleção dos fatores de controle	47
3.5.3 Seleção dos níveis dos fatores de controle	48
3.5.4 Seleção das variáveis de resposta	48
3.5.5 Seleção da matriz experimental.....	48
3.5.6 Processamento das amostras.....	49

3.5.7	Análise dos dados	50
3.5.8	Interpretação dos Resultados	52
3.6	Experimento de Otimização	54
3.6.1	Seleção dos fatores de controle	54
3.6.2	Seleção dos níveis dos fatores de controle	54
3.6.3	Seleção da matriz experimental	55
3.6.4	Adequação e ajuste do modelo	55
3.6.5	Análise dos resíduos	56
3.6.6	Análise dos efeitos principais dos fatores.....	56
3.6.7	Análise dos efeitos das interações entre os fatores.....	57
3.7	Experimento de Validação.....	59
4.	CONCLUSÕES.....	62
4.1	Conclusões gerais	62
4.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	63

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Este trabalho relata o desenvolvimento de um processo de fabricação dentro de uma indústria de autopeças. Sabe-se que a indústria automobilística é um setor de grande influência econômica que possui grande concorrência, no qual montadoras bem como seus fornecedores são continuamente desafiados a fornecer produtos com qualidade, baixo custo e melhor eficiência (GANGUE et. al, 2004). Mais recentemente, fatores relacionados ao meio ambiente e a segurança, entraram em cena, requerendo ainda mais esforços de desenvolvimento tecnológico. Cada vez mais os países pressionam as indústrias automotivas por meio de legislações rígidas na área de segurança e meio ambiente.

Na área ambiental existem iniciativas internacionais como, por exemplo, o Protocolo de Kyoto, que visa limitar a emissão de CO₂, como iniciativas nacionais como o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE). Segundo Gangue et. al. (2004), todos os envolvidos com projeto e fabricação de veículos vivem num ambiente caracterizado pela “ebulição” de novas ideias, nas áreas de materiais e processos. De acordo com estes autores é crescente a necessidade de se produzir automóveis mais leves, econômicos, recicláveis e menos poluentes, levando dessa forma a indústria automobilística a modificar seus projetos e processos de fabricação. Será, portanto, fundamental a otimização dos sistemas utilizados em novos veículos.

Dentro deste cenário o presente trabalho mostra o desenvolvimento de um processo de fabricação que visa atender novas especificações de um produto que foi redimensionado para atender a necessidade de redução de peso. O produto é formado por cabos multifilares de cobre com terminais metálicos de latão em suas extremidades. Uma das soluções encontradas para promover a redução do peso do sistema é a redução das bitolas dos cabos. Porém, o processo de fabricação que promove a união destes começa a chegar a sua barreira tecnológica à medida que as dimensões dos cabos vão sendo reduzidas. Para isto foi necessário estudar processos alternativos para a união dos terminais metálicos junto aos cabos multifilares. Muitos processos foram pesquisados como, por exemplo, soldagem a laser, brasagem e solda por resistência elétrica. Dentre estes processos, o processo de solda por resistência elétrica em uma fase inicial se apresentou com o potencial mais adequado para atender os requisitos de produto e processo. Entretanto, nesta fase inicial de definição do processo de solda por resistência elétrica de pequena escala como um processo disponível

para a união de cabos e terminais metálicos, vários aspectos do produto e processo precisavam serem estudados no desenvolvimento e aplicabilidade da soldagem dos componentes em questão. Considerando as dificuldades no desenvolvimento e desconhecimento do processo a ser aplicado, o presente trabalho mostra a utilização de técnicas de planejamento e análise de experimentos, nas fases iniciais de desenvolvimento de um processo.

Vários autores como como Flesch (2002), Ross (1991), Rowlands & Antony (2003) e Montgomery (2005), reportam vários benefícios da aplicação de técnicas de planejamento e análise de experimentos durante o desenvolvimento de produto/processo. Os principais benefícios relatados são:

- Identificação dos fatores que mais influenciam nas respostas.
- Ajustes ótimos dos parâmetros de produto e processo.
- Obtenção de produtos robustos em relação às variações decorrentes do próprio processo de fabricação, meio ambiente e usuário.
- Economia na utilização dos recursos do experimento.

Segundo Ross (1991), um enfoque especial deve ser dado às etapas iniciais do desenvolvimento, pois atividades de controle da qualidade aplicadas nestas fases proporcionam impactos positivos sobre os custos. Para o autor, após definido o projeto do produto (materiais, partes, parâmetros, tolerâncias) e meios produtivos (processos, máquinas, métodos), torna-se mais difícil e oneroso às alterações e correções. A substituição de produtos que já estão em posse do cliente, gera muitos custos, tanto tangíveis (custo de substituição das peças, mão de obra) como intangíveis (insatisfação do cliente e a perda da credibilidade da marca, etc.).

Ressalta-se que a utilização deste tipo de processo é algo incomum para esse tipo de união, devido aas especificidades das partes (cabos multifilares de cobre e terminais de latão).

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivos principais:

- Identificar os fatores de controle que mais influenciam o processo de solda por resistência elétrica de pequena escala;
- Obter uniões que atendam o requisito de resistência à ruptura de no mínimo 60 Newtons;
- Obter modelos matemáticos que correlacionem os fatores de controle do processo com a resistência a ruptura da união;
- Encontrar o ponto ótimo de ajuste dos fatores de controle do processo (ajuste que

proporcione o maior valor de resistência à ruptura);

- Desenvolver um processo que tenha uma boa capacidade (C_{pk} maior que 1,65).

Para atingir estes objetivos principais, alguns objetivos intermediários foram fixados:

- Adaptar e analisar a possibilidade de utilização de um equipamento convencional de solda por resistência elétrica para a aplicação em união em soldas de pequena escala;
- Identificar novos materiais para os eletrodos que permitissem a soldagem de cabos multifilares de cobre a terminais de latão sem ocasionar danos aos eletrodos;
- Identificar a melhor geometria dos eletrodos para a execução das uniões.

1.3 Justificativas do trabalho

Segundo Rogeon et al. (2008), embora o processo de solda por resistência elétrica pareça simples é na verdade bastante complexo, devido a combinação e interação de vários fenômenos como elétrico, térmico, metalúrgico e mecânico. O processo torna-se ainda mais complexo quando este é aplicado a peças de pequenas dimensões (espessuras menores que 0,5mm). De acordo com Chang e Zhou (2003), a prática de “redução de escala” dos parâmetros de processo aplicados em soldas de grandes dimensões, não pode ser transposta para as soldas de pequenas dimensões, devido às diferenças que existem entre elas, necessitando de estudos específicos para estas aplicações. Segundo Fujiawara (2008), apesar da crescente demanda pela utilização do processo de solda por resistência elétrica, ainda existem poucas pesquisas que exploram soldas de pequena espessura, sendo a maior parte dos trabalhos desenvolvidos direcionada para aplicações de grandes dimensões (espessuras maiores que 0.5mm). Para Tan et al. (2004), existe uma falta de entendimento para soldas por resistência elétrica deste tipo, denominados de “pequena escala”.

Outro fator de atenção para a realização destas uniões são os materiais a serem trabalhados. A união dissimilar de cabos multifilares de cobre a terminais de latão envolve dois materiais com características distintas. O cobre e suas ligas possuem alta condutividade elétrica e térmica, fazendo com que possua baixa soldabilidade através do processo de soldagem por resistência elétrica. Por outro lado, os terminais possuem revestimento de zinco que durante processo de união podem causar problemas nas propriedades da solda dificultando ainda mais o processo (WU et al. 2008).

Diante desta complexidade, fica muito difícil a obtenção de informações significativas através de experimentos isolados, fazendo do processo um cenário ideal para a aplicação de técnicas e métodos estatísticos. A utilização de técnicas estatísticas tem o potencial de permitir um maior entendimento do processo e um desenvolvimento mais eficiente em sua

aplicação industrial com a realização de um número pequeno de experimentos.

1.4 Método de pesquisa

Estudos realizados por Gil (1988) e Miguel et.al. (2010), mostram que toda a pesquisa e/ou trabalho científico pode ser classificado de acordo com os objetivos propostos e formas utilizadas para se encontrar as respostas. Existem, no entanto, várias formas classificações das pesquisas, estas variam de acordo com os objetivos e formas de abordar o problema deste trabalho. Uma pesquisa pode ser classificada conforme sua natureza, abordagem do problema, objetivos da pesquisa e procedimentos técnicos. Segundo estes itens esta pesquisa pode ser classificada da seguinte maneira:

- Conforme a natureza: Ela é uma pesquisa aplicada tendo em vista que objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas do processo de solda por resistência elétrica de pequena escala.
- Conforme a abordagem do problema: Ela é uma pesquisa quantitativa, pois as informações podem ser quantificáveis, ou seja, podem ser traduzidas em números para que podem ser classificados e analisados. Esta abordagem utiliza recursos e técnicas estatísticas.
- Conforme os objetivos da pesquisa: É uma pesquisa explicativa pois, visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência do fenômeno. Ela aprofunda o conhecimento da realidade explicando a razão das coisas. Nesses estudos, vários métodos são utilizados como meio científico de validar ou rejeitar as hipóteses formuladas.
- Conforme os procedimentos técnicos: É uma pesquisa experimental, possui um objeto de estudo, variáveis capazes de influenciá-la, formas definidas de controle e capacidade de observar o efeito que estas variáveis de entrada provocam nas de saída. Com ela é possível realizar testes e verificar as consequências das ações promovidas. A experimentação tem como característica a facilidade de estabelecimento da relação de causa *versus* efeito, identificando quando uma variável exerce efeito sobre a outra.

A principal técnica estatística utilizada neste trabalho é a de planejamento de experimentos. A **Figura 1.1** mostra um esquema gráfico das etapas de pesquisa realizadas na presente dissertação. Elas se adéquam ao método de pesquisa experimental descrita na literatura por Gil (1988) e autores que estudam as técnicas de planejamento e análise de experimentos como Antony et al. (1998) e Montgomery (2005). As etapas deste processo serão abordadas com maiores detalhes no Capítulo 3.

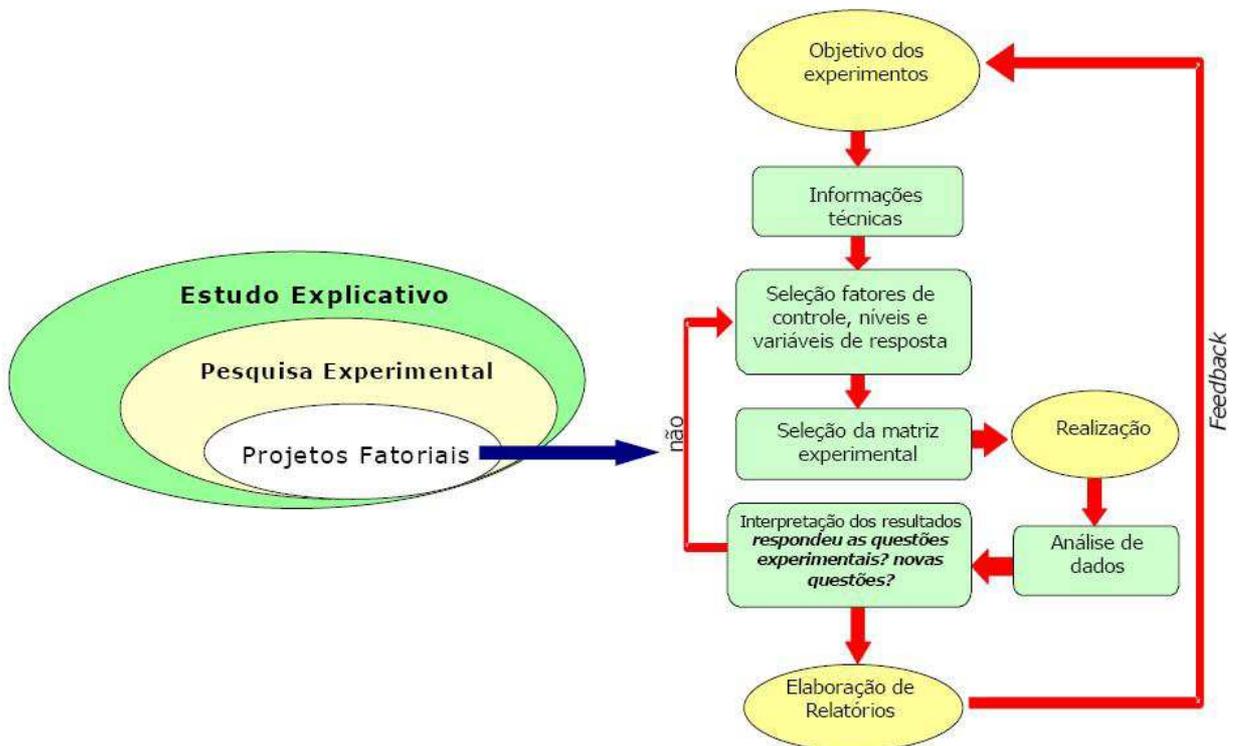


Figura 1.1 - Metodologia de pesquisa.
 Fonte: Adaptado de Haaland et. al. (1993) e Antony et al. (1998)

1.5 Estrutura do trabalho

O trabalho está estruturado em cinco capítulos. Os quatro capítulos subsequentes a este tratam dos seguintes assuntos:

- Segundo capítulo: Apresentará uma revisão sobre o processo de soldagem à resistência elétrica, definindo o processo em si, suas utilizações, aplicações para pequenas dimensões, equipamentos, fatores de controle, programas de solda e formas de validação. Nesse capítulo será ainda abordada a fundamentação teórica sobre planejamento e análise de experimentos e temas que dizem respeito às aplicações, planejamentos fatoriais e metodologia de superfície de resposta.
- Terceiro capítulo: Este capítulo apresentará a pesquisa realizada, os experimentos, os resultados obtidos e análises. Serão apresentados todos os passos da pesquisa, que vão desde a definição dos objetivos, passando pela definição e seleção dos fatores de entrada, seleção da matriz experimental, execução do experimento e análise dos resultados. Será exposto também à utilização de ferramentas para a otimização das respostas, e por fim experimentos confirmatórios.
- Quarto capítulo: Este capítulo apresentará as conclusões do trabalho e recomendações e propostas para futuros trabalhos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Características do Processo de solda por resistência elétrica

O processo de solda por resistência elétrica é utilizado há muitos anos como um dos principais processos para a união de peças metálicas, em vários setores industriais, com destaque para a indústria automotiva e aeroespacial. Ultimamente tem se verificado um crescente interesse pela utilização do mesmo na fabricação de componentes eletrônicos, sendo este tipo de aplicação comumente denominado de “pequena escala”, dado a pequena espessura dos componentes a serem unidos (WU et. al 2008).

Vários autores como Yi et, al (2008), Rogeon et al (2007), Goodarzi et. Al. (2009), Aslanlar et. Al. (2008), Martín (2008), Chen e Farzon (2006), Colombari (2004), relatam diversas vantagens na utilização do processo, tais como:

- Possui alta taxa de produção;
- Indicado para soldar chapas finas;
- Fácil operação;
- Apresenta excelente flexibilidade;
- Manutenção fácil e barata;
- Não necessita uso de consumíveis, como materiais de brazagem, ou eletrodos de solda;

Quando a solda é executada corretamente, não há a necessidade de acabamento final na união soldada, porque, este processo, não produz escória nem respingo. Uniões realizadas por ele, oferecem maior resistência à vibrações quando comparada com uniões rebitadas ou parafusadas. Para Martín (2008), todas estas características fazem desde processo uma tecnologia bastante adequada para a produção em massa.

2.2 Princípios do Processo

O nome de solda por resistência elétrica deriva do fato de que a resistência das peças a serem soldadas e dos eletrodos, são combinados para gerarem calor em suas interfaces, podendo, portanto, ser definido como um processo de geração de calor. A corrente passa dos eletrodos para as peças a serem soldadas devido ao efeito Joule, permitindo a geração de calor. O cálculo do calor gerado é bastante simples, a quantidade de calor gerada depende principalmente de três fatores:

- Corrente de solda (I)
- Resistência elétrica do conjunto (R)

- Duração da corrente (t)

A fórmula geral é dada pela Lei de Joule :

$$Q = RI^2 t \quad (1)$$

onde, I é dado em Ampere, R é dado em Ohms e t em milissegundos.

O fluxo de corrente deve permanecer até que as superfícies desenvolvam calor suficiente para atingirem o ponto de fusão. No momento em que a interface superfície/superfície (S/S) atinge o ponto de fusão dos materiais, a poça de fusão (lentilha de solda) começa a se formar e crescer, quando o fluxo de corrente é interrompido, a poça de solda se solidifica e une as superfícies das peças.

Em escala microscópica, o processo ocorre da seguinte maneira: os metais apresentam superfícies rugosas, quando as superfícies destes são forçadas a ficar juntas formam-se alguns pontos de contato. Nos pontos onde a pressão de contato é suficientemente alta, quebra-se a camada de óxido, formando-se um número limitado de pontes de metal-metal. A corrente de solda passa dos eletrodos para a junta, sua continuidade é garantida pela força aplicada pelos eletrodos que gera as pontes e produz uma densidade de corrente necessária para que ocorra a solda. As primeiras pontes fundem-se e entram em colapso, novos picos entram em contato, assim novas pontes são formadas gerando novos caminhos de corrente. A resistividade do metal fundido é maior que das pontes metal-metal, deste modo, a corrente flui através das pontes. Este processo acontece até que todo material seja fundido. Quando a corrente para, os eletrodos rapidamente se resfriam e o metal fundido se solidifica, formando a solda.

Segundo Chang & Zhou (2003) e Rogeon et al (2008), a solda por resistência elétrica é um processo complexo, devido à combinação e interação de vários fenômenos (elétricos, térmicos, metalúrgicos e mecânicos) conforme mostrado na **Figura 2.1**.

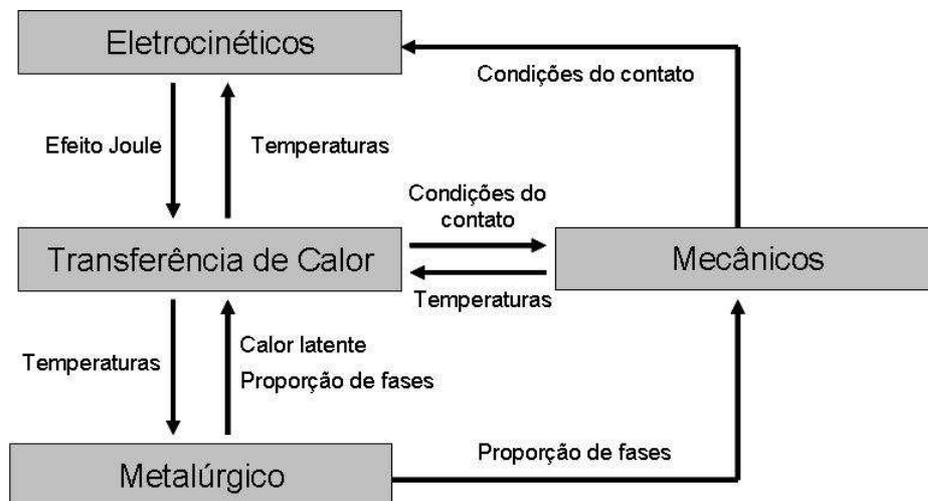


Figura 2.1- Interações entre fenômenos elétrico, térmico, metalúrgico e mecânicos.

Fonte: Feulvarch et al, (2004).

Para compreender como funciona a geração de calor, é necessário primeiro conhecer as resistências existentes numa junta de solda. Chang e Zhou (2003), classificam a existência de pelo menos sete resistências conectadas em série em uma solda. Quais sejam: duas resistências do núcleo dos eletrodos, duas resistências do núcleo das peças, duas resistências de contato eletrodo superfície e uma resistência de contato entre a superfície das peças. A **Figura 2.2** mostra as pontos de resistência de uma junta de solda.

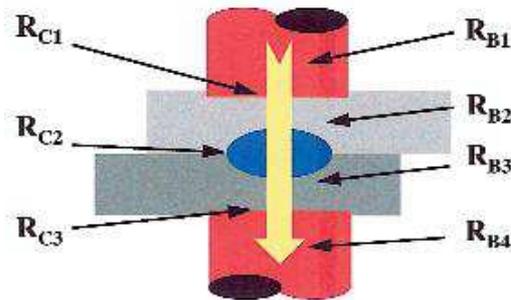


Figura 2.2 - Esquema das resistividades em um conjunto de solda.

Onde;

- $RB1$ e $RB4$: Representam a resistência elétrica do material dos eletrodos.
- $RC1$ e $RC3$: São as resistências do contato entre o eletrodo e a base do metal. A magnitude destas resistências depende da condição da superfície da base do eletrodo, do tamanho e do contorno da face do eletrodo e da pressão aplicada nos eletrodos. Este é um ponto de alta geração de calor, mas a superfície da base do metal não chega a temperatura de fusão durante a passagem da corrente, devido a alta condutividade térmica dos eletrodos e ao fato que estes são, geralmente, refrigerados.
- $RB2$ e $RB3$: Indicam a resistência dos materiais a serem soldados. É diretamente proporcional à sua resistividade e espessura e inversamente proporcional à área da secção por onde a corrente irá passar.
- $RC2$: É a resistência na interface dos metais, local onde a solda deve ser formada. Esse é o ponto de maior resistência e, portanto, o ponto de maior geração de calor. Como o calor também é gerado nas áreas de interface dos materiais e eletrodos ($C1$ e $C3$), o calor gerado na interface $RC2$ não é imediatamente dissipado pelos eletrodos. Os eletrodos e as peças possuem valores bem definidos de resistividade elétrica, que são uma função da propriedade dos materiais. Contudo, segundo Chang e Zhou (2003), as resistências de contato das interfaces eletrodo/peça e peça/peça não são bem definidas. O calor é gerado em todos os lugares da junta de solda e não apenas nas interfaces, no

entanto o calor necessário para solda é apenas o da interface dos metais. Dessa maneira, o calor gerado nas demais regiões deverá ser minimizado. Entretanto, este controle é muito difícil, fazendo com que apareçam Zonas Termicamente Afetadas (ZTA) no material soldado. A ZTA é a região que se encontra próximo ao ponto de solda, a qual apresenta suas propriedades alteradas devido ao calor gerado. Estas alterações podem ser benéficas ou não. Em geral, o objetivo de uma boa solda é minimizar a ZTA. Segundo Vural et al. (2006), as trincas por fadiga iniciam no interior das zonas termicamente afetadas, sendo muito importante o conhecimento da taxa de crescimento de trincas, para que se possa determinar o tempo de manutenção da solda antes da sua falha. Estudos de Rathbun e Matlock (2003), permitiram verificar o desempenho a fadiga para chapas soldadas pelo processo de resistência elétrica mostrando que a mesma é mais afetada pelos fatores geométricos do que pela microestrutura do material.

2.3 Características da Soldagem por Resistência Elétrica

Para a realização de uma boa solda é fundamental o conhecimento das características dos materiais que estão sendo trabalhados. A seguir são apresentadas algumas das principais características:

- Resistividade do material: Em geral, existem duas categorias de materiais a serem soldadas, os condutivos (cobre, prata, ouro) e os resistivos (aço, níquel, titânio, tungstênio, molibdênio). Materiais com maior resistência elétrica produzem maior quantidade de calor e assim melhores soldas. Materiais condutivos como, por exemplo, o cobre, requererem alta corrente para produzirem a mesma quantidade de calor.
- Condutividade térmica: Materiais com alta condutividade térmica (exemplo: cobre), apresentam alta condutividade elétrica. O calor gerado em materiais altamente condutivos termicamente, é rapidamente conduzido para fora da região da solda. Materiais metálicos apresentam uma correlação direta entre condutividade térmica e elétrica.
- Expansão térmica: Materiais maleáveis exibem um alto coeficiente de expansão térmica (CET), entretanto materiais mais duros, como por exemplo, tungstênio, apresentam, de forma geral, um baixo coeficiente de expansão. Os coeficientes de expansão térmica diferentes entre as peças trabalhadas, podem resultar em um acúmulo de forças residuais na junta. Estas quando submetidas a esforços, podem falhar com baixos valores de força de tração.

- Faixa de temperatura plástica: É a faixa de temperatura na qual cada material pode ser facilmente deformado sobre aplicação de força. O aço e suas ligas exibem uma ampla faixa de temperatura plástica, portanto, são de mais fácil controle para uniões fundidas. Elementos naturais como cobre e alumínio exibem uma estreita faixa de temperatura plástica, requerendo controles precisos de temperatura, a fim de evitar fusão excessiva.
- Polaridade: Se alguma das interfaces do conjunto de solda (interfaces entre os eletrodos e peças ou entre peças) for composta de materiais dissimilares, esta irá aquecer ou resfriar dependendo da polaridade do potencial aplicado. Este efeito é dominante somente nos primeiros momentos da soldagem. Entretanto, é mais dominante para soldas de curta duração, afetando a qualidade da solda e o desgaste dos eletrodos. Este efeito da polaridade pode ser minimizado ou controlado através do uso de diferentes valores de força nos eletrodos e/ou alternando a polaridade durante a solda.
- Rugosidade da Superfície: Segundo Wu et al. (2008), nos estágios iniciais do crescimento da lentilha de solda, a condição da superfície das peças tem um impacto dominante na resistência de contato. Se alguma condição da superfície impede o contato adequado entre cada uma das peças e entre estas e os eletrodos, isto irá inibir a realização de boas soldas. A rugosidade pode gerar áreas localizadas de superaquecimento, aderência do eletrodo ou expulsão de material.
- Contaminação de óxidos: Causam dificuldades para a solda por inibirem o contato efetivo entre as partes. Ações preventivas como a pré-limpeza das peças a serem soldadas, aumento da força de contato para expulsar os óxidos e uso de gás de proteção durante a solda, previnem a formação de óxidos. Segundo Rogeon et al (2007), defeitos superficiais (rugosidades, óxidos, etc.) forçam a corrente a fluir através de pequenas áreas microscópicas. O efeito destas micro-resistências localizadas é aumentar a resistência elétrica independentemente da resistência do material.
- Materiais recobertos: Segundo Wu et al. (2008), o processo de aquecimento em materiais recobertos é diferente do processo que acontece em materiais sem revestimento. O controle apropriado do revestimento das peças reduz a chance de soldas fracas, inconsistentes, aderência do eletrodo ou expulsão do material. Esse trabalho foca na união de cabos multifilares e material metálico, sendo que esses terminais possuem uma camada de revestimento de zinco.

2.4 Equipamentos de Solda por Resistência Elétrica

- Geralmente os equipamentos são divididos em três sistemas básicos: elétrico, mecânico e de controle.

2.4.1 Sistemas elétricos

São formados basicamente de uma fonte de energia que fornece a corrente de solda. Estas fontes de energia podem ser do tipo “direta” ou “armazenada” e ter corrente contínua ou alternada. A fonte de energia mais conhecida é a de energia direta com corrente alternada (AC), onde a corrente de saída possui forma senoidal com a mesma frequência da linha de alimentação. Equipamentos do tipo AC possuem transformador de solda, que tem a função de transformar, modular e controlar a corrente elétrica da linha e também o tempo de solda. É função do transformador reduzir a voltagem e elevar a corrente. Ele reduz a voltagem da linha (normalmente entre 480 e 100 Volts) até a voltagem de solda (tipicamente de 2 a 20 Volts) e elevar a corrente de solda numa faixa que varia de 10 até 100.000 Amperes. Podem operar numa taxa de 5 a 6 soldas por segundo, pois possuem um tempo de solda curto que varia aproximadamente de 0,001 até 2 segundos. Para possibilitar os ajustes de corrente e voltagem, uma combinação de circuito primário e secundário é utilizada nos transformadores. A **Figura 2.2** mostra o esquema de montagem destes transformadores.

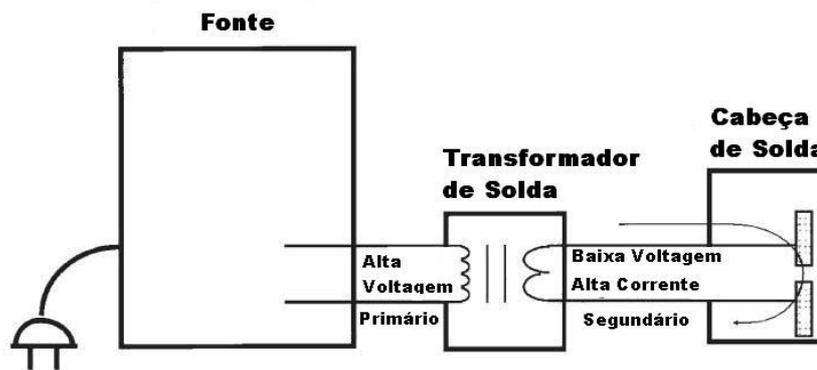


Figura 2.3 - Esquema de uma máquina de solda por resistência elétrica

A classificação dos transformadores é dada em kVA (kilovolt-amperes) para especificar o ciclo de trabalho, que é uma classificação térmica e indica a quantidade de energia que o transformador pode fornecer para uma dada potência, num período específico de tempo, sem exceder sua taxa de temperatura. Uma vez que o aquecimento é função da corrente de solda, este parâmetro mostra uma indicação da espessura dos materiais que podem ser soldados.

Outro tipo de fonte é o de energia armazenada, que são máquinas de corrente contínua as quais extraem a energia da linha da rede de distribuição e armazenam num banco de capacitores tornando a energia de solda independente das flutuações de voltagem da linha. Durante a solda, a energia armazenada é rapidamente descarregada através de um pulso, que produz o fluxo de corrente. A energia armazenada é expressa em watt-segundo (Joule), que é o produto da metade da capacitância do banco de capacitores e da raiz quadrada da voltagem aplicada devido a perdas de energia na saída dos eletrodos é um pouco menor. Segundo Colombari (2004), neste tipo de equipamento, o tempo de acumulação é bem maior do que o tempo de descarga. Contudo, estas máquinas demandam um consumo bem menor de energia. O tamanho de máquinas DC, depende da quantidade de energia que armazenam e da velocidade da solda.

Existe ainda uma terceira classe que é constituída por equipamentos que transformam corrente alternada em corrente contínua. Isto é possível através do uso de inversores de alta frequência. Eles utilizam a tecnologia de modulação do comprimento de pulso, com um ciclo fechado de retroalimentação, no qual a energia de solda é controlada em incrementos de milisegundos, após três etapas, a corrente de entrada é totalmente retificada para corrente contínua. O circuito com retroalimentação de alta velocidade, possibilita o transformador se adaptar as mudanças ocorridas no circuito secundário e para variações dinâmicas do processo. O inversor de alta frequência com retroalimentação, pode ser usado para controlar (manter constante) tanto a corrente, como a voltagem ou potência enquanto monitora estes mesmos três parâmetros. Por exemplo, um transformador-inversor de 25 kHz, ajusta a corrente de saída a cada 20 microsegundos, e também permite que o tempo de solda (duração da corrente) possa ser controlada com alta acuracidade, com incrementos menores que 0,1 milisegundos. A utilização da corrente constante é utilizada em aplicações que exibem uma baixa resistência de contato, uma pequena variabilidade na resistência de contato, partes planas e múltiplas partes “sandwiches”. A voltagem constante é indicada para peças que não possuem superfícies planas, por exemplo, cabos entrelaçados, situações onde a resistividade varia significativamente e para soldas extremamente curtas (tempo menor que 1 milisegundo). A potência constante é utilizada em aplicações que apresentam variações significativas de solda para solda, incluindo aplicações onde ocorre degradação do revestimento e aglomeração de impurezas nas faces dos eletrodos.

A utilização desta tecnologia reduz o consumo de energia, permite o uso de transformadores menores e possibilita o uso de pequenos pulsos de pré-solda, que são realizados para verificar se os eletrodos e as peças estão corretamente posicionados antes da

execução da solda. Isto garante que a solda não inicie sem que antes os parâmetros de ajuste estejam dentro dos limites especificados. Os inversores de alta frequência, permitem uma maior flexibilidade de programação e, por isso, são geralmente a melhor escolha para aplicações automatizadas.

2.4.2 Sistemas Mecânicos

Os sistemas mecânicos são compostos pelo cabeçote de solda e eletrodos. O cabeçote é responsável pela aplicação e o controle da força durante o processo de solda. Tem a função de pressionar as peças a serem soldadas, mantendo-as juntas durante a solda. Além disso, realiza diversas funções, tais como: prover o caminho da corrente, realizar a pressão de união das peças, disparar a corrente de solda, realizar o acompanhamento da força durante o processo e realizar o resfriamento após a solda. Segundo Aslanlar et al. (2008), a queda do valor de força durante a solda, faz com que a pressão interna do metal fundido expulse material da zona de solda, gerando vãos internos ou desgaste excessivo dos eletrodos. Para Farson et. al (2003), este é um dos principais modos de falha, e ocorre quando o diâmetro da poça de solda (lentilha de solda) cresce de tal forma, que a pressão dos eletrodos é insuficiente para conter a alta pressão ocasionada pela expansão volumétrica do material após liquefeito. O dimensionamento do cabeçote de solda é tão importante quanto o dimensionamento da fonte de corrente. Quando realizado de maneira correta, assegura o contato elétrico e o balanço de calor apropriado entre as peças e os eletrodos. Cabeçotes de solda recente utilizam sensores de força “*strain gauges*” e sensores de movimento “*transducers*”, que possibilitam controles mais precisos de movimento e de força de contato. Também permitem a programação do tempo de cada elemento de força, minimizando assim, a força de impacto.

Os eletrodos de solda também fazem parte do sistema mecânico. De acordo com Aslanlar *et al.* (2008), estes são parte fundamental do equipamento de solda e possuem três funções principais: manter uniforme a densidade de corrente, concentrar a corrente nos pontos de solda e manter o balanço térmico durante a solda. Os eletrodos trabalham em condições extremamente desfavoráveis, pois mantêm o contato com as peças ao longo de todo o processo, por isso, precisam possuir propriedades elétricas e mecânicas que possibilitem a condução de corrente elétrica de grande intensidade, sem que tenham grande aquecimento, além de resistir a pressões elevadas sem apresentarem desgaste excessivo.

A forma e materiais para a construção dos eletrodos são determinados de acordo com os materiais a serem soldados. Desta maneira, existem duas categorias principais de materiais: os condutivos e os resistivos. Sabe-se que quanto maior a resistência elétrica, maior a

quantidade de calor gerado, produzindo assim, melhores soldas. A regra geral (com poucas exceções como a do alumínio e berílio-cobre), para selecionar eletrodos, é utilizar eletrodos condutivos contra peças de materiais resistivos e eletrodos resistivos para peças de materiais condutivos. Por extensão, quando se solda materiais dissimilares, os eletrodos inferiores ou superiores (anodo e catodo), precisam ser de diferentes materiais cada um. Esta é conhecida como “regra dos opostos”. Os eletrodos podem ser tratados termicamente para atingirem características necessárias como:

- Condutividade elétrica e térmica elevadas;
- Resistência mecânica, mesmo em altas temperaturas;
- Pouca tendência para formar ligas com o material soldado;
- Resfriamento seguro das pontas dos eletrodos;
- Alto ponto de amolecimento, temperatura na qual após um período de tempo, o material perde grande parte de sua dureza.

Para a realização de macro-soldas, como as de carrocerias de carros, os eletrodos são feitos de ligas de cobre e geralmente resfriados a água. Contudo, para micro soldagens, existem uma ampla variedade de materiais com as quais os eletrodos podem ser construídos. De acordo com Aslanlar et al. (2008), a escolha correta das ligas a serem utilizadas é de fundamental importância. Eles devem apresentar resistência mecânica e dureza adequadas, pois a qualidade da solda deteriora-se de acordo com a deformação da ponta do eletrodo. A seguir, tem-se as principais ligas utilizadas em eletrodos:

- Liga de cobre-cádmio: Utilizadas para soldar alumínio e estanho. Possuem uma dureza de 70 Rockwell B e 90% de condutividade.
- Liga de cobre-cromo: Usadas para soldar aços, ligas de níquel e outros materiais de alta resistividade elétrica. Possuem uma dureza de 83 Rockwell B e 85% de condutividade.
- Liga cobre-cobalto-berílio: Utilizadas para soldar materiais de alta resistividade elétrica que requerem altas forças para a soldagem. Possuem uma dureza de 100 Rockwell B e 48% de condutividade.
- Liga cobre-tungstênio: Usadas para soldar ligas de cobre e metais preciosos. Geralmente são inseridas em um liga cobre-cromo. Possuem uma dureza de 99 Rockwell B e 46% de condutividade.
- Tungstênio: Usado para soldar metais não ferrosos como cobre e latão. Possuem uma dureza de 70 Rockwell B e 32% de condutividade.

- Molibdênio: Usado para soldar cobre, prata, ouro e suas respectivas ligas. Possuem uma dureza de 90 Rockwell B e 31% de condutividade.

Colombari (2004), destaca que a geometria dos eletrodos, também possui grande influência na qualidade da solda e que esta deve ser otimizada para cada aplicação. É importante que se utilizem eletrodos adequados pois, o diâmetro da lentilha de solda não deve ser maior que a face do eletrodo. A **Figura 2.4** mostra as formas mais comuns de eletrodos:

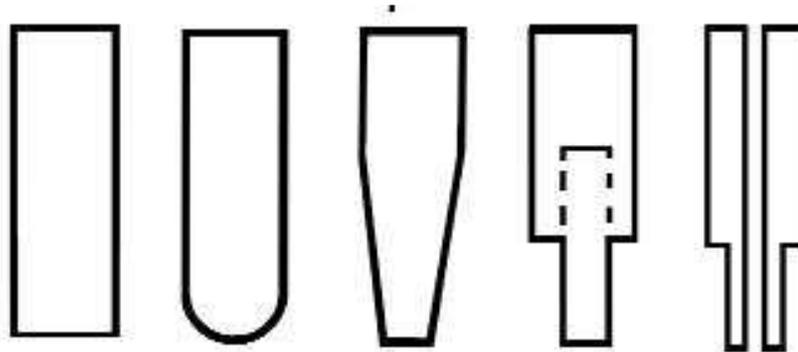


Figura 2.4 – Geometria dos eletrodos.

Segundo Rogeon et al (2007), eletrodos com perfil plano são indicados para materiais com camadas de revestimento. O posicionamento dos eletrodos também é um fator bastante relevante, pois se os eletrodos estiverem posicionados de forma assimétrica, virados, truncados ou excêntricos, ocasionam desencontro nas áreas de soldagem resultando em deformação do material no local da solda, aquecimento inadequado e mau formação do botão de solda e um mau aspecto da solda. Também é preciso eliminar folgas excessivas para evitar desencontros das áreas de contato dos eletrodos, pois isto provoca falhas de contato e ocasionam problemas como:

- Ponto de solda com aspecto ovalado;
- Superaquecimento do material;
- Expulsão do material fundido em forma de fagulhas;
- Ponto de solda queimado e com pouca resistência mecânica.

Os eletrodos devem estar posicionados exatamente no local onde deve ocorrer a solda. Devem cobrir as paredes das peças (exceto em cabos e solda de pequenos terminais), ser perpendicular ao plano de trabalho das peças e manter o diâmetro constante (área constante) mesmo quando desgastado. Para Rogeon et al (2007), eletrodos com perfis inicialmente curvados, passam a ter partes planas com a repetição das soldas. O aumento do raio de contato, devido ao desgaste do eletrodo, ocasiona uma modificação incremental na corrente de solda, durante o processo.

2.4.3 Sistemas de Controle

A facilidade e rapidez na execução das soldas exigem uma atenção especial no controle do processo de tal forma a garantir a qualidade das soldas executadas. Assim um controle do processo é importante na consecução destes objetivos através do monitoramento do processo, garantindo que os objetivos de qualidade serão atendidos. Estes dispositivos monitoram um ou mais parâmetros (elétricos e/ou mecânicos) específicos que mudam dinamicamente durante o processo. O monitoramento pode incluir a corrente de solda, a queda de tensão nos eletrodos, a expansão e deformação das peças trabalhadas, a força e movimentação dos eletrodos, o tamanho da face dos eletrodos, a energia acústica emitida quando a solda esta sendo formada e a temperatura das peças trabalhadas. Técnicas modernas de monitoramento permitem a medição acurada da energia e pressão de solda. Para detectar a falta de peças, irregularidades na espessura das peças ou mau encaixe do conjunto é realizado a verificação da resistência elétrica do conjunto de solda, antes da mesma iniciar. De acordo com Aslanlar et al (2008), o monitoramento do deslocamento dos eletrodos é considerado uma importante característica do processo, pois através dele, é possível controlar a qualidade da solda. Já o monitoramento da pressão de solda pode ser usado como uma medida para prevenir o impacto dos eletrodos contra as peças e também, para evitar uma força excessiva durante a solda. O monitoramento de solda só é efetivo se as inferências das medidas elétricas e mecânicas realizadas durante o processo, refletirem as variações das propriedades físicas das peças trabalhadas. Normalmente, são requeridos vários experimentos para determinar qual combinação de medida de parâmetros tem correlação com a qualidade das peças soldadas. Uma vez que estas correlações são identificadas, devem ser monitoradas de forma “*on-line*”, durante a realização do processo. A combinação de medições de aspectos chaves do processo provém informações úteis da qualidade da solda ao usuário. O monitoramento de solda é utilizado como uma ferramenta de controle do processo, e não como uma ferramenta de avaliação de qualidade. Alguns equipamentos de monitoramento são integrados com softwares de controle estatístico do processo, estes geram gráficos de controle, além de prover um resumo das informações do processo. Estes sistemas proveem dados para o controle estatístico do processo, os quais podem ser utilizados para a melhoria da qualidade e, conseqüentemente, redução dos custos de manufatura.

2.5 Solda por Resistência Elétrica de Pequena Dimensão

O processo de solda por resistência elétrica é frequentemente utilizado dentro da indústria automotiva para a união de chapas metálicas. Porém outras áreas tecnológicas tem

ampliado a utilização deste processo. De acordo com Rogeon et al (2007), a solda por resistência elétrica tem aumentado significativamente seu uso dentro da indústria eletrônica e de instrumentos médicos, nos últimos anos. Segundo o autor, isto ocorre devido à capacidade do processo trabalhar com chapas de pequena espessura. De acordo com Qiu et al. (2009) os componentes trabalhados nas indústrias eletrônica e médica, apresentam espessura menor que 0.2 mm. Para estas aplicações utiliza-se o processo conhecido como solda por resistência elétrica de pequena escala. O termo pequena escala está associado com chapas de pequena espessura (menor que 0,5mm), as quais geram pequenas lentilhas de solda.

Trabalhos experimentais e numéricos realizados para aplicações de pequena escala, mostraram que a força do eletrodo pode ser uma das principais diferenças entre soldas de grande e pequena escala. Comparando-as, constatamos que as soldas de pequena escala requerem pressões de eletrodo muito menores do que as soldas convencionais de grande escala. De acordo com Farson et al. (2003), uma força de soldagem muito menor deve ser empregada para elas. Isto resulta numa área de contato relativamente menor e, com isso, uma maior densidade de corrente, que por sua vez, provoca uma alta taxa de aquecimento e assim uma maior temperatura na interface das peças. Segundo Fujiwara (2008), uma alta taxa de resfriamento pode ser obtida nos eletrodos durante as soldas de pequena escala.

A lentilha de solda também é reduzida nas soldas de pequena escala, sendo aproximadamente de 30 a 40% do diâmetro do eletrodo, enquanto na solda de grande escala são do tamanho do diâmetro total do eletrodo. Segundo Chang e Zhou (2003), devido a estas diferenças a prática da “redução de escala” dos parâmetros de processo aplicados nas soldas de grandes dimensões, não pode ser aplicada para as de pequena, exigindo portanto, estudos mais detalhados para um melhor entendimento. Assim, valores para o deslocamento do eletrodo, alterações de força, voltagem, precisam ser definidos.

Outros estudos como o de Chen e Farson (2006), mostraram por meio de modelos analíticos, que para as soldas de pequena escala, a forma dominante de transferência de calor é a condução. Em seus estudos também verificaram que devido à pequena espessura das peças a serem trabalhadas, o tempo de solda geralmente é curto, aproximadamente 10 milissegundos. Já o trabalho de Chang e Zhou (2003), verificou a soldabilidade de chapas finas de alumínio, latão e cobre e constaram que existem diferenças significativas no controle da qualidade de soldas de pequena e grande escala. A solda de pequena escala envolve amplitudes de mudanças muito menores e, portanto, tornam-se muito mais difíceis de serem medidas, monitoradas e controladas. Por isso, são necessários controles elétricos e mecânicos muito mais precisos.

Segundo Tan et al. (2004), apesar da crescente demanda, ainda existe uma falta de entendimento para o processo de soldas de pequena escala. Para Farson et al. (2003), não há distinções claras entre os limites da solda de pequena e grande escala. Outros autores como Fujiawara (2008), Tan et al. (2004) e Chang e Zhou (2003), relatam que se comparado com a solda de grande escala, ainda existem poucas pesquisas que exploram soldas de pequena escala, especialmente estudos da dinâmica do processo e controle da qualidade.

2.6 Fatores de Controle do Processo de Solda por Resistência Elétrica

De acordo com Yi et al. (2008), para a obtenção de uma solda dentro das especificações é necessário manter o equilíbrio entre os parâmetros de tempo, pressão e aquecimento. Aslanlar et al. (2008) confirmam este pressuposto afirmando que para encontrar o ponto ótimo de ajuste devem ser considerados fatores como intensidade e duração da corrente elétrica, geometria e materiais das peças e dos eletrodos, condições das superfícies e alinhamento das peças. Colombari (2004) corrobora com estes autores afirmando que a operação de solda a resistência, envolve a aplicação coordenada de corrente elétrica e pressão de magnitude e duração apropriadas. Para Goodarzi et al. (2009), é necessário ajustar corretamente os parâmetros do processo, para que se possam produzir soldas de boa qualidade e grande resistência mecânica. A amplitude da pressão e corrente com seus respectivos tempos, são conhecidos como “programa de solda”. A **Figura 2.5** mostra o formato básico de um destes programas, sendo a base para todos os demais.

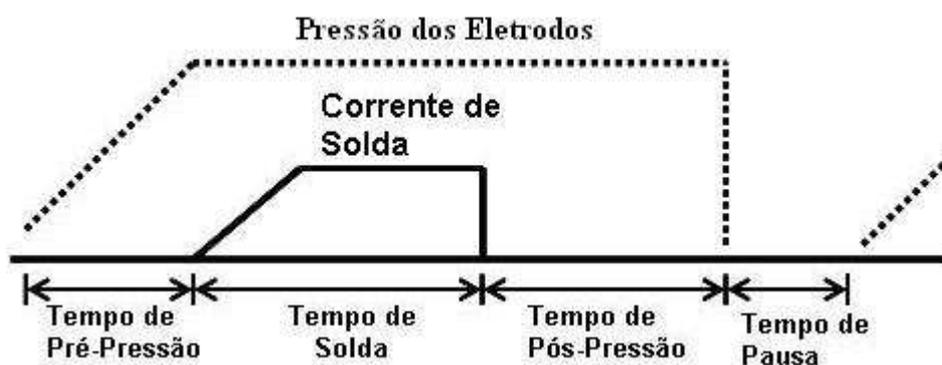


Figura 2.5 - Programa básico de solda.

Os principais parâmetros de um programa de solda são:

- **Tempo de pré-pressão:** É o intervalo de tempo entre a primeira aplicação de força nas peças e o início da aplicação de corrente. Segundo Aslanlar, et. al. (2008), é importante que exista um tempo de espera antes do início da corrente de solda, que é necessário para que os eletrodos atinjam o nível de força desejado. O tempo de solda é ajustado e medido

em ciclos da rede de alimentação.

- **Tempo de solda:** Tempo no qual o fluxo de corrente passa através das peças a serem soldadas. Este tempo afeta o calor gerado, ele deve ser suficiente para desenvolver a lentilha de solda requerida a fim de obter a resistência mecânica necessária ao conjunto soldado. O tamanho da lentilha de solda reduz-se rapidamente à medida que decresce o tempo de solda. Quanto mais tempo a corrente flui, maior é a lentilha de solda. Ela cresce até o tamanho limite do diâmetro do eletrodo. Ele depende do material a ser soldado, de sua condutibilidade térmica e elétrica e espessura. De acordo com Aslanlar et al. (2008), em soldas de pequena escala, é utilizado um curto tempo de solda e, por isso, é utilizada corrente relativamente alta para que se possa desenvolver o aquecimento necessário para a realização da solda. A duração do tempo de solda deve ser curta para prevenir o aquecimento excessivo das faces dos eletrodos.
- **Tempo de pós-pressão:** É o tempo entre o fim do fluxo de corrente e liberação das peças. Ele é necessário para permitir que a lentilha de solda se solidifique antes da liberação das peças. Não deve ser muito longo para não sobre-aquecer os eletrodos.
- **Tempo de pausa:** É o tempo entre a realização de soldas sendo utilizado quando o resfriamento do eletrodo é necessário.
- **Intensidade da corrente de solda:** É o valor de corrente elétrica que irá passar pelo conjunto de solda. É uma das responsáveis direta pelo aquecimento gerado na área de solda. Essa temperatura deve ser maior no núcleo da solda, para a obtenção da fusão adequada e menor na área de contato com o eletrodo, para não enfraquecer a estrutura granular do material que está sendo soldado. Durante a solda, parte do calor gerado é perdida para o meio através da condução (transferência de calor através dos sólidos), da convecção (perda de calor das superfícies expostas devido ao resfriamento do ar) e da radiação (que não requer meio de propagação). O objetivo de uma boa solda é concentrar o calor gerado próximo ao ponto onde a solda é desejada.
- **Pressão dos eletrodos:** É a força exercida pelos eletrodos nas peças a serem soldadas. Ela é muito importante no controle da qualidade da solda. A sua aplicação de maneira adequada e consistente, melhora o contato dos materiais, aumenta o caminho da corrente, faz que não haja barreiras de óxido e proporciona uma redução da resistência elétrica na interface das peças. Um controle de força adequado faz com que se tenha contato elétrico e balanço de calor consistente, garantindo assim uma boa repetibilidade da qualidade da solda. Deve-se ajustar corretamente a força aplicada para que não ocorra a expulsão de material

durante a solda, isto gera soldas de má qualidade, desgaste acelerado dos eletrodos e ineficiências para o processo. De acordo com Aslanlar et. al. (2008), se a pressão é excessiva, quando a quantidade de material fundido cresce parte dela acaba sendo expelida e forma uma série de picos e vales de escala microscópica na superfície das peças. De acordo com estudos de Goodarzi et. al. (2009), quando solda-se aço, a expulsão de material é frequentemente usada como um indicador visual do processo. Porém, considerando-se todos os efeitos negativos, é uma prática que deve ser evitada. Boas soldas são obtidas quando a aplicação da força é precisa, ou seja, controlada para reduzir o impacto inicial e com repetibilidade. O controle da força pode também ser usado para disparar a corrente de solda. Isto ocorre quando níveis de força pré-determinados são atingidos. Este controle também é importante após o fim do fluxo de corrente, período no qual a força do eletrodo deve ser mantida por uma fração de segundos, enquanto a solda resfria rapidamente e se solidifica. É necessário este tempo para solidificação, pois o calor gerado durante o processo, funde o material que se encontra na interface ou reduz a sua dureza até o ponto que ele se torna plástica, necessitando solidificar-se.

A disposição dos eletrodos também pode variar dependendo do tipo de solda a ser realizada e geometria das peças, sendo que os tipos mais comuns de disposição dos eletrodos são:

- Solda Oposta (Direta): É a configuração mais comumente usada em solda a resistência, mostrada na **Figura 2.6 (a)**. A corrente passa diretamente de um eletrodo para o outro através das peças.
- Solda Passo (Indireta): É geralmente utilizada quando as peças a serem soldadas estão dispostas de maneira que apenas um lado da peça é acessível com o eletrodo, **Figura 2.6 (b)**. A corrente elétrica flui do primeiro eletrodo através da peça, depois para a área de solda, em seguida passa para a outra peça a ser soldada, e por fim para o último eletrodo.
- Solda em série: É também usada quando somente um lado da peça possui acesso para os eletrodos, **Figura 2.6 (c)**. Esta forma tem a vantagem de fazer duas lentilhas de solda ao mesmo tempo. Contudo, a solda em série é geralmente menos controlável por causa dos muitos caminhos disponíveis para a corrente de solda.

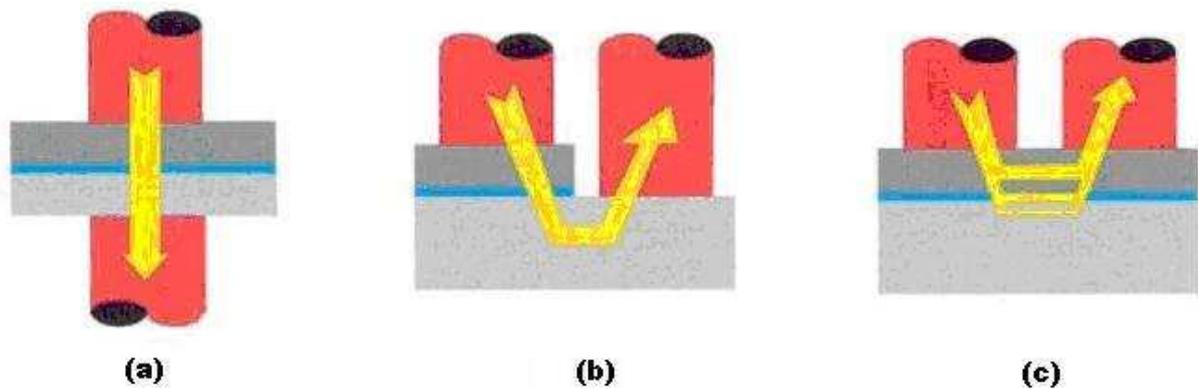


Figura 2.6 - Formas de disposição dos eletrodos.

Cada solda não é realizada sob a mesma condição, devido a variações das superfícies e alinhamento das peças e eletrodos. A cada solda os eletrodos sofrem desgastes gerando uma nova condição. Por isso, é necessário encontrar um ponto ótimo de ajuste para todas as variáveis importantes para o processo. Ajustes estes que irão permitir a realização de uma solda com qualidade.

2.7 Validação do Processo

É muito importante verificar se os parâmetros definidos para o processo atendem os requerimentos especificados. Assim, faz-se necessário a validação do processo antes de seu uso.

Segundo Yi et al (2008), os valores de força de tração e rasgamento são importantes índices de qualidade pois, estes valores estão associados com a área efetiva da lentilha de solda. De acordo Goodarz et al. (2009), o teste de resistência ao rasgamento (cisalhamento) é o mais utilizado para a avaliação do comportamento mecânico das uniões. Para o autor existem três indicadores para o controle da qualidade, que são respectivamente:

- Tamanho da zona de fusão (lentilha de solda): Pode ser obtida por cortes da secção transversal e também por testes de ultra-som.
- Desempenho mecânico: O desempenho mecânico é geralmente considerado com condições de carga estática ou quase estática. A carga de pico, obtida dos testes de resistência à tração e rasgamento, geralmente são usadas para descrever o comportamento mecânico da solda. Ela também pode fornecer a energia de falha que é usada para melhor descrever o comportamento mecânico. A energia de falha é a medida da capacidade de absorção de energia da solda. Altos valores de energia demonstram um aumento na confiabilidade contra impactos.

- Modos de falha da solda: É a maneira pela qual a solda falha. As falhas ocorrem principalmente de dois modos: falha interfacial ou rompimento total. No primeiro, a falha ocorre através da propagação de trincas na zona de fusão, enquanto no segundo caso, a falha ocorre através do rompimento completo (ou parcial) da zona fundida (lentilha de solda) de uma das peças. Os modos de falhas são medidas qualitativas da qualidade da solda. Elas podem afetar significativamente a capacidade de carga e absorção de energia. Soldas que falham através do rompimento total da lentilha de solda, apresentam maiores níveis de cargas de pico e de absorção de energia, quando comparadas com soldas que falham de modo interfacial. Dessa maneira, para assegurar a confiabilidade das soldas, os parâmetros de processo devem ser ajustados para produzir soldas que falhem no modo de rompimento. Para lentilhas de solda pequena, a tensão de rasgamento é mais crítico que o teste de resistência à tração pois este causa alongamento da solda o que faz com que ela tenda a falhar do modo interfacial. Segundo Goodarz et al. (2009), a capacidade de carga e absorção de energia de uma solda depende dos atributos físicos da solda, especialmente do tamanho da lentilha de solda, propriedades mecânicas, modo de falha e localização da falha.

Além dos testes de avaliação mecânica da união foram realizados também testes de avaliação elétrica. Para isso as peças foram submetidas a uma sequencia de testes apresentada na **Figura 2.7**, com posterior análise da resistência elétrica do contato.

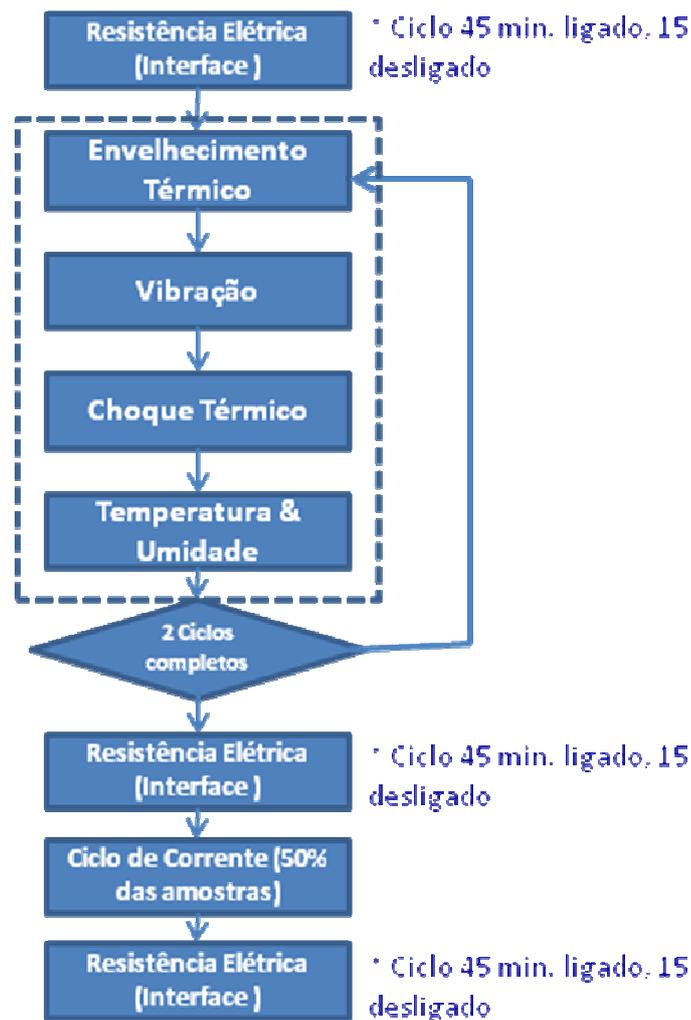


Figura 2.7: Sequencia de testes para validação de resistividade elétrica.

- Teste de resistência elétrica: neste teste é medida a resistência elétrica da união em dois momentos, inicialmente com duas horas de funcionamento e, depois, de duzentas horas de funcionamento. Esse funcionamento ocorre da seguinte maneira: quarenta e cinco minutos com fluxo de corrente elétrica e quinze minutos sem fluxo.
- Envelhecimento Térmico: no envelhecimento térmico as peças ficam expostas a uma temperatura de 85 °C por 72 horas.
- Vibração: no teste de vibração, as peças são submetidas à vibração e tem a continuidade de corrente monitorada.
- Choque Térmico: neste teste, as peças oscilam numa temperatura elevada (cerca de 90 °C), para, rapidamente, chegarem numa temperatura baixa (cerca de -20 °C).
- Temperatura e Umidade: esse teste ocorre num ambiente de elevada umidade

(maior que 90%) e elevada temperatura (aproximadamente 65°C). Sendo que as peças ficam submetidas a esse ambiente por 72 horas.

O ciclo citado a cima é repetido duas vezes, sendo que no final é realizado um teste de resistência elétrica das uniões.

2.7 Projeto e Análise de Experimentos

2.7.1 Planejamento e análise de experimentos no desenvolvimento de projetos

Experimentos são realizados em quase todos os campos do conhecimento, geralmente para descobrir algo particular de um sistema ou processo. Um experimento é literalmente um teste. Mais formalmente pode-se definir um experimento como um teste ou uma série de testes nos quais mudanças propositas são realizadas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, observando-se e identificando mudanças nas variáveis de saída (MONTGOMERY, 2005). Uma das vantagens da realização de experimentos planejados é a de criar uma relação das variáveis de saídas (Y's) em função dos fatores de entradas (x's) e também identificar qual dos fatores de entrada (x's) mais afetam a saída (Y). Segundo Domenech (2004), o método de planejamento de experimentos, ou do inglês DOE (*design of experiments*) é uma técnica de experimentação, onde todas as variáveis controladas são modificadas simultaneamente, com medição dos resultados nas variáveis de saída, objetivando criar um modelo empírico da relação $y=f(x)$.

O DOE (*design of experiments*) apresenta uma grande vantagem sobre o método OFAT (*One Factor at the Time*) no qual é alterado apenas um fator por vez, enquanto os outros são mantidos constantes, quando a resposta melhora, o fator alterado é mantido no nível que proporcionou a melhora e assim, passa-se para a análise do próximo fator, sendo isto realizado até que todos os fatores sejam analisados. Para Rowlands & Antony (2003), procedimento experimental de um fator por vez possui várias deficiências, como:

- Falta de reprodutibilidade;
- Dificuldade na análise das interações entre os fatores;
- Riscos de falsos pontos de ótimo para o processo;

O DOE se mostra mais vantajoso pelo fato de todas as variáveis controladas serem modificadas simultaneamente, ao invés de se estudar o efeito de cada variável isoladamente. Sendo assim, todas as interações entre as variáveis são levadas em conta tornando o estudo mais eficiente.

Geralmente os processos de fabricação possuem vários fatores de entrada, sendo todos eles necessários para que o processo funcione. Porém, nem todos tem a mesma influência nas características de qualidade; assim a execução de experimentos planejados e analisados estatisticamente permite identificar aqueles que mais influenciam o processo. Esta técnica tem sido utilizada frequentemente na melhor compreensão do processo de soldagem por resistência elétrica. Dentre os trabalhos pode-se citar ROWLANDS & ANTONY (2003) que exploraram a análise de experimentos na área de soldagem a ponto por resistência com o objetivo de otimizar a resistência da solda através do melhor ajuste dos parâmetros de tempo de soldagem, diâmetro do eletrodo, corrente de soldagem, força do eletrodo e profundidade de deslocamento do eletrodo.

Para Galdámez (2002), as técnicas de planejamento e análise de experimentos podem ser utilizadas nas fases iniciais de desenvolvimento como: Projeto preliminar, projeto do produto e processo de fabricação e na etapa de avaliação/ melhoria. Para Antony et. al. (2003) o planejamento de experimentos será a principal técnica para o desenvolvimento de produtos e processos confiáveis e robustos no século 21. De acordo com Taguchi (1993), robustez significa que as características funcionais do produto não serão sensíveis às variações causadas por fatores de perturbações (internas ou externas). Perturbações externas são aquelas que ocorrem através de deteriorações, tais como desgaste de peças pelo atrito, perda de elasticidade etc. Perturbações internas são causadas durante o processo produtivo, como por exemplo, variações em ajustes de preparação de máquinas, folgas mecânicas, etc. Para Taguchi (1993), produtos de alta qualidade são obtidos quando as propriedades chave do produto atingem o valor desejado pelo cliente, com o mínimo de variação. Segundo Rowlands & Antony (2003) quando aplicado corretamente o planejamento de experimento proporciona benefícios como:

- Melhoria no desempenho do produto;
- Aumento da qualidade e confiabilidade do produto;
- Redução da variabilidade do processo;

A utilização industrial efetiva do processo de solda por resistência elétrica de pequena escala, como já foi abordado anteriormente, depende de ajustes corretos dos parâmetros no sentido de obter uma solda otimizada. Através da análise de experimentos, abrem-se oportunidades de analisar as influências de cada variável de controle sobre a solda, assim como o efeito das interações entre estas. Desta forma, torna-se possível estabelecer as variáveis que exercem influencia significativa na resposta, assim como os seus valores ótimos visando alcançar estabilidade e consistência do processo. Além disso, considerando a rapidez

na execução da solda, características de solda de pequena dimensão e a repetibilidade normalmente verificada no processo, técnicas estatísticas baseadas no planeamento de experimentos são ferramentas extremamente úteis na ampliação das análises e otimização do processo.

2.7.2 Conceitos básicos de projeto e análise de experimentos

O projeto e análise de experimentos é um método que foi desenvolvido nas décadas de 1920 e 1930. Utilizada em diversas áreas como agricultura, medicina, neurociências, engenharia e outras, visando o aumento da produtividade através de um maior controle sobre as variáveis envolvidas no processo. Segundo Montgomery (2005), esta ferramenta consiste em planejar experimentos de forma a gerar dados apropriados para uma eficaz análise estatística, que por sua vez permitam conclusões válidas e objetivas. Segundo Box & Hunter (2005), Montgomery (2005) os principais termos necessários para a aplicação e entendimento da metodologia são:

- **Variáveis de Resposta:** São as variáveis dependentes (Y) do experimento. Nos experimentos podem existir uma ou mais variáveis de resposta.
- **Fatores de Controle:** os fatores de controle são variáveis experimentais controláveis, ou seja, variáveis que podem assumir os níveis desejados pelo experimentador. Estes fatores são alterados deliberadamente no experimento com o objetivo de introduzir estímulos nas variáveis de resposta. A mudança que os fatores de entrada (variáveis independentes) ocasionam na variável de resposta (variável dependente) indicam o quão forte é o efeito destes fatores. Os fatores de controle podem ser quantitativos (pressão de injeção, velocidade, temperatura etc.) ou qualitativos (diferentes máquinas, operadores, materiais, liga/desliga).
- **Fatores incontroláveis (ruídos):** São fatores não controláveis, conhecidos ou desconhecidos, que influenciam resposta do experimento. Cuidados especiais devem ser tomados com os ruídos, pois seus efeitos podem se misturar como os efeitos dos fatores de controle e com isso mascarar os resultados do experimento.
- **Níveis dos fatores:** São as condições de operação dos fatores de controle. Geralmente os níveis são identificados por nível baixo (-1) e nível alto (+1).
- **Matriz de Experimento:** É a planilha que apresenta as combinações dos fatores analisados e respectivos níveis. Ela depende do tipo de experimento realizado: dois níveis ou mais, completo ou fracionado. Ela auxilia a condução dos experimentos.
- **Tratamentos:** É a combinação dos fatores de controle e seus níveis para a realização de

cada um dos experimentos, isto significa que cada uma das corridas do experimento (linhas da matriz) representará um tratamento.

- Efeito Principal: São os efeitos observados na resposta quando se muda os níveis dos fatores de controle.
- Efeito Interação: Ocorrem quando o efeito combinado de dois ou mais fatores interferem na resposta. Algumas vezes o efeito principal de cada um dos fatores isoladamente não é pronunciado, porem aparece quando eles são combinados.
- Aleatorização: É forma de definir a ordem dos tratamentos da matriz experimental. Utiliza-se este recurso para diluir os efeitos produzidos pelos fatores de ruído.
- Repetição: É o processo de repetir cada uma das combinações (tratamentos) da matriz experimental sob as mesmas condições de experimentação, peças produzidas em seqüência. Segundo Montgomery (2005), este conceito permite encontrar uma estimativa de erro experimental que é utilizado para determinar se as diferenças entre os dados são estatisticamente significativas.
- Replicação: É o processo de repetir cada uma das combinações da matriz experimental, porem com a realização de um novo ajuste (setup) dos níveis. Produção da peça em um novo tratamento. Experimentos com replicação permitem a análise da significância estatística do experimento.

A **Figura 2.8** mostra a relação entre os elementos de entrada (Inputs), elementos de saída (output), fatores controláveis e incontroláveis.

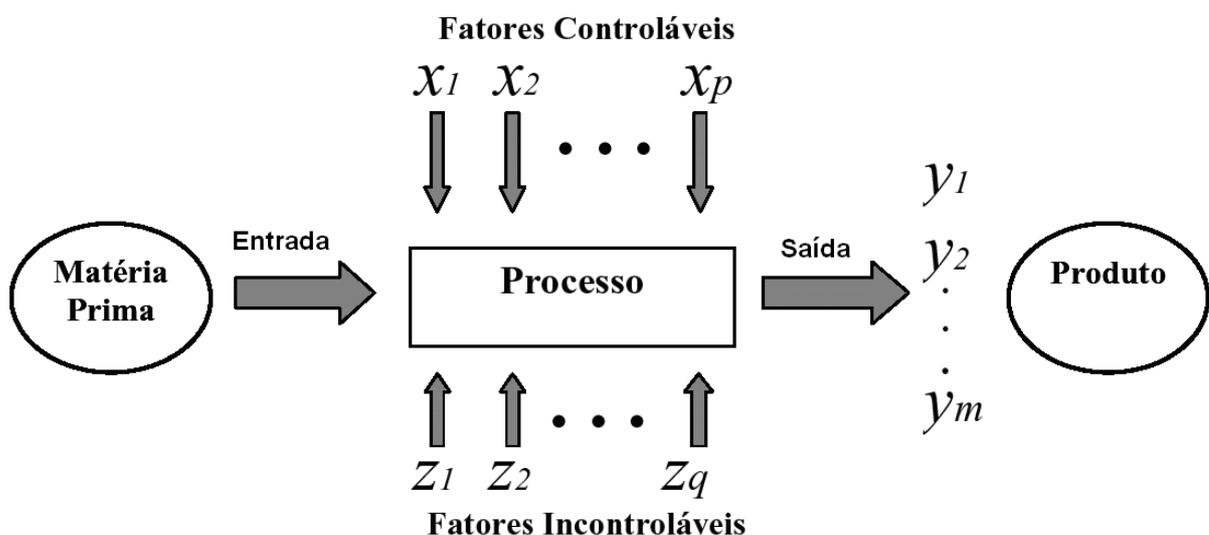


Figura 2.8 - Fatores componentes de um processo.

2.7.3 Etapas para a condução do experimento

Vários autores como Antony et al., (1998), Coleman & Montgomery (1993), Colombari (2004), Galdámez (2002), Box e Hunter (2005), Montgomery (2005) recomendam alguns passos para a realização dos experimentos, para garantir uma maior confiabilidade nas informações obtidas. As etapas sugeridas são as seguintes:

1. Definição dos objetivos do experimento: Para a realização de um experimento conclusivo é necessário que se faça a definição clara dos objetivos do experimento. Deve-se ter bem definido o problema a ser atacado. Segundo Antony et.al. (1998) é natural que as pessoas descrevam vários problemas nos processos e produtos, neste caso ferramentas como o diagrama de causa e efeito e gráfico de Pareto, podem ser utilizados para a identificação e priorização do problemas a serem analisados.
2. Escolha dos parâmetros do experimento: Esta fase envolve a coleta de informações técnicas do produto ou processo, devem ser listados todos os fatores de controle, ruídos, variáveis de resposta. É necessário planejar muito bem quais são os fatores que serão analisados no experimento, de maneira a não excluir fatores relevantes e também, não testar um número muito grande de fatores, uma vez que o número de experimentos a serem realizados é função direta da quantidade de fatores e experimentos existentes. Existe uma relação de compromisso entre performance e custo do experimento, uma vez que um grande número de fatores implica em um grande número de corridas. Segundo Galdámez (2002), nesta fase as informações técnicas podem resultar de uma combinação entre o conhecimento prático (experiência) e a compreensão teórica do objeto de estudo.
3. Seleção para posterior utilização durante a análise dos resultados. Informações estas que tendem a enriquecer a análise.
4. Análise dos dados: Nesta etapa os conceitos estatísticos são aplicados para descrever qual o efeito provocado na variável de resposta (fator dependente), pelas variáveis de controle (fatores independentes). A análise estatística ainda permite tomar decisões quanto à aceitar ou rejeitar as hipóteses formuladas nas etapas iniciais do experimento. Atualmente, estas análises são auxiliadas por softwares estatísticos como (MINITAB, STATISTICA, EXCEL, DOE PRO), que realizam cálculos estatísticos, geram relatórios e gráficos para a realização das análises.
5. Interpretação dos Resultados: Esta é uma das fases mais importante do experimento. Aqui as pessoas responsáveis por ele, devem extrair informações e conclusões práticas do experimento e com isso recomendar ações. Nesta etapa deve ser questionado se as respostas satisfazem as questões experimentais definidas na primeira etapa ou se é

necessário formular novas questões experimentais revisando as anteriores. Os gráficos gerados pelos softwares de estatística ajudam bastante nesta fase de interpretação dos resultados.

6. **Elaboração de Relatórios:** O trabalho realizado deve ser descrito, identificando-se as limitações práticas e teóricas encontradas, resultados e conclusões obtidas. Este relatório pode ser de grande benefício para o processo de avaliação do desempenho do experimento, bem como para o processo de revisão e comunicação entre as pessoas: engenheiros, operadores, gerentes, entre outros.

2.7.4 Planejamentos Fatoriais 2^o

Segundo Montgomery (2005) as matrizes ajudam a garantir que as informações obtidas sejam confiáveis e que os recursos disponíveis para a experimentação (equipamentos, pessoas, materiais e informações) sejam bem utilizados. De acordo com o autor planejamentos fatoriais são os mais indicados em situações nas quais se tem diversos fatores e se deseja conhecer quais são os de maior influência. O método fatorial completo (*Full Fatorial Designs*) consiste em testar todas as combinações entre níveis pré-estabelecidos das variáveis, cobrindo assim todo o espaço experimental. Para Galdámez (2002), planejamentos fatoriais são indicados para fases iniciais do procedimento experimental, na qual existem diversos fatores. Porém deve-se selecionar cuidadosamente quais são os fatores que serão analisados, pois enquanto o número de fatores cresce linearmente, o número de experimentos para esses fatores cresce exponencialmente. Uma quantidade muito grande de fatores pode tornar um processo de experimentação inviável. Por isso uma pré-seleção de fatores deve ser realizada junto com especialistas.

O método fatorial permite estabelecer um modelo ótimo dentro dos níveis estabelecidos para as variáveis. Porém, não há garantia de que os níveis estabelecidos estejam na região ideal de operação, ou seja, o ótimo local pode vir a ser diferente do ótimo global. Para assegurar o melhor desempenho possível do processo, pode ser necessário fazer uso do método de análise de superfície de resposta.

2.7.5 Método da Superfície de Resposta

Segundo Myers & Montgomery (1995), a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR ou RSM do inglês "*Response Surface Methodology*"), é um conjunto de técnicas de planejamento e análise de experimentos usada na modelagem matemática de respostas. A MSR passou a ser aplicada pelas empresas, visando à melhoria da qualidade dos produtos e

processos, aumento da produtividade e redução do tempo de desenvolvimento de produto, entre outros fatores. O sucesso alcançado pelas indústrias motivou outros setores a conduzir (planejar) e analisar estatisticamente os seus experimentos (ELSAYED & CHEN, 1993). A MSR pode ser aplicada tanto para a modelagem de apenas uma única resposta (single-response analysis) como para problemas em que são observadas varias características de qualidade. Sendo este método conhecido como otimização de multi-respostas (multiple-response experimental design) (MYERS & MONTGOMERY, 1995).

Os principais benefícios da utilização da superfície de resposta são:

- Determinar as condições ótimas dos fatores de entrada (Xs) para determinar o melhor valor de resposta (Y).
- Conhecer característica da função resposta, que mais se aproximam das condições reais de operação do sistema.
- Identificar o relacionamento existente entre os parâmetros de entrada e a resposta.

A análise de uma superfície de resposta é feita em termos de uma superfície ajustada. Se tal superfície é adequada, sua análise será aproximadamente equivalente a análise da superfície real. Evidentemente, usando-se um projeto de experimentos adequado para coletar os dados das respostas (y), os parâmetros do modelo (x) serão estimados eficazmente. Geralmente, quando se está em um ponto da superfície de resposta que está distante do ponto de ótimo, a curvatura do sistema é bem pequena, de onde decorre que um modelo de primeira ordem seja adequado para modelar a resposta. O objetivo experimental é, então, caminhar rápida e eficazmente em direção às proximidades da região de ótimo. Uma vez que tal região é encontrada, um modelo mais elaborado deve ser utilizado, tal como o de segunda ordem. Neste estágio, deve-se localizar o ponto ótimo. Portanto, o objetivo da RSM é determinar as condições ótimas de operação para um sistema ou determinar a região do espaço fatorial na qual as necessidades operacionais sejam satisfeitas.

O projeto quadrático denominado *Box-Wilson Central Composite Design*, ou, simplesmente, *Central Composite Design (CCD)*, é formado por três grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo ou um fatorial fracionário, um conjunto de Pontos Centrais "*Center Points*" e, adicionalmente, um grupo de níveis extras denominados Pontos axiais "*Axial points*" ou *StarPoints*. Se a distância entre o centro do projeto e ponto fatorial (+1;-1) for aproximadamente 1 (em módulo), a distância do centro ao *Axial Point* será maior que a unidade.

Um CCD é recomendado quando o planejamento fatorial necessitar de experimentação seqüencial. Isto porque estes *projetos* podem incorporar informações de um experimento

fatorial apropriadamente planejado (Ganguli, 2002). O número de *Axial Points* em um CCD é igual ao dobro do número de fatores e representam os valores extremos de cada fator. Em função de sua localização, podem ser Circunscritos, Inscritos ou de Face Centrada. O *Circunscrito* (CCC) é o CCD original. Nele, os *Axial Points* estão a uma distância a do centro, baseado nas propriedades desejadas do projeto. Aumentando-se um fatorial existente com pontos axiais obtém-se o arranjo mostrado na **Figura 2.9**.

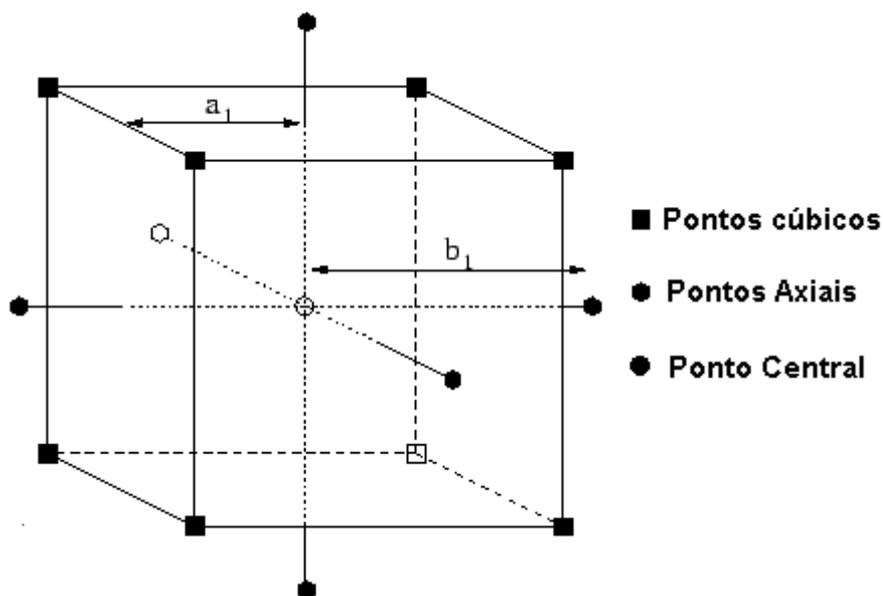


Figura 2.9 - Representação gráfica de um Central Composite Design

A seguir é descrito um dos métodos de otimização que pode ser utilizado para se identificar o ponto ótimo de desempenho. No procedimento de otimização, um primeiro passo é identificar uma função matemática que modele a variação das respostas em função das variações dos fatores investigados (MYERS & MONTGOMERY, 1995). Segundo os autores, os polinômios algébricos são amplamente utilizados para identificar a região de ótimo. O grau de aproximação depende essencialmente do grau do polinômio e da faixa do intervalo considerado. Geralmente, a primeira função que é utilizada para se aproximar ao conjunto de resultados são os polinômios de primeira ordem (**equação- 2.1**).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad \text{Eq. (2.1)}$$

Onde $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$, representam os coeficientes do polinômio; x_1, x_2, \dots, x_k são os fatores experimentais e ε é o erro experimental.

Nesse caso, procura-se verificar se a variação da resposta em função dos fatores é bem modelada por uma superfície plana, conforme mostrado na **figura 2.10**.

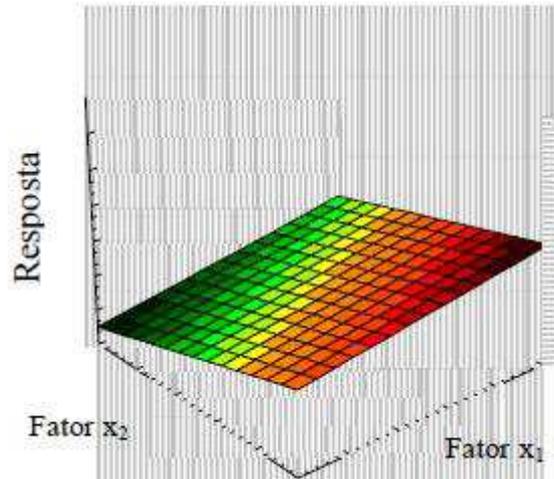


Figura 2.10 - Superfície de resposta tridimensional plana
 Fonte: Montgomery (2005).

Montgomery (2005) ressalta que se a variação da resposta em função dos fatores é melhor modelada por uma superfície não plana, ou seja, se o teste estatístico apontar que o modelo linear não satisfaz as condições de operação do sistema, é sinal que existe uma curvatura na superfície de resposta, conforme mostrado na **Figura 2.11**, então a função a ser aproximada ao conjunto de resultados é um de mais alta ordem, como o apresentado pela **equação (2.2)**.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad \text{Eq. (2.2)}$$

Onde $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$, representam os coeficientes do polinômio; x_1, x_2, \dots, x_k são os fatores experimentais e ε é o erro experimental.

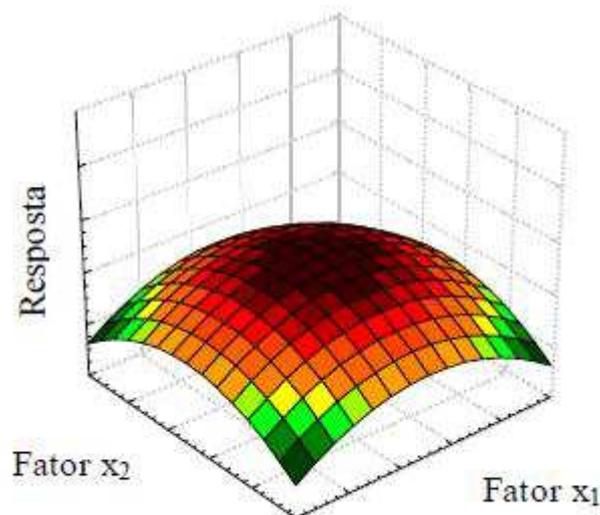


Figura 2.11 - Superfície de resposta tridimensional não plana.
 Fonte: Montgomery (2005).

3. PESQUISA EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Este capítulo apresenta o desenvolvimento experimental aplicado no estudo do processo de solda por resistência elétrica de pequena escala utilizado na soldagem de pequenos componentes constituídos de cabos multifilares de cobre e terminais de latão. O objetivo é descrever a metodologia utilizada, desde a fase inicial de adaptação do processo até os experimentos industriais realizados para determinar os principais parâmetros de controle e os níveis de regulagens do processo, culminando com a determinação de uma condição ótima de ajuste que permita a realização da solda dos componentes.

Nesta seção serão relatadas as atividades realizadas na fase da pesquisa experimental, as dificuldades encontradas pela equipe que realizou os ensaios e como foram determinados os principais parâmetros de controle para o processo estudado. Os experimentos foram realizados no departamento de desenvolvimento de processos industriais de uma empresa multinacional de autopeças e contou com a participação de uma equipe multifuncional, com representantes das seguintes áreas:

- Engenharia de processos
- Engenharia de produto
- Manufatura
- Qualidade

3.2 A empresa

A empresa possui uma grande diversidade de linhas de produtos e tem uma política de valorização constante do desenvolvimento e inovações para seus produtos e processos. Possui diversos centros tecnológicos localizados em diferentes países como: Alemanha, Estados Unidos, México, Brasil e China. A pesquisa foi desenvolvida no centro de desenvolvimento do Brasil com o apoio de especialistas e recursos de laboratório dos Estados Unidos e Alemanha.

3.3 Objeto de estudo

Os experimentos foram realizados sobre a união de cabo de cobre multifilares (7 filamentos que totalizam uma de bitola de 0,35mm), mostrado na *Figura 3.1* com terminais de latão de espessura 0,5mm revestido com zinco (*Figura 3.2*). Em função das dimensões dos

elementos a serem soldados, tal aplicação se caracteriza como sendo de pequena escala.



Figura 3.1 - Cabo de cobre multifilar (7 filamentos- diâmetro de 0,35mm).

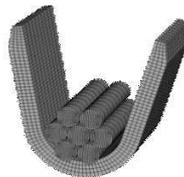


Figura 3.2 - Terminal e cabo multifilar.

Para o desenvolvimento experimental, foi utilizado um equipamento de solda por resistência elétrica com as seguintes características:

- Corrente alternada
- Acionamento dos eletrodos de forma pneumática
- Transformador de 25 kVA
- Fabricante: Presol Transweld.

Como critério de avaliação das soldas executadas foi analisado a resistência mecânica das peças soldadas. Para o atendimento de normas e requerimentos especificou-se como critério de aceitação para validação do processo que a resistência à tração da união apresentasse um valor mínimo de 60 Newtons. Vale ressaltar que esta resposta pode ser considerada como a única mensurável neste tipo de soldas caracterizada como de pequenas dimensões. Nos processos de solda por resistência dito convencional há a possibilidade de avaliações de outras respostas como, por exemplo, a caracterização da geometria de solda (penetração, indentação, diâmetro do ponto, zona térmicamente afetada, entre outras), porém estas características não foram avaliadas neste trabalho.

3.4 Desenvolvimento da Pesquisa Experimental

Para a condução da pesquisa experimental, foram seguidos os passos recomendados por diversos autores como Antony et. al. (1998); Coleman & Montgomery (1993); Colombari (2004) e Galdámez (2002), cujas etapas recomendadas são as seguintes:

1. Definição dos objetivos do experimento;
2. Definição dos fatores do experimento;
3. Seleção dos níveis dos fatores de controle;

4. Seleção das variáveis de resposta;
5. Seleção da matriz experimental;
6. Processamento das amostras;
7. Análise dos dados;
8. Interpretação dos resultados.

Segundo os autores citados, o cumprimento destas etapas garante ao experimento uma maior organização trazendo uma maior confiabilidade das informações e, com isso, melhores análises. A seguir, será apresentado a descrição de cada uma destas etapas, aplicados ao objeto de estudo desta pesquisa.

3.4.1 Definição dos objetivos do primeiro experimento.

O objetivo deste primeiro experimento é identificar quais são os fatores que mais influenciam o processo de solda por resistência elétrica, quando aplicado a cabos de cobre multi-filares e terminais metálicos de latão, todos caracterizados como de pequena dimensão.

3.4.2 Levantamento dos fatores de controle do primeiro experimento.

Para a identificação dos fatores de controle com maior potencial de influência no processo foi realizada uma revisão bibliográfica na literatura em tópicos associados à área de pesquisa, conforme descrição no capítulo 2. Diversos fatores foram levantados, como:

- Geometria das peças a serem soldadas;
- Geometria dos eletrodos;
- Materiais dos eletrodos;
- Espessura das peças a serem soldadas;
- Formas de fixação das peças;
- Configuração de montagem dos eletrodos e polaridade;
- Pressão de contato dos eletrodos;
- Intensidade da corrente elétrica durante a soldagem;
- Tempo de soldagem;
- Tempo de pré-pressão;
- Tempo de pós-pressão;
- Tempo entre soldas;
- Frequência de solda

Porém seria inviável realizar experimentos considerando todos estes fatores, o que exigiria um número muito grande de experimentos. Segundo Montevechi et al (2007) existe

uma relação de compromisso entre performance e custo do experimento, sendo necessário um planejamento criterioso dos fatores a serem analisados, de maneira a não excluir fatores relevantes e não testar um número muito grande de fatores, pois a quantidade de rodadas experimentais é diretamente proporcional a quantidade de fatores selecionados. Portanto foi necessário realizar uma pré-seleção dos fatores antes da realização dos experimentos.

3.4.3 Seleção dos fatores de controle.

Foram utilizados dois critérios para a seleção dos fatores. O primeiro foi basear-se em trabalhos de solda por resistência elétrica publicados na literatura, em assuntos que apresentassem certa similaridade com o proposto, e que se caracterizassem como sendo de pequenas dimensões. O outro critério foi relacionado a capacidade de controle dos níveis dos fatores de entrada. Neste sentido, diversos trabalhos foram avaliados, a **Tabela 3.1** mostra em cada trabalho, os fatores selecionados para a realização do experimento.

Autor	Fatores selecionados				Tipo de solda
Wu et. al. (2008)	Corrente	Pressão			Pequena dimensão
Fujiwara et. al. (2008)	Corrente	Pressão	Tempo de solda		Pequena dimensão
Goodarzi et. al. (2009)	Corrente	Pressão	Tempo de solda	Tempo de pré-pressão	Pequena dimensão
Martin et. al. (2008)	Corrente	Pressão	Tempo de solda		Pequena dimensão
Qiu et. al. (2008)	Corrente	Pressão	Tempo de solda		Pequena dimensão
Yi. et. al. (2008)	Corrente	Pressão	Tempo de solda	Corrente de pré-aquecimento	Pequena dimensão
Aslanlar et. al. (2007)	Corrente		Tempo de solda		Pequena dimensão
Vural et. al. (2006)	Corrente				Pequena dimensão
Tan et. al. (2006)	Corrente	Pressão	Tempo de solda		Pequena dimensão
Farson et. al. (2003)	Corrente	Pressão	Tempo de solda		Pequena dimensão
Chang & Zhou (2003)	Corrente	Pressão	Raio de contato		Pequena dimensão

Tabela 3.1 – Autores versus fatores do processo de solda por resistência elétrica

Da Tabela 3.1, verifica-se que os fatores mais abordados são:

- Corrente de solda;
- Pressão de contato dos eletrodos;
- Tempo de solda;

- Tempo de pré-pressão e,
- Corrente de pré-aquecimento.

Como citado, o outro critério de avaliação considerado foi a capacidade de definição e controle de níveis dos fatores. De acordo com Montgomery (2005) os fatores de controle do experimento devem ser variáveis independentes e controláveis. Com a ajuda de especialistas em solda por resistência elétrica os fatores pré-selecionados foram classificados em três classes de controle distintas:

- Fácil controle – Permite alterações numa escala contínua.
- Médio controle – Permite alterações, porém de maneira não continua (discreta).
- Difícil controle – Não permite o controle.

Baseado nesta padronização, a **Tabela 3.2** mostra a classificação dos fatores envolvidos no processo de acordo com a sua forma de controle.

Item	Nome do fator	Controle
1	Geometria das peças a serem soldadas	Médio
2	Geometria dos eletrodos	Médio
3	Espessura das peças a serem soldadas	Médio
4	Formas de fixação das peças	Médio
5	Corrente de pré-aquecimento	Médio
6	Configuração de montagem dos eletrodos e polaridade	Fácil
7	Materiais dos eletrodos	Fácil
8	Distância entre os eletrodos	Fácil
9	Pressão de contato dos eletrodos	Fácil
10	Intensidade da corrente elétrica durante a soldagem	Fácil
11	Tempo de soldagem	Fácil
12	Tempo de pré-pressão	Fácil
13	Tempo de pós-pressão	Fácil
14	Tempo entre soldas	Fácil
15	Frequência de solda	Fácil

Tabela 3.2 - Classificação da dificuldade de controle dos parâmetros de entrada.

Cruzando-se a capacidade de controle com os fatores considerados pelos autores da área anteriormente mencionados, foram selecionados como os fatores com maior potencial de influencia para o processo e, portanto, sujeitos a avaliação nos testes preliminares (primeiro

experimento) os seguintes fatores:

- Pressão de contato dos eletrodos;
- Intensidade da corrente elétrica;
- Tempo de solda;
- Tempo de pré-pressão.

Como equipamento para a realização dos experimentos foi utilizado uma máquina estacionária de pequeno porte com potência de 25 KVA com a parte inferior fixa e a parte superior móvel e acionada por um cilindro pneumático, da marca Presol Transweld. A **Figura 3.3** mostra detalhes do painel do equipamento que permite o controle dos fatores a serem testados no experimento.



Figura 3.3 – Fatores de controle

Para a realização dos experimentos foi levado em consideração alguns aspectos específicos relacionados ao fatores de controle bem como faixas de operação a serem adotadas:

- Pressão de contato dos eletrodos: Realizada por meio de um cilindro pneumático com capacidade de faixa de ajuste de 1 a 7 bar. O ajuste foi realizado através de um manômetro de pressão.
- Intensidade da corrente elétrica: Controlada por meio do ajuste da potencia da fonte de energia, sendo que quanto maior a potência elétrica, maior a corrente e vice e versa. Normalmente considera-se como valor mínimo de ajuste aquele que garanta uma formação mínima do ponto de solda, e como valor máximo a condição que evita a expulsão de material da região soldada. Utilizou-se uma fonte de 25 KvA, com uma escala de regulagem de 0 – 100% desta potência.
- Tempo de soldagem: Possui ajuste realizado pela quantidade de ciclos de rede.

Considerando-se uma rede de 60 Hz, cada ciclo equivale a uma duração de 16 ms.

- Tempo de pré-pressão: É o intervalo de tempo entre a primeira aplicação de força nas peças e o início de passagem de corrente. O controle também é dado pela quantidade de ciclos da rede.

Os demais fatores foram fixados conforme a especificação dos especialistas.

3.4.5 Adequação do equipamento e demais fatores de controle.

Antes da realização dos experimentos foram realizados testes preliminares para a adequação dos fatores de controle que iriam manter-se fixos sendo que os ajustes foram realizados segundo a seguinte ordem:

- Geometria dos terminais: Durante a realização dos primeiros testes verificou-se que a geometria dos terminais utilizados (formado em U) como ilustrado na *Figura 3.2*, não permitia uma área de contato adequada entre o terminal e o eletrodo de solda, dificultando a pressuposta ocorrência de um fluxo uniforme de corrente elétrica na área dos cabos, terminais e eletrodos. Isto originou soldas não homogêneas resultando em baixa resistência mecânica das mesmas muito provavelmente devido a irregularidade na formação dos pequenos pontos de soldas (lentilhas de solda). Consultado a literatura e em conjunto com o time do projeto optou-se pela utilização de terminais de geometria plana, já que estes, muito provavelmente, permitiriam uma maior área de contato, proporcionando um fluxo de corrente mais uniforme e a formação de maiores lentilhas de solda.
- Geometria dos eletrodos: Normalmente em solda ponto de grande dimensão utilizam-se eletrodos de forma arredondada. No caso específico deste trabalho, verificou-se em testes preliminares que esta geometria não atendia aos objetivos pretendidos em função da soldagem ser realizada em cabos multifilares e não sobre uma superfície plana. Observou-se que a área de contato mudava de solda para solda, característica esta similar a mencionada por Steinmeier (2006) e ilustrada de forma esquemática na *Figura 3.4*. Assim optou-se por utilizar eletrodos de geometria retangular (*Figura 3.4*), tanto inferior como o superior, e com dimensões que permitisse um bom contato entre os cabos e o terminal.

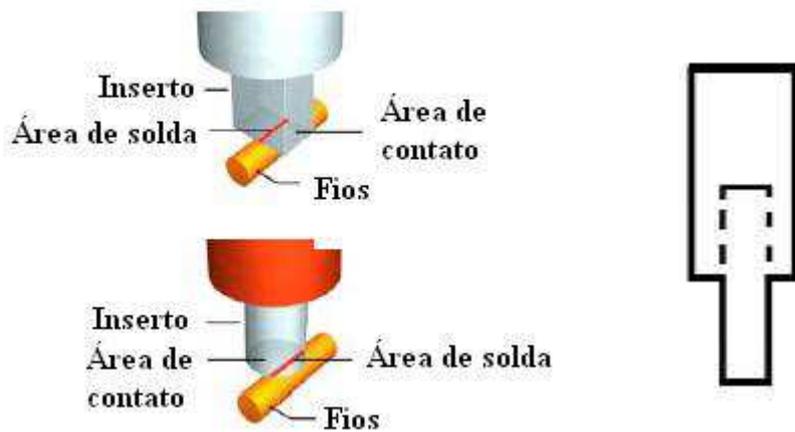


Figura 3.4 - Geometria do eletrodo *versus* área de contato

- Material dos eletrodos: Inicialmente foram utilizados eletrodos normais de cobre eletrolítico. Entretanto, como era de se esperar, foi observado após as primeiras soldas que os terminais e cabos aderiam aos eletrodos, principalmente no eletrodo inferior no qual os terminais eram posicionados, dificultando dessa forma a remoção do material soldado. Notou-se ainda que, a medida que as soldas eram realizadas, havia um acúmulo de calor nos eletrodos, mesmo utilizando-se curtos tempo de soldagem (16 ms). Sendo constituído dos mesmos materiais a serem trabalhados (cabos de cobre e terminais de latão), tanto materiais como eletrodos atingiam a fusão na mesma temperatura (1084 °C), fazendo com que os eletrodos e materiais a serem soldados se fundissem. A solução encontrada foi substituir eletrodos de cobre por outro material com ponto de fusão ocorrendo a temperaturas mais elevadas. Para esta definição, alguns aspectos foram considerados. Vale destacar que para a escolha do eletrodo mais adequado há a necessidade de se levar em consideração a condutividade elétrica dos materiais a serem soldados. Steinmeier (2006) cita que para soldas de pequenas dimensões de materiais de média e alta condutividade como latão e cobre, respectivamente, eletrodos confeccionados com materiais de baixa condutividade como cobre/tungstênio, molibdênio ou tungstênio são os mais adequados. Levando em consideração tais informações, optou-se por eletrodos confeccionados com tungstênio por possuir ponto de fusão de 3422 °C. Como o tungstênio é um material mais nobre e por isso de maior custo, foram utilizados eletrodos com o corpo em cobre com insertos de tungstênio nas extremidades, tanto para o eletrodo superior quanto para o inferior.
- Fixação das peças: Para que as soldas pudessem ser executadas de forma adequada e repetitiva, foi desenvolvido um dispositivo para o posicionamento do terminal sob o

eletrodo inferior, garantido dessa forma a uniformidade de posicionamento para a realização de todas as soldas.

- Configuração de montagem dos eletrodos e polaridade: A configuração adotada foi a oposta e direta com a corrente fluindo diretamente de um eletrodo para o outro. O eletrodo superior foi definido como o catodo (polaridade negativa) e o inferior foi definido como o anodo (polaridade positiva). A **Figura 3.53** mostra a configuração de montagem.

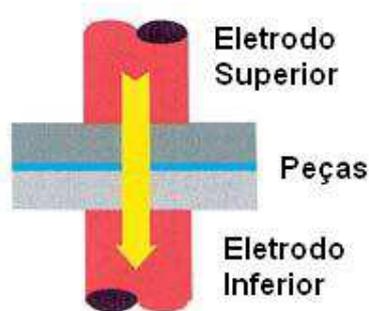


Figura 3.5 - Configuração de montagem dos eletrodos.

- Tempo de pós-pressão: É normalmente utilizado para permitir o resfriamento uniforme e gradual da área de solda. Como as peças processadas apresentavam pequenas dimensões, o resfriamento pós-solda ocorre de maneira rápida conforme observado por Fujiwara (2008). Portanto observou-se que o tempo mínimo de ajuste de pós-pressão permitido pelo equipamento foi suficiente para garantir o resfriamento adequado da região de solda.
- Tempo de espera entre soldas: Utilizado para permitir o resfriamento dos eletrodos. Devido a alta taxa de resfriamento que ocorre em soldas de pequenas dimensões e devido a alimentação das peças serem realizadas de forma manual, o tempo decorrido entre uma solda e outra era suficiente para permitir o resfriamento dos eletrodos, não necessitando dessa maneira de um tempo de espera entre as soldas.

3.4.6 Seleção dos níveis dos fatores de controle

De acordo com Chang e Zhou (2003) a prática da “redução de escala” dos parâmetros aplicados em soldas de grandes dimensões, não pode ser aplicada de forma direta para as de pequenas dimensões. Esta última, em função da pequena espessura tem sua forma de ajuste muito particular para se chegar a condições adequadas de soldagem. Por isso foram necessários alguns testes iniciais para a definição de faixas de operação para a aplicação desejada. Segundo Galdámez (2002), esta definição é resultado da combinação entre o conhecimento prático (experiência) e a compreensão teórica do objeto de estudo. Foram realizados diversos “pré-testes” para a definição dos níveis máximo e mínimo dos fatores de

controle, sendo assim possível definir as seguintes faixas de operação para o primeiro experimento (*Tabela 3.3*)

Fator	Unidade	Nível Inferior (-)	Nível Superior (+)
Corrente de solda	kA	2,9	4,1
Pressão dos eletrodos	bar	3	5
Tempo de solda	ciclos	1	2
Tempo de pré-pressão	ciclos	10	20

Tabela 3.3 - Níveis de testes dos fatores de controle (Primeiro DOE)

3.4.7 Seleção da variável de resposta para o experimento inicial

Os experimentos iniciais tiveram como objetivo principal avaliar a influência dos parâmetros selecionados na variável de resposta (resistência à tração), permitindo assim eliminar o(s) fator(es) não significativo(s) ao processo, numa próxima etapa de estudo. Para isto a variável de resposta escolhida foi a resistência máxima à ruptura no teste destrutivo de tração da solda. Segundo Yi *et al* (2008) os valores de força máxima de ruptura são um importante índice de avaliação da qualidade do processo de solda por resistência elétrica, sendo este tipo de avaliação comumente utilizado. Para a realização destes testes de ruptura utilizou-se um máquina universal de tração com velocidade de ensaio (deformação) de 25 mm/min.

3.4.8 Seleção da matriz experimental

De acordo com Rogeon *et al* (2007), a solda por resistência elétrica é um processo que apresenta e interação de fenômenos elétricos, térmicos, mecânicos e metalúrgicos. Isto faz com que exista uma grande probabilidade de se encontrar interações entre os fatores de entrada do processo. Como a quantidade de fatores selecionados para o experimento não era grande (4 fatores) foi possível realizar um experimento fatorial completo. Com este tipo de experimento é possível verificar tanto os fatores principais como suas interações. Para garantir uma melhor avaliação estatística das análises os experimentos foram realizados em ordem aleatória e com uma replicação, o que permite avaliar a repetibilidade do processo através da avaliação do erro experimental.

Utilizando-se um experimento fatorial completo 2^n obteve-se um total de 32 experimentos ($2^4 = 16 = 16 \times 2$ (replicação) = 32) em um único bloco. A *Tabela 3.4* mostra a matriz de experimentos delineada.

Ordem da Corrida	Ordem aleatorizada	Corrente (kA)	Pressão (bar)	Tempo de Solda (ciclos)	Tempo de pré-pressão (ciclos)
1	4	4,1	5	1	10
2	29	2,9	3	2	20
3	8	4,1	5	2	10
4	6	4,1	3	2	10
5	21	2,9	3	2	10
6	11	2,9	5	1	20
7	1	2,9	3	1	10
8	18	4,1	3	1	10
9	26	4,1	3	1	20
10	14	4,1	3	2	20
11	16	4,1	5	2	20
12	10	4,1	3	1	20
13	32	4,1	5	2	20
14	7	2,9	5	2	10
15	23	2,9	5	2	10
16	25	2,9	3	1	20
17	5	2,9	3	2	10
18	24	4,1	5	2	10
19	15	2,9	5	2	20
20	30	4,1	3	2	20
21	19	2,9	5	1	10
22	3	2,9	5	1	10
23	9	2,9	3	1	20
24	28	4,1	5	1	20
25	2	4,1	3	1	10
26	20	4,1	5	1	10
27	31	2,9	5	2	20
28	12	4,1	5	1	20
29	27	2,9	5	1	20
30	17	2,9	3	1	10
31	22	4,1	3	2	10
32	13	2,9	3	2	20

Tabela 3.4 – Matriz Experimental (Fatorial Completo e 1 replicação)

3.4.9 Processamento das amostras

Para o processamento das amostras, os fatores de controle foram ajustados de acordo com a sequência aleatorizada indicados na matriz experimental, mostrada na *Tabela 3.4*. O processamento foi realizado por um operador experiente. Após a soldagem dos cabos multifilares nos terminais, os corpos de prova assim obtidos foram submetidos ao teste de

tração. A **Tabela 3.5** mostra os resultados obtidos de acordo com a ordem padrão dos experimentos realizados.

Ordem da Corrida	Ordem aleatorizada	Tensão de ruptura (N)
1, 17	7, 30	68,1; 49,9
2, 18	8, 25	70,5; 84,6
3, 19	21, 22	41,1; 47,9
4, 20	1, 26	66,2; 82,8
5, 21	5, 17	70,0; 53,5
6, 22	4, 31	81,4; 79,5
7, 23	14, 15	49,8; 64,3
8, 24	3, 18	79,3; 64,8
9, 25	16, 23	44,9; 58,7
10, 26	9, 12	84,5; 85,8
11, 27	6, 29	45,4; 42,9
12, 28	24, 28	76,7; 74,7
13, 29	2, 32	60,7; 45,0
14, 30	10, 20	80,3; 77,6
15, 31	19, 27	47,3; 50,4
16, 32	11, 13	79,3; 86,1

Tabela 3.5 - Resultados do teste de tração (Primeira rodada)

3.4.10 Análise dos resultados

A primeira análise realizada foi a de identificação da influência significativa dos parâmetros, bem como suas interações sobre a resistência à ruptura no teste de tração. Para isto, foi realizada através do software Minitab a análise de variância (ANOVA), cujos resultados são mostrados na **Tabela 3.6**. Observando-se os resultados nota-se que, considerando-se um intervalo de confiança de 95%, a corrente e a pressão se mostraram significativos na resposta considerada (valores em negrito na Tabela 3.6). Analisando a o valor p (nível descritivo) que é uma estatística utilizada para sintetizar o resultado de um teste de hipóteses, para um nível de significância ($\alpha= 0,05$) temos os seguintes resultados:

- A corrente apresentou um $p_valor = 0,000$ ou seja, menor que nível de significância ($\alpha= 0,05$), fazendo deste fator um fator significativo.
- A pressão apresentou um $p_valor = 0,05$, portando foi também considerado um fator significativo.

- Tempo de solda apresentou p_valor = 0,340 ou seja, maior que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), portanto o fator não foi considerado como significativo.
- Todas as interações apresentaram um p_valor > 0,05, portanto nenhuma foi considerada como significativa.

O modelo apresentou um bom coeficiente de correlação do modelo ($R^2 = 85,79$) e razoável explicabilidade do modelo ($R^2_{\text{adj}} = 72,46\%$).

Fator	Efeito	Coefficiente	SE Coef	T	p_valor
Constante		65,438	1,418	46,13	0,000
Corrente	25,888	12,944	1,418	9,13	0,000
Pressão	-6,000	-3,000	1,418	-2,12	0,050
Tempo de solda	2,787	1,394	1,418	0,98	0,340
Tempo de pré-pressão	-0,837	-0,419	1,418	-0,30	0,772
Corrente x Pressão	1,712	0,856	1,418	0,60	0,555
Corrente x Tempo de solda	-2,475	-1,238	1,418	-0,87	0,396
Corrente x Tempo de pré-pressão	5,325	2,662	1,418	1,88	0,079
Pressão x Tempo de solda	2,662	1,331	1,418	0,94	0,362
Pressão x Tempo de pré-pressão	1,663	0,831	1,418	0,59	0,556
Tempo de solda x Tempo de pré- pressão	-1,150	-0,575	1,418	-0,41	0,691
Corrente x Pressão x Tempo de solda	-0,700	-0,350	1,418	-0,25	0,808
Corrente x Pressão x Tempo de pré-pressão	-0,225	-0,112	1,418	-0,08	0,938
Corrente x Tempo de solda x Tempo de pré-pressão	1,237	0,619	1,418	0,44	0,669
Pressão x Tempo de solda x Tempo de pré-pressão	1,550	0,775	1,418	0,55	0,592
Corrente x Pressão x Tempo de solda x Tempo de pré-pressão	3,088	1,544	1,418	1,09	0,293
S					8.02383
R²					85.79%
R²(adj)					72.46 %

Tabela 3.6 – Efeitos Estimados e coeficientes para tração (Primeiro DOE)

A **Figura 3.6** mostra o efeito principal dos fatores na resistência à ruptura dos corpos de prova soldados. Observa-se que o incremento no nível de corrente de 2,9 kA para 4,1 kA, como era de se esperar, aumenta a geração de calor por efeito Joule e, conseqüentemente,

melhora a resistência a tração da junção soldada. Por outro lado, a influência do nível de pressão aplicado pelo equipamento, muito embora tenha uma significância menor, revela que o aumento do nível de pressão provocou uma redução na resistência da junta soldada. De forma geral, sabe-se que no processo de solda por resistência elétrica de grande espessura (acima de 0,5 mm), o aumento da pressão de solda provoca a diminuição da resistência a passagem da corrente elétrica em função da eliminação de pontos que poderiam reduzir a condutividade elétrica do material. O mesmo efeito parece acontecer neste tipo de solda de pequena dimensão, ou seja, a pressão menor aumenta a resistividade elétrica e em consequência maior a geração de calor e fusão localizada, melhorando assim a resistência da solda. Com relação aos outros dois fatores, muito embora não significativos, a **Figura 3.6** mostra o seu comportamento observado.

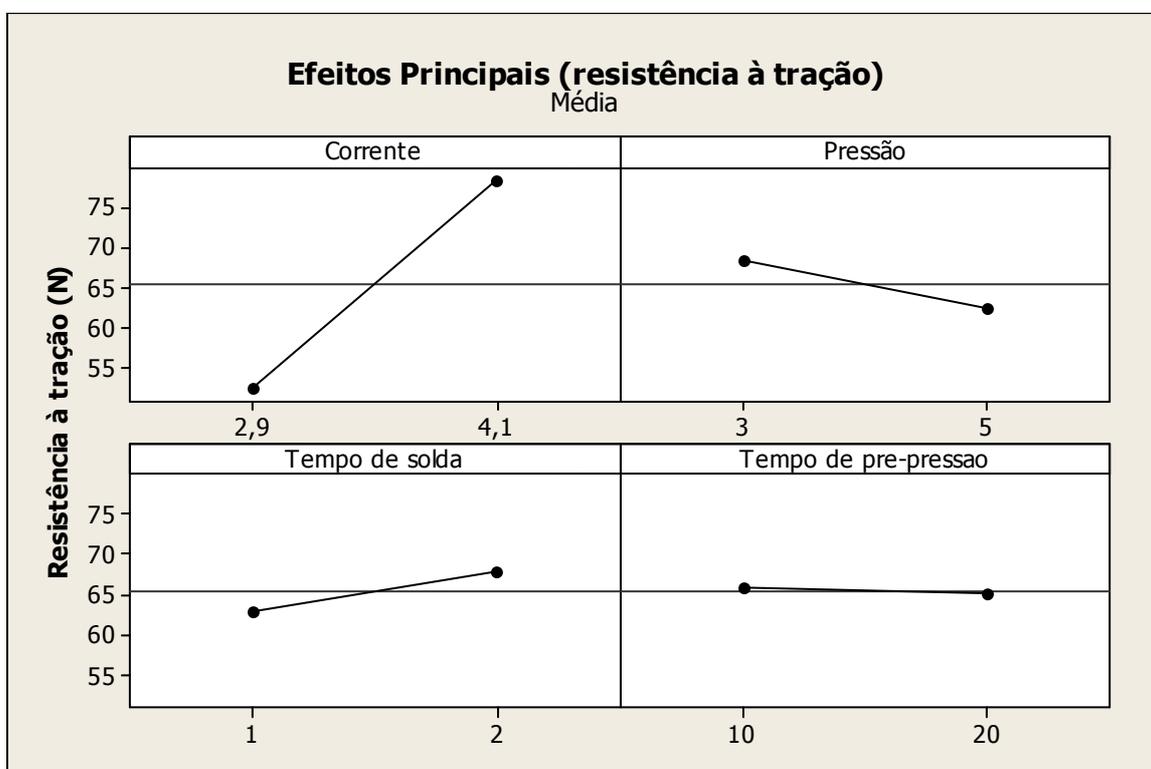


Figura 3.6 - Gráfico linear dos efeitos principais (Primeiro Experimento)

Outra avaliação realizada foi a da análise dos resíduos experimentais, a qual é importante para verificar discrepâncias na adequação do modelo, permitindo desta forma uma maior consistência nas demais análises (Montgomery, 2005). Foram verificadas três suposições: independência, variância constante e normalidade dos dados, sendo todas validadas.

3.4.11 Interpretação dos Resultados

Os resultados obtidos foram apresentados e discutidos com especialistas no processo de solda por resistência elétrica convencional. Esta análise é de fundamental importância para avaliar se os resultados obtidos fazem sentido prático e físico. Analisando-se os dados foi possível verificar que destacadamente o fator que apresentou maior influência foi à corrente de solda, como esperado. O segundo fator de maior influência foi a pressão, a qual se situou no limite de significância. Os outros fatores analisados, tempo de solda e tempo de pré-pressão, não se mostraram influentes de forma significativa para a resistência à ruptura da solda. Contudo segundo recomendação dos especialistas, o tempo de solda é um fator que não deveria ser descartado em testes subsequentes, pois da mesma maneira que a corrente de solda ele tem uma influência direta com a quantidade de calor que será gerada na área de solda. Portanto, mesmo apresentando um *p_value* de 0,340, este fator foi selecionado para o próximo experimento. Um dos motivos para que o tempo de solda não tenha se mostrado significativo pode ser, muito provavelmente, devido ao tempo mínimo utilizado que é de 1 ciclo de rede, o qual pode ser afetado por ruídos da linha de alimentação causados por transitórios de corrente.

3.5 Segunda Rodada Experimental

Na primeira rodada experimental foram identificados os fatores de maior influência na resistência mecânica da solda (corrente, pressão e considerado o tempo de solda). O segundo experimento irá avaliar melhor estes fatores, principalmente o do tempo de solda que será ajustado para maiores valores permitindo uma estabilização adequada da corrente. Todos os passos utilizados para a realização da primeira rodada experimental foram também seguidos para a próxima rodada de experimentos.

3.5.1 Definição do objetivo do experimento

Os objetivos deste segundo experimento são:

- Identificar os principais fatores que influenciam a resistência mecânica da solda;
- Obter uma função matemática que correlaciona a resposta com as entradas do processo (função de transferência).

3.5.2 Seleção dos fatores de controle

Como citado anteriormente foram analisados os seguintes fatores neste segundo experimento:

- Corrente de solda
- Pressão
- Tempo de solda

Nesta segunda rodada experimental, o tempo de pré-pressão foi assim considerado um fator fixo e ajustou-se o seu valor em 10 ciclos de rede.

3.5.3 Seleção dos níveis dos fatores de controle

De acordo com o aprendizado obtido no primeiro experimento, os níveis de tempo de solda foram aumentados para a obtenção de resultados mais consistentes. Por isso neste segundo experimento ao invés de se utilizar o primeiro e o segundo ciclos, optou-se por aumentar o tempo de solda para 2 e 4 ciclos, permitindo assim uma maior estabilização da corrente. Os valores utilizados no segundo experimento, em seus níveis inferior e superior, estão mostrados na *Tabela 3.7*.

Fator	Nível Inferior (-)	Nível Superior (+)
Corrente de solda (kA)	2,9	4,1
Pressão (bar)	3	5
Tempo de solda (ms)	2	4

Tabela 3.7 - Fatores e níveis de testes dos fatores (Segundo DOE)

3.5.4 Seleção das variáveis de resposta

Novamente se utilizou a resistência à ruptura no teste de tração como resposta do experimento. Nesta rodada experimental objetiva-se entender melhor os fatores significativos para a resistência à ruptura dos componentes soldados, incluindo a curvatura do modelo (utilização de ponto central), além da obtenção de um modelo matemático que correlacione a resistência à ruptura (Y) com os fatores de controle (x`s).

3.5.5 Seleção da matriz experimental

Novamente utilizou-se um planejamento fatorial completo de 2^n com níveis máximo e mínimo. Foram testados 3 fatores tendo-se assim: $2^3 = 8$ experimentos. Para garantir uma melhor avaliação estatística das análises foi realizada uma replicação, que permite avaliar a repetibilidade do processo através da avaliação do erro experimental, dessa forma 8×2 (replicação) = 16, acrescido de 1 ponto central para a verificação da linearidade do modelo, resultando num total de 17 experimentos. As amostras foram processadas da mesma maneira que no primeiro experimento. A **Tabela 3.8** mostra a matriz experimental.

Ordem padrão	Ordem aleatorizada	Corrente (kA)	Pressão (bar)	Tempo de Solda (ciclos)
6	1	4,1	3	4
15	2	2,9	5	4
11	3	2,9	5	2
17	4	3,5	4	3
10	5	4,1	3	2
8	6	4,1	5	4
1	7	2,9	3	2
2	8	4,1	3	2
16	9	4,1	5	4
3	10	2,9	5	2
5	11	2,9	3	4
7	12	2,9	5	4
13	13	2,9	3	4
9	14	2,9	3	2
12	15	4,1	5	2
4	16	4,1	5	2
14	17	4,1	3	4

Tabela 3.8 - Matriz experimental (Fatorial Completo, 1 replicação e 1 ponto central).

3.5.6 Processamento das amostras

Para o processamento das amostras, os fatores de controle foram ajustados de acordo com a sequência aleatorizada indicados na matriz experimental, mostrada na **Tabela 3.8**. Após a soldagem dos cabos multifilares nos terminais, os corpos de prova foram submetidos ao teste de tração. A **Tabela 3.9** mostra os resultados do experimento.

Ordem da Corrida	Ordem aleatorizada	Tensão de ruptura (N)
1, 9	7, 14	53,1; 55,3
2, 10	8, 5	72,3; 73,4
3, 11	10, 3	43,8; 48,0
4, 12	16, 15	73,0; 75,0
5, 13	11, 13	48,0; 43,8
6, 14	1, 17	78,5; 75,5
7, 15	12, 2	65,8; 73,1
8, 16	6, 9	75,8; 74,9
17	4	74,8

Tabela 3.9 - Resultados do teste de tração (segundo experimento)

3.5.7 Análise dos dados

Com os resultados do teste de tração (*Tabela 3.9*), processaram-se as análises de influência dos parâmetros e suas respectivas interações na resistência mecânica das soldas. Foi realizada a análise estatística, os resultados são mostrados na *Tabela 3.10*. Observando-se os resultados nota-se que, considerando-se um limite de significância de 95%, a corrente, o tempo de solda bem como a interação entre eles se mostraram significativos na resposta considerada (valores em negrito na *Tabela 3.10*), visto que os *p_values* correspondentes foram inferiores que o nível de significância considerado (0,05). Nota-se ainda que o ponto central mostrou-se significativo (*p_value* = 0,030) e que a pressão não se mostrou significativa (*p_value* = 0,181). Os resultados da ANOVA também indicam a presença de um bom coeficiente de correlação do modelo ($R^2 = 96,60$) e boa explicabilidade do modelo ($R^2_{adj} = 93,21\%$), sendo este o melhor modelo e sem a necessidade de redução do mesmo. Outro detalhe importante é que o *p_value* do ponto central (0,030) indica que os níveis dos fatores utilizados se encontram na região de ótimo do processo, o que o torna viável para a aplicação da metodologia de superfície de resposta.

Fator	Efeito	Coefficiente	SE Coef.	T	p_valor
Constante		67,203	0,7024	95,67	0,000
Corrente	15,192	7,596	0,7024	10,81	0,000
Pressão	-2,055	-1,027	0,7024	-1,46	0,181
Tempo de solda	10,912	5,456	0,7024	7,77	0,000
Corrente x Pressão	1,802	0,901	0,7024	1,28	0,235
Corrente x Tempo de solda	-8,185	-4,092	0,7024	-5,83	0,000
Pressão x Tempo de solda	1,522	0,761	0,7024	1,08	0,310
Corrente x Pressão x Tempo de solda	-2,940	-1,470	0,7024	-2,09	0,070
Ponto central		7,600	2,8961	2,62	0,030
S	2,80962				
R²	96,60%				
R²(adj)	93,21 %				

Tabela 3.10- Efeitos Estimados e coeficientes para tração (segundo experimento)

A **Figura 3.7** mostra os efeitos principais dos fatores na resistência à ruptura dos corpos de prova soldados. Como o ocorrido no experimento anterior, observa-se que o incremento no nível de corrente de 2,9 kA para 4,1 kA, aumenta a geração de calor por efeito Joule e, conseqüentemente, melhora a resistência a tração da junção soldada. A resistência mínima da solda neste caso se mostrou próximo a 60 N e superior ao verificado no experimento anterior que se situou próximo a 50 N, conforme se observa na **Figura 3.6**. O ajuste do fator tempo no segundo experimento parece ter influenciado nestes resultados, pois observa-se que este fator tornou-se significativo para a resistência mecânica da solda, como o esperado pelas análises dos especialistas. Para corroborar com esta afirmação, nota-se que a interação do tempo com a corrente foi também significativa. Entretanto analisando o efeito principal do fator tempo, observa-se que a utilização no nível inferior em 2 ciclos se obtém soldas com resistência à ruptura perto dos 60 (N) e quando ela passa para 4 ciclos passa-se a ter soldas com resistência a ruptura com aproximadamente 72 (N), ou seja, o tempo de solda apresenta uma grande significância no processo.

Neste segundo experimento foram adicionados pontos centrais para a verificação da linearidade do modelo. O resultado da análise de variância (ANOVA) mostrou que o ponto central é significativo ($p_value = 0,030$) e pela análise da **Figura 3.7** é possível verificar que o ponto central encontra-se fora da reta que liga os pontos máximos e mínimos e indica um valor de resistência a ruptura maior que os níveis máximo e mínimo.

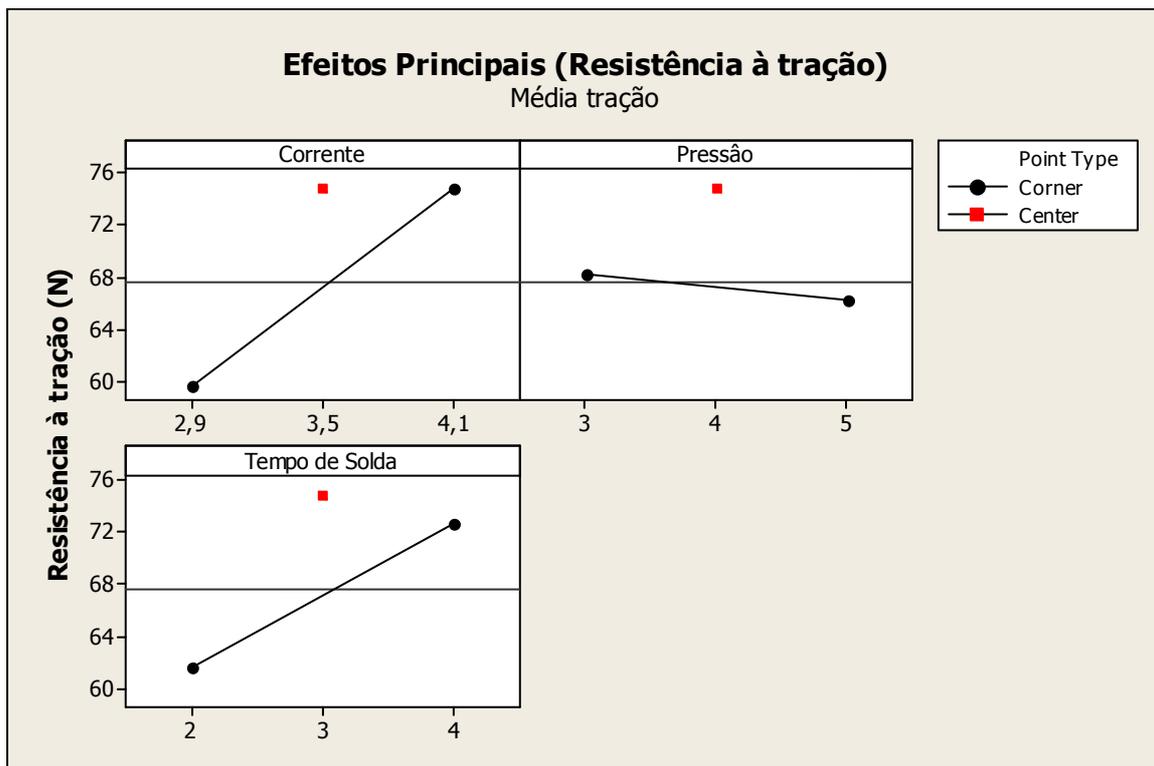


Figura 3.7 - Gráfico linear dos efeitos principais com ponto central (segundo experimento)

Novamente foi realizada a análise dos resíduos, para garantir que as análises realizadas serão confiáveis. Foram verificadas três suposições: a de independência, variância constante e normalidade dos dados, sendo todas estas validadas.

A **equação 3.1** representa o modelo matemático obtido para a resistência a ruptura da solda.

$$Y = 72,0752 - 2,2854 \times I - 34,2935 \times p - 0,50099 \times t + 8,85208I \times p + 0,186198 \times I \times t + 0,583516 \times p \times t - 0,153125 \times I \times p \times t \quad (3.1)$$

onde I – corrente de soldagem (kA) ; p – pressão (bar); t – tempo de solda (ciclos).

Com esta equação é possível realizar previsões dos valores esperados para a resistência a ruptura da solda.

3.5.8 Interpretação dos Resultados

Analisando-se o resultado foi possível verificar que os fatores corrente e tempo de solda e a interação entre ambos apresentaram grande influencia na resistência a ruptura da solda. Ambos os fatores influenciam no calor gerado na área de solda e, portanto, na lentilha de solda formada. Observou-se também que existe um ponto ótimo de ajuste para estes parâmetros. Valores reduzidos de corrente e tempo de solda geram uma baixa quantidade de calor e, conseqüentemente, pequenas lentilhas de solda. Por outro lado, valores elevados de

corrente e tempo de solda geram uma grande quantidade de calor porém uma área termicamente afetada muito grande fragilizando assim o material ao redor da região da solda tornando-o mais quebradiço e, portanto, com uma baixa resistência a ruptura. Percebeu-se nas peças ensaiadas com elevados valores de corrente e tempo de solda, que o rompimento não ocorreu no ponto de solda e sim nos cabos numa região próxima ao local da solda, ou seja, na região termicamente afetada. Foi também possível notar uma coloração diferente nesta região em peças que apresentaram este modo de rompimento. Se observarmos a interação significativa da corrente com o tempo de soldagem (**Figura 3.8**), nota-se que a resistência a ruptura da solda é pouco afetada pelo tempo de solda quando utilizado uma corrente no nível máximo. Em função do observado nos testes, conforme descrito anteriormente, talvez uma opção interessante seja operar com a corrente máxima e tempo mínimo de solda. Porém novos testes devem comprovar tal afirmação.

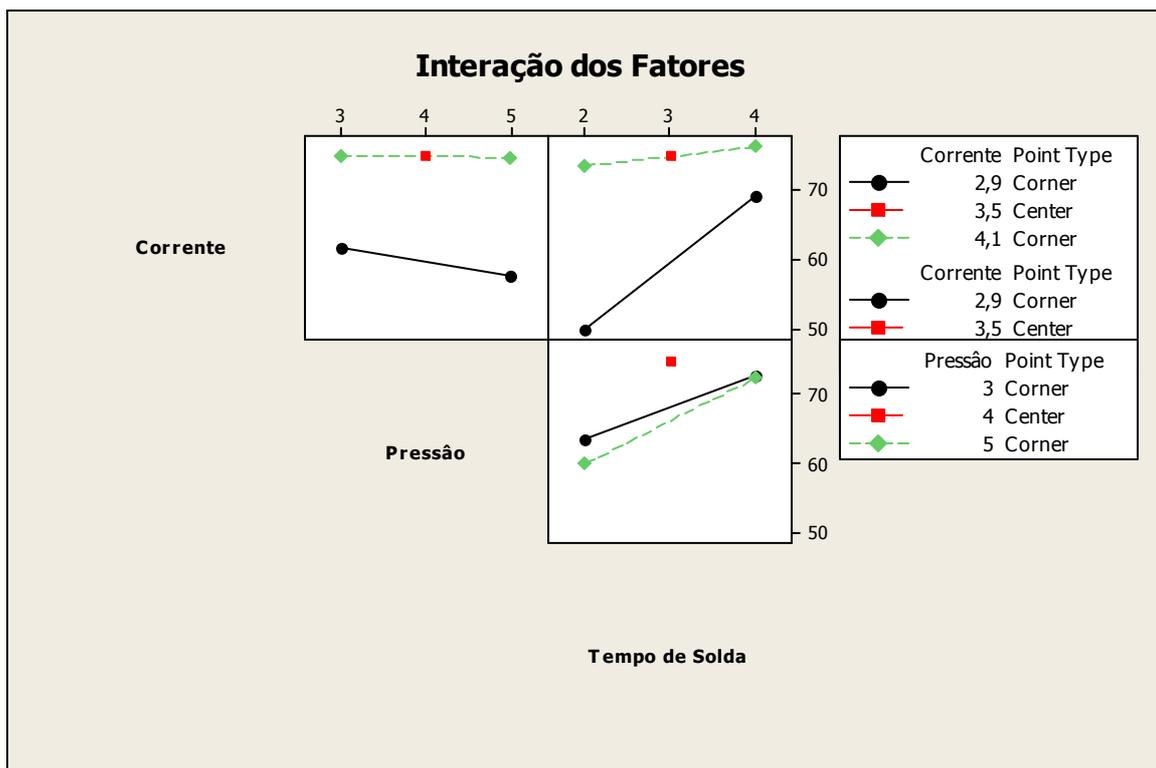


Figura 3.8 – Gráfico das interações dos fatores.

A pressão também apresentou um ponto de ótimo entre os limites testados. Por se tratar de cabos multifilares que apresentam vários pontos de contato tanto com o eletrodo superior como com o terminal uma baixa pressão de solda provoca uma inadequada acomodação do material, fazendo com que não se tenha um fluxo uniforme da corrente. Quando se tem uma inadequada acomodação dos materiais os pontos de contato se dão em

apenas algumas áreas que serão responsáveis por conduzir toda a corrente elétrica, isto faz com que exista uma elevada corrente em pequenas áreas de contato gerando uma quantidade muito grande de calor neste ponto provocando a evaporação e perda de material nestes pontos enquanto pelos quais a corrente não fluiu não ocorre a união. Isto faz com que se tenha uniões de baixa resistência mecânica. Por outro lado, elevados valores de pressão fazem que ocorra a expulsão de material quando este atinge o ponto de fusão e está fortemente comprimido, causando também a perda de material e enfraquecimento da união. Por isso deve-se ajustar a pressão num ponto ótimo para a adequada formação da lentilha de solda.

É necessário encontrar o ponto ótimo dos fatores para não gerar grandes áreas termicamente afetadas e nem pequenas lentilhas de solda. Para melhor definição do ponto de ajuste ótimo decidiu-se pela realização de um terceiro experimento denominado experimento de otimização, no qual será gerado uma superfície de resposta para resistência à ruptura modelando-se os dois fatores principais verificados, ou seja, corrente e tempo de soldagem.

3.6 Experimento de Otimização

O objetivo desta rodada experimental é determinar o nível ótimo de ajuste dos parâmetros de entrada para a obtenção do maior valor possível de resistência a ruptura da solda. Para isto será utilizado um planejamento que permite a obtenção de uma superfície de resposta das variáveis envolvidas (corrente e tempo de solda). Considerando as informações da análise estatística da segunda rodada um novo experimento foi planejado. Nessa fase foi utilizada a técnica de planejamento composto central. Essa técnica consiste em acrescentar pontos axiais ao experimento fatorial 2^2 , com pontos centrais.

3.6.1 Seleção dos fatores de controle

Serão analisados neste experimento os fatores que se mostraram significativos no experimento anterior:

- Corrente de solda
- Tempo de solda

Vale ressaltar que devido a pouca significância do fator pressão no experimento anterior, para esta fase experimental este parâmetro foi considerado fixo e ajustada a 4 bar.

3.6.2 Seleção dos níveis dos fatores de controle

Os valores utilizados no experimento estão mostrados na *Tabela 3.11*.

Fator	Nível Inferior (-)	Nível Superior (+)
Corrente de solda (kA)	2,9	4,1
Tempo de solda (ms)	2	4

Tabela 3.11 - Fatores e níveis de testes dos fatores (terceiro experimento)

3.6.3 Seleção da matriz experimental

A *Tabela 3.12* mostra a matriz experimental delineada para esta fase de experimentos bem como os resultados obtidos para a tensão máxima de ruptura a tração.

Ordem padrão	Ordem aleatorizada	Ponto	Corrente (kA)	Tempo de Solda (ciclos)	Tensão de Ruptura (N)
1	12	0	3,5	3,0	74,8
2	7	-1	3,5	1,6	57,8
3	10	0	3,5	3,0	76,0
4	8	-1	3,5	4,4	72,0
5	4	1	4,1	4,0	73,5
6	9	0	3,5	3,0	76,5
7	11	0	3,5	3,0	75,2
8	6	-1	4,3	3,0	71,4
9	1	1	2,9	2,0	46,0
10	5	-1	2,6	3,0	60,0
11	13	0	3,5	3,0	75,5
12	3	1	2,9	4,0	69,1
13	2	1	4,1	2,0	72,7

Tabela 3.12 - Matriz experimental (Superfície de Resposta)

3.6.4 Adequação e ajuste do modelo

Com os resultados obtidos, procedeu-se a análise de variância (ANOVA) para verificar a adequação do modelo que permita avaliar a influência dos fatores e respectivas interações na resistência mecânica da solda. A *Tabela 3.13* mostra a análise de variância com os *p_values* dos fatores, bem como de suas interações, onde nota-se que todos os fatores e interações são significativos, não havendo portanto necessidade de redução do mesmo. Percebe-se ainda que o modelo desenvolvido é adequado pois apresenta *p_value* inferior a 5% de significância. Os resultados do ANOVA também indicam que o modelo desenvolvido apresenta excelente ajuste já que o valor de $R^2(\text{adj})$ foi de 94,9%. A *equação 3.2* mostra o modelo matemático final obtido em valores codificados e a *equação 3.3* em valores não codificados.

Fator	Coefficiente	SE Coef	T	p_valor
Constante	75.610	0,9240	81,830	0.000
Corrente (I)	5.975	0,7305	8,179	0.000
Tempo de solda (ciclos)	5.516	0,7305	7,552	0.000
Corrente x Corrente	-5.024	0,7833	-6,414	0.000
Tempo de solda x Tempo de solda	-5.324	0,7833	-6,797	0.000
Corrente x Tempo de solda	-5.582	1,0330	-5,404	0.001
S	2,06609			
R ²	97,05%			
R ² (adj)	94,95%			

Tabela 3.13- Efeitos Estimados e coeficientes para tração (terceiro experimento)

$$R = 75,610 + 5,967 \times I + 5,516 \times \text{ciclos} - 5,024 \times I^2 - 5,324 \times \text{ts}^2 - 5,583 \times I \times \text{ciclos} \quad (3.2)$$

$$R = -292,3734 + 135,5665 \times I + 4,3767 \times \text{ciclos} - 13,9566 \times I^2 - 0,0208 \times \text{ciclos}^2 - 0,5815 \times I \times \text{ciclos} \quad (3.3)$$

3.6.5 Análise dos resíduos

Novamente foi realizada a análise dos resíduos, para garantir que as análises realizadas serão confiáveis. Verifica-se que os resíduos são normais já que apresentaram coeficientes de Anderson-Darling (AD) menor que um (AD = 0,143) e p_valor maior que 5% de significância (p_valor = 0,959). Foram ainda verificadas a suposição de independência e variância constante dos dados, sendo todas validadas.

3.6.6 Análise dos efeitos principais dos fatores

A partir do desenvolvimento do modelo final, torna-se possível analisar a maneira como as respostas do processo se comportam devido as alterações nos fatores de entrada. Através da variação dos fatores cujo efeito se deseja estudar, enquanto os demais são mantidos constantes, suas influências sobre as respostas de interesse passam a ser conhecidas. Isto contribui para que informações importantes sobre o processo em análise tornem-se claras.

A **Figura 3.9** apresenta os efeitos principais sobre a resistência da solda, mostrando como é influenciada pelos fatores de controle do processo. Observa-se agora com mais clareza o que havia de certa forma discutido preliminarmente na segunda rodada experimental onde a utilização de uma corrente máxima e tempo máximo afetam a resistência da solda provavelmente pela geração de uma zona termicamente afetada maior, com aumento de sua fragilidade. Por outro lado a utilização de corrente e tempo em seus níveis mínimos não

atendem os requisitos de resistência, visto que o ponto de solda não apresenta fusão suficiente e, conseqüentemente, não suportando os esforços. Nota-se também que a utilização de um tempo mínimo de solda de 1 ciclo não atende, para todos os níveis de corrente utilizados, a resistência mínima exigida de 60 N. Por sua vez a maior resistência da solda foi obtida com níveis de corrente entre 3 e 4 kA e tempo de solda entre 3 e 4 ciclos condições esta que permitiram obter soldas com resistência superior a 70 N.

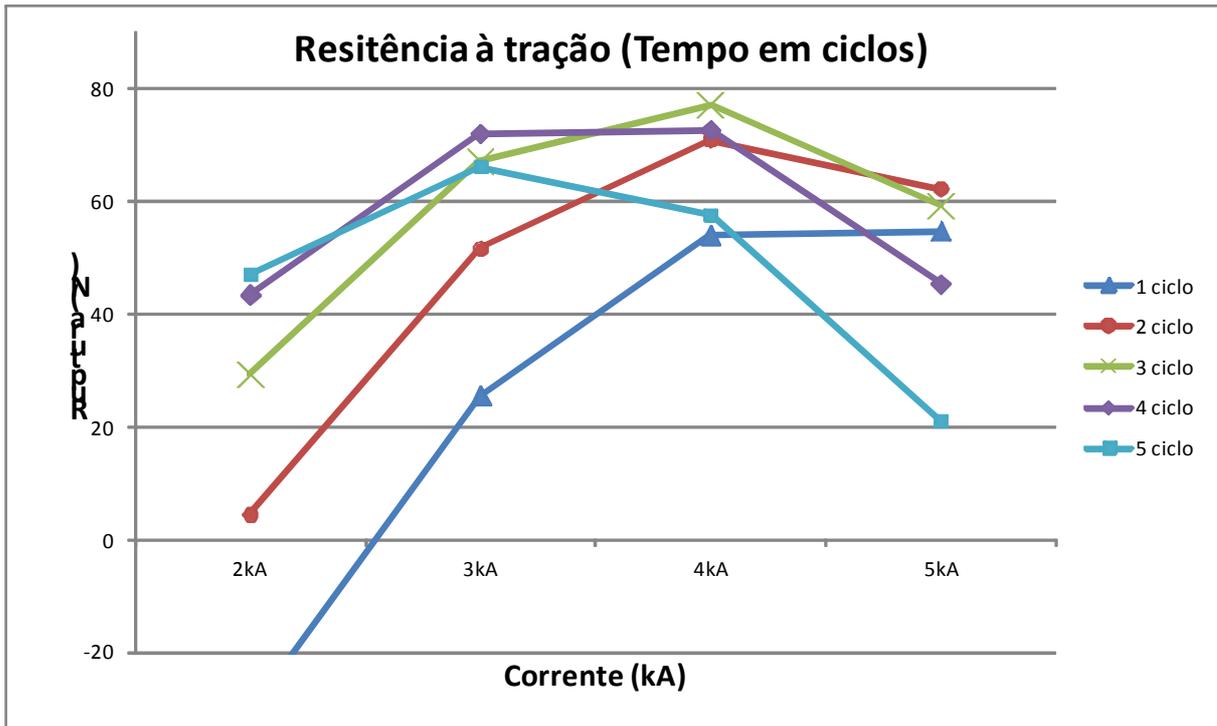


Figura 3.9 - Efeitos principais dos fatores -corrente e tempo- na resistência da conexão soldada.

3.6.7 Análise dos efeitos das interações entre os fatores

A **Tabela 3.13** revelou que as interações entre os parâmetros se mostraram significativas. Isto significa que o efeito conjunto desses parâmetros influencia de forma significativa a resistência da solda. A **Figura 3.10** apresenta o efeito conjunto da corrente e do tempo de solda sobre a tensão de ruptura do conjunto soldado. A superfície de resposta confirma o analisado no item anterior, onde se percebe que a resistência máxima da solda pode ser obtida para faixas de corrente entre 3 e 4 kA com utilização de tempos intermediários.

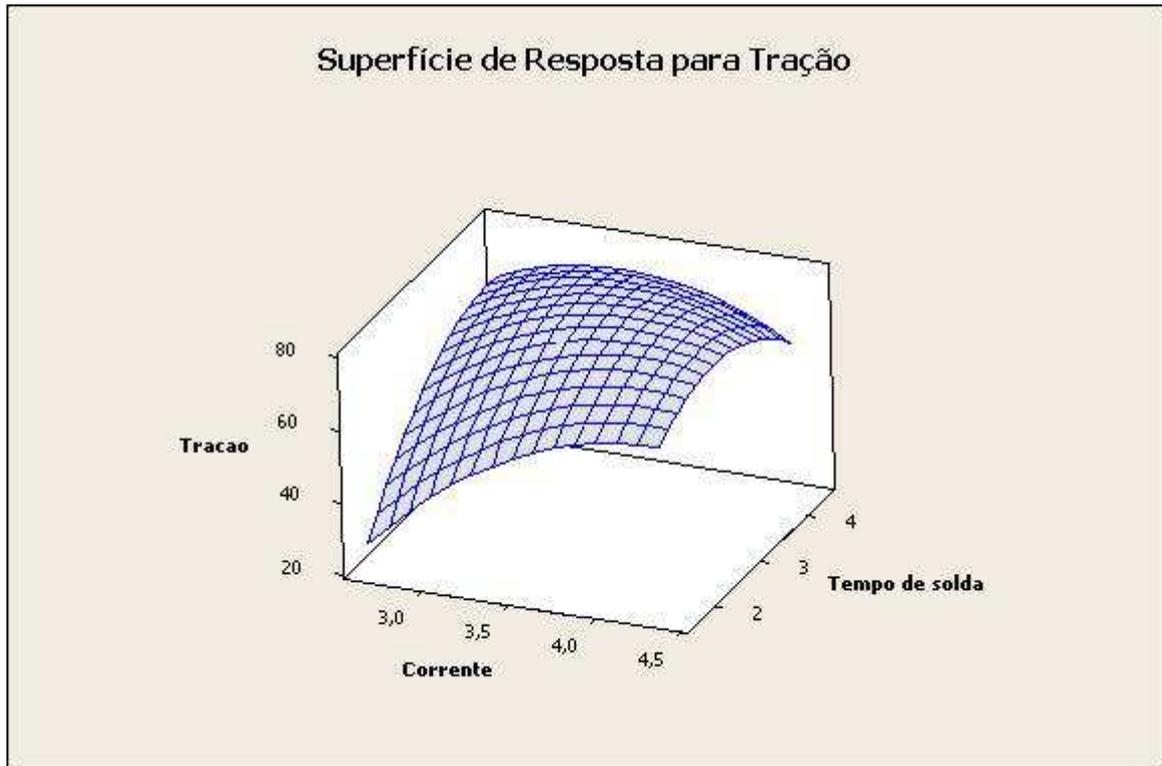


Figura 3.10 - Efeito da corrente e tempo na resistência da solda.

Para se obter a otimização da solda utilizou-se a ferramenta do Minitab denominada “*Response Optimizer*”, cuja condições estabelecidas são mostrada na **Tabela 3.14**. Para a maximização da resistência à tração os valores para o ajuste são:

- Corrente: 3,75 kA
- Tempo de solda: 3,29 – ajuste realizado em 3 cicloswce2

Permitindo obter uma solda com resistência prevista de 77 N.

Response Optimization						
Parameters						
	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Tracao	Maximum	60	70	70	1	1
Global Solution						
Corrente	=	3,74856				
Tempo de sol	=	3,29998				
Predicted Responses						
Tracao	=	77,7048	,	desirability =	1,000000	
Composite Desirability = 1,000000						

Tabela 3.14 - Otimização realizada.

Entretanto a condição otimizada pode não ser a única. Em função das possibilidades de ajuste oferecidas pelo processo, principalmente considerando sua aplicação industrial imediata, foi gerada uma superfície de contorno que permite estabelecer novos ajustes. A Figura 3.13 mostra a superfície de contorno obtida onde se percebe que solda com resistência entre 73 e 77 N, podem ser obtidas mediante diferentes ajustes de corrente e tempo.

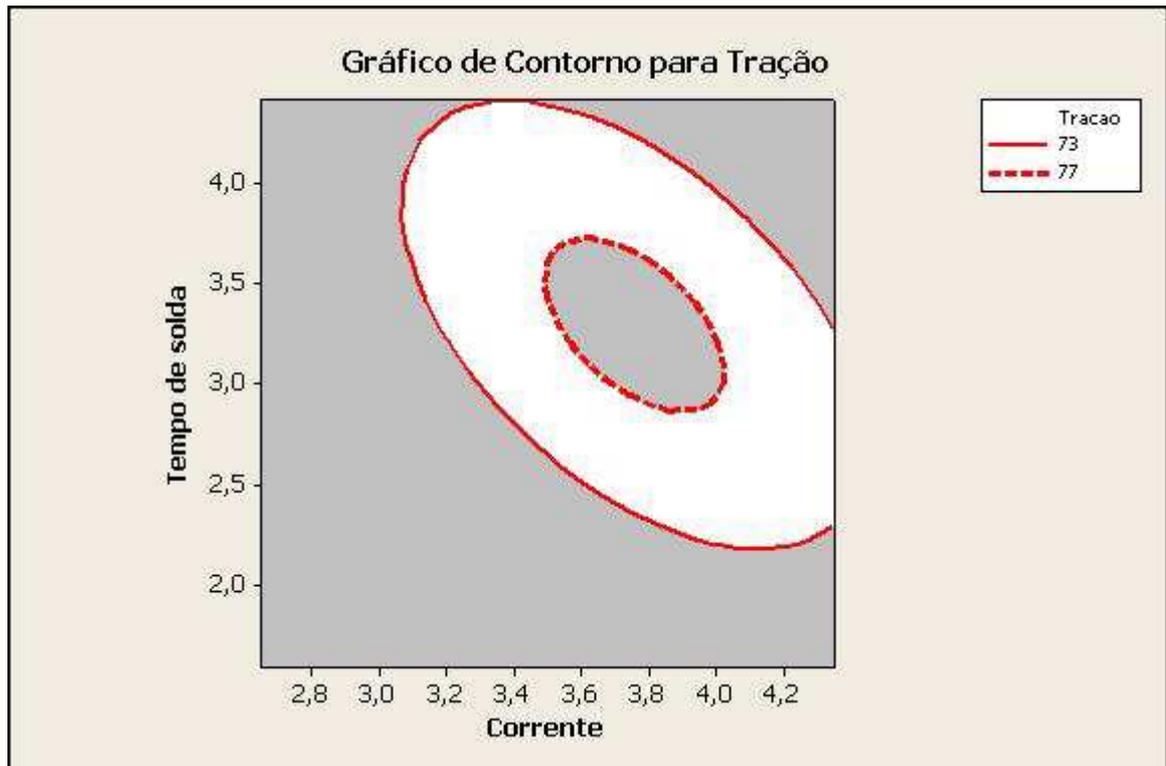


Figura 3.11 - Gráfico de contorno.

3.7 Experimento de Validação

Para validar o ponto de ótimo encontrado, foi realizado um experimento de confirmação. O processo foi ajustado como os valores indicados pelo “*Response Optimizer*”, após a otimização. O gráfico abaixo **Figura 3.12** mostram o resultado dos testes. A análise de capacidade do processo apresentou um Cpk satisfatório, indicando que os níveis utilizados para o ajuste do processo são adequados.

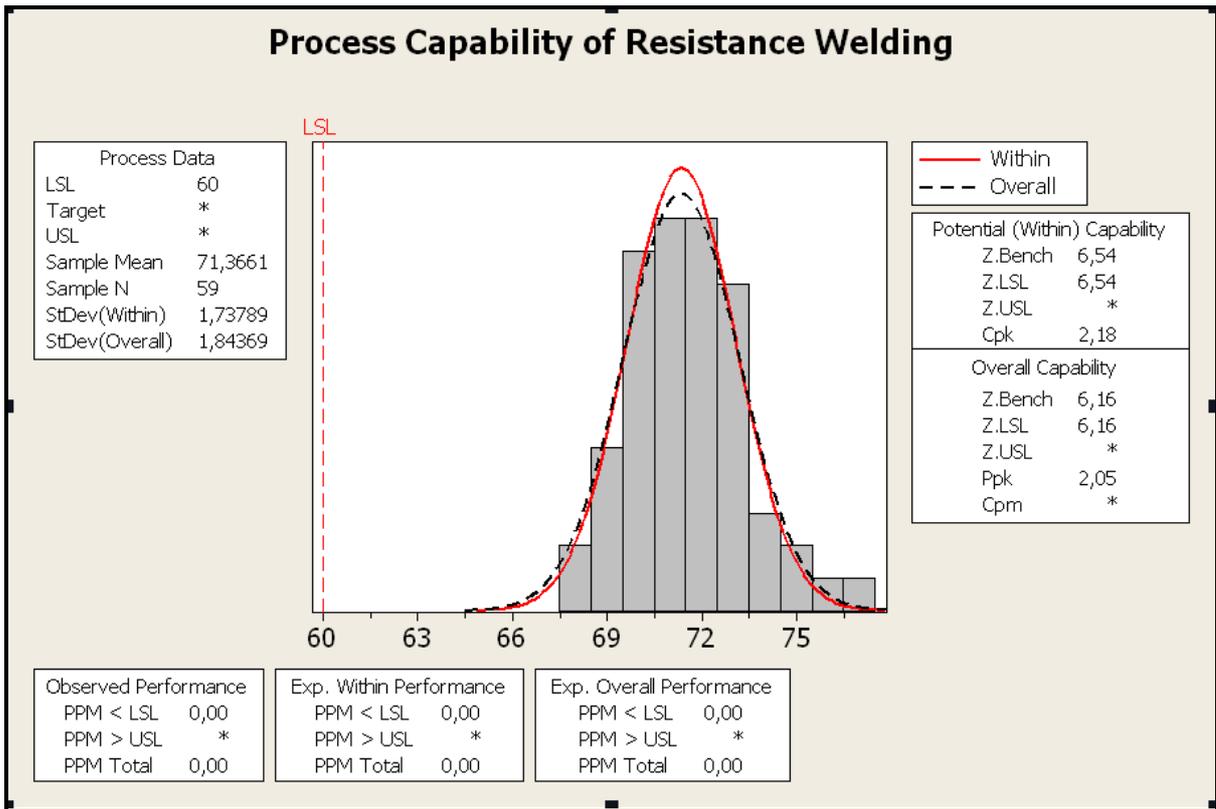


Figura 3.12 - Análise de capacidade do processo.

O processo apresentou uma boa capacidade ($C_{pk}=2,13$) no que diz respeito à resistência da mecânica da união. As peças apresentaram boa aparência, sem áreas de perda de material ou áreas de coloração diferenciada.

Também foram realizados outros testes, como:

- Teste de resistência elétrica: neste teste é medida a resistência elétrica da união em dois momentos, inicialmente com duas horas de funcionamento e, depois, de duzentas horas de funcionamento. Esse funcionamento ocorre da seguinte maneira: quarenta e cinco minutos com fluxo de corrente elétrica e quinze minutos sem fluxo.
- Envelhecimento Térmico: no envelhecimento térmico as peças ficam expostas a uma temperatura de 85 °C por 72 horas.
- Vibração: no teste de vibração, as peças são submetidas à vibração e tem a continuidade de corrente monitorada.
- Choque Térmico: neste teste, as peças oscilam numa temperatura elevada (cerca de 90 °C), para, rapidamente, chegarem numa temperatura baixa (cerca de -20 °C).
- Temperatura e Umidade: esse teste ocorre num ambiente de elevada umidade

(maior que 90%) e elevada temperatura (aproximadamente 65°C). Sendo que as peças ficam submetidas a esse ambiente por 72 horas.

O ciclo citado a cima é repetido duas vezes, sendo que no final é realizado um teste de resistência elétrica das uniões.

Todas as peças foram aprovadas nos testes anteriormente mencionados e ainda apresentaram uma boa resistência a ruptura (aproximadamente 71 N). Sendo assim, possível validar o processo de solda por resistência elétrica de pequena escala como um processo alternativo para a união de cabos de cobre multifilares e terminais metálicos de latão.

4. CONCLUSÕES

4.1 Conclusões gerais

Em função dos resultados obtidos sobre soldagem de pequena escala envolvendo a união de fios multifilares de cobre a terminais de latão e posteriores análises este trabalho permite concluir que:

- A escolha de um eletrodo de tungstênio com formato plano apresentou melhores resultados que o formato redondo para a realização do processo.
- Dentre os parâmetros analisados corrente de soldagem, tempo de soldagem, pressão e tempo de pré-pressão; a corrente e o tempo de soldagem foram os mais significativos na obtenção de soldas mais resistentes.
- A utilização de corrente e tempo de solda em seus níveis máximos, apresentaram nos componentes soldados baixa resistência à tensão de ruptura, apresentando fratura frágil na região próxima ao local da solda.
- Para as presentes condições de estudo, as soldagens mais resistentes ocorreram numa faixa de 3 a 4 kA e tempo de solda entre 3 e 4 ciclos de solda.
- Em função dos modelos matemáticos gerados foi possível otimizar as condições de soldagem bem como gerar uma superfície de contorno que permitem ampliar as condições de aplicações industriais.
- Em função das condições de otimização estabelecidas, a regulagem da corrente em 3,7 kA com uma duração de 3 ciclos permitiu obter uniões com resistência à ruptura de 71 N.
- Testes confirmatórios mostram que o processo na condição otimizada, apresentou pequena variabilidade que o credencia para aplicações industriais.
- A solda por resistência elétrica de pequenas dimensões mostrou uma boa capacidade de processo no que diz respeito à resistência à tração mecânica da união (índice de capacidade do processo $C_{pk}=2,13$). Este nível de capacidade do processo permite a validação do mesmo para a produção, nível mínimo exigido por montadoras que é de 1,67. Desta forma foi possível desenvolver e validar o processo de solda por resistência elétrica, como um processo alternativo ao atual, especialmente para aplicações de pequenas dimensões.

4.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Todo o estudo foi desenvolvido utilizando um equipamento com fonte de energia alternada (frequência da rede em 60 Hz). Outros estudos poderiam ser desenvolvidos em equipamentos com fonte de energia de média frequência (maior que 1.000 Hz) e com inversor de frequência. Esperam-se melhores resultados com este tipo de equipamento.
- As uniões resultantes do processo mostraram-se bastante estáveis, com pouca variação de resistividade ao decorrer do tempo, sendo bastante recomendadas em aplicações que requerem estas características como aplicações de air bag, sensores e circuitos de sinais que necessitam alta precisão. Estudos que comparassem o desempenho de uniões realizadas por crimpagem com uniões soldadas por solda a resistência elétrica, especialmente nos casos anteriormente citados, seriam de grande contribuição.
- Aprofundar os estudos a respeito da resistência elétrica de contato, resistência à corrosão e capacidade de resistência a choques térmicos dos cabos de cobre multifilares soldados a terminais de latão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTONY, J., KATE, M., FRANGOU, A. Strategic methodology to the use of advanced statistical quality improvement techniques. *The TQM Magazine*, v.10, n.3, pp.169-176, 1998.

ASLANLAR, S., OGUR, A., OZSARAC, U., ILHAN, E. Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding. *Materials and Design*, v.29, p.1427-1431, 2008.

BOX, G.E.P., HUNTER, J.S., HUNTER, W.G., *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*. 2 ed. New Jersey: John Wiley, 2005.

CHANG, B.H. & ZHOU, Y. Numerical study on the effect of electrode force in small-scale resistance spot welding. *Journal of Materials Processing Technology*, n 139, pp. 635-641, 2003.

CHEN, J.Z. & FARSON, D.F. Analytical modeling of heat conduction for small scale resistance spot welding process. *Journal of Materials Processing Technology*, v.178, pp.251-258, 2006.

COLOMBARI, R. R. *Aplicação de delineamento de experimentos para o processo de solda a projeção*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2004.

ELSAYED, E.A., CHEN, A. Optimal levels of process parameters for products with multiple characteristics. *International Journal Production Research*, v.31, n.5, p.1117-1132, 2003.

FARSON, D.F., CHEN, J.Z., ELY, K., FRECH, T. Monitoring of expulsion in small scale resistance spot welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, v.8, n.6, p. 431-436, 2003.

FEULVARCH, E., ROBIN, V., BERGHEAU, J.M. Strategic Resistance spot welding simulation: a general finite element formulation of electro-thermal contact conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, v.153, p.436-441, 2004.

FLESCH, G. *Aplicação de projeto de experimentos como suporte no projeto e melhoria de produtos no setor de autopeças*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

FUJIWARA, K., FUKUMOTO, S., YOKOYAMA, Y. NISHIJIMA, M., YAMAMOTO, A. Weldability of Zr50Cu30Al10Ni10 bulk glassy alloy by small-scale resistance spot welding. *Materials Science and Engineering A*. n. 498, p. 302-307, 2008.

GALDÁMEZ, E.V.C. *Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos*. Dissertação de Mestrado da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.

GANGUE, F.J.R., GODEFROID, L.B., SILVA, E. *Análise atual do setor automobilístico nacional*. *Revista Científica Symposium*. v.2, n.1, p.6-11. Lavras: Instituto Adventista de Ensino de Minas Gerais, 2004.

- GANGULI, R. Optimum Design of a Helicopter Rotor for Low Vibration using Aeroelastic Analysis and Response Surface Methodology. *Journal of Sound and Vibration*, v.2, n.258, p. 327-342, 2002.
- GIL, A.C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo, edit. Atlas. p.45-60, 1998.
- GOODARZI, M., MARASHI, S.P.H., POURANVARI, M. Dependence of overload performance on weld attributes for resistance spot welded galvanized low carbon steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v.209, p.4379–4384, 2009.
- HAALAND, P.D., O'CONNELL, M.A., COLEMAN, D.E., MONTGOMERY, D.C. Discussion: a systematic approach to planning for a designed industrial experiment. *Technometrics*, n.209, p. v.35, n.1, p.17-20, 1993.
- MARTIN, O., LOPEZ, M., TIEDRA, P., JUAN, M. S., Prediction of magnetic interference from resistance spot welding processes on implantable cardioverter-defibrillators. *Journal of Materials Processing Technology*, v.206, p.256-262, 2008.
- MIGUEL, P.A.C, FLEURY, A., MELLO, C.H., NAKANO, D.N., TURRIONI, J.B., HO, L.L., MARTINS, R.A., PUREZA, V.M.M., MORABITO, R. “*Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações*” 1ª Ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- MONTGOMERY, D.C. *Design and Analysis of Experiments*. 6th edition, New York: John Wiley & Sons, 2005.
- MYERS, R.H., MONTGOMERY, D.C. *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. Canada, John Wiley & Sons, 1995.
- PAIVA, A. P. *Estudo da Minimização de Erro nas Medições de Concentração de Emulsões por Titração Karl-Fischer utilizando-se Projeto de Experimentos*. Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá, 215 p, 2002.
- QIU, R., IWAMOTO, C., SATONAKA, S. Interfacial microstructure and strength of steel/aluminum alloy joints welded by resistance spot welding with cover plate. *Journal of Materials Processing Technology*, n.209, p. 4186-4193, 2009.
- ROGEON, P., CARRE, P., COSTA, J., SIBILIA, G., SAINDRENAN, G. Characterization of electrical contact conditions in spot welding assemblies. *Journal of Materials Processing Technology*, n.195, p.117-124, 2008.
- ROWLANDS, H. & ANTONY, J. Application of design of experiments to a spot welding process. *Assembly Automation*, v.23, n.3, p.273-279, 2003.
- ROSS, P. J. *Aplicações das técnicas de na engenharia da qualidade São Paulo*. Edit. Makron McGraw-Hill, 1991.
- TAN, W., ZHOU, Y., KERR, H.W., LAWSON, S. A study of dynamic resistance during small scale resistance spot welding of thin Ni sheets. *Journal of Physics D: Applied Physics*, n. 37, p. 1998-2008, 2004.
- TAGUCHI, G. *Taguchi on robust technology development: bringing quality upstream by Genichi Taguchi*. New York, ASME.

WU, J., ZHAI, G., CHEN, Q., WANG, J., REN, G. The interfacial structure of plated copper alloy resistance spot welded joint. *Applied Surface Science*. n. 254, p. 7227-7231, 2008.

YI, L., JINHE, L., HUIBIN, X., CHENGZHI, X., LIN, L. Regression modeling and process analysis of resistance spot welding on galvanized steel sheet. *Materials and Design*. n. 30, p. 2547-2555, 2009.