

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DA SOLDAGEM
A PONTO EM CHAPAS DE AÇO
GALVANIZADO UTILIZANDO OS MÉTODOS
TAGUCHI E SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Autor: Robson Edgard Faria

Orientador: **Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa**

Itajubá, junho de 2017
MG – Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

Robson Edgard Faria

MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DA SOLDAGEM A PONTO EM
CHAPAS DE AÇO GALVANIZADO UTILIZANDO OS MÉTODOS
TAGUCHI E SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

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.

Área de Concentração: Modelagem, Otimização e Controle

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa

Itajubá, junho de 2017
MG – Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

Robson Edgard Faria

**MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DA SOLDAGEM A PONTO EM CHAPAS DE AÇO
GALVANIZADO UTILIZANDO OS MÉTODOS TAGUCHI E SUPERFÍCIE DE
RESPOSTA**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 29 de junho de 2017, conferindo ao autor o título de *Mestre em Ciências em Engenharia de Produção*.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Wanderley Xavier Pereira – CEFET Varginha

Prof. Dr. José Henrique de Freitas Gomes – IEPG/UNIFEI

Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa (Orientador) – IEPG/UNIFEI

Itajubá, junho de 2017
MG – Brasil

Dedicatória

Dedico à Deus, que me deu forças e sabedoria para atingir o meu objetivo.

Aos meus filhos Davi Faria e Miguel Faria.

Agradecimentos

Agradeço à Deus, por me dar forças para caminhar para que eu pudesse concluir este trabalho.

Aos meus pais Rubens Faria e Maria Ap. G. Faria por estarem comigo em todos os momentos me apoiando e motivando.

Às minhas irmãs Andressa E. Faria e Elaine P. Faria por todo apoio e amizade.

À minha esposa e companheira Beatriz S. Ferreira, pela amizade, companhia, carinho, paciência e apoio em todos os momentos.

Aos meus filhos Davi Faria e Miguel Faria, por seus sorrisos.

Ao professor Sebastião Carlos da Costa, pela grande oportunidade profissional e pessoal em me aceitar como seu orientando e por me guiar no desenvolvimento do meu trabalho, e por não desistir de mim.

Ao professor Carlos Henrique Pereira Mello, pela amizade e todo apoio, e pela ajuda com os meus problemas o que permitiu que eu pudesse chegar até aqui.

A todos os professores do Programa de Mestrado em Engenharia de Produção da UNIFEI, pela formação e conhecimento adquirido.

Aos funcionários da oficina mecânica da UNIFEI, em especial ao Angelo de Souza, pela realização dos ensaios mecânicos.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

Finalmente, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”.

Arthur Schopenhauer

RESUMO

A soldagem a ponto por resistência elétrica é um processo bastante empregado no meio industrial devido principalmente as suas características, tais como o baixo custo, não necessidade de metal de adição, a simplicidade da execução, alta produtividade, entre outras. Este processo apesar de possuir uma simples execução, possui uma relativa dificuldade no *setup* do equipamento, visto pelo número excessivo de parâmetros de regulagem. Na soldagem de aços galvanizados por solda a ponto, normalmente os trabalhos se concentram em espessuras superiores a 1 mm. Porém, quando se soldam chapas inferiores a esta espessura, novos complicadores surgem no *setup* do equipamento, visto que a analogia do comportamento para chapas mais espessas não pode ser transferida para estas novas condições. Visando um estudo mais aprofundado neste contexto, este trabalho teve como objetivo a otimização da soldagem de chapas de aço galvanizado com espessura de 0,70 mm. Buscou-se identificar a combinação ótima dos parâmetros que maximizassem a força de cisalhamento, isto sujeito a um nível aceitável de indentação. Foram analisados 10 diferentes parâmetros de regulagem utilizando inicialmente a metodologia Taguchi com um arranjo ortogonal L27, permitindo desta forma identificar os 4 parâmetros mais significativos na força de cisalhamento e na indentação dos pontos soldados. Considerando estes parâmetros significativos foi desenvolvida uma superfície de resposta que permitiu a elaboração da modelagem matemática para a força de cisalhamento e indentação. Após as análises finais, foi identificado que a corrente de soldagem, o tempo de soldagem, a pressão e o tempo de pré pressão produziram um efeito significativo sobre a força de cisalhamento e sobre a indentação. Visando maximizar a força de cisalhamento foi utilizada a programação não-linear com o algoritmo GRG. A maximização da força cisalhante foi sujeita aos valores inteiros dos parâmetros de regulagem, além de trabalhar limitada à região interna da superfície e a condição de indentação máxima de 20% da espessura da chapa. Os ensaios de confirmação realizados para os níveis otimizados confirmaram a validade do modelo.

Palavras-chave: Soldagem a Ponto, Aço Galvanizado, Projeto e Análise de Experimentos, Método de Taguchi, Metodologia de Superfície de Resposta, Otimização.

ABSTRACT

The resistance spot welding is a process widely used in the industrial environment due mainly to its characteristics, such as low cost, no need for addition metal, simplicity of execution, high productivity, among others. Although this process has a simple execution, it has also a relative difficulty in the setup of the equipment, as seen by the excessive number of control parameters. Welding of galvanized steels by spot welding usually concentrates on thicknesses of more than 1 mm. However, when welding plates less than this thickness, new complications arise in the setup of the equipment, since the analogy of the behavior for thicker plates can not be translated into these new conditions. Aiming at a more detailed study in this context, this work had the objective of optimizing the welding of galvanized steel sheets with a thickness of 0,70 mm. We attempted to identify the optimum combination of parameters that maximized the shear force, subject to an acceptable level of indentation. Ten different control parameters were analyzed using the Taguchi methodology with an L27 orthogonal array, thus allowing identification of the 4 most significant parameters in the shear force and in the indentation of the welded points. Considering these significant parameters a response surface was developed that allowed the elaboration of the mathematical modeling for shear force and indentation. After the final analysis, it was identified that the welding current, the welding time, the pressure and the pre-pressure time produced a significant effect on the shear force and on the indentation. In order to maximize the shear force, was used the non-linear programming with the GRG algorithm. The maximization of the shear force was subjected to the integer values of the adjustment parameters, in addition to working limited the internal region of the surface and the condition of maximum indentation of 20% of the thickness of the sheet. Confirmation tests performed at optimized levels confirmed the validity of the model.

Keywords: Spot Welding, Galvanized Steel, Design and Analysis of Experiments, Taguchi Method, Response Surface Methodology, Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Resistência à passagem de corrente no processo de soldagem a ponto	5
Figura 2.2 – Diagrama de causa e efeito para os parâmetros principais da soldagem a ponto ..	6
Figura 2.3 – Efeito da corrente de soldagem na resistência ao cisalhamento	7
Figura 2.4 – Resistência ao cisalhamento em função do tempo de soldagem.....	8
Figura 2.5 – Esquema de soldagem a ponto por resistência elétrica para único pulso.....	9
Figura 2.6 – Esquema de soldagem a ponto por resistência elétrica para múltiplos pulsos.....	9
Figura 2.7 – Curva de força aplicada no processo de soldagem RSW	10
Figura 2.8 – Ciclo de soldagem com pré-aquecimento e pós-aquecimento	12
Figura 2.9 – Ciclo de soldagem com súbita e descida da corrente de soldagem.....	13
Figura 2.10 – (a) Aplicação de um único pulso de corrente (b) Aplicação de múltiplos pulsos de corrente	14
Figura 2.11 – Diâmetro do ponto em função do número de pontos realizados pelos eletrodos	15
Figura 2.12 – Variação das características da face do eletrodo e dos pontos de solda realizados em função do número de pontos executados	16
Figura 2.13 – Comparação dos tamanhos necessários	18
Figura 2.14 – Ponto de solda em corte	19
Figura 2.15 – Esquema para ensaio de cisalhamento	20
Figura 2.16 – Modo de falha	20
Figura 2.17 – Fatores de um processo	21
Figura 2.18 – Etapas a seguir para o Método Taguchi	22
Figura 2.19 – Arranjo de Box-Behnken para três fatores.....	26
Figura 3.1 – Método experimental – Fase 1: Método Taguchi	30
Figura 3.2 – Método experimental – Fase 2: Metodologia de Superfície de Resposta.....	30
Figura 3.3 – Método experimental – Fase 3: Otimização	31
Figura 3.4 – Detalhes do equipamento de soldagem RSW utilizado	31
Figura 3.5 – Especificações dimensionais para o corpo de prova (em mm)	33
Figura 3.6 – Eletrodo utilizado	33
Figura 3.7– Interface de aquisição de dados do sensor de deslocamento.....	34
Figura 3.8 – Acoplamento do sensor LVDT ao cabeçote móvel. (1) sensor de deslocamento e (2) parafuso de ajuste de altura.....	34
Figura 3.9 – Ensaio de cisalhamento.	35
Figura 3.10 – Medição da indentação da solda: (1) Relógio apalpador, (2) Traçador de altura, (3) Bloco magnético	35
Figura 3.11 – Tipos diferentes de modo de falha observados nos experimentos	39

Figura 4.1 – Medida do sensor de deslocamento em função do tempo para a amostra 6	42
Figura 4.2 – Histograma da força de cisalhamento agrupado em qualidade da solda.....	43
Figura 4.3 Gráfico dos efeitos principais com razão sinal/ruído para força máxima de cisalhamento	46
Figura 4.4 Gráfico dos efeitos principais com razão sinal/ruído para a indentação medida pelo sensor de deslocamento	47
Figura 4.5 – <i>Box-Plot</i> da Força de Cisalhamento pela Pressão	58
Figura 4.6 – <i>Box-Plot</i> da Indentação pelo Sensor de Deslocamento pela Pressão	58
Figura 4.7 – Gráfico de força de cisalhamento para os modelos A, B e valores observados...	64
Figura 4.8 – Gráfico de indentação medida através do sensor de deslocamento para os modelos A, B e valores observados	64
Figura 4.9 – Efeitos principais sobre a força de cisalhamento	65
Figura 4.10 – Efeitos principais sobre a indentação	66
Figura 4.11 – Efeito da interação entre o tempo de calor e a corrente sobre a força de cisalhamento	67
Figura 4.12 – Efeito da interação entre o tempo de pré pressão 1 e a corrente sobre a força de cisalhamento	68
Figura 4.13 – Efeito da interação entre o tempo de pré pressão 1 e o tempo de calor sobre a força de cisalhamento	68
Figura 4.14 – Efeito da interação entre a corrente e o tempo de calor sobre a indentação	69
Figura 4.15 – Efeito da interação entre o tempo de pré pressão 1 e o tempo de calor sobre a indentação	70
Figura 4.16 – Efeito da interação entre o tempo de pré pressão 1 e a corrente sobre a indentação	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Soldas realizadas com diferentes configurações.....	17
Tabela 2.2 – Alguns tipos de arranjos de Taguchi e suas respectivas resoluções	24
Tabela 3.1 – Composição química do aço utilizado. Fonte: Usiminas.....	34
Tabela 3.2 – Experimentos preliminares para determinação dos níveis experimentais	37
Tabela 3.3 – Fatores e níveis experimentais.....	38
Tabela 3.4 – Arranjo experimental	40
Tabela 4.1 – Respostas obtidas para os arranjos experimentais	43
Tabela 4.2 – Análise de variância para a razão sinal-ruído	44
Tabela 4.3 – Análise de resíduos para as respostas de força cisalhante e indentação	45
Tabela 4.4 – Valores obtidos experimentalmente para níveis ótimos para força de cisalhamento	47
Tabela 4.5 – Parâmetros mantidos constantes e níveis utilizados	49
Tabela 4.6 – Variáveis e níveis de trabalho.....	49
Tabela 4.7 – Resumo das respostas para a superfície de resposta.....	49
Tabela 4.8 – Modelos quadráticos e análise de variância para o arranjo A – Pressão 2,0 bar .	51
Tabela 4.9 – Modelos quadráticos e análise de variância para o arranjo B – Pressão 2,5 bar .	52
Tabela 4.10 – Modelos quadráticos e análise de variância para o arranjo customizado A+B .	53
Tabela 4.11– Análise de resíduos para as respostas de força cisalhante e indentação	54
Tabela 4.12 – Valores das variáveis aleatórias DF e DI para as amostras pareadas	55
Tabela 4.13 – Teste-t pareado para comparação de médias para força de cisalhamento	56
Tabela 4.14 – Teste-t pareado para comparação de médias para a indentação	57
Tabela 4.15 – Teste de Fisher-Snedecor para Comparação das Variâncias da Força de Cisalhamento	59
Tabela 4.16 – Teste de Fisher-Snedecor para Comparação das Variâncias da Indentação.....	60
Tabela 4.17 – Valores observados, valores calculados e variação entre valores observados e esperados para força de cisalhamento	62
Tabela 4.18 – Valores observados, valores calculados e variação entre valores observados e esperados para indentação medida pelo sensor de deslocamento.....	63
Tabela 4.19 – Ensaio de confirmação nos níveis ótimos	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ANOVA</i>	Análise de variância
<i>AWS</i>	<i>American Welding Society</i>
<i>CCD</i>	<i>Central Composite Design</i>
<i>GRG</i>	Gradiente Reduzido Generalizado
<i>LVDT</i>	<i>Linear Voltage Differential Transdutor</i>
<i>MSR</i>	Metodologia de Superfície de Resposta
<i>RSW</i>	<i>Resistance Spot Welding</i>
<i>ZTA</i>	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

AD	Coefficiente de Anderson-Darling
$Coef.$	Coefficiente
Cte	Termo constante estimado para o modelo
d	Diâmetro do ponto
D	Densidade máxima de corrente
DP	Desprendimento do ponto
DF	Variável aleatória relativa a diferença entre as medidas de força de cisalhamento dos arranjos A e B
DI	Variável aleatória relativa a diferença entre as medidas de indentação dos arranjos A e B
\bar{D}_i	Média amostral para a variável aleatória D_i
E	Erro experimental
EF	Valor esperado pelo modelo para os níveis dos parâmetros de entrada para a força de cisalhamento
EI	Valor esperado pelo modelo para os níveis dos parâmetros de entrada para a indentação
F	Força máxima de cisalhamento
F_F	Transformação das variâncias para verificar se as variâncias das respostas de força de cisalhamento são iguais entre os arranjos A e B
F_I	Transformação das variâncias para verificar se as variâncias das respostas de indentação são iguais entre os arranjos A e B
$Frat$	Modo de falha ocorrido após ensaio de cisalhamento

H_0	Hipótese nula
H_1	Hipótese alternativa
I	Corrente
Ind_{AP}	Indentação pelo relógio apalpador
Ind_{SEN}	Indentação pelo sensor de deslocamento
IR	Ruptura interfacial
I_{PRE}	Corrente de pré-aquecimento
LOF	<i>Lack-of-fit</i> ou falta de ajuste
n	Tamanho da amostra
OE_F	Variável aleatória definida para a escolha do arranjo experimental A ou B para força de cisalhamento
OE_I	Variável aleatória definida para a escolha do arranjo experimental A ou B para a indentação
OF	Valor observado para a força de cisalhamento
OI	Valor observado para a indentação
P	Pressão
QS	Qualidade da solda
R^2	Explicabilidade
R^2_{adj}	Explicabilidade ajustada
RC	Região crítica de aceitação ou rejeição da hipótese nula
S	Desvio padrão
S^2_i	Variância amostral para a resposta i

t	Espessura da chapa mais fina da junta a ser soldada
T	Tempo
T_{DESC}	Tempo de descida da corrente
T_F	Variável aleatória padronizada para a comparar as médias das respostas de força de cisalhamento dos arranjos A e B
T_I	Variável aleatória padronizada para a comparar as médias das respostas indentação dos arranjos A e B
T_{POS}	Tempo de pós pressão
T_{PP1}	Tempo de pré pressão 1
T_{PP2}	Tempo de pré pressão 2
T_{PRE}	Tempo de pré-aquecimento
T_{SUB}	Tempo de subida da corrente
T_T	Tempo de soldagem
σ^2_i	Variância populacional para a resposta i
Σ	Somatório
μ_i	Média Populacional para a variável aleatória i

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Importância do tema	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Delimitações	2
1.4	Estrutura do trabalho	3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
2.1	Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica	4
2.2	Parâmetros de Regulagem e Variáveis do Processo	5
2.2.1	Corrente de Soldagem	6
2.2.2	Tempo de soldagem.....	7
2.2.3	Pressão de soldagem.....	9
2.2.4	Corrente de pré-aquecimento e pós-aquecimento	11
2.2.5	Subida e descida da corrente	12
2.2.6	Impulso	13
2.3	Garantia da Qualidade em Operações de Solda a Ponto	14
2.3.1	Influência do eletrodo em soldagem de aços galvanizados.....	14
2.3.2	Espessura da chapa	16
2.4	Testes destrutivos e não destrutivos	18
2.4.1	Inspeção visual	18
2.4.2	Ensaio de cisalhamento	19
2.5	Projeto e Análise de Experimentos.....	20
2.5.1	Conceitos básicos de Projeto e Análise de Experimentos	20
2.5.2	Método Taguchi.....	21
2.5.3	Metodologia de Superfície de Resposta	25
2.5.4	Gradiente Reduzido Generalizado.....	27
2.6	Considerações finais	28
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	29
3.1	Método experimental.....	29
3.2	Materiais e Métodos Utilizados	31
3.3	Testes Preliminares.....	36
3.4	Seleção das respostas.....	38

3.5	Escolha do arranjo de Taguchi	39
3.6	Considerações finais	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1	Resultados e análises obtidos com a aplicação do Método Taguchi	41
4.1.1	Análise dos resíduos	45
4.1.2	Efeitos principais para a razão sinal/ruído.....	45
4.1.3	Validação dos resultados	47
4.2	Resultados e análises obtidos com a aplicação da superfície de resposta	48
4.2.1	Modelagem matemática das respostas e análise de variância	50
4.2.2	Análise dos resíduos	53
4.2.3	Análise comparativa dos arranjos A e B	54
4.2.4	Análise dos efeitos principais dos parâmetros.....	64
4.2.5	Análise dos efeitos das interações entre os parâmetros.....	66
4.2.6	Otimização das respostas.....	71
4.2.7	Validação dos resultados	72
4.3	Considerações finais	72
5	CONCLUSÕES.....	73
5.1	Conclusões Gerais	73
5.2	Contribuições do trabalho.....	74
5.3	Sugestões para trabalhos futuros	74
	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 Importância do tema

A soldagem a ponto por resistência elétrica (RSW - do inglês *Resistance Spot Welding*) é utilizada na união de duas ou mais chapas de materiais metálicos, sendo que estas podem ser constituídas por materiais iguais ou distintos. Este processo desperta grande interesse por possuir como características alta produtividade, baixo custo, pequena zona termicamente afetada, não necessidade de metal de adição associado a um rápido resfriamento. Habib *et al.* (2016) afirmam que em comparação com outros processos de soldagem, a RSW é mais rápida e fácil para automação.

Esta técnica foi desenvolvida em 1877, por Elihu Thomson, com a união de fios de cobre e somente a partir de 1933 começou a ser empregada na indústria automotiva. O processo de soldagem RSW pode ser empregado em diferentes tipos de materiais metálicos, tais como os aços carbono, aços galvanizados, aços de baixa liga e os aços inoxidáveis, além de cobre, níquel, alumínio, magnésio, titânio e suas ligas (MACHADO; 1996), (SUBRAMMANIAN e JABARAJ; 2013).

Atualmente o processo RSW é bastante empregado na união de chapas metálicas de aço galvanizado no setor automotivo (BRANCO e OKIMOTO, 2012), (AMARAL, 2011), (BALDIM, 2014), (MACHADO,1996). Uma das finalidades do revestimento em aços galvanizados é aumentar a proteção contra a corrosão garantindo uma maior vida útil destes materiais; porém a presença desta camada de zinco prejudica a soldagem visto que o aumento da espessura deste revestimento faz com que ocorra o aumento do desgaste dos eletrodos devido à formação de latão na ponta do mesmo (MÜFTÜOĞLU e KESKINEL,2007).

O equipamento de RSW apresenta vários parâmetros de regulagem; isto faz com que as opções de regulagem sejam variadas, porém cada uma apresenta influências distintas que muitas vezes resultam em pontos de solda inadequados resultando em critérios de aceitabilidade insuficientes. Segundo Arunchai *et al.* (2014) a qualidade da soldagem RSW tem sido um problema relevante no setor automotivo visto que a regulagem dos parâmetros normalmente se dá de forma empírica, o que de certa forma causa um prejuízo relevante no processo devido ao alto custo para o ajuste dos equipamentos.

A espessura das chapas desempenha papel fundamental na soldagem através do processo RSW. Normalmente chapas abaixo de 0,5 mm não são comumente soldadas por este processo e quando assim o são, são classificados como soldagem de pequena escala (*small scale*). Normalmente as faixas mais utilizadas e, conseqüentemente as mais estudadas, se situam entre 1,0 e 1,2 mm. Chapas abaixo deste limite tem aplicações mais limitadas, mas não menos importantes; porém não são amplamente estudadas, visto que não há muitas referências sobre as mesmas. Shafee *et al.* (2014), Raut e Achwal (2014) e Chaudhary *et al.* (2014) mostram em seus estudos que a alteração da espessura da peça modifica a influência dos parâmetros do processo de soldagem. Visando contribuir para a ampliação destes estudos, este trabalho se concentrou na modelagem e otimização do processo RSW em chapas de aço galvanizado com espessura de 0,70 mm utilizadas no setor automotivo.

1.2 Objetivos

Em função do que foi exposto, este trabalho foi desenvolvido tendo como propósito otimizar a soldagem a ponto de chapas finas de aço galvanizado com espessura de 0,70mm procurando atingir os seguintes objetivos:

- Analisar os efeitos dos parâmetros de regulagem do equipamento sobre as respostas de força de cisalhamento e indentação utilizando o método de Taguchi.
- Modelar o processo de soldagem a ponto para as respostas de força de cisalhamento e indentação utilizando a superfície de respostas.
- Otimização do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica de modo a encontrar a combinação ótima dos parâmetros do processo que possibilitem a maximização da força de cisalhamento com imposição de restrições no nível de indentação máxima permissível.

1.3 Delimitações

O presente trabalho encontra-se delimitado pelos seguintes elementos:

1. O processo de soldagem estudado foi somente o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica (RSW). Sendo assim, os resultados aqui obtidos não podem ser utilizados para outros tipos de soldagem;

2. O único material utilizado foi o aço galvanizado por eletrodeposição, em chapas de espessura de 0,70mm, e deste modo não é possível utilizar dos resultados encontrados aqui em outros tipos de materiais, assim como para outras espessuras de chapas;

1.4 Estrutura do trabalho

O primeiro capítulo buscou introduzir o problema de pesquisa bem como estabelecer os objetivos e as delimitações deste trabalho.

O Capítulo 2 traz os conceitos necessários para a fundamentação teórica desta pesquisa. São apresentados os conceitos relacionados à soldagem a ponto por resistência elétrica, projeto de experimentos, metodologia Taguchi, superfície de respostas e também os aspectos relevantes do material utilizado que influenciam no processo de soldagem.

O Capítulo 3 mostra o procedimento experimental utilizado, assim como detalha as características de regulagem do equipamento utilizado.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos pela metodologia Taguchi, com posterior utilização para a montagem da superfície de resposta. Aborda ainda a metodologia para a otimização da resposta de força de cisalhamento utilizando a programação não-linear com o algoritmo GRG, onde foram realizados ensaios de confirmação para a resposta prevista através da otimização.

Finalmente, o Capítulo 5 encerra o trabalho, apresentando as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta o embasamento teórico relativo ao tema abordado no presente trabalho, apresentando conceitos que compõem o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica (RSW), ferramentas de análise e otimização relacionados aos aços galvanizados.

2.1 Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica

A soldagem é um processo de união de materiais que visa assegurar a continuidade de suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Este processo pode ser aplicado a diversos tipos de materiais como os aços e suas ligas, alumínio e suas ligas, ferro, plástico, entre outros. A soldagem é uma das atividades mais empregadas no meio industrial, não somente para a união de peças, mas também para a deposição de material sobre superfícies e trabalhos de manutenção (WAINER, 1992; AWS, 2002). Os processos de soldagem são utilizados na indústria automobilística, aeronáutica, naval, para a construção de estruturas metálicas entre outras atividades. Cada processo de soldagem tem suas vantagens e limitações, e a escolha adequada depende do balanço dessas características.

Dentre os processos empregados no setor automotivo, a soldagem a ponto por resistência elétrica é um dos mais utilizados. Conforme a AWS (1997), o princípio da soldagem a ponto por resistência elétrica é baseado na aplicação de um baixo valor de tensão, com uma alta intensidade de corrente elétrica que fluirá por um condutor de cobre (eletrodo de trabalho) esta encontrará uma baixa resistência até que atinja o material a ser soldado. O fluxo de corrente através de uma resistência elétrica maior gera um calor intenso, e com a aplicação da pressão sobre a junta, as peças são soldadas. É desejável ter a temperatura máxima na interface das peças a serem unidas. Assim, a resistência das peças de trabalho e a resistência de contato entre os eletrodos e a peça de trabalho devem ser mantidas tão baixas quanto possível em relação à resistência entre as superfícies de contato (RAWAL e INAMDAR, 2012).

O calor gerado pode ser calculado segundo a lei de Joule, **Eq. (2.1)**; a energia térmica gerada está diretamente relacionada com as resistências elétricas presentes no sistema, **Figura 2.1**. Deste conjunto de resistências, a resistência entre as chapas é a maior de todas, sendo, portanto, neste local onde há a maior geração de calor. Vale lembrar que a resistência varia de modo complexo durante a soldagem por resistência elétrica a ponto; fatores como a força aplicada pelos eletrodos, a temperatura, o tempo e características do material soldado influenciam na quantidade de calor gerado durante o processo RSW.

$$Q = \frac{1}{J} \int_0^t I^2 R_T dt \quad (2.1)$$

Onde:

$J = 4,185 \text{ J}$; I = corrente de soldagem (A); dt = intervalo de tempo de passagem da corrente elétrica (s); R_T = conjunto de resistências elétricas, estáticas (Ω)

$$R_T = R_{B1} + R_{C1} + R_{B2} + R_{C2} + R_{B3} + R_{C3} + R_{B4} \quad (2.2)$$

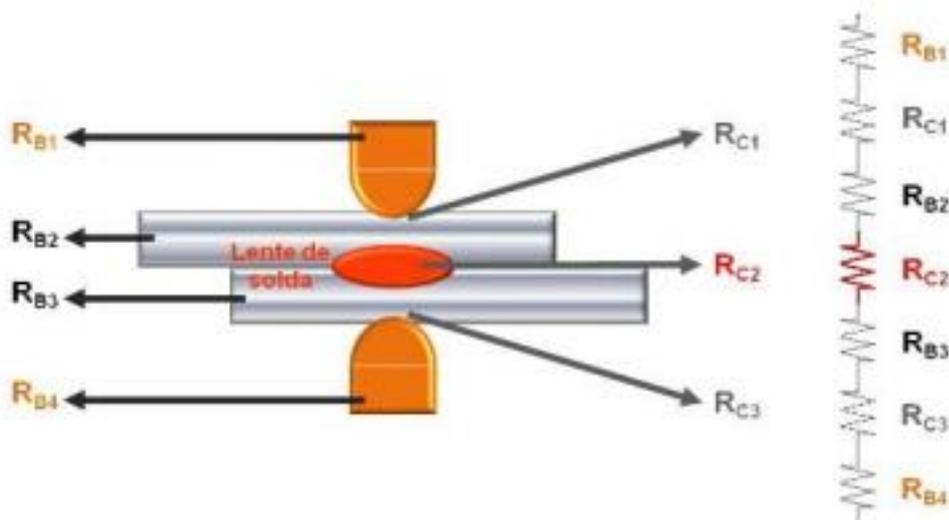


Figura 2.1 – Resistência à passagem de corrente no processo de soldagem a ponto

Fonte: Nascimento (2008)

O processo RSW é um processo que une de forma rápida e prática a maioria dos metais e apresenta algumas vantagens como gerar calor somente no local da solda, reduzindo os efeitos da zona termicamente afetada, possibilidade de grandes reduções do tempo para execução da solda, tornando-a competitiva em relação a outros processos de soldagem. Makwana *et al.* (2014) afirmam ainda que uma vantagem do processo RSW é a ausência de uma poça fundida, resultando em menores danos às superfícies e a estética da peça de trabalho.

2.2 Parâmetros de Regulagem e Variáveis do Processo

O equipamento de soldagem a ponto por resistência elétrica possui um número expressivo de parâmetros de regulagem que combinado com o tipo de material, a espessura da chapa, a presença e o tipo de revestimento, entre outros fatores, torna por vezes o *setup* do processo uma atividade relativamente complexa.

Os três principais parâmetros de regulagem do processo são a intensidade da corrente de soldagem, o tempo de soldagem e a força exercida pelos eletrodos de trabalho, tal como apresentado no diagrama de causa e efeito da **Figura 2.2**. Variações nestes parâmetros irão causar variações na força de tensão das chapas, diâmetro do ponto de solda (*nugget*) e indentação. Outros fatores como corrente de pré-aquecimento e pós-aquecimento, forma de subida e descida da corrente também influenciam na qualidade da solda (LANE *et al.*, 1987).

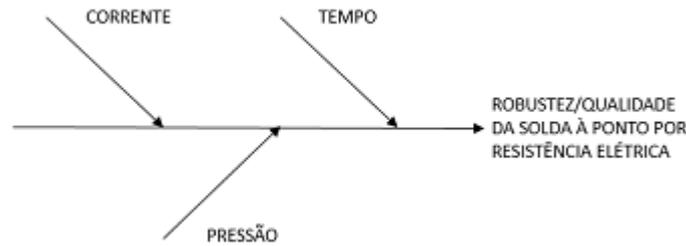


Figura 2.2 – Diagrama de causa e efeito para os parâmetros principais da soldagem a ponto

Fonte: Pandey *et al.* (2013)

2.2.1 Corrente de Soldagem

A corrente de soldagem é o parâmetro de maior influência na geração de calor durante a formação do ponto de solda, sendo responsável pela fusão do material e pela formação da lente de solda. O tamanho do ponto de solda varia diretamente com a intensidade de corrente utilizada. Sendo assim, verifica-se que normalmente baixas intensidades de corrente produzem menores pontos de solda. O controle da corrente de soldagem pode ser feito em conjunto com alguns fatores tais como o ajuste do tempo de soldagem ou a utilização de impulso de corrente (POURANVARI *et al.*, 2007).

Machado (1996) e Branco (2004) concordam que existe um intervalo de densidade de corrente, em que um limite inferior e superior deve ser observado para garantir a qualidade do ponto de solda, e se este limite inferior não for observado, a fusão não ocorrerá ou o ponto de solda será fraco. Uma outra questão a ser considerada é que se a densidade de corrente ultrapassar o limite superior o eletrodo penetrará na peça, abaixando com isso, a vida útil do mesmo. Pandey *et al.* (2013) afirmam ainda que a resistência ao cisalhamento do ponto de solda é diretamente proporcional a densidade de corrente, desta forma, valores altos de densidade de corrente podem promover a expulsão de material fundido, ocasionando vazios internos e trincas no ponto de solda, além de gerar grandes indentações e deterioração rápida do eletrodo.

Na **Figura 2.3** é possível observar uma relação entre a resistência ao cisalhamento em função da corrente aplicada. Mantendo-se os outros parâmetros constantes, esta não apresenta uma relação linear, iniciando-se após um valor mínimo requerido. É possível perceber ainda um rápido aumento da resistência para uma pequena variação do módulo da corrente sendo que, após este momento, inicia-se a expulsão do metal fundido, até que para valores de corrente maiores o valor da carga máxima começa a reduzir.

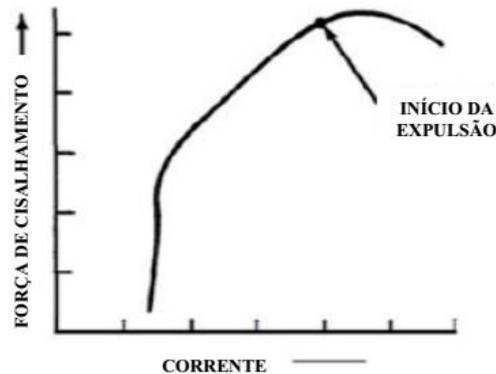


Figura 2.3 – Efeito da corrente de soldagem na resistência ao cisalhamento

Fonte: Pandey *et al.* (2013)

Machado (1996) apresenta uma relação, **Eq. (2.3)**, deduzida empiricamente, que relaciona a densidade máxima de corrente, D , com a espessura da chapa mais fina da junta, t (mm), onde o valor de D fornece o valor limite para que não ocorra expulsão de material.

$$D = 192 + 480 \cdot e^{-t} \text{ (A/mm}^2\text{)} \quad (2.3)$$

2.2.2 Tempo de soldagem

Assim como a corrente de soldagem, o tempo de soldagem é um parâmetro de grande relevância para a formação do ponto de solda. A unidade de medida de tempo comumente utilizada para o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica é o ciclo, sendo que 1 ciclo equivale ao inverso da frequência da rede; para uma frequência de 60 Hz, 1 ciclo corresponde a 1/60 s.

Pandey *et al.* (2013) afirmam que um tempo excessivo de soldagem terá o mesmo efeito negativo que a elevada densidade de corrente sobre o metal base e os eletrodos, além de estender a região afetada pelo calor (ZTA). Na **Figura 2.4** pode-se observar a relação entre o tempo de soldagem e a resistência ao cisalhamento do ponto de solda. Mantendo-se as outras condições constantes, existe um intervalo ótimo durante o qual a corrente deve ser aplicada, valores fora deste intervalo irão gerar soldas de baixa qualidade.



Figura 2.4 – Resistência ao cisalhamento em função do tempo de soldagem

Fonte: Pandey *et al.* (2013)

A **Figura 2.5** representa um ciclo de soldagem simples ao passo que a **Figura 2.6** representa um ciclo de soldagem com múltiplos pulsos e com etapas adicionais, e as fases segundo a AWS (1997) são:

- a. Tempo de aperto – O tempo entre o início do ciclo de soldagem e a primeira aplicação de corrente.
- b. Tempo de soldagem – Tempo de aplicação da corrente.
- c. Tempo de folga – Tempo que os eletrodos estão sem contato com as peças, geralmente é utilizado quando a soldagem é repetida.
- d. Tempo de pré-aquecimento – É a duração da corrente durante o intervalo de pré-soldagem.
- e. Tempo de Subida – A duração do tempo que a corrente de soldagem é continuamente incrementada até que alcance a corrente de soldagem.
- f. Tempo de aquecimento – O intervalo de tempo com múltiplos pulsos de corrente.
- g. Intervalo – tempo entre os pulsos de corrente.
- h. Tempo de descida – O tempo durante o qual a corrente é continuamente reduzida.
- i. Tempo de descanso – O tempo a partir do fim da soldagem, intervalo de soldagem, ou intervalo de tempo para que ocorra a descida da corrente para iniciar o intervalo de têmpera; neste tempo não ocorre fluxo de corrente entre as peças e a solda é rapidamente resfriado através dos eletrodos.
- j. Tempo de têmpera – Intervalo de tempo que aplicada uma corrente de menor intensidade com o propósito de fazer um tratamento térmico.
- k. Tempo de espera – Tempo onde há aplicação da força após o último pulso cessar.

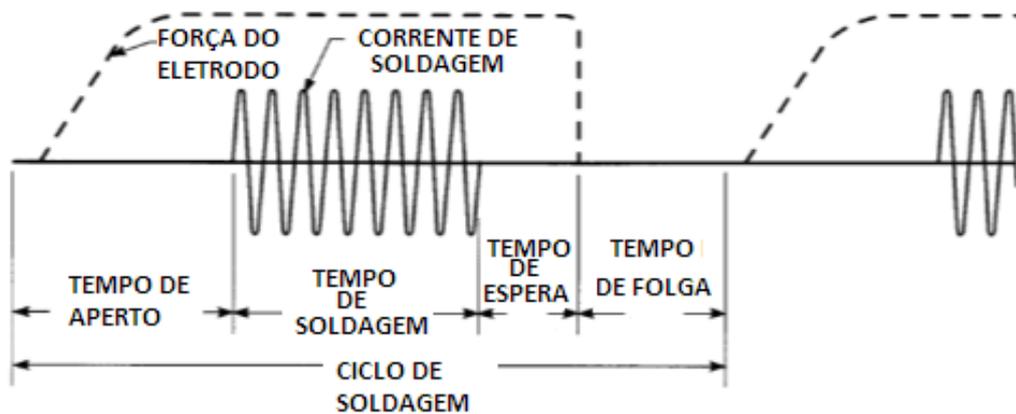
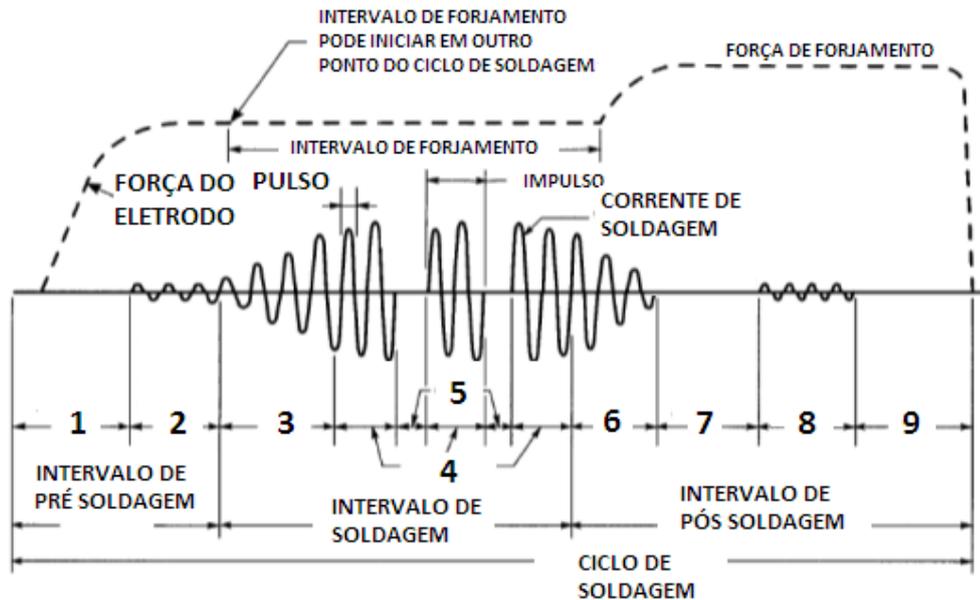


Figura 2.5 – Esquema de soldagem a ponto por resistência elétrica para único pulso

Fonte: Adaptado de AWS (1997)



- | | | | | | |
|---|--------------------------|---|----------------------|---|-------------------|
| 1 | Tempo de aperto | 4 | Tempo de aquecimento | 7 | Tempo de descanso |
| 2 | Tempo de pré-aquecimento | 5 | Intervalo | 8 | Tempo de tempera |
| 3 | Tempo de Subida | 6 | Tempo de descida | 9 | Tempo de espera |

Figura 2.6 – Esquema de soldagem a ponto por resistência elétrica para múltiplos pulsos

Fonte: Adaptado de AWS (1997)

2.2.3 Pressão de soldagem

A pressão aplicada ao eletrodo de trabalho é considerada como uma força dinâmica líquida atuando sobre as chapas, e a pressão resultante desta força afeta a resistência de contato do conjunto. Deste modo, o aumento excessivo da pressão reduz a resistência de contato e a quantidade de calor gerado, tornando necessário o aumento do tempo de soldagem, podendo

ocasionar ainda deformação elevada nas superfícies das chapas. Pressões menores aumentam a resistência elétrica, devido ao contato incompleto entre as superfícies. De acordo com Machado (1996), a força aplicada aos eletrodos se comporta de forma inversamente proporcional à resistência elétrica do sistema. Completando este raciocínio, Wainer *et al.* (1992) afirmam que a superfície do metal numa escala microscópica é constituída por uma série de picos e vales, e quando submetido a uma leve pressão, o contato real de metal-contra-metal será apenas para os picos, o que representa apenas uma pequena porcentagem da área e desta forma a resistência de contato será alta. Por sua vez, para valores elevados de pressão os picos são forçados, aumentando-se assim a região de contato efetiva de metal-contra-metal e deste modo tem-se uma menor resistência elétrica.

Durante a fase de pressão, os eletrodos são forçados sobre as superfícies das chapas por meio do sistema de força de acionamento, e este oferece a possibilidade de deformar as chapas para assegurar um bom contato entre elas. Na fase de soldagem, enquanto a pressão permanece sobre as peças de trabalho, a corrente irá fluir através dos eletrodos e as chapas, aquecendo cada parte do circuito de soldagem proporcional à resistência eficaz presente em cada ponto (NASCIMENTO, 2008).

Mesmo assumindo-se uma pressão constante, Fonseca e Bracarense (1999) constataram que a força exercida pelo eletrodo, mensurada por uma célula de carga posicionada no sistema mecânico de acionamento da pinça, varia ao longo da soldagem, como pode ser visto na **Figura 2.7**.

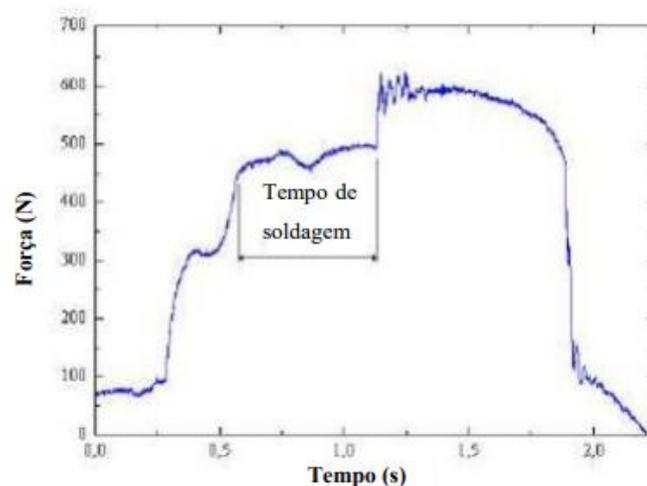


Figura 2.7 – Curva de força aplicada no processo de soldagem RSW

Fonte: Fonseca e Bracarense (1999)

2.2.3.1 Pré-pressão e Pós-pressão

Durante a fase de pré-pressão, o eletrodo móvel se movimenta no sentido das peças a serem soldadas, provocando o contato entre os eletrodos e as chapas. Nesta etapa, a velocidade dos eletrodos no ponto do impacto é muito importante, considerando-se que uma alta energia de impacto irá resultar em desgaste excessivo do eletrodo. O tempo de pré-pressão deve ser suficiente para garantir que força total necessária aos eletrodos seja estabelecida antes do início do fluxo de corrente. Caso a corrente seja liberada antes do ajuste dos eletrodos, haverá formação de arco elétrico, que pode danificar os eletrodos e as peças, podendo gerar expulsões de metal fundido da solda ou expulsões entre o eletrodo e a superfície da peça de trabalho (MAKWANA *et al.*, 2014; SANTOS, 2006; RUUKKI, 2009).

Durante o tempo de pós-pressão a corrente é cortada, e a solda produzida é resfriada até se solidificar sendo que a pressão neste instante é mantida constante. Após este tempo de espera os eletrodos são afastados e o ciclo está terminado. A pós-pressão evita que durante a solidificação ocorra a formação de bolhas na lente de solda. O tempo de pós-pressão deve ser suficiente para que a corrente vá a zero antes do afastamento dos eletrodos, tendo assim este parâmetro um importante papel no tempo de vida dos eletrodos (NASCIMENTO, 2008).

2.2.4 Corrente de pré-aquecimento e pós-aquecimento

A corrente de pré-aquecimento consiste na aplicação de uma corrente de menor intensidade antes da corrente de soldagem. Lane *et al.* (1987) afirmam que a utilização dos parâmetros de soldagem correntes de pré-aquecimento e pós-aquecimento conferem efeitos significativos na qualidade do ponto de solda, permitindo que o mesmo fique mais uniforme.

Para os aços galvanizados, a utilização da corrente de pré-aquecimento possui algumas vantagens, como a melhora da qualidade da solda, fornecendo uma transição suave do estado não aquecido ao estado de metal fundido. Além disso, permite que ocorra a remoção do zinco das faces das chapas, impedindo que o zinco entre em contato com o aço líquido ou mesmo, evite a contaminação do eletrodo.

A corrente de pós-aquecimento ou de revenimento é aplicada após a corrente de soldagem e tem como função produzir a diminuição da dureza do ponto de solda, evitando trincas. A corrente de pós-aquecimento pode ser utilizada com rampa de descida, ocasionando em um resfriamento mais lento (GEDEON *et al.* 1987; NASCIMENTO *et al.*, 2008). Ainda segundo Jahandideh *et al.* (2011), a aplicação da corrente de pós-aquecimento produz um efeito

significativo na redução do modo de falha interfacial. A utilização da corrente de pós-aquecimento suprime a expulsão de material da zona fundida, inibindo a movimentação da zona fundida anular, a redução gradual desta corrente fará com que ocorra a diminuição das forças eletromagnéticas, levando a um rígido fluxo do metal fundido.

Gedeon e Eagar (1986) concluem em seu estudo que as correntes de pré-aquecimento e pós-aquecimento possuem efeitos semelhantes à subida e descida da corrente, embora não na mesma extensão. A **Figura 2.8** ilustra um ciclo de soldagem com pré-aquecimento e pós-aquecimento. É possível perceber que existe um tempo de espera entre o tempo de soldagem e a aplicação da corrente de pós-aquecimento. Em algumas máquinas este tempo pode ser controlado dependendo do comportamento do material soldado.

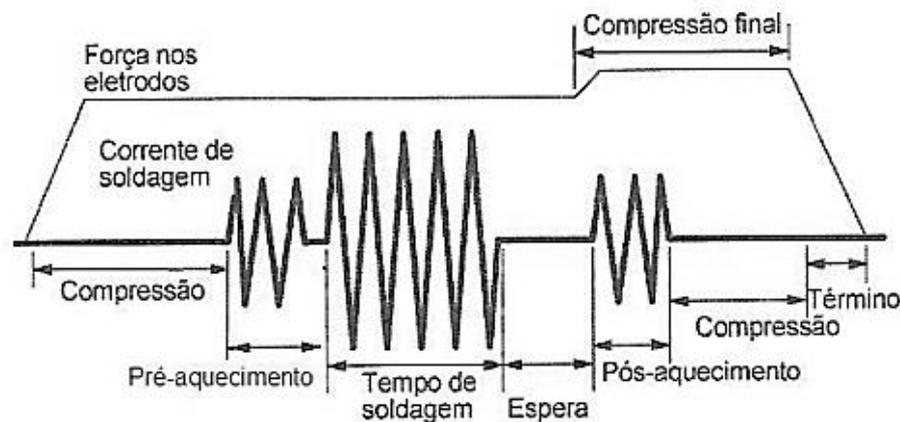


Figura 2.8 – Ciclo de soldagem com pré-aquecimento e pós-aquecimento

Fonte: Adaptado de Marques *et al.* (2009)

2.2.5 Subida e descida da corrente

A subida da corrente de soldagem consiste no aumento gradual da intensidade da mesma antes do início da aplicação da corrente de soldagem. A subida da corrente tem um efeito positivo na vida do eletrodo na soldagem de aços galvanizados, pois faz com que os eletrodos se acomodem com um tempo maior sobre o revestimento de zinco, reduzindo o superaquecimento local no contato das rugosidades, restringindo a produção de calor na superfície do eletrodo (AWS, 1997; GEDEON e EAGAR, 1986).

Wu (1975) indica que a subida da corrente pode ser utilizada para aumentar a soldabilidade de ligas de alumínio, onde a corrente será aumentada quando a área de contato entre eletrodo e peça estiver maior, devido à deformação plástica e fusão gradual do material.

A diminuição gradual da intensidade da corrente de soldagem é conhecida como descida da corrente. Segundo Wu (1975), devido às elevadas expansões e contrações térmicas durante a soldagem, pode ocorrer expulsão de metal fundido e quebra da chapa. Para evitar estes problemas, uma força de forjamento em conjunto com a descida da corrente é aplicada durante a soldagem. A **Figura 2.9** ilustra um esquema de ciclos de soldagem com subida e descida de corrente.

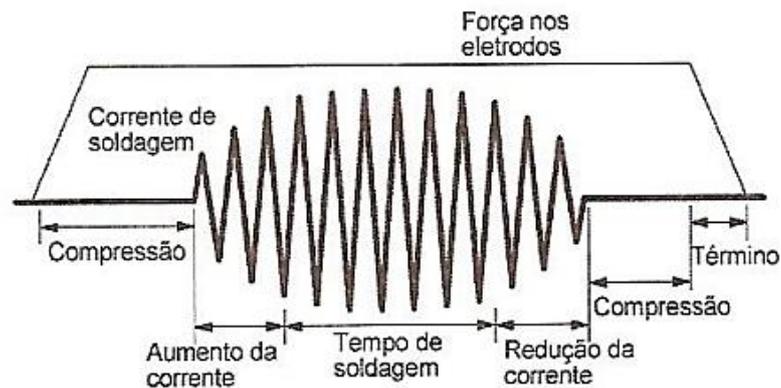


Figura 2.9 – Ciclo de soldagem com súbita e descida da corrente de soldagem

Fonte: Adaptado de Marques *et al.* (2009)

2.2.6 Impulso

A AWS (1997) define impulso como uma mudança súbita, tal como um aumento ou diminuição da tensão ou da corrente. Na soldagem a ponto por resistência elétrica, um impulso de corrente pode ser constituído por um único impulso, ou por uma série de impulsos, separadas por um tempo de intervalo entre a solda. Pode ser utilizado quando se trabalha com chapas de altas espessuras, ou materiais que necessitem de maior corrente, tais como aços de alta resistência. Tal aplicação tem como fim reduzir a expulsão de material e a quantidade de respingos (Hernandez *et al.*, 2012).

Segundo Marques *et al.* (2009), a aplicação de pulso de corrente reduz o aquecimento das chapas, pois a corrente não é aplicada de forma contínua, e desta forma, a chapa irá sofrer um resfriamento entre os pulsos. A **Figura 2.10 (a)** mostra a aplicação de um único pulso de corrente ao passo que a **Figura 2.10 (b)** mostra a aplicação de múltiplos pulsos de corrente.

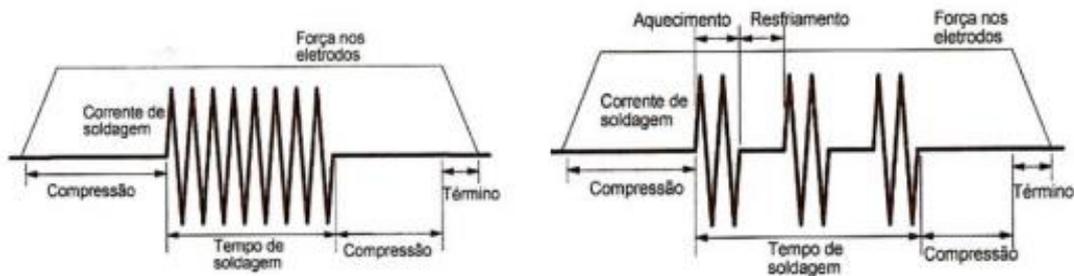


Figura 2.10 – (a) Aplicação de um único pulso de corrente (b) Aplicação de múltiplos pulsos de corrente

Fonte: Marques *et al.* (2009)

2.3 Garantia da Qualidade em Operações de Solda a Ponto

2.3.1 Influência do eletrodo em soldagem de aços galvanizados

A qualidade das soldas a ponto é influenciada por vários fatores, entre os quais, a qualidade e manutenção adequada dos eletrodos são responsáveis por fornecer a corrente elétrica às peças, mantê-las sobre pressão para a geração de calor por efeito joule e proporcionar a dissipação de calor (BRANCO e OKIMOTO, 2012). Além disso, Abdulhadi *et al.* (2011) afirmam que um fator importante na determinação do diâmetro do ponto de solda é a área da superfície do eletrodo no ponto de contato. A degradação da ponta do eletrodo resulta na perda da sua capacidade em desempenhar as suas funções, um caso típico é quando ocorre um aumento excessivo da ponta do eletrodo, diminuindo a densidade de corrente necessária para a soldagem.

Os materiais a serem trabalhados influenciam na vida dos eletrodos, Silva e Modenesi (2010) apontam que a soldagem a ponto dos aços galvanizados, materiais estes amplamente utilizados na indústria automotiva, são prejudiciais para a vida útil dos eletrodos devido ao efeito do revestimento de zinco de trabalho, reduzindo a produção de pontos de solda de 20.000 para 2.000 antes que seja necessária a manutenção. Durante a soldagem de aços galvanizados ocorrerá a formação de latão na ponta do eletrodo, devido à interação de Cu-Zn. Segundo Nascimento e Scotti (2010), a formação de latão na ponta do eletrodo faz com que ocorra a diminuição da densidade de corrente e, como consequência, a geometria da solda pode ser comprometida. Zhang e Senkara (2006) afirmam que o mecanismo de desgaste do eletrodo em aços galvanizados é similar ao que ocorre na soldagem com o alumínio.

Segundo Ruukki (2009) chapas de aço galvanizados podem ser soldadas tanto com eletrodos planos quanto com eletrodos convexos. A utilização de eletrodos convexos faz com que haja uma menor deposição de zinco na superfície do eletrodo e ainda facilita a remoção do zinco.

Müftüoğlu e Keskinel (2007) avaliaram a vida do eletrodo variando o revestimento de Zn, e conforme visto na **Figura 2.11**, os autores identificaram que a vida do eletrodo foi reduzida à medida que se aumentou a camada de revestimento de Zn (UC-sem revestimento, C100 - 100g/mm², C180 - 180g/mm² e C275 - 275 g/mm²). Para isto, os autores consideraram o diâmetro do ponto em função do número de pontos executados até que o diâmetro do ponto atingisse o valor mínimo aceitável. Deste modo, observou-se que a vida do eletrodo reduziu proporcionalmente ao aumento do número de pontos.

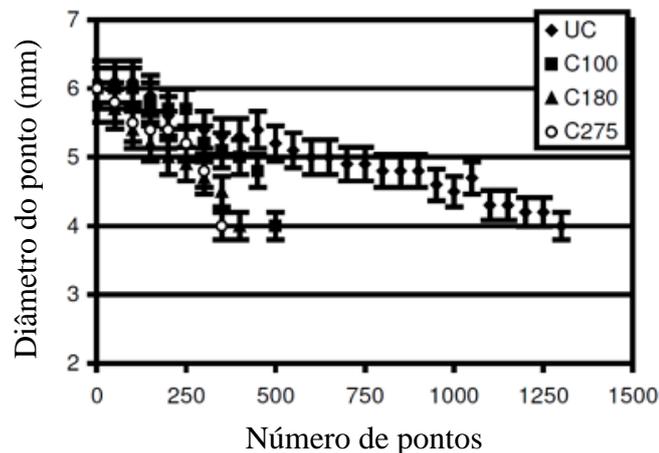


Figura 2.11 – Diâmetro do ponto em função do número de pontos realizados pelos eletrodos
Fonte: Müftüoğlu e Keskinel (2007)

Branco e Okimoto (2012) observaram que houve um aumento da superfície do eletrodo com o aumento do número de pontos executados, e que o diâmetro do ponto após o teste de arrancamento reduziu drasticamente com o aumento da quantidade de pontos, **Figura 2.12**.

Wainer *et al.* (1992) sugerem que as faces de contato entre o eletrodo e a peça devem ser aproximadamente 1,6 mm maior que o diâmetro do ponto de solda, e que o mesmo pode ser previsto através das **Eq. (2.4) e (2.5)**.

$$d = 5\sqrt{t} \quad (2.4)$$

ou
$$d = 2,5 + 2\sqrt{t} \quad (2.5)$$

Onde: d = diâmetro do ponto (mm)

t = espessura da chapa (mm)

Wainer *et al.* (1992) apontam ainda que o desgaste do eletrodo promove um aumento na área de contato entre eletrodo e peça, e assim diminui a densidade de corrente, por outro lado a usinagem do eletrodo feita de modo inadequado pode diminuir em excesso a área de contato, aumentando a densidade de corrente e ocasionando sobreaquecimento e diminuição da vida útil do eletrodo.

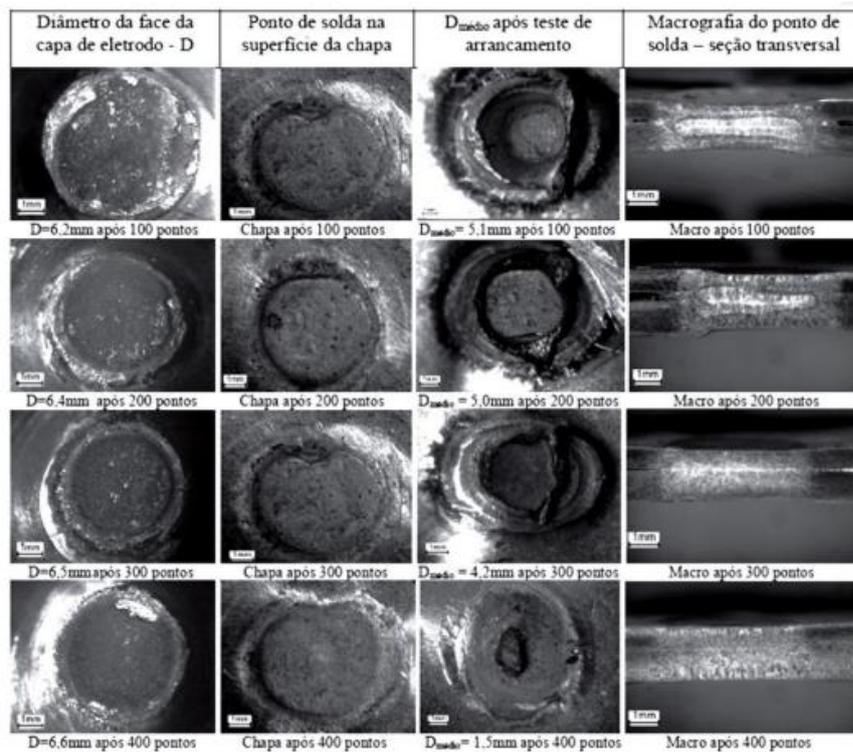


Figura 2.12 – Variação das características da face do eletrodo e dos pontos de solda realizados em função do número de pontos executados

Fonte: Branco e Okimoto (2012)

Para Branco e Okimoto (2012), o desgaste dos eletrodos é inevitável durante a soldagem, e deve-se considerar o processo de usinagem da sua superfície como uma etapa importante na eliminação do seu desgaste. Isto permite manter a qualidade do ponto de solda e aumentar a produtividade dos eletrodos, já que recupera a geometria do perfil e produz uma limpeza da face, retirando as crateras e a camada de latão formada durante o processo de soldagem das chapas galvanizadas. Para Furlanetto (2014), um método de compensar o desgaste do eletrodo aplicado no ambiente industrial é o aumento gradual da corrente de soldagem.

2.3.2 Espessura da chapa

A espessura da chapa é utilizada como referência nos cálculos que buscam definir os padrões de qualidade do ponto de solda. Porém, segundo Makwana *et al.* (2014), a espessura

da chapa influencia na soldagem RSW, tal como os parâmetros de regulagem do equipamento. Os autores afirmam que para cada espessura de chapa a ser soldada deve-se adequar os parâmetros de regulagem do equipamento com uma configuração apropriada.

Zhang e Senkara (2006) afirmam que para que se possa prever o comportamento da solda em uma chapa de uma certa espessura, é utilizado a Lei da Similaridade Térmica (LST), sendo que a partir desta pode-se utilizar de informações conhecidas de chapas finas para extrapolar para chapas grossas. Os autores afirmam que a LST indica que perfis de temperatura semelhantes serão produzidos se o tempo de solda for proporcional ao quadrado da espessura da chapa, ou seja, se o tempo de soldagem é tI para uma folha de espessura hI , então $n^2 \times tI$ é necessário para soldar uma chapa de espessura $n \times hI$. O tempo de solda total é determinado pela espessura total do empilhamento, e a folha externa mais fina determina a duração máxima de qualquer pulso de solda. Outros parâmetros de soldagem podem ser derivados da mesma forma. Em geral, quando a espessura da chapa e o diâmetro dos eletrodos são aumentados n vezes, o tempo de soldagem deve ser aumentado para n^2 vezes e a densidade de corrente diminuir para n vezes de modo a ter a nova distribuição de temperatura semelhante à original.

A Tabela 2.1 mostra as diferentes configurações dos parâmetros de soldagem em termos das diferentes espessuras propostos por Zhang e Senkara (2006), onde é possível observar que a LST não se ajusta bem em casos onde as chapas possuem espessuras distintas, já que a lei baseia-se na espessura total.

Tabela 2.1 – Soldas realizadas com diferentes configurações

Espessura da Chapa	Fator da LST	Diâmetro do Eletrodo (mm)	Corrente (A)	Tempo (ms/ciclos)	Força (kgf/lbf)	Diâmetro da Solda (mm)	Expulsão	Aparência
0,75		6,35	10500	150/9	227/500	6,10	Não	Boa
	0,62	4,41	8367	77/4,6	136/299	3,2	Não	Boa
	0,40	3,15	6547	45/2,68	93/204	2,89	Não	Boa
1,21		7,11	13500	200/12	354/780	7,07	Não	Boa
	1,61	10,24	16940	390/23,43	590/1301	7,76	Não	Danificada
	0,64	5,08	10563	116/6,97	242/532	3,4	Não	Boa
1,89		7,94	16500	283/17	590/1300	8,01	Não	Boa
	2,52	16,00	26460	953/57,15	1440/3175	11,3	Alta	Danificada
	1,56	11,11	21086	488/29,28	863/1903	10,8	Alta	Danificada

Fonte: Zhang e Senkara (2006)

2.4 Testes destrutivos e não destrutivos

Pandey *et al.* (2013) afirmam que geralmente a solda a ponto tem sua qualidade expressa na forma de características mensuráveis, podendo ser avaliada de maneira destrutiva ou não. Os autores consideram que a qualidade do ponto de solda pode ser descrita de três formas: por suas características físicas ou geométricas, sua força ou desempenho, e características do processo durante a soldagem. Os atributos de solda comumente analisados são: inspeção visual, tamanho do ponto, indentação e força máxima de ruptura.

Zhang e Senkara (2006) afirmam que o tamanho do ponto de solda será considerado de qualidade de acordo com a aplicação que se destina e de acordo com o fabricante, como é mostrado na **Figura 2.13**.

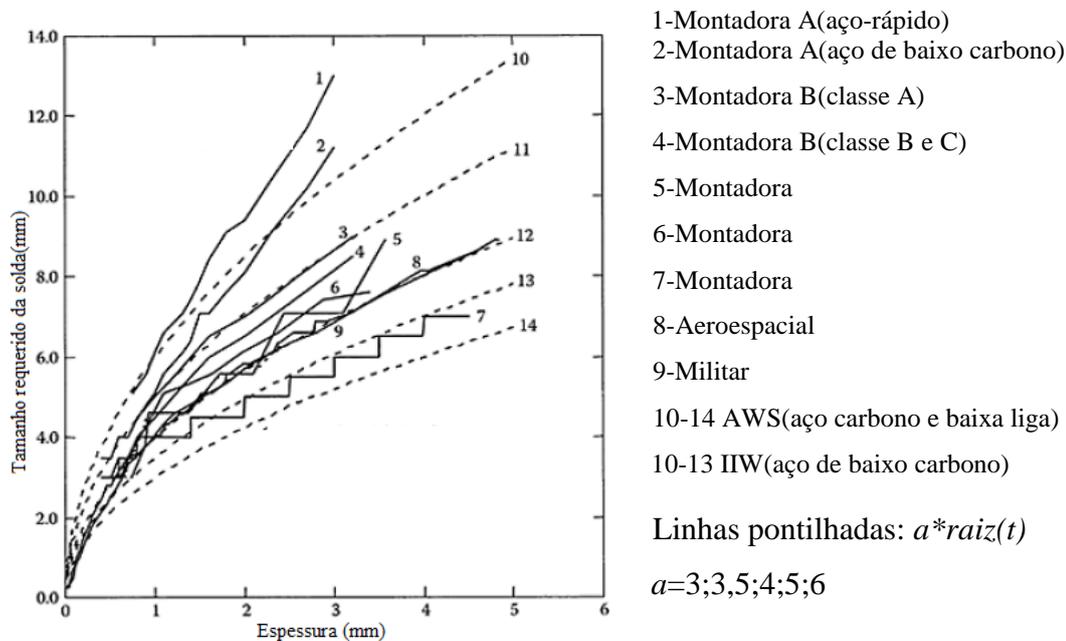


Figura 2.13 – Comparação dos tamanhos necessários

Fonte: Zhang e Senkara (2006)

2.4.1 Inspeção visual

A inspeção visual é um procedimento simples e muito usual na indústria. O método consiste em avaliar a superfície do ponto de solda e suas adjacências, analisando se ocorreu a formação de trincas e outros defeitos, descoloração ao redor da solda, planicidade e outros fatores que indiquem a fragilização do ponto de solda. Este teste permite avaliar a indentação produzida, sendo esta a impressão deixada nas chapas soldadas devido à aplicação de pressão e corrente por meio dos eletrodos. Segundo a AWS/SAE D 8.9 (2002), a indentação não é um

fator de reprovação. Silva e Camargo (2010) afirmam que a indentação é resultado da diminuição da resistência à compressão do material conforme a fusão avança. A **Figura 2.14** ilustra o ponto de solda em corte, e apresenta as características da indentação, sendo h a profundidade, d o diâmetro e V o seu volume.

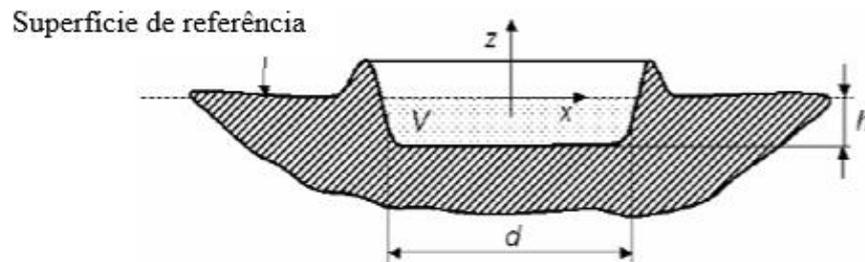


Figura 2.14 – Ponto de solda em corte

Fonte: Silva e Camargo (2010)

No entanto, sabe-se que indentações muito elevadas representam um sinal de parametrização indevida, além de comprometerem o acabamento das soldas. Por outro lado, indentações muito pequenas representam um sinal de que a solda é de má qualidade. Como valor orientativo, normalmente em aplicações industriais relacionadas ao setor automotivo, esta indentação máxima se situa na faixa aceitável de 20% da espessura da peça (BALDIM, 2014).

A medida de indentação pode ser realizada de diversas formas, onde pode-se utilizar de meios manuais, como por exemplo através do relógio apalpador, ou meios automatizados, como através de sensores de deslocamento do tipo LVDT.

2.4.2 Ensaio de cisalhamento

A reprodutibilidade dos resultados e a facilidade de reprodução tornam o ensaio de cisalhamento por tração um dos mais importantes para avaliação de soldas a ponto. Segundo Souza (1982), o ensaio de cisalhamento permite medir satisfatoriamente a resistência dos pontos de solda, uma vez que as deformações promovidas no material são distribuídas uniformemente por toda a área do ponto de solda, até ser atingida a carga máxima.

O ensaio de força cisalhamento consiste na aplicação de duas forças em sentidos opostos, **Figura 2.15**. Neste ensaio a velocidade é constante, a qual é pré-definida pelo operador da máquina de ensaio. O ensaio de cisalhamento fornece algumas informações importantes, tais como: deslocamento, força máxima de ruptura e alongamento.

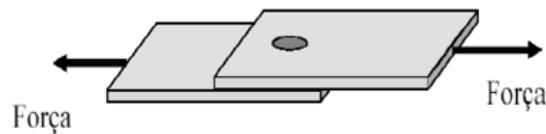


Figura 2.15 – Esquema para ensaio de cisalhamento

Fonte: Aures (2006)

Amaral (2011) em seu trabalho destaca quatro modos de falhas característicos do ensaio de cisalhamento, sendo estes: modo de falha interfacial (**Figura 2.16a**) – associado à baixa resistência do ponto; modo de falha por arrancamento do ponto (**Figura 2.16b**) – associado à média resistência do ponto; modo de falha por rasgamento da chapa (**Figura 2.16c**) - associado à alta resistência do ponto; modo de falha por arrancamento do ponto com rasgamento da chapa (**Figura 2.16d**) - associado à alta resistência do ponto.

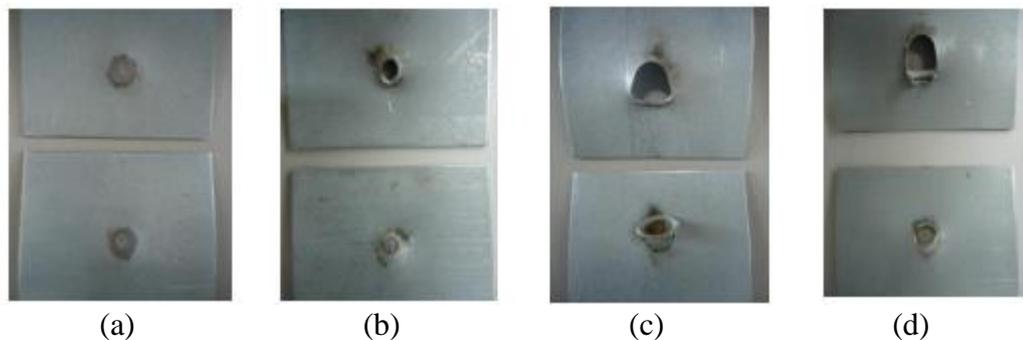


Figura 2.16 – Modo de falha

Fonte: Amaral (2011)

2.5 Projeto e Análise de Experimentos

2.5.1 Conceitos básicos de Projeto e Análise de Experimentos

Para utilizar técnicas estatísticas de modo a projetar e analisar um experimento é necessário que cada envolvido no processo tenha a clara ideia do que será pesquisado, como os dados serão coletados e uma ideia qualitativa de como será analisado. Segundo Kim *et al.* (2008), o projeto de experimentos fornece um meio poderoso para alcançar melhorias significativas na qualidade do produto e eficiência do processo. Do ponto de vista da área de manufatura, pode-se reduzir a quantidade de experimentos necessários quando se leva em conta os inúmeros fatores que afetam o resultado experimental (MONTGOMERY, 2009).

Segundo Couto (2012), depois de se aplicar o projeto de experimentos em um processo ou sistema em estudo, um modelo matemático é obtido, sendo composto de uma equação que poderá ser capaz de relacionar as variáveis de resposta com as variáveis de entrada.

Segundo Gomes (2010) e Montgomery (2009), os principais benefícios alcançados com o emprego das técnicas do projeto de experimentos são melhoria do rendimento dos processos, redução de variabilidade e maior conformidade com especificações nominais, redução do tempo de desenvolvimento de produtos ou processos e finalmente redução de custos. De acordo com Montgomery (2009), projetos de experimentos geralmente são utilizados para estudar o desempenho de sistemas ou processos, onde o processo será responsável por transformar a entrada (*input*), em uma saída (*output*), **Figura 2.17**. Os parâmetros que irão controlar o processo (equipamento, máquina, métodos, etc...) são classificados em duas formas: os controláveis, que são aqueles que podem ser ajustados dentro de uma escala de operação, e os não controláveis, fatores que influenciam na resposta mas não podem ser alterados.

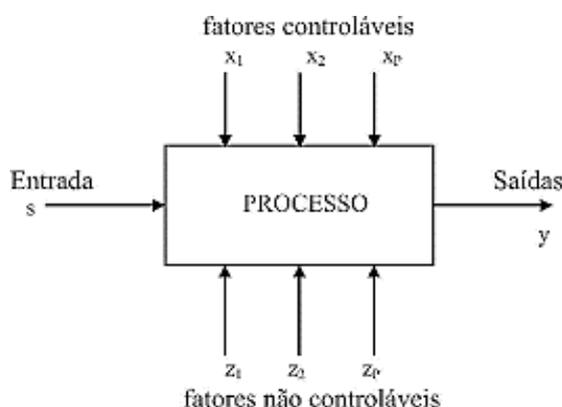


Figura 2.17 – Fatores de um processo

Fonte: Montgomery (2009).

Montgomery (2009) afirma que os objetivos de um experimento podem incluir:

- a. Determinar quais variáveis são mais influentes na resposta.
- b. Determinar os valores dos X 's influentes para que Y fique próximo do valor desejado.
- c. Determinar os valores dos X 's influentes para que Y possua uma pequena variabilidade.
- d. Determinar os valores dos X 's influentes para que os efeitos das variáveis não controláveis Z 's sejam minimizados.

2.5.2 Método Taguchi

O Método Taguchi pode ser compreendido como uma abordagem da qualidade voltada para o projeto do processo e/ou do produto. A proposta do método consiste em determinar, empregando técnicas estatísticas, a função perda do produto e otimizá-la; permitindo identificar os parâmetros ótimos de projeto que eliminam ou minimizam as influências dos fatores ruídos

no comportamento do produto. A vantagem deste método é possibilitar ao pesquisador a utilização de inúmeras informações conhecidas sobre o processo, contudo realizando um número mínimo de experimentos com base nos arranjos ortogonais (ANTONY, 2006); (AMARAL, 2011).

Segundo Almeida e Toledo (1989), Taguchi define o que este chamou de Controle da Qualidade *Off-line*, que consiste em etapas que serão desenvolvidas buscando-se obter produtos de alta qualidade e baixo custo. As etapas estão representadas esquematicamente na **Figura 2.18**, onde as etapas são:

1. Identificar os ruídos e os parâmetros de projeto ou processo que afetam significativamente o desempenho e que possam ser manipulados, bem como os seus níveis potenciais;
2. Realizar experimentos fatoriais fracionados no produto e no processo utilizando-se da matriz ortogonal;
3. Analisar os resultados dos experimentos para determinar o nível ótimo de operação dos parâmetros estudados;
4. Realizar um experimento de confirmação para certificar-se que esse nível de operação dos parâmetros realmente melhora a qualidade.

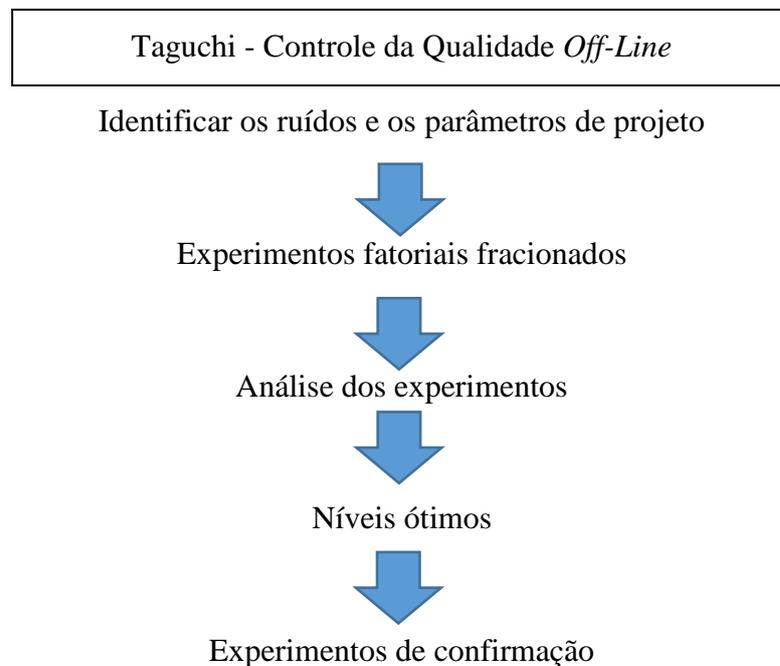


Figura 2.18 – Etapas a seguir para o Método Taguchi

Segundo Lin *et al.* (2007), Taguchi desenvolveu uma transformação dos dados de respostas em valores relacionados com a variação presente devido aos ruídos, conhecida como razão sinal-ruído (S/R). Ainda segundo Lin *et al.* (2007), Almeida e Toledo (1989), diferentes relações sinal ruído podem ser usadas de acordo com os objetivos desejados, tais como: “nominal melhor – NB, **Eq. (2.6)**”, “menor melhor –LB, **Eq. (2.7)**” e “maior melhor – HB, **Eq. (2.8)**”. Seja a variável de interesse Y_i , sendo suas medidas correspondentes Y_1, Y_2, \dots, Y_n , a razão sinal/ruído (S/R) de Taguchi será:

$$S/R = 10 \log \left(\frac{\bar{Y}^2}{S^2} \right) \quad (2.6)$$

$$S/R = -10 \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum Y_i^2 \right) \quad (2.7)$$

$$S/R = -10 \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (2.8)$$

Onde

$$\bar{Y} = \frac{\sum Y_i}{n} \quad (2.9)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (2.10)$$

Sendo \bar{Y} a média e S^2 a variância da variável de interesse.

A Tabela 2.2 traz para uma quantidade de fatores selecionados e conforme a quantidade de níveis definidos, o tipo de arranjo de Taguchi que pode ser utilizado, e ainda a resolução correspondente, isto para arranjos em que todos os fatores possuem a mesma quantidade de níveis segundo Ross (1991) tem se os possíveis confundimento associados à resolução:

Resolução 1-Somente os fatores principais podem ser estimados (os efeitos principais estão todos mascarados com qualquer outra interação). Baixa resolução

Resolução 2-Os fatores principais não estão mascarados com interações com dois valores (os efeitos principais não estão mascarados com interações com dois fatores; interações com dois fatores não estão mascarados.)

Resolução 3-Os fatores principais e interações com dois fatores podem ser estimados (não estão mascarados)

Resolução 4-Os efeitos principais e as interações podem ser estimadas. Alta resolução

Tabela 2.2 – Alguns tipos de arranjos de Taguchi e suas respectivas resoluções

Número de ensaios	Número de níveis	Número de fatores	Resolução
4	2	1	4
4	2	2	4
4	2	3	1
8	2	1--3	4
8	2	4	2
8	2	5--7	1
9	3	1	4
9	3	2	4
9	3	3	1
9	3	4	1
16	2	1--4	4
16	2	5	3
16	2	6--8	2
16	2	9--15	1
18	3	1--8	1
27	3	1--3	4
27	3	4--13	1
32	2	1--5	4
32	2	6	3
32	2	7--16	2
32	2	17--31	1

Fonte: (ROSS,1991)

Rawal e Inamdar (2012) utilizaram o Método Taguchi aplicado na soldagem RSW, isto em chapas de aço inoxidável, utilizaram um arranjo L27, para 3 fatores em 3 níveis, sendo os fatores corrente de soldagem, tempo de soldagem e força exercida através dos eletrodos. Estes afirmaram em seu trabalho terem obtido os níveis dos fatores que eram mais significativos para as respostas estudadas, sendo força de cisalhamento e diâmetro do ponto de solda. Os autores ainda identificaram que o efeito da corrente de soldagem é o mais significativo em ambas as respostas.

Raut e Vishal (2014) utilizaram um arranjo L18 de Taguchi, com 3 fatores em 3 níveis. Estes utilizaram os mesmos parâmetros que Rawal e Inamdar (2012), porém optaram por utilizar como resposta a força de cisalhamento, os autores trabalharam com chapas de aço macio, reproduzindo os ensaios para chapas de 0,80mm e 1,00mm. Assim como Rawal e Inamdar (2012), eles encontraram que a corrente de soldagem produz o efeito mais significativo na medida de força de cisalhamento, visto isto pelo valor da razão sinal/ ruído (S/R).

Ambos trabalhos, sendo estes os de Rawal e Inamdar (2012) e de Raut e Vishal (2014), confirmam a aplicação do Método Taguchi, de modo que, através da razão *S/R* foi possível identificar os parâmetros mais influentes na resposta, e através de ensaios de confirmação identificaram a melhoria da qualidade, ou seja, maximização da força de cisalhamento.

2.5.3 Metodologia de Superfície de Resposta

Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) de acordo com Montgomery (2009) são técnicas estatísticas e matemáticas aplicadas na modelagem e análise de respostas influenciadas por variáveis. Ainda segundo Montgomery (2009) geralmente, a relação entre as variáveis dependentes e independentes são desconhecidas, sendo por vezes necessário encontrar uma aproximação da real influência do conjunto de variáveis independentes (x) nas respostas (y).

Guedes (1996) ressalta que, geralmente, problemas analisados com a MSR, a função matemática que define a relação entre fatores experimentais e resposta é desconhecida. No entanto, na literatura é possível encontrar algumas funções de respostas. Para descrever uma aproximação das relações entre as respostas de interesse e as variáveis independentes, normalmente são usadas funções polinomiais. Se o modelo da resposta for uma função linear, a função pode ser representada pelo modelo de primeira ordem da **Eq. (2.11)**:

$$y(\mathbf{X}) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.11)$$

onde: $y(\mathbf{X})$ – Resposta de interesse

x_i – Variáveis independentes

β_i – Coeficientes a serem estimados

k – Número de variáveis independentes

ε – Erro experimental

No entanto, Montgomery (2009) ressalta que, a modelagem por uma superfície não plana representa melhor a variação da resposta em função dos fatores, como o modelo de segunda ordem apresentado na **Eq. (2.12)**.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.12)$$

Montgomery (2009) considera ainda que é pouco provável que o modelo polinomial represente uma boa aproximação para todo o espaço experimental coberto pelas variáveis independentes. O Método dos Mínimos Quadrados Ordinários é o algoritmo tipicamente

utilizado para a estimação dos parâmetros (β), e que na forma matricial pode ser representado pela **Eq. (2.13)**.

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (2.13)$$

Onde X é a matriz dos níveis de fatores codificados e Y é a resposta.

Apesar de o arranjo experimental composto central (*Central Composite Design – CCD*) ser bastante utilizado para a coleta de dados na Metodologia de Superfície de Resposta, em algumas situações o arranjo de Box-Behnken é mais adequado, isto ocorre quando os vértices do cubo representam uma combinação de níveis dos fatores proibitiva por custo ou devido a restrições nas características físicas do processo, visto que o arranjo de Box-Behnken não contém nenhum vértice do cubo com todos os níveis inferiores e superiores para cada variável (MONTGOMERY, 2009), a **Figura 2.19** representa um arranjo de Box-Behnken para três fatores.

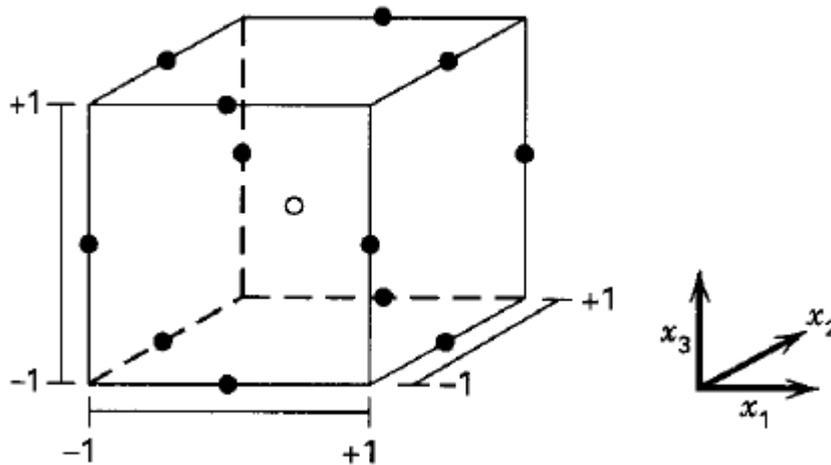


Figura 2.19 – Arranjo de Box-Behnken para três fatores

Fonte: Montgomery (2009)

A Metodologia de Superfície de Resposta é uma das principais técnicas do Projeto e Análise de experimentos e frequentemente tem sido utilizada por alguns pesquisadores; ajudando a compreender melhor os fenômenos dos processos de fabricação. Após feito a modelagem matemática através da Metodologia de Superfície de Resposta, muitos autores partem para a otimização das respostas. A otimização das respostas é buscada impondo restrições ao modelo e definindo a meta para a função objetivo, onde, quanto maior o número de restrições mais difícil será atingir a meta.

2.5.4 Gradiente Reduzido Generalizado

Segundo Gomes (2013), Köksoy e Doganaksoy (2003), o algoritmo GRG é um dos métodos gradientes com maior robustez e eficiência, fazendo com que seja apropriado a uma grande gama de problemas. Apresenta ainda uma facilidade de acesso, geralmente encontra-se disponível em *softwares* comerciais, como no caso das planilhas eletrônicas do Microsoft Excel, podendo ser aplicado a diversos problemas de otimização não-lineares restritos ou irrestritos (KÖKSOY, 2008).

Gomes (2013), Luenberger e Ye (2008) afirmam que o GRG apresenta três vantagens significantes: (i) se o processo de busca termina antes da confirmação do ótimo, o último ponto encontrado é viável devido ao fato de que cada ponto gerado é viável e provavelmente próximo do ótimo; (ii) se o método gera uma sequência convergente, o ponto limite garante, pelo menos, um mínimo local; (iii) não depende da convexidade.

O algoritmo GRG proporciona uma adequada convergência global, principalmente se o ponto inicial for próximo da solução (GOMES, 2013), (LASDON *et al.*, 1978). Uma forma geral para a programação não-linear pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(\mathbf{x}) \\ & \text{Sujeito a: } h_i(\mathbf{x}) = 0 \\ & \mathbf{x}^{\min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^{\max} \end{aligned} \tag{2.14}$$

onde: \mathbf{x} – Vetor das variáveis de decisão

$f(\mathbf{x})$ – Função objetivo não-linear

$h_i(\mathbf{x}) = 0$ – Restrições

$\mathbf{x}^{\min}, \mathbf{x}^{\max}$ – Limites mínimo e máximo para as variáveis de decisão

Gomes (2013) afirma ainda que o algoritmo adiciona variáveis de folga para converter inequações de restrição ($g_i(\mathbf{x}) \leq 0$) em equações, caso seja necessário. O algoritmo remove as restrições do problema através de substituição direta, transformando a Eq. 2.14 na forma apresentada por Gomes (2013), Chen e Fan (2002) e Lasdon *et al.* (1978):

$$\text{Min } F(\mathbf{x}) = f[\mathbf{x}_B(\mathbf{x}_N), \mathbf{x}_N]$$

$$\text{Sujeito a: } l_N \leq \mathbf{x}_N \leq u_N \quad (2.15)$$

onde: l_N – Limite inferior para \mathbf{x}_N

u_N – Limite superior para \mathbf{x}_N

Partindo de um ponto inicial viável \mathbf{x}^k , uma direção de movimento é definida pelo algoritmo GRG para otimizar a função objetivo. Esta direção de movimento é obtida pelo gradiente reduzido, o qual é calculado da seguinte maneira:

$$\mathbf{r}^k(\mathbf{x}_N) = \left(\frac{\partial f^k}{\partial \mathbf{x}_N^k} \right)^T - \left(\frac{\partial f^k}{\partial \mathbf{x}_B^k} \right)^T \left(\frac{\partial g^k}{\partial \mathbf{x}_B^k} \right)^{-1} \left(\frac{\partial g^k}{\partial \mathbf{x}_N^k} \right) \quad (2.16)$$

Finalmente, o GRG utiliza como critério de convergência o valor pré-definido do erro, deste modo, quando o algoritmo atinge este valor de erro o processo é encerrado, caso contrário o procedimento é repetido até que se atinja a melhor solução viável (GOMES, 2013).

2.6 Considerações finais

Este capítulo teve como objetivo fornecer o embasamento teórico para o desenvolvimento da pesquisa. Os conceitos discutidos sobre a soldagem a ponto aplicada a chapas de aço galvanizado mostraram a dificuldade quanto à durabilidade do eletrodo, visto que a configuração inadequada causa a formação de latão nas extremidades do mesmo mais rapidamente. Outro fato importante é que os trabalhos identificados na literatura utilizaram fontes de corrente com valores superiores a 6kA, e deste modo, a faixa de trabalho teve de ser obtida experimentalmente.

Quanto ao Método Taguchi, a maioria dos trabalhos o utilizam somente para experimentos exploratórios, isto devido à baixa resolução do arranjo, porém o trabalho desenvolvido mostrou que é viável a aplicação do método para a parametrização do equipamento de soldagem a ponto, sem necessitar de outros métodos para fazê-lo.

A Metodologia de Superfície de Resposta se mostra muito utilizada em diversos trabalhos que utilizam o Projeto e Análise de Experimentos. Os modelos onde os coeficientes possuem segunda ordem são na maioria das vezes suficientes, e adequados para a modelagem das respostas em função das variáveis independentes.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Considerando os objetivos principais estabelecidos no Capítulo 1 e na revisão da literatura abordada no Capítulo 2, neste capítulo são descritos os procedimentos experimentais utilizados.

3.1 Método experimental

Para a otimização do objeto de estudo descrito anteriormente, o presente trabalho utilizou, como método de pesquisa, a experimentação. Assim, entre as técnicas de experimentação, foi empregado o Projeto e Análise de Experimentos, definido no item 2.5 como o processo de planejamento dos experimentos para que dados apropriados sejam coletados e depois analisados por métodos estatísticos, o que resulta em conclusões válidas e objetivas (MONTGOMERY, 2009).

Considerando os projetos experimentais do DOE, foram utilizados o Método Taguchi, que se caracteriza como uma ferramenta indicada em estudos exploratórios, e a Metodologia de Superfície de Resposta, que se caracteriza como um conjunto de ferramentas indicado para a otimização de processos, além de permitir um amplo conhecimento a respeito do fenômeno estudado. Finalmente, para a otimização propriamente dita, foi empregada a programação não-linear com o algoritmo GRG. Com isso, o método experimental pode ser dividido em três fases:

1ª Fase – Método Taguchi: utilizado para obter os parâmetros significativos do processo, bem como encontrar os níveis ótimos de operação destes.

2ª Fase – Metodologia de Superfície de Resposta: utilizada para modelagem matemática das respostas e análise das influências dos parâmetros.

3ª Fase – Otimização através da programação não-linear com o algoritmo GRG: utilizada para obter a combinação ótima dos parâmetros de soldagem que permitam a maximização da força de cisalhamento.

As **Figura 3.1, 3.2 e 3.3** apresentam as etapas seguidas em cada fase do método experimental:

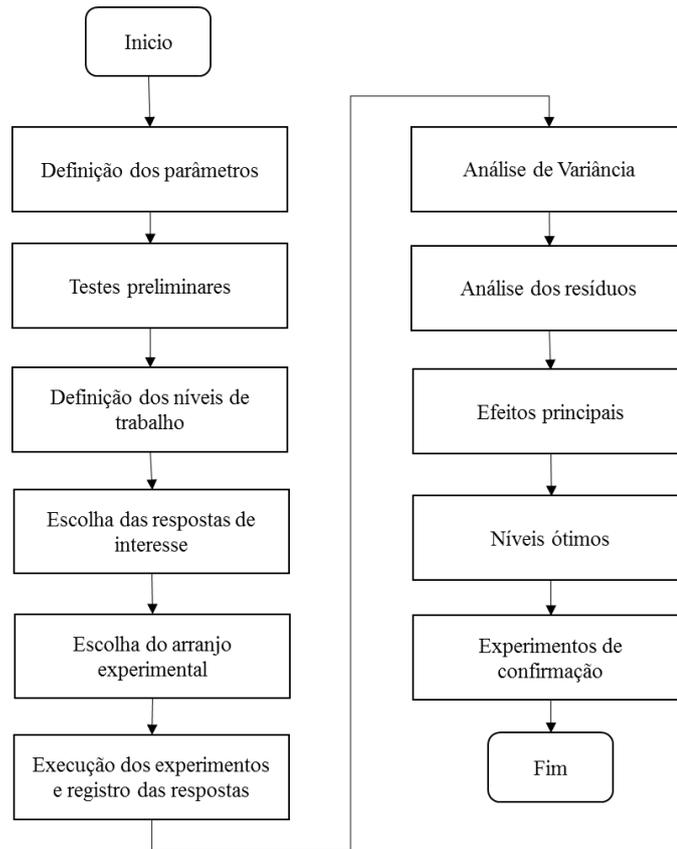


Figura 3.1 – Método experimental – Fase 1: Método Taguchi

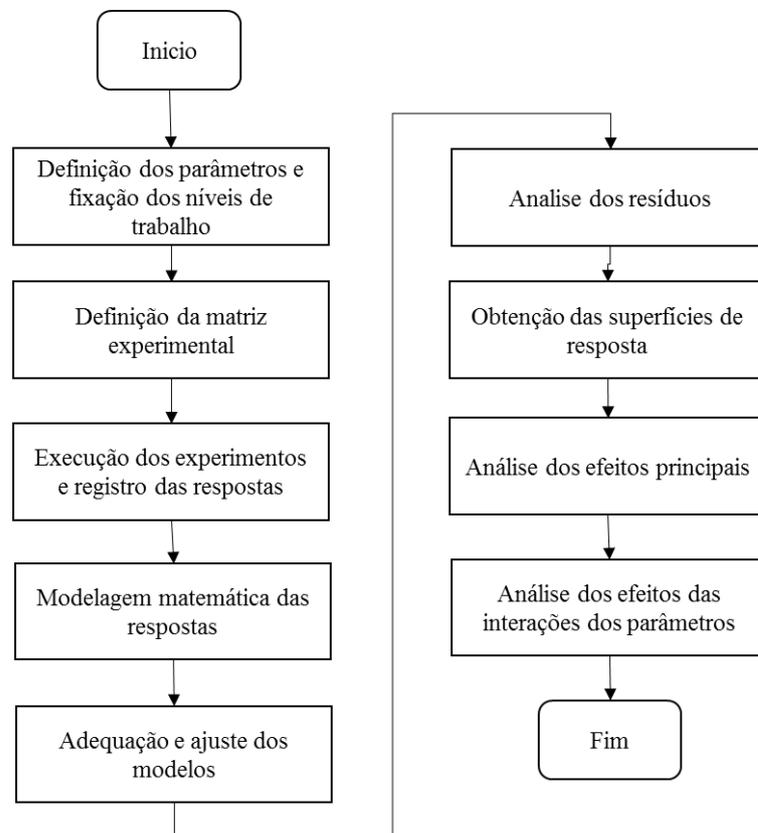


Figura 3.2 – Método experimental – Fase 2: Metodologia de Superfície de Resposta

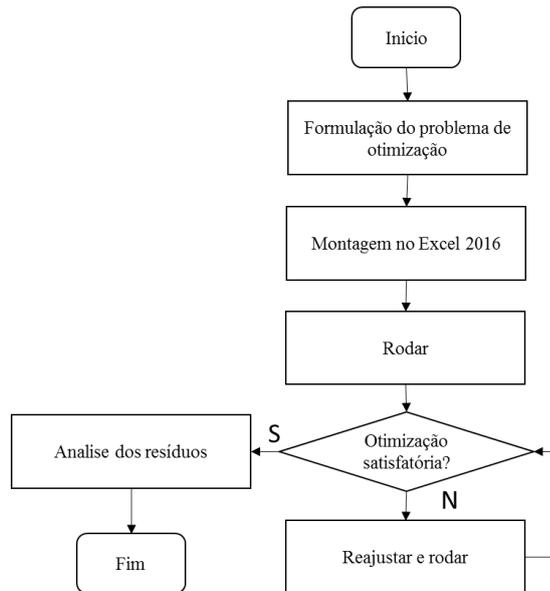


Figura 3.3 – Método experimental – Fase 3: Otimização

3.2 Materiais e Métodos Utilizados

Para o desenvolvimento do trabalho, todos os testes preliminares e soldagens definitivas foram realizados no Laboratório de Soldagem – LSO - da Unifei em uma máquina de solda a ponto estacionária marca Presol Transweld, modelo TWPRV50 com potência nominal de 50 kVA, alimentação de 220V e corrente máxima de 6kA, cujos detalhes de seus principais acessórios são mostrados na **Figura 3.4**. Este equipamento possui a capacidade de ajuste de 15 parâmetros diferentes durante execução das soldagens cujas regulagens podem seguir as faixas estabelecidas no Quadro 3.1.

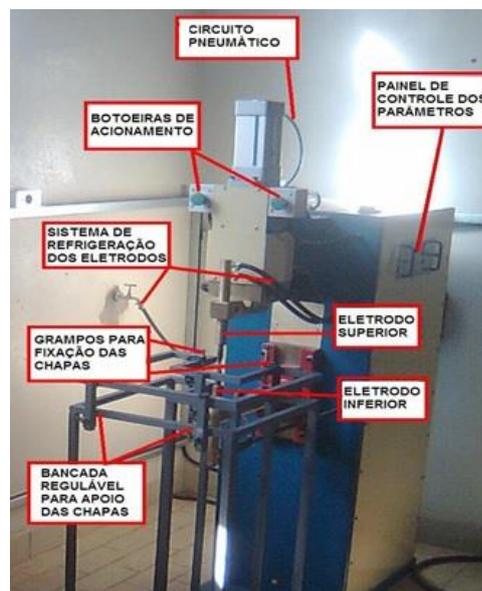


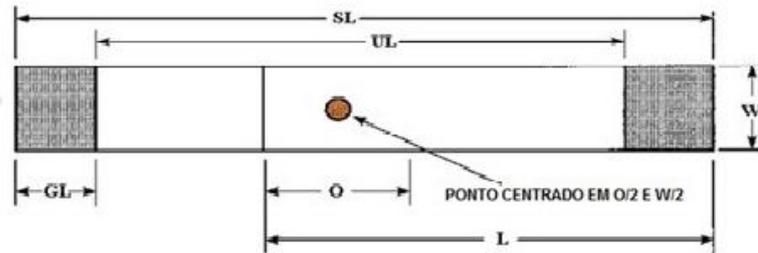
Figura 3.4 – Detalhes do equipamento de soldagem RSW utilizado

Quadro 3.1 – Descrição dos parâmetros do equipamento de soldagem-PRESOL

Parâmetro	Descrição	Faixa de regulagem
Pressão	Responsável por manter o contato adequado entre as chapas, cujo ajuste é feito através de uma válvula pneumática e um manômetro analógico.	0-16 (bar)
Pré-pressão 1	Tempo que o eletrodo móvel leva para tocar a peça, a partir da posição inicial.	1-99 (ciclos)
Pré-pressão 2	Tempo para o incremento da pressão que o eletrodo irá exercer, partindo do zero até o valor ajustado na válvula pneumática.	1-99 (ciclos)
Pré- aquecimento	Tempo de aplicação da corrente de aquecimento, que ocorre antes da aplicação efetiva da corrente de soldagem.	0-99 (ciclos)
Corrente pré- aquecimento	Corrente fornecida pelo equipamento para aquecer o material.	0-99 (%6kA)
Subida da corrente	Tempo que pode ser utilizado para reduzir o faiscamento inicial da corrente sendo que a corrente aumenta de forma incremental durante o tempo definido, partindo do zero até o valor programado para a corrente de soldagem.	0-99 (ciclos)
Corrente de solda	É a intensidade de corrente aplicada para promover a fusão do ponto de solda.	0-99 (%6kA)
Tempo de solda	Tempo de aplicação da corrente de solda.	0-99 (ciclos)
Descida da corrente	Tempo adicionado ao processo, é um tempo extra, para a redução da intensidade de corrente de forma mais amena.	0-99 (ciclos)
Resfriamento	Tempo entre a aplicação da corrente de soldagem e a corrente de revenimento.	0-99 (ciclos)
Revenimento ciclo	Tempo utilizado para reduzir a dureza do ponto de solda.	0-99 (ciclos)
Corrente revenimento	Intensidade da corrente aplicada para fazer o revenimento.	0-99 (%6kA)
Impulsos	Quantidade de pulsos de corrente durante a aplicação da corrente de soldagem.	1-99
Solda ciclo – Tempo de soldagem	Intervalo de tempo que é constituído do tempo de subida da corrente e o tempo de aplicação constante da corrente.	0-99 (ciclos)
Pós-pressão	Tempo de retenção da solda sob pressão pós a aplicação da corrente.	1-99 (ciclos)

Para realização dos experimentos (preliminares e definitivos) utilizaram-se amostras preparadas nas dimensões 105,0 x 45,0 x 0,7 mm e posteriormente limpas de impurezas e óleos e dispostos para a soldagem conforme recomendações da norma AWS/SAE 8.9M (2002) e posicionadas conforme o estabelecido na **Figura 3.5**. Os eletrodos de liga de Cu-Cr-Zr foram preparados na forma truncada com diâmetro de 5 mm e inclinação de 15°. Durante as soldagens

procurou-se garantir uma vazão mínima de água de refrigeração de 5,0 l/min por eletrodo. A **Figura 3.6** mostra o detalhamento da preparação dos eletrodos. Para o monitoramento do deslocamento do eletrodo foi utilizado um sensor de deslocamento LVDT cuja interface permite a aquisição do deslocamento em função do tempo de solda. A **Figura 3.7** mostra os detalhes do sistema de aquisição de dados, ao passo que a **Figura 3.8** detalha o posicionamento do sensor para a realização das medições.



Espessura da chapa	Comprimento da chapa	Largura	Superposição	Comprimento Total	Comprimento Livre	Comprimento a segurar
	L	W	O	SL	UL	GL
0,60 – 1,29	105	45	35	175	95	40
1,30 – 3,00	138	60	45	230	105	62,5

Figura 3.5 – Especificações dimensionais para o corpo de prova (em mm)

Fonte: AWS (2002) modificada

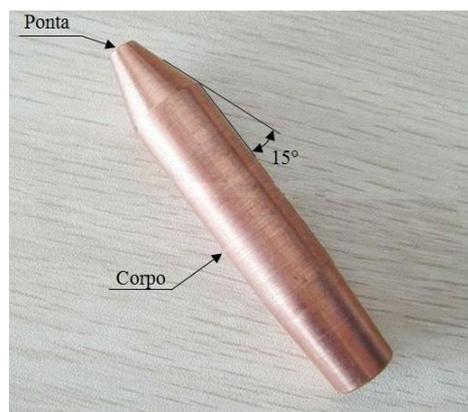


Figura 3.6 – Eletrodo utilizado

Fonte: BALDIM (2014)



Figura 3.7– Interface de aquisição de dados do sensor de deslocamento

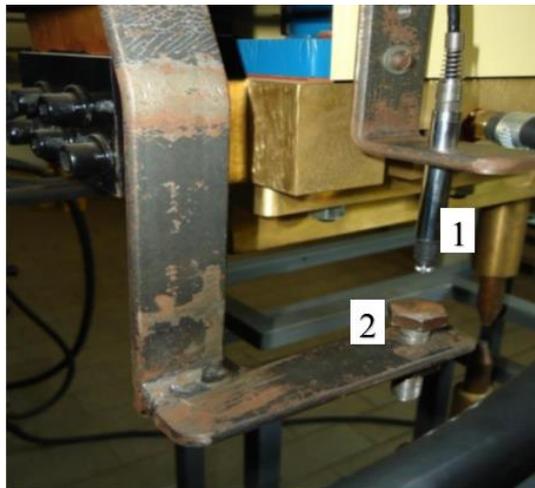


Figura 3.8 – Acoplamento do sensor LVDT ao cabeçote móvel. (1) sensor de deslocamento e (2) parafuso de ajuste de altura

Os corpos de prova utilizados neste estudo foram constituídos de chapas de aço carbono galvanizado fabricado pela Usiminas, com espessura de 0,70 mm, galvanizado por eletrodeposição. A Tabela 3.1 mostra a composição química do material utilizado.

Tabela 3.1 – Composição química do aço utilizado. Fonte: Usiminas

Material	C	Mn	P	S	Al	Zn
	%	%	%	%	%	g/m ²
Aço carbono USIGALVE-EEP-PC	0,06	0,35	0,025	0,025	0,02	40 - 60

Dependendo da fase de desenvolvimento do trabalho, após a soldagem os corpos de prova foram submetidos ao teste de cisalhamento para avaliar a resistência máxima de ruptura, bem como a deformação nesta condição. Tal procedimento foi realizado no Laboratório de Ensaaios Destrutivos da UNIFEI através da utilização de uma máquina de tração EmicDL2000, cujos detalhes da montagem e medições são mostrados na **Figura 3.9**. Uma célula de carga de 500 kg foi adaptada na máquina utilizada para o experimento.



Figura 3.9 – Ensaio de cisalhamento.

Um relógio apalpador modelo 513-204 Mitutoyo, com precisão de 0,01 mm foi utilizado para medição da indentação em ambos os lados da chapa e em conjunto com um bloco magnético para fixação das chapas de forma retilínea e um traçador de altura (ajuste fino). A **Figura 3.10** mostra detalhes da montagem *in-loco* para as medições efetuadas no Laboratório de Metrologia da UNIFEI.

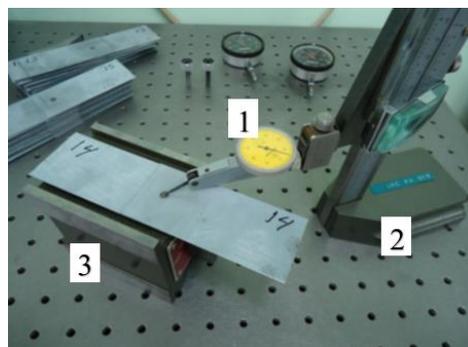


Figura 3.10 – Medição da indentação da solda: (1) Relógio apalpador, (2) Traçador de altura, (3) Bloco magnético

3.3 Testes Preliminares

Para iniciar o procedimento experimental, a primeira etapa, aqui estudada, foi a regulagem do equipamento procurando identificar inicialmente quais os parâmetros poderiam influenciar no objeto de estudo. O Quadro 3.1 relaciona os parâmetros passíveis de análises e regulagens no equipamento utilizado.

Para seleção dos parâmetros/fatores de interesse buscou-se na literatura o efeito dos diversos parâmetros, sendo que aqui identificou-se que alguns parâmetros têm efeito para materiais de maior espessura, e estes com os respectivos valores configurados no equipamento são:

- Impulso - 1
- Intervalo - 0

Já outros fatores são empregados em materiais que possuem maiores durezas, sendo:

- Corrente de revenimento - 0
- Tempo de revenimento - 0
- Resfriamento - 0

Deste modo, os fatores escolhidos dentre os 15, e as respectivas notações, foram:

- Pressão – P
- Corrente – I
- Tempo de soldagem - T_T
- Corrente de pré-aquecimento - I_{PRE}
- Tempo de pré pressão 1 – T_{PP1}
- Tempo de pré pressão 2 – T_{PP2}
- Tempo de pré-aquecimento - T_{PRE}
- Tempo de subida da corrente - T_{SUB}
- Tempo de descida da corrente - T_{DESC}
- Tempo de pós pressão - T_{POS}

Definidos os parâmetros, o próximo passo foi a determinação dos níveis a serem empregados e para isto investigou-se os trabalhos de AMARAL (2011) e BALDIM (2014), visto que utilizaram o mesmo equipamento, porém trabalharam com chapas de 1,0 mm diferentemente da chapa de 0,7 mm deste trabalho. A Tabela 3.2 mostra os níveis testados e os resultados obtidos para o modo de falha observado após teste de cisalhamento.

O tempo de soldagem (T_T) que é ajustado no equipamento é a soma do tempo de subida da corrente T_{SUB} e o tempo (T) onde a corrente (em módulo) é mantida constante, deste modo para montar o arranjo experimental foram utilizados os tempos T e T_{SUB} , já o T_T somente para o *setup* da máquina de solda, isto evita a correlação entre as variáveis de entrada.

Tabela 3.2 – Experimentos preliminares para determinação dos níveis experimentais

Amostra	P (bar)	Fase de pré pressão		Fase de pré- aquecimento		Fase de soldagem			Fase de pós soldagem		Resultado
		T _{PP1} (ciclos)	T _{PP2} (ciclos)	I _{PRE} (kA)	T _{PRE} (ciclos)	T _T			T _{DESC} (ciclos)	T _{POS} (ciclos)	
						I (kA)	T _{SUB} (ciclos)	T (ciclos)			
1	6	10	30	1,2	20	3,6	10	25	10	10	IR
2	2	10	30	1,2	20	3,6	10	25	10	10	IR
3	2	10	50	1,2	20	3,9	10	25	10	10	IR
4	2	10	50	3,6	20	3,9	10	25	10	10	IR
5	2	10	50	3,6	20	3,9	10	25	30	10	IR
6	2	10	50	3,6	20	3,9	0	35	10	10	IR
7	3	10	50	3,6	20	3,9	0	35	10	10	IR
8	3	30	30	3,6	20	3,9	0	45	10	10	IR
9	2	30	30	1,8	20	4,2	10	20	0	20	DP
10	3	30	30	1,8	20	4,2	10	20	0	20	DP
11	3	30	30	1,8	20	4,2	10	20	10	10	DP
12	3	30	30	1,8	10	4,2	10	20	10	10	IR
13	4	30	30	1,8	10	4,2	10	20	10	10	IR
14	3	30	30	2,4	20	4,5	1	20	10	10	IR
15	2	30	30	2,4	20	4,5	1	20	10	10	DP
16	2	30	30	3,0	20	4,5	5	20	10	10	DP
17	4	30	30	3,0	20	4,5	5	20	10	10	IR
18	3	30	30	3,0	20	4,5	5	20	10	10	IR
19	4	30	30	1,8	10	4,8	10	20	10	10	DP
20	4	30	30	1,8	20	4,8	0	20	10	10	DP
21	4	30	30	1,2	20	4,8	0	15	10	10	DP
22	4	30	30	1,2	20	4,8	10	5	10	10	DP
23	5	30	30	1,2	20	4,8	10	5	10	10	DP
24	6	30	30	1,2	20	4,8	10	5	10	10	DP
25	6	10	30	1,2	20	4,8	10	5	10	10	DP
26	6	10	30	1,2	20	4,8	10	15	10	10	DP
27	2	30	30	3,0	20	4,8	10	15	10	30	DP
28	2	30	20	3,0	20	4,8	15	10	20	30	DP
29	3	30	30	2,4	20	5,1	10	5	10	10	DP
30	2	30	30	3,6	20	5,1	10	15	20	30	DP

IR – ruptura interfacial, DP – desprendimento do ponto

Os níveis experimentais definidos, após os testes preliminares, estão representados na Tabela 3.3. Os níveis que mostraram uma soldagem sem que houvesse uma mínima fixação entre as chapas foram descartados. Os níveis foram definidos buscando a região onde ocorrem os 4 tipos de modos de falhas apontados no trabalho de AMARAL (2011), e deste modo

possibilitar na primeira etapa encontrar a relação dos parâmetros de soldagem com a força de cisalhamento.

Tabela 3.3 – Fatores e níveis experimentais

Fatores	Unidade	Nível 1	Nível 2	Nível 3
P	bar	2,0	3,5	5,0
I	kA	4,50	4,74	4,98
T_{PP1}	ciclos	15	25	35
T_{PP2}	ciclos	25	35	45
I_{PRE}	kA	3,96	4,20	4,44
T_{PRE}	ciclos	7	10	13
T_{SUB}	ciclos	3	8	13
T	ciclos	7	12	17
T_{DESC}	ciclos	3	8	13
T_{POS}	ciclos	10	20	30

3.4 Seleção das respostas

A escolha das respostas, como visto, é uma etapa muito importante, e as escolhidas foram:

- Indentação medida pelo relógio apalpador - Ind_{AP}
- Indentação medida pelo sensor de deslocamento - Ind_{SEN}
- Força máxima de cisalhamento - F
- Modo de falha ocorrido - $Frat$

Os modos de falhas encontrados após o ensaio de cisalhamento estão sintetizados na Figura 3.11, esta resposta não foi analisada estatisticamente, somente foi considerada como critério de aceitação da solda, como proposto por Amaral (2011) pontos foram identificados e classificados em:

- Ruptura interfacial (Figura 3.11 a), nota 1 – As amostras sofreram pouca ou nenhuma curvatura após ensaio, o ponto de solda foi classificado como inaceitável.
- Arrancamento do ponto (Figura 3.11 b), nota 2 - O ponto saiu em uma chapa removendo uma parte pequena da outra chapa, o ponto de solda foi classificado como aceitável.

○ Arrancamento do ponto com rasgamento da chapa (Figura 3.11 c), nota 3 - O ponto saiu em uma chapa removendo uma parte da outra chapa, o ponto de solda foi classificado como aceitável.

○ Arrancamento do ponto com rasgamento de ambas as chapas (Figura 3.11 d), nota 4 - O ponto saiu em uma chapa e houve um pequeno arrancamento desta e removendo uma parte da outra chapa, o ponto de solda foi classificado como aceitável.

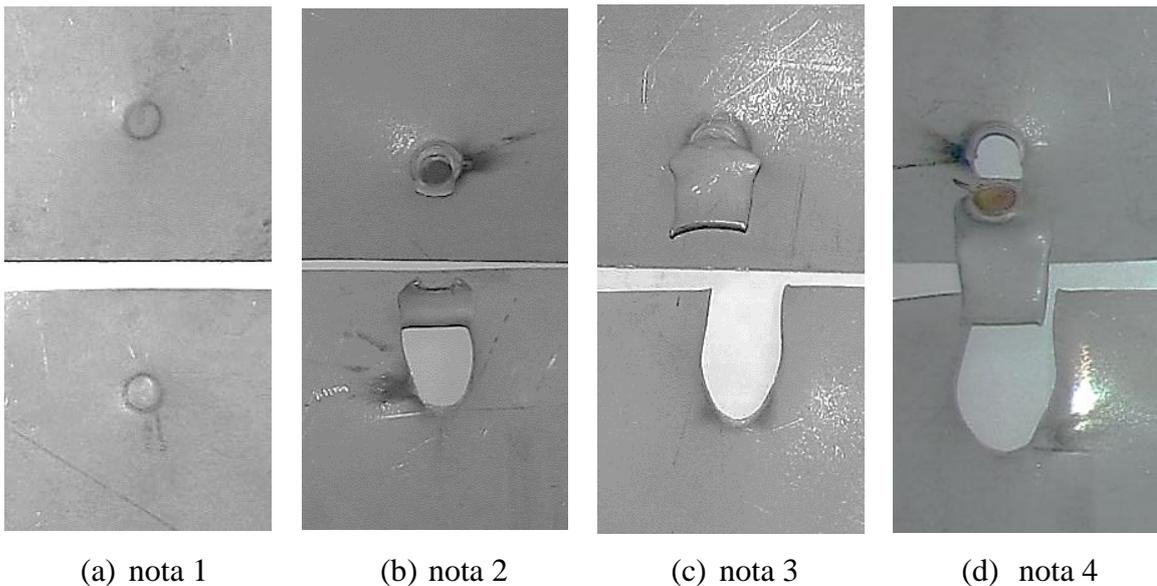


Figura 3.11 – Tipos diferentes de modo de falha observados nos experimentos

3.5 Escolha do arranjo de Taguchi

O arranjo de Taguchi escolhido foi o L27, para os 10 fatores em 3 níveis cujo delineamento da matriz experimental é mostrado na Tabela 3.4. Este arranjo segundo Ross (1991) possui resolução 1, deste modo, somente os fatores principais podem ser estimados.

Tabela 3.4 – Arranjo experimental

Amostra	I (kA)	P (bar)	T _{PP1} (ciclos)	T _{PP2} (ciclos)	I _{PRE} (ciclos)	T _{PRE} (ciclos)	T _T			T _{POS} (ciclos)
							T (ciclos)	T _{SUB} (ciclos)	T _{DESC} (ciclos)	
1	4,50	2,0	15	25	3,96	7	7	3	3	10
2	4,50	2,0	15	35	4,20	10	7	8	8	20
3	4,50	2,0	15	45	4,44	13	7	13	13	30
4	4,74	2,0	25	25	3,96	7	12	8	8	20
5	4,74	2,0	25	35	4,20	10	12	13	13	30
6	4,74	2,0	25	45	4,44	13	12	3	3	10
7	4,98	2,0	35	25	3,96	7	17	13	13	30
8	4,98	2,0	35	35	4,20	10	17	3	3	10
9	4,98	2,0	35	45	4,44	13	17	8	8	20
10	4,50	3,5	35	25	4,20	13	12	3	8	30
11	4,50	3,5	35	35	4,44	7	12	8	13	10
12	4,50	3,5	35	45	3,96	10	12	13	3	20
13	4,74	3,5	15	25	4,20	13	17	8	13	10
14	4,74	3,5	15	35	4,44	7	17	13	3	20
15	4,74	3,5	15	45	3,96	10	17	3	8	30
16	4,98	3,5	25	25	4,20	13	7	13	3	20
17	4,98	3,5	25	35	4,44	7	7	3	8	30
18	4,98	3,5	25	45	3,96	10	7	8	13	10
19	4,50	5,0	25	25	4,44	10	17	3	13	20
20	4,50	5,0	25	35	3,96	13	17	8	3	30
21	4,50	5,0	25	45	4,20	7	17	13	8	10
22	4,74	5,0	35	25	4,44	10	7	8	3	30
23	4,74	5,0	35	35	3,96	13	7	13	8	10
24	4,74	5,0	35	45	4,20	7	7	3	13	20
25	4,98	5,0	15	25	4,44	10	12	13	8	10
26	4,98	5,0	15	35	3,96	13	12	3	13	20
27	4,98	5,0	15	45	4,20	7	12	8	3	30

3.6 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados o procedimento experimental e os equipamentos utilizados para que os objetivos definidos para o presente trabalho pudessem ser alcançados. Considerando que o objeto de estudo possui muitos parâmetros de entrada, o que eleva a quantidade de experimentos necessários, e que um dos objetivos do estudo é analisar a influência de todos parâmetros de regulação, o problema foi tratado em duas etapas, sendo primeiro o estudo dos parâmetros utilizando o Método Taguchi e com os resultados do Taguchi foi montado uma Superfície de Resposta.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados e as correspondentes análises para os testes realizados conforme metodologia descrita no capítulo 3. Após os ensaios de confirmação realizados para o Método Taguchi serão mostradas uma análise via superfície de resposta com posterior otimização e testes confirmatórios.

4.1 Resultados e análises obtidos com a aplicação do Método Taguchi

Os resultados obtidos para o delineamento experimental de Taguchi utilizando um arranjo L27 estão apresentados na Tabela 4.1. As classificações dos pontos de solda inseridas foram avaliadas após ensaio de cisalhamento e com a posterior observação do modo de falha gerado e em seguida classificadas conforme o critério estabelecido por Amaral (2011) que está representado na Figura 3.11. Os pontos aceitáveis segundo este critério de aceitação são os referentes às amostras 1, 7, 8 e 9. Entretanto, visto pelos altos valores de força de cisalhamento atingido por amostras que tiveram o modo de falha ruptura interfacial, pode-se considerar que este tipo de critério de avaliação tem uma finalidade estética, e não está associado a quantidade de carga que a solda resiste.

A medida de indentação calculada através da leitura registrada pelo sensor de deslocamento LVDT foi baseada no procedimento descrito por Baldim (2014), em seu trabalho utilizou chapas de aço galvanizado com a espessura de 1,0mm, calculando as medidas de indentação utilizando como ponto de referência a queima de zinco, visto que a dilatação térmica produzida durante a queima do zinco é registrada pelo sensor de deslocamento. Deste modo a medida de indentação foi calculada como a diferença entre o maior nível de deslocamento, o ponto B na Figura 4.1, e o ponto onde inicia-se a expansão térmica do zinco, ponto A, por exemplo para a amostra 6 foi encontrado o valor de 0,065mm(9,3% da espessura da chapa, onde $0,065=0,859-0,794$). Durante a execução do delineamento experimental de Taguchi o sensor de deslocamento não identificou a queima de zinco para as amostras 19, 22, 25 e 26, e para contornar este problema e poder calcular a indentação utilizou-se do instante onde a variação de deslocamento registrada através do sensor de um ponto para o outro tendeu a zero. Para a amostra 1 foi utilizado o mesmo procedimento citado anteriormente devido o valor calculado à

partir da queima de zinco fornecer uma medida de indentação próxima a espessura da chapa, o que é improvável.

A composição das etapas do ciclo de soldagem e o deslocamento do sensor de deslocamento para a amostra 6, estão apresentados na Figura 4.1, considerando que a pressão chega a seu valor máximo em 70 ciclos, isto quando termina a etapa 2, e sendo que a aplicação de corrente se dá a partir da etapa 3, é possível inferir que a partir deste momento inicia-se a indentação.

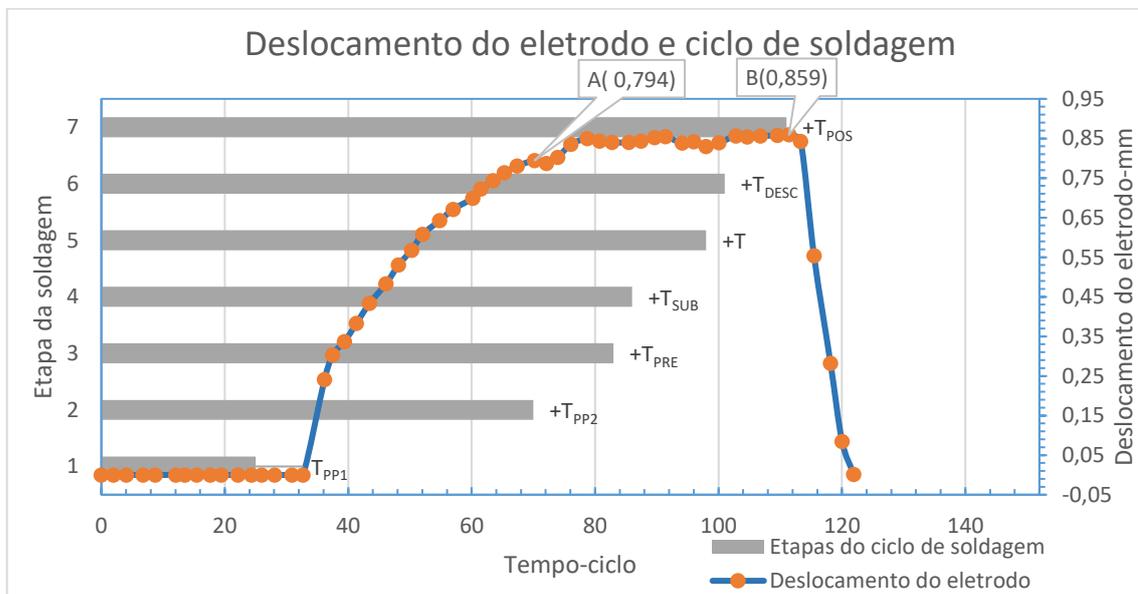


Figura 4.1 – Medida do sensor de deslocamento em função do tempo para a amostra 6

O histograma obtido para a força de cisalhamento agrupados de acordo com a qualidade da solda(QS) está apresentado na Figura 4.2, onde nota-se que os pontos classificados como inaceitável atingiram os mesmos níveis de força que os pontos classificados como aceitável, isto indica que o tipo de modo de falha não limita os níveis de força de cisalhamento que a amostra suporta, considerando que o valor de carga que a solda suporta sendo o mais importante, não deve-se tomar como critério de aceitação o modo de falha.

Tabela 4.1 – Respostas obtidas para os arranjos experimentais

Teste	Parâmetros										Respostas			
	I (kA)	P (bar)	TPP1 (ciclos)	TPP2 (ciclos)	IPRE (ciclos)	TPRE (ciclos)	T (ciclos)	TSUB (ciclos)	TDESC (ciclos)	TPOS (ciclos)	F (N)	IndAP (%)	IndSEN (%)	Frat
1	4,50	2,0	15	25	3,96	7	7	3	3	10	3638	12,9	16,4	4
2	4,50	2,0	15	35	4,20	10	7	8	8	20	3168	12,9	11,4	1
3	4,50	2,0	15	45	4,44	13	7	13	13	30	3204	14,3	5,0	1
4	4,74	2,0	25	25	3,96	7	12	8	8	20	3566	15,7	12,2	1
5	4,74	2,0	25	35	4,20	10	12	13	13	30	3715	18,6	11,3	1
6	4,74	2,0	25	45	4,44	13	12	3	3	10	3763	18,6	9,3	1
7	4,98	2,0	35	25	3,96	7	17	13	13	30	4342	32,9	17,3	2
8	4,98	2,0	35	35	4,20	10	17	3	3	10	4116	15,7	11,3	2
9	4,98	2,0	35	45	4,44	13	17	8	8	20	4058	20,0	6,6	2
10	4,50	3,5	35	25	4,20	13	12	3	8	30	3332	21,4	12,6	1
11	4,50	3,5	35	35	4,44	7	12	8	13	10	1990	17,1	9,7	1
12	4,50	3,5	35	45	3,96	10	12	13	3	20	2061	12,9	9,4	1
13	4,74	3,5	15	25	4,20	13	17	8	13	10	3827	22,9	26,7	1
14	4,74	3,5	15	35	4,44	7	17	13	3	20	3685	24,3	17,3	1
15	4,74	3,5	15	45	3,96	10	17	3	8	30	3702	21,4	17,9	1
16	4,98	3,5	25	25	4,20	13	7	13	3	20	2544	18,6	12,5	1
17	4,98	3,5	25	35	4,44	7	7	3	8	30	2179	14,3	21,4	1
18	4,98	3,5	25	45	3,96	10	7	8	13	10	2883	20,0	15,6	1
19	4,50	5,0	25	25	4,44	10	17	3	13	20	1871	20,0	27,4	1
20	4,50	5,0	25	35	3,96	13	17	8	3	30	2043	11,4	7,1	1
21	4,50	5,0	25	45	4,20	7	17	13	8	10	2170	18,6	17,0	1
22	4,74	5,0	35	25	4,44	10	7	8	3	30	766	15,7	16,3	1
23	4,74	5,0	35	35	3,96	13	7	13	8	10	1001	4,3	17,3	1
24	4,74	5,0	35	45	4,20	7	7	3	13	20	535	21,4	23,1	1
25	4,98	5,0	15	25	4,44	10	12	13	8	10	3788	27,1	35,4	1
26	4,98	5,0	15	35	3,96	13	12	3	13	20	3635	32,9	30,2	1
27	4,98	5,0	15	45	4,20	7	12	8	3	30	3244	18,6	17,9	1

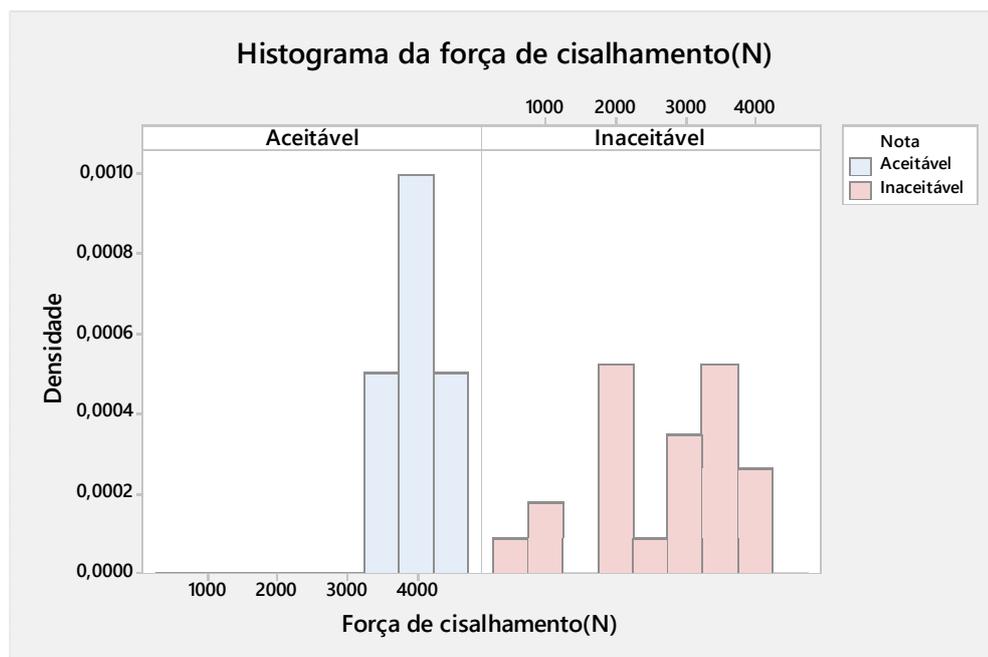


Figura 4.2 – Histograma da força de cisalhamento agrupado em qualidade da solda

Os resultados das análises de variância para as respostas de indentação medida pelo sensor de deslocamento, indentação medida pelo relógio apalpador e força de cisalhamento estão resumidos na Tabela 4.2. Os dados foram coletados para as 27 amostras, os mesmos foram analisados por meio do programa Minitab17. Foi identificado que as chapas sofreram uma pequena deformação no ato do corte para a preparação das amostras, e isto gerou dados inconclusivos do experimento para a indentação medida pelo relógio apalpador, visto pela forma que é feita a medida por este instrumento. O baixo valor da explicabilidade ajustada ($R^2 adj$) de 14,20% mostra que as respostas medidas não se ajustaram adequadamente, e desta forma os valores de P_{VALUE} maior que 0,05 não indicam corretamente que os parâmetros não estão influenciando a resposta medida, sendo assim esta resposta foi descartada. Para as demais respostas houve um bom ajuste visto pelo valor de $R^2 adj$ superior a 75% e os parâmetros influentes nas respostas foram os que apresentaram P_{VALUE} menor que 0,05, um fato importante visto aqui é que o tempo de pré pressão 1 (T_{PP1}) apresenta um efeito significativo na resposta de força de cisalhamento, isto pode ser explicado supondo que a variação deste parâmetro varia a velocidade de aproximação do eletrodo à peça e deste modo menores tempos geram uma quantidade maior de calor no impacto. Contudo neste ponto pode ter havido um confundimento do efeito deste parâmetro com outros, por exemplo a pressão que é exercida após terminado o intervalo de tempo da pré pressão 1. Isto será analisado mais adiante através de uma superfície de resposta.

Tabela 4.2 – Análise de variância para a razão sinal-ruído

PARÂMETROS	Respostas							
	Ind _{AP}		Ind _{SEN}			F		
	F _{VALUE}	P _{VALUE}	F _{VALUE}	P _{VALUE}	Ordem	F _{VALUE}	P _{VALUE}	Ordem
P	0,25	0,788	16,04	0,004	1	56,00	0,000	1
I	1,89	0,231	6,86	0,028	3	18,44	0,003	4
T	2,8	0,139	0,06	0,945		37,29	0,000	2
T _{PP1}	0,74	0,515	4,12	0,075	6	34,13	0,001	3
T _{PP2}	1,45	0,306	7,32	0,025	2	0,97	0,432	
I _{PRE}	0,58	0,588	0,46	0,651		0,72	0,525	
T _{PRE}	0,35	0,717	5,11	0,051	4	1,87	0,234	
T _{SUB}	0,36	0,711	4,89	0,055	5	0,31	0,744	
T _{DESC}	1,93	0,225	3,06	0,121		1,00	0,422	
T _{POS}	0,55	0,601	2,14	0,198		1,64	0,270	
R ² (%)	78,4		94,3			98,1		
R ² adj(%)	6,5		75,5			91,6		
Desvio Padrão	3,262		2,029			1,327		

Os valores em **negrito** indicam os parâmetros influentes nas respostas

4.1.1 Análise dos resíduos

A análise de resíduos feita para as respostas de força de cisalhamento e indentação pelo sensor de deslocamento através do software MINITAB 17 está apresentada na Tabela 4.3, resíduos são definidos pela diferença entre o valor previsto do modelo e o valor experimental, resíduos devem ser normais, aleatórios e não correlacionados (MONTGOMERY, 2009). Pode ser visto que a distribuição dos resíduos não foi Normal para a resposta de força de cisalhamento, isto pode-se observar pelo coeficiente de Anderson-Darling (AD) > 1 e P_{VALUE} menor que 0,05, já para a resposta de indentação os resíduos estão normalmente distribuídos. Os testes de aleatoriedade presentes na Tabela 4.4 mostram que os resíduos para as duas respostas, força de cisalhamento e indentação são aleatórios, visto pelo valor P_{VALUE} maior que 0,05 para os quatro índices do *Run Chart*. Os testes de independência mostraram que os resíduos para ambas as respostas não são correlacionados, isto devido ao valor de P_{VALUE} maior que o nível de significância de 5% e o coeficiente de Pearson igual a zero.

Tabela 4.3 – Análise de resíduos para as respostas de força cisalhante e indentação

Análise dos resíduos		F	Ind _{SEN}
Teste de Normalidade	AD	1,133	0,551
	P_{VALUE}	0,005	0,142
Teste de Aleatoriedade Run Chart	Agrupamento	0,425	0,725
	Mistura	0,575	0,275
	Tendência	0,104	0,215
	Oscilação	0,896	0,785
Teste de Correlação	Pearson	0,000	-0,000
	P_{VALUE}	1,000	1,000

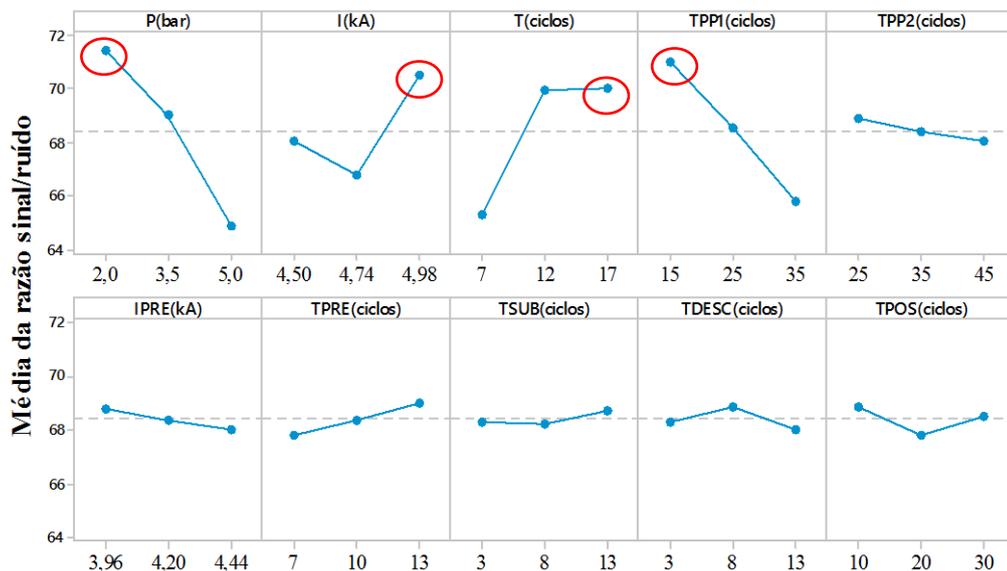
4.1.2 Efeitos principais para a razão sinal/ruído

As análises dos efeitos principais para a razão sinal/ruído permitiu identificar os níveis de trabalho dos distintos parâmetros que influenciaram diretamente na resposta. Os gráficos com os níveis de cada parâmetro que influenciam nas respostas de força de cisalhamento e indentação medida pelo sensor de deslocamento são mostrados nas Figuras 4.3 e 4.4, respectivamente. Utilizou-se uma razão sinal/ruído do tipo maior é melhor para as respostas do modelo gerado para força de cisalhamento, pois é desejável a maximização dos valores de resistência das soldas. No modelo gerado para indentação medida pelo sensor de deslocamento

foi utilizada uma razão sinal/ruído do tipo menor é melhor sobre as respostas, considerando a busca por valores menores de indentação dos pontos de solda.

Os parâmetros que apresentaram efeito significativo para a resposta de força de cisalhamento foram a pressão (P), a corrente (I), o tempo (T) e o tempo de pré pressão 1 (T_{PP1}), a combinação dos níveis ótimos visto pela Figura 4.3 é 1331, pode ser visto pelo F_{VALUE} na Tabela 4.2 a sequência dos fatores mais influentes na resposta, sendo que quanto maior mais influente. Os demais parâmetros não influenciaram na resposta de força de cisalhamento, visto pelo P_{VALUE} maior que 0,05. Já para a resposta de indentação medida pelo sensor de deslocamento, **Figura 4.4**, os parâmetros que apresentaram efeito significativo ($P_{VALUE} < 0,05$) foram a pressão (P), corrente (I) e tempo de pré pressão 2 (T_{PP2}), porém os parâmetros tempo de pré pressão 1 (T_{PP1}), tempo de pré-aquecimento (T_{PRE}) e tempo de subida da corrente (T_{SUB}) apresentaram um valor de P_{VALUE} ligeiramente maior que 0,05, desta forma a combinação de níveis ótimos que minimiza a indentação é 113332, seguindo a ordem $P, I, T_{PP1}, T_{PP2}, T_{PRE}$ e T_{SUB} .

Efeitos principais na razão sinal/ruído para a força de cisalhamento



Sinal/ruído: Maior é melhor

Figura 4.3 Gráfico dos efeitos principais com razão sinal/ruído para força máxima de cisalhamento

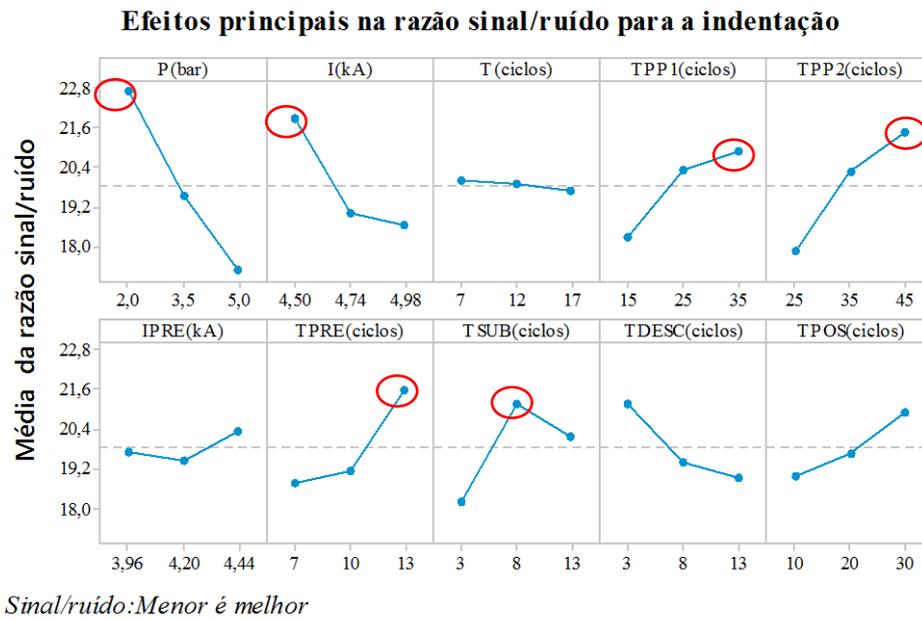


Figura 4.4 Gráfico dos efeitos principais com razão sinal/ruído para a indentação medida pelo sensor de deslocamento

4.1.3 Validação dos resultados

A partir dos parâmetros apontados como significativos pelo Método Taguchi e os seus respectivos níveis ótimos, para a resposta de força de cisalhamento (Figura 4.3), foram realizados experimentos confirmatórios. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.4, que mostra ainda os valores de indentação e o modo de falha. O valor obtido experimentalmente mostra que o Método de Taguchi possibilitou encontrar na região trabalhada uma região em que é possível construir soldas de qualidade, visto pelo alto nível de força de cisalhamento obtido, diâmetro do ponto maior que $5\sqrt{t}$ (4,18mm) para todos ensaios de confirmação e indentação menor do que 20% da espessura da chapa.

Tabela 4.4 – Valores obtidos experimentalmente para níveis ótimos para força de cisalhamento

Parâmetros	P(bar)	I(kA)	T(ciclos)	TPP1(ciclos)
Nível	2	4,98	17	15
Amostra		F(N)	IndSEN(%)	Frat
1		4141	17,4	2
2		4230	19,3	2
3		4482	9,4	3
4		4232	13,4	3
5		4366	9,7	3
6		4298	8,3	3
Média		4291,6	12,92	
Desvio-padrão		119,89	4,585	

4.2 Resultados e análises obtidos com a aplicação da superfície de resposta

Considerando os parâmetros identificados como significativos após a aplicação do Método Taguchi para a resposta de força de cisalhamento, foi construído uma superfície de resposta, neste ponto do trabalho buscou-se criar uma região em que as respostas força de cisalhamento e indentação trabalhem em torno dos níveis ótimos, e deste modo fazer a modelagem das respostas. O arranjo utilizado foi o de Box-Behnken, este foi escolhido por necessitar de uma quantidade menor de experimentos, utilizando somente três níveis, além de não utilizar pontos axiais fora da região de operação (MONTGOMERY,2009).

Os parâmetros identificados como não influentes no arranjo de Taguchi para a resposta de força de cisalhamento foram mantidos constantes nos níveis indicados na Tabela 4.5, isto visando reduzir o desgaste do eletrodo. A correspondência entre os níveis codificados e os valores dos parâmetros utilizados na superfície de respostas estão indicados na Tabela 4.6, modelos encontrados para as respostas de força de cisalhamento e indentação são válidos para estes níveis codificados. A Tabela 4.7 representa os resultados obtidos através da metodologia de superfície de resposta. As classificações dos pontos de solda inseridas foram avaliadas após o ensaio de cisalhamento e observação do modo de falha, tal como feito para o delineamento de Taguchi. Foram gerados dois arranjos de Box-Behnken com três fatores em três níveis totalizando dois arranjos com 15 experimentos cada, sendo os fatores o tempo de pré pressão 1 (T_{PP1}), a corrente (I) e o tempo (T), no arranjo A foi utilizado a pressão de soldagem (P) de 2,0 bar e no arranjo B a pressão de 2,5 bar. A pressão de soldagem foi trabalhada em dois níveis, pois valores abaixo e acima destes estavam fora da região de soldagem, ou seja, não geraram soldas de qualidade, e levando em consideração o tipo de regulagem de pressão não era possível valores intermediários, já que o erro de precisão iria ser da ordem de grandeza da distância entre os níveis. Os experimentos mostraram um resultado satisfatório, onde o diâmetro do ponto para todas as amostras foi superior à $5\sqrt{t} = 4,18mm$ e o alto valor de força de cisalhamento atingido. De posse das respostas novamente foi utilizado o software Minitab 17 para a análise. Os arranjos A e B, para as pressões de 2,0 e 2,5 bar, respectivamente, foram analisados separadamente e em um arranjo customizado A+B, que apresenta o mesmo resultado que teria se utilizado a variável pressão (P) como categórica em dois níveis.

Tabela 4.5 – Parâmetros mantidos constantes e níveis utilizados

T_{PP2}(ciclos)	I_{PRE}(kA)	T_{PRE}(ciclos)	T_{SUB}(ciclos)	T_{DESC}(ciclos)	T_{POS}(ciclos)
45	4,2	10	10	10	25

Tabela 4.6 – Variáveis e níveis de trabalho

	Níveis codificados		
	-1	0	1
T _{PP1} (ciclos)	15	25	35
I(kA)	4,86	4,92	4,98
T(ciclos)	14	16	18

Tabela 4.7 – Resumo das respostas para a superfície de resposta

Teste	Parâmetros				Respostas		
	P(bar)	T _{PP1} (ciclos)	T(ciclos)	I(kA)	F(N)	Ind _{SEN} (%)	Frat
1	2,0	25	14	4,86	4280	17,0	3
2	2,0	25	14	4,98	4342	29,6	3
3	2,0	25	18	4,86	4392	35,0	3
4	2,0	25	18	4,98	4355	38,8	2
5	2,0	15	16	4,86	4196	9,2	3
6	2,0	15	16	4,98	4329	12,2	3
7	2,0	35	16	4,86	4324	21,1	3
8	A 2,0	35	16	4,98	4317	26,0	3
9	2,0	15	14	4,92	4236	8,8	3
10	2,0	15	18	4,92	4415	18,7	3
11	2,0	35	14	4,92	4286	20,4	3
12	2,0	35	18	4,92	4352	21,9	3
13	2,0	25	16	4,92	4309	13,6	3
14	2,0	25	16	4,92	4300	15,5	3
15	2,0	25	16	4,92	4329	17,2	3
16	2,5	25	14	4,86	4131	17,4	3
17	2,5	25	14	4,98	4283	20,7	3
18	2,5	25	18	4,86	4201	13,6	3
19	2,5	25	18	4,98	4444	16,3	3
20	2,5	15	16	4,86	4230	9,6	2
21	2,5	15	16	4,98	4312	24,0	3
22	2,5	35	16	4,86	4387	22,4	3
23	B 2,5	35	16	4,98	4413	23,6	3
24	2,5	15	14	4,92	4144	23,4	3
25	2,5	15	18	4,92	4415	10,4	3
26	2,5	35	14	4,92	4227	22,3	3
27	2,5	35	18	4,92	4420	22	3
28	2,5	25	16	4,92	4250	17,1	3
29	2,5	25	16	4,92	4224	17,3	3
30	2,5	25	16	4,92	4265	18,2	3

4.2.1 Modelagem matemática das respostas e análise de variância

A partir dos dados experimentais apresentados na Tabela 4.7, é possível obter relações matemáticas correlacionando as respostas analisadas e as variáveis de entrada. Anteriormente, na seção 2.5.3 foram apresentadas equações que representam modelos para a modelagem através da metodologia superfície de resposta, considerando o modelo de segunda ordem apresentado na **Eq. (2.12)**, pode-se reescrevê-lo em termos das variáveis de processo conforme a **Eq. (4.1)** a seguir:

$$y = \beta_0 + \beta_1 T_{PP1} + \beta_2 I + \beta_3 T + \beta_{11} T_{PP1}^2 + \beta_{22} I^2 + \beta_{33} T^2 + \beta_{12} T_{PP1} I + \beta_{13} T_{PP1} T + \beta_{23} I T \quad (4.1)$$

Onde: $y(X)$ – Resposta de interesse

x_i – Variáveis independentes

$\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ – Coeficientes a serem estimados ($i=1,2,3$ e $j=2,3$)

T_{PP1} – Tempo de pré pressão 1

I – Corrente

T – Tempo

O software Minitab 17 foi aplicado aos dados dos arranjos A, B e ao arranjo customizado A+B, contidos na Tabela 4.7, e então foram geradas as Tabelas 4.8, 4.9 e 4.10, respectivamente estas apresentam os coeficientes estimados para os modelos quadráticos completos com os respectivos P_{VALUE} 's, além do ajuste dos mesmos para as respostas de indentação e força de cisalhamento, estatísticas F_{VALUE} 's e os P_{VALUE} 's referentes as análises de variância dos modelos também são indicados.

Através dos dados da análise de variância presentes na Tabela 4.8 é possível inferir que somente o modelo completo para a resposta de força de cisalhamento não apresenta P_{VALUE} menor que 5% de significância, podendo indicar que o modelo completo desenvolvido não é adequado para a resposta de força de cisalhamento, F_{VALUE} para este modelo também indica que ao nível 95% não se ajusta. Os resultados da ANOVA presentes na Tabela 4.8 indicam que ambos os modelos para a indentação apresentaram um bom ajuste, visto pelo valor de R^2 *adj* superior a 84%, os modelos desenvolvidos para a força apresentaram um ajuste (R^2 *adj*) não muito bom, porém aceitável. Além disso, todos os modelos desenvolvidos para o arranjo A não apresentaram falta de ajuste, $Lack-Of-Fit < 0,05$. Após visto quais os modelos são adequados

através da análise de variância o próximo passo foi escolher entre o modelo completo ou o reduzido para representar a relação entre as respostas e as variáveis independentes. O critério utilizado para escolher qual modelo é mais adequado foi o que tivesse maior R^2 *adj* e menor desvio padrão S , deste modo, o modelo completo foi escolhido para a indentação e o modelo reduzido para a força de cisalhamento.

Tabela 4.8 – Modelos quadráticos e análise de variância para o arranjo A – Pressão 2,0 bar

Termo	Ind _{SEN}				F			
	Modelo Completo		Modelo Reduzido		Modelo completo		Modelo reduzido	
	Coef.	P _{VALUE}	Coef.	P _{VALUE}	Coef.	P _{VALUE}	Coef.	P _{VALUE}
Cte	0,1083	0,001	0,1083	0,000	4312,7	0,000	4312,4	0,000
T_{PP1}	0,0354	0,009	0,0354	0,004	13,0	0,322	13,0	0,274
I	0,0213	0,057	0,0213	0,040	18,9	0,171	18,9	0,131
T	0,0338	0,011	0,0338	0,005	46,3	0,011	46,3	0,005
T_{PP1}²	-0,0385	0,029	-0,0385	0,017	-20,5	0,292	-20,5	0,244
I²	0,0501	0,011	0,0501	0,005	-0,5	0,980	*	*
T²	0,0524	0,009	0,0524	0,004	29,9	0,147	30,0	0,108
T_{PP1}*I	0,0034	0,792	*	*	-35,2	0,090	-35,2	0,061
T_{PP1}*T	-0,0148	0,281	*	*	-28,2	0,153	-28,2	0,115
I*T	-0,0154	0,265	*	*	-24,7	0,201	-24,7	0,158
F_{VALUE}	9,36(4,77)		12,74(3,58)		3,68(4,77)		4,96(4,15)	
P_{VALUE}	0,012		0,003		0,083		0,033	
R²(%)	94,40		90,91		86,88		86,87	
R²adj(%)	84,31		84,09		63,25		69,37	
S	0,0245		0,0247		33,5239		30,6051	
LOF	0,152		0,181		0,120		0,157	

Os valores entre parênteses em **negrito** são os tabelados de $F_{95\%}(9,5)=4,77$; $F_{95\%}(6,8)=3,58$; $F_{95\%}(8,6)=4,15$

As **Eq. (4.2)** e **(4.3)** representam os modelos obtidos para as respostas de indentação (Ind_{SEN}) e força cisalhante (F), para o arranjo A:

$$Ind_{SENA} = 0,1083 + 0,0354T_{PP1} + 0,0213I + 0,0338T - 0,0385T_{PP1}^2 + 0,0501I^2 + 0,0524T^2 + 0,0034 T_{PP1}I - 0,0148 T_{PP1}T - 0,0154IT \quad (4.2)$$

$$F_A = 4312,4 + 13,0T_{PP1} + 18,9I + 46,3T - 20,5T_{PP1}^2 + 30,0T^2 - 35,2T_{PP1}I - 28,2T_{PP1}T - 24,7IT \quad (4.3)$$

Através dos dados da análise de variância presentes na Tabela 4.9 é perceptível que somente o modelo completo para a resposta de força de cisalhamento apresenta P_{VALUE} maior

que 5% de significância, podendo indicar que o modelo desenvolvido não é adequado, o valor de F_{VALUE} também indica a não adequação deste modelo ao nível de 95%. Os resultados da ANOVA presentes na Tabela 4.9 mostram ainda que ambos os modelos para a indentação apresentaram um bom ajuste, visto pelo valor de $R^2 adj$ superior a 85%; já os modelos desenvolvidos para a força de cisalhamento apresentam um ajuste não muito bom, porém aceitável. Além disso, todos os modelos desenvolvidos para o arranjo B não apresentaram falta de ajuste, $Lack-Of-Fit < 0,05$. Após visto que os modelos são adequados através da análise de variância, o próximo passo foi escolher entre o modelo completo ou o reduzido para representar a relação entre as respostas e as variáveis independentes. Em ambas as respostas os modelos reduzidos apresentaram melhor ajuste $R^2 adj$ e menor S , e deste modo foram escolhidos.

Tabela 4.9 – Modelos quadráticos e análise de variância para o arranjo B – Pressão 2,5 bar

Termo	Ind _{SEN}				F			
	Modelo Completo		Modelo Reduzido		Modelo Completo		Modelo reduzido	
	Coef.	P _{VALUE}	Coef.	P _{VALUE}	Coef.	P _{VALUE}	Coef.	P _{VALUE}
Cte	0,1229	0,000	0,1207	0,000	4246,1	0,000	4256,8	0,000
T_{PP1}	0,0201	0,006	0,0201	0,000	43,2	0,121	43,2	0,046
I	0,0190	0,008	0,0190	0,001	62,8	0,042	62,8	0,008
T	-0,0189	0,008	-0,0189	0,001	86,9	0,013	86,9	0,001
T_{PP1}²	0,0171	0,046	0,0173	0,011	63,0	0,124	61,6	0,051
I²	-0,0007	0,921	*	*	26,5	0,472	*	*
T²	-0,0031	0,652	*	*	-7,8	0,828	*	*
T_{PP1}*T	0,0222	0,016	0,0222	0,002	-19,5	0,577	*	*
T_{PP1}*I	-0,0231	0,014	-0,0231	0,002	-13,9	0,689	*	*
T*I	-0,0009	0,893	*	*	23,0	0,514	*	*
F_{VALUE}	10,19(4,77)		23,21(3,58)		3,32(4,77)		10,48(3,48)	
P_{VALUE}	0,010		0,000		0,100		0,001	
R²(%)	94,83		94,57		85,66		80,74	
R²adj(%)	85,53		90,49		59,86		73,04	
S	0,0125		0,0101		65,5503		53,7190	
LOF	0,059		0,110		0,061		0,117	

Os valores entre parênteses em **negrito** são os tabelados de $F_{95\%}(9,5)=4,77$; $F_{95\%}(6,8)=3,58$; $F_{95\%}(4,10)=3,48$

As Eq. (4.4) e (4.5) representam os modelos para indentação e para força cisalhante, para o arranjo B:

$$Ind_{SEN}B = 0,1229 + 0,0201T_{PPI} + 0,0190I - 0,0189T + 0,0173T_{PPI}^2 + 0,0222T_{PPI}T - 0,0231T_{PPI}I \quad (4.4)$$

$$F_B = 4256,8 + 43,2T_{PPI} + 62,8I + 86,9T + 61,6T_{PPI}^2 \quad (4.5)$$

Foi analisado o arranjo customizado A + B, esta análise possui resultado equivalente ao uso da pressão como variável categórica, tendo obtido um baixo ajuste, R^2_{adj} , e pelo valor do *Lack-of-fit*, ambos inferiores a 0,05, pode-se ver que o arranjo customizado não foi adequado, vide Tabela 4.10. Este fato do arranjo customizado A+B apresentar um baixo ajuste vai ser estudado a seguir no tópico 4.2.3 na análise comparativa dos arranjos A e B.

Tabela 4.10 – Modelos quadráticos e análise de variância para o arranjo customizado A+B

Termo	IndSEN				F			
	Modelo Completo		Modelo Reduzido		Modelo Completo		Modelo Reduzido	
	Coef	P _{VALUE}						
Cte	0,1156	0,000	0,1090	0,000	4279,4	0,000	4303,6	0,000
P	-0,0062	0,407	-0,0062	0,357	-13,9	0,193	-13,9	0,175
T _{PPI}	0,0278	0,013	0,0278	0,006	28,1	0,062	28,1	0,050
T	0,0075	0,464	0,0075	0,416	66,6	0,000	66,6	0,000
I	0,0202	0,060	0,0202	0,036	40,8	0,010	40,8	0,006
T _{PPI} ²	-0,0107	0,476	*	*	21,2	0,319	*	*
T ²	0,0246	0,113	0,0255	0,068	11,1	0,599	*	*
I ²	0,0247	0,112	0,0255	0,067	13,0	0,537	*	*
P*T _{PPI}	-0,0077	0,454	*	*	15,1	0,297	*	*
P*T	-0,0263	0,018	-0,0263	0,008	20,3	0,167	20,3	0,150
P*I	-0,0012	0,909	*	*	21,9	0,137	21,9	0,121
T _{PPI} *T	0,0037	0,796	*	*	-23,9	0,246	*	*
T _{PPI} *I	-0,0098	0,496	*	*	-24,5	0,233	*	*
T*I	-0,0081	0,573	*	*	-0,8	0,968	*	*
F _{VALUE}	2,14(2,40)		4,49(2,46)		3,63(2,40)		7,33(2,53)	
P _{VALUE}	0,076		0,003		0,008		0,000	
R ² (%)	63,44		58,83		74,68		65,67	
R ² _{adj} (%)	33,74		45,73		54,11		56,72	
LOF	0,04		0,006		0,014		0,017	

Os valores entre parênteses em **negrito** são os tabelados de $F_{95\%}(13,16)=2,40$; $F_{95\%}(7,22)=2,46$; $F_{95\%}(6,23)=2,53$

4.2.2 Análise dos resíduos

A análise de resíduos feita para as respostas de força de cisalhamento e indentação pelo sensor de deslocamento através do software MINITAB 17 está apresentada na Tabela 4.11. Pode ser visto que a distribuição dos resíduos foi segundo uma Normal para as duas respostas e para os dois arranjos, e logo para o arranjo customizado A+B, isto pode-se observar pelo coeficiente de Anderson-Darling (AD) < 1 e P_{VALUE} maior que 0,05. A aleatoriedade dos resíduos foi verificada utilizando os quatro indicadores do *Run Chart* no software Minitab 17,

visto que o valor do P_{VALUE} para os indicadores deve ser maior que 0,05 para que os resíduos sejam aleatórios, os resíduos para a resposta de força cisalhante para o arranjo A mostraram um problema de agrupamento, visto pelo valor do índice inferior à 0,05, os resíduos para força cisalhante para o arranjo B mostraram um problema de mistura, visto pelo índice inferior à 0,05, para o arranjo customizado não houve problemas para aleatoriedade. Os testes de independência mostraram que os resíduos para ambas as respostas não são correlacionados, isto devido ao valor de P_{VALUE} maior que o nível de significância de 5% e o coeficiente de *Pearson* próximo a zero, válido para os arranjos A, B e o customizado A+B.

Tabela 4.11– Análise de resíduos para as respostas de força cisalhante e indentação

Análise de resíduos		Arranjo A		Arranjo B		Arranjo A+B	
		Ind _{SEN}	F	Ind _{SEN}	F	Ind _{SEN}	F
Teste de	AD	0,191	0,576	0,118	0,379	0,261	0,247
Normalidade	P_{VALUE}	0,879	0,113	0,986	0,358	0,685	0,732
Teste de Aleatoriedade Run Chart	Agrupamento	0,401	0,031	0,914	0,917	0,005	0,229
	Mistura	0,599	0,969	0,086	0,029	0,995	0,771
	Tendência	0,332	0,138	0,586	0,808	0,117	0,383
	Oscilação	0,668	0,862	0,414	0,192	0,883	0,617
Teste de	Pearson	0,048	-0,014	0,029	-0,020	-0,011	0,014
Correlação	P_{VALUE}	0,864	0,960	0,918	0,943	0,954	0,942

4.2.3 Análise comparativa dos arranjos A e B

Após obtidos os resultados para os arranjos, buscando comparar as respostas de indentação pelo sensor de deslocamento e de força de cisalhamento, isto nos níveis de pressão de 2,0 bar e 2,5 bar, foi realizado uma análise comparativa para ambas as respostas. De modo a buscar verificar se a pequena variação de pressão de 2,0 bar para 2,5 bar afetou de modo significativo as respostas, e assim escolher dentre os modelos obtidos o mais adequado para as medidas de indentação e de força de cisalhamento.

4.2.3.1 Comparação entre as médias das respostas obtidas através dos arranjos A e B

Para comparar os resultados, primeiramente, definindo as variáveis aleatórias DF e DI , Eq. (4.6) e (4.7), para as diferenças entre as medidas de força cisalhante e de indentação, respectivamente, nos níveis de 2,0 bar e 2,5 bar. Assumindo as amostras dependentes, visto que foram mantidos os mesmos níveis dos outros parâmetros e somente alterado a pressão.

Utilizando uma comparação de médias através de um teste de Hipóteses do tipo t-pareado (MONTGOMERY e RUNGER,2003), (MAGALHÃES e LIMA, 2002). A Tabela 4.12 apresenta os valores das diferenças DF e DI .

$$DF = F_A - F_B \quad (4.6)$$

Onde: DF – Variável aleatória definida através da diferença entre as medidas de força de cisalhamento dos arranjos A e B

F_A – Força de cisalhamento para o arranjo A

F_B – Força de cisalhamento para o arranjo B

$$DI = I_A - I_B \quad (4.7)$$

Onde: DI – Variável aleatória definida através da diferença entre as medidas de indentação dos arranjos A e B

I_A – Indentação para o arranjo A

I_B – Indentação para o arranjo B

Tabela 4.12 – Valores das variáveis aleatórias DF e DI para as amostras pareadas

Amostras pareadas	DF(N)	DI(mm)
1;16	149	0,00
2;17	59	0,06
3;18	191	0,15
4;19	-89	0,16
5;20	-35	0,00
6;21	17	-0,08
7;22	-63	-0,01
8;23	-96	0,02
9;24	92	-0,10
10;25	0	0,06
11;26	59	-0,01
12;27	-68	0,00
13;28	59	-0,02
14;29	76	-0,01
15;30	64	-0,01
Média amostral \bar{D}	27,8	0,012
Variância amostral S^2	7356,77	0,0051

Tomando as hipóteses, para força de cisalhamento, tem-se:

- $H_0 : \mu_{DF}=0$ (a variação da pressão, de 2,0 bar para 2,5, não produziu efeito significativo no valor da força de cisalhamento)
- $H_1: \mu_{DF}\neq 0$ (a variação da pressão, de 2,0 bar para 2,5, produziu efeito significativo no valor da força de cisalhamento)

Utilizando como estimador para μ_{DF} a média amostral \overline{DF} , e para σ^2_{DF} a variância amostral S^2_{DF} , tendo 14 graus de liberdade. Utilizando a transformação dada pela **Eq. (4.8)**:

$$T_F = \frac{\overline{DF} - \mu_{DF}}{S_{DF}/\sqrt{n}} \quad (4.8)$$

Onde: T_F – Variável aleatória padronizada para a diferença entre as medidas de força dos arranjos A e B

\overline{DF} – média amostral para a variável aleatória DF

μ_{DF} – média populacioanal para a variável aleatória DF

S_{DF} – desvio padrão para a variável aleatória DF

n – tamanho da amostra

Considerando um nível de significância $\alpha=0,05$, obtem-se os dados que estão na Tabela 4.13 que mostram que a variação da pressão não influenciou na média da resposta de força de cisalhamento, visto pelo valor de $t_{Fobs} < t_{crítico}$. Deve-se assim aceitar a hipótese nula.

Tabela 4.13 – Teste-t pareado para comparação de médias para força de cisalhamento

Pressão	2,0 bar	2,5 bar
Média(N)	4317,5	4290,0
Variância	3058,35	10704,75
Observações	15	15
Correlação de Pearson	0,5598	
Hipótese da diferença de média	0	
Graus de liberdade	14	
t_{Fobs}	1,256	
PVALUE	0,230	
t_F crítico bi-caudal	2,145	

Tomando as hipóteses, para a Indentação medida pelo sensor de deslocamento, tem-se:

- $H_0 : \mu_{DI}=0$ (a variação da pressão, de 2,0 bar para 2,5, não produziu efeito significativo no valor da indentação)
- $H_1: \mu_{DI}\neq 0$ (a variação da pressão, de 2,0 bar para 2,5, produziu efeito significativo no valor da indentação)

Utilizando como estimador para μ_{DI} a média amostral \overline{DI} , e para σ^2_{DI} a variância amostral S^2_{DI} , tendo 14 graus de liberdade. Utilizando a transformação dada pela equação (4.9):

$$T_I = \frac{\overline{DI} - \mu_{DI}}{S_{DI}/\sqrt{n}} \quad (4.9)$$

Onde: T_I – Variável aleatória padronizada para a diferença entre as medidas de indentação dos arranjos A e B

\overline{DI} – média amostral para a variável aleatória DI

μ_{DI} – média populacional para a variável aleatória DI

S_{DI} – desvio padrão para a variável aleatória DI

n – tamanho da amostra

Considerando um nível de significância de 0,05, obtemos os dados que estão na Tabela 4.14 que mostram que a variação da pressão não influenciou na média da resposta de indentação, visto pelo valor de $t_{obs} < t_I$ crítico. Assim como para a resposta de força de cisalhamento deve-se aceitar H_0 .

Tabela 4.14 – Teste-t pareado para comparação de médias para a indentação

Pressão	2,0bar	2,5bar
Média(mm)	0,142	0,130
Variância	0,0038	0,0011
Observações	15	15
Correlação de Pearson	-0,0407	
Hipótese da diferença de média	0	
Graus de liberdade	14	
t_{obs}	0,676	
P_{VALUE}	0,510	
t_I crítico bi-caudal	2,145	

Deste modo, após as análises das médias, ao nível de 5% de significância, conclui-se que as médias das respostas de indentação e de força de cisalhamento, foram iguais para ambas

os arranjos. Para concluir a análise das respostas para os diferentes arranjos, a próxima etapa foi a comparação das variâncias.

4.2.3.2 Comparação entre as variâncias das respostas obtidas através dos arranjos A e B

Para comparar as variâncias das respostas de força de cisalhamento e indentação, inicialmente, foram construídos dois *box-plot's*, que estão representados nas Figuras 4.5 e 4.6. Através dos *box-plot's* de força de cisalhamento e de indentação observa-se que aparentemente as amostras apresentam variabilidade distintas para ambas as respostas, para confirmar isto construiu-se um teste de hipóteses para comparação das variâncias.

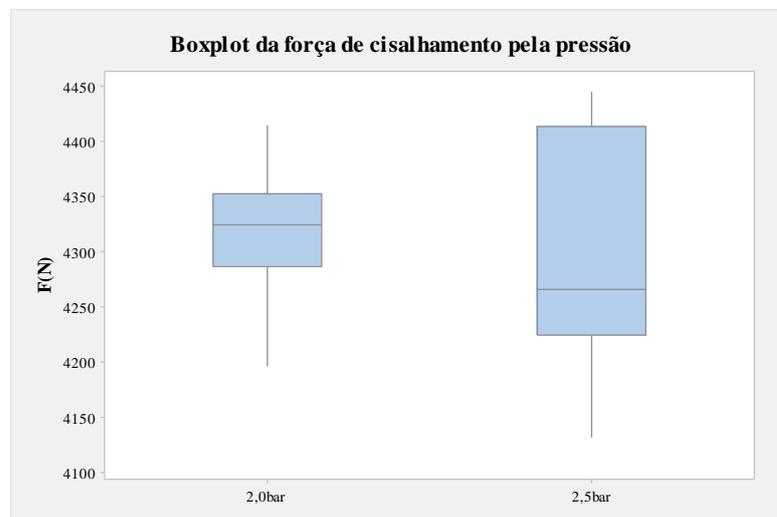


Figura 4.5 – *Box-Plot* da Força de Cisalhamento pela Pressão

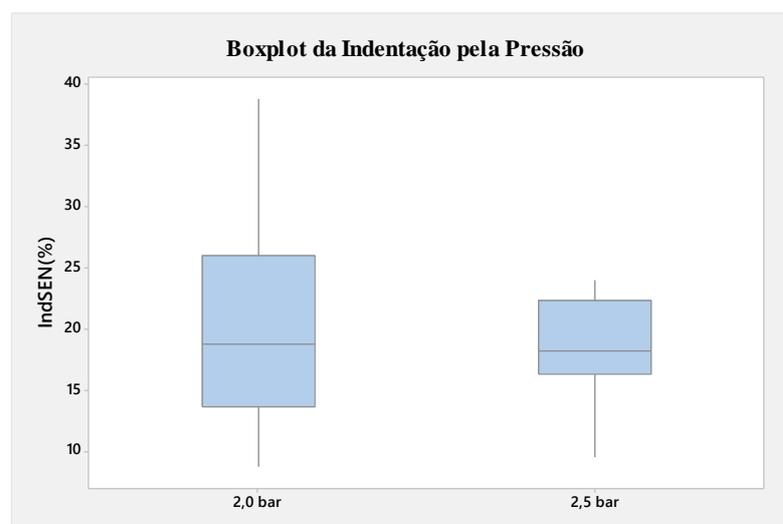


Figura 4.6 – *Box-Plot* da Indentação pelo Sensor de Deslocamento pela Pressão

Tomando primeiramente o teste de hipóteses para a variância da força de cisalhamento, definindo as variáveis aleatórias F_2 e F_{25} para as respostas de força de cisalhamento para as pressões de 2,0 e 2,5 bar, respectivamente. Sejam também as respectivas variâncias $\sigma_{F_2}^2$ e $\sigma_{F_{25}}^2$. As hipóteses tomadas foram:

$H_0: \sigma_{F_2}^2 = \sigma_{F_{25}}^2$ (a variação da pressão, de 2,0 bar para 2,5, não produziu efeito significativo no valor da variância da força de cisalhamento)

$H_1: \sigma_{F_2}^2 \neq \sigma_{F_{25}}^2$ (a variação da pressão, de 2,0 bar para 2,5, produziu efeito significativo no valor da variância da força de cisalhamento)

Utilizando como estimador para a variância $\sigma_{F_2}^2$ a variância amostral $S_{F_2}^2$, e para a variância $\sigma_{F_{25}}^2$ a variância amostral $S_{F_{25}}^2$, tendo 14 graus de liberdade. Utilizando a transformação da pela equação (4.10):

$$F_F = \frac{S_{F_2}^2}{S_{F_{25}}^2} \quad (4.10)$$

Onde: F_F – transformação para a variância da medida de força

$S_{F_2}^2$ – Variância amostral para a resposta de força cisalhante para o arranjo A– $P=2,0$ bar

$S_{F_{25}}^2$ – Variância amostral para a resposta de força cisalhante para o arranjo B– $P=2,5$ bar

Utilizando o teste de Fisher-Snedecor, através do software EXCEL 2016, obteve-se a Tabela 4.15, considerando $\alpha=0,05$, e deste modo, sendo a hipótese alternativa a diferença entre as variâncias, pode-se ver que o valor de f_{Fobs} está na região de rejeição e, logo, deve-se descartar a hipótese nula, significando que as variâncias das medidas de força de cisalhamento são diferentes.

Tabela 4.15 – Teste de Fisher-Snedecor para Comparação das Variâncias da Força de Cisalhamento

Pressão	2,0 bar	2,5 bar
Média(N)	4317,5	4289,6
Variância	3058,35	10704,75
Observações	15	15
Graus de liberdade	14	14
f_{Fobs}	0,286	
PVALUE	0,013	
RC= $\{f_F \in \mathbb{R}^+ / f_F < 0,336 \text{ ou } f_F > 2,979\}$		

Do mesmo modo que foi realizado para a força de cisalhamento, inicialmente, o teste de hipóteses para a variância da indentação, definindo as variáveis aleatórias I_2 e I_{25} para as respostas de indentação para as pressões de 2,0 e 2,5 bar, respectivamente. Sejam também as respectivas variâncias $\sigma_{I_2}^2$ e $\sigma_{I_{25}}^2$. As hipóteses tomadas foram:

$H_0 : \sigma_{I_2}^2 = \sigma_{I_{25}}^2$ (a variação da pressão, de 2,0 bar para 2,5, não produziu efeito significativo no valor da variância da indentação)

$H_1 : \sigma_{I_2}^2 \neq \sigma_{I_{25}}^2$ (a variação da pressão, de 2,0 bar para 2,5, produziu efeito significativo no valor da variância da indentação)

Utilizando como estimador para $\sigma_{I_2}^2$ a variância amostral $S_{I_2}^2$, e para $\sigma_{I_{25}}^2$ a variância amostral $S_{I_{25}}^2$, tendo 14 graus de liberdade. Utilizando a transformação dada pela equação (4.11):

$$F_I = \frac{S_{I_2}^2}{S_{I_{25}}^2} \quad (4.11)$$

Onde: F_I – transformação para a variância da medida de indentação

$S_{I_2}^2$ – Variância amostral para a resposta de indentação para o arranjo A – $P=2,0$ bar

$S_{I_{25}}^2$ – Variância amostral para a resposta de indentação para o arranjo B – $P=2,5$ bar

Como procedido para a força de cisalhamento, utilizando o teste de Fisher-Snedecor, através do software EXCEL 2016 obteve-se a Tabela 4.16, considerando $\alpha=0,05$, e deste modo sendo a hipótese alternativa a diferença entre as variâncias, pode-se ver que o valor de $f_{I_{obs}}$ está na região de rejeição e, logo, deve-se descartar a hipótese nula, significando que as variâncias das medidas de indentação realizadas através do sensor de deslocamento são diferentes.

Tabela 4.16 – Teste de Fisher-Snedecor para Comparação das Variâncias da Indentação

Pressão	2,0 bar	2,5 bar
Média(mm)	0,142	0,130
Variância	0,0038	0,0010
Observações	15	15
Graus de liberdade	14	14
$f_{I_{obs}}$	3,568	
PVALUE	0,012	
RC={ $f_I \in \mathbb{R}^+ / f_I < 0,336$ ou $f_I > 2,979$ }		

Através das análises das médias e das variâncias, isto para a força cisalhante e para a indentação, pode-se concluir que os dois arranjos, variando-se as pressões, apresentaram a mesma média, porém variâncias distintas, isto refletiu no arranjo customizado A+B e no ajuste do modelo gerado para este, desta forma, o próximo passo foi escolher qual dentre os dois modelos é mais adequado para as respostas de força de cisalhamento e de indentação, considerando todas as amostras.

Para a escolha do modelo a ser utilizado para as respostas de força de cisalhamento e de indentação, partiu-se da comparação entre os valores esperados (previstos através dos modelos) (E_i) e observados (O_i) para as respectivas respostas, isto para os diferentes modelos.

Primeiramente, definindo a variável aleatória OE_i , sendo esta dada pela equação (4.12):

$$OE_i = \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (4.12)$$

Sendo:

OE_i – Variável aleatória

$i=F$ – para a força de cisalhamento

$i=I$ – para a indentação

onde OE_F para a força de cisalhamento e OE_I para a indentação.

O_i – Valor observado para a resposta i , OF para a força de cisalhamento e OI para a indentação.

E_i – Valor esperado pelo modelo para os níveis dos parâmetros de entrada para a resposta i , EF para a força de cisalhamento e EI para a indentação.

Por exemplo, o valor observado para a força de cisalhamento para a amostra de número 15 é $of = 4329\text{N}$, o valor esperado pelo modelo A é $ef = 4312\text{N}$ e o valor da variável aleatória correspondente será $oef = 0,07\text{N}$. As Tabelas 4.17 e 4.18 apresentam os valores de OE_F e OE_I para os arranjos A e B, ou seja, para as pressões 2,0 e 2,5 bar. Para a escolha do modelo para as respostas de força de cisalhamento e de indentação foram utilizadas as variâncias calculadas para as variáveis aleatórias OE_F e OE_I , de modo que o modelo que apresentou menor somatório e menor variância, ou seja, melhor ajuste, foi escolhido, e assim temos que os modelos escolhidos foram os F_B e I_A , para força de cisalhamento e indentação, respectivamente. Considerando as análises anteriores, pode-se ver que a variação de pressão nesta magnitude não é suficiente para alterar significativamente os níveis das respostas trabalhadas, podendo ser

explicado por erro de ajuste fino do equipamento para a pressão e também por possíveis falhas no circuito pneumático.

Tabela 4.17 – Valores observados, valores calculados e variação entre valores observados e esperados para força de cisalhamento

Amostra	OF(N)	2 bar		2,5 bar	
		EF(N)	OE _F (N)	EF(N)	OE _F (N)
1	4280	4253	0,18	4107	7,28
2	4342	4340	0,00	4233	2,80
3	4392	4395	0,00	4281	2,89
4	4355	4383	0,18	4407	0,60
5	4196	4197	0,00	4212	0,07
6	4329	4361	0,23	4338	0,02
7	4324	4349	0,15	4299	0,15
8	4317	4260	0,76	4424	2,59
9	4236	4263	0,17	4188	0,54
10	4415	4355	0,81	4362	0,63
11	4286	4289	0,00	4275	0,03
12	4352	4381	0,19	4449	2,09
13	4309	4312	0,00	4257	0,63
14	4300	4312	0,04	4257	0,44
15	4329	4312	0,07	4257	1,24
16	4131	4253	3,45	4107	0,14
17	4283	4340	0,75	4233	0,59
18	4201	4395	8,53	4281	1,49
19	4444	4383	0,86	4407	0,32
20	4230	4197	0,27	4212	0,08
21	4312	4361	0,55	4338	0,15
22	4387	4349	0,32	4299	1,80
23	4413	4260	5,46	4424	0,03
24	4144	4263	3,32	4188	0,48
25	4415	4355	0,81	4362	0,63
26	4227	4289	0,89	4275	0,53
27	4420	4381	0,34	4449	0,18
28	4250	4312	0,92	4257	0,01
29	4224	4312	1,83	4257	0,26
30	4265	4312	0,52	4257	0,02
Somatório(N)			31,59		28,72
Variância			3,4966		2,1717
Desvio Padrão			1,8699		1,4737

OF-Valor observado para força, EF-Valor esperado para força e OE_F-Variável Aleatória para força.

Tabela 4.18 – Valores observados, valores calculados e variação entre valores observados e esperados para indentação medida pelo sensor de deslocamento

Amostra	OI(mm)	2,0 bar		2,5 bar	
		EI(mm)	OE _I (mm)	EI(mm)	OE _I (mm)
1	0,12	0,16	0,009	0,12	0,000
2	0,21	0,20	0,000	0,16	0,015
3	0,24	0,22	0,002	0,08	0,317
4	0,27	0,27	0,000	0,12	0,188
5	0,06	0,06	0,000	0,10	0,012
6	0,09	0,11	0,004	0,14	0,020
7	0,15	0,13	0,001	0,14	0,000
8	0,18	0,18	0,000	0,18	0,000
9	0,06	0,05	0,001	0,14	0,041
10	0,13	0,12	0,001	0,10	0,010
11	0,14	0,12	0,003	0,18	0,007
12	0,15	0,19	0,008	0,14	0,001
13	0,10	0,11	0,002	0,12	0,005
14	0,11	0,11	0,000	0,12	0,001
15	0,12	0,11	0,001	0,12	0,000
16	0,12	0,16	0,007	0,12	0,000
17	0,15	0,20	0,014	0,16	0,001
18	0,10	0,22	0,074	0,08	0,002
19	0,11	0,27	0,086	0,12	0,000
20	0,07	0,06	0,000	0,10	0,010
21	0,17	0,11	0,037	0,14	0,007
22	0,16	0,13	0,004	0,14	0,002
23	0,17	0,18	0,001	0,18	0,001
24	0,16	0,05	0,232	0,14	0,005
25	0,07	0,12	0,019	0,10	0,007
26	0,16	0,12	0,009	0,18	0,002
27	0,15	0,19	0,007	0,14	0,002
28	0,12	0,11	0,001	0,12	0,000
29	0,12	0,11	0,002	0,12	0,000
30	0,13	0,11	0,003	0,12	0,000
Somatório(mm)		0,528		0,658	
Variância		0,0021		0,0043	
Desvio Padrão		0,0454		0,0655	

OI-Valor observado para indentação, EI-Valor esperado para indentação e OE_I-Variável Aleatória para indentação.

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam a representação gráfica das respostas de força de cisalhamento e de indentação, respectivamente. Estas estão em função das amostras, os valores observados são os que foram realizados, os previsto são as projeções calculadas a partir dos diferentes modelos.

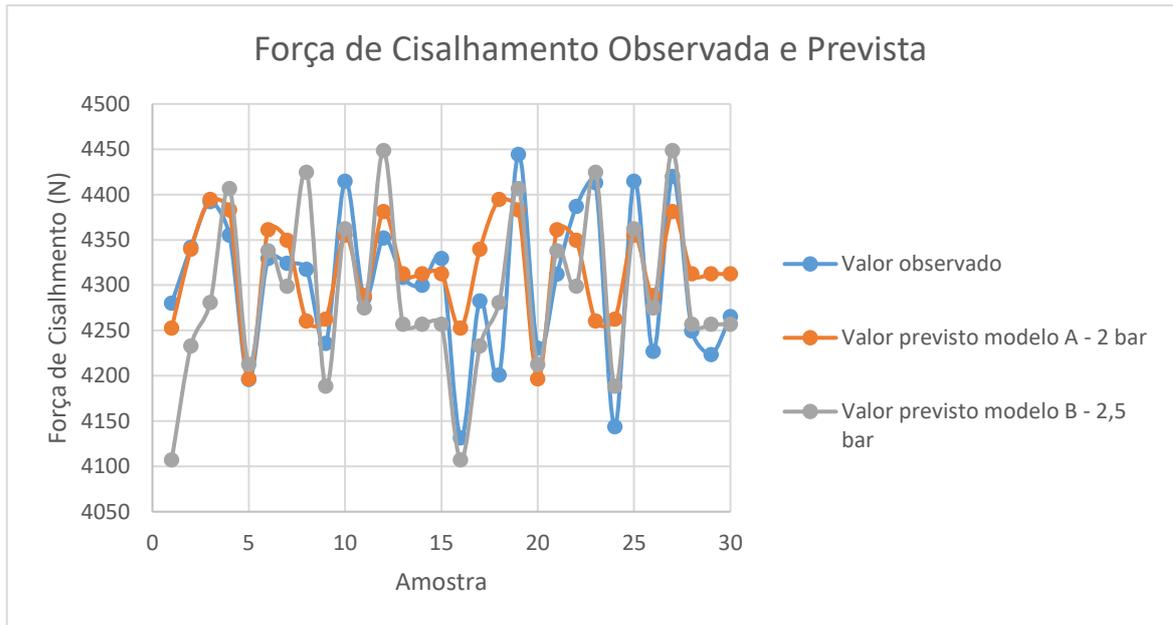


Figura 4.7 – Gráfico de força de cisalhamento para os modelos A, B e valores observados

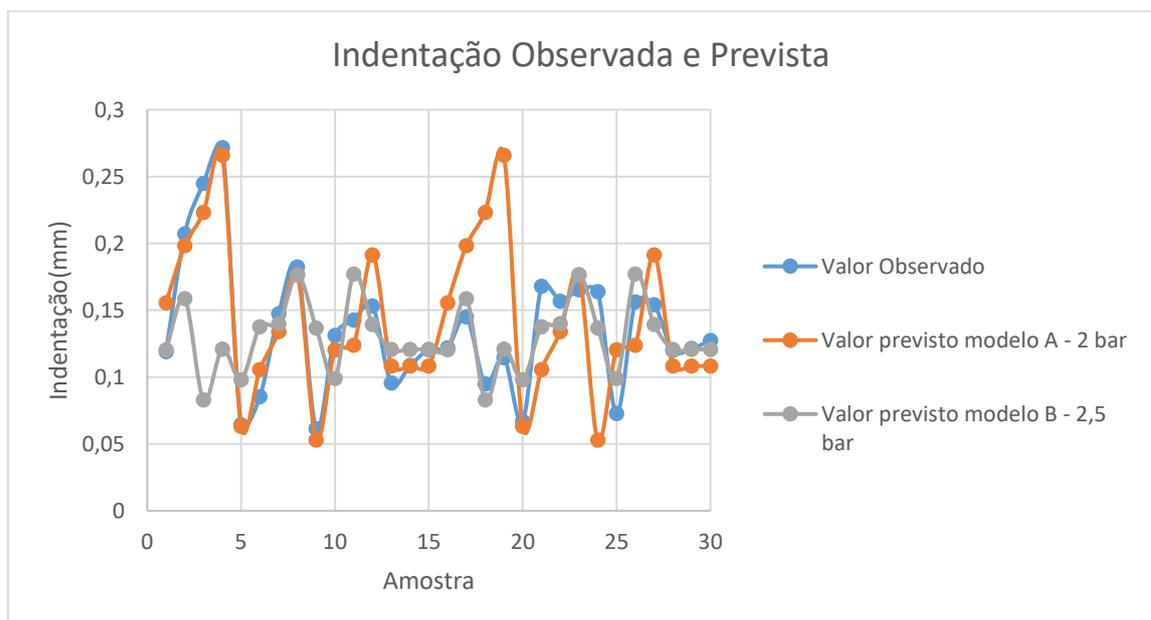


Figura 4.8 – Gráfico de indentação medida através do sensor de deslocamento para os modelos A, B e valores observados

4.2.4 Análise dos efeitos principais dos parâmetros

De posse dos modelos finais torna-se possível analisar a maneira como as respostas do processo se comportam em relação às alterações realizadas nos parâmetros de entrada. Através da variação do parâmetro de interesse, mantidos os demais fixos, suas influências sobre as

respostas de interesse passam a ser conhecidas. Desta forma, informações importantes sobre o processo em análise tornam-se claras.

As influências dos parâmetros da soldagem a ponto por resistência elétrica sobre a força de cisalhamento e sobre a indentação para as chapas de aço galvanizados por eletrodeposição com espessura de 0,70 mm são obtidas através das análises dos modelos desenvolvidos, são discutidas nesta e na próxima seção.

4.2.4.1 Efeitos principais sobre a força de cisalhamento

A Figura 4.9 apresenta os efeitos principais sobre a força de cisalhamento, mostrando como os parâmetros influenciam nesta resposta. A força de cisalhamento é influenciada pelos três parâmetros, sendo que quanto maior os três parâmetros maior será a intensidade da força de cisalhamento, o tempo de pré pressão 1 produz maiores efeitos nos níveis extremos e menor efeito em torno de 23 ciclos. O tempo de soldagem e o tempo de pré pressão 1 são os parâmetros que mais influenciaram na resposta, aqui fica confirmado que houve a influência do parâmetro tempo de pré pressão 1, visto que o valor da pressão é constante, deste modo pode-se inferir que não ocorreu confundimento no delineamento experimental de Taguchi entre estas duas variáveis como foi suposto anteriormente.

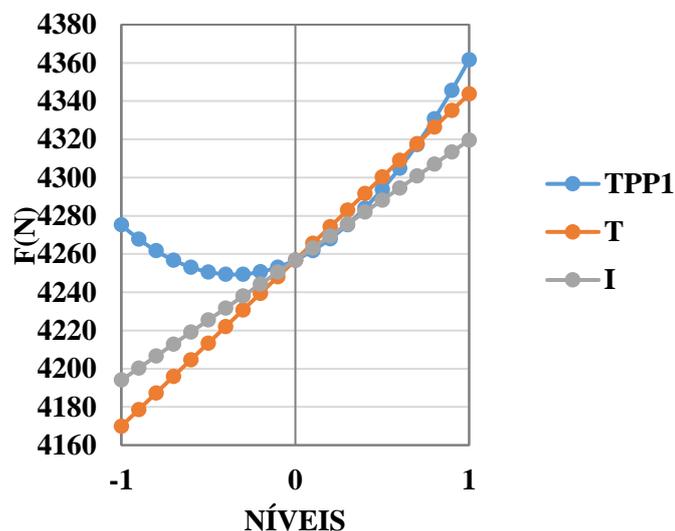


Figura 4.9 – Efeitos principais sobre a força de cisalhamento

4.2.4.2 Efeitos principais sobre a indentação

A Figura 4.10 apresenta os efeitos principais sobre a indentação. A indentação é influenciada pelos três parâmetros, o perfil da curva do tempo e da corrente são parecidos, com

concavidade para cima, e desta forma existe um mínimo que ocorre a menor indentação, já o tempo de pré pressão 1 possui a concavidade para baixo atingindo sua influência máxima em torno de 30 ciclos. Tendo em vista que esta resposta é do tipo menor é melhor, é possível inferir que os níveis indicados para a corrente e para o tempo estão nos vértices, ou seja aproximadamente a corrente de 4,92kA e o tempo de 15 ciclos. Já para o tempo de pré pressão 1 o valor de 15 ciclos. Novamente o tempo de pré pressão 1 mostra um efeito significativo.

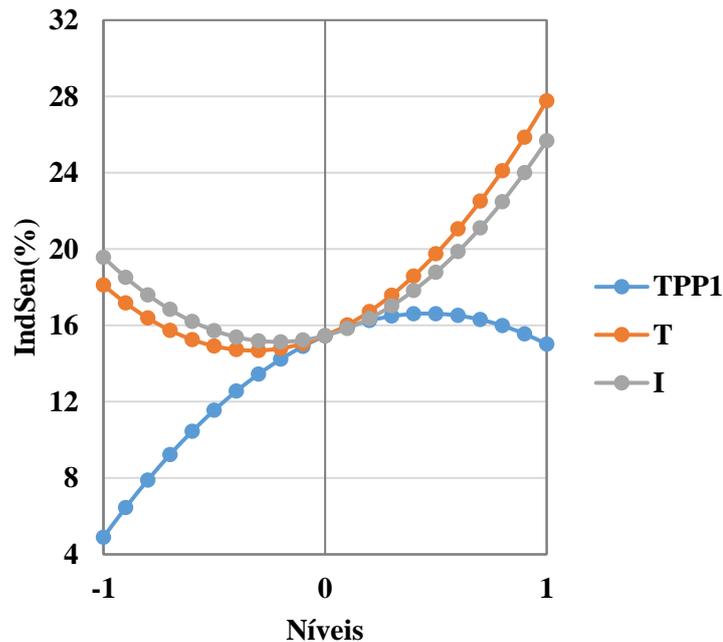


Figura 4.10 – Efeitos principais sobre a indentação

4.2.5 Análise dos efeitos das interações entre os parâmetros

Os parâmetros utilizados na superfície de resposta mostraram que interagem de modo efetivo nas respostas de indentação e de força de cisalhamento. Isto significa que o efeito conjunto desses parâmetros influencia de forma significativa os resultados do processo. Sendo assim, a análise sobre tais interações foi realizada através das superfícies de resposta.

4.2.5.1 Efeitos das interações dos parâmetros sobre a força de cisalhamento

As Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 mostram os efeitos das interações dos parâmetros sobre a força de cisalhamento, onde foram analisados dois a dois as interações mantendo-se um dos parâmetros em um nível fixo, isto no valor indicado no canto superior direito das mesmas.

A Figura 4.11 mostra a interação entre o tempo de calor, em ciclos, e a corrente sobre a força de cisalhamento, onde foi mantido o tempo de pré pressão 1 constante no valor de 25

ciclos. Pode-se perceber um comportamento planar e crescente conforme aumenta-se a corrente e o tempo de calor, como esperado pelo Efeito Joule, aumenta o valor da força de cisalhamento pois é fornecido mais calor à solda, isto pode ser explicado considerando que ocorre uma fusão mais homogênea. A Figura 4.9 havia mostrado que os dois parâmetros eram significativos sobre esta resposta, observa-se aqui que a interação destes também é significativa, e os aumento de ambas as variáveis aumenta de forma significativa a força máxima de cisalhamento. As Figuras 4.12 e 4.13 mostram que existe um efeito significativo da interação entre o tempo de pré pressão 1 com a corrente sobre a força de cisalhamento, e o tempo de pré pressão 1 com o tempo de calor(T). Pode-se perceber um comportamento cilíndrico com projeção parabólica no plano YZ, com concavidade para cima e crescente conforme aumenta-se a corrente (Figura 4.12) e o tempo (Figura 4.13), porém diferente do comportamento visto na Figura 4.11, neste caso existe uma linha de mínimo da respectiva resposta na superfície em torno do valor do tempo de pré pressão 1 igual à 21. Aqui mais uma vez é evidenciado a influência do parâmetro tempo de pré pressão 1.

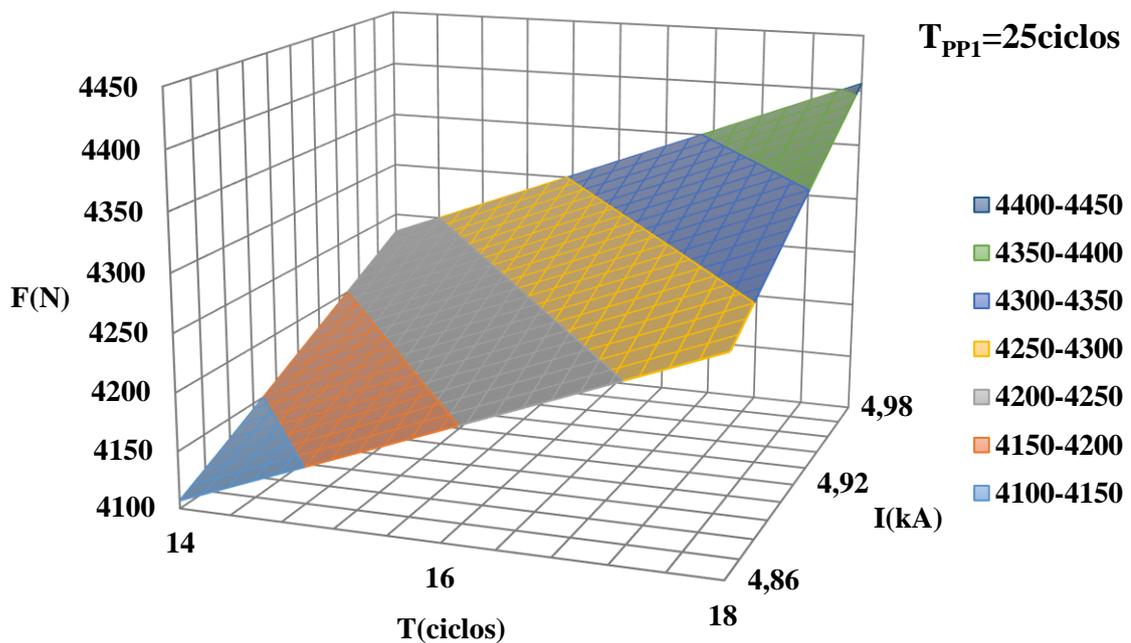


Figura 4.11 – Efeito da interação entre o tempo de calor e a corrente sobre a força de cisalhamento

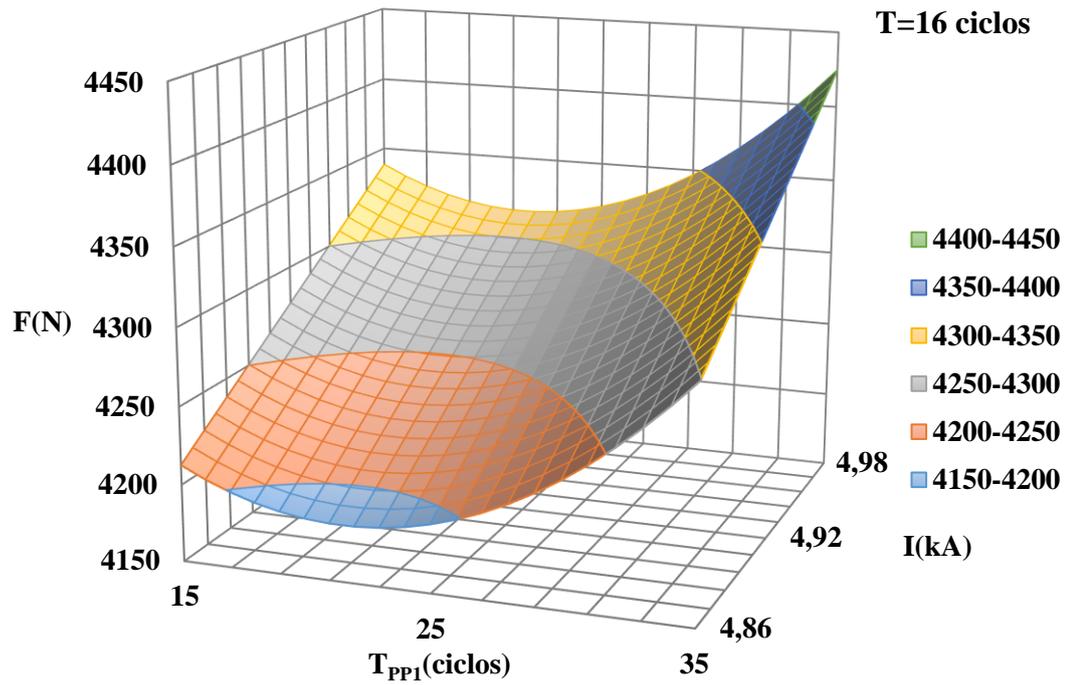


Figura 4.12 – Efeito da interação entre o tempo de pré pressão 1 e a corrente sobre a força de cisalhamento

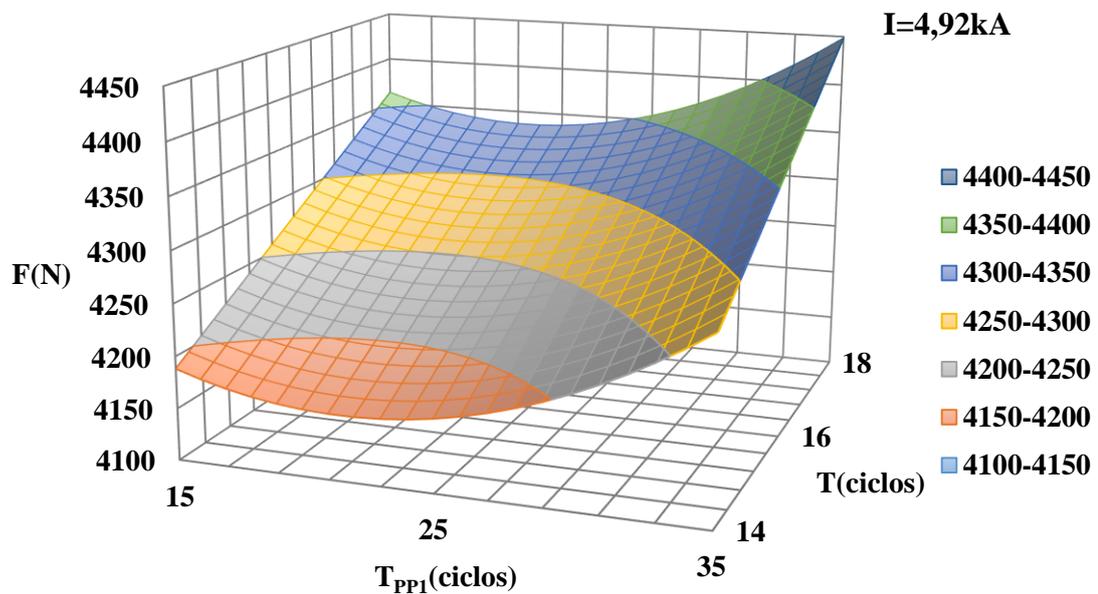


Figura 4.13 – Efeito da interação entre o tempo de pré pressão 1 e o tempo de calor sobre a força de cisalhamento

4.2.5.2 Efeitos das interações dos parâmetros sobre a indentação

As Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 mostram os efeitos das interações dos parâmetros sobre a indentação, em que foram analisados dois a dois as interações mantendo-se um dos parâmetros em um nível fixo, tal como feito no item 4.2.5.1.

A Figura 4.14 mostra a interação entre o tempo de calor e a corrente sobre porcentagem de indentação, relativa à espessura total da chapa, 0,70 mm, isto num nível de tempo de pré pressão 1 de 25 ciclos. Pode-se perceber uma superfície com concavidade para cima, a região em amarelo é onde ocorre a menor indentação.

As Figuras 4.15 e 4.16 exibem um mesmo perfil, no formato de sela, estas ainda mostram que existe interação entre as variáveis na resposta de indentação. Na Figura 4.15 é visível a interação entre o tempo de pré pressão 1 e o tempo de calor sobre a indentação, percebe-se um crescimento da indentação conforme o tempo de pré pressão 1 tende para 25 ciclos, isto tanto pela direita, por valores maiores, quanto pela esquerda, por valores menores, assim como para a resposta de força de cisalhamento o tempo de pré pressão 1 mostra um efeito significativo também sobre a indentação. A Figura 4.16, assim como na Figura 4.15, mostra a interação entre o tempo de pré pressão 1 e a corrente sobre a indentação, percebe-se um perfil parecido ao da superfície da Figura 4.15.

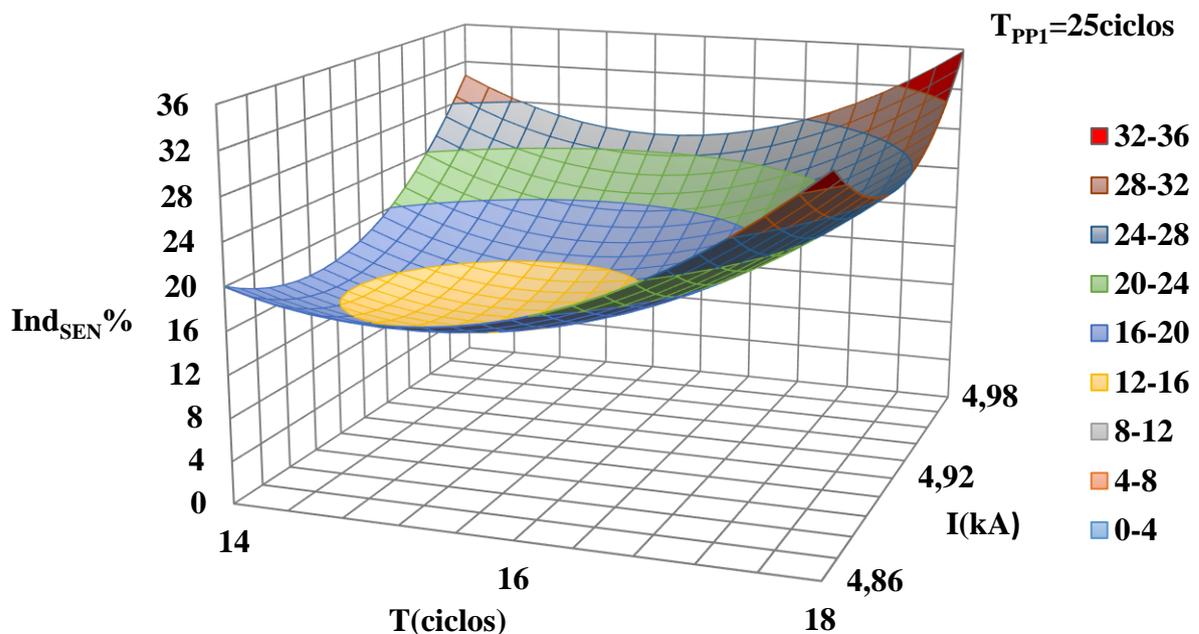


Figura 4.14 – Efeito da interação entre a corrente e o tempo de calor sobre a indentação

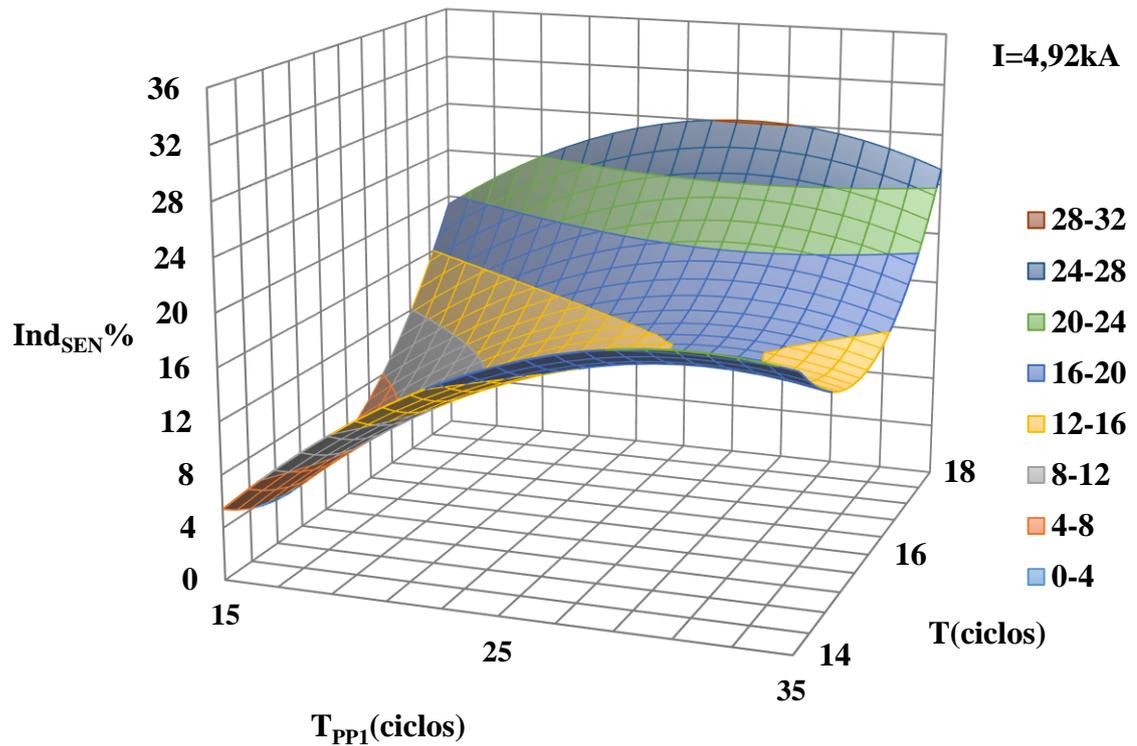


Figura 4.15 – Efeito da interação entre o tempo de pré pressão 1 e o tempo de calor sobre a indentação

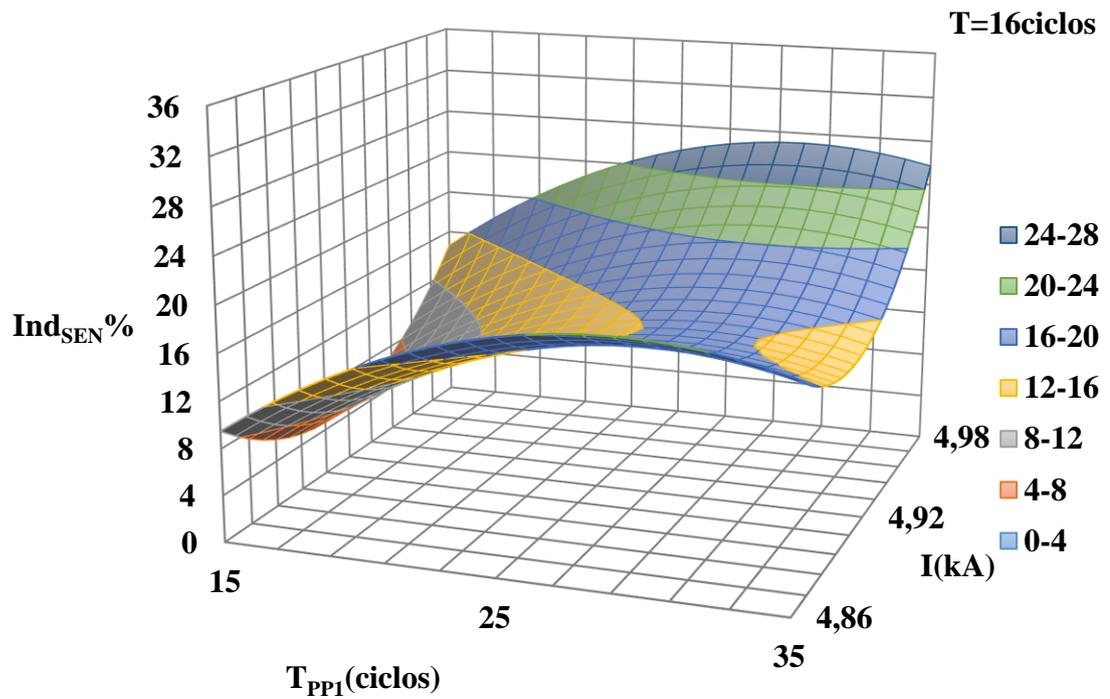


Figura 4.16 – Efeito da interação entre o tempo de pré pressão 1 e a corrente sobre a indentação

4.2.6 Otimização das respostas

Após escolhido os modelos para a força de cisalhamento e para a indentação, a última etapa foi a otimização das respostas. Os parâmetros de entrada do equipamento que influenciaram na resposta de força de cisalhamento também influenciaram na resposta de indentação, e deste modo, para a otimização das respostas, sendo estas dependentes tomou-se como função objetivo a maximização da resposta de força de cisalhamento, sujeita a restrição de indentação máxima de 20% da espessura da chapa também foram tomadas como restrições os níveis de trabalho do equipamento, de modo que os valores estejam dentro da região. Para otimização utilizou-se o Solver do Excel 2016 e escolhido o método de otimização Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) não-linear. As variáveis do processo presentes nos modelos estão em níveis codificados, desta forma uma transformação foi efetuada para colocar a restrição de variáveis em níveis inteiros, e utilizar o domínio das variáveis não-codificadas. A Eq. (4.13) representa a função objetivo e as restrições Eq. (4.14), Eq. (4.15), Eq. (4.16) e Eq. (4.17):

Função objetivo:

$$\text{Máx } F = 4256,8 + 43,2T_{PPI} + 62,8I + 86,9T + 61,6T_{PPI}^2 \quad (4.13)$$

Sujeito à:

$$0,1083 + 0,0354T_{PPI} + 0,0213I + 0,0338T - 0,0385T_{PPI}^2 + 0,0501I^2 + 0,0524T^2 + 0,0034 T_{PPI}I - 0,0148 T_{PPI}T - 0,0154IT \leq 0,14 \quad (4.14)$$

$$-1 \leq T_{PPI} \leq 1 \quad (4.15)$$

$$-1 \leq I \leq 1 \quad (4.16)$$

$$-1 \leq T \leq 1 \quad (4.17)$$

Assim, obteve-se os seguintes resultados previstos para os parâmetros:

- Tempo (T): 18 ciclos
- Tempo de pré pressão 1 (T_{PPI}): 15 ciclos
- Corrente (I): 4,92kA

As respostas previstas e seus intervalos de confiança utilizando os valores ótimos dos parâmetros foram:

- Força máxima de cisalhamento (F): 4362 N(4289 a 4435)

- Indentação máxima (Ind_{SEN}): 17,1% (11,4% a 22,8%)

4.2.7 Validação dos resultados

Foram realizadas 5 amostras para confirmar o resultado previsto através da otimização. Foi trabalhado com a pressão no nível de 2,5 bar, estes estão apresentados na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Ensaios de confirmação nos níveis ótimos

Amostra	F(N)	Ind_{SEN}(%)	Frat
1	4069	14,3	3
2	4253	17,1	3
3	4223	12,9	3
4	4200	14,3	3
5	4246	17,1	3
Média(IC)	4198,2(4104,7 a 4291,5)	15,1(12,7 a 17,5)	
Desvio Padrão	75,16	1,90	

O resultado para a força de cisalhamento está dentro do esperado, assim como a indentação medida através do sensor de deslocamento está inferior à 20% (0,14 mm), o diâmetro dos pontos foram todos maiores que o limite admissível de $5\sqrt{t}$ (4,18 mm), os tipos de fraturas observados após os ensaios de cisalhamento foram todos do tipo considerado como aceitável, deste modo obteve-se pontos de solda de qualidade.

4.3 Considerações finais

Este capítulo buscou descrever a aplicação do método experimental definido no Capítulo 3 para se obter a condição otimizada do processo de soldagem a ponto aplicadas a chapas de aço galvanizado de espessura 0,70 mm. Dessa forma, foram desenvolvidas as etapas necessárias para o desenvolvimento do Método Taguchi, assim como as etapas necessárias para o desenvolvimento da Metodologia de Superfície de Resposta e, também, a Otimização do processo, tudo de forma sistemática, o que contribuiu para que os resultados fossem obtidos de forma satisfatória.

5 CONCLUSÕES

5.1 Conclusões Gerais

A partir dos resultados observados e discutidos no capítulo anterior pôde-se concluir que:

- A aplicação do Método Taguchi identificou que os parâmetros influentes na força de cisalhamento são a pressão, a corrente de soldagem, o tempo de soldagem e o tempo de pré pressão 1. Os parâmetros influentes na indentação são a pressão, a corrente de soldagem, os tempos de pré pressão 1 e 2, o tempo de pré-aquecimento e o tempo de subida da corrente.
- Foi possível identificar com a aplicação da Superfície de Resposta, dentro da região trabalhada, que quanto maiores a corrente de soldagem e o tempo de soldagem, maior será a força de cisalhamento que o ponto resiste. A indentação mínima ocorre na região central dos níveis trabalhados para os três parâmetros em torno de $T_{PPI} = 25$ ciclos, $T = 16$ ciclos e $I = 4,92$ kA.
- Os modelos encontrados para a força de cisalhamento e para a indentação podem ser considerados de grande confiabilidade, visto pelo alto valor do ajuste. Os valores dos ajustes foram de 73,04 %, para força de cisalhamento e de 84,31% para indentação, ambos considerados satisfatórios.
- A maximização da força de cisalhamento sujeita a indentação máxima de 20 % foi obtida com sucesso, onde os resultados dos testes de confirmação validaram o resultado previsto pela otimização, e deste modo, os modelos desenvolvidos para ambas as respostas. A configuração do equipamento prevista e experimentada foi $T_{PPI} = 15$ ciclos, $T = 18$ ciclos, $I = 4,92$ kA e $P = 2,5$ bar. Os valores ótimos previstos foram: indentação máxima 17,1% e força máxima de cisalhamento de 4362 N, já os valores médios dos ensaios de confirmação foram: indentação máxima 15,1% e força máxima de cisalhamento de 4198,1 N. Finalmente, pode-se concluir que o trabalho alcançou um resultado positivo, já que foi encontrada uma configuração para a soldagem de chapas de 0,70 mm que permite que se obtenha pontos de solda de boa qualidade.

5.2 Contribuições do trabalho

O desenvolvimento deste estudo permite atribuir para o presente trabalho as seguintes contribuições:

- Obtenção de um procedimento otimizado para a soldagem a ponto em chapas de aço galvanizado com espessura de 0,70mm;
- Construção de um guia prático para utilização da máquina de solda a ponto;
- Obtenção de modelos matemáticos confiáveis que permitem controlar as respostas do processo em função dos parâmetros de soldagem;

5.3 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para estudos futuros, ficam as seguintes considerações:

- Expandir os resultados encontrados adicionando a espessura da chapa como um parâmetro de entrada, e deste modo obter a configuração ótima para qualquer espessura, além de permitir a comparação com outros trabalhos tal como o de Amaral(2011).
- Analisar o processo do ponto de vista do custo e produtividade, de modo a encontrar as configurações que minimizem o custo e maximizem a produtividade.
- Expandir os resultados para outros tipos de materiais.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ABDULHADI, A.; BURTON, D. e LILLEY, F. **Assessing the Quality of Spot Welding Electrode Tips Using Image Processing Techniques**. Proceedings of the World Congress on Engineering 2011, Vol II WCE 201, London, U.K., 2011.

ALMEIDA, H.S. e TOLEDO, J.C. **Método Taguchi: Qualidade voltada para o Projeto do Produto e do Processo**. Revista de Administração, São Paulo 24(4):62-68, 1989.

AMARAL, F. F. **Monitoramento da Qualidade na Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica de Chapas de Aço Galvanizadas Baseado em Análise de Experimentos**, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, 95p., 2011.

ANTONY, J.; PERRY, D.; WANG, C. e KUMAR, M. **An application of Taguchi method of experimental design for new product design and development process**, Assembly Automation, Volume 26, Number 1, 2006, pp 18–24.

ARUNCHAI, T.; SONTHIPERMPOON, K.; APICHAYAKUL, P e TAMEE, K.. **Resistance Spot Welding Optimization Based on Artificial Neural Network** . Hindawi Publishing Corporation International Journal of Manufacturing Engineering Volume 2014, 2014.

AURES, V. J. **Estudo da Formação, Geometria e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistência: uma Abordagem Estatística**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 164p, 2006.

AWS – American Welding Society, Jefferson's Welding Encyclopedia. 18th Edition. Miami, 1997.

AWS/SAE D8.9M. **Recommended Practices for Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials**. Florida: *American Welding Society*, 2002.

BALDIM, A.C. **Análise do efeito da eliminação da camada de zinco na qualidade da solda a ponto em chapas de aços galvanizados**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 96p, 2014.

BRAČUN, D.; POLAJNAR, D. e DIACI, I. J. **Indentation shape parameters as indicators of spot weld quality**. The 8th International Conference of the Slovenian Society for

Non-Destructive Testing »Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering«September 1-3, 2005, Portorož, Slovenia, pp. 419-427.

BRANCO, H. L. O. e OKIMOTO, P. C. **Análise do desgaste de capas de eletrodos de soldo ponto e sua influência na qualidade da soldagem de chapas automotivas galvanizadas.** Soldag. insp. [online]. 2012, vol.17, n.4, pp. 347-355. ISSN 0104-9224.

CALVA, C. M. e EAGAR, T. W. **Enhancement of the weldability in resistance spot welding,** Sheet Metal Welding Conference IV, Conference Proceedings, 1990.

CHAUDHARY, S.; SHARMA, V. K. e RANA, K. **Taguchi Analysis of tensile strength of Resistance Spot Welding weld.** International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering, vol. 3,n.10, pp. 217-221, 2014.

CHEN, M. C. e FAN, S. K. S. **Tolerance evaluation of minimum zone straightness using nonlinear programming techniques: a spreadsheet approach.** Computers & Industrial Engineering, v. 43, n. 3, p. 437-453, 2002.

FONSECA, E. O. T. e BRACARENSE, A. Q. **Desenvolvimento de um Sistema para Monitoração da Resistência Dinâmica e da Força na Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica.** In: Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 25. Belo Horizonte, Anais Belo Horizonte: ABS, p. 1-10. 1999.

FURLANETTO, V. **Desenvolvimento e instrumentação de um cabeçote de soldagem a ponto por resistência elétrica para aplicação em condições industriais.** Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014.

GEDEON, S.A. e EAGAR, T. W. **Resistance Spot Welding of Galvanized Steel, Part I: Material Variations and Process Modifications.** Metallurgical Transactions B, v.17b, p.885, 1986a.

GEDEON, S.A. e EAGAR, T. W. **Resistance Spot Welding of Galvanized Steel, Part II: Mechanisms of Spot Weld Nugget Formation.** Metallurgical Transactions B, v.17B, p.901, 1986b.

GOMES, J. H. F. **Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço abnt 1020 com utilização de arame tubular inoxidável austenítico,** dissertação de mestrado, UNIFEI, 2010

GOMES, J. H. F **Método dos Polinômios Canônicos e misturas para otimização multi-objetivo.** Tese de Doutorado, UNIFEI, 2013.

GUEDES, T. A. **Procedimentos de otimização no planejamento e controle da qualidade de produtos e processos.** Florianópolis. 215p. Tese(Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina – 1996.

HABIB, L.; ABDELKADER, Z.; HABIB, B. e BENALLEL, B. F.. **Experimental Study of Tensile Test in Resistance Spot Welding Process.** Latin American Journal of Solids and Structures, *On-line version* ISSN 1679-7825, 2016.

HERNANDEZ, V.H.B.; OKITA, Y. e ZHOU, Y. **Second Pulse Current in Resistance Spot Welded TRIP Steel — Effects on the Microstructure and Mechanical Behavior.** Welding Journal, vol.91, pp.278-285, 2012.

JAHANDIDEH, A.R.; HAMED, M.; MANSOURZADEH, S.A. e RAHI, A.: **An experimental study on effects of post-heating parameters on resistance spot welding of SAPH440 steel.** Sci. And Technol. Weld. Join., vol. 16, pp. 669-675, 2011.

KIM, D.W.; CHO, M.W.; SEO, T.I. e LEE, E.S. **Application of Design of Experiment Method for Thrust Force Minimization in Step-feed Micro Drilling.** *Sensors* 2008, 8, 211-221.

KÖKSOY, O. **A nonlinear programming solution to robust multi-response quality problem.** Applied Mathematics and Computation, v. 196, n. 2, p. 603-612, 2008.

KÖKSOY, O. e DOGANAKSOY, N. **Joint optimization of mean and standard deviation using response surface methods.** Journal of Quality Technology, v. 35, n. 3, p. 237-334, 2003.

LANE, C.T. *et al.* **Cinematography of Resistance Spot Welding of Galvanized Steel Sheet.** Welding Journal, pp. 260-265, September, 1987.

LASDON, L. S.; WARREN, A. D.; JAIN, A. e RATNER, M. **Design and testing of a Generalized Reduced Gradient Code for nonlinear programming.** ACM Transactions on Mathematical Software, v. 4, n. 1, p. 34-50, 1978.

LIMA, A. C. P. e MAGALHÃES, M. N. **Noções de Probabilidade e Estatística.** São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

LIMA, V. B. S.; BALESTRASSI, P. P. e PAIVA, A. P.. **Otimização do Desempenho de Amplificadores de Radiofrequência Banda Larga: Uma Abordagem Experimental.** Produção online. 2011, vol.21, n.1, pp. 118-131. Epub 26-Jan-2011. ISSN 0103-6513, 2011.

LIN, H. L.; CHOU, T. e CHOU, C. P. **Optimization of Resistance Spot Welding Process using Taguchi Method and a Neural Network**. Society for Experimental Mechanics, 2007.

LUENBERGER, D. G. e YE, Y. **Linear and nonlinear programming**. 3 ed. New York: Springer, 2008, 516 p.

MACHADO, I.G. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**, editado pelo próprio autor, 1996.

MAKWANA, B.; RUCHIR, D e PRADHYUMAN, P.: **Optimization of process parameters for Resistance Spot Welding process of Austenitic SS304 using Response Surface Method – A Review**, International Journal For Technological Research In Engineering, Vol 1, Issue 9, April-2014, p.746-750.

MAGALHÃES M. N. e LIMA A. C. P. **Noções de Probabilidade e Estatística**. Ed. Edusp, 395 p. 2002.

MARQUES P. V.; MODENESI P. J. e BRACARENSE A. Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**, Ed. UFMG, pp.293-306, 2009.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 7th ed. New York: John Wiley, 655 p. 2009.

MONTGOMERY, D. C. e RUNGER, G.C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 3rd ed.,2003.

MÜFTÜOĞLU, F. e KESKINEL, T. **Effect of coating thickness on electrode life in spot welding of galvanized steels**. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, v. 31, p. 183-187, 2007.

NASCIMENTO, V. C. **Seleção de Parâmetros de Soldagem a Ponto por Resistência, Baseado na Medição da Resistência Elétrica entre Chapas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 113p, 2008.

NASCIMENTO, V. C. e SCOTTI, A. **Metodologia para parametrizar e avaliar a técnica da "burn-zinc" no processo de soldagem a ponto por resistência**. Soldag. insp. (Impr.) [online]. 2010, vol.15, n.1, pp. 11-21. ISSN 0104-9224

PANDEY, A.K.; KHAN,M.I. e MOEED,K.M. **Investigation of the effect of current on tensile strength and nugget diameter of spot welds made on aisi-1008 steel sheets**.

International Journal of Technical Research and Applications, Volume 1, Issue 1 (july-aug 2013)

POURANVARI, M.; ASGARI, H. R. ; MOSAVIZADCH, S. M.; MARASHI, P. H. e GOODARZI, M. **Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds.** SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WELDING & JOINING · MARCH 2007

RAUT, M. e ACHWAL,V.. **Optimization of spot welding process parameters for maximum tensile strength.** International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, Vol. 3 N° 4, 2014.

RAWAL, M.R. e INAMDAR, K. H. **Application of Taguchi Method for Resistance Spot Welding of Stainless Steel-304 Grade.** International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN (Online): 2319-7064, Volume 3, 2014.

ROSS, P. J. **Aplicações das Técnicas de Taguchi na Engenharia da Qualidade.** McGraw-Hill Ltda. São Paulo. 1991.333p.

RUUKKI, R. **Resistance Welding Manual.** Rautaruukki Corporation, Copyright © 2009.

SANTOS, F. B. S. **Estudo da Eficiência do Processo de Soldagem de Pontos por Resistência Elétrica Utilizada na Indústria Automotiva.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 104p, 2006.

SHAFEE, S.; NAIK, B.B.; SAMMAIAH, K. e MOHINODDIN, M. **RSW Process Parameters Optimization by Taguchi Method.** Journal of Mechanical and Civil Engineering, vol.2, pp.46-54, 2014.

SILVA, F. R. e CAMARGO,J.R. **Análise inicial da solda a ponto por resistência para caracterizar o defeito por indentamento e eletrodos desalinhados – PARTE 1.** Revista Ciências Exatas – UNITAU , vol. 16, n. 1, 2010

SILVA, T. A. e MODENESI, P.J.. **Efeito do Tipo de Revestimento na Soldagem a Ponto de Aços Galvanizados.** Soldagem & Inspeção., vol.15, n.3, pp. 177-183, 2010.

SOUZA, S. A. D. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos.** 5ª Edição. Editora: Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 266 p., 1982.

SUBRAMMANIAN, A. e JABARAJ, D.B. **Research on Resistance Spot Welding of Stainless Steel - An Overview.** International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, 2013.

WAINER, E.; MELLO; F. D. H. e BRANDI, S. D. **Soldagem Processos e Metalurgia.** São Paulo:Editora Edgar Blücher, 1992.

WANG, H.; ZHANG, Y. e CHEN, G. **Resistance Spot Welding Processing Monitoring based on Electrode Displacement Curve using Moving Range Chart.** Measurement, v. 42, n. 7, pp. 1032-1038, 2009.

WU, K. C. **Electrode Indentation Criterion for Resistance Spot Welding.** Welding Journal, vol. 47, n. 10, pp. 472s – 478s, 1968.

WU, K. D. **Resistance Spot Welding of High Contact – Resistance Surface for Weld Bonding.** Welding Journal 54(10):436-443, 1975.

ZHANG, H. e SENKARA, J. **Resistance Welding Fundamentals and Applications.** Ed. Taylos and Francis. 2006.

ZHANG, S.Y.; WANG,H.; CHEN, G.L. e ZHANG, X. **Monitoring and Intelligent Control of Electrode Wear Based on a Measured Electrode Displacement Curve in Resistance Spot Welding.** Measurement Science and Technology, v.18, pp - 867–876, 2007.

ZHOU, M; ZHANG, H. e HU, S. J. **Relationships between Quality and Attributes of Spot Welds.** Welding Journal, p. 72s-77s, April, 2003.