

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

FERNANDO FERRAZ AMARAL

**Monitoramento da Qualidade na
Soldagem a Ponto por Resistência
Elétrica de Chapas de Aço Galvanizadas
Baseado em Análise de Experimentos**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como requisito parcial à obtenção do título de *Mestre em Engenharia de Produção*

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

Co-orientador: **Prof. Dr. Rafael Coradi Leme**

Itajubá

2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

FERNANDO FERRAZ AMARAL

**Monitoramento da Qualidade na
Soldagem a Ponto por Resistência
Elétrica de Chapas de Aço Galvanizadas
Baseado em Análise de Experimentos**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 29 de junho de 2011,
conferindo ao autor o título de *Mestre em Engenharia de Produção*

Banca Examinadora

Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa (Orientador)

Prof. Dr. Messias Borges Silva

Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva

Itajubá

2011

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha família
por todo apoio e incentivo e a
minha companheira Alessandra,
pela paciência, carinho e força que
tornaram possível o alcance deste ideal.

Agradecimentos

A Deus, por olhar por mim e permitir chegar até aqui.

Ao meu orientador Prof. Dr. Sebastião Carlos Costa, pela confiança na minha pessoa e apoio durante o transcorrer deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Rafael Coradi Leme por co-orientar e oferecer toda disposição em contribuir com seu conhecimento, apoio e incentivo.

Ao Prof. Dr. Anderson Paulo Paiva, pela boa vontade, suporte e apoio oferecidos no decorrer dos experimentos.

Ao Prof. Barca pela boa vontade e auxílio para especificar alguns equipamentos utilizados nos experimentos.

Aos demais professores da Universidade Federal de Itajubá, em especial aos professores do Departamento de Engenharia de Produção, pela oportunidade concedida para realização deste trabalho.

Ao Fernando por todo o apoio e suporte oferecidos no laboratório de soldagem.

A todos os funcionários da UNIFEI, que no cumprimento das mais diversas funções contribuíram para o desenvolvimento do presente trabalho.

Ao Eduardo, pela amizade, incentivo e contribuições preciosas no decorrer desde trabalho.

Ao Paulo e a Usiminas pelo incentivo à pesquisa, através da doação das chapas utilizadas nos experimentos.

A CAPES pelo apoio financeiro, através do sistema de bolsas.

A minha família e minha namorada Alessandra pelo incentivo.

RESUMO

A soldagem a ponto por resistência elétrica possui um papel importante na fabricação de diversos produtos da indústria devido a diversas vantagens tais como rapidez, boa adaptabilidade à automação e custo relativamente baixo. Apesar de sua amplitude, este processo está sujeito a apresentar certa inconsistência na qualidade das soldas devido a muitas variáveis controláveis e não controláveis envolvidas. Este é o caso da soldagem de chapas de aços galvanizados, onde a busca por soldas otimizadas se torna uma procura constante considerando as maiores oscilações causadas pela queima do revestimento. Desta forma, a análise e otimização dos fatores controláveis do processo, tais como corrente de soldagem, tempo de soldagem e força do eletrodo, é um dos objetivos deste trabalho. Paralelamente, em função dos fatores não controláveis tais como desgaste do eletrodo, encaixe entre as chapas e impureza do material, presentes nos processos industriais, surge a necessidade de monitorar a qualidade dos pontos de solda de forma não destrutiva a fim de reduzir as perdas. Dentre os métodos não destrutivos já adotados, a medição do deslocamento do eletrodo destaca-se pela alta eficácia e baixo custo, sendo assim utilizado com o objetivo de monitorar a qualidade dos pontos de solda. Através de um modelo gerado pelo planejamento e análise de experimentos, foram obtidos pontos de solda com alta resistência à força de cisalhamento, modo de falha dado por arrancamento do ponto ou rasgamento da chapas, dentro de um limite de indentação de 20% da espessura das chapas, conforme recomendado pela literatura. O monitoramento da qualidade dos pontos de solda foi estabelecido com base na comparação do sinal de deslocamento do eletrodo gerado na condição otimizada, com os sinais gerados mediante as variações dos fatores não controláveis presentes durante a soldagem, o que tornou possível observar as variações na qualidade a fim de evitar soldas inapropriadas e alcançar estabilidade no processo.

Palavras Chave: Solda a ponto por resistência elétrica, aço galvanizado, projeto e análise de experimentos, monitoramento da qualidade, deslocamento do eletrodo.

ABSTRACT

Resistance spot welding has an important role in manufacture industry due to several advantages such as speed, good adaptability to automation and relatively low cost. Despite its breadth, this process can bring certain quality inconsistency due to many controllable and uncontrollable variables involved. This is the case of galvanized steel sheets welding where the optimization of welding conditions becomes constant considering the major oscillations caused by the zinc coat melting. Thus, the analysis and optimization of controllable factors of the process such as welding current, welding time and electrode force, which influence the final quality of the weld spots is one objective of this work. Other important point in the resistance spot welding process is the uncontrollable factors such as electrode wear, fit between sheets, material impurity, present in industry that brings a necessity for new quality evaluation techniques. This fact leads to the need to monitor the weld quality non-destructively to reduce losses. Among the techniques used to estimate weld quality non-destructively, the electrode displacement can be highlighted by high efficiency and low cost. Thus, it was used in order to monitor weld spots quality. By utilizing a model based on analysis of experiments techniques, optimized weld spots were obtained with high resistance to shear force, pullout failure mode and indentation limit of 20% as recommended in the literature. The monitoring of the weld spots was established based on comparing the electrode signal generated by the optimized condition with the signals generated upon the variation of non-controllable factors present during the welding, which makes it possible to observe changes in quality in order to avoid inappropriate welds and achieve process stability.

Keywords: resistance spot welding, galvanized steel, design and analysis of experiments, quality monitoring, electrode displacement.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Autores que utilizaram ensaios destrutivos	25
Tabela 2.2 – Autores que utilizaram ensaios não destrutivos.....	26
Tabela 3.1 – Composição química do aço carbono galvanizado.....	48
Tabela 3.2 – Níveis iniciais definidos para os parâmetros de soldagem	50
Tabela 4.1 – Arranjo ortogonal de Taguchi L27 utilizado no experimento.....	59
Tabela 4.2 - Valores de força máxima de cisalhamento obtidos.....	60
Tabela 4.3 – Valores de indentação máxima obtidos.....	61
Tabela 4.4 – Significância dos parâmetros e explicabilidade para força máxima de cisalhamento.....	62
Tabela 4.5 – Significância dos parâmetros e explicabilidade para indentação máxima.....	62
Tabela 4.6 – Níveis dos parâmetros para experimento fatorial completo	67
Tabela 4.7 – Arranjo fatorial completo com pontos centrais e respostas obtidas.....	68
Tabela 4.8 – Efeitos obtidos no modelo fatorial completo para estimar força máxima de cisalhamento.....	70
Tabela 4.9 – Efeitos obtidos no modelo fatorial completo para estimar indentação máxima.....	72
Tabela 4.10 – Níveis dos parâmetros para experimento de superfície de resposta.....	74
Tabela 4.11 – Arranjo experimental e respostas dos experimentos de superfície de resposta.....	75
Tabela 4.12 – Efeitos principais e modelos , quadráticos e das interações para a força máxima de cisalhamento e indentação máxima.....	76
Tabela 4.13 - Respostas dos ensaios de confirmação.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1– Princípio de funcionamento da soldagem a ponto por resistência.	7
Figura 2.2– Pontos principais de calor nos eletrodos e gradiente de temperatura após 20% do tempo de soldagem e no final do processo.	8
Figura 2.3– Força entre eletrodos x tempo.....	12
Figura 2.4 - Ciclo de soldagem com pré-aquecimento e pós-aquecimento.	13
Figura 2.5 - Ciclo de soldagem com aumento e diminuição gradativas da corrente de soldagem.....	14
Figura 2.6 - Ciclo de soldagem. (a) com impulso único; (b) com impulsos múltiplos.	15
Figura 2.7 - Penetração da solda.....	19
Figura 2.8 - Medição das dimensões do ponto de solda.	19
Figura 2.9 - Avaliação geométrica da indentação.	21
Figura 2.10 - Esquema para ensaio de cisalhamento	22
Figura 2.11 - Tipos de falha em teste de resistência ao cisalhamento como função da rotação do corpo-de-prova.....	22
Figura 2.12 - Formato do corpo-de-prova utilizado no teste de tração axial.....	23
Figura 2.13 – Rotina de testes para arrancamento: a) Com chave tipo pé de cabra, b) Teste mecânico e c) Teste tipo descascamento	24
Figura 2.14 - Curva típica de resistência dinâmica durante a soldagem.	27
Figura 2.15 - Diagrama esquemático para obtenção da resistência dinâmica através dos circuitos secundário (sistema I) e primário (sistema II)	28
Figura 2.16 – Circuito RLC equivalente entre os eletrodos.	29
Figura 2.17 – Ondas ultra-sônicas geradas a partir processo RSW.....	29
Figura 2.18 – Sinal acústico emitido durante o processo de soldagem	30
Figura 2.19 – Faixa aceitável do deslocamento do eletrodo.....	31
Figura 2.20 – Exemplo de sistema de monitoramento da qualidade utilizando sinal de deslocamento do eletrodo.....	32

Figura 2.21 – Formação do ponto durante a soldagem.	33
Figura 2.22 - Regiões de deslocamento típicas em aço galvanizados.	34
Figura 2.23 – Curva de deslocamento do eletrodo para diferentes níveis de calor aplicado. ...	35
Figura 2.24 – Elementos básicos da metodologia DOE	38
Figura 2.25 – Etapas do DOE	38
Figura 2.26 - Representação gráfica de um Central Composite Design	42
Figura 3.1– Principais componentes da máquina de soldagem a ponto utilizada nos experimentos.....	43
Figura 3. 2 – Dispositivo para regulagem de pressão.....	44
Figura 3.3 – Teste de deslocamento do eletrodo com relógio comparador analógico.	44
Figura 3.4- Posicionamento do sensor LVDT e condicionador de sinais para aquisição dos dados na máquina de solda a ponto.	45
Figura 3.5- Fixação do sensor LVDT e da base de apoio.....	48
Figura 3.6 – Contato inicial entre o sensor e a base fixa.	47
Figura 3.7– Chapas de aço carbono galvanizado utilizadas nos experimentos.	47
Figura 3.8 – Especificações dimensionais dos corpos de prova.....	48
Figura 3.9 – Etapas seguidas na realização dos experimentos	51
Figura 3.10 – Equipamento para realização do ensaio de cisalhamento.	52
Figura 3.11 – Equipamentos utilizados no ensaio de indentação.....	53
Figura 3.12 – Modo de falha: (a) interfacial (b) arrancamento do ponto (c) rasgamento da chapa (d) arrancamento do ponto com rasgamento da chapa.....	54
Figura 3.13 - Interface principal do software SD20 DataLogger para visualização do deslocamento do eletrodo em tempo real.	55
Figura 3.14 - Critério de disparo para coleta das amostras de deslocamento.....	55
Figura 3.15 - Critérios de amostragem	56
Figura 3.16 – Filtros digitais para tratamento do sinal.	56
Figura 3.17 – Critérios de parada da aquisição de dados.	57

Figura 3.18 – Arquivo gerado com deslocamento do eletrodo a cada instante decorrido.....	57
Figura 4.1 – Efeito dos parâmetros com relação sinal-ruído na força máxima de cisalhamento.....	64
Figura 4.2 - Efeito dos parâmetros com relação ao sinal-ruído na indentação máxima.....	64
Figura 4.3 – Gráficos de análise residual para força máxima de cisalhamento.....	65
Figura 4. 4 – Gráficos de análise residual para indentação máxima.	66
Figura 4. 5 – Gráficos de análise residual para força máxima de cisalhamento.....	69
Figura 4.6 – Gráficos de análise residual para indentação máxima.	70
Figura 4.7 – Efeitos principais dos parâmetros na força máxima de cisalhamento.....	71
Figura 4.8 – Efeitos principais dos parâmetros na indentação máxima.	73
Figura 4. 9 – Efeitos principais dos parâmetros sobre as respostas.....	77
Figura 4.10 – Análise residual para força máxima de cisalhamento	78
Figura 4.11 – Análise residual para indentação máxima.....	79
Figura 4. 12 – Superfícies de resposta para força máxima de cisalhamento	80
Figura 4.13 – Superfícies de resposta para indentação máxima.....	81
Figura 4.14 – Região de interseção entre as curvas de força de cisalhamento e indentação.....	82
Figura 4. 15 – Curva de deslocamento do eletrodo durante a formação de um ponto de solda a partir do início da expansão térmica do material.....	85
Figura 4.16 – Curva de deslocamento do eletrodo durante a formação de um ponto de solda a partir do início da passagem de corrente e queima do revestimento.....	86
Figura 4.17 – Curvas de deslocamento do eletrodo com diferentes condições de ruído.....	87
Figura 4.18 – Curvas de deslocamento nas condições de soldagem ideal (verde), falta de calor (azul) e excesso de calor (vermelha).	87
Figura 4. 19 – Curvas de deslocamento nas diferentes condições de soldagem incluindo a fase de queima do revestimento do material. Condições de soldagem: ideal (verde), falta de calor (azul) e excesso de calor (vermelha).	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A/D – Conversão analógico-digital

Ar – Argônio

Al – Alumínio

ANOVA – Análise de Variância.

C – Capacitância

C – Carbono

CCD - Central Composite Design (Arranjo de experimentos)

Cu – Cobre

DOE – Design of Experiments (Planejamento de experimentos)

dt – Diferencial de tempo

F - Força

I – Corrente

J – Constante de Joule

L – Indutância

L – Comprimento da chapa

LB - *Lower is better* (Menor é melhor)

LVDT – *Linear Voltage Differential Transdutor* (Transdutor de deslocamento diferencial linear)

Mn – Manganês

Ni – Níquel

O – Superposição das chapas

P – Pressão

Valor p – Coeficiente percentual de significância.

Q – Quantidade de calor

V - Tensão

OFAT - One Factor at a Time (Um fator por vez)

SNR – *Sinal-to-Noise Ratio* (Relação sinal-ruído)

NB – *Nominal is better* (Normal é melhor)

HB – *Larger is better* (Maior é melhor)

R – Resistência

Rt – Resistência total

RSM - *Response Surface Methodology* (Metodologia de superfície de resposta)

RSW – Resistance Spot Welding (soldagem a ponto por resistência elétrica)

S - Enxofre

SL – Comprimento total das chapas soldadas

UL – Comprimento livre da chapa

W – Largura da chapa

Zn - Zinco

SUMÁRIO

RESUMO.....	V
ABSTRACT	VI
LISTA DE TABELAS.....	<u>VII</u>
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	XI
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Apresentação	1
1.2 – Situação problema	2
1.3 – Objetivos.....	4
1.4 – Justificativa.....	5
1.5 - Hipóteses do trabalho	5
1.6 - Estrutura do trabalho	6
2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
2.1 – Princípio de funcionamento da soldagem a ponto por resistência elétrica.....	7
2.2 - Parâmetros primários de soldagem	9
2.2.1 - Intensidade da corrente.....	10
2.2.2 – Tempo de soldagem.....	10
2.2.3 – Força/Pressão entre eletrodos	11
2.2.4 – Parâmetros secundários de soldagem	11
2.3 – Outros fatores que influenciam no processo de soldagem a ponto por resistência	15
2.3.1 – Condições da superfície do material base	15
2.3.2 – Desgaste dos eletrodos.....	16
2.3.3 – Condutibilidade térmica e dissipação do calor	16
2.3.4 – Materiais e espessuras das chapas dissimilares	17
2.3.5 – Efeito <i>Shunt</i>	17
2.3.6 – Desalinhamento dos eletrodos	18
2.4 – Qualidade da solda a ponto por resistência elétrica.....	18
2.4.1 – Inspeção visual	20
2.4.2 – Indentação.....	20
2.4.3- Ensaios destrutivos	21

2.5 – Métodos não destrutivos de monitoramento da qualidade	25
2.6 - Princípio de monitoramento da qualidade com base no deslocamento do eletrodo.....	33
2.7 – Planejamento e Análise de Experimentos	37
2.7.1 - Conceitos básicos de planejamento e análise de experimentos.....	37
2.7.2 – Método Taguchi.....	39
2.7.3 – Arranjo Fatorial e Superfície de resposta	40
3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	43
3.1 - Material e equipamentos utilizados.....	43
3.2 - Seleção inicial dos parâmetros	49
3.3 - Condução dos experimentos	50
3.4 - Escolha das respostas para análise e projeto de experimentos.....	52
3.5 - Aquisição dos dados de deslocamento do eletrodo.....	54
4- RESULTADOS E ANÁLISES	58
4.1 – Aplicação do método de Taguchi	58
4.2 – Aplicação do método fatorial completo.....	66
4.3 – Aplicação do método de superfície de resposta.....	73
4.4 – Otimização do processo.....	82
4.5 – Monitoramento de qualidade	84
5 - CONCLUSÕES	89
6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
7 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Apresentação

O processo de soldagem a ponto por resistência elétrica (RSW – do inglês *Resistance Spot Welding*) foi inventado em 1877 por Elihu Thomson em uma aplicação de união de fios de cobre. Desde então, esta técnica passou a ser utilizada para soldar outros materiais e tem crescido enormemente desde a primeira chapa automotiva soldada, a qual foi introduzida em 1933. Suas utilizações mais comuns se concentram nos aços carbono, aços inoxidáveis e alumínio (BRANCO, 2004; SANTOS, 2006).

A facilidade de operação e de automação, rapidez, realização de vários pontos de solda sem que sejam necessários grandes ajustes dos parâmetros e o baixo investimento, são alguns fatores que levam à grande utilização deste processo abrindo possibilidades para a obtenção de produtos de alta qualidade (PEREIRA et al, 2009).

Comparado aos processos de soldagem por arco elétrico, o processo RSW possui a vantagem de proporcionar menor aquecimento das partes unidas devido à fusão ficar restrita ao local de formação do ponto, além de não acrescentar peso extra ao produto pelo fato da não utilização de materiais adicionais, o que contribui para a redução dos custos.

Com o decorrer do tempo, o processo RSW ganhou grande importância na fabricação de diversos produtos da indústria, estando entre um dos processos mais utilizados em produções seriadas e abrangendo muitos segmentos da indústria tais como automobilístico, eletrônicos, nuclear, tubulações, equipamentos ferroviários, aeroespacial, etc (PAES 1989, MARQUES 2009).

Entre os vários tipos de aços utilizados na indústria, os aços carbono revestidos com zinco (galvanizados) se destacam por possuírem maior robustez à corrosão. Porém, no processo de soldagem, o revestimento das chapas torna-se um fator complicador, pois causa um desgaste prematuro dos eletrodos aumentando a instabilidade do processo e dificultando o controle dos parâmetros para garantir soldas de qualidade.

Os equipamentos para soldagem a ponto por resistência vêm sendo melhorados com a introdução de novos métodos de controle de parâmetros que levam a um melhor nível de controle do processo e automação de etapas, considerando que o número de aplicações vem aumentando continuamente (MARQUES, 2009).

A crescente demanda da indústria contemporânea por menores custos e produtos livres de falhas, faz com que uma constante busca pelo aumento da eficiência dos processos seja estabelecida, visando prevenir futuras falhas que podem implicar em perdas de garantia e imagem. Desta forma, o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica ainda é considerado alvo de futuras melhorias que o levem a um patamar de excelência, tendo como princípio básico o alinhamento dos resultados obtidos no processo com os interesses das organizações (SANTOS, 2006).

1.2 – Situação problema

Apesar das vantagens proporcionadas pela soldagem RSW, a garantia da qualidade das soldas exige um controle apurado do processo e permanece alvo de melhorias. Nos processos de soldagem de aços revestidos com zinco, as resistências de contato são mais baixas. Desta forma, para se produzir soldas adequadas, os parâmetros de soldagem tais como tempos e níveis de corrente de soldagem devem ser redimensionados, quando comparados aos aços não revestidos. Além disso, durante a formação de uma solda a ponto entre duas chapas de aço galvanizado, o zinco na interface sobreposta se funde e é radialmente deslocado da zona de solda para formar uma auréola que circunda a solda. Esta auréola desvia alguma corrente ao redor da zona de solda, deixando menos corrente disponível para a formação de lente. Este comportamento da corrente provoca desgaste excessivo dos eletrodos, dificultando a obtenção de soldas de qualidade. Para isso, é de vital importância a obtenção de um bom ajuste dos parâmetros. O monitoramento da qualidade também se torna fundamental considerando que ao longo do tempo os pontos de solda estão mais sujeitos a perda de qualidade. Segundo Zhou (2003) e AWS (1998), os parâmetros de um ponto de solda são difíceis de especificar em termos gerais. Cada usuário pode estabelecer seus limites de acordo com os requerimentos do projeto e a experiência das práticas (INTERMACHINERY, 2002).

Uma forma comumente utilizada na indústria para avaliação da qualidade dos pontos de solda baseia-se em ensaios destrutivos que podem estimar a qualidade dos pontos através da medição das suas dimensões ou da força necessária para o seu rompimento. Embora estes ensaios possam testar a qualidade de forma satisfatória, existe a necessidade de destruição da solda para realizar a avaliação. Considerando a grande quantidade de pontos de solda que são realizados nos processos industriais em períodos curtos de tempo, não há possibilidade de obter informações de todos os pontos de solda ao longo da produção. Devido a este fato, a

avaliação da qualidade é feita, na maior parte dos casos, de forma aleatória por amostragem, o que leva à aplicação de pontos de solda extras para reduzir os riscos de falha, aumentando assim os custos (WANG, 2009). No caso da soldagem dos aços galvanizados este fato é agravado considerando a maior dificuldade de controle dos parâmetros envolvidos.

Baseando-se neste fato, a necessidade de formas alternativas de avaliação da qualidade da solda durante a produção torna-se uma demanda natural para as indústrias. Novas maneiras de verificar a qualidade de forma não destrutiva e em tempo real permanecem sendo objeto de investigações nos meios acadêmicos e industriais. Segundo Darwish (1999), alguns estudos para a adaptabilidade do processo podem ser de grande valia. Podrzaj et al (2005), afirmam que existe uma demanda crescente por pesquisas que explorem alternativas potenciais de monitoramento da qualidade de forma não destrutiva.

Muitos métodos não destrutivos de avaliação da qualidade tais como medição da resistência de contato dinâmica, medição da impedância de entrada, ultra-som, emissões acústicas e medição de deslocamento do eletrodo, já foram utilizados de forma a gerar sinais que indicam a qualidade da solda. Dentre as alternativas utilizadas, o sinal do deslocamento do eletrodo mostra-se bastante eficiente em fornecer indicativos de qualidade em tempo real, sendo assim explorado por diversos autores. Lee et al (2001) afirmam que a separação dos eletrodos fornece o sinal mais efetivo para estimação da formação do ponto de solda devido à expansão térmica, o que o torna ideal para estimar sua resistência. Wang (2009) afirma que vários sistemas de controle baseados em curvas de deslocamento do eletrodo já foram desenvolvidos e podem fornecer um sinal muito útil para monitorar a qualidade da solda. Porém, existem críticas na literatura quanto à utilização deste método, referentes a possíveis dificuldades de calibração e manutenção do equipamento de medição, na robustez do sistema em aplicações industriais e nos custos elevados dos equipamentos (DENNISON, 1997; LING, 2009). Outro ponto importante levantado por Chien et al (2002) diz respeito à limitação deste método a aplicações com máquinas de solda com pedestal. Apesar destas limitações, pode-se afirmar que novas alternativas que possibilitem a medição do deslocamento do eletrodo de maneira robusta e barata podem melhorar a aplicabilidade deste método.

Através das técnicas de projeto e análise de experimentos aplicadas em laboratório é possível analisar os impactos das principais variáveis controláveis no processo de soldagem a ponto por resistência em chapas de aço galvanizadas de forma a obter valores otimizados dos parâmetros de soldagem para maximizar a qualidade do ponto de solda. Fazendo uso destas técnicas e utilizando os ensaios de força e análises dimensionais do ponto de solda como respostas da análise de experimentos, pode-se obter um sinal de deslocamento do eletrodo

como referência para monitorar a qualidade dos pontos de solda com base na comparação das curvas geradas ao longo de experimentos envolvendo os fatores não controláveis do processo, o que torna possível estabelecer uma forma alternativa de monitoramento da qualidade em tempo real.

1.3 – Objetivos

Com base nas informações descritas anteriormente referentes à qualidade do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, este trabalho concerne à proposição dos seguintes objetivos específicos:

- Propor um modo alternativo de monitoramento da qualidade dos pontos de solda de forma não destrutiva, em tempo real e de baixo custo de implementação, com base na leitura do deslocamento do eletrodo.
- Analisar o impacto dos principais parâmetros controláveis no processo de soldagem a ponto por resistência elétrica em chapas de aço galvanizadas.
- Otimizar a qualidade dos pontos de solda através da aplicação das técnicas de projeto e análise de experimentos utilizando como resposta ensaios de força de cisalhamento, indentação e tipo de rompimento.

Para atingir os objetivos específicos alguns objetivos intermediários serão estabelecidos

- Realizar testes exploratórios no sentido de selecionar os parâmetros de análise do processo RSW dentre os vários parâmetros disponíveis aplicados aos aços galvanizados;
- Adaptar o processo de soldagem RSW para a implementação de um sistema de detecção de deslocamento;
- Caracterizar os modos de falhas nos testes de cisalhamento dos corpos de prova.

- Obter uma configuração otimizada dos parâmetros para soldar chapas de aço galvanizado.
- Investigar a correlação entre os critérios de qualidade utilizados: resistência de cisalhamento, indentação e tipo de rompimento da solda.

1.4 – Justificativa

Chapas de aço revestidos com Zn possuem vasta aplicação na indústria. Porém, a soldabilidade destes aços é conhecida como sendo inferior àquela das chapas de aço laminadas a frio devido à reação causada entre o Cobre contido no eletrodo e o Zinco do revestimento, o que leva à formação de ligas na ponta do eletrodo. Desta forma, existe maior consumo do eletrodo e, conseqüentemente, uma diminuição da sua vida útil, o que reforça a necessidade de obter uma condição otimizada dos parâmetros para melhorar o processo de soldagem neste tipo de material. Destaca-se também a importância de monitorar a qualidade dos pontos em chapas de aço galvanizado que tende a oscilar mais devido ao maior desgaste causado aos eletrodos.

Segundo Wang (2009), novas maneiras de verificar a qualidade de forma não destrutiva e em tempo real permanecem sendo objeto de investigações nos meios acadêmicos e industriais. Considerando o número significativo de pesquisas envolvendo a aplicação de análise e projeto de experimentos para otimização da qualidade no processo de soldagem a ponto por resistência elétrica e a abordagem na literatura quanto a presente necessidade de métodos não destrutivos e em tempo real de avaliação da qualidade dos pontos de solda, esta dissertação visa relacionar as variáveis relevantes nos meios industriais do processo de soldagem a ponto por resistência com os parâmetros de qualidade, contribuindo para pesquisadores e profissionais atuantes na área de soldagem.

1.5 - Hipóteses do trabalho

Este trabalho parte da hipótese que se dispendo de experimentos que analisam o impacto dos principais fatores envolvidos no processo de solda a ponto por resistência elétrica e de um método de monitoramento de qualidade em tempo real pode-se obter informações que contribuam para o conhecimento e melhoria do processo de soldagem de chapas finas de

ação galvanizado refletindo na redução das falhas, melhoria das condições de avaliação de qualidade e redução dos custos. Sob essa ótica, o resultado estabelece uma alternativa a ser explorada que poderá refletir em uma menor probabilidade de falhas nos processos resultando na redução das falhas nos produtos.

1.6 - Estrutura do trabalho

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos. No capítulo 1 foi abordada a introdução incluindo apresentação, situação problema, objetivos, justificativas de escolha do tema proposto e hipóteses do trabalho.

O capítulo 2 traz a fundamentação teórica desse estudo abordando os conceitos do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica incluindo princípio de funcionamento, parâmetros de soldagem, e os métodos destrutivos e não destrutivos de avaliação da qualidade, além dos fundamentos de projeto e análise de experimentos utilizados que incluem os conceitos básicos referentes aos métodos de Taguchi, fatorial completo e superfície de resposta.

O capítulo 3 apresenta os procedimentos experimentais passo a passo incluindo material e equipamentos utilizados, seleção inicial dos parâmetros, escolha das respostas para análise e projeto de experimentos e condução dos experimentos.

No capítulo 4, são analisados e discutidos todos os resultados obtidos nos experimentos. Com base nos resultados, é avaliada a eficácia da solução alternativa proposta para o monitoramento da qualidade em processos de soldagem a ponto por resistência.

O capítulo 5 finaliza o estudo, apresentando as conclusões da dissertação e as sugestões para trabalhos futuros.

Após o capítulo 5 são apresentadas as referências bibliográficas para a realização da dissertação.

2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 – Princípio de funcionamento da soldagem a ponto por resistência elétrica

A soldagem a ponto por resistência elétrica é dada pela junção de duas peças sobrepostas envoltas por dois eletrodos, superior e inferior, gerando calor através da passagem de corrente elétrica e aplicação de pressão no ponto de soldagem. Durante o processo de solda, ocorre uma fusão localizada no ponto de contato entre as peças, como pode ser observado na *Figura 2.1*.

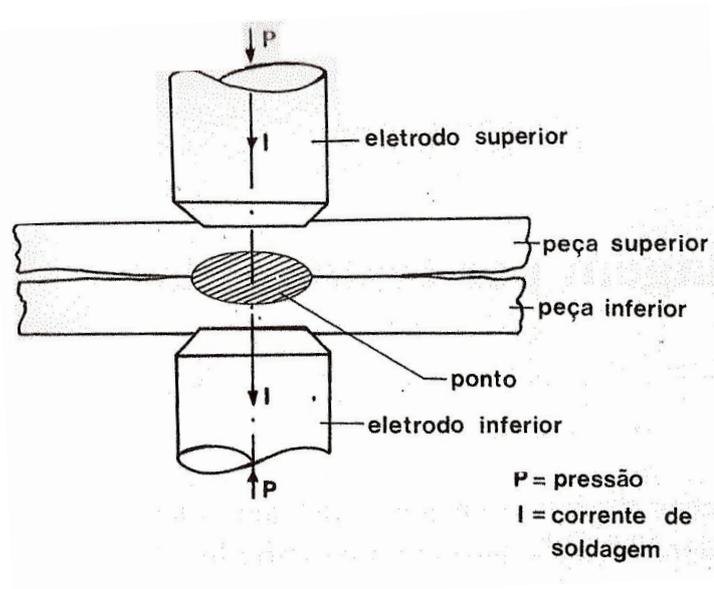


Figura 2.1– Princípio de funcionamento da soldagem a ponto por resistência

Fonte: Wainer, 1992

A resistência do conjunto, composta pela resistência de contato peça/eletrodo e peça/peça, à passagem da corrente elétrica, gera o calor necessário para a solda. A energia térmica total gerada pode ser calculada pela lei de Joule, cuja fórmula é expressa pela *equação 1*.

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

onde:

$J = 4,185J$; I = corrente de soldagem (A); R_T = conjunto de resistência elétrica (Ω);

dt = intervalo de tempo de passagem da corrente.

O calor gerado no processo de solda a ponto (*equação 1*) é proporcional ao quadrado da corrente de soldagem e diretamente proporcional à resistência e ao tempo. No balanço da distribuição do calor gerado, nota-se que parte deste gera a fusão no ponto de formação da solda e parte é dissipado para o material de base e eletrodo por condução, convecção e radiação (AURES, 2006). Considerando a mesma equação, pode-se deduzir que a corrente de soldagem exigida para produzir um ponto de solda é inversamente proporcional à raiz quadrada do tempo de soldagem. Assim, se o tempo for extremamente curto, a corrente exigida será muito alta (AWS, 1998).

A **Figura 2.2** mostra os efeitos compostos de geração de calor e sua dissipação nas peças de trabalho e eletrodos. Nota-se que existem sete resistências envolvidas no processo, associadas em série. Estas resistências, numeradas de 1 a 7 na **Figura 2.2**, são melhor caracterizadas de acordo com Aures (2006) como:

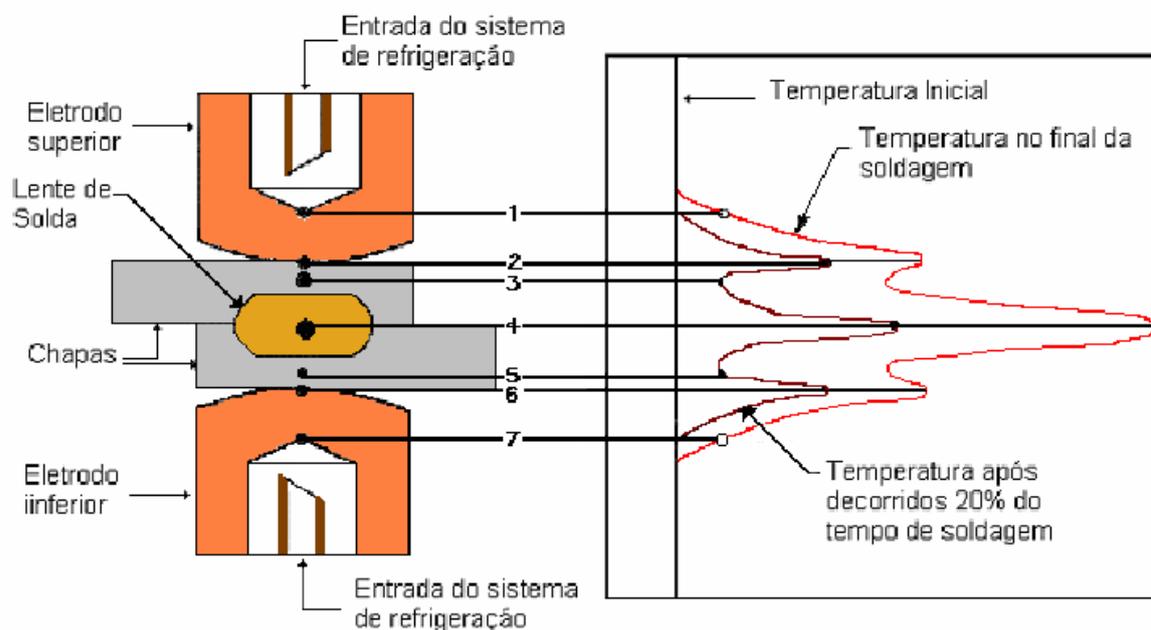


Figura 2.2– Pontos principais de calor nos eletrodos e gradiente de temperatura após 20% do tempo de soldagem e no final do processo.

Fonte: Aures, 2006

- Pontos 1 e 7: resistência elétrica do material do eletrodo;
- Pontos 2 e 6: resistência de contato entre os eletrodos inferior e superior e o metal das chapas. Essa resistência tem comportamento dinâmico possuindo variações devido a

fatores como as condições da superfície do metal das chapas e dos eletrodos, o tamanho e perfil da face dos eletrodos e a força aplicada por eles. Nestes pontos ocorre alta geração de calor, porém, não ocorre fusão devido a condutibilidade térmica dos eletrodos e ao fato de serem geralmente refrigerados a água.

- Pontos 3 e 5: resistência total das chapas a serem soldadas. Essas resistências são inversamente proporcionais à área da seção transversal por onde a corrente passa;
- Ponto 4: resistência de contato entre as chapas no local onde a solda deve ser formada. É o ponto de mais alta resistência, onde ocorre maior geração de calor. Essa resistência possui um comportamento dinâmico ao longo do processo podendo variar em função dos fatores controláveis e não controláveis do processo.

Apesar de o calor ser gerado em todos os pontos citados, este é requerido apenas nas interfaces entre as chapas e os eletrodos para que a soldagem ocorra. Pelo fato da maior resistência estar localizada no ponto 4, o calor é mais rapidamente desenvolvido nesse local. O calor gerado nos outros locais deve ser minimizado. O gradiente térmico com 20% do tempo de soldagem, é representado na *Figura 2.2* pela curva à esquerda. A curva a direita representa o gradiente térmico no final do tempo de soldagem (AWS, 1998).

Durante o período de aquecimento, a região fundida cresce e se torna contínua para formar a lentilha de solda (AWS, 1998). A aplicação da pressão garante a continuidade do circuito elétrico, permitindo a obtenção de soldas com baixo nível de contaminação pela expulsão da região contaminada para fora da junta. O resfriamento da junta é dado sob pressão após a realização da solda propriamente dita.

O processo de solda a ponto é muito utilizado na fabricação de peças e conjuntos, com chapas metálicas finas com espessura de até aproximadamente 3 mm. É aplicável em uma vasta gama de materiais como os aços carbono, aços inoxidáveis, aços galvanizados, Al, Cu, Mg, Ni e suas ligas entre outros (MARQUES, 2009).

2.2 - Parâmetros primários de soldagem

Para uma melhor caracterização do processo RSW se torna fundamental o conhecimento da influência dos principais parâmetros de soldagem na qualidade final do ponto de solda. Os parâmetros fundamentais que estão envolvidos no processo de soldagem a ponto por resistência elétrica são de acordo com a literatura: tempo de soldagem, intensidade

da corrente elétrica e a força/pressão aplicada entre os eletrodos. Esses parâmetros estão fortemente relacionados entre si e seus valores são fundamentais para determinar a qualidade do ponto de solda, e normalmente são ajustados de acordo com o tipo e a espessura do material a ser soldado. Em alguns casos deve-se também levar em conta o tipo de proteção superficial do material como é o caso, por exemplo, dos aços galvanizados (AURES, 2006; SANTOS, 2006).

2.2.1 - Intensidade da corrente

A corrente elétrica no processo de solda a ponto é responsável pelo aquecimento da área de soldagem. Quando a temperatura atinge certo nível, ocorre a fusão das chapas entre os eletrodos. A área fundida, que determina o tamanho do ponto de solda, esta relacionada com a intensidade da corrente. Existem limites inferiores e superiores que devem ser respeitados de acordo com as especificações das chapas soldadas para garantir a correta formação do ponto de solda. Esses limites também podem variar com a área de contato entre eletrodos e peças ou das peças entre si. Caso a corrente fique abaixo do limite inferior, a fusão poderá não ocorrer ou o diâmetro do ponto não irá atingir o tamanho necessário para garantir uma solda de qualidade (SANTOS, 2006). Caso o limite superior seja ultrapassado, ocorrerá deformação plástica de toda a seção sob a ação dos eletrodos e expulsão de material resultando em respingos durante a execução e formação de soldas fracas, fora dos padrões de qualidade. A resistência mecânica máxima na junta ocorre geralmente para valores de corrente ligeiramente abaixo do limite superior (MARQUES, 2009).

2.2.2 – Tempo de soldagem

O tempo de soldagem ocorre entre o início e o término da passagem de corrente elétrica. Este tempo pode ser diretamente relacionado com o poder de fusão entre as chapas soldadas, ou seja, é diretamente proporcional a quantidade de calor gerada na junta. O ajuste do tempo de soldagem varia de acordo com o tipo de material soldado, espessura das chapas e tratamento superficial, devendo assim ser otimizado em função dos demais parâmetros de soldagem (AURES, 2006). De acordo com a *equação 2.1*, quantidades iguais de calor podem ser geradas com diferentes parâmetros de tempo e corrente, desde que o produto entre o

quadrado da corrente e o tempo de solda mantenha-se constante. Desta forma, em teoria, soldas equivalentes podem ser obtidas para níveis diferentes de corrente se o tempo de soldagem for variado de forma conveniente. Porém, na prática isto não é totalmente verdade, pois um aumento no tempo de soldagem implica em uma diminuição da eficiência do processo devido ao fato de ocorrer uma perda maior de calor através de condução dos eletrodos e das peças antes de acontecer a fusão do material no ponto de solda. Para reduzir a extensão da zona termicamente afetada, é preferível trabalhar com correntes mais elevadas e tempos menores (MARQUES, 2009).

2.2.3 – Força/Pressão entre eletrodos

A força aplicada pelos eletrodos sobre as chapas durante o processo de soldagem é importante para a formação de uma junção adequada das chapas para formação do ponto de solda, estando indiretamente relacionada com a quantidade de calor gerada. A quantidade de força aplicada influencia na formação da resistência elétrica de contato entre as chapas, que por sua vez, está relacionada com a quantidade de calor gerada na zona de formação do ponto, sendo determinante na qualidade da solda (SANTOS, 2006).

Quanto maior a força aplicada, melhor o contato gerado e menor a resistência entre as chapas. Desta forma, uma força grande pode retardar o processo de fusão. Por outro lado, a aplicação de uma força muito pequena pode causar flutuações na resistência de contato, levando a alterações na qualidade dos pontos de solda ou até, em casos extremos, a abertura de arco elétrico entre as peças.

2.2.4 – Parâmetros secundários de soldagem

Embora os parâmetros determinantes para formação do ponto de solda tenham sido descritos anteriormente, existem alguns recursos que podem servir de ajuste fino ao processo, contribuindo para a formação do ponto de solda. Estes recursos podem amenizar a agressão a região afetada pelo calor ou ainda reduzir a emissão de respingos durante a passagem de corrente. Em contrapartida, a utilização desses pode demandar um tempo maior para conclusão da soldagem. (SANTOS, 2006)

2.2.4.1 – Pré-pressão e Pós-pressão

Os parâmetros de pré-pressão e pós-pressão estão relacionados a força entre os eletrodos, porém, referem-se a força/pressão dos eletrodos sobre as chapas antes e após a passagem de corrente. Embora sejam considerados parâmetros secundários, a pré-pressão e a pós-pressão aplicadas nas chapas podem influenciar na qualidade do ponto da solda.

O tempo de pré-pressão deve ser o suficiente para garantir a força total necessária aos eletrodos antes do início do fluxo de corrente. Caso a corrente seja liberada antes do estabelecimento de uma pressão adequada, pode haver formação de arco elétrico, que pode danificar os eletrodos e as peças. Após a passagem da corrente faz-se necessária a pós-pressão durante um tempo que garanta a solidificação do material no ponto de solda, impedindo a formação de espaços vazios no ponto (SANTOS, 2006).

Pode-se observar na **Figura 2.3**, uma relação esquemática de como a força entre os eletrodos deve ser estabelecida em relação a passagem de corrente elétrica para garantir a correta formação da solda (SANTOS, 2006).

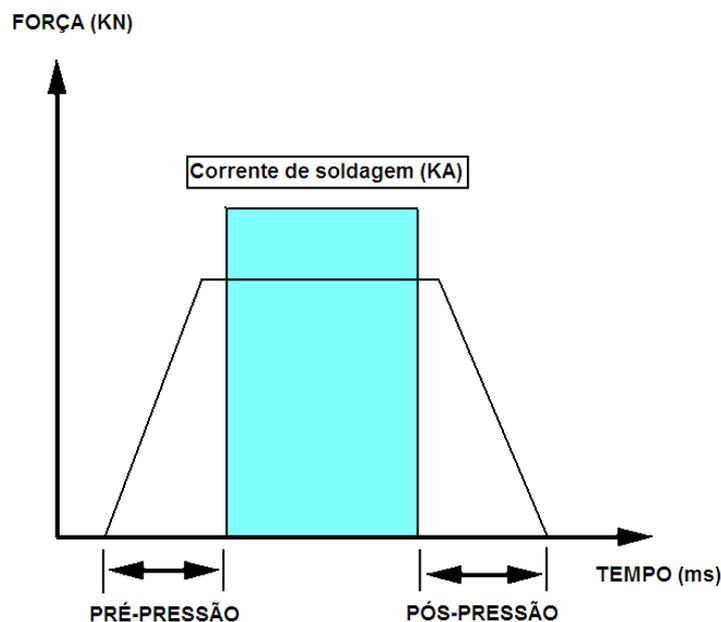


Figura 2.3– Força entre eletrodos x tempo
Fonte: Santos, 2006- Modificado

2.2.4.2 - Pré-aquecimento e pós-aquecimento

O pré-aquecimento constitui-se de uma corrente elétrica aplicada durante a soldagem que antecede a passagem da corrente programada. No caso de chapas com revestimento de Zinco (galvanizadas) ou outros tratamentos superficiais, a corrente de pré-aquecimento torna-se útil para queimar a camada revestida e garantir que a corrente de soldagem seja aplicada inteiramente na realização da soldagem. Outra função do pré-aquecimento aplicada em alguns tipos de materiais é diminuir a diferença de temperatura no início da solda objetivando reduzir a possibilidade de formação de trincas no ponto de solda.

O pós-aquecimento possui a função de amenizar o resfriamento do ponto de solda evitando possíveis trincas na região afetada pelo calor, sendo também conhecida como corrente de revenimento (SANTOS, 2006).

A **Figura 2.4** mostra o esquema de um ciclo de soldagem com pré-aquecimento e pós-aquecimento. Nota-se que existe um tempo de espera entre o tempo de soldagem e o pós-aquecimento. Este tempo também pode ser controlado em algumas máquinas de acordo com as propriedades e o comportamento do material soldado.

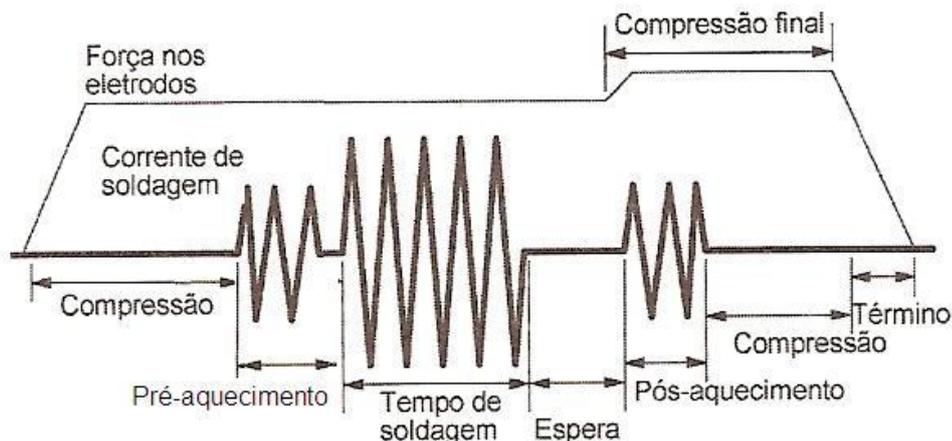


Figura 2.4 - Ciclo de soldagem com pré-aquecimento e pós-aquecimento
Fonte: Marques, 2009, Modificado

2.2.4.3 – Subida e descida de corrente

Após determinada corrente de soldagem, pode-se estabelecer que a corrente suba gradativamente até seu valor nominal obedecendo a uma rampa de subida programada. O tempo da subida de corrente pode ser ajustado de acordo com a necessidade do material. De forma análoga, pode-se utilizar deste recurso ao final da soldagem, fazendo com que a corrente diminua gradativamente segundo uma rampa de descida controlada até ser cessada, evitando assim uma interrupção abrupta da corrente.

A utilização desses recursos permite amortizar os efeitos da corrente de soldagem nas chapas através de uma aplicação mais suave, eliminando assim possíveis respingos e evitando a falta de fusão adequada no ponto de solda. Um esquema do ciclo de soldagem com subida e descida de corrente pode ser observado na **Figura 2.5**.

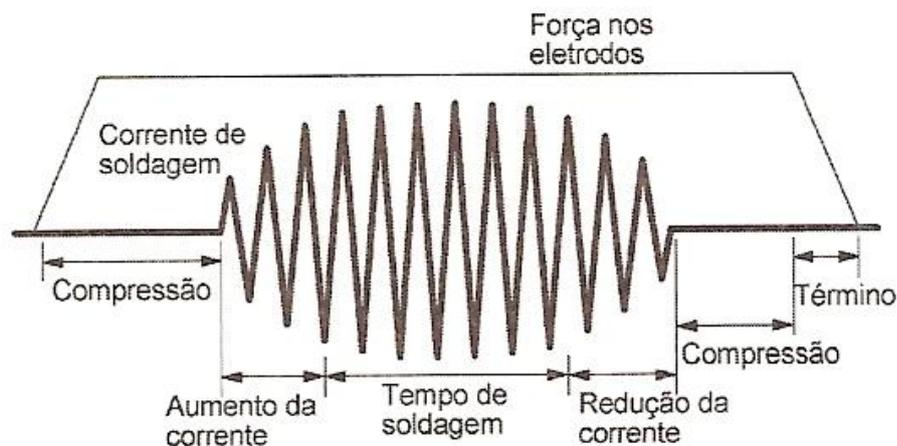


Figura 2.5 - Ciclo de soldagem com aumento e diminuição gradativas da corrente de soldagem
Fonte: Marques, 2009

2.2.4.4 - Impulsos de solda

Os impulsos de solda são geralmente aplicados a chapas mais espessas, onde é necessário tempo de soldagem maior. Isso se dá pelo fato do tempo de soldagem em conjunto com a corrente necessária para fusão, provocar o superaquecimento das chapas e expulsão de material em forma de respingos. A corrente aplicada em forma de impulsos pode evitar essa situação dividindo o tempo de passagem de corrente durante o tempo de soldagem em

intervalos iguais, reduzindo assim seu valor absoluto. As **Figuras 2.6a** e **2.6b** mostram a distribuição dos tempos de passagem de corrente de soldagem aplicados de forma contínua e por impulsos respectivamente. Pode-se notar que durante um mesmo período, a quantidade de corrente aplicada na forma de impulsos é menor do que a quantidade aplicada de forma contínua, o que leva a um menor aquecimento das chapas.

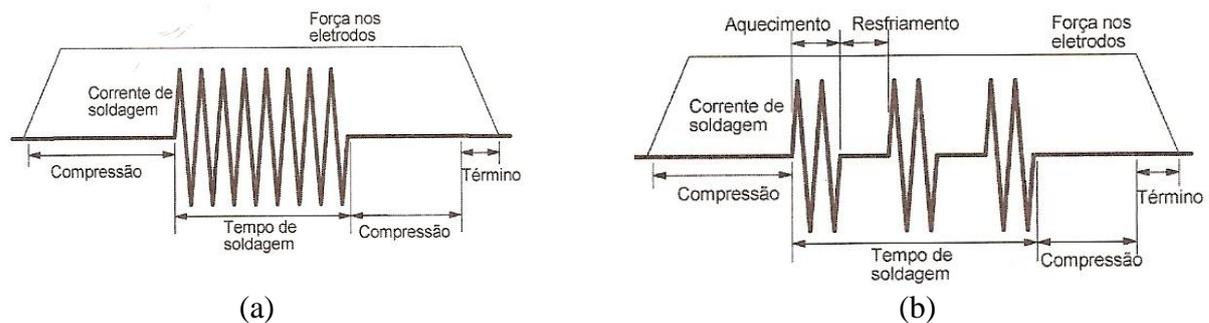


Figura 2.6 - Ciclo de soldagem. (a) com impulso único; (b) com impulsos múltiplos
Fonte: Marques, 2009

2.3 – Outros fatores que influenciam no processo de soldagem a ponto por resistência

Além dos parâmetros vistos anteriormente que podem ser ajustados para efetuar os pontos de solda, existem outros fatores presentes nos processos de soldagem a ponto que influenciam diretamente na corrente de soldagem, interferindo no calor gerado e causando possíveis variações na qualidade de solda para solda. Mesmo com um ajuste otimizado das variáveis do equipamento, o processo de soldagem está sujeito a oscilações devido a fatores tais como as condições da superfície das chapas e o desgaste da ponta do eletrodo entre outros (CHANG, 1990; AURES, 2006).

2.3.1 – Condições da superfície do material base

As condições da superfície dos materiais a serem soldados podem interferir diretamente na resistência de contato entre peças e eletrodos fazendo com que essa aumente. O aumento irregular da resistência de contato pode levar a um aumento demasiado da temperatura entre os eletrodos e as chapas, impactando em diferentes formas e tempos de fusão das chapas devido a presença dos corpos estranhos. Portanto, as variações na resistência e na fusão causadas pela presença de impurezas tais como poeira, óxidos, óleos, graxas, etc.,

podem resultar em variações na qualidade do ponto de solda ou mesmo deteriorações nos eletrodos.

O encaixe entre as chapas é outro fator determinante para formação da solda, pois também está relacionado com a resistência de contato gerada. Irregularidades no encaixe entre as chapas irão impactar no aumento da resistência gerada levando a flutuações na qualidade dos pontos e, em casos extremos, a abertura de arco elétrico entre as peças.

2.3.2 – Desgaste dos eletrodos

A densidade da corrente de soldagem está diretamente ligada a área da face do eletrodo. A deformação do eletrodo causada ao longo do seu uso faz com que sua área de contato aumente. O resultado dessa mudança de área, considerando que a resistência de contato e a força do eletrodo variam inversamente, é a diminuição da pressão do eletrodo e o aumento das resistências de contato, o que implica na elevação da taxa de calor gerada nas chapas (AWS, 1998). As mudanças no calor levam a falhas nas dimensões e características do ponto de solda e, portanto, na sua qualidade.

No processo de soldagem, o calor gerado na superfície de contato entre a ponta dos eletrodos e a chapas, considerando a constante repetição das soldas, pode gerar incrustações ou ligas entre o cobre do eletrodo e o material soldado. No caso de materiais revestidos, tais como aços carbono com tratamento de zinco, a formação das ligas ocorre mais rapidamente podendo levar a formação de uma capa de latão na ponta do eletrodo. A menor condutividade elétrica e térmica da capa de latão formada faz com que essa parte do eletrodo aqueça mais rapidamente ocasionando seu desgaste prematuro. Muitos estudos tais como Mei et al (2009) , Tang et al (2003), tem sido conduzidos no intuito de aumentar a vida dos eletrodos.

2.3.3 – Condutibilidade térmica e dissipação do calor

Durante a soldagem, o calor é perdido por condução para o metal base adjacente e para os eletrodos. A dissipação de calor ocorre em taxas variáveis durante a aplicação da corrente e após o seu término, até o resfriamento completo da solda. Os eletrodos ao permanecerem em contato com o material após a corrente de soldagem ter cessado, proporcionam o rápido resfriamento da lente de solda. A taxa de dissipação de calor no metal base circundante decresce com tempos de soldagem mais longos porque um volume maior de metal base terá sido aquecido (AWS, 1998).

A resistividade elétrica de um metal influencia diretamente no aquecimento por resistência durante soldagem. Em metais de alta condutibilidade térmica tais como Ag e Cu, pouco calor é desenvolvido mesmo sob altas densidades de corrente. A pequena quantidade de calor gerado é rapidamente transmitida para dentro do material circundante e para os eletrodos (AWS, 1998). A composição de um metal determina seu calor específico, temperatura de fusão, calor latente de fusão e condutibilidade térmica. Estas propriedades governam a quantidade de calor requerida para fundir o metal e produzir uma solda (AWS, 1998).

2.3.4 – Materiais e espessuras das chapas dissimilares

Cada material possui características próprias incluindo propriedades térmicas e elétricas, temperatura de fusão, faixas de deformação plástica e ligas que podem ser formadas no ponto de solda. Muitas vezes estas características podem dificultar a realização das soldas.

Modificações dos planos de solda e o uso de eletrodos com menor área de contato e menor condutividade elétrica e térmica em contato com o material de maior condutividade, por exemplo, tenderá a melhorar o balanço de calor. Segundo Gedeon (1984), quando o material a ser soldado é muito fino, ocorre uma diminuição na vida dos eletrodos devido ao fato das perdas de calor, desde a superfície de contato das chapas pela água de refrigeração dos eletrodos serem maiores em materiais de menor espessura, resultando em um maior aquecimento dos eletrodos. A presença de Zinco na superfície da chapa também contribui para o desgaste dos eletrodos, pois incrementa a condutividade térmica através da interface do eletrodo.

2.3.5 – Efeito *Shunt*

Em situações práticas, uma solda é feita após outra com um intervalo curto de tempo entre elas. Dessa forma, a solda adjacente afeta a qualidade da solda subsequente devido ao efeito de desvio da corrente que flui através de ponto de solda existente. Este efeito é o chamado efeito “*shunt*” e é uma fonte de variação de qualidade (CHANG, 1990). Neste trabalho esse efeito não será considerado pelo fato dos experimentos serem conduzidos em amostras com um único ponto de solda.

2.3.6 – Desalinhamento dos eletrodos

O desalinhamento entre os eletrodos, seja axial ou angular, resulta em distribuições assimétricas na aplicação da força do eletrodo e na passagem de corrente, podendo causar formas irregulares e medidas reduzidas do ponto de solda. (AURES, 2006). Este desalinhamento pode resultar de uma deflexão sob uma força aplicada durante o processo ou pode estar presente mesmo na aparência de eletrodos alinhados sem carga ou muito pouca carga. Como consequência pode haver uma redução na área de contato, o que afeta na densidade de corrente e em uma distribuição de pressão errada devido à deflexão induzida (TANG, 2003).

Segundo Karagoulis (1994), um desalinhamento de 40% do eixo dos eletrodos leva a uma diminuição da área de contato de aproximadamente 50% da área total da face do eletrodo, o que causa aumento da densidade de corrente. Portanto, deve-se procurar o correto alinhamento dos eletrodos durante a soldagem visto que um desalinhamento induz a características desfavoráveis ao processo e a perda de qualidade da solda. (AURES, 2006)

2.4 – Qualidade da solda a ponto por resistência elétrica

O processo de soldagem RSW, como mencionado anteriormente, vem sendo amplamente aplicado em diferentes setores industriais, tais como indústrias automotivas, eletrônicas, nucleares, entre outras, devido a sua rapidez e boa adaptabilidade à automação para grandes volumes, além de apresentar um custo relativamente baixo. Com a alta velocidade deste processo para a realização de cada ponto de solda (*nugget*), suas aplicações industriais exigem um controle mais apurado dos parâmetros visto o mesmo apresentar frequentemente uma inconsistência na qualidade de solda para solda considerando a grande quantidade de variáveis envolvidas, tais como corrente e tempo de soldagem, pressão e desgaste do eletrodo, diferentes condições das peças a serem soldadas, etc.

Basicamente, para gerar uma solda de qualidade, é de vital importância a obtenção de um tamanho apropriado do ponto de solda, principalmente na direção do eixo vertical z (**Figura 2.7**), que define a penetração da solda. Uma penetração aceitável deve estar entre 0,6 e 0,7 vezes o tamanho da espessura das duas peças. (JOU, 2003).

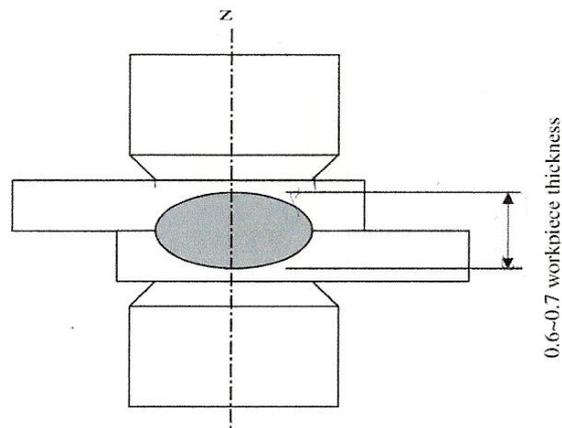


Figura 2.7 - Penetração da solda
Fonte: Jou, 2003

A qualidade da solda deve envolver, além da aparência, sua força. Estes são requisitos fundamentais para os padrões que as indústrias demandam. No chassi de um automóvel, por exemplo, deve-se garantir a integridade estrutural e evitar vibrações e ruídos. Porém, garantir qualidade consistente em uma linha de produção real não é uma tarefa fácil. Para isso existem inúmeros métodos para verificar a qualidade dos pontos de solda. Uma prática bastante comum na indústria é a medição das dimensões do ponto de solda (**Figura 2.8**) após a separação das chapas. Estas medidas são correlacionadas, através de um padrão, com a força da solda. Embora este método seja bastante conveniente, sua precisão é comprometida pelo fato de não levar em conta os defeitos invisíveis como, por exemplo, a penetração da solda (LING, 2009).

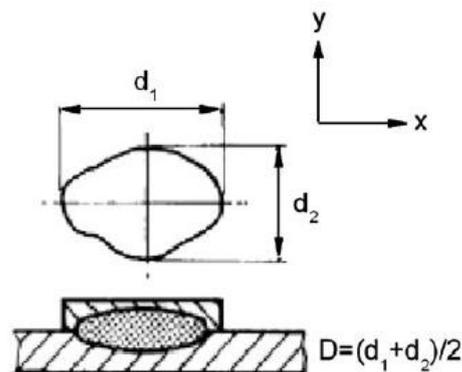


Figura 2.8 - Medição das dimensões do ponto de solda
Fonte: Ling et al.(2009)

Uma solda pode ser examinada usando procedimentos de ensaios destrutivos e não destrutivos. Os ensaios destrutivos são bastante utilizados e confiáveis, porém, são feitos por amostragem. Desta forma, não há a garantia de que todas as soldas estejam na qualidade requerida, uma vez que as condições de soldagem podem variar de uma solda para outra por diversas razões (ANDREWS, 1975).

Vários métodos de inspeção são, portanto, utilizados, os quais serão descritos a seguir para melhor compreensão.

2.4.1 – Inspeção Visual

Segundo Aures (2006), a superfície de um ponto de solda deve ser uniforme na forma, relativamente plano e livre de fusão superficial, indentação profunda dos eletrodos, trincas, descoloração ao redor da solda e outros fatores que indicam necessidade de manutenção dos eletrodos ou funcionamento impróprio do equipamento. Entretanto, a aparência superficial não é sempre um indicador confiável da qualidade da solda já que o desvio de corrente e outras causas que provocam o aquecimento insuficiente ou penetração inadequada, usualmente, não deixam efeitos visíveis nas chapas.

Todas essas consequências da solda, além de degradarem o aspecto da superfície, podem dar a impressão de que a solda é defeituosa, como o caso da descoloração ao redor da solda, evidente em aço revestido. Porém, em alguns casos esses fatores não são possíveis de serem eliminados.

2.4.2 – Indentação

A indentação é um fenômeno comum nos processos de solda a ponto. Este ocorre quando a resistência compressiva do material em contato com o eletrodo diminui à medida que a fusão avança, permitindo, deste modo, que a face do eletrodo se movimente para dentro da superfície da peça de trabalho (*Figura 2.9*). A indentação pode ser grande quando um eletrodo com uma área superficial pequena for empregado com pressão e densidade de corrente excessivamente altas.

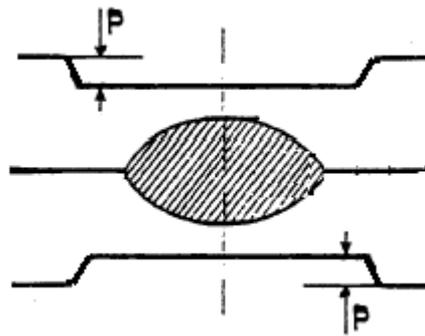


Figura 2.9 - Avaliação geométrica da indentação

A indentação assimétrica, que usualmente produz uma aresta semicircular na periferia da solda, é causada ou pelo deslocamento lateral do eletrodo em relação à superfície ou por um eletrodo com o contorno da face simétrico que se aproxima da superfície de trabalho em ângulo (AWS,1998). O controle da indentação é bastante utilizado nas indústrias como uma forma de controlar a qualidade dos pontos de solda. O limite máximo de indentação usualmente adotado corresponde a 20% da espessura das chapas soldadas (ASLANLAR, 2006). Porém, este limite pode oscilar de acordo com os critérios de aparência e resistência exigidos.

2.4.3- Ensaios destrutivos

Nestes ensaios a qualidade da solda é determinada pelas informações obtidas sobre um grupo de amostras aleatórias nas quais são realizados os testes necessários de resistência do ponto.

- Teste de cisalhamento

O teste por tensão cisalhante consiste na aplicação de forças de separação nas duas peças unidas. Estas forças são opostas e agem em uma direção paralela à superfície da peça, conforme ilustrado na **Figura 2.10**.

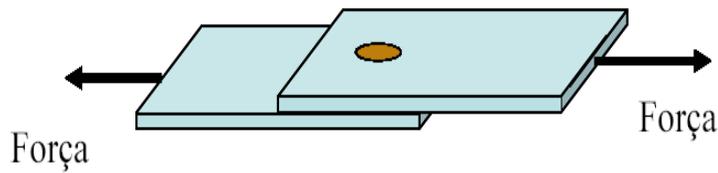


Figura 2.10 - Esquema para ensaio de cisalhamento
Fonte: Aures (2006).

O corpo de prova é carregado até a sua ruptura sob tensão numa máquina padrão para o teste. As dimensões do corpo-de-prova para este teste são especificadas através de norma, como será visto posteriormente nos procedimentos experimentais. A avaliação da solda é feita em função do valor máximo da carga utilizada para romper o corpo de prova, assim como o modo de ruptura do ponto que, em chapas de até 2 mm de espessura deve se dar pelo rompimento do metal base adjacente ao ponto, causando arrancamento da lente de solda de uma das chapas ou rasgamento da chapa ao redor da solda, o que está associado com a alta resistência da junção. (*Figura 2.11b*). Por outro lado, o rompimento da junta de forma interfacial na lente de solda (*Figura 2.11a*), está associado à baixa resistência (GOODARZI et al, 2009).

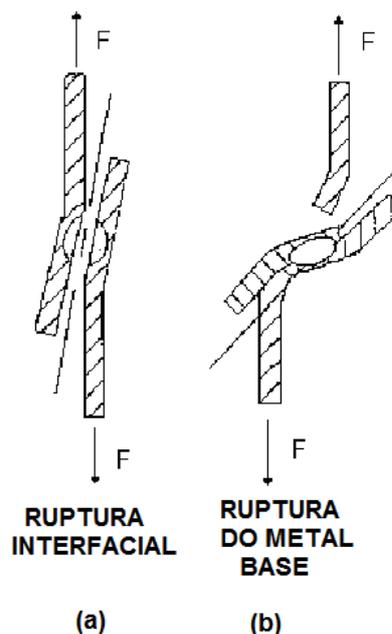


Figura 2.11 - Tipos de falha em teste de resistência ao cisalhamento como função da rotação do corpo-de-prova (AURES, 2006).

Em geral, um diâmetro de lente de solda deve ser cerca de 4 vezes a raiz do valor da espessura da chapa para que a falha por rompimento do metal base ocorra. Porém, o diâmetro da lente de solda pode ser menor dependendo do equipamento utilizado e da finalidade a que tal solda destina-se (INTERMACHINERY, 2002).

A resistência ao cisalhamento das soldas aumenta rapidamente no intervalo entre os níveis de solda mínima e expulsão. Resultados mostram que a resistência ao cisalhamento ainda é mantida em correntes acima do limite de expulsão de modo que soldas aceitáveis em termos de resistência ainda são obtidas. Entretanto, a expulsão é indesejável por uma série de razões, entre elas, a segurança do operador e o perigo de incêndio. Também deve ser evitada porque acredita-se que ela reduz a vida da ponta do eletrodo e isto é de importância fundamental quando se solda aços com revestimento metálico. É recomendado, portanto, soldar numa corrente um pouco abaixo da de expulsão (INTERMACHINERY, 2002).

A dureza da zona de fusão exerce algum efeito na resistência por tensão cisalhante, mas ela contribui ainda mais para a falha na solda quando esta é submetida a forças de impacto ou vibração. Para esta situação, uma dureza excessiva pode resultar em falhas devido à trincas e fadiga.

- Teste de tração axial

Neste teste, a solda é tensionada na direção normal à superfície do material. O procedimento adotado a nível industrial pode ser visto na **Figura 2.12**: o corpo de prova é dividido em três regiões iguais e suas bordas são dobradas a 90 graus num dispositivo adequado formando um “U”. Este corpo de prova é soldado a um outro corpo de prova com a mesma forma, formando uma estrutura em forma de “H” e o conjunto assim formado é, então, tracionado axialmente.



Figura 2.12 - Formato do corpo de prova utilizado no teste de tração axial
Fonte: Intermachinery, 2002

- Teste de arrancamento

Este teste é usado para determinar a soldabilidade a ponto em todas as espécies automobilísticas. Existem várias razões para o seu amplo uso tais como facilidade de execução, baixo custo e a larga utilização em chão de fábrica para controle de qualidade (AURES, 2006). Neste teste, após os corpos de prova terem sido soldados, eles são levados a um dispositivo de fixação e com auxílio de uma ferramenta apropriada, são dobrados fazendo-se o arrancamento da lente, como pode ser observado na **Figura 2.13**. Em seguida, mede-se o diâmetro da lente de solda em duas direções perpendiculares. A qualidade da solda é avaliada pelo diâmetro da lente de solda que ficará aderido a uma das partes após separação (POWELL *et al.*, 1996).

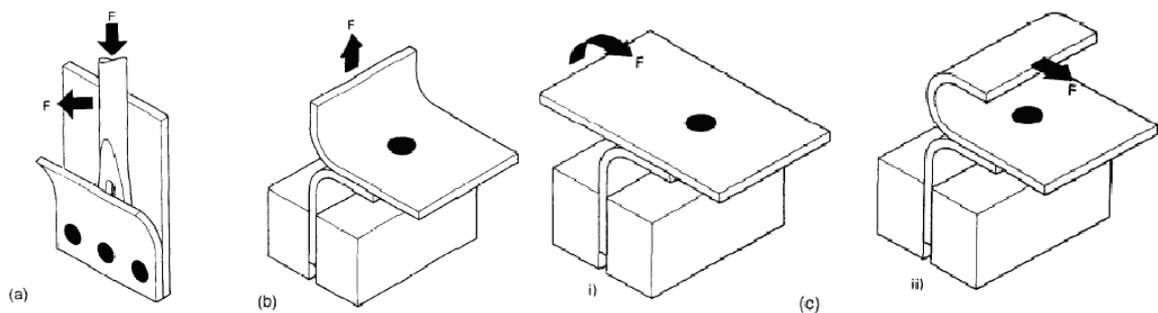


Figura 2.13 – Rotina de testes para arrancamento: a) Com chave tipo pé de cabra, b) Teste mecânico e c) Teste tipo descascamento Fonte: Aures, 2006

Os testes de qualidade baseados em ensaios destrutivos são considerados muitas vezes ineficazes pelo fato de serem aplicados a um pequeno número de amostras, fora da linha de produção. Levando isso em conta, as fábricas aplicam em muitos casos, pontos de solda além dos originais de projeto para reduzir os riscos de falha, o que acaba acarretando em custos extras. Com base neste aspecto, existe uma demanda natural de otimização do processo, havendo assim a necessidade de monitoramento da qualidade de soldagem de forma não destrutiva e em tempo real (ZHANG, 2009)

A **Tabela 2.1** apresenta alguns autores que utilizaram ensaios destrutivos para otimizar o processo de soldagem a ponto.

Tabela 2.1 – Autores que utilizaram ensaios destrutivos

TRABALHOS COM ENSAIOS DESTRUTIVOS				
AUTOR/ANO	PRINCIPAIS VARIÁVEIS	RESPOSTAS AVALIADAS	ATERIAL UTILIZADA	TÉCNICAS DOE
Goodarzi et al. (2009)	Corrente de soldagem , tempo de soldagem , força do eletrodo, espessura das chapas	Força de cisalhamento, análise micro estrutural, identificação, modo de falha	Alumínio (1.1mm)	Não utiliza
Pereira et al. (2009)	Corrente de soldagem , tempo de soldagem , força do eletrodo	Força de cisalhamento e arrancamento, dureza, análise micro-estrutural, diâmetro do ponto	Alumínio (1mm)	Não utiliza
Martin et al. (2009)	Corrente de soldagem , tempo de soldagem , força do eletrodo	Força de cisalhamento	Aço tratado (0.8mm)	Utiliza
Aslanlar (2004)	Corrente de soldagem , tempo de soldagem , força do eletrodo,	Força de cisalhamento e arrancamento, diâmetro do ponto	Aço tratado (1mm/0.8mm)	Não Utiliza
Rowlands e Jiju (2003)	Corrente de soldagem , tempo de soldagem , força do eletrodo, diâmetro do eletrodo, distância entre soldas	Força de cisalhamento	Aço	Utiliza
Lin et al. (2007)	Corrente de soldagem, tempo de soldagem, força do eletrodo, área de contato do eletrodo	Força de cisalhamento	Aço tratado	Utiliza
Cho et al. (2006)	Corrente de soldagem, tempo de soldagem, força do eletrodo, área de contato do eletrodo, tamanho do eletrodo, encaixe entre chapas	Dimensões do ponto de solda (diâmetro e lentilha)	Alumínio (2mm)	Utiliza
Darwish et al. (1999)	Corrente de soldagem , tempo de soldagem , força do eletrodo, espessura das chapas	Força de cisalhamento e diâmetro do ponto de solda	Alumínio (várias espessuras)	Utiliza

2.5 – Métodos não destrutivos de monitoramento da qualidade

Muitos métodos já foram desenvolvidos para monitorar a qualidade no processo de soldagem a ponto de forma não destrutiva. Os sinais utilizados para fornecer uma estimativa da qualidade do ponto de solda variam entre sinais de deslocamento, de força, elétricos, acústicos e ultra-sônicos. A **Tabela 2.2** mostra alguns trabalhos que já exploraram esses métodos.

Savage et al. (1978) introduziram o conceito de “resistência de contato dinâmica” para investigar o processo de soldagem a ponto. Foi percebido que a resistência entre os eletrodos

poderia ser mensurada dividindo-se a tensão pela corrente do circuito secundário nos seus respectivos valores de pico a cada meio ciclo. Vários autores passaram a utilizar a resistência dinâmica como uma forma de medir a qualidade da solda de maneira não destrutiva e em tempo real. Dicknson et al. (1980) sugeriram uma nova alternativa para coletar a resistência de contato dinâmica através da medição dos valores dos sinais de tensão e corrente monitorados usando um circuito analógico. Livshits (1997) afirma que este método pode ser implementado sem a necessidade de sensores de difícil operação para medir os parâmetros elétricos, e possibilita o controle da qualidade da solda em tempo real. Para que isso ocorra é necessário identificar através da curva de resistência dinâmica o local onde a solda atinge o ponto ótimo, que está diretamente relacionado com sua qualidade.

Tabela 2. 2 – Autores que utilizaram ensaios não destrutivos

TRABALHOS ENVOLVENDO ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS			
AUTOR/ANO	VARIÁVEIS ESTUDADAS	RESPOSTAS AVALIADAS	MATERIAL
Podrzaj et al. (2005)	Tempo para queima do revestimento e força da solda	Sinais acústicos	Aço tratado
Dennison et al. (1997)	Tempo de soldagem, tempo pré solda - tempo pós solda	Sinais acústicos	x
Martín et al. (2007)	Corrente de soldagem, tempo desoldagem	Sinais ultra-sônicos	Aço (1mm)
Chein et al. (2002)	Corrente de soldagem, tempo de soldagem, força do eletrodo	Sinais de deslocamento do eletrodo e força, sinais acústicos e sinais elétricos	Aço tratado (0,8mm)
Farson et al. (2003)	Corrente e tempo de solda e pré solda	Sinais de força e deslocamento do eletrodo, sinais elétricos	Aço tratado(0.25mm)
Cullen et al. (2007)	Desgaste do eletrodo	Sinais ultra sônicos, sinais elétricos, sinais de infra vermelho	Aço tratado (0,8mm/2mm)
Mei et al. (2009)	Desgaste do eletrodo	Sinais elétricos	Aço tratado (0,8mm)
Tan et al. (2007)	Corrente de soldagem, tempo de soldagem	Sinais elétricos	Ni (0,2mm)
Cho et al. (2004)	Corrente de soldagem	Sinais elétricos, força de cisalhamento	x
Ling et al (2009)	Corrente de soldagem	Sinais elétricos, força de cisalhamento, dimensões do ponto	Aço (0,5mm)
Lee et al. (2001)	Corrente de soldagem, tempo de soldagem, força do eletrodo	Sinais de deslocamento de eletrodo e sinais eletricos	Aço tratado (0,8mm)
Chen et al. (2004)	Corrente de soldagem	Sinais de deslocamento de eletrodo	x
Jou (2003)	Calor de soldagem, encaixe entre as chapas, desgaste do eletrodo	Sinais de deslocamento de eletrodo	Aço (diversos)
Wang et al. (2009)	Corrente de soldagem, tempo de soldagem, força e desgaste do eletrodo	Sinais de deslocamento de eletrodo	Aço tratado
Zhang et al. (2007)	Corrente de soldagem, tempo de soldagem, força e desgaste do eletrodo	Sinais de deslocamento de eletrodo	Aço tratado

A curva típica de resistência dinâmica entre os eletrodos em função do tempo durante o processo de soldagem pode ser vista na **Figura 2.14**. Pode-se observar que inicialmente há uma redução na resistência (1). Esta redução ocorre devido ao aumento do contato e diminuição do espaço entre os eletrodos. Quando o ponto de resistência mínima é alcançado pode-se dizer que foi estabelecido um bom contato entre as duas chapas a serem soldadas e entre os eletrodos e as chapas. Na fase seguinte (2), ocorre um aumento da resistência que está associado, em sua maior parte, ao aumento da resistência do material devido ao seu aquecimento durante a soldagem. Quando ocorre a fusão no ponto de solda, o calor gerado causa um afastamento entre as pontas dos eletrodos, que por sua vez, causa a redução da corrente. A medida que o ponto de solda se expande, a resistência dinâmica passa a cair novamente (3) até atingir o seu valor terminal, quando o tamanho final do ponto de solda é atingido.

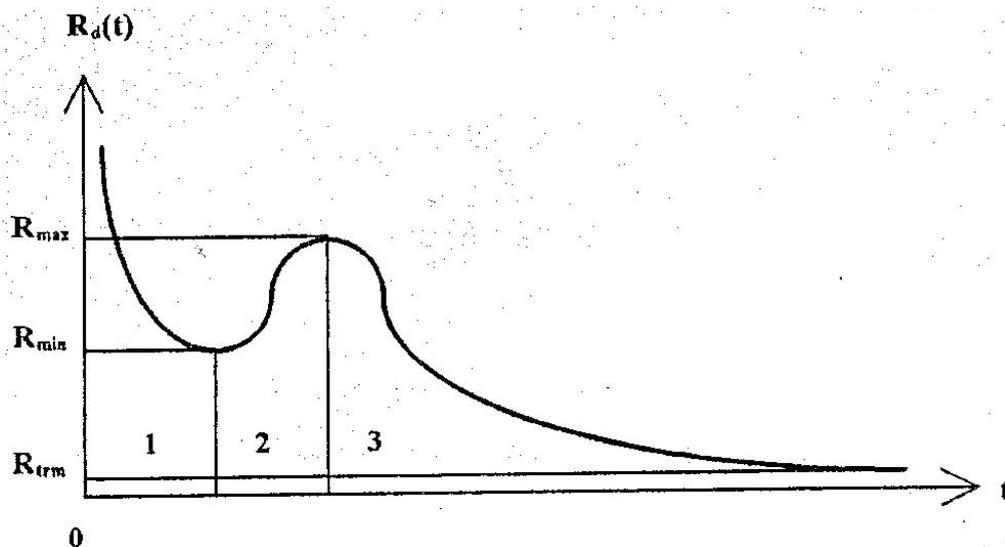


Figura 2.14 - Curva típica de resistência dinâmica durante a soldagem.
Fonte: Livshits (1997).

Uma dificuldade encontrada nos métodos de medição da resistência dinâmica diz respeito a falta de precisão das medidas devido a alta variação da resistência ao longo do tempo, principalmente considerando os ruídos e interferências que estão presentes em ambientes industriais, o que gera uma alta descontinuidade do sinal. O sinal pode ser tratado em laboratório, porém em situações práticas na indústria, a utilização desses equipamentos de tratamento de sinal pode se tornar cara e inviável (Cho e Rhee,2000; Ling, 2009).

Com base nas dificuldades encontradas para obter a resistência dinâmica através do circuito secundário, Cho e Rhee (2000) propuseram a medição da resistência dinâmica coletando os parâmetros do circuito primário ou do “timer” da máquina de solda, tornando o processo de medição mais robusto e aplicável na indústria, evitando assim a instalação de dispositivos extras para tratar o sinal. A **Figura 2.15** mostra o esquema para obtenção dos sinais de resistência dinâmica através dos circuitos primário e secundário.

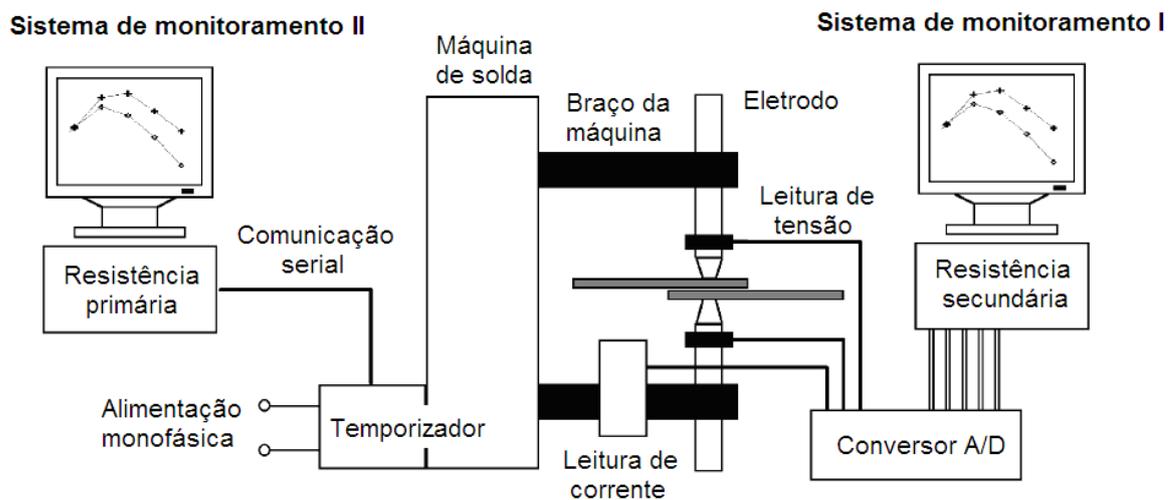


Figura 2.15 - Diagrama esquemático para obtenção da resistência dinâmica através dos circuitos secundário (sistema I) e primário (sistema II) Fonte : Cho (2000) – Adaptado

Mais recentemente Ling (2009) utilizou o sinal de impedância de entrada como um sinal para o monitoramento da qualidade no processo de soldagem a ponto por resistência. A impedância de entrada possui vantagem sobre a resistência dinâmica por ser uma propriedade inerente em um sistema dinâmico e não variar tanto devido as mudanças nas condições do sistema tornando assim o método mais robusto nas aplicações industriais. A variação nas condições do sistema são refletidas de forma coletiva na impedância de entrada.

Este método considera que um sistema de soldagem a ponto por resistência pode ser representado por um circuito elétrico equivalente que consiste de uma resistência (R), uma indutância (L) e uma capacitância (C) em série, como pode ser observado na **Figura 2.16**. A impedância de entrada deste circuito é definida pelo quociente entre a tensão de excitação e a corrente de resposta que flui pelo circuito. A impedância de entrada é representada em função dos parâmetros RLC na forma de um número complexo, que depende da frequência. A parte real representa a resistência e a parte imaginária representa a reatância do circuito elétrico. A

parte real e a parte imaginária refletem a variação na resistência ponto a ponto durante todo o processo de soldagem e estão associados à qualidade da solda. Através de um analisador dinâmico de sinal torna-se possível calcular a impedância e separar a parte real da parte imaginária no domínio do tempo.

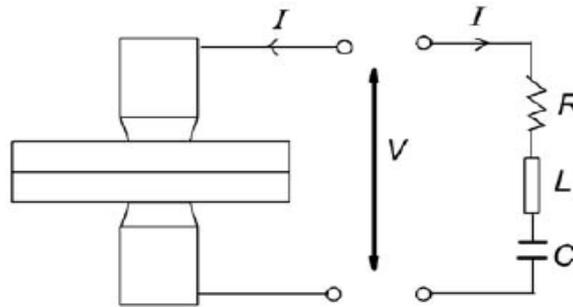


Figura 2.16 – Circuito RLC equivalente entre os eletrodos.
Fonte: Ling (2009).

Outra alternativa que possibilita analisar com precisão as propriedades físicas da solda tais como dimensões, porosidade e penetração, está baseada no conceito de ondas de ultra-som. Este método é explorado na literatura por autores como Martín et al. (2006) e Cullen et al. (2007). A **Figura 2.17**, mostra um exemplo de oscilograma ultra-sônico gerado para avaliar a qualidade da solda. De acordo com as amplitudes e distância entre os picos do sinal gerado, pode-se obter informações referentes a qualidade. Devido a dificuldade de interpretação dos sinais ultra-sônicos, autores tem utilizado esta técnica conjugada com a aplicação de redes neurais como método para facilitar a obtenção da qualidade a partir das informações obtidas pelo ultra-som (MARTÍN et al., 2006).

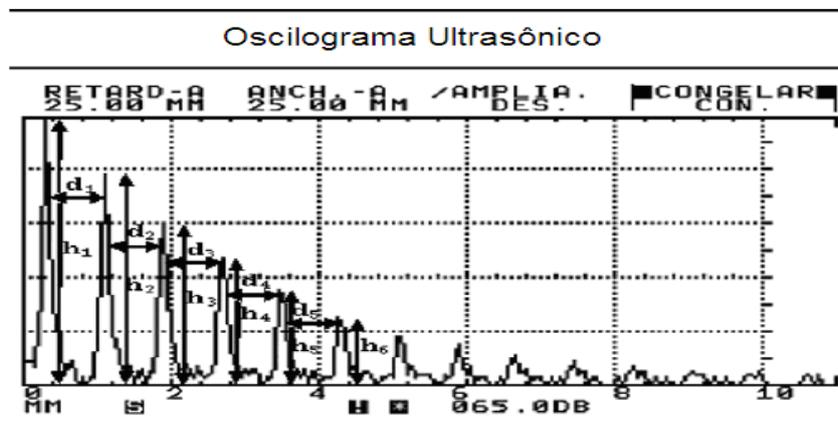


Figura 2.17 – Ondas ultra-sônicas geradas a partir processo RSW.
Fonte: Martín (2006).

Embora a aplicação das ondas de ultra-som possa dar um diagnóstico preciso a respeito da qualidade do ponto de solda, a dificuldade de adaptação do equipamento, seu alto custo e habilidade requerida para instalação e operação tornam essa técnica mais propícia de ser utilizada em amostras fora do ambiente de produção. Porém, é possível integrar as informações coletadas via ultra-som com outros sensores para monitorar a qualidade da solda em tempo real, como foi feito na proposta trazida por Cullen et al.(2007). Outros autores tais como Chein et al (2002) e Farson et al (2003) fizeram uso de sistemas multi-sensores incluindo a utilização de sinais elétricos, sinais de ultra-som e infra vermelho, sinais de deslocamento e força e sinais acústicos, visando o controle da qualidade do ponto de solda.

Sinais gerados de emissões acústicas também podem fornecer um indicativo de qualidade da solda de maneira não destrutiva. Este método é explorado na literatura por autores como Podrzaj et al.(2005) e Dennison et al.(1997) e está baseado na correlação entre sinais acústicos emitidos durante o processo de soldagem, e a força da solda. As ondas de som são geradas durante o processo de soldagem a ponto através da liberação de energia dentro do material das chapas ou através da vibração da estrutura da máquina de soldagem. O som propaga-se pelas chapas, eletrodos e pelo ar (PODRZAJ, 2005).

Pode-se observar na **Figura 2.18** um exemplo de sinal acústico emitido durante o processo de soldagem.

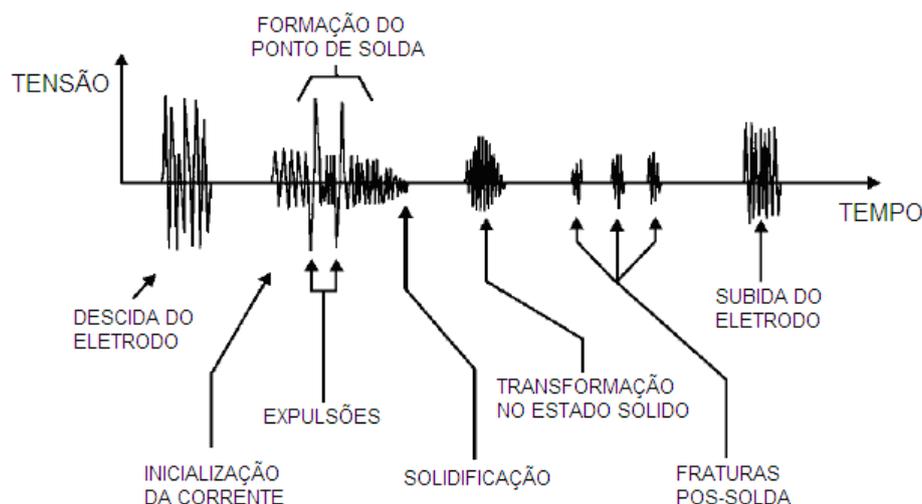


Figura 2.18 – Sinal acústico emitido durante o processo de soldagem
Fonte: Podrzaj et al. (2005).

Algumas dificuldades encontradas no método de emissões acústicas dizem respeito a mudanças constantes de posicionamento entre os sensores e o ponto de solda e os ruídos dos sinais emitidos pelos sensores acústicos, o que faz sua aplicação mais cabível em amostras

fora da linha de produção (LING, 2009). Os sensores acústicos geralmente possuem valores elevados e são bastante vulneráveis à ruídos e interferências (PODRZAJ et al, 2005).

Além das formas vistas anteriormente para coletar informações através de sensores que possam indiretamente refletir a qualidade da solda incluindo tensão, corrente, impedância de entrada, sinais sônicos/acústicos e ultra-som, outro sinal referente a movimentação do eletrodo pode ser utilizado para este fim. Durante o processo de soldagem, ocorre uma separação entre os dois eletrodos devido a expansão térmica do material soldado, que está relacionada com o crescimento do ponto de solda. Através da coleta do sinal de deslocamento do eletrodo, pode-se obter então, informações que indiquem a qualidade do ponto de solda. Autores como Wang et al. (2009); Jou (2003); Lee et al. (2001) e Chen (2004) utilizaram o sinal de deslocamento do eletrodo como meio de avaliação da qualidade. Zhang (2009) afirma que vários sistemas de controle baseados em curvas de deslocamento do eletrodo já foram desenvolvidos e podem fornecer um sinal muito útil para monitorar a qualidade da solda. Lee et al. (2001) afirmam que a separação dos eletrodos fornece o sinal mais efetivo para estimação da formação do ponto de solda devido a expansão térmica, o que o torna ideal para avaliar a força do ponto de solda.

O deslocamento do eletrodo é causado por uma combinação da expansão térmica e da mudança de volume, de sólido para líquido, das peças. Como pode ser observado na **Figura 2.19**, para uma faixa aceitável de tamanho e resistência do ponto de solda em um determinado tipo de material, haverá uma faixa aceitável no deslocamento do eletrodo. Se o deslocamento final do eletrodo estiver entre os valores mínimo e máximo estabelecidos, uma boa solda pode ser assegurada (Tsai et al, 1991; Jou, 2003)

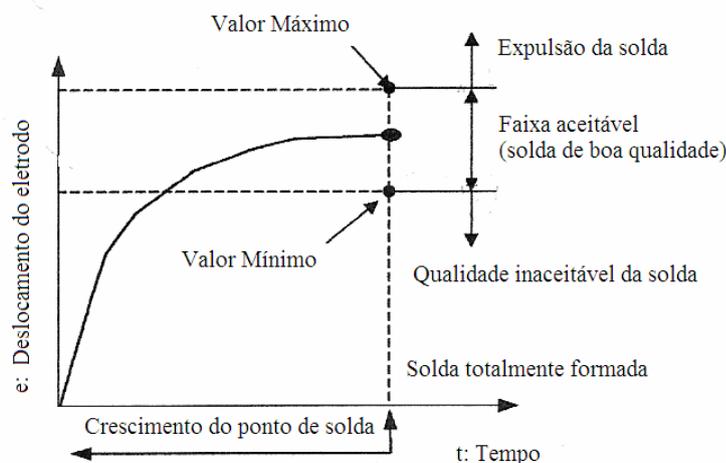


Figura 2.19 – Faixa aceitável do deslocamento do eletrodo.
Fonte: Jou (2003).

A aplicabilidade deste método na indústria é questionada por alguns autores devido a complicações que podem ser encontradas de acordo com o tipo de equipamento utilizado para ler e transmitir o deslocamento do eletrodo (LING, 2009) e também devido a pequena escala de medição na ordem de milésimos de milímetros (DENNISON, 1997). Segundo Chien et al (2002), este método está limitado a aplicações em máquinas de solda com pedestal, como será o caso da aplicação vislumbrada no presente projeto de dissertação.

Um exemplo de sistema de monitoramento utilizado para estimar a qualidade que utiliza o sinal de deslocamento do eletrodo é apresentado na **Figura 2.20**. Neste sistema, o sinal é lido por um sensor a laser passando pelo controlador do sensor, pelo equipamento de tratamento do sinal e pelo conversor de sinal para ser posteriormente lido e analisado no computador.

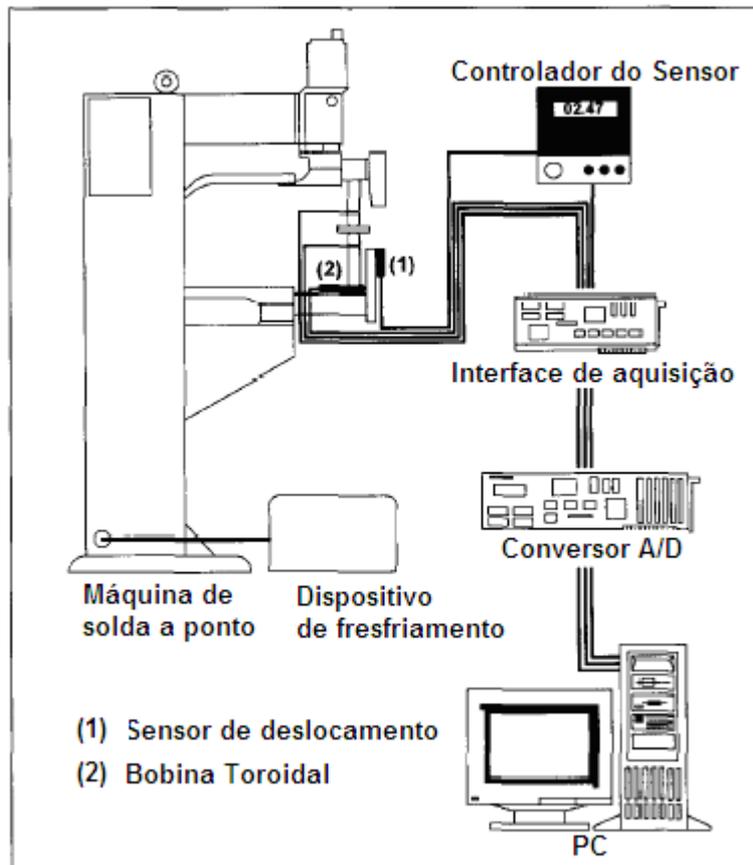


Figura 2.20 – Exemplo de sistema de monitoramento da qualidade utilizando sinal de deslocamento do eletrodo. Fonte: Lee et al. (2001).

No caso dos sensores a laser, utilizados por Choo e Lee (2001) e Wang et al.(2009) entre outros autores, podem haver dificuldades de instalação e calibração, o que pode tornar

No início do processo de soldagem, correspondente a fase 1 da **Figura 2.23**, os eletrodos aproximam-se devido a pressão aplicada. Já na fase 2, os eletrodos começam a separar a uma velocidade constante devido a expansão térmica das chapas e a mudança de estado do material. Na fase 3, o ponto de solda é formado, fazendo com que as chapas percam a rigidez e os eletrodos aproximem-se novamente (LEE, 2001).

Na fase 1, observa-se a queda no deslocamento devido ao achatamento das asperezas na superfície do material pela aplicação da pré-pressão. Na fase 2, ocorre uma expansão térmica da camada protetora de zinco bem como expansão do material base, porém, devido a presença da camada de zinco entre as chapas nota-se que esta se afasta de forma gradual e lentamente pela pressão dos eletrodos fazendo com que haja uma competição entre estes dois mecanismos, gerando uma leve inclinação da curva comparada com a fase 4 onde predomina a expansão térmica. Na fase 3, a camada de zinco se torna líquida sendo afastada dos eletrodos mais rapidamente que nos estágios anteriores, sendo o deslocamento maior que a expansão térmica, resultando em pequeno decréscimo desta última com pequena inclinação (pequeno slope). Na fase 5 observa-se que, uma vez o aço se tornando macio pelo alto aquecimento, o deslocamento começará a decrescer, devendo ser a corrente desligada sob risco da indentação se tornar proeminente. Na fase 6, caso a corrente se situe num nível muito alto e um tempo de solda muito longo, a expulsão de material pode ocorrer.

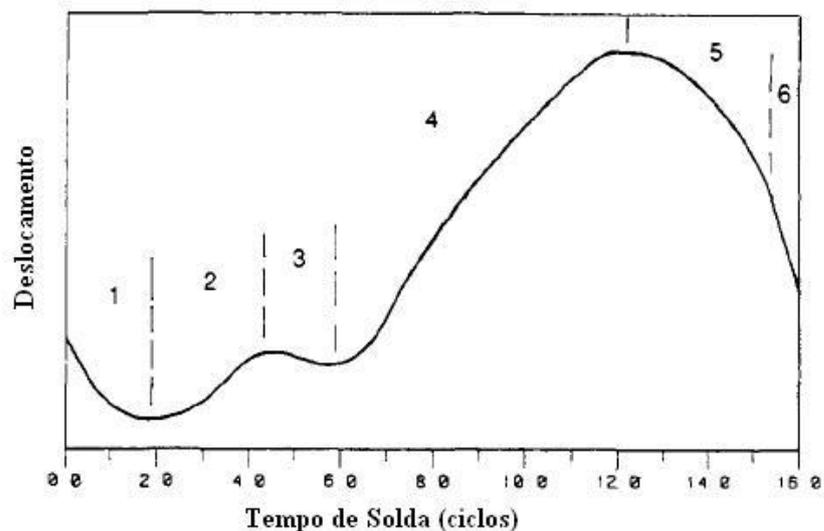


Figura 2.22 - Regiões de deslocamento típicas em aços galvanizados.
Fonte: Geden (1986).

A indentação, presente na região 5, é comum nos processos de solda a ponto. Como explicado, esta ocorre quando a resistência compressiva do material em contato com o eletrodo diminui à medida que a fusão avança, permitindo, deste modo, que a face do eletrodo se movimente para dentro da superfície da peça de trabalho.

Jou (2003) mostra as mudanças que ocorrem na solda e interferem na curva de deslocamento do eletrodo em diferentes níveis de calor aplicado que está diretamente relacionado com a formação do ponto de solda e com sua qualidade, o que pode ser observado na **Figura 2.23**.

Se o calor estabelecido for muito baixo, como está representado pela curva A da **Figura 2.23**, o calor dos elementos na junção, como um resultado de sua resistência interna e calor mais concentrado nas superfícies das peças leva a uma alta resistência de contato. A curva de deslocamento do eletrodo reflete a expansão térmica da junção assim como o aumento de volume causado por qualquer mudança de estado que deve ocorrer. Contudo, o calor é insuficiente para causar mudança de estado na superfície da peça. Desta forma, o ponto de solda não é formado e não há expansão de volume associada a mudança do estado sólido para o líquido. Uma vez que a corrente aplicada é cessada, a fase de aquecimento é interrompida e dá-se início a fase de resfriamento.

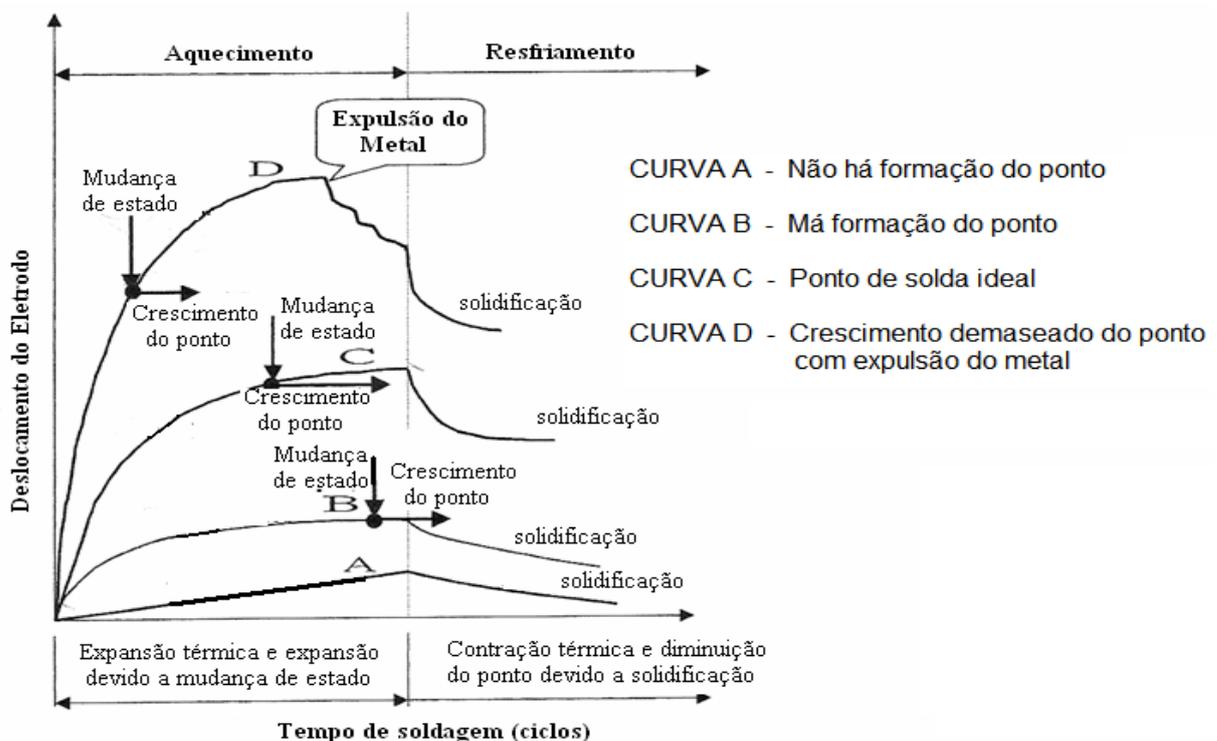


Figura 2.23 – Curva de deslocamento do eletrodo para diferentes níveis de calor aplicado.
Fonte: Jou, (2003).

Durante o resfriamento, o calor é extraído da área soldada primeiramente pela condução do material ao redor da junção. Entretanto, algum resfriamento adicional ocorre devido às condições atmosféricas. Desta forma, os elementos da junção e a junção como um todo contraem. Durante o resfriamento, qualquer mudança de volume devido a alteração de estado também é refletida na curva de deslocamento do eletrodo (JOU, 2003).

A medida que o calor na entrada é aumentado, o grau e a taxa de calor gerados aumentam. Como pode ser observado na curva B, o material é submetido a uma mudança de estado em certo ponto do aquecimento. Um ponto de solda é formado e então este ponto começa a crescer. Porém, neste caso o calor de entrada ainda não é suficiente para desenvolver um tamanho adequado do ponto de solda, resultando assim em uma solda mal desenvolvida e pouco resistente. Ao se cortar a passagem de corrente, a curva de deslocamento do eletrodo cai. Inicialmente, o ponto de solda mal formado se solidifica e encolhe devido à mudança de estado. Logo após a solidificação, a contração térmica ocorre da mesma forma descrita na curva A.

Um tamanho ideal do ponto de solda só é alcançado quando o calor de entrada alcança um certo nível, que deve variar dependendo das características do material a ser soldado. Esta situação é mostrada na curva C. Neste caso, a formação do ponto de solda começa com mais antecedência. Sendo assim, há mais tempo de aquecimento para deixar o ponto de solda crescer e ficar com um tamanho mais apropriado. A curva referente ao deslocamento do eletrodo reflete a expansão mais rápida e eficiente. O resfriamento ocorre de maneira similar, porém, a maior parte da contração está associada a mudança de estado de um ponto de solda maior (JOU, 2003).

Caso o calor gerado seja muito alto, como mostrado na curva D, o ponto de solda se desenvolve em excesso, o que levará a expulsão de material da solda na mudança de estado. É muito importante evitar a expulsão, pois esta resulta em espaços vazios ou quebras nas soldas, além de resultar em uma resistência pobre e não aceitável. A expulsão resulta em uma resposta inconsistente e imprevisível da curva de deslocamento do eletrodo considerando que a quantidade de metal expelida é uma função complexa que envolve o tipo do material, dureza, geometria, encaixe de junção, força do eletrodo, entre outros. Qualquer tentativa de controle da soldagem após ocorrer expulsão seria ineficaz. Desta forma, o aquecimento deve ser bem controlado para garantir que não ocorrerá expulsão (JOU, 2003) e neste sentido a influência dos parâmetros principais do processo deve ser muito bem avaliada.

2.7 – Planejamento e análise de Experimentos

A utilização industrial efetiva do processo RSW, como já foi abordado anteriormente, depende de ajustes corretos dos parâmetros no sentido de obter uma solda otimizada. As técnicas estatísticas baseadas em projeto e análise de experimentos (DOE – *Design of Experiments*) têm sido frequentemente utilizadas como descrito em trabalhos de diversos autores como Rowlands e Jiju (2003), Martin et al. (2009), Lin et al. (2007), Cho et al. (2006), Darwish e Al-Dekhial (1999) entre outros.

Através da análise de experimentos, abrem-se oportunidades de analisar as influências de cada variável de controle sobre a solda, assim como o efeito das interações entre estas. Desta forma, torna-se possível estabelecer as variáveis que exercem influência significativa na resposta, assim como os seus valores ótimos visando alcançar estabilidade e consistência do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica. Além disso, considerando a rapidez na execução da solda e a repetibilidade normalmente verificada no processo RSW, técnicas estatísticas baseadas no DOE são ferramentas extremamente úteis na ampliação das análises e otimização do processo.

2.7.1 - Conceitos básicos de planejamento e análise de experimentos

A metodologia de planejamento e análise de experimentos (DOE) foi desenvolvida nas décadas de 20 e 30, possuindo larga utilização em diversas áreas como agricultura, medicina, neurociências, engenharia e outras, visando o aumento da produtividade através de um maior controle sobre as variáveis de cada processo. Segundo Montgomery (1997), esta metodologia consiste em planejar experimentos capazes de gerar dados apropriados para uma eficaz análise estatística, o que resulta em conclusões válidas e objetivas. Sua maior utilização começou com o desenvolvimento de programas computacionais estatísticos, permitindo a obtenção de respostas em menor tempo e simplificando a realização dos cálculos.

Os elementos básicos que compõem esta metodologia (*Figura 2.24*) são:

- **Fatores controlados:** variáveis que podem ser modificadas durante os experimentos para determinar a influência nas saídas.

- **Fatores não controlados:** variáveis que deveriam permanecer constantes durante os experimentos, mas de alguma forma variam alterando as saídas.
- **Respostas:** saídas que deverão ser otimizadas.
- **Modelo:** consiste na equação que relaciona as respostas com as variáveis do processo.

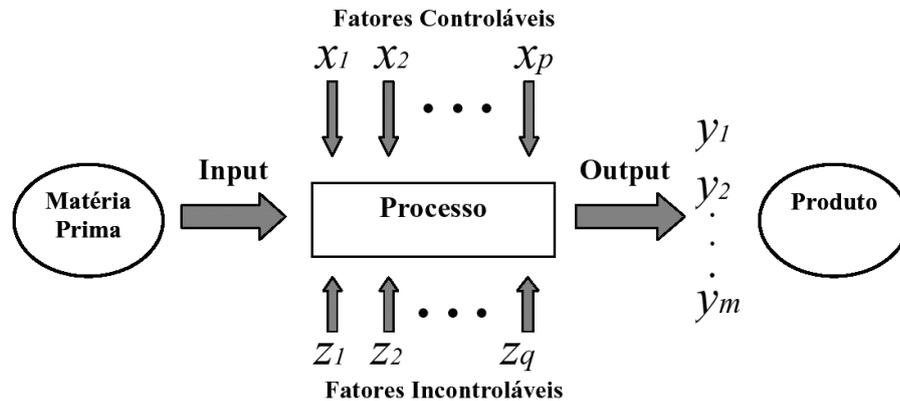


Figura 2.24 – Elementos básicos da metodologia DOE

Para a aplicação do DOE cinco etapas necessitam ser observadas, bem como alguns questionamentos específicos conforme caracterizado na **Figura 2.25** (Domenech, 2004). Segundo este autor, o DOE é uma metodologia de experimentação, onde todas as variáveis controladas são modificadas simultaneamente. É feita a medição dos resultados nas variáveis de saída com o objetivo de manter um modelo empírico da relação $y = f(x)$. A sequência de ensaios para a utilização do DOE são protegidas contra a influência de variáveis não controladas que poderiam introduzir vícios nas conclusões. Outro recurso frequentemente usado para reduzir esses vícios é os dados coletados aleatórios.



Figura 2.25 – Etapas do DOE –
Fonte: Domenech (2004).

O DOE apresenta uma grande vantagem sobre o método OFAT (*One Factor at the Time*), pelo fato de todas as variáveis controladas serem modificadas simultaneamente, ao invés de se estudar o efeito de cada variável isoladamente. Sendo assim, todas as interações entre as variáveis são levadas em conta tornando o estudo mais eficiente.

Esta metodologia tem sido utilizada frequentemente na melhor compreensão do processo de soldagem por resistência elétrica. Dentre os trabalhos pode-se citar Rowlands e Antony (2003) que exploraram a análise de experimentos na área de soldagem a ponto por resistência com o objetivo de otimizar a resistência da solda através do melhor ajuste dos parâmetros de tempo de soldagem, diâmetro do eletrodo, corrente de soldagem, força do eletrodo e profundidade de deslocamento do eletrodo.

Os principais métodos na área de projeto e análise de experimentos que podem contribuir para a otimização do processo de soldagem a ponto por resistência serão comentados a seguir.

2.7.2 – Método Taguchi

Taguchi, considerado referência da engenharia de qualidade, tem obtido sucesso na integração de aplicações de métodos estatísticos dentro dos processos de engenharia por alcançar grande capacidade e estabilidade. Antony (2001) afirma que a análise de parâmetros de Taguchi provou ser um estágio poderoso dentro da otimização de processos. A análise de parâmetros de Taguchi, também conhecida por metodologia da análise robusta, envolve maximização de performance e qualidade a um custo baixo. O grande diferencial deste método é possibilitar ao pesquisador utilizar uma grande quantidade de informações conhecidas sobre o processo, porém conduzindo um número mínimo de experimentos com base nos arranjos ortogonais. A robustez deste método é alcançada através da separação dos fatores de controle e fatores de ruído, o que possibilita a determinação da melhor configuração dos parâmetros do processo que influenciam na variação de performance do produto, e o ajuste fino dos parâmetros que influenciam a performance média (ANTONY, 2006).

Taguchi criou uma transformação dos dados de resposta em outros valores que estão relacionados com a variação presente devido aos ruídos. Esta transformação é conhecida como razão sinal-ruído (SNR). Existem diferentes relações de sinal ruído que podem ser utilizadas de acordo com o tipo de característica desejada, tais como “menor melhor - LB”,

“nominal melhor - NB” e “maior melhor - HB”. A característica de qualidade tensão máxima de cisalhamento que será avaliada neste trabalho pelo método de Taguchi é um caso de “maior melhor”. O cálculo da SNR com característica HB pode ser obtido pela *equação 2.3* (LIN et al. 2007).

$$SNR = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2.3)$$

onde:

n = número de testes em cada condição (número de repetições independente dos níveis de ruído utilizados).

Lin et al.(2007) utilizou o método de Taguchi junto a técnica de redes neurais para otimizar o processo de soldagem a ponto por resistência utilizando como resposta a força máxima de cisalhamento suportada pela solda. Segundo este autor, a técnica de Taguchi não apenas fornece uma metodologia sistemática e eficiente para a otimização inicial dos parâmetros dentro do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, como também é aplicada para descobrir os parâmetros que exercem maior influência nas respostas consideradas. Através da análise de variância (ANOVA), pode-se investigar os parâmetros que exercem um impacto significativo nas características de qualidade. A contribuição percentual dentro da soma total dos desvios quadrados pode ser usada para avaliar a importância de cada mudança dos parâmetros sobre as respostas adotadas.

Devido à grande quantidade de variáveis envolvidas no processo de soldagem a ponto por resistência, torna-se cabível a aplicação do método de Taguchi para filtrar os parâmetros de controle do processo utilizando um número aceitável de experimentos, de forma a estabelecer quais exercem impacto significativo na resposta e quais podem ser desconsiderados.

2.7.3 – Arranjo Fatorial e Superfície de resposta

O arranjo fatorial completo (*Full Fatorial Designs*) consiste em testar todas as combinações entre níveis pré-estabelecidos das variáveis, cobrindo assim todo o espaço experimental. Desta forma, a análise fatorial torna possível observar o impacto de cada

variável e de todas as interações entre estas na saída do processo. Porém, enquanto o número de fatores cresce linearmente, o número de experimentos para esses fatores cresce exponencialmente. Uma quantidade muito grande de fatores pode tornar um processo de experimentação inviável. Por esta razão, torna-se aplicável a utilização deste método no processo de soldagem a ponto por resistência após definidos os parâmetros que mais interferem nas respostas.

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

De acordo com Montgomery (2005), a Metodologia de Superfície de Resposta (*RSM – Response Surface Methodology*) é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas que são utilizadas para modelar e analisar problemas nos quais a resposta de interesse é influenciada por muitas variáveis e nos quais a resposta deva alcançar um valor ótimo. A análise de uma superfície de resposta é feita em termos de uma superfície ajustada. Se tal superfície é adequada, sua análise será aproximadamente equivalente a análise da superfície real. Evidentemente, usando-se um projeto de experimentos adequado para coletar os dados das respostas (y), os parâmetros do modelo (x) serão estimados eficazmente. Geralmente, quando se está em um ponto da superfície de resposta que está distante do ponto de ótimo, a curvatura do sistema é bem pequena, de onde decorre que um modelo de primeira ordem seja adequado para modelar a resposta. O objetivo experimental é, então, caminhar rápida e eficazmente em direção às proximidades da região de ótimo. Uma vez que tal região é encontrada, um modelo mais elaborado deve ser utilizado, tal como o de segunda ordem (*equação 2.4*). Neste estágio, deve-se localizar o ponto ótimo. Portanto, o objetivo da RSM é determinar as condições ótimas de operação para um sistema ou determinar a região do espaço fatorial na qual as necessidades operacionais sejam satisfeitas.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \chi_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \chi_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} \chi_i \chi_j + \varepsilon \quad (2.4)$$

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

Um CCD é recomendado quando o planejamento fatorial necessitar de experimentação sequencial. Isto porque estes *projetos* podem incorporar informações de um experimento fatorial apropriadamente planejado (GANGULI, 2002). O número de *Axial Points* em um CCD é igual ao dobro do número de fatores e representam os valores extremos de cada fator. Em função de sua localização, podem ser *Circunscritos*, *Inscritos* ou de *Face Centrada*. O *Circunscrito (CCC)* é o CCD original. Nele, os *Axial Points* estão a uma distância α do centro, baseado nas propriedades desejadas do projeto. Aumentando-se um fatorial existente com pontos axiais obtém-se o arranjo mostrado na *Figura 2.26*.

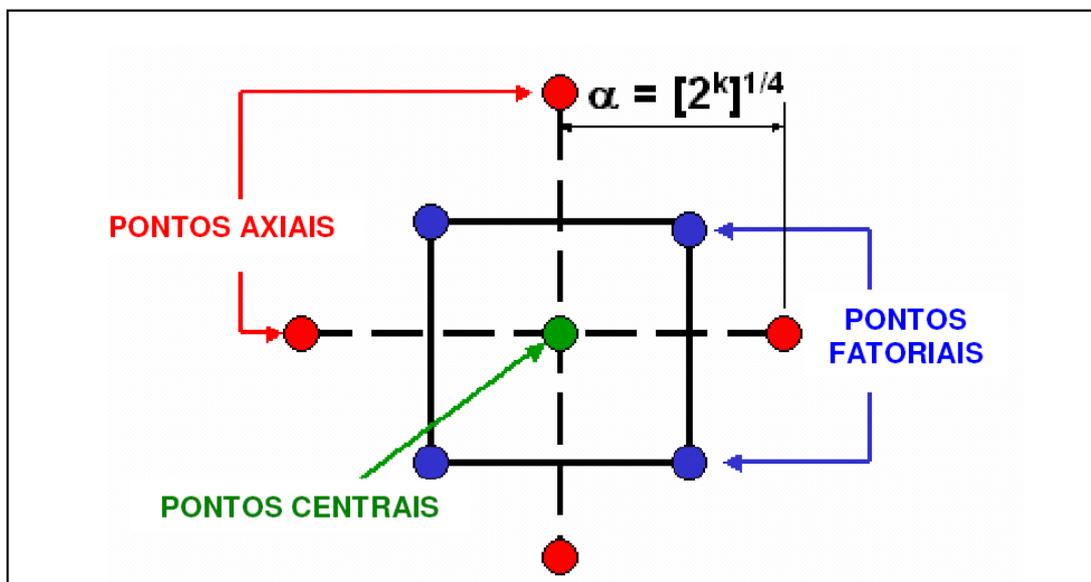


Figura 2.26 - Representação gráfica de um Central Composite Design -
Fonte: Paiva (2002)

3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os itens a seguir descrevem o procedimento experimental utilizado desde os testes preliminares até a implantação do sistema de monitoramento de deslocamento dos eletrodos como forma de avaliação do comportamento dos parâmetros do processo de soldagem na união de chapas de aço galvanizadas.

3.1 - Material e equipamentos utilizados

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Soldas – LSO - da Unifei em uma máquina de solda a ponto estacionária marca Presol, modelo TWPRV50 com potência nominal de 50 kVA, alimentação de 220V e corrente máxima de 6kA. Alguns detalhes e principais componentes da máquina de solda podem ser observados nas *Figuras 3.1 e 3.2*.

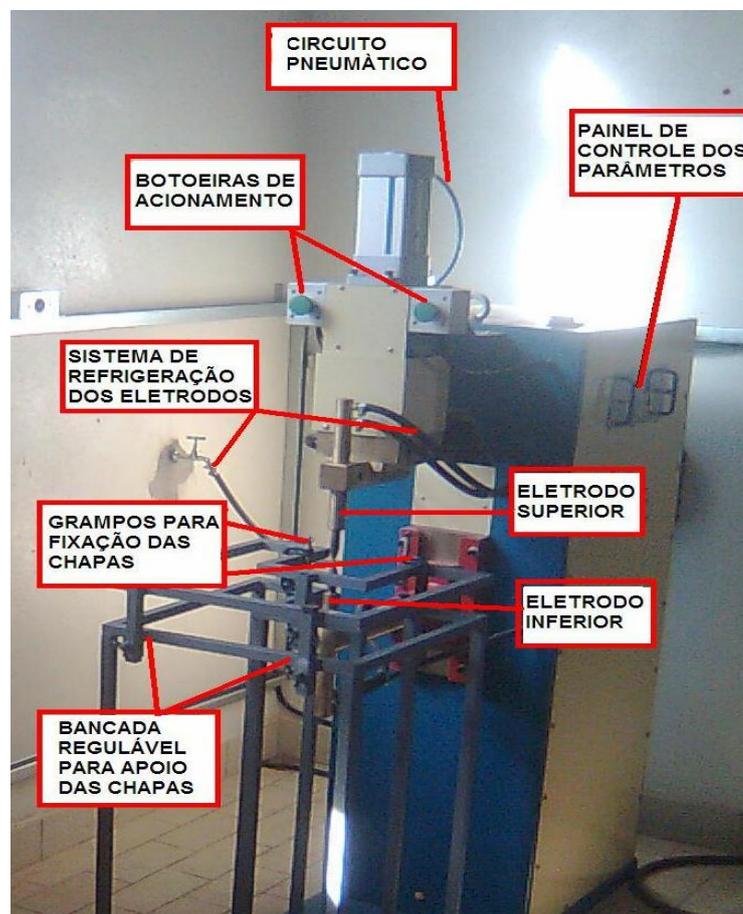


Figura 3. 1– Principais componentes da máquina de soldagem a ponto utilizada nos experimentos

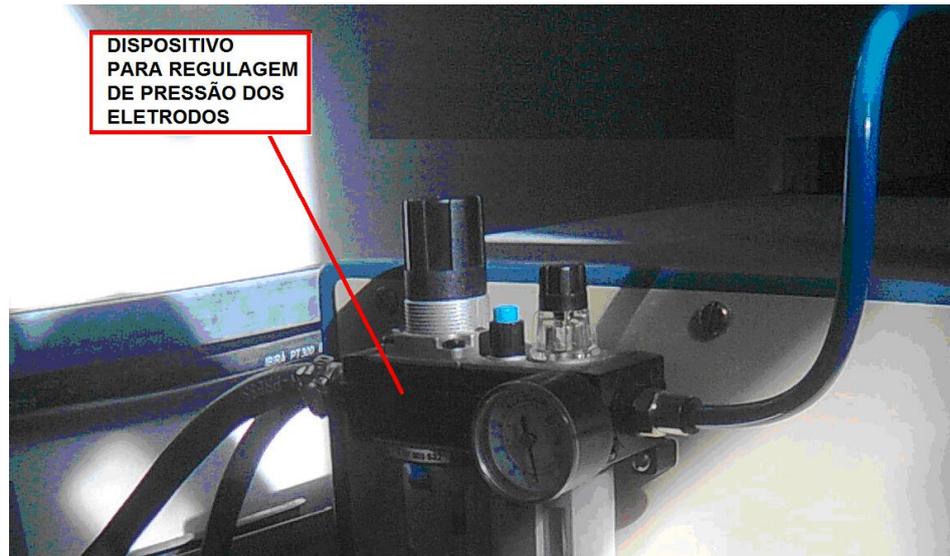


Figura 3. 2 – Dispositivo para regulagem de pressão.

Para se avaliar a capacidade de deslocamento do eletrodo, bem como sua viabilidade de medição durante o processo de soldagem, alguns testes iniciais foram executados acoplando-se um relógio comparador analógico Mitutoyo. Através do contato da ponta de prova do equipamento com a base do eletrodo superior da máquina de solda (*Figura 3.3*), pôde-se verificar um deslocamento do eletrodo da ordem de centésimos de milímetros no momento da passagem de corrente durante a soldagem, o que confirmou a teoria descrita na literatura. Desta forma, optou-se então em utilizar um sistema mais robusto que permitisse uma avaliação mais efetiva do deslocamento.



Figura 3.3 – Teste de deslocamento do eletrodo com relógio comparador analógico.

Após pesquisas de dispositivos disponíveis no mercado, decidiu-se realizar a medição através de um transdutor diferencial de deslocamento linear (LVDT) sendo adquirido o modelo GA-HD LBB315PA-100-M da Metrolog, dispositivo este de alta precisão com suporte do eixo por rolamento linear de precisão, avanço do êmbolo por mola e apalpador de carbono-tungstênio com repetibilidade de 0,0001mm e campo de medição de +/- 2,5mm. A aquisição dos dados foi procedida através de um condicionador digital Metrolog modelo SD20 com saída USB para aplicação com sensores LVDT e conversor A/D 24-bits para linearização digital de todo campo de medição.

A **Figura 3.4** mostra o posicionamento dos equipamentos para a realização dos experimentos de monitoramento.



Figura 3.4- Posicionamento do sensor LVDT e condicionador de sinais para aquisição dos dados na máquina de solda a ponto.

O corpo do sensor foi fixado a parte móvel da máquina de solda a ponto como pode ser observado a **Figura 3.5**. Esta parte está unida ao eletrodo superior que desce gerando a

pressão nas chapas para realização da soldagem. A base de referência alocada abaixo do sensor esta parafusada na parte fixa da carcaça da máquina de solda. O ajuste de altura é executado através de um parafuso de cabeça chata que ao ser rosqueado, modifica a distância da base em relação ao sensor.



Figura 3.5- Fixação do sensor LVDT e da base de apoio.

A altura da base fixa foi ajustada de modo que a posição em que o sensor toca na base, porém, sem ser pressionado (*Figura 3.6*) coincide com a posição em que o eletrodo superior toca na chapa a ser soldada antes da aplicação de pressão sobre estas. Desta forma, o sensor é pressionado e fornece os valores de deslocamento somente no momento em que já existe contato entre os eletrodos e as chapas.

Os corpos de prova utilizados neste estudo são constituídos de um tipo de aço carbono galvanizado de ampla aplicação na indústria automotiva, espessura de 1mm e composição química mostrado na *Tabela 3.1*.

As soldas realizadas foram do tipo ponto único, ou seja, uma única solda foi utilizada para união de cada amostra experimental contendo duas chapas (*Figura 3.7*).



Figura 3.6 – Contato inicial entre o sensor e a base fixa.

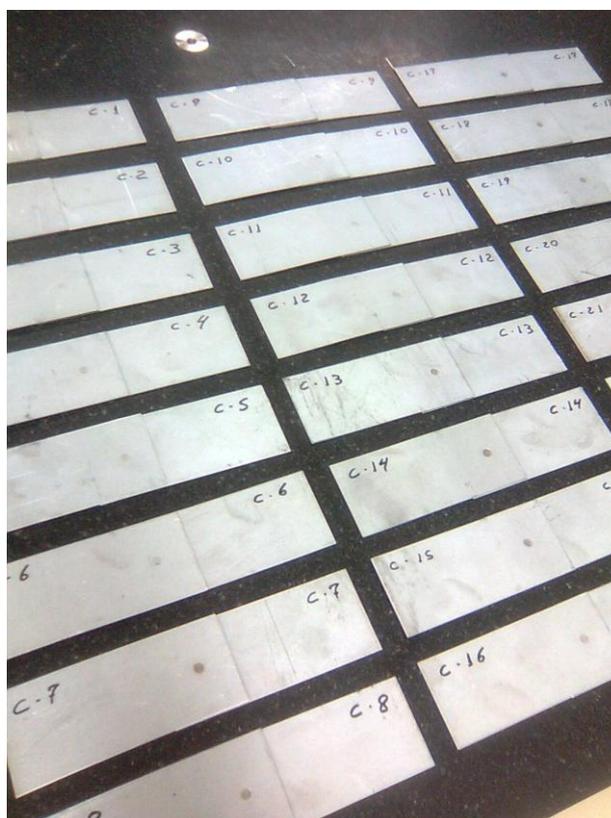


Figura 3.7– Chapas de aço carbono galvanizado utilizadas nos experimentos.

Tabela 3.1 – Composição química do aço carbono galvanizado.

Composição química do Aço Carbono Galvanizado	
C	0,08%
Mn	0,45%
P	0,03%
S	0,03%
Al	0,005%
Camada de Zn	42,5 - 85 g/m ²

Para a realização dos testes, os corpos de prova foram cortados nas dimensões 105 x 45 mm e posteriormente dispostos de forma sobreposta conforme a norma AWS/SAE 8.9M (2002) como mostrado na **Figura 3.8**. Foram utilizados nos experimentos eletrodos de cobre e cromo (classe C) com ponta chapada de 5 mm de diâmetro. Tomou-se o cuidado de manter os eletrodos em uma condição média de desgaste para a aplicação das técnicas de projeto e análise de experimentos, sendo sua superfície recuperada periodicamente durante os experimentos. Este cuidado mostrou-se necessário em virtude do desgaste na ponta do eletrodo após as soldas fazendo com que a área de contato com a peça se alterasse levando a variação na densidade superficial de corrente, o poderia influenciar diretamente no rendimento do processo. Tomou-se também o cuidado de garantir boas condições da superfície das chapas utilizadas. Na etapa final de monitoramento, entretanto, passou-se a considerar o desgaste do eletrodo e as condições da superfície das chapas com o objetivo de verificar as variações de qualidade causadas por esses fatores indesejáveis presentes na indústria.

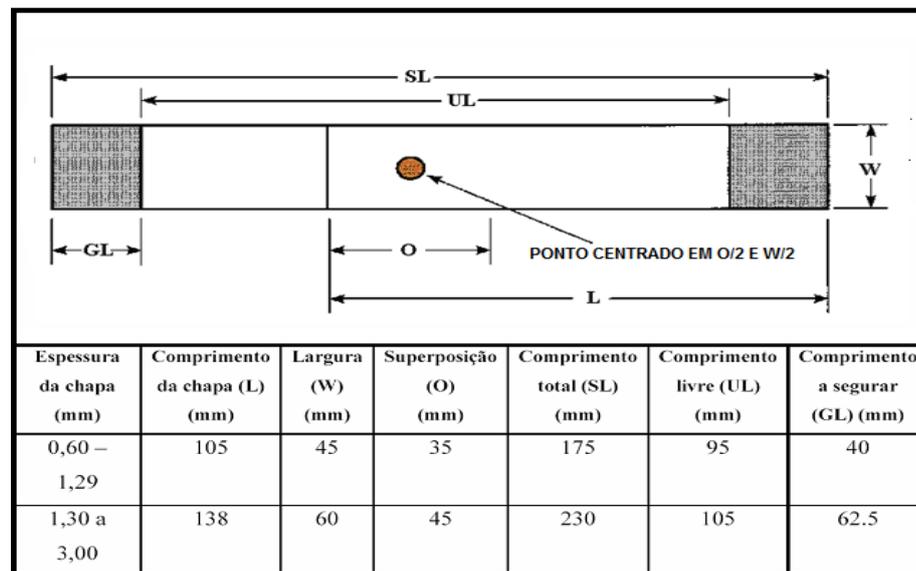


Figura 3.8 – Especificações dimensionais dos corpos de prova.

Fonte: AWS (2002) Modificada.

3.2 - Seleção inicial dos parâmetros

O equipamento de solda a ponto utilizado permite o controle de 14 parâmetros diferentes, os quais são:

- Tempo de pré-pressão; tempo de pós-pressão; tempo de pré aquecimento; corrente de pré aquecimento; tempo de solda; corrente de solda; pressão do eletrodo; intervalo de solda; impulsos de solda; tempo de resfriamento; tempo de revenimento; corrente de revenimento; tempo de subida de corrente e tempo de descida de corrente

A seleção dos parâmetros mais influentes tornou-se cabível devido ao número elevado de experimentos necessários para cobrir os efeitos de todos os parâmetros disponíveis. Como ponto de partida, foi considerado que os parâmetros tempo de solda, corrente de solda e força/pressão do eletrodo possuem grande relevância. Estes são analisados na maioria dos trabalhos na área de solda a ponto. Portanto estes parâmetros são imprescindíveis na análise do processo.

Os parâmetros de tempo de pré-pressão e pós-pressão foram mantidos fixos em todos os experimentos pelo fato de não haver a aplicação de múltiplos pontos de solda em série. Desta forma, pode-se estabelecer os tempos de modo a garantir que não haja risco de arco elétrico ou qualquer alteração na qualidade da solda, pois não existe preocupação com a demora na realização de cada ponto.

Os parâmetros tempo de pré-aquecimento e pós-aquecimento foram unidos em um só parâmetro a ser considerado nos experimentos como calor de pré-aquecimento, de forma a variá-los de acordo com a alteração do produto entre o quadrado da corrente e o tempo. O mesmo procedimento foi adotado em relação a corrente e o tempo de pós pressão.

Os parâmetros de intervalo e impulsos de solda foram mantidos nulos pelo fato de serem aplicados em chapas mais espessas.

Baseado nestas considerações foram selecionados os seguintes parâmetros a serem incluídos na primeira etapa da análise de experimentos, com o intuito de verificar a significância de cada parâmetro e permitir numa segunda fase selecionar os mais significativos:

- Tempo de solda
- Corrente de solda

- Pressão do eletrodo
- Tempo de resfriamento
- Tempo de subida de corrente
- Tempo de descida de corrente
- Calor de pré-aquecimento
- Calor de pós-aquecimento (revenimento)

A partir dos parâmetros selecionados foram realizados os ensaios preliminares para estabelecer as faixas de valores iniciais de cada parâmetro para a realização dos experimentos. Com base nos testes foram estabelecidos três níveis para cada variável com valores próximos aos limites operacionais do equipamento de forma a tornar o experimento bastante exploratório e verificar o impacto de cada parâmetro nas respostas utilizadas. Os valores adotados podem ser observados na **Tabela 3.2**.

Tabela 3. 2 – Níveis iniciais definidos para os parâmetros de soldagem

Parâmetro	Níveis		
Corrente de solda	65% (3,9kA)	70% (4,2kA)	75% (4,5kA)
Tempo de solda	15 ciclos	25 ciclos	35 ciclos
Pressão	3 bar	4 bar	5 bar
Pré-aquecimento	0	20c,30%	30c,50%
Pós-aquecimento	0	20c,30%	30c,50%
Resfriamento	0	20 ciclos	40 ciclos
Subida de corrente	0	3 ciclos	6 ciclos
Descida de corrente	0	3 ciclos	6 ciclos

3.3 - Condução dos experimentos

Após a realização dos testes preliminares e estabelecidos os níveis iniciais de cada variável, os experimentos foram conduzidos em cinco etapas, conforme sequência mostrada na **Figura 3.9**. As análises estatísticas foram conduzidas através do software Minitab.15, e a

otimização das respostas foi gerada por meio da ferramenta Solver do software Microsoft Excel.



Figura 3.9 – Etapas seguidas na realização dos experimentos

As três primeiras etapas estão relacionadas à aplicação das técnicas de projeto e análise de experimentos. Inicialmente, na primeira etapa, foi aplicada a técnica de Taguchi com o objetivo principal de verificar o impacto dos oito parâmetros inicialmente selecionados nas respostas analisadas. Foi escolhido um arranjo ortogonal L27 com base nos níveis escalonados anteriormente nos testes preliminares (*Tabela 3.2*). Foram selecionadas 8 parâmetros definidos em 3 níveis. Ao L27 procurou-se arbitrar diferenças consideráveis entre os níveis, dentro das condições de contorno da máquina de solda, para tornar esta etapa o mais exploratória possível. O desgaste do eletrodo foi considerado como fator de ruído tornando a análise mais robusta às variações de desgaste. Outra razão importante para aplicação desta técnica foi a possibilidade de reduzir o número de experimentos considerando a grande quantidade de combinações possíveis para oito variáveis.

Na segunda etapa, partiu-se para um fatorial completo incluindo somente as variáveis que apresentaram maior impacto. Nesta fase o arranjo foi redefinido estimando-se os níveis dentro de uma faixa onde foram obtidas melhores respostas e menor desgaste do eletrodo, dentro dos limites operacionais do equipamento. Na terceira etapa foi gerado o arranjo final, incluindo pontos fatoriais, centrais e axiais, para obter assim as superfícies de resposta e o modelo ótimo global de previsão das respostas em função dos parâmetros. Com base nas equações das superfícies de resposta geradas, partiu-se para a quarta etapa, de otimização. Nesta etapa gerou-se um modelo final com o objetivo de maximizar a resistência dos pontos de solda com uma restrição de indentação máxima de 20%. O modelo foi gerado através da ferramenta Solver do Microsoft Excel. A quinta e última etapa, tratou-se da parte de monitoramento da qualidade, conduzida com base na leitura de deslocamento do eletrodo da máquina de solda a cada ponto realizado. O monitoramento foi feito utilizando a resposta ótima obtida da fase anterior como referência.

3.4 - Escolha das respostas para análise e projeto de experimentos

Como respostas utilizadas na análise de experimentos, foram escolhidas as seguintes:

- força máxima de cisalhamento suportada pelo ponto de solda;
- indentação máxima no ponto (considerando ambos os lados);
- modo de falha da solda após teste de cisalhamento.

- **Força máxima de cisalhamento suportada pelo ponto de solda**

A Força máxima de cisalhamento necessária para romper cada amostra foi obtida através de ensaios realizados em uma máquina de tração EmicDL2000 localizada no Laboratório de Ensaios Destrutivos da UNIFEI, cujos detalhes de medição são mostrados na **Figura 3.10**. Foi avaliada como resposta a força máxima de ruptura dos corpos de prova. Registradas através de uma interface computacional, cada chapa foi presa a uma garra. A medida em que as garras puxam as chapas tendendo a separá-las, a força cisalhante sobre o ponto aumenta até causar o seu rompimento.



Figura 3.10 – Equipamento para realização do ensaio de cisalhamento.

- **Indentação máxima no ponto de solda**

A medição da indentação, cuja caracterização é mostrada na *Figura 2.11*, foi realizada por meio de um apalpador analógico Mitutoyo com resolução de 0,01 mm, em ambos os lados de cada amostra, sendo registrado o valor máximo encontrado após percorrida toda a superfície do ponto. Foi utilizado um traçador de altura Mitutoyo para fazer o ajuste fino durante a medição, e um bloco magnético Mitutoyo para fixar as chapas de forma retilínea. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Metrologia da Unifei.

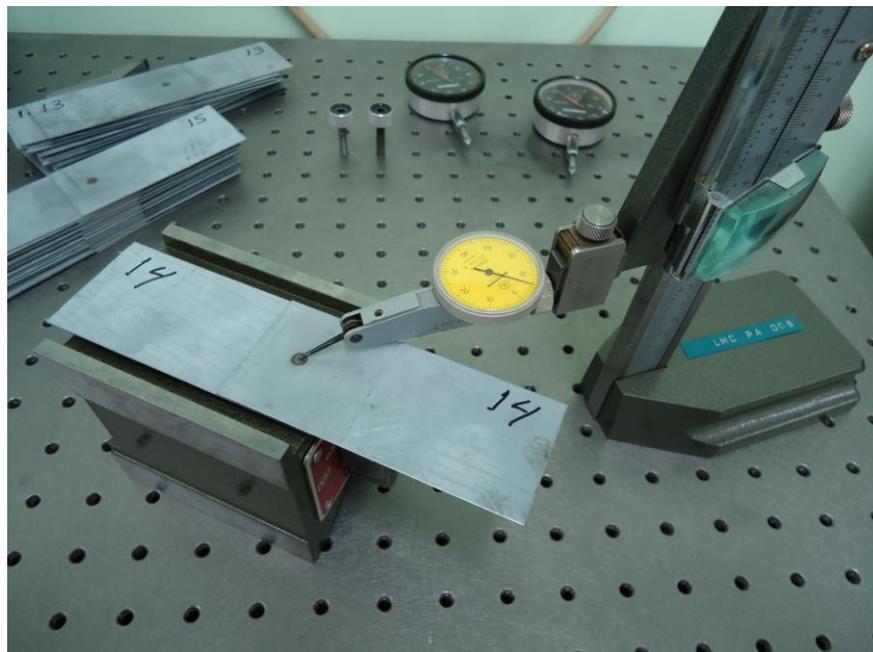


Figura 3.11 – Equipamentos utilizados no ensaio de indentação

- **Modo de falha das chapas soldadas**

Uma resposta importante, normalmente referenciada por outros autores, é a forma característica do modo de falha verificado após teste de cisalhamento. O modo de falha de cada amostra foi caracterizado visualmente logo após a ruptura do corpo de prova pelo teste de cisalhamento. Como forma avaliativa, cada falha foi caracterizado dentre quatro tipos distintos, *Figura 3.12*, ou seja:

- Modo de falha interfacial (*Figura 3.12a*) – Associado à baixa resistência do ponto.
- Modo de falha por arrancamento do ponto (*Figura 3.12b*) – Associado à alta resistência do ponto.

- Modo de falha por rasgamento da chapa (*Figura 3.12c*) - Associado à alta resistência do ponto.

- Modo de falha por arrancamento do ponto com rasgamento da chapa (*Figura 3.12d*)
- Associado à alta resistência do ponto.

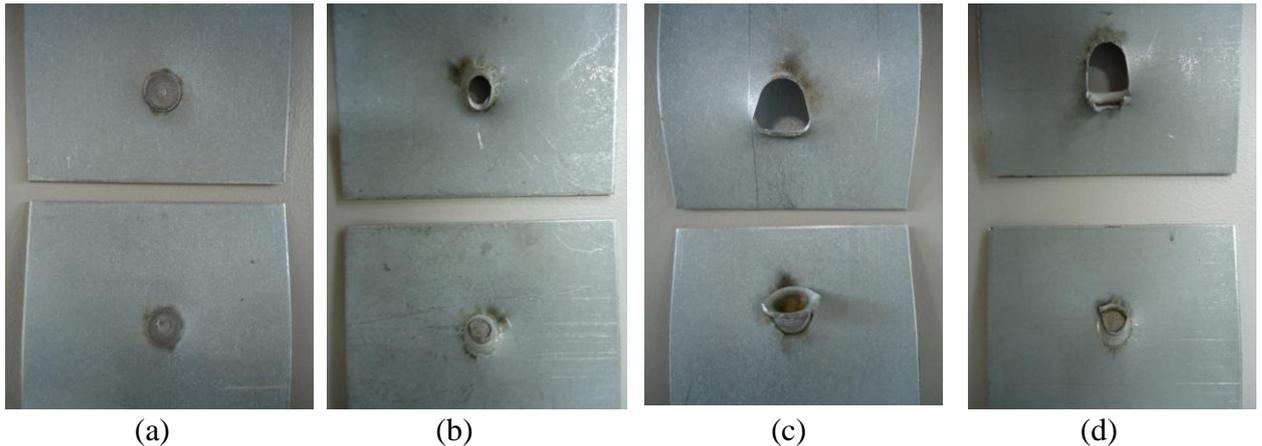


Figura 3.12 – Modo de falha: (a) interfacial (b) arrancamento do ponto (c) rasgamento da chapa (d) arrancamento do ponto com rasgamento da chapa.

3.5 - Aquisição dos dados de deslocamento do eletrodo

A *Figura 3.13* ilustra a interface principal do software SD20 DataLogger utilizado para coletar o deslocamento do eletrodo com a descrição de cada item. Esta interface mostra o deslocamento em milímetros em tempo real do eletrodo superior durante a solda. Este valor de deslocamento é relativo e pode ser zerado antes da obtenção de cada amostra para evitar erros de repetibilidade, muito embora este procedimento não seja viável em uma aplicação industrial. O ponto de zero corresponde a posição em que o eletrodo superior toca na chapa. A descida do eletrodo gera um deslocamento negativo e a subida gera um deslocamento positivo. O disparo para coleta das amostras foi feito de forma manual por via do software alguns instantes antes de iniciar cada ciclo de soldagem.

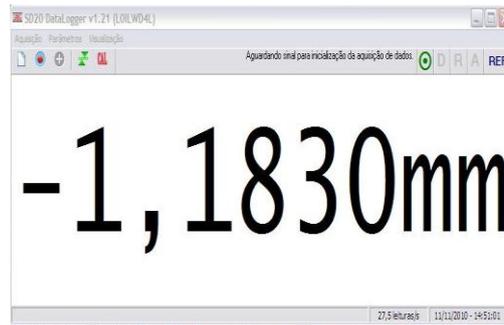


Figura 3.13 - Interface principal do software SD20 DataLogger para visualização do deslocamento do eletrodo em tempo real.

O critério de disparo para coleta das amostras de deslocamento pode ser escolhido de acordo com as opções ilustradas na **Figura 3.14**. Existe a possibilidade de disparar a coleta de dados a partir de data e hora programada ou a partir de sinais externos. Estas opções tornam-se bastante cabíveis em aplicações industriais embora não sejam utilizadas neste estudo. O critério de disparo utilizado foi por comando no software.

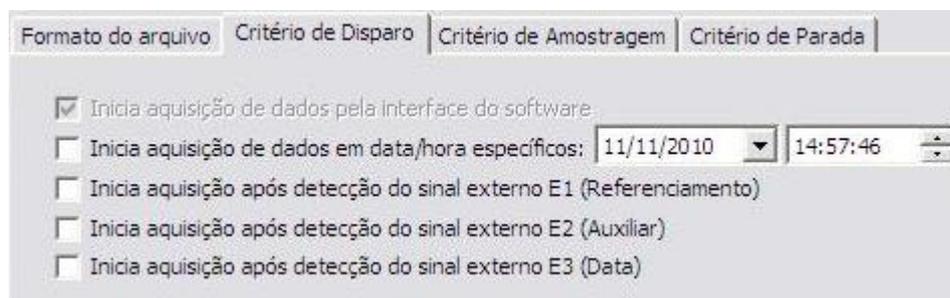


Figura 3.14 - Critério de disparo para coleta das amostras de deslocamento

A **Figura 3.15** mostra os critérios possíveis de amostragem que incluem a coleta de amostra por meio de comando no software, por variação pré-definida de leitura, por intervalo de tempo ou por meio de sinais externos. O critério de amostragem utilizado foi a adoção da taxa de amostragem correspondente a taxa de leitura utilizada pelo condicionador de sinais. Este taxa de leitura pode variar de 7 amostras por segundo até 3000 amostras por segundo. Porém, quanto maior a taxa de amostragem utilizada, maior a tendência de ruído na resposta. Nos experimentos deste estudo adotou-se a taxa de 27,5 amostras por segundo. Esta taxa mostrou-se eficaz em descrever um número suficiente de pontos para estimar a curva de deslocamento do eletrodo com um ruído mínimo.

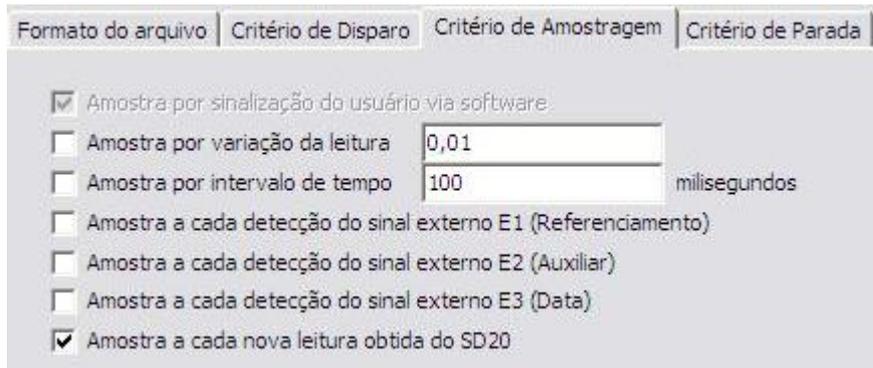


Figura 3.15 - Critérios de amostragem

O condicionador digital utilizado é composto de dois filtros como mostra a **Figura 3.16**. O filtro primário é do tipo passa faixa (FIR) onde utiliza-se uma frequência de corte correspondente a taxa de amostragem desejada para coletar os dados. O segundo filtro, tipo media móvel (MA), pode ser utilizado para atenuar as variações e suavizar a curva de resposta a partir das medias retiradas por um numero definido de amostras anteriores. Como houve pouco ruído nas respostas, este recurso não precisou ser utilizado.

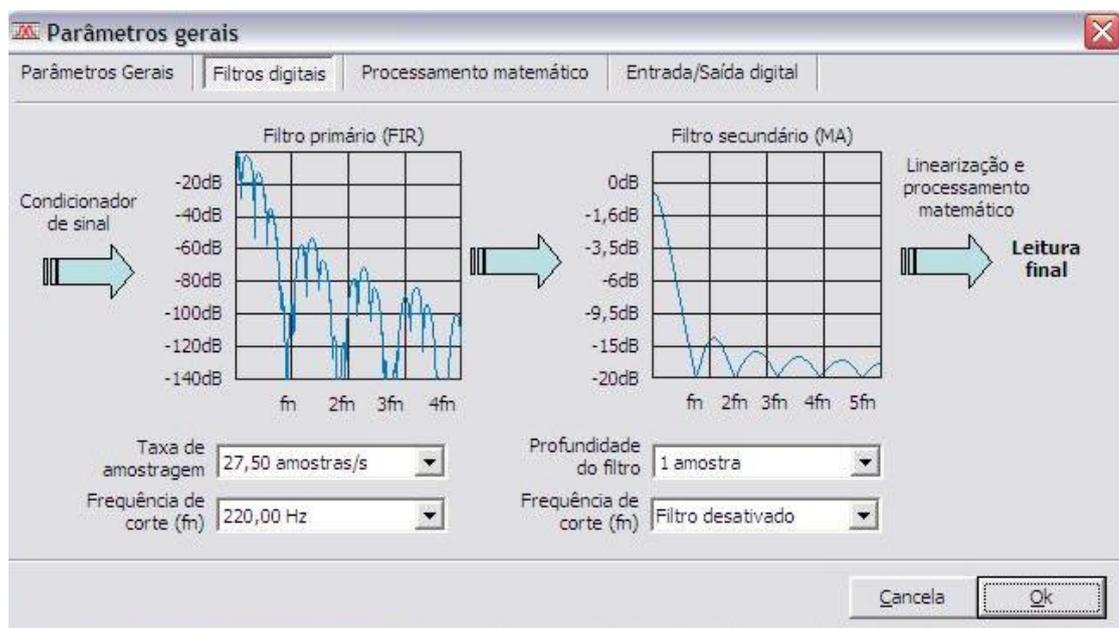


Figura 3.16 – Filtros digitais para tratamento do sinal.

O critério de parada da coleta de amostras também pode ser ajustado via comando no software, data e hora programada, tempo decorrido, numero de amostras armazenadas ou através da detecção de sinal externo como mostra a **Figura 3.17**. Neste estudo foi utilizado o

critério de parada após um tempo definido de 10 segundo. Tempo este suficiente para completar um ciclo de soldagem.

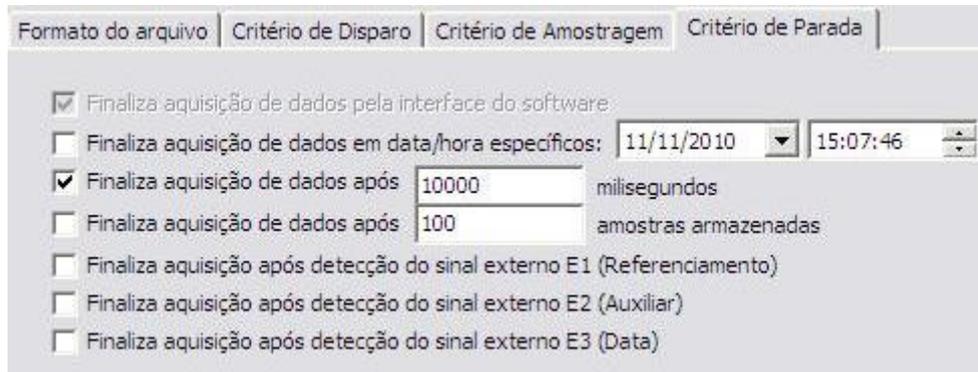


Figura 3.17 – Critérios de parada da aquisição de dados.

Após feita a coleta dos valores de deslocamento ao final do ciclo de solda. O software armazena automaticamente os dados em um arquivo de texto. Os valores foram gerados em seqüência no mesmo arquivo a cada novo ciclo de soldagem. Este arquivo é composto por duas colunas de dados como pode ser visto na **Figura 3.18**. A coluna a esquerda representa o tempo decorrido em micro-segundos a partir de cada disparo. Já a coluna a direita representa o deslocamento do eletrodo em milímetros correspondente a cada instante de tempo registrado.

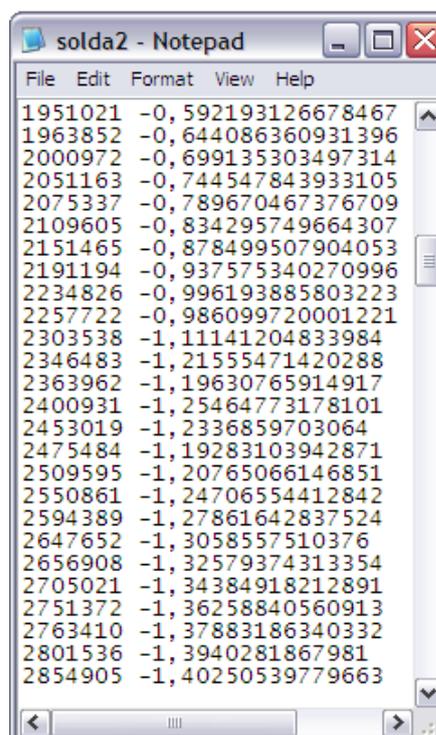


Figura 3. 18 – Arquivo gerado com deslocamento do eletrodo a cada instante decorrido.

As curvas de deslocamento foram plotadas no software Microsoft Excel a partir dos dados armazenados no arquivo de texto. Para melhorar a visualização das curvas geradas foram selecionados somente os pontos correspondentes ao momento de cada ciclo de soldagem.

4- RESULTADOS E ANÁLISES

Os itens a seguir apresentam a descrição e a análise dos resultados obtidos em cada etapa experimental realizada conforme ilustrado no fluxograma da *Figura 3.12*.

4.1 – Aplicação do método de Taguchi

O arranjo ortogonal L27 gerado para esta primeira etapa experimental pode ser observado na *Tabela 4.1*. A ordem dos parâmetros foi definida de forma a provocar mais variação entre os parâmetros secundários (pré-aquecimento, pós-aquecimento, resfriamento, subida e descida de corrente) buscando melhor investigar seus impactos na qualidade. Os parâmetros primários (corrente de solda, tempo de solda, pressão entre eletrodos) possuem alta influencia na qualidade dos pontos de solda com base na literatura como descrito por Martin et al (2009) , Lin et al (2007), entre outros.

Os experimentos foram divididos em dois blocos. No primeiro bloco foram geradas as respostas de força máxima de cisalhamento e indentação com o eletrodo sem desgaste. No segundo bloco, as respostas foram obtidas com o eletrodo desgastado. Para os testes de força máxima de cisalhamento foram realizadas três rodadas de experimentos com o eletrodo sem desgaste (usinado) e três rodadas com o eletrodo desgastado, totalizando seis amostras para cada combinação dos parâmetros. O tipo de rompimento de cada amostra foi registrado logo após realizado os testes para avaliação da resistência mecânica. Nos testes para verificação de indentação foram consideradas as indentações de ambos os lados de cada ponto de solda. Foram feitas duas réplicas com a condição do eletrodo sem desgaste e duas réplicas com eletrodo desgastado.

Tabela 4. 1 – Arranjo ortogonal de Taguchi L27 utilizado no experimento.

Corrente (%)	Tempo de solda (ciclos)	Pressão (bar)	Pré aquecimento (ciclos,%)	Pós aquecimento (ciclos,%)	Resfriamento (ciclos)	Subida de corrente (ciclos)	Descida de corrente (ciclos)
65%	15	3	0	0	0	0	0
65%	15	3	0	20c,30%	20	3	3
65%	15	3	0	30c,50%	40	6	6
65%	25	4	20c,30%	0	0	0	3
65%	25	4	20c,30%	20c,30%	20	3	6
65%	25	4	20c,30%	30c,50%	40	6	0
65%	35	5	30c,50%	0	0	0	6
65%	35	5	30c,50%	20c,30%	20	3	0
65%	35	5	30c,50%	30c,50%	40	6	3
70%	15	4	30c,50%	0	20	6	0
70%	15	4	30c,50%	20c,30%	40	0	3
70%	15	4	30c,50%	30c,50%	0	3	6
70%	25	5	0	0	20	6	3
70%	25	5	0	20c,30%	40	0	6
70%	25	5	0	30c,50%	0	3	0
70%	35	3	20c,30%	0	20	6	6
70%	35	3	20c,30%	20c,30%	40	0	0
70%	35	3	20c,30%	30c,50%	0	3	3
75%	15	5	20c,30%	0	2	3	0
75%	15	5	20c,30%	20c,30%	0	6	3
75%	15	5	20c,30%	30c,50%	20	0	6
75%	25	3	30c,50%	0	40	3	3
75%	25	3	30c,50%	20c,30%	0	6	6
75%	25	3	30c,50%	30c,50%	20	0	0
75%	35	4	0	0	40	3	6
75%	35	4	0	20c,30%	0	6	0
75%	35	4	0	30c,50%	20	0	3

As respostas de força máxima de cisalhamento obtidas em cada amostra são mostradas na **Tabela 4.2**. As colunas de Y1 correspondem as respostas obtidas com os eletrodos sem desgaste (usados). Já as três colunas de Y2 referem-se as respostas obtidas com os eletrodos desgastados.

Percebe-se que os resultados variaram consideravelmente. Porém, poucas amostras apresentaram valores satisfatórios. Considerando que pontos de solda de qualidade em chapas de 1mm de aço galvanizado podem resistir a forças superiores a 3500N com base em trabalhos tais como Aslanlar (2004), Darwish et al. (1999), e nos experimentos preliminares, grande parte das respostas apresentaram valores não satisfatórios. Pode-se concluir destes resultados que os níveis adotados para os parâmetros não estavam dentro de uma boa faixa de operação.

Tabela 4. 2 - Valores de força máxima de cisalhamento obtidos.

Força máxima de cisalhamento com o eletrodo usinado (N)			Força máxima de cisalhamento com o eletrodo usinado (N)		
(Y1)			(Y2)		
Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3
1695	1338	2139	2387	1930	2115
1464	*	1854	1421	1692	2058
*	*	1961	1631	1687	1873
1666	1859	2644	2307	2157	1358
1728	1821	2285	*	1963	2006
1607	1744	2298	1832	1972	2205
2266	1846	2456	2321	2456	2625
1872	*	2317	1936	2145	1773
2105	1941	1657	2274	2316	1723
1721	1906	2307	2240	1564	2133
2005	2573	2350	1982	2247	2262
2043	2407	2495	2435	2309	1607
2001	2126	2198	2086	2554	1685
2271	2594	2730	2361	2544	2596
2461	1825	3066	1840	2470	2202
2487	2233	3932	3437	3548	3686
2739	2171	3873	3366	3399	3812
2770	1961	3612	3646	2978	3634
2333	2404	2615	2352	2532	1873
2385	2292	1730	1474	2345	2267
2381	2340	3213	1904	2848	3024
3636	3124	4198	3698	3783	4172
3477	2741	4068	3638	3643	3843
3880	3693	4331	4196	4198	4222
4179	3933	4600	3935	4173	4277
3964	4063	4101	3766	4149	4218
4313	4332	4253	3824	4270	4381

O tipo de rompimento obtido em cada amostra, confirma que a maior parte das soldas não obteve boa qualidade. Somente sete soldas apresentaram rompimento por arrancamento do ponto ou rasgamento da chapa, avaliações estas estabelecidas conforme critério de padronização mostrado na **Figura 3.12**. As demais chapas apresentaram rompimento interfacial, o que confirma que os níveis adotados estavam em uma faixa não ideal.

Os resultados de indentação máxima das amostras podem ser observados na **Tabela 4.3**. Baseado no limite de indentação máxima de 20% da espessura da chapa mais comumente adotado na indústria para chapas finas de aço galvanizado, nota-se que alguns resultados apresentaram valores altos de indentação. Estas soldas estão destacadas em vermelho e, em geral, correspondem as amostras que suportaram maiores forças de cisalhamento. Desta observação conclui-se que existe uma possível correlação entre força máxima de cisalhamento e indentação máxima dos pontos de solda. Esta hipótese será melhor investigada mais adiante neste trabalho.

Tabela 4. 3 – Valores de indentação máxima obtidos.

Indentação com eletrodo usinado (mm)				Indentação com o eletrodo desgastado (mm)			
Y1				Y2			
Z1		Z2		Z1		Z2	
Lado A	Lado B	Lado A	Lado B	Lado A	Lado B	Lado A	Lado B
0,02	0,03	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05
0,01	0,01	0,03	0,03	0,02	0,03	0,04	0,04
0,01	0,01	0,04	0,05	0,03	0,02	0,04	0,03
0,03	0,03	0,05	0,05	0,05	0,04	0,07	0,05
0,02	0,02	0,08	0,06	0,05	0,04	0,05	0,07
0,02	0,02	0,05	0,05	0,05	0,04	0,06	0,07
0,10	0,07	0,18	0,17	0,14	0,10	0,20	0,20
0,10	0,07	0,13	0,15	0,16	0,12	0,14	0,11
0,06	0,08	0,16	0,14	0,13	0,12	0,16	0,15
0,02	0,02	0,07	0,08	0,08	0,08	0,09	0,07
0,06	0,05	0,12	0,13	0,10	0,07	0,13	0,12
0,06	0,05	0,10	0,08	0,09	0,06	0,12	0,10
0,06	0,07	0,12	0,13	0,12	0,08	0,12	0,09
0,07	0,12	0,18	0,17	0,16	0,11	0,15	0,15
0,07	0,06	0,16	0,15	0,13	0,09	0,12	0,10
0,05	0,04	0,18	0,15	0,12	0,10	0,21	0,20
0,05	0,05	0,19	0,17	0,13	0,09	0,23	0,20
0,05	0,05	0,20	0,17	0,12	0,09	0,21	0,19
0,06	0,05	0,13	0,13	0,11	0,08	0,14	0,11
0,04	0,07	0,11	0,11	0,09	0,05	0,13	0,13
0,11	0,05	0,19	0,19	0,13	0,08	0,18	0,17
0,09	0,08	0,21	0,21	0,15	0,12	0,22	0,21
0,07	0,07	0,22	0,21	0,12	0,08	0,20	0,20
0,12	0,11	0,22	0,24	0,17	0,14	0,23	0,23
0,17	0,21	0,31	0,32	0,25	0,18	0,34	0,32
0,18	0,15	0,29	0,30	0,27	0,17	0,27	0,28
0,23	0,30	0,32	0,34	0,32	0,22	0,35	0,37

A análise estatística de Taguchi realizada para investigar o impacto de cada parâmetro nas respostas de qualidade foi feita utilizando o software Minitab versão 15. Pode-se observar nas *tabelas 4.4 e 4.5*, os níveis de significância (valor p) obtidos para cada parâmetro na força máxima de cisalhamento e indentação máxima, respectivamente. As tabelas também mostram a classificação de cada parâmetro no impacto causado na resposta, o desvio padrão (S) na relação sinal ruído das respostas obtidas e a explicabilidade (R-Sq) dos modelos gerados e ajustados.

Tabela 4. 4 – Significância dos parâmetros e explicabilidade para força máxima de cisalhamento.

Termo	F	Valor p	Classificação
Corrente	214,79	0,000	1
Tempo de solda	110,59	0,000	2
Pressão	47,51	0,000	3
Pré aquecimento	10,88	0,003	4
Pós aquecimento	1,27	0,322	8
Resfriamento	2,97	0,097	7
Subida de corrente	5,92	0,020	6
Descida de corrente	7,7	0,009	5
<hr/>			
S	0,4396		
R-Sq	98,80%		
R-Sq(ajustado)	96,80%		

Tabela 4. 5 – Significância dos parâmetros e explicabilidade para indentação máxima.

Termo	F	Valor p	Classificação
Corrente	319,56	0,000	1
Tempo de solda	260,50	0,000	2
Pressão	21,65	0,000	3
Pré aquecimento	22,01	0,000	4
Pós aquecimento	1,45	0,279	7
Resfriamento	0,30	0,750	8
Subida de corrente	14,97	0,001	5
Descida de corrente	2,88	0,103	6
<hr/>			
S	0,7648		
R-Sq	99,00%		
R-Sq(ajustado)	98,00%		

Pode-se observar na *tabela 4.4* que os parâmetros de corrente de soldagem, tempo de soldagem e pressão dos eletrodos exercem maior impacto na resistência dos pontos de solda conforme descrito por diversos autores como Martin et al (2009), Pereira (2009), Aslanlar et al(2004) entre outros.

Os parâmetros de pré-aquecimento, subida e descida de corrente também apresentaram efeito significativo (Valor $p < 0,05$) na resistência dos pontos. Porém, apresentaram menor impacto nos testes preliminares. O parâmetro de pré-aquecimento mostrou-se importante devido a sua reconhecida ação na queima do revestimento das chapas (GEDEON, 1986; MEI, 2009 ; WANG, 2009), que interferiu diretamente na fusão do ponto e na sua qualidade.

Os parâmetros de tempo de resfriamento e pós aquecimento não apresentaram efeito significativo (Valor $p > 0,05$) sobre a resistência dos pontos de solda. Os resultado obtido na análise de Taguchi para força máxima de cisalhamento apresentou um desvio padrão na razão sinal ruído (S) de 0,4396 , com explicabilidade ajustada (R-Sq adj) de 96,8%.

Para resposta de indentação máxima (*tabela 4.5*), os parâmetros de corrente de soldagem, tempo de soldagem e pressão dos eletrodos, assim como na resistência dos pontos, exercem maior impacto na indentação. Os parâmetros de pré-aquecimento, e subida de corrente também apresentaram efeito significativo (Valor $p < 0,05$) na indentação dos pontos. Similarmente ao ocorrido nas respostas de resistência dos pontos, o parâmetro de subida de corrente apresentou menor impacto na indentação, podendo assim ser desconsiderado. A queima do revestimento das chapas causada pelo pré-aquecimento contribuiu para o aumento dos níveis de indentação, o que confirma a significância deste parâmetro na qualidade das soldas. Os parâmetros de tempo de resfriamento, descida de corrente e tempo de pós pressão não apresentaram efeito significativo (Valor $p > 0,05$) sobre a indentação dos pontos. O modelo gerado para indentação apresentou um desvio padrão na razão sinal ruído (S) = 0,7648 , com ajuste (R-Sq adj) de 98%.

Os gráficos com os impactos de cada parâmetro na força máxima de cisalhamento e na indentação máxima são mostrados nas *Figuras 4.1 e 4.2*, respectivamente. Utilizou-se uma razão sinal ruído do tipo maior-melhor (LB) nas respostas do modelo gerado para força máxima de cisalhamento, pois é desejável a maximização dos valores de resistência das soldas. No modelo gerado para indentação máxima foi utilizada uma razão sinal ruído do tipo menor-melhor (SB) sobre respostas, considerando a busca por valores menores de indentação dos pontos de solda.

Pode-se observar na *Figura 4.1* que maiores valores na razão sinal ruído para resistência foram alcançados utilizando-se maiores níveis de corrente e tempo de soldagem e menores níveis de pressão dos eletrodos. Já para a indentação dos pontos, os gráficos da *Figura 4.2* mostram que maiores valores na razão sinal ruído, foram alcançados com menores níveis de corrente, tempo de soldagem, e pressão dos eletrodos. Os resultados obtidos mostram que deve-se buscar um equilíbrio dos níveis para obter valores satisfatórios de força máxima de cisalhamento e indentação.

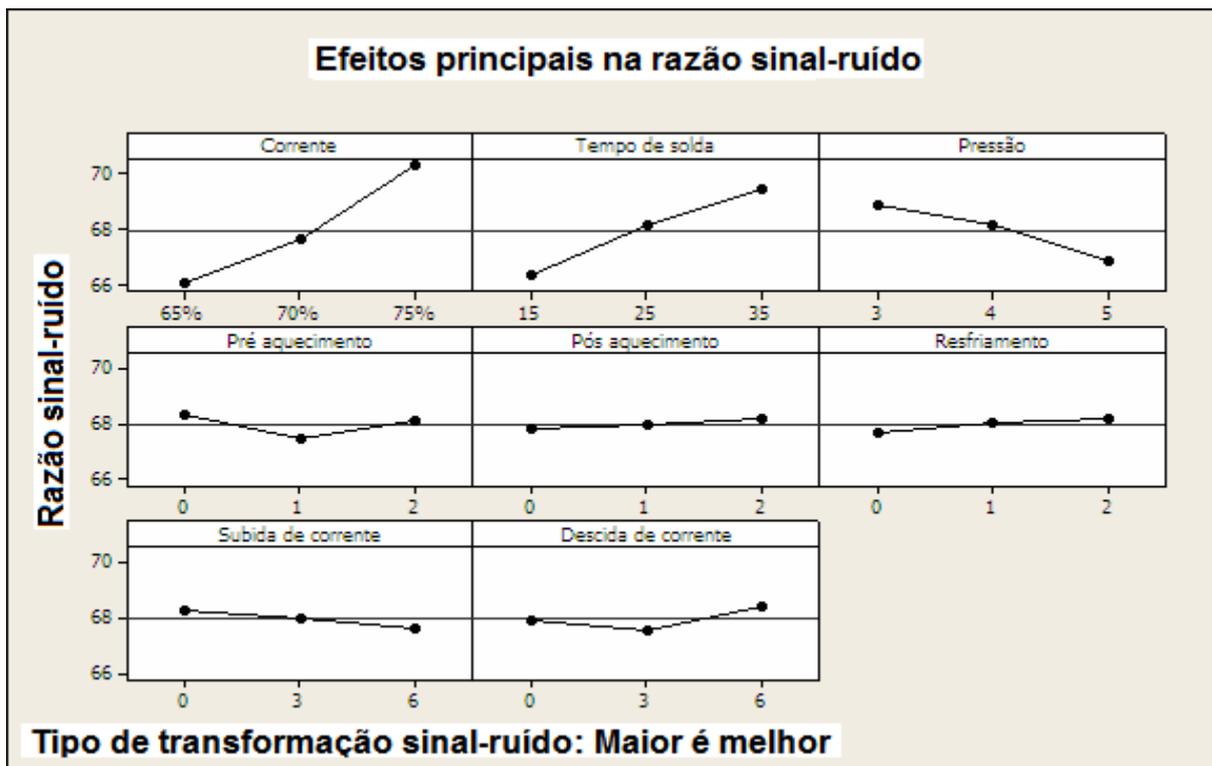


Figura 4. 1 – Efeito dos parâmetros com razão sinal-ruído para força máxima de cisalhamento.

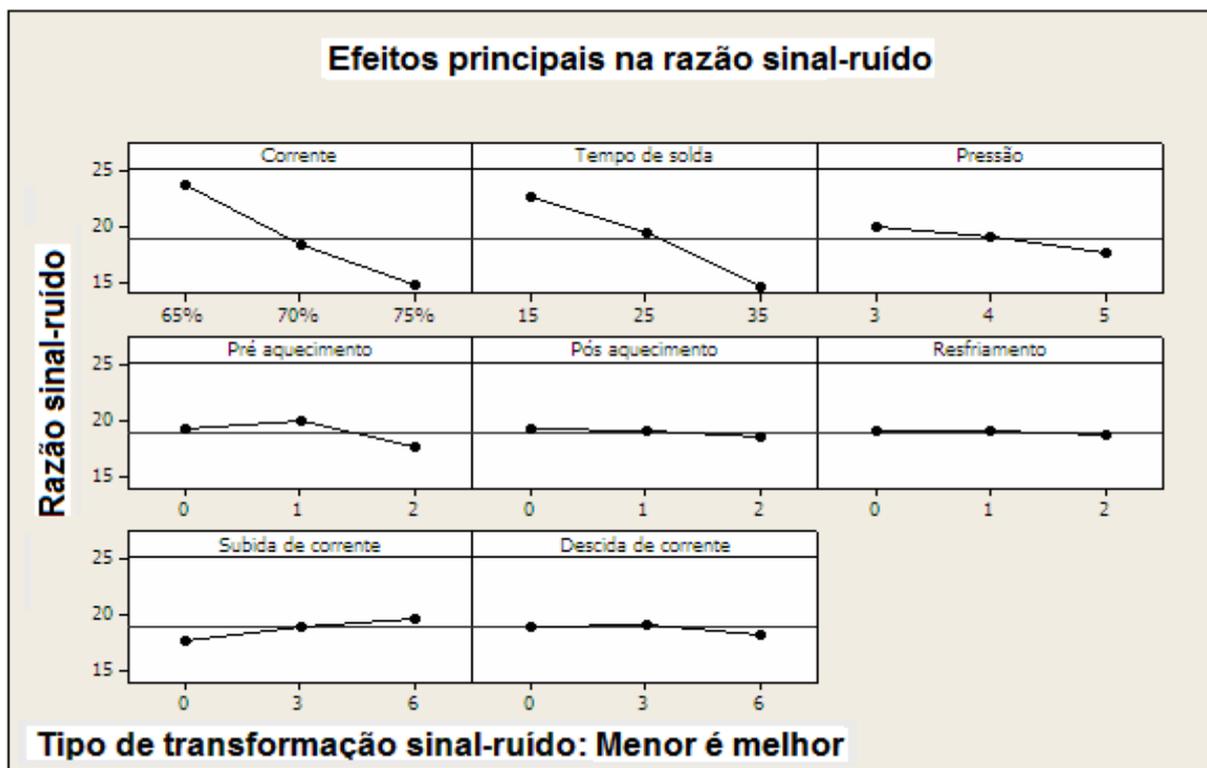


Figura 4.2 - Efeito dos parâmetros com razão ao sinal-ruído na indentação máxima.

A análise de resíduos feita sobre os resultados de força máxima de cisalhamento obtida para cada amostra pode ser observada na **Figura 4.3**. O gráfico de teste de normalidade e o histograma indicaram distribuição normal dos resíduos. Já os gráficos de resíduos padronizados por intensidade das respostas e por ordem dos experimentos apontam todas as amostras dentro de um desvio padrão em relação a média das amostras, não havendo assim amostras a serem descartadas.

A análise dos resíduos das respostas de indentação máxima, mostrados na **Figura 4.4** indica distribuição normal dos resíduos obtidos nos experimentos. Os gráficos residuais das amostras por ordem de amostragem e por valor ajustado também apontam todas as amostras dentro de um intervalo padronizado inferior a um desvio padrão da média das amostras, o que mostra que não há nenhuma amostra a ser descartada.

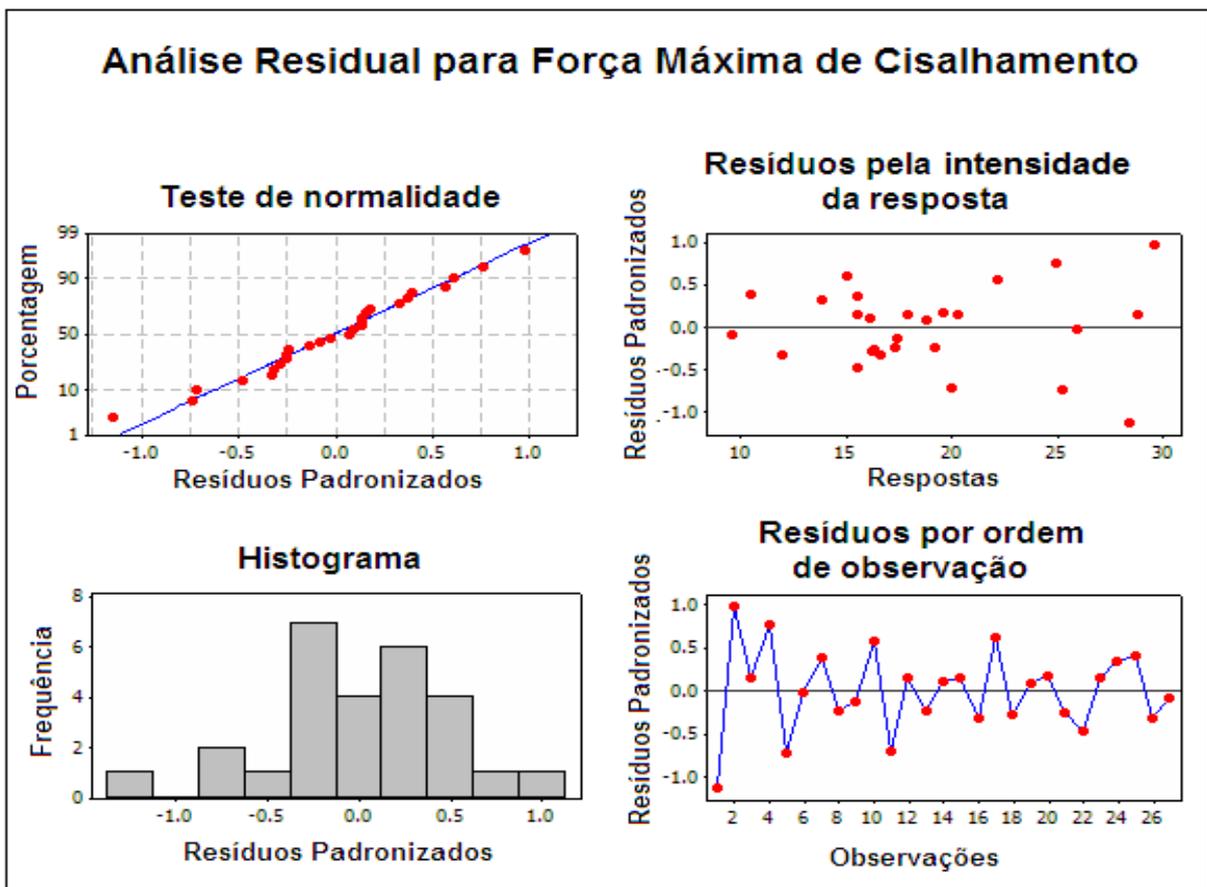


Figura 4.3 – Gráficos de análise dos resíduos para força máxima de cisalhamento.

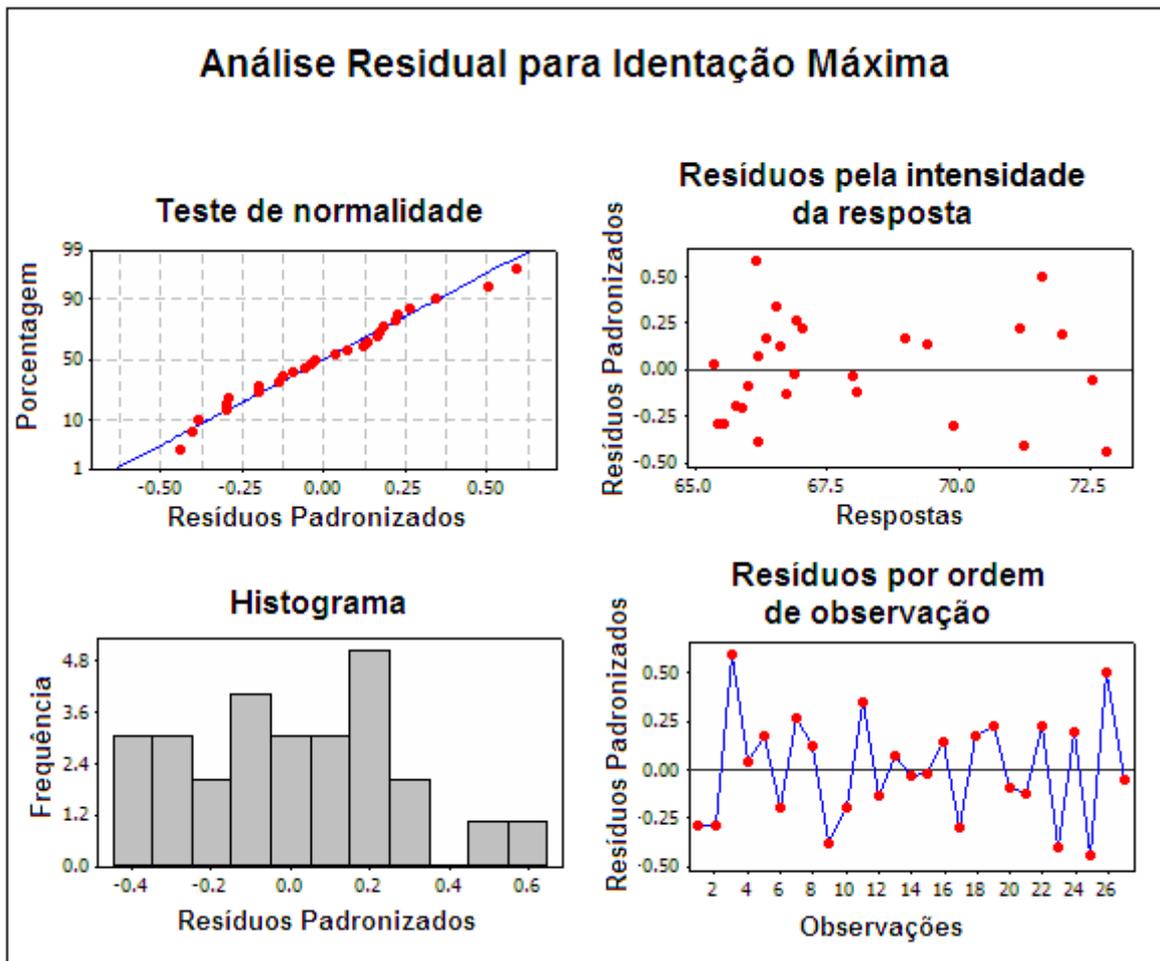


Figura 4. 4 – Gráficos de análise dos resíduos para indentação máxima.

4.2 – Aplicação do método fatorial completo

Com base nas respostas obtidas na primeira etapa dos experimentos, foram selecionados para esta segunda etapa experimental os parâmetros de corrente de soldagem, tempo de soldagem, pressão dos eletrodos e pré-aquecimento (tempo/corrente). Estes parâmetros mostraram-se mais significativos e foram explorados visando avaliar a sua influência na soldagem de chapas galvanizadas e, conseqüentemente, permitir alcançar níveis mais eficazes com o intuito de melhorar o processo no que tange a qualidade final da solda. Novos testes preliminares foram feitos para definir as novas faixas dos parâmetros para garantir melhores resultados. Percebeu-se, então, que valores elevados de corrente aplicados com tempos de ciclo reduzidos geravam soldas mais limpas e resistentes. Sendo assim, os níveis dos parâmetros foram redefinidos conforme mostrado na **Tabela 4.6**. Procurou-se

estimar níveis mínimos de forma a garantir o rompimento das amostras por arrancamento do ponto ou rasgamento das chapas, e níveis máximos que não causassem excesso de fusão no ponto e desgaste e excessivo do eletrodo.

Tabela 4. 6 – Níveis dos parâmetros para experimento fatorial completo.

Fator	Níveis	
Corrente de solda	86% (5,16kA)	88% (5,28kA)
Tempo de solda	10 ciclos	12 ciclos
Pressão	3 bar	5 bar
Pré-aquecimento	0	10 ciclos, 50%

No arranjo final, foram incluídos 5 centrais que somados aos 32 experimentos da parte fatorial com quatro fatores e dois níveis com uma réplica, totalizando 37 experimentos conforme mostrado na **Tabela 4.7**. A ordem dos experimentos foi aleatória para evitar tendências e a condição dos eletrodos foi mantida em uma condição mediana entre usinado e desgastado ao longo dos experimentos.

A **Tabela 4.7** mostra as respostas de indentação máxima, força máxima de cisalhamento e tipo de rompimento obtido em cada amostra experimental.

As respostas obtidas nesta segunda etapa experimental foram satisfatórias. Pôde-se verificar que a nova faixa operacional dos parâmetros foi melhor definida para traçar novos modelos de estimativa para força máxima de cisalhamento e indentação máxima. As tendências de curvatura nas respostas indicaram que os níveis adotados foram eficazes para encontrar a região de ótimo global de operação considerando todos os níveis dos parâmetros possíveis de serem trabalhados dentro das limitações do objeto de estudo. As curvaturas nas respostas analisadas podem indicar pontos de máximo ou de mínimo para que o processo atinja os melhores resultados. No modelo de força máxima de cisalhamento procurou-se obter pontos de máximo, que obviamente conduz a uma solda mais resistente, ao passo que no modelo de indentação procurou-se obter pontos de mínimo, evitando assim prováveis expulsões de material, risco de trincas internas e soldas com aparência indesejável.

Como pode ser observado na **Tabela 4.7**, 92% das amostras obtiveram rompimento por arrancamento do ponto, rasgamento das chapas, ou uma combinação de ambos. Esse resultado confirmou que os níveis adotados foram mais adequados para a obtenção de soldas

de melhor qualidade. A média de força máxima de cisalhamento suportada pelos pontos ficou em 4149N com desvio padrão de 259

Tabela 4.7 – Arranjo fatorial completo com pontos centrais e respostas obtidas.

FATORES				RESPOSTAS		
Corrente (%)	Tempo (ciclos)	Pressão (bar)	Pre-aquecimento (ciclos,%)	Identação Máx (mm)	Força Máx (N)	Tipo de Rompimento
86	10	3	0	0,08	3876	arrancamento
88	10	3	0	0,09	4059	arrancamento/ rasgamento
86	12	3	0	0,15	4353	rasgamento
88	12	3	0	0,17	4364	arrancamento/ rasgamento
86	10	5	0	0,15	3500	Interfacial
88	10	5	0	0,19	3935	arrancamento
86	12	5	0	0,22	4260	arrancamento/ rasgamento
88	12	5	0	0,22	4232	arrancamento/ rasgamento
86	10	3	10c,50%	0,21	4104	arrancamento
88	10	3	10c,50%	0,18	4186	rasgamento
86	12	3	10c,50%	0,18	4550	arrancamento/ rasgamento
88	12	3	10c,50%	0,20	4424	arrancamento/ rasgamento
86	10	5	10c,50%	0,15	3733	arrancamento
88	10	5	10c,50%	0,25	4100	arrancamento
86	12	5	10c,50%	0,26	4326	arrancamento/ rasgamento
88	12	5	10c,50%	0,27	4350	arrancamento/ rasgamento
86	10	3	0	0,12	3978	arrancamento
88	10	3	0	0,16	4286	arrancamento/ rasgamento
86	12	3	0	0,15	4243	arrancamento/ rasgamento
88	12	3	0	0,15	4142	arrancamento/ rasgamento
86	10	5	0	0,18	3619	Interfacial
88	10	5	0	0,17	3932	rasgamento
86	12	5	0	0,23	4250	rasgamento
88	12	5	0	0,22	4294	arrancamento/ rasgamento
86	10	3	10c,50%	0,16	4009	arrancamento/ rasgamento
88	10	3	10c,50%	0,23	*	*
86	12	3	10c,50%	0,25	4379	arrancamento/ rasgamento
88	12	3	10c,50%	0,25	4507	rasgamento
86	10	5	10c,50%	0,16	3489	arrancamento
88	10	5	10c,50%	0,20	4021	arrancamento
86	12	5	10c,50%	0,27	4367	arrancamento/ rasgamento
88	12	5	10c,50%	0,25	4412	arrancamento/ rasgamento
87	11	4	5c,50%	0,17	4213	arrancamento/ rasgamento
87	11	4	5c,50%	0,17	4187	arrancamento/ rasgamento
87	11	4	5c,50%	0,16	4205	arrancamento/ rasgamento
87	11	4	5c,50%	0,17	4210	arrancamento/ rasgamento
87	11	4	5c,50%	0,16	4279	arrancamento/ rasgamento

Este valor de média é muito superior ao encontrado na etapa anterior. Os valores de indentação também foram satisfatórios, ficando abaixo dos valores encontrados na primeira etapa e com uma média de 0,188mm, próxima ao limite de 0,20 mm utilizado como referência neste estudo, com desvio de 0,0472. Todas as respostas apresentaram distribuição normal e nenhuma amostra teve de ser descartada. Os gráficos residuais para força de cisalhamento e indentação podem ser observados nas *Figuras 4.5 e 4.6*, respectivamente.

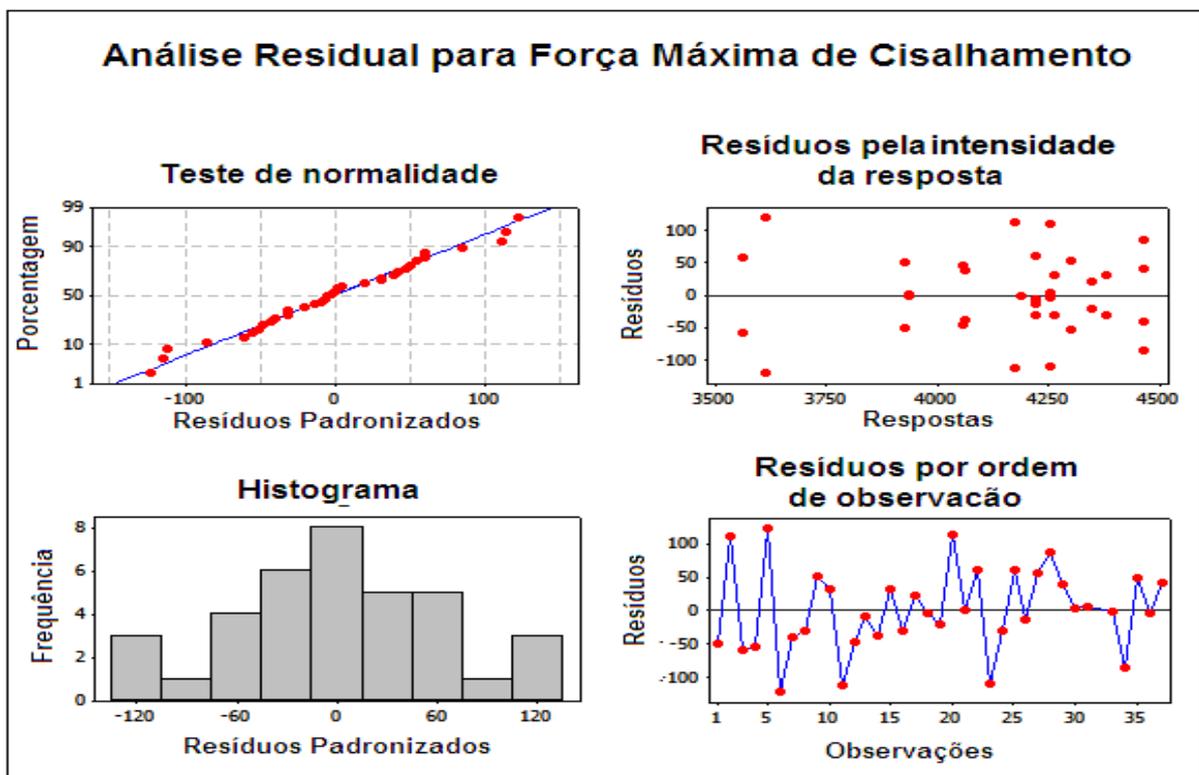


Figura 4. 5 – Gráficos de análise dos resíduos para força máxima de cisalhamento.

Os valores de significância (valor p) referentes a cada parâmetro analisado em relação a força máxima de cisalhamento seguidos do desvio padrão do modelo, do coeficiente de curvatura, grau de ajuste do modelo e explicabilidade do modelo podem ser observados na *Tabela 4.8*. Os valores nulos do Valor p mostram que todos os parâmetros possuem significância na resposta analisada. O índice de curvatura ficou em 0,057, um pouco acima do ideal de curvatura (0,05) porém, muito próximo do ideal, o que mostra uma forte tendência de curvatura na resposta. O grau de ajuste apresentado pelo modelo foi de 0,726 e o desvio padrão (S) estimado foi de 79,489. O coeficiente de explicabilidade do modelo ajustado (R-Sq

adj) foi de 90%. Estes coeficientes obtidos mostram que os níveis adotados para os parâmetros estão em uma faixa próxima do ideal dentro da região de contorno específica no presente trabalho.

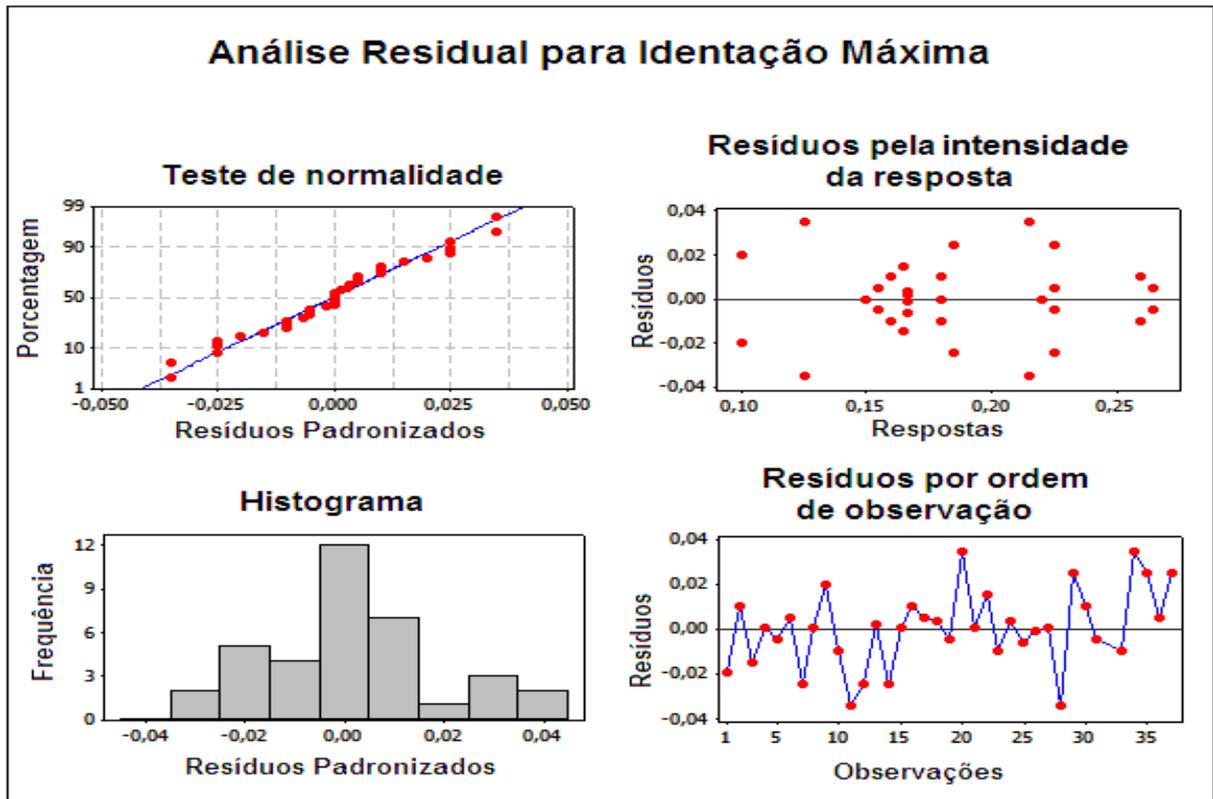


Figura 4.6 – Gráficos de análise dos resíduos para indentação máxima.

Tabela 4. 8 – Efeitos obtidos no modelo fatorial completo para estimar força máxima de cisalhamento.

Termo	Efeito	Valor p
Corrente de solda	77,84	0,000
Tempo de solda	198,22	0,000
Pressão	-91,34	0,000
Pré-aquecimento	59,91	0,000
<hr/>		
Desvio padrão (S)	79,48	
Curvatura	0,057	
Grau de Ajuste (<i>Lack of fit</i>)	0,726	
R-Sq(adj)	90,62%	

Os gráficos de força máxima de cisalhamento obtidos em relação a cada parâmetro nesta etapa são mostrados na **Figura 4.7**. O aumento dos níveis de corrente, tempo de soldagem e pré-aquecimento causou o aumento do calor no ponto de solda, aumentando assim a fusão no ponto e conseqüentemente, elevando sua resistência. Porém, existe a tendência de diminuição da resistência após um certo nível destes parâmetros devido ao excesso de fusão que pode acarretar em expulsão de material. Embora a corrente tenha sido classificada anteriormente como fator de maior impacto na resistência dos pontos, esta mostrou um impacto inferior ao tempo de soldagem. Uma hipótese cabível para este comportamento diz respeito ao desgaste excessivo do eletrodo em maiores níveis de corrente devido a queima do revestimento das chapas, o que limitou a amplitude dos níveis de corrente adotados, diminuindo assim o impacto deste parâmetro na resposta. O aumento do nível de pressão dos eletrodos provocou diminuição da resistência dos pontos devido a diminuição de resistência entre os eletrodos, o que implicou na redução do calor gerado levando a menores valores de resistência.

Observando os dois pontos fatoriais e o ponto central de cada gráfico traçado, pode-se notar uma tendência de concavidade. Considerando que se deseja maximizar a força de cisalhamento suportada pelos pontos de solda, a tendência de curvatura com perfil côncavo mostra-se bastante favorável para encontrar o ponto de ótimo, pois converge em um ponto de resistência máxima da solda.

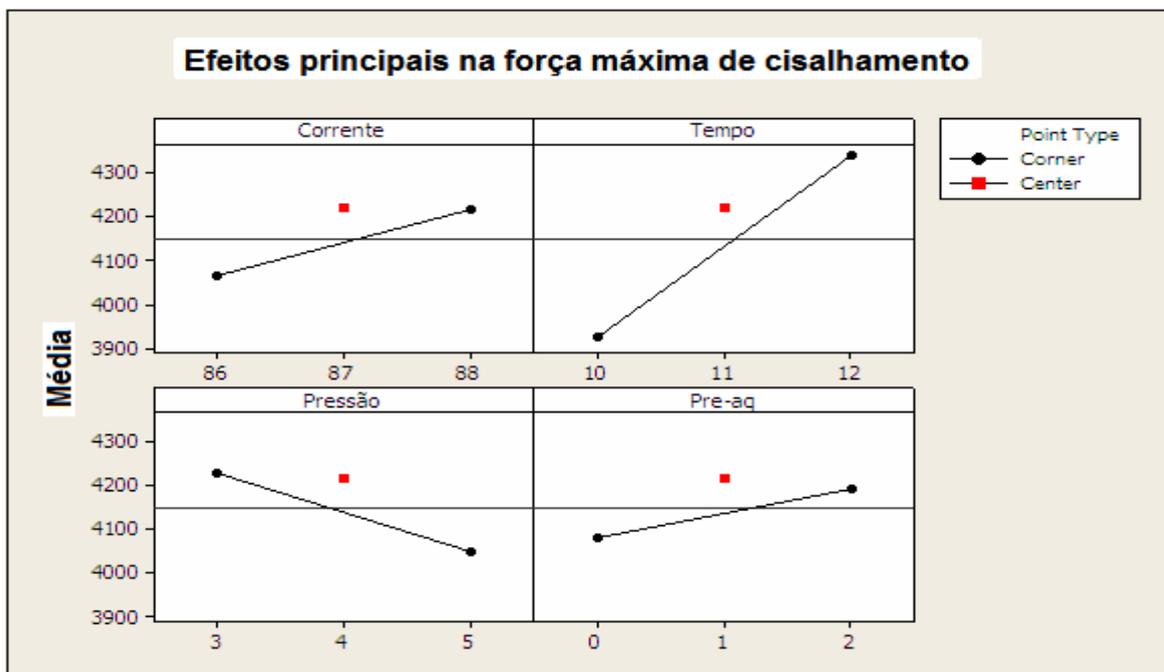


Figura 4.7 – Efeitos principais dos parâmetros na força máxima de cisalhamento.

Os efeitos obtidos pelo modelo gerado para indentação máxima podem ser observados na **Tabela 4.9**. Os valores p ficaram abaixo de 0,05 para os quatro parâmetros analisados, o que mostra significância destes parâmetros também em relação a indentação máxima dos pontos de solda. O valor p do teste de curvatura obtido foi de 0,034, abaixo de 0,05, apontando curvatura nas respostas. O grau de ajuste do modelo foi de 0,752 e o desvio padrão (S) estimado para a resposta ficou em 0,023. A explicabilidade (R-Sq) do modelo ajustado (R-Sq adj) foi de 76,03%. Estes efeitos obtidos mostraram que os níveis adotados para os parâmetros estão dentro de uma faixa propícia para garantir além de um valor ótimo de resistência dos pontos, um valor minimizado de indentação dos mesmos.

Tabela 4. 9 – Efeitos obtidos no modelo fatorial completo para estimar indentação máxima.

Termo	Efeito	Valor p
Corrente de solda	0,00875	0,041
Tempo de solda	0,02375	0,000
Pressão	0,02063	0,000
Pré-aquecimento	0,02562	0,000
Desvio padrão (S)	0,023	0,023
Curvatura	0,034	0,034
Grau de Ajuste (<i>Lack of fit</i>)	0,752	0,752
R-Sq(adj)	76,03%	76,03%

Os gráficos com as respostas de indentação máxima obtidas para cada parâmetro são mostrados na **Figura 4.8**.

O aumento dos níveis de corrente, tempo de soldagem, pressão dos eletrodos e pré-aquecimento causou o aumento da indentação sobre os pontos devido ao aumento de calor e da fusão no ponto de solda. Assim como o ocorrido para o modelo de força máxima de cisalhamento, a corrente mostrou-se menos significativa que os demais parâmetros, embora tenha sido classificada anteriormente como fator de maior impacto na indentação dos pontos. A mesma hipótese apontada para a força máxima de cisalhamento aplica-se para a indentação dos pontos. O desgaste excessivo do eletrodo em maiores níveis de corrente devido a queima do revestimento das chapas limitou a amplitude dos níveis de corrente adotados, diminuindo assim o impacto deste parâmetro na indentação.

Ao contrário dos gráficos do modelo de força máxima de cisalhamento, pode-se observar uma tendência de convexidade entre os dois pontos fatoriais e o ponto central de cada gráfico. Considerando o objetivo de minimizar a indentação dos pontos de solda, a tendência de perfil convexo mostra-se ideal para encontrar um ponto de menor indentação, pois converge para um ponto de mínimo.

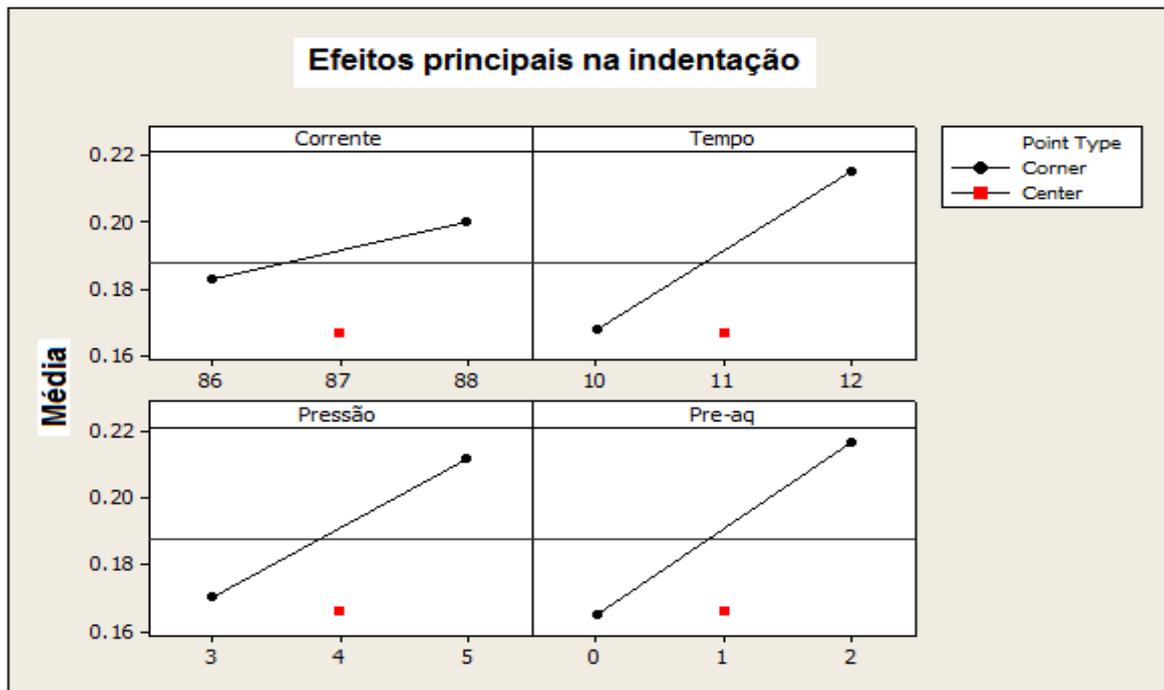


Figura 4.8 – Efeitos principais dos parâmetros na indentação máxima.

Algumas interações entre os fatores também se mostraram significativas tanto para o modelo de força de cisalhamento quanto para o modelo de indentação. Essas interações serão analisadas a seguir na etapa de superfície de resposta.

4.3 – Aplicação do método de superfície de resposta

As respostas obtidas na etapa anterior mostraram que os níveis escolhidos para os parâmetros de corrente de solda, tempo de solda, pressão dos eletrodos e calor de pré-aquecimento, foram satisfatórios para gerar modelos de alta explicabilidade para estimar força máxima de cisalhamento e indentação máxima. Partindo dos níveis adotados no arranjo fatorial completo, passou-se para a terceira etapa experimental, onde foi aplicado o método de

superfície de resposta objetivando encontrar os modelos finais para estimar a força máxima de cisalhamento e indentação máxima das soldas. No modelo de superfície de resposta, foram incluídos os termos quadráticos de cada fator e as interações entre estes.

Os níveis de corrente de soldagem e tempo de soldagem foram mantidos os mesmos. Devido a alguns experimentos de ajuste, o nível mínimo de pressão dos eletrodos foi redefinido em 4bar e o tempo de preaquecimento foi definido de 0 a 6 ciclos conforme mostrado *na Tabela 4.10*.

Tabela 4. 10 – Níveis dos parâmetros para experimento de superfície de resposta.

Termo	Níveis Fatoriais		Pontos Centrais	Níveis Axiais	
Corrente de solda	86% (5,16kA)	88% (5,28kA)	87% (5,24kA)	85%	89%
Tempo de solda	10 ciclos	12 ciclos	11 ciclos	9 ciclos	13 ciclos
Pressão	4 bar	5 bar	4,5 bar	3,5 bar	5,5 bar
Pré-aquecimento	0	6 ciclos, 50%	3 ciclos, 50%	0	9 ciclos , 50%

Foi utilizado um arranjo de superfície de resposta composto por cinco pontos centrais, sete pontos axiais e dezesseis pontos fatoriais. Os experimentos foram feitos de forma aleatorizada para evitar tendências.

A seqüência de experimentos e os resultados de força máxima de cisalhamento, indentação máxima, e modo de falha obtidos para cada amostra podem ser observados na *Tabela 4.11*.

O modo de falha obtido nos experimentos foi consistente com o esperado. Todas as amostras obtiveram rompimento dado pelo arrancamento do ponto, rasgamento da chapa ou pela combinação de ambos, confirmando assim que os níveis adotados para gerar os modelos finais foram dimensionados para garantir pontos de solda de alta resistência.

O impacto de cada parâmetro, assim como o impacto das interações na força máxima de cisalhamento e na indentação máxima são mostrados na *Tabela 4.12*. Considerando um nível de significância de 5% (valor $p < 0,05$), os parâmetros de corrente de soldagem (A), tempo de soldagem(B) e pré-aquecimento(D), assim como o quadrado de pressão dos eletrodos (C*C) e a interação entre corrente de soldagem e pré-aquecimento (AxD) mostraram exercer um impacto significativo na força máxima de cisalhamento. Apesar dos demais termos não apontarem significância, o modelo completo considerando todos os coeficientes lineares, quadráticos e interações, apresentou maior porcentagem de

explicabilidade, com R-Sq de 96,07% e R-Sq do modelo ajustado de 91,83%. O modelo completo para força máxima de cisalhamento não apresentou falta de ajuste (*Lack-of-Fit*) de 0.289 com um desvio (S) de 48.648. Porém, verificou-se que o modelo final reduzido sem as iterações (A*B) e (A*C) apresentou maior porcentagem de explicabilidade R-Sq_{aj} de 92,20%, bem como um adequado ajuste (*Lack-of-Fit* de 0.319).

Tabela 4. 11 – Arranjo experimental e respostas dos experimentos de superfície de resposta.

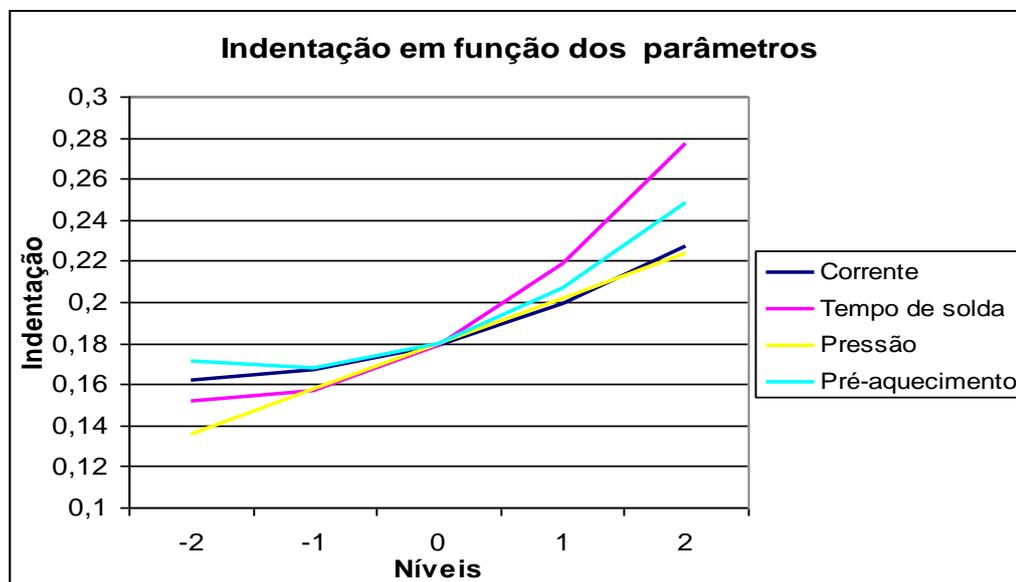
Corrente (%)	Tempo (ciclos)	Pressão (bar)	Pre-aquecimento (ciclos,%)	Identação Máx (mm)	Força Máx (N)	Tipo de Rompimento
86	12	4,0	0	0,13	4184	arrancamento/ rasgamento
88	12	4,0	0	0,18	4312	rasgamento
88	12	5,0	6c, 50%	0,27	4384	arrancamento/ rasgamento
88	10	4,0	6c, 50%	0,17	4206	rasgamento
87	11	3,5	3c , 50%	0,16	4130	rasgamento
86	10	4,0	6c, 50%	0,13	4118	rasgamento
88	10	5,0	0	0,18	3916	arrancamento
88	10	5,0	6c, 50%	0,20	4269	rasgamento
87	11	4,5	9c, 50%	0,19	4510	arrancamento/ rasgamento
86	10	4,0	0	0,10	3904	arrancamento
87	13	4,5	3c , 50%	0,28	4450	arrancamento/ rasgamento
87	11	4,5	3c , 50%	0,17	4250	arrancamento/ rasgamento
87	11	5,5	3c , 50%	0,21	4127	arrancamento
87	9	4,5	3c , 50%	0,15	3857	arrancamento
86	10	5,0	6c, 50%	0,17	4024	arrancamento
87	11	4,5	3c , 50%	0,18	4202	rasgamento
88	12	4,0	6c, 50%	0,24	4490	rasgamento
86	12	5,0	6c, 50%	0,26	4197	arrancamento/ rasgamento
86	12	5,0	0	0,21	4177	arrancamento/ rasgamento
89	11	4,5	3c , 50%	0,23	4279	arrancamento/ rasgamento
85	11	4,5	3c , 50%	0,16	4028	rasgamento
87	11	4,5	3c , 50%	0,17	4226	arrancamento/ rasgamento
87	11	4,5	3c , 50%	0,19	4167	arrancamento/ rasgamento
87	11	4,5	3c , 50%	0,18	4159	rasgamento
88	10	4,0	0	0,12	3947	arrancamento/ rasgamento
88	12	5,0	0	0,24	4222	rasgamento
86	12	4,0	6c, 50%	0,19	4334	arrancamento/ rasgamento
86	10	5,0	0	0,16	4001	arrancamento

Tabela 4. 12 – Efeitos principais e modelos , quadráticos e das interações para a força máxima de cisalhamento e indentação máxima.

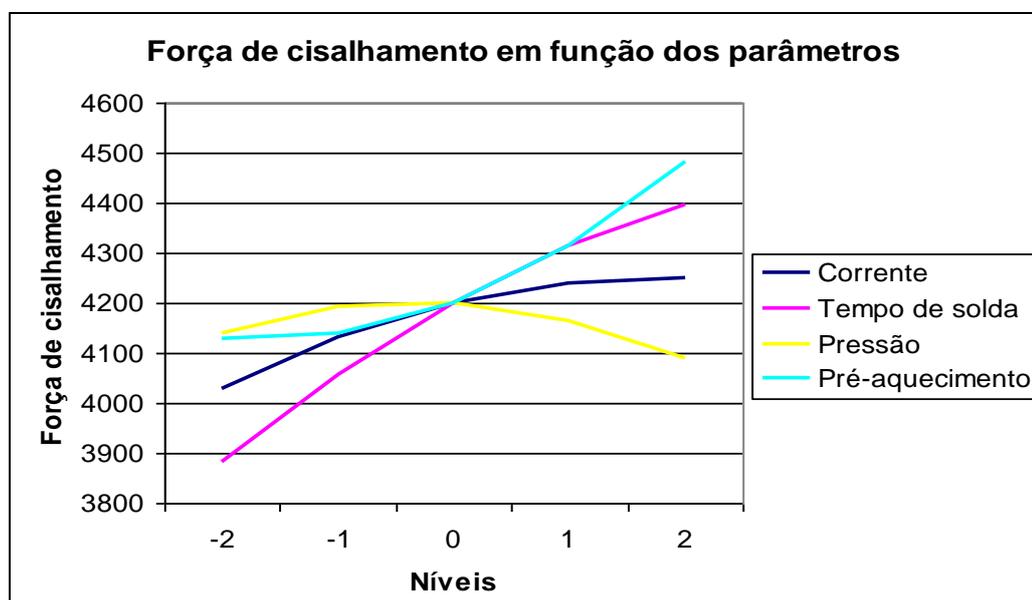
	Força				Indentação			
	Modelo completo	Valor p	Modelo reduzido	Valor p	Modelo completo	Valor p	Modelo reduzido	Valor p
Coeficiente	4200,80		4200,80		0,17800		00,1798	
I (A)	54,54	0,000	54,54	0,000	0,01625	0,000	0,01625	0,000
ts (B)	129,21	0,000	129,21	0,000	0,03125	0,000	0,03125	0,000
Pres (C)	-12,96	0,215	-12,96	0,202	0,02208	0,000	0,02208	0,000
Preaq (D)	88,42	0,000	88,42	0,000	0,01967	0,000	0,01951	0,000
I*I (A*A)	-15,30	0,138	-15,30	0,127	0,00396	0,117	0,00365	0,107
ts*ts (B*B)	-15,30	0,138	-15,30	0,127	0,00896	0,002	0,00865	0,001
Pres*Pres (C*C)	-21,55	0,044	-21,55	0,038	0,00146	0,546	*	*
Preaq*Preaq (D*D)	26,13	0,054	26,13	0,047	-0,00742	0,028	-0,0075	0,016
I*ts (A*B)	14,06	0,268	*	*	0,00188	0,537	*	*
I*pres (A*C)	-1,44	0,908	*	*	-0,00438	0,163	-0,0044	0,131
I*Preaq (A*D)	34,06	0,015	34,06	0,012	0,00063	0,836	*	*
ts*pres (B*C)	-23,44	0,076	-23,44	0,068	0,00313	0,310	0,0031	0,273
ts*pres (B*D)	-21,19	0,105	-21,19	0,095	0,00563	0,080	0,0056	0,058
I*preaq (C*D)	-15,19	0,234	-15,19	0,221	-0,00563	0,080	-0,0056	0,058
S	48,648			47,58		1,184		1,100
Rsqr	96,07			95,70		96,57		96,3
Rsqr_adj	91,83			92,20		92,87		93,8
LOF	0,289			0,319		0,202		0,268
Residual	0,078			0,355		0,844		0,441

Os resultados para indentação máxima, considerando o mesmo nível de significância de 5%, apontaram impacto significativo dos parâmetros de corrente de soldagem (A), tempo de soldagem (B), pressão entre os eletrodos(C) e Pré-aquecimento(D) na resposta. O quadrado do tempo de soldagem (BxB) e o quadrado do pré-aquecimento(DxD) também apontaram efeito significativo. Assim como ocorrido com a resposta de força máxima de cisalhamento, o modelo completo apresentou explicabilidade elevada, com R-Sq(adj) do modelo ajustado de 92,87%, ajuste (*Lack of fit*) de 0,202 e o desvio (S) de 0,012. Eliminando-se as interações (C*C), (A*B) e (A*D) obteve-se um modelo reduzido final com explicabilidade superior R-Sq(adj) de 93,8% e ajuste(*Lack-of-Fit*) de 0,268.

Os gráficos com os efeitos principais sobre as duas respostas de força máxima de cisalhamento e indentação máxima podem ser observados nas *Figuras 4.9(a)* e *4.9(b)*, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 4. 9 – Efeitos principais dos parâmetros sobre as respostas.

Pode-se observar na *Figura 4.9(a)* que o aumento da corrente, tempo de soldagem e pré-aquecimento causaram aumento da resistência dos pontos como havia sido apontado na fase anterior dos experimentos. Já a pressão dos eletrodos apresentou uma relação não linear

com esta resposta, diferente do que havia sido apontado. Nota-se que há sim uma tendência de diminuição da força com o aumento da pressão após o nível de 3bar, porém, em valores reduzidos de pressão, o modelo mostrou uma relação inversa, resultando em uma curva parabólica e uma significância expressiva do termo quadrático da pressão dos eletrodos (C*C). Como os níveis de pressão inferiores a 3bar não são aplicáveis na prática, pode-se considerar que o comportamento deste parâmetro na resposta ficou condizente com o apresentado anteriormente dentro da faixa de níveis adotada para este objeto de estudo. Os efeitos de cada parâmetro na indentação máxima podem ser observados na **Figura 4.9(b)**. Os valores de indentação dos pontos cresceram a medida que os valores dos quatro parâmetros analisados foram aumentando, assim como o ocorrido na etapa anterior.

Os resíduos gerados para as respostas de força máxima de cisalhamento e indentação máxima são mostrados nas **Figuras 4.10** e **4.11**, respectivamente. Pode-se notar que as amostras apresentam uma distribuição normal e nenhuma observação está a mais de 3 desvios padrão da média das amostras.

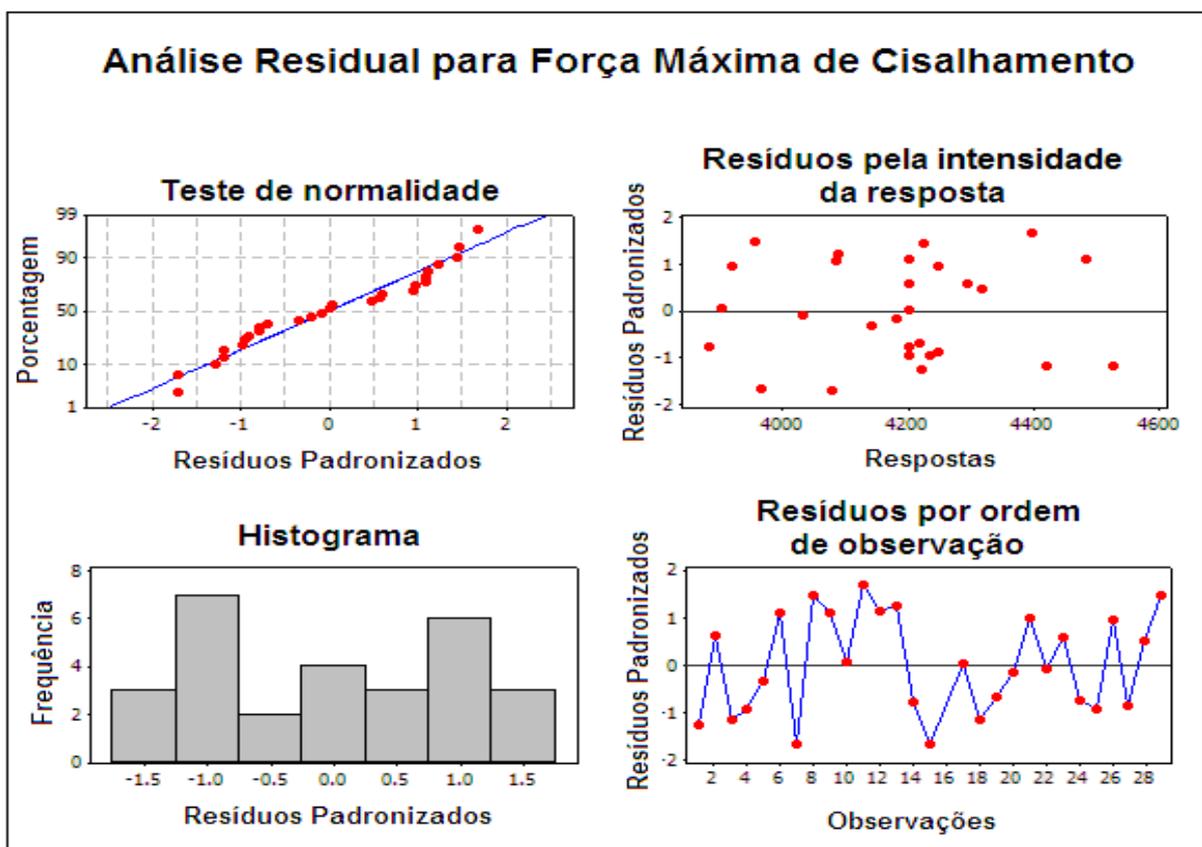


Figura 4.10 – Análise dos resíduos para força máxima de cisalhamento

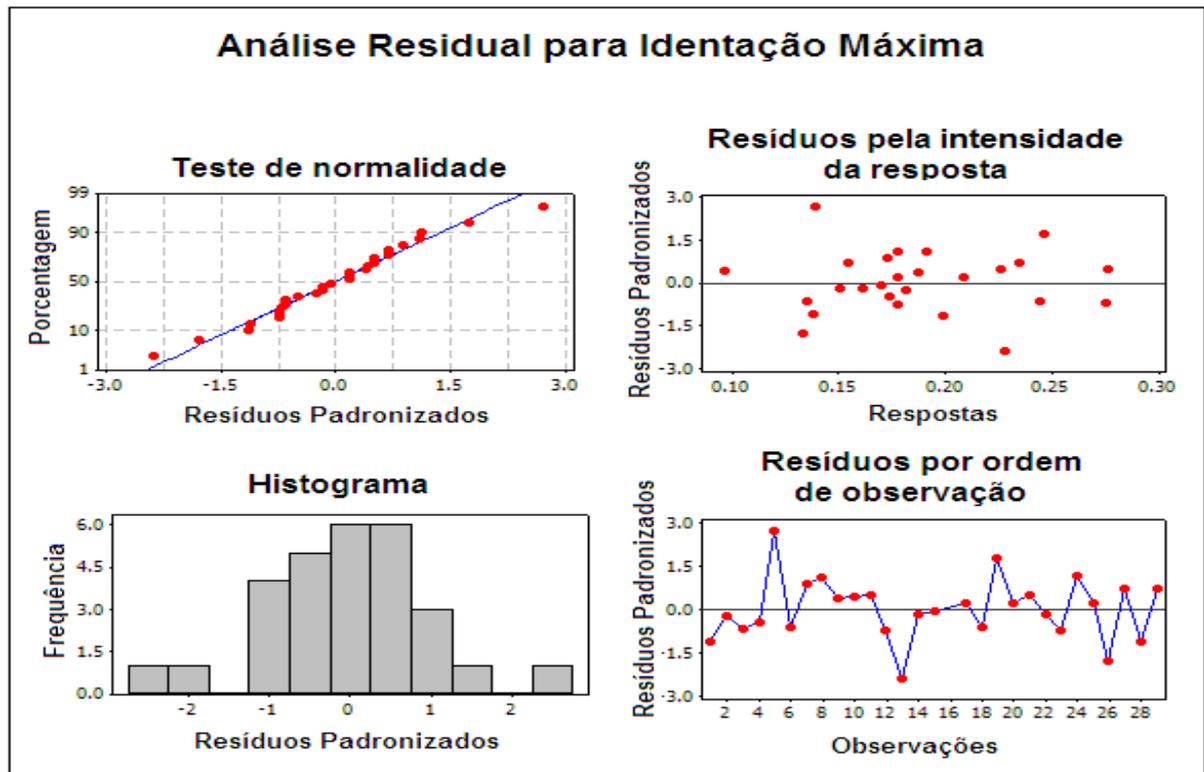


Figura 4.11 – Análise dos resíduos para indentação máxima.

As *equações 4.1* e *4.2* representam os modelos para estimar a força máxima de cisalhamento e indentação máxima, respectivamente. Considerando que para conseguir um ponto de solda de qualidade deve-se buscar maximizar sua resistência e minimizar sua indentação, os dois modelos são cabíveis de serem utilizados para se obter pontos de solda otimizados. Porém, foi verificada uma correlação de 0,657 (Valor $p = 0,000$) entre força de cisalhamento e indentação, o que torna incabível otimizar a resistência e a indentação da solda de forma independente pois as respostas são dependentes entre si.

$$Y = 4200,8 + 54,54A + 129,21B - 12,95C + 88,42D - 15,30A^2 - 15,30B^2 - 21,55 \times C^2 + 26,13 \times D^2 + 34,06AD - 23,44BC - 21,19BD - 15,19CD \quad (4.1)$$

$$Y = 0,178 + 0,01625A + 0,03125B + 0,02208C + 0,01967D + 0,00396A^2 + 0,00896B^2 + 0,00742D^2 - 0,00437AC + 0,00313BC + 0,00563BD + 0,00563CD \quad (4.2)$$

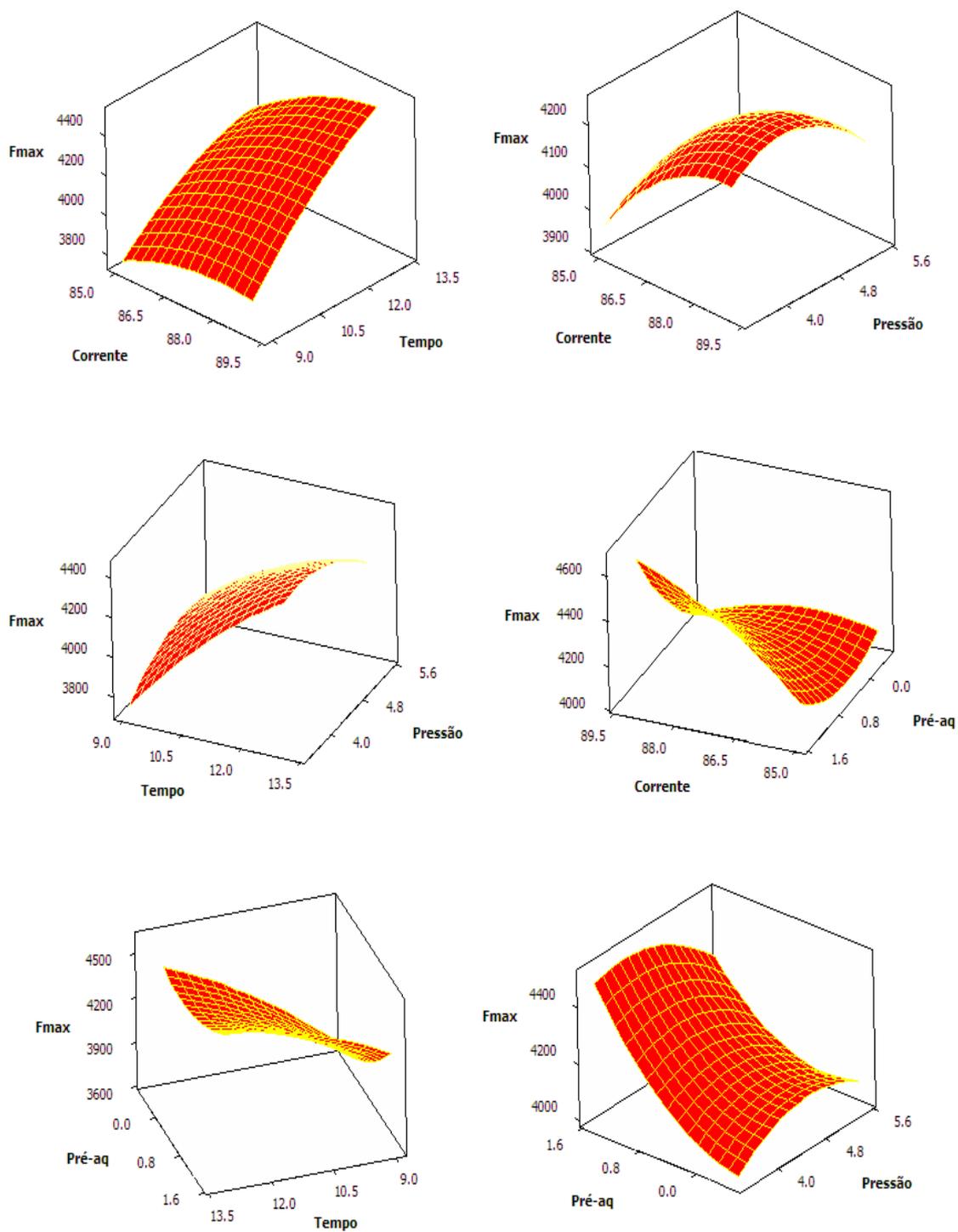


Figura 4. 12 – Superfícies de resposta para força máxima de cisalhamento

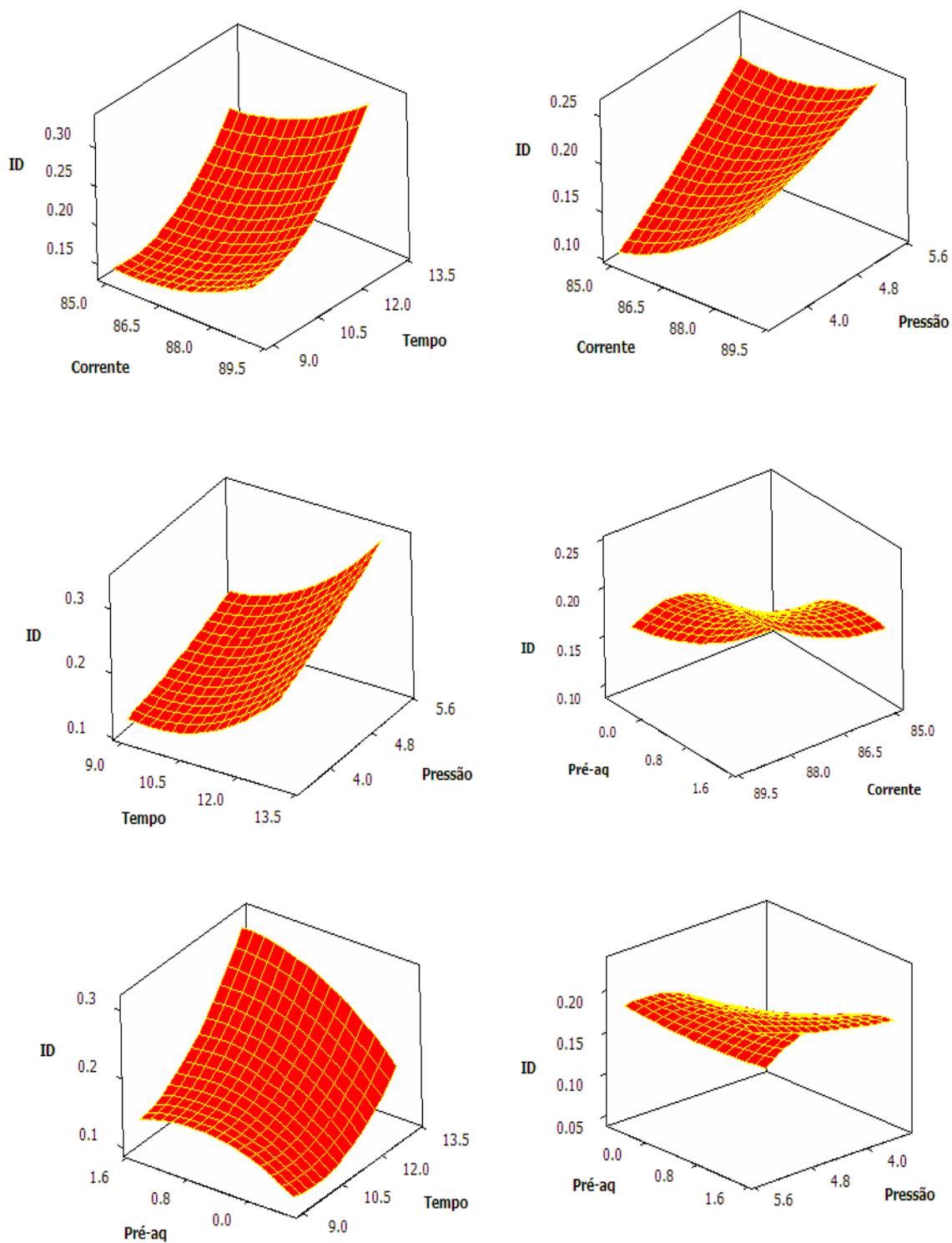


Figura 4.13 – Superfícies de resposta para identificação máxima

As superfícies de resposta para a força máxima de cisalhamento e indentação máxima entre os parâmetros de corrente de soldagem, tempo de soldagem, pré-aquecimento e pressão entre os eletrodos, podem ser observadas nas *Figuras 4.12 e 4.13*, respectivamente. Nota-se uma curvatura nas superfícies para ambas as respostas, porém, as curvas para força máxima apresentam um perfil côncavo, favorável para localizar um ponto de máximo. Já as curvas para a indentação máxima apresentaram um perfil convexo, favorável para localizar um ponto mínimo.

4.4 – Otimização do processo

Como pode ser observado na *Figura 4.14*, há uma faixa possível de ser coberta com valores de indentação máxima variando entre 0,18mm a 0,20mm, dentro de uma faixa de força máxima de cisalhamento de 4200N a 4400N.

Partindo do pré-suposto de que existem limites permissíveis de indentação que podem variar de acordo com a aplicação, um modelo de otimização foi gerado através do Solver do Excel objetivando maximizar a força máxima de cisalhamento com uma restrição de indentação máxima de 20%, limite mais comumente utilizado na indústria. As *equações 4.3, 4.4 e 4.5* representam o resumo do modelo proposto com as suas restrições. A segunda restrição (*equação 4.5*) representa a garantia de que a resposta permaneça dentro do espaço amostral utilizado nos experimentos, garantindo, desta forma, que o modelo não retorne valores para os parâmetros fora dos limites operacionais da máquina.

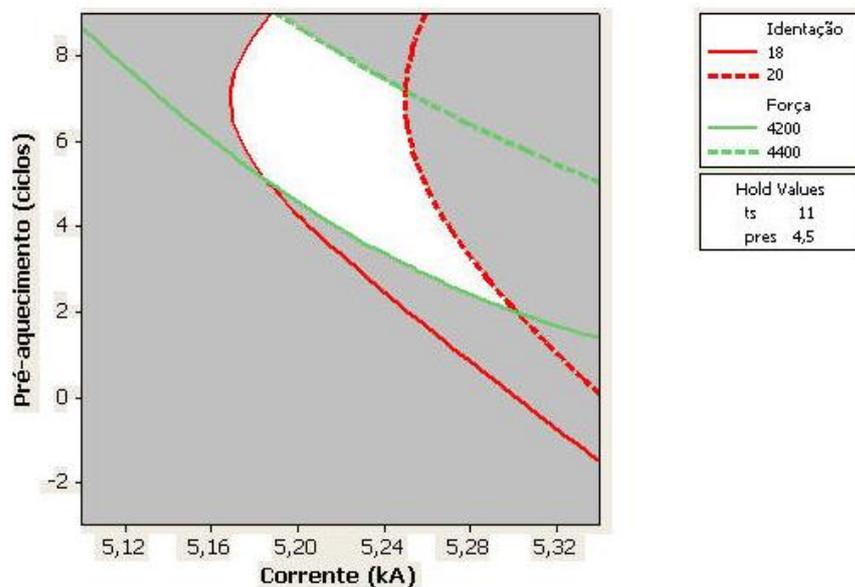


Figura 4.14 – Região de interseção entre as curvas de força de cisalhamento e indentação

Função Objetivo :

$$\begin{aligned} MaxY = & 4200,8 + 54,54A + 129,21B - 12,95C + 88,42D - 15,30A^2 - 15,30B^2 - 21,55 \times C^2 \\ & + 26,13 \times D^2 + 34,06AD - 23,44BC - 21,19BD - 15,19CD \end{aligned} \quad (4.3)$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} 0,178 + 0,01625A + 0,03125B + 0,02208C + 0,01967D + 0,00396A^2 + 0,00896B^2 \\ + 0,00742D^2 - 0,00437AC + 0,00313BC + 0,00563BD + 0,00563CD \leq 0,20 \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$X^T X \leq \rho^2 \quad (4.5)$$

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

- Corrente de solda: 88% (5,28kA)
- Tempo de solda: 11 ciclos
- Pressão dos eletrodos: 4.3Bar
- Pré-aquecimento: 9 ciclos a 50%(3kA)

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

- Força máxima de cisalhamento: 4543 N (4436 a 4725)
- Indentação máxima: 0,20mm (0,172 a 0,242)

A partir das condições otimizadas realizou-se um ensaio de confirmação em um total de 20 amostras, como pode ser visto na **Tabela 4.13**. Todas as amostras apresentaram modo de falha adequado, ou seja, arrancamento do ponto ou rasgamento da chapa. A média de força máxima de cisalhamento foi de 4505N como um intervalo de confiança entre 4444N e 4566N estando dentro do intervalo previsto de 4436N a 4725N, totalizando um erro de 1,66% entre o valor previsto e a média dos experimentos de confirmação. A média de indentação máxima foi de 0,198mm com intervalo de confiança entre 0,181mm e 0,216mm, também estando dentro dos limites previstos de 0,172 a 0,242, com um erro em relação a média prevista de 4,35%.

Tabela 4.13 - Respostas dos ensaios de confirmação

Força Máxima (N)	Indentação Máxima (mm)	Modo de Falha
4471	0,18	arrancamento/rasgamento
4443	0,19	arrancamento/rasgamento
4486	0,22	rasgamento
4659	0,23	rasgamento
4466	0,18	arrancamento/rasgamento
4481	0,19	arrancamento/rasgamento
4486	0,21	arrancamento/rasgamento
4649	0,20	rasgamento
4459	0,20	arrancamento/rasgamento
4507	0,18	rasgamento
4491	0,19	arrancamento/rasgamento
4507	0,23	arrancamento/rasgamento
4471	0,18	rasgamento
4529	0,19	arrancamento/rasgamento
4469	0,21	arrancamento/rasgamento
4498	0,20	arrancamento/rasgamento
4476	0,22	rasgamento
4501	0,17	rasgamento
4598	0,20	arrancamento/rasgamento
4448	0,19	arrancamento/rasgamento

4.5 – Monitoramento de qualidade

Na quinta etapa experimental deste estudo foram realizados alguns experimentos de monitoramento da qualidade utilizando o método de deslocamento do eletrodo descrito anteriormente. Os experimentos foram gerados a partir das condições otimizadas obtidas na etapa anterior. Assim, tornou-se possível obter uma curva de referencia para estimar um ponto de solda de qualidade. Alguns fatores de ruído tais como encaixe não ideal entre as chapas, impureza das chapas e desgaste dos eletrodos foram simulados para provocar condições de excesso e falta de calor durante a formação do ponto que refletem nas variações de qualidade apontadas com base nas oscilações da curva de deslocamento do eletrodo.

A *Figura 4.15* ilustra uma curva de deslocamento do eletrodo plotada a partir do momento em que o ponto começa a se formar. Verificou-se que as curvas geradas durante os experimentos ficaram condizentes com as curvas descritas em trabalhos que como Jou (2003),

Wang et al (2009), Lee et al. (2001), que descrevem este método de monitoramento da soldagem. E que podem de fato estimar a qualidade dos pontos de solda.



Figura 4. 15 – Curva de deslocamento do eletrodo durante a formação de um ponto de solda a partir do início da expansão térmica do material.

O deslocamento positivo no começo da curva corresponde a subida do eletrodo causada pela expansão térmica do material e pela sua mudança de estado. O ponto de máxima subida (pico superior da curva) e a rapidez com que esse máximo é alcançado (taxa de subida) podem ser correlacionados com o grau de formação da solda, que esta diretamente relacionado a sua resistência. Já a taxa de descida após a corrente de soldagem ser cessada, assim como o ponto de máxima penetração do eletrodo na solda (pico inferior da curva) estão relacionados a indentação causada no ponto de solda. Desta forma, estes quatro parâmetros retirados da curva de deslocamento do eletrodo são ideais para estimar a qualidade do ponto de solda

Ao incluir alguns pontos durante a passagem de corrente que antecedem a expansão térmica do material, percebeu-se um pequeno deslocamento positivo do eletrodo causado pela

queima do revestimento do material como mostra a **Figura 4.16**. Após a queima do revestimento, o eletrodo volta a descer sobre a junção ate o momento em que o ponto de solda começa a se formar causando a expansão térmica e a subida do eletrodo, confirmando o que foi apontado por Geden (1986). Esta pequena oscilação do eletrodo no momento da queima do revestimento das chapas pode possibilitar um parâmetro extra de controle de qualidade em se tratando de chapas revestidas.

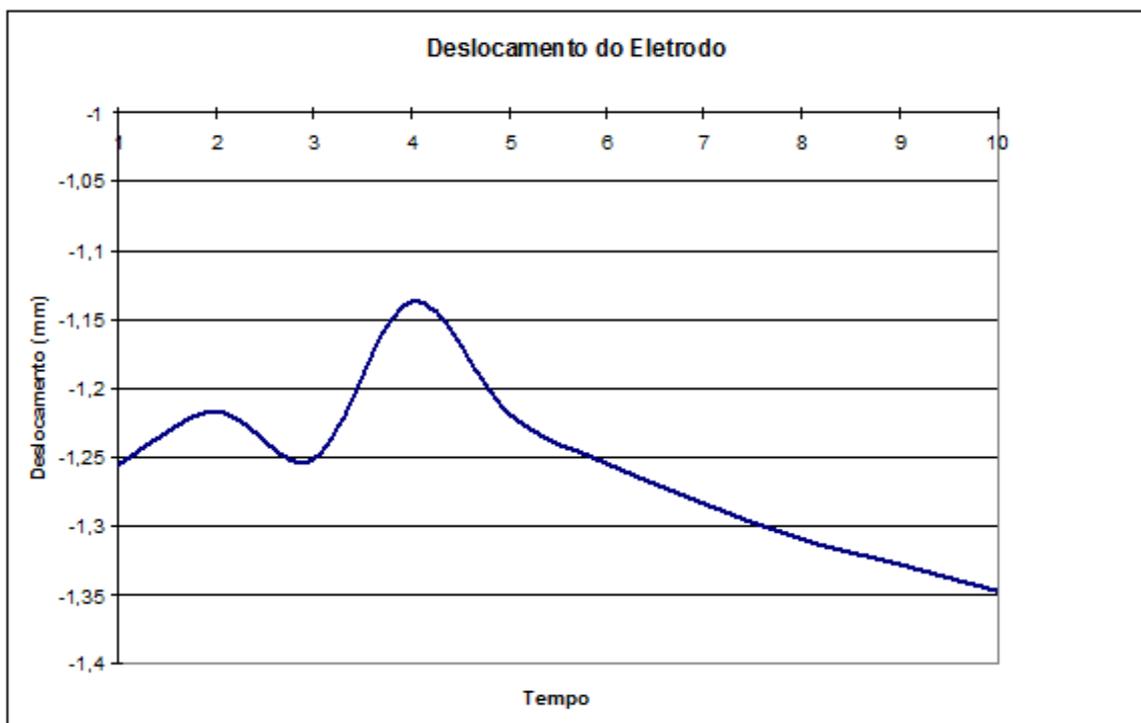


Figura 4.16 – Curva de deslocamento do eletrodo durante a formação de um ponto de solda a partir do início da passagem de corrente e queima do revestimento.

As curvas mostradas na **Figura 4.17**, ilustram o deslocamento do eletrodo desde o momento em que a pré-pressão é estabelecida nas chapas até o momento de retorno do eletrodo após finalizado o ponto de solda. Pode-se notar a diferença entre as quatro curvas plotadas, onde foram simuladas diferentes condições de ruído durante as soldas. Esses ruídos incluem desgaste do eletrodo, encaixe entre as chapas e impurezas das chapas. Com base nestas curvas, objetiva-se plotar uma curva de referencia relacionada a formação de um ponto de qualidade. Através da comparação desta curva modelo com as demais curvas plotadas durante o processo pode-se então obter uma estimativa da qualidade do ponto.

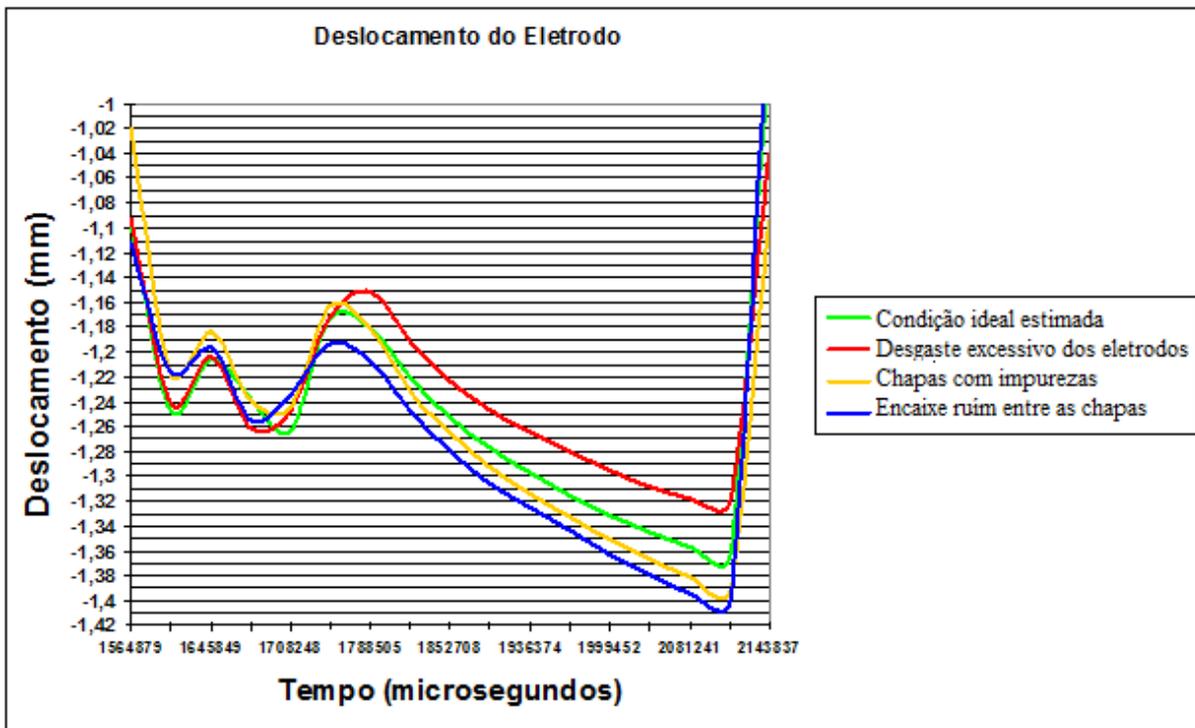


Figura 4.17 – Curvas de deslocamento do eletrodo com diferentes condições de ruído.

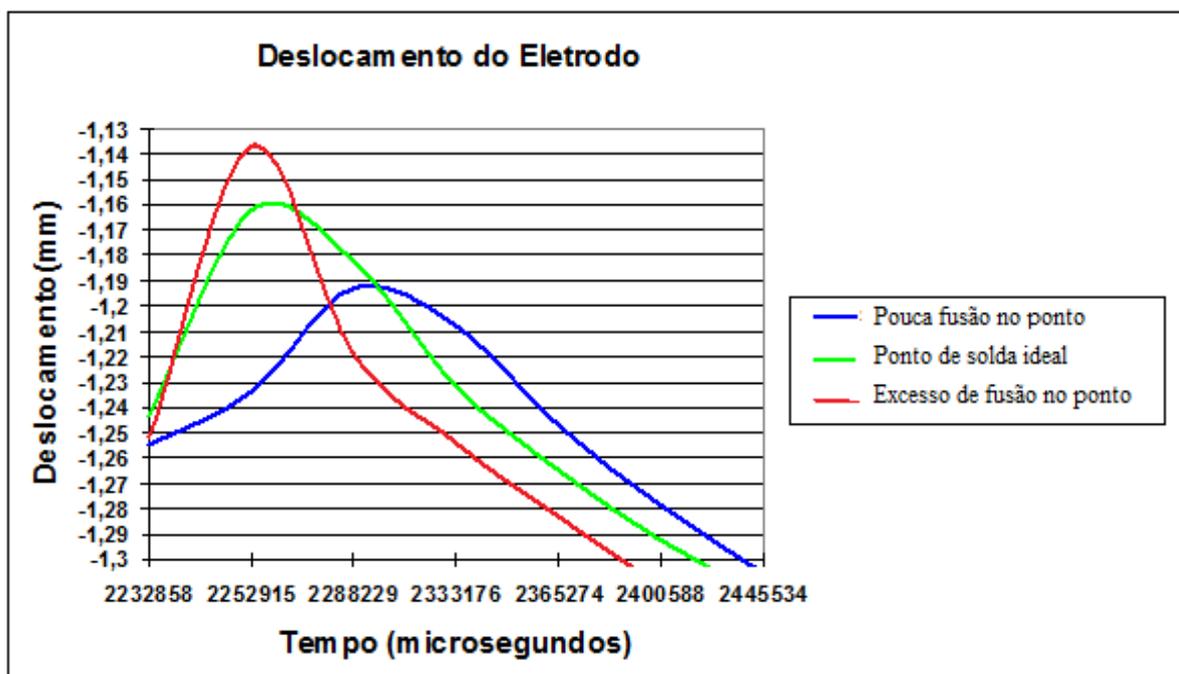


Figura 4.18 – Curvas de deslocamento nas condições de soldagem ideal (verde), falta de calor (azul) e excesso de calor (vermelha).

A **Figura 4.18** ilustra a diferença entre a curva ideal correspondente a um ponto de solda de qualidade e as demais curvas que correspondem a formação não ideal do ponto. A curva em verde representa a curva ideal que serve como referência de qualidade. A curva em vermelho expressa uma situação de excesso de calor no ponto de solda, que compromete diretamente sua qualidade devido a um excesso de indentação. Já a curva em azul corresponde a uma situação de pouca fusão durante a formação do ponto de solda, o que compromete sua qualidade devido a um crescimento insuficiente do ponto de solda resultando em uma baixa resistência.

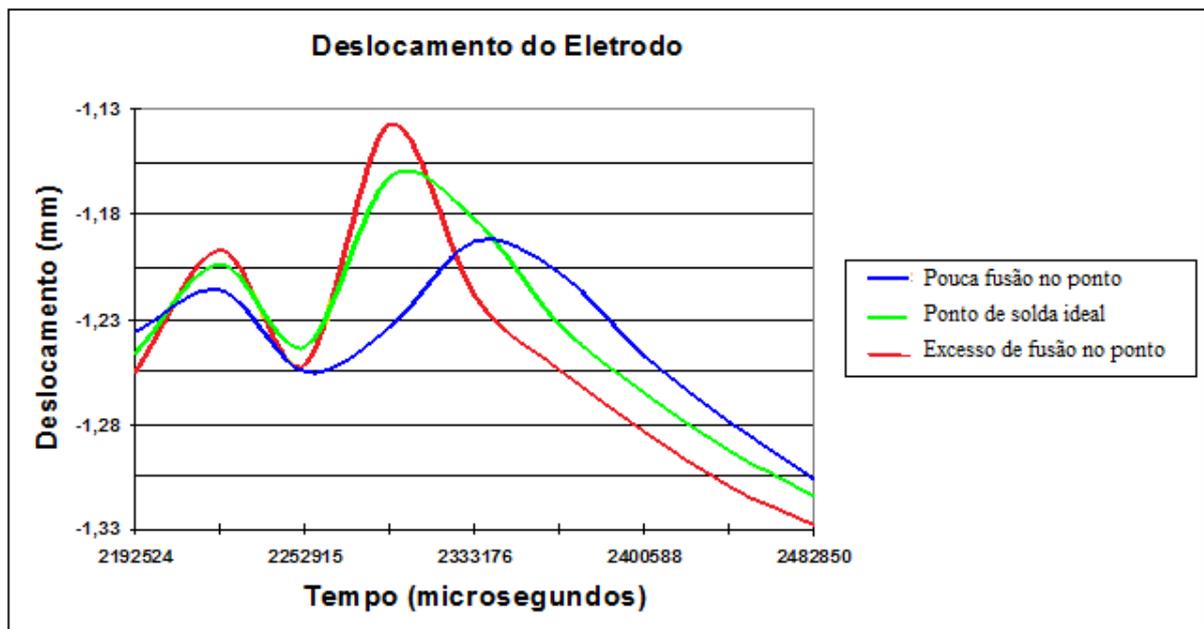


Figura 4. 19 – Curvas de deslocamento nas diferentes condições de soldagem incluindo a fase de queima do revestimento do material. Condições de soldagem: ideal (verde), falta de calor (azul) e excesso de calor (vermelha).

A **Figura 4.19** ilustra as mesmas curvas plotadas anteriormente, porém, incluindo pontos de deslocamento gerados durante a fase da queima do revestimento. Pode-se notar que variações na subida do eletrodo também ocorreram durante a fase de queima do revestimento antes do início da formação do ponto. Este fato gera uma hipótese de que o deslocamento do eletrodo durante a fase de queima do revestimento pode ser útil, não somente para monitorar a sua qualidade, mas para controlar a qualidade em tempo real, considerando que esta variação de deslocamento ocorre antes da fusão do material, e a tempo de atuar sobre os parâmetros do processo durante a execução da soldagem para garantir a qualidade da mesma.

5 – CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nos experimentos e nos objetivos estabelecidos no trabalho, pode-se concluir:

- Dentre os parâmetros investigados, a corrente, o tempo do solda e a pressão foram significativos conforme descrito na literatura. Porém, o pré-aquecimento surtiu um impacto positivo nas chapas galvanizadas, melhorando as características de qualidade.
- Valores mais elevados de corrente e tempos de ciclo reduzidos proporcionaram resultados mais satisfatórios, garantindo o tipo de rompimento desejado, maiores níveis de força e menores níveis de indentação.
- Foi verificada uma correlação significativa de 0,657 entre a força máxima de cisalhamento e indentação, dentro das condições de contorno do objeto de estudo.
- Um modelo de otimização foi proposto e verificado através dos experimentos de confirmação, garantindo um ponto de solda com resistência otimizada com média de 4505N, um modo de falha dado por arrancamento do ponto ou rasgamento da chapas conforme o recomendado pela literatura, e dentro de um limite de indentação de 20% da espessura das chapas, com média de 0,198mm.
- Pôde-se verificar através dos experimentos gerados com o sensor de deslocamento LVDT e o condicionador de sinais que os parâmetros de qualidade do ponto de solda estão correlacionados com os parâmetros do deslocamento do eletrodo durante a soldagem como descrito na literatura.
- As variáveis incontroláveis do processo tais como desgaste dos eletrodos, encaixe entre as chapas e impurezas na superfície das chapas, refletem na qualidade dos pontos alterando os parâmetros de deslocamento do eletrodo.
- Uma oscilação na expansão térmica causada pela queima do revestimento nas chapas galvanizadas foi verificada nas curvas de deslocamento. Esta ocorre antes da fusão do metal e pode ser utilizada como parâmetro de controle de qualidade.
- Uma metodologia alternativa de monitoramento da qualidade com baixo custo de implementação foi proposta para verificar a qualidade dos pontos com base na comparação das curvas de deslocamento, sem a necessidade de desfazer a solda e interromper o processo.

6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar um projeto de experimento (DOE) similar ao deste trabalho, incluindo parâmetros da curva de deslocamento do eletrodo como resposta para otimizar o processo.
- Aplicar testes de fadiga como resposta na análise de experimentos para otimizar os pontos garantindo sua qualidade a longo prazo.
- Fazer um estudo mais aprofundado da influência do revestimento das chapas galvanizadas no desgaste dos eletrodos e nas oscilações causadas no deslocamento do eletrodo.
- Utilizar o método de leitura do deslocamento do eletrodo para monitorar a qualidade em outros tipos de material tais como alumínio, aço inox e aços carbono com espessuras e revestimentos diversos.
- Elaborar um sistema de controle de qualidade capaz de atuar sobre parâmetros de controle do objeto de estudo a fim de garantir soldas de qualidade com base nos parâmetros de deslocamento do eletrodo obtidos.
- Adequar o método de leitura do deslocamento do eletrodo para monitorar múltiplos pontos de solda em uma produção em série.

7 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTONY, J.; PERRY, D.; WANG, C.; 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.

ANDREWS, D. R.; BROOMHEAD, J. Quality Assurance for Resistance Spot Welding. *Welding Journal*, 1975, June, Vol. 54, N° 6, pp. 431 – 435.

ASLANLAR, S. The Effect of Nucleus Size on Mechanical Properties in Electrical Resistance Spot Welding of Sheets used in Automotive Industry. *Materials and Design* 27, 2006, pp 125–131.

AURES, V.J. Estudo da Formação, Geometria e Resistência do ponto na soldagem por resistência: uma abordagem estatística. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, 2006.

AWS - *Welding Handbook*. Vol. 2: *Welding Process*, 8° ed., 1998.

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

BRANCO, H.L.O. Avaliação de Capas de Eletrodos utilizadas na Soldagem por Resistência de Chapas Galvanizadas Automotivas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2004.

CHEN, Z.J.; FARSON, F.D. Electrode Displacement Measurement Dynamics in Monitoring of Small Scale Resistance Spot Welding. *Measurement Science and Technology*, v. 15 , pp. 2419–2425, 2004.

CHIEN, C.S. e KANNATEY-ASIBU E. Jr. Investigation of Monitoring Systems for Resistance Spot Welding. *Welding Journal* , v. 81, pp.195–199, 2002

CHO, Y; LI; W.; HU, S.J. Design of Experiment Analysis and Weld Lobe Estimation for Aluminum Resistance Spot Welding. *Welding Journal*, v.85, n3 pp45-50, 2006.

CHO, Y.; RHEE S. New technology for measuring dynamic resistance and estimating strength in resistance spot welding. *Measurement Science & Technology*, 2000; v.11, pp – 1173-1178.

CULLEN, J.D.; ATHI, N.; AL-JADER, M.; JOHNSON, P.; AL-SHAMMA'A, A.I.; SHAW, A.; EL-RASHEED, A.M.A. Multisensor fusion for on line monitoring of the quality of spot welding in automotive industry, *Measurement* , 2007, pp. 412–423.

DARWISH, S.M.; AL-DEKHAL, S.D. Micro-Hardness of Spot Welded (BS 1050) Commercial Aluminium as Correlated with Welding Variables and Strength Attributes, *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 43-51, 1999.

DENNISON, A.V.; TONCICH, D.J.; MASSOD, S. Control and Process-Based Optimisation of Spot-Welding in Manufacturing Systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* , v.13; pp. 256-263, 1997.

FARSON, F.D.; CHEN, J.Z.; ELY, K.; FRECH, T. Monitoring of Expulsion in Small Scale Resistance Spot Welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 8, no. 6, pp. 431-436, 2003.

GANGULI, R. Optimum Design of a Helicopter Rotor for Low Vibration using Aeroelastic Analysis and Response Surface Methodology. *Journal of Sound and Vibration*, v.2, n.258, pp. 327-342, 2002.

GEDEN, S. A.; SCHROCK, D.; LAPOINTE, J.; EAGAR, T.W. Metallurgical and Process Variables Affecting the Resistance Spot Weldability of Galvanized Sheet Steels. *Society of Automotive Engineers, Inc.* pp. 1 – 9, 1984.

GOODARZI, M. ; MARASHI, P. S. ; POURANVARI, M. Dependence of Overload Performance on Weld attributes for Resistance Spot Welded Galvanized Low Carbon Steel. *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 4379-4384, 2009.

Intermachinery - Manual de Soldagem por Resistência a Ponto, 41 p, 2002.

JOU, M. Real Time Monitoring Weld Quality of Resistance Spot Welding for the Fabrication of Sheet Metal Assemblies. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 132, no. 1-3, 10, pp.102-113, 2003.

KARAGOULIS, M. J. A Nuts-and-Bolts Approach to the Control of Resistance Spot Welding. *Welding Journal*, pp. 27 – 31, july, 1994.

LEE, S. R.; CHOO, T.J.; LEE, T.M.; KIM, M.H.; CHOI, S.K.. A Quality Assurance Technique for Resistance Spot Welding using a Neuro-Fuzzy Algorithm. *Journal of Manufacturing Systems*, v.20; n.5; pp-320 – 328, 2001.

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

LING, S.; WAN, L; WONGN, Y.; Li, D. Input Electrical Impedance as Quality Monitoring Signature for Characterizing Resistance Spot Welding. *NDT&E International*, 2009.

LIVSHITS, A. G. Universal Quality Assurance Method for Resistance Spot Welding based on Dynamic Resistance. *Welding Journal*, v.76, pp- 383-390 , september, 1997.

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

MARTÍN, O., LOPEZ, M., MARTÍN, F. Artificial Neural Networks for Quality Control by Ultrasonic Testing in Resistance Spot Welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 183, pp. 226–233, 2007.

MEI, S. D.; Li, D.Q.; ZHANG, Z.D.; LAN, L. On-line Monitoring Method for Electrode Invalidation during Spot Welding of Zinc-Coated Steel. *Materials Science and Engineering*, pp 279–281, 2009.

MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*, 6th ed., 2005, Wiley, New York.

PAES, M. T. P., GUIMARÃES, A. S.; REBELLO, J. M. A. Significância da Expulsão e do Tipo de Fratura em Soldagem por Pontos. *Soldagem e Materiais*, pp 51-57, Junho 1989.

PAIVA, A. P. Estudo da Minimização de Erro nas Medições de Concentração de Emulsões por Titração Karl-Fischer utilizando-se Projeto de Experimentos. *Dissertação de mestrado*, UNIFEI, Itajubá, 215 p, 2002.

PEREIRA, M. A.; FERREIRA, M. J.; LOUREIRO, A.; COSTA, M. D. J.; BÁRTOLO, J. P. Effect of Process Parameters on the Strength of Resistance Spot Welds in 6082-T6 Aluminium Alloy. *Materials and Design*, 2009.

PODRZAJ P.; IVAN P.; JANEZ D.; ZORAN, K. Estimating the strength of resistance spot welds based on sonic emission. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2005; v.10: pp.399–405.

ROWLANDS, H. e ANTONY, J. Application of Design of Experiments to a Spot Welding Process. *Assembly Automation* , v. 23, no. 3, pp. 273–279, 2003.

SANTOS, F. B. Estudo da Eficiência do Processo de Soldagem de Pontos por Resistência Elétrica utilizado na Indústria Automobilística. *Dissertação de Mestrado*, Unifei, 2006.

TAN, W.; ZHOU, Y.; KERR, W.H.; LAWSON, S. A Study of Dynamic Resistance during Small Scale Resistance Spot Welding of Thin Ni Sheets. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, v. 37, pp. 1998–2008, 2004.

TANG, H.; HOU, W.; HU, J.S.; ZHANG, Y.H.; FENG, Z.; KIMCHI, M. Influence of Welding Machine Mechanical Characteristics on the Resistance Spot Welding Process and Weld Quality. *Welding Journal*, May, pp. 116s – 124s, 2003.

TSAI, C.L.; DAI, L.W.; DICKINSON, W.D. Analysis and Development of a Real-Time Control Methodology in Resistance Spot Welding. *Welding Journal*, pp. 339s – 351s, December, 1991.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; DE MELLO, F.D.H. *Soldagem: Processos e Metalurgia*, ed. Edgard Blucher Ltda., pp 217 – 242, 1992.

WANG, H.; ZHANG, Y.; CHEN, G. Resistance Spot Welding Processing Monitoring based on Electrode Displacement Curve using Moving Range Chart. *Measurement*, v. 42, no. 7, pp. 1032-1038, august, 2009.

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

ZHANG, S.Y.; WANG,H.; CHEN, G.L.; 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.