

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DO EFEITO DA ELIMINAÇÃO DA
CAMADA DE ZINCO NA QUALIDADE DA SOLDA A
PONTO EM CHAPAS DE AÇOS GALVANIZADOS**

Autor: Adriano Cássio Baldim

Orientador: Sebastião Carlos da Costa

Itajubá, Julho de 2014

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANÁLISE DO EFEITO DA ELIMINAÇÃO DA
CAMADA DE ZINCO NA QUALIDADE DA SOLDA A
PONTO EM CHAPAS DE AÇOS GALVANIZADOS

Autor: **Adriano Cássio Baldim**

Orientador: **Sebastião Carlos da Costa**

Curso: **Mestrado de Engenharia Mecânica**

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

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

Itajubá, Julho de 2014

MG – Brasil

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

B177a

Baldim, Adriano Cássio

Análise do Efeito da Eliminação da Camada de Zinco na
Qualidade da Solda a Ponto em Chapas de Aços Galvanizados /
Adriano Cássio Baldim. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2014.
112 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Solda a Ponto. 2. Monitoramento da Qualidade. 3. Sensor
de Deslocamento. 4. Aço Galvanizado. 5. DOE. I. Costa, Sebas_
tião Carlos da, orient. II. Universidade Federal de Itajubá. III.
Título.

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANÁLISE DO EFEITO DA ELIMINAÇÃO DA
CAMADA DE ZINCO NA QUALIDADE DA SOLDA A
PONTO EM CHAPAS DE AÇOS GALVANIZADOS

Autor: **Adriano Cássio Baldim**

Orientador: **Sebastião Carlos da Costa**

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rosinei Batista Ribeiro – UERJ-FAT

Prof. Dr. Hélcio Francisco Villa Nova – IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa, Presidente – IEPG/UNIFEI

Dedicatória

À Deus, pela luz e sabedoria concedidas.

Agradecimentos

Agradeço à Deus, por estar sempre junto comigo; pela luz e pela esperança necessária ao alcance deste objetivo em minha vida.

Aos meus pais Joaquim I. Baldim e Elza Ap. Baldim, pela educação e pelo exemplo de vida.

Aos meus irmãos Diego S. Baldim e Leandro H. Baldim, pela amizade e companheirismo ao longo de toda a vida.

À minha namorada e companheira Marissa P. Ramos, pela tolerância, compreensão e ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor e amigo Sebastião Carlos da Costa, pela orientação e paciência no desenvolvimento deste trabalho.

Aos funcionários da oficina mecânica da UNIFEI, em especial, Arlei de Melo Rodrigues, pela ajuda e dicas nas atividades de laboratório de usinagem.

Aos amigos do trabalho, Fernando de Lucca e Abel Rezende, e a todos os amigos da pós-graduação de modo especial, Tarcísio Gonçalves de Brito, Rogério Santana Peruchi, Leonardo Albergaria Oliveira, Edinaldo Luciano da Silva, José Eustáquio Leite Filho, Thairone Conti Serafini e José Veríssimo Toledo, pela convivência, pela amizade e apoio durante este trabalho.

Aos professores Edmilson Otôni Correa e Anderson Paulo de Paiva, pelo apoio e paciência.

Ao Instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEI, representado pelo competente corpo administrativo e docente e por seus dedicados funcionários, pela oportunidade de crescimento com a realização deste trabalho e pela aprendizagem no convívio profissional.

“A mente que se abre a uma nova ideia, jamais voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein

Resumo

Baldim, A.C. Análise do Efeito da Eliminação da Camada de Zinco na Qualidade da Solda a Ponto em Chapas de Aços Galvanizados. 2014. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

O processo de solda a ponto por resistência elétrica (RSW) possui uma grande variedade de aplicação no setor automotivo pela alta velocidade de execução e a não utilização de consumíveis. Dentre os aços utilizados estão os galvanizados (aços carbono com cobertura de uma fina camada de zinco). Muito embora, tenham resistência à corrosão, o revestimento de zinco é um fator complicador da solda. No entanto, visando garantir a qualidade final do ponto soldado e uma longa vida útil do eletrodo, este projeto tem por objetivo propor um modo alternativo de monitoramento da remoção da camada de zinco sobre a chapa de aço galvanizado, com base na leitura do deslocamento do eletrodo e avaliar, por meio de métodos estatísticos, a influência de uma pré-fase (denominado preaquecimento) na escolha dos níveis de parâmetros de soldagem. Para tanto, na primeira etapa procurou-se validar a quebra da camada de zinco pelo sinal do deslocamento do eletrodo. Na segunda etapa, os experimentos de simulação física foram realizados com o intuito de desenvolver um envelope de parâmetros para a fase de preaquecimento. Na, terceira etapa, foi feita uma análise da influência do preaquecimento e dos parâmetros de solda propriamente ditos culminando com a otimização destes parâmetros na resistência ao cisalhamento, deformação na força máxima de ruptura e indentação gerada, utilizando para isto o método de planejamento de experimentos (DOE). Os resultados mostraram que, o sinal de deslocamento do eletrodo é um eficiente método não destrutivo para a determinação de parâmetros adequados de preaquecimento e de indentação. Observou-se que a pré-fase influencia diretamente na resistência do ponto soldado, e possui uma relação inversamente proporcional a corrente e ao tempo de solda.

Palavras-chave: Solda a Ponto, Monitoramento de Qualidade, Sensor de Deslocamento, Aço galvanizado, DOE.

Abstract

Baldim, A.C. Analysis of the Effect of Elimination of Layer Zinc in quality Spot Welding on Galvanized Steel Sheet. 2014. 112 p. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) - Institute of Mechanical Engineering, Federal University of Itajubá.

The resistance spot welding process (RSW) has wide application in the automotive industry for high execution speed without the need of consumables. Among commonly materials used are the galvanized steels (carbon steel coated with a thin layer of zinc). Although, have corrosion resistance, the zinc coating is a complicating factor of the weld. However, in order to ensure the final quality of the welded point and a long electrode life, this project has the aim to propose an alternative mode of monitoring the removal of zinc on galvanized steel sheet layer, based on the reading of the displacement electrode and by statistical methods, the influence of a pre-phase (called preheating) to choose the levels of welding parameters. For both, the first step it was sought to validate the breakdown of the zinc layer signal by moving the electrode. In the second stage, the physical simulation experiments were performed with intention of developing an envelope parameters for the preheating phase. Na, the third step, was taken an analysis of the influence of preheating and welding parameters itself culminating with the optimization of these parameters on shear strength, elongation at maximum breaking strength and indentation generated using this method for the design of experiments (DOE). The results showed that the displacement of the signal electrode is an efficient non-destructive method for the determination of appropriate parameters in the preheating and stage also level generated indentation. It was observed that the pre-phase directly influences the strength of the welded point, and has an inversely proportional relation with current and weld time.

Keywords: Spot Welding, Quality monitoring, Sensor displacement, Galvanized Steel, DOE.

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Quadros.....	vi
Lista de Tabelas	vi
Simbologia	vii
Letras Latinas.....	vii
Letras Gregas	vii
Abreviaturas e Siglas	viii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Importância do tema	1
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Contribuições esperadas	3
1.4. Estrutura do trabalho.....	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1. Princípio de funcionamento do processo de solda a ponto.....	6
2.2. Parâmetros de regulação.....	8
2.2.1. Corrente.....	8
2.2.2. Tempo de soldagem e preaquecimento	13
2.2.3. Força/Pressão entre eletrodos e resistência de contato	15
2.2.4. Os eletrodos.....	17
2.3. A geometria do ponto soldado e a avaliação da qualidade da solda.....	22
2.3.1. Caracterização da geometria do ponto de solda.....	22
2.4. Testes destrutivos.....	25
2.4.1. Teste de cisalhamento	25
2.4.2. Teste de arrancamento.....	26
2.5. Ensaios não destrutivos.....	27
2.5.1. Inspeção Visual	27
2.5.2. Sinal de deslocamento do eletrodo.....	29

2.6. Planejamento e Análise de Experimentos.....	34
2.6.1. Início do planejamento do projeto de experimentos	35
2.6.2. Arranjo Fatorial e Superfície de Resposta	36
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	39
3.1. Banco de ensaios, materiais e equipamentos utilizados	41
3.2. Parametrização da máquina de solda	46
3.3. Primeira etapa: Validação da quebra da camada de zinco pelo sinal de um sensor de deslocamento.	47
3.4. Segunda etapa: Desenvolvimento de um envelope operacional.....	48
3.5. Terceira etapa: Análise da influência dos parâmetros de preaquecimento e soldagem e as condições otimizadas.....	49
3.6. Condução dos experimentos	49
4. RESULTADOS E ANÁLISES	51
4.1. Validação da quebra da camada de zinco pelo sinal de um sensor de deslocamento...	51
4.2. Desenvolvimento de um envelope operacional	59
4.2.1. Formação dos padrões: visual e do sensor de deslocamento	60
4.2.2. Determinação do envelope operacional	64
4.3. Análise da influência do preaquecimento na solda.....	67
4.3.1. Escolha das respostas de interesse	67
4.3.2. Matriz experimental e resultados obtidos	68
4.3.3. Adequação dos modelos.....	73
4.3.4. Modelagem matemática das respostas	75
4.3.5. Análise de resíduos	76
4.3.6. Análise dos efeitos principais dos parâmetros	77
4.3.7. Análise dos efeitos das interações entre os parâmetros	80
4.4. Otimização no processo de soldagem.....	82
4.4.1. Regiões ótimas dos parâmetros de soldagem.....	83
5. CONCLUSÕES	86
5.1. Conclusões Gerais.....	86
5.2. Sugestão de Trabalhos Futuros	87
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
ANEXOS	93

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Princípio de funcionamento do processo RSW. Fonte: Usiminas (2010)	6
Figura 2.2 - Temperatura e resistências do processo. Adaptado de: Podrzaj <i>et al.</i> , 2008.	7
Figura 2.3 - Esboço da expulsão. (a) Interface interna. (b) Interface externa.	9
Figura 2.4 - Revestimento de zinco sobre o metal base. Fonte: Usiminas (2010).	10
Figura 2.5 - Subida e descida da corrente. Adaptado de: Willians (2004).	11
Figura 2.6 - Pontos de solda realizados em sequência. Fonte: Usiminas (2010).	12
Figura 2.7 - Amassamento das asperezas. Adaptado de: Babu <i>et al.</i> (2001).....	13
Figura 2.8 - Esboço dos tempos totais do processo de soldagem. Fonte: Usiminas (2010).....	14
Figura 2.9 - Curva senoidal da frequência Hz. Fonte: Medar (2005).....	15
Figura 2.10 - A força em função da resistência ômica. (General Motors, 1996).	15
Figura 2.11 - A variação da força. Fonte: Fonseca & Bracarense (1999).	16
Figura 2.12 - Tempo da pré-pressão e pós-pressão no processo RSW. Fonte: Santos (2006).	17
Figura 2.13 - Posicionamento do tubo de refrigeração. Fonte: Medar (2005).	18
Figura 2.14 - Desgaste da face do eletrodo. Adaptado de: William & Parker (2004 ^b).	19
Figura 2.15 - Desgaste do eletrodo. Adaptado de: Usiminas (2010).....	20
Figura 2.16 - Desalinhamento dos eletrodos. Fonte: Medar (2005).	20
Figura 2.17 - Tipos de eletrodos mais utilizados. Adaptado de: Intermachinery (2002).	21
Figura 2.18 - Tipo de eletrodo pela espessura do metal base. Fonte: Medar (2005).....	21
Figura 2.19 - Geometria do ponto de solda. Fonte: Zhou <i>et al.</i> (2003).....	23
Figura 2.20 - Modos de ruptura: (a) interfacial (b) arrancamento do ponto (c) rasgamento da chapa (d) arrancamento do ponto com rasgamento da chapa. Fonte: Amaral (2011).....	24
Figura 2.21 - Tipos de medições do ponto de solda Fonte: Branco (2004).....	24
Figura 2.22 - Esquema para ensaio de cisalhamento. Adaptado de: Luo <i>et al.</i> (2009).	25

Figura 2.23 - Rotina de testes para arrancamento: a) Com chave tipo pé de cabra, b) Teste mecânico e c) Teste tipo descascamento Fonte: Aures, 2006.	26
Figura 2.24 - Defeitos e possíveis causas do ponto de solda. Fonte: Medar (2005).	28
Figura 2.25 - Defeitos e possíveis causas do ponto de solda. Fonte: Medar (2005).	28
Figura 2.26 - Sistema de deslocamento do eletrodo adaptado. Fonte: Chuntão 2010.....	30
Figura 2.27 - Remoção do zinco na interface das chapas para uma mesma corrente. (a) após 2 ciclos, (b) após 7 ciclos Fonte: Gedeon & Eagar (1986 ^a).....	30
Figura 2.28 - Curva de deslocamento do eletrodo. Adaptado de: Gedeon & Eagar (1986 ^a)....	31
Figura 2.29 - Curva de deslocamento do eletrodo. Adaptado de: Jou (2003).	32
Figura 2.30 - Deslocamento do eletrodo para uma solda de qualidade. Jou (2003).....	32
Figura 2.31 - Publicações abordando o método de deslocamento do eletrodo.....	34
Figura 2.32 - Tipos de arranjos experimentais ortogonais. Fonte: Prasad <i>et al.</i> (2012).....	37
Figura 3.1 – Procedimento para realização da etapa experimental	40
Figura 3.2 - Equipamento de soldagem RSW utilizado.	41
Figura 3.3 - Acoplamento do sensor LVDT ao cabeçote móvel.	42
Figura 3.4 - Chapa de aço AISI 1006 galvanizado.....	43
Figura 3.5 - Interface de leitura do deslocamento do eletrodo.	44
Figura 3.6 - Eletrodo utilizado no experimento.....	44
Figura 3.7 - Realização do ensaio de ruptura nos corpos de prova.	45
Figura 3.8 - Medição da indentação da solda.(a) Relógio apalpador, (b) Traçador de altura, (c) Bloco magnético.	46
Figura 3.9 - Critério de ajuste para os filtros e amostragem.	47
Figura 4.1 - Teste 1. (a) Deslocamento do eletrodo, (b) Interface Interna e (c) Interface Externa, considerando 20 %kA e 30 ciclos.	53
Figura 4.2 - Teste 2. (a) Deslocamento do eletrodo, (b) Interface Interna e (c) Interface Externa, considerando 50 %kA e 30 ciclos.	54
Figura 4.3 - Teste 3. (a) Deslocamento do eletrodo, (b) Interface Interna e (c) Interface Externa, considerando 70 %kA e 30 ciclos.	55

Figura 4.4 - Teste 6. (a) Deslocamento do eletrodo, (b) Interface Interna e (c) Interface Externa, considerando 75 %kA e 30 ciclos.	56
Figura 4.5 - Teste 10. (a) Deslocamento do eletrodo, (b) Interface Interna e (c) Interface Externa, considerando 75 %kA e 10 ciclos.	57
Figura 4.6 - Teste 4. (a) Deslocamento, (b) Interface Externa (ocorrência de solda).	58
Figura 4.7 - Revestimento de zinco. Ampliações: (a) 200 vezes, (b) 500 vezes.	60
Figura 4.8 - Remoção parcial com 10 ciclos e 70% da I max. Ampliações na zona de contato: (a) 6.7 vezes, (b) 15 vezes, (c) 200 vezes, (d) 500 vezes.	61
Figura 4.9 - Remoção ideal com 20 ciclos e 70% da I max. Ampliações: (a) 6.7 vezes, (b) 15 vezes, (c) 200 vezes, (d) 500 vezes.	62
Figura 4.10 - Deslocamento do eletrodo não amaciado durante a fase de preaquecimento.	64
Figura 4.11 - Deslocamento do eletrodo amaciado na fase de preaquecimento	66
Figura 4.12 - Impressão em carbono da ponta do eletrodo, durante os 31 experimentos.	71
Figura 4.13 - Gráfico de crescimento do ponto de solda.	71
Figura 4.14 - Teste 18. Gráfico de deslocamento do eletrodo.	72
Figura 4.15 - Gráfico comparativo entre IS e IM.	72
Figura 4.16 - Efeito dos parâmetros na resistência ao cisalhamento.	77
Figura 4.17 - Efeito dos parâmetros na deformação na força máxima.	78
Figura 4.18 - Efeito dos parâmetros na indentação medida pelo sensor.	79
Figura 4.19 - Efeito dos parâmetros na indentação medida pelo relógio apalpador.	79
Figura 4.20 - Influência da interação significativa par RC.	80
Figura 4.21 - Influência da interação significativa para DF _{máx}	80
Figura 4.22 - Influência da interação significativa para IS.	81
Figura 4.23 - Influência da interação significativa para IM.	81
Figura 4.24 - Região otimizada de soldagem considerando níveis baixos de corrente.	83
Figura 4.25 - Região otimizada de soldagem considerando níveis médios de corrente.	84
Figura 4.26 - Região otimizada de soldagem considerando níveis altos de corrente.	84

Lista de Quadros

Quadro 2.1 - Características fundamentais do Projeto e Análise de Experimentos.	36
Quadro 3.1 - Especificações dimensionais dos corpos de prova. Valores em (mm). Fonte: AWS (2002) Modificada.	43

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Composição química do aço utilizado.	43
Tabela 3.2 - Parâmetros reguláveis no equipamento de solda ponto.	46
Tabela 4.1 - Valores programados no equipamento de soldagem e os resultados obtidos.	52
Tabela 4.2 - Valores de preaquecimento obtidos para eletrodo sem “amaciamento”.	63
Tabela 4.3 - Valores de preaquecimento para eletrodo com “amaciamento”.	63
Tabela 4.4 - Arranjo experimental de um fatorial completo com center points.	68
Tabela 4.5 - Coeficientes obtidos no modelo fatorial completo para as respostas escolhidas.	69
Tabela 4.6 - Arranjo experimental CCD.	70
Tabela 4.7 - Comparação entre os modelos.	73
Tabela 4.8 – Coeficientes e suas interações no modelo reduzido.	74
Tabela 4.9 - Análise dos Resíduos	76
Tabela 4.10 - Indicadores “Run Chart”	76
Tabela 4.11 - Parâmetros da otimização.	82
Tabela 4.12 - Resultados obtidos.	82

Simbologia

Letras Latinas

Cu	Cobre
e	espessura da chapa
Hz	Hertz
I	corrente
i_w	corrente de solda
R	resistência elétrica
R^2	ajuste do modelo matemático em relação ao modelo real
U_w	tensão de solda
Zn	Zinco
y	Resposta de interesse
xi	Parâmetros independentes
k	Número de parâmetros independentes
d_i	coeficiente do desirability $0 \leq d_i \leq 1$.
D	Índice global do desirability
Y_k	Valor ajustado da resposta

Letras Gregas

λ_{PC}	auto valor do componente principal
F τ	força de tração
Δ	distância entre linhas de força

β_i	Coefficientes a serem estimados
ε	Erro experimental.
α	Nível de significância para o Minitab

Abreviaturas e Siglas

A/D	Analógico / Digital
AIISI	American Iron and Steel Institute
ANOVA	Análise de Variância
AWS	American Welding Society
BZ	Burn Zinc
CCD	Central Composite Design
DOE	Design of Experiments
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
Ipreaq	corrente de preaquecimento
ISO	International Organization for Standardization
Isolda	corrente de solda
LOF	Lack of Fit
LVDT	Linear Voltage Differential Transdutor
MAG	Metal Ativo Gás
MIG	Metal Inerte Gás
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
RSW	Resistance Spot Welding
SAE	Society of Automotive Engineers
TIG	Tungstênio Inerte Gás
Tpreaq	tempo de preaquecimento
Tsolda	tempo de solda
ZTA	Zona Termicamente Afetada
MEV	Microscopia de Varredura Eletrônica
MO	Microscopia Ótica

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. Importância do tema

Desde a invenção do processo de solda por resistência, em 1877, por Elihu Thomson, que aplicou o processo na união de fios de cobre, a soldagem a ponto por resistência, vem sendo muito utilizada nos diversos setores da indústria. O setor automobilístico, atualmente considerado o setor que mais emprega o processo de solda a ponto por resistência, utiliza no mínimo 3587 pontos de solda em uma produção de cabine de caminhão Ford Cargo (Usiminas, 2010). Atualmente pode-se afirmar que a solda a ponto por resistência elétrica (do inglês RSW – *Resistance Spot Welding*) é o processo de solda mais utilizado dentre os outros existentes, neste setor industrial. Isto ocorre dada a sua facilidade de ajuste de seus parâmetros, robustez e rapidez na obtenção de soldas de qualidade, bem como apresentar baixo custo de aplicação, se comparado a outros processos de solda a arco elétrico (como MIG/MAG, TIG e outros), como comprovado por Azambuja (1987) e Vargas (2006).

É importante destacar que o processo RSW é o único dentre os demais que não utiliza metal de adição. Desta forma, o peso do conjunto soldado não aumenta após a solda. Isto se torna ideal para a indústria na qual a disputa por carrocerias ou estruturas soldadas mais leves é bem competitiva. Assim, o baixo peso do automóvel traz benefícios ao consumidor final pela economia de combustível e pela performance, que proporciona agilidade nas retomadas de segurança. Ainda neste contexto de competitividade industrial, a durabilidade dos

automóveis também se destaca. A utilização de chapas de aço, revestidas com zinco, torna-se bastante atrativa, pelo fato de que as superfícies resistentes à corrosão possam ser produzidas a partir de aços carbono que tem menor custo. Sabe-se, todavia, que o projeto da solda inicia-se pela escolha do material a ser soldado, em que a composição química do metal e do revestimento (se existir) deve ser levada em conta. De posse deste dado, a definição do tipo de eletrodo, sua geometria e composição química tornam-se importantes. Na sequência, vem o ajuste dos parâmetros do processo como a corrente, o tempo e a pressão do eletrodo, entre outros. A fase do processo RSW em que ocorre a remoção do zinco denomina-se preaquecimento. Assim, uma atenção especial à remoção do revestimento de zinco, antes da solda propriamente dita (ciclo pré-solda), torna-se necessária. Devido ao risco eminente da contaminação da poça de fusão e dos eletrodos pelo zinco originário do revestimento durante o processo de soldagem que, além de migrar para o eletrodo (diminuindo sua vida útil), pode tornar-se uma incrustação dentro do ponto de solda, afetando a resistência do mesmo, procedimentos no ciclo pré-solda são necessários para minimizar esta atuação negativa do revestimento (Nascimento, 2008).

Ainda neste contexto, o baixo custo de aplicação do processo RSW, também está relacionado à condição adequada na seleção dos parâmetros de preaquecimento no equipamento de soldagem. Assim é possível obter uma vida longa do eletrodo (principalmente por se tratar de um material consumível de alto custo), e diminuir os pontos extras atualmente inseridos no projeto de um conjunto soldado. Em razão disto, dado os pontos falhos existentes devido a uma parametrização incorreta do equipamento de solda, e aos fatores incontrolláveis, observa-se que a maior parte das dificuldades apresentadas até o momento está relacionada em maior parte ao revestimento de zinco presente no metal base. Desta forma, questões sobre a possibilidade de avaliar a remoção desta camada de zinco durante a execução do processo RSW surgem naturalmente juntamente com a necessidade de avaliar sua influência na solda.

Uma forma de avaliação, utilizada hoje nas indústrias, para verificar a qualidade final do ponto de solda, são os ensaios destrutivos. Neste teste, amostras são preparadas e ensaiadas fora do processo fabril com o intuito de representar a condição real, que ocorre no processo de soldagem. Por outro lado, este método, além de ser feito por amostragem, não representa claramente a condição real do conjunto soldado. Fatores como, o encaixe de chapas, a condição de superfície, a sujeira, o desgaste do eletrodo, a experiência do operador, etc., passam despercebidos. Devido a estas limitações existentes nestes ensaios destrutivos, muitas pesquisas têm sido feitas na tentativa de monitoramento do ponto de solda. Com base nas

informações até o momento, este trabalho foi direcionado ao estudo da análise do efeito da eliminação da camada de zinco como avaliador da qualidade da solda a ponto em chapas de aço galvanizadas, utilizando para isto o método do deslocamento do eletrodo como sinal efetivo e de alta confiabilidade na descrição do comportamento do processo RSW na fase de preaquecimento. Caracterizado esta fase de uma remoção efetiva da camada de zinco, a sua interação com o ciclo de solda propriamente dito necessita ser avaliado para que o ponto soldado possa assim apresentar as melhores características geométricas e de resistência mecânica, o que será realizado neste trabalho de pesquisa.

1.3. Objetivos

Em função do que foi escrito anteriormente, este trabalho foi desenvolvido com o propósito de cumprir os objetivos abaixo:

- Analisar a viabilidade de utilização de uma metodologia baseada no deslocamento do eletrodo de cobre para avaliação da remoção da camada de zinco em soldagem a ponto de chapas de aços eletro galvanizados AISI 1006;
- Avaliar, por meio do deslocamento do eletrodo, a influência dos parâmetros de preaquecimento (tempo e intensidade de corrente) nas etapas de remoção da camada de zinco e desenvolver um envelope operacional para rápido ajuste dos mesmos;
- Avaliar a influência dos principais parâmetros de solda na geometria do ponto de solda e também na resistência ao cisalhamento, buscando, encontrar valores ótimos dos parâmetros de soldagem, utilizando ferramentas estatísticas com base no projeto e análise de experimentos.

1.4. Contribuições esperadas

A soldagem por resistência elétrica quando realizada em chapas de aços galvanizados, necessita remover o zinco presente no revestimento anticorrosivo. Esta remoção se dá pela inserção de uma pré-fase (dita preaquecimento) em que uma corrente elétrica é aplicada por

um período curto de tempo. Na literatura científica, existe uma grande carência de informações específicas sobre este assunto. Desta forma, algumas dúvidas surgem quanto a influência dos níveis de parâmetros deste preaquecimento na qualidade final do ponto soldado. No setor automotivo este procedimento é determinado de modo empírico e, muitas das vezes com a utilização de baixos valores de corrente e tempo. Neste contexto, este trabalho possibilitou analisar de forma científica, a remoção desta camada de zinco presente nas chapas de aços galvanizados.

1.4. Estrutura do trabalho

Este primeiro capítulo teve como função uma breve explanação sobre a importância da solda a ponto por resistência, no contexto industrial atual. Dentre suas aplicações, procurou-se demonstrar a relevância do processo incluindo materiais com superfícies revestidas e os fatores que levaram o método do deslocamento do eletrodo a constantes pesquisas no meio acadêmico.

O capítulo 2 apresenta os conceitos para embasar teoricamente esta pesquisa; os conceitos relacionados à soldagem RSW são analisados sobre o ponto de vista de vários autores, destacando-se a influência da camada de zinco na qualidade de pontos soldados bem como métodos para avaliar a sua efetiva remoção. Aborda-se ainda, de forma superficial, técnicas estatísticas baseadas no DOE (do inglês - *Design of Experiments*) e a Metodologia de Superfície de Respostas como métodos importantes de aplicação em processos automáticos.

O capítulo 3 relata o método experimental proposto, bem como os equipamentos utilizados dentro das etapas do capítulo 4.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos bem como as discussões pertinentes.

O capítulo 5 finaliza este trabalho com as devidas conclusões e sugestões para os trabalhos futuros.

O capítulo 6 apresenta as referências bibliográficas consultadas.

Os anexos mostram dados complementares não inseridos no corpo principal do trabalho.

Capítulo 2

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem o objetivo de apresentar os conceitos que compõem o processo de soldagem RSW. Uma análise das pesquisas anteriores envolvendo este processo também é apresentada com a finalidade de identificar como este assunto vem sendo abordado pela literatura. Assim pode-se compreender o que já existe em relação ao tema e quais contribuições ainda podem ser feitas. Quanto às ferramentas de análise e otimização, o conhecimento dos conceitos envolvendo métodos baseados em análises estatísticas como o projeto e análise de experimentos (DOE do inglês *Design of Experiments*) e Metodologia de Superfície de Resposta é neste trabalho de fundamental importância ser utilizado visto o processo de soldagem em questão apresentar um número grande de parâmetros e respostas, com prováveis interações entre estas e com reflexos na qualidade final da solda. Conceitos relativos a estes métodos serão apresentados de forma reduzida no sentido de consolidar as análises a serem efetuadas. Muito embora a solda a ponto resistência possa ser realizado por meio de diferentes processos como a solda por projeção, solda por costura e solda a ponto, neste trabalho tratar-se-á especificamente deste último por ser o processo mais utilizado no meio industrial.

2.1. Princípio de funcionamento do processo de solda a ponto

A solda a ponto por resistência elétrica, em geral, é dada pela junção de duas partes metálicas sobrepostas envoltas por dois eletrodos, superior e inferior, gerando calor no ponto de maior resistência (interface das chapas) pela passagem de corrente elétrica e aplicação de pressão no ponto de solda. Durante o processo de solda, a ligação acontece pelo calor gerado entre as partes que são fornecidas por fontes de energia elétrica (INTERMACHINERY, 2002). Tal calor gerado leva a uma fusão localizada no ponto de contato entre as peças como pode ser observado na *Figura 2.1*.

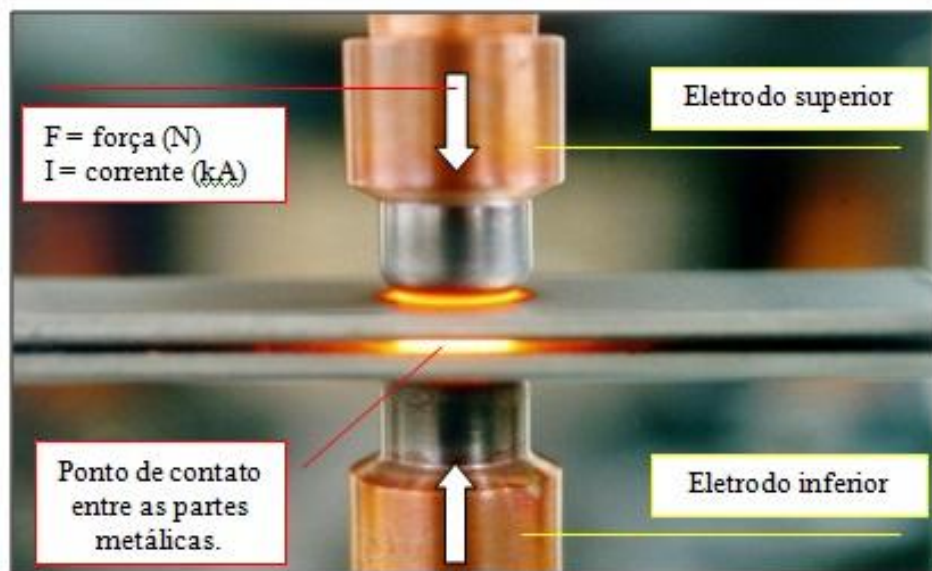


Figura 2.1 - Princípio de funcionamento do processo RSW. Fonte: Usiminas (2010)

A solda a ponto é um processo muito bem estabelecido e sendo usado em altos volumes de produção, por muitos anos. Várias são as formas disponíveis de fornecimento de energia para o equipamento de solda. Dentre elas, estão às fontes de corrente alternadas, as fontes por descarga de capacitores que fornecem um pico curto de energia, e por fim as fontes inversoras que fornecem um pulso controlado (AWS, 1995). Os principais tipos de fontes de potência têm permanecido basicamente iguais, com modificações para melhorar a consistência da corrente de saída. A seleção do tipo de fonte de potência é baseada nos materiais metálicos (condutividade elétrica, térmica, dimensão, etc.) a serem unidos, velocidade de produção e custos, entre outros. Uma boa revisão sobre o assunto, fontes para a solda a ponto resistiva,

pode ser encontrada em Furlanetto (2005). A fonte utilizada neste trabalho será de corrente alternada (60 Hz – frequência da rede elétrica do Brasil). A resistência do conjunto à passagem da corrente elétrica gera o calor necessário para a solda. Em adição às resistências ôhmicas, a resistência de contato também é um fator importante. As resistências de contato são influenciadas pelas condições da superfície (aspereza, limpeza, oxidação e formação de placas na superfície). Segundo Weiner et al. (1992), a energia térmica total gerada pode ser calculada pela lei de Joule, cuja fórmula é expressa pela **Equação 2.1**.

$$Q = \int_0^t I^2 R dt \quad (2.1)$$

Onde:

Q = energia térmica desenvolvida no ato da solda em Joule;

t = tempo de duração da passagem da corrente elétrica, em segundos;

R = resistência de contato das chapas, ohms;

I = valor da intensidade da corrente elétrica que passa através do metal, ampères.

Como se percebe pela **Equação 2.1**, o calor gerado no processo de solda é proporcional ao quadrado da corrente de soldagem e também à resistência do conjunto e ao tempo aplicado. A **Figura 2.2** mostra os pontos de maior calor onde a curva à esquerda representa o gradiente térmico durante o tempo de soldagem.

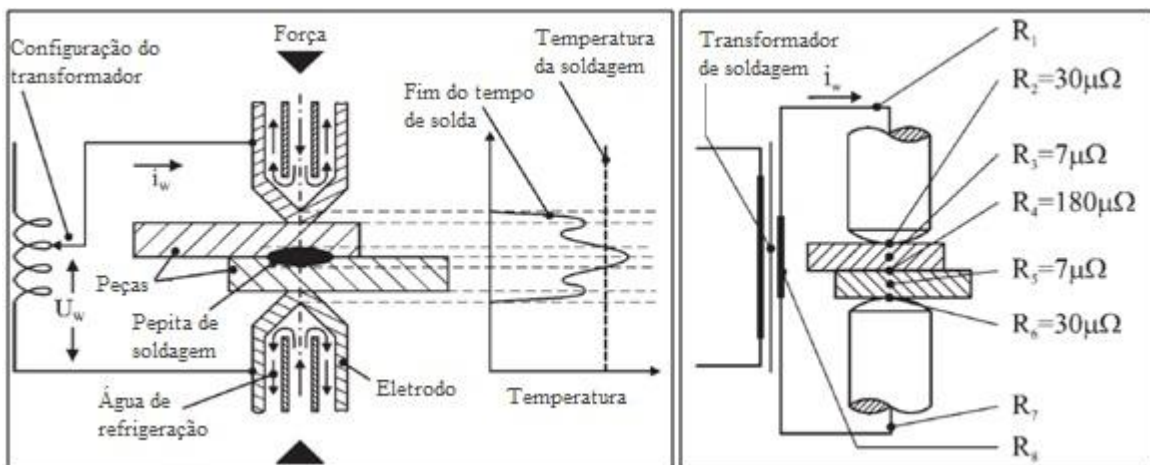


Figura 2.2 - Temperatura e resistências do processo. Adaptado de: Podrzaj et al., 2008.

Ainda considerando a **Figura 2.2**, nota-se que existem sete resistências envolvidas no processo e associadas em série. Dentre elas, os pontos 1 e 7 representam a resistência dos eletrodos. Os pontos 3 e 5 representam a resistência das chapas. Já os pontos 2, 4 e 6 representam a resistência de contato. No ponto 4, onde está localizado o ponto de maior resistência do conjunto, ocorre a maior geração de calor. É neste ponto que se inicia a geração de calor e mais tarde a fusão do material. Para que isto ocorra, os eletrodos são fabricados com materiais de baixa resistência elétrica. Assim, a resistência do eletrodo no ponto de contato com a chapa é baixa em comparação com a interface das chapas. Muito embora o resfriamento do ponto de solda seja pela condução por meio da peça de trabalho e principalmente por meio dos eletrodos, existe também a perda de calor pela convecção e radiação (AURES, 2006).

2.2. Parâmetros de regulação

Os principais parâmetros de regulação no processo de soldagem para uma adequada formação da lente de solda são o tempo de solda, a corrente elétrica e a força aplicada entre os eletrodos (BRANCO, 2004). Todavia, existem parâmetros de extrema importância para o bom desempenho do processo como a refrigeração, o desgaste e o desalinhamento dos eletrodos, a composição química do material a ser soldado, seu revestimento, a condição de superfície e a sua espessura (INTERMACHINERY, 2002; VARGAS, 2006; REU, 1997). Esses parâmetros estão fortemente relacionados entre si e seus valores são fundamentais para determinar a qualidade do ponto de solda, considerando condições médias de temperatura, pressão e a presença do ar atmosférico.

2.2.1. Corrente

A corrente elétrica no processo de solda a ponto é responsável pelo aquecimento da área de soldagem. Pode-se dizer que a corrente elétrica é o fluxo de cargas elétricas, e a intensidade de corrente elétrica pode ser expressa pela quantidade de elétrons pelo tempo. Esta possui uma variação de níveis mais baixos para soldas eletrônicas até valores maiores quando se trabalha com chapas de espessuras crescentes. Tão importante quanto a corrente, é a densidade de corrente na região de contato eletrodo/chapa que está diretamente ligada ao

diâmetro e forma da ponta do eletrodo. Para diâmetros maiores da ponta do eletrodo, a densidade de corrente diminui devido ao aumento da área de contato (**Equação 2.2**).

$$\text{Densidade de Corrente} = I / \text{Área de contato do eletrodo} \quad (2.2)$$

De forma geral, há a exigência de um nível mínimo de corrente abaixo do qual a fusão poderá não ocorrer para garantir uma solda de qualidade (SANTOS, 2006). Muito embora este nível mínimo dependerá da espessura do material a ser soldado, da sua composição química e das suas condições superficiais, o diâmetro da ponta do eletrodo afeta diretamente a densidade de corrente. Um detalhe importante que se deve observar é o posicionamento dos pontos de tal forma a diminuir a fuga de corrente (denominado efeito *shunt*). Da mesma forma, devido ao longo cabo que liga o transformador ao eletrodo, também existem perdas que diminuem o valor da corrente aplicado. Sendo assim, para uma melhor precisão no ajuste, equipamentos de medição devem ser usados. Atualmente, existem equipamentos completos portáteis que apresentam a leitura da corrente, o número de ciclos. Outro ponto importante a ser observado é a expulsão que é identificada pela perda do metal base mostrada na **Figura 2.3**. Tal perda resulta em diminuição da resistência do ponto de solda (BRANCO, 2004).

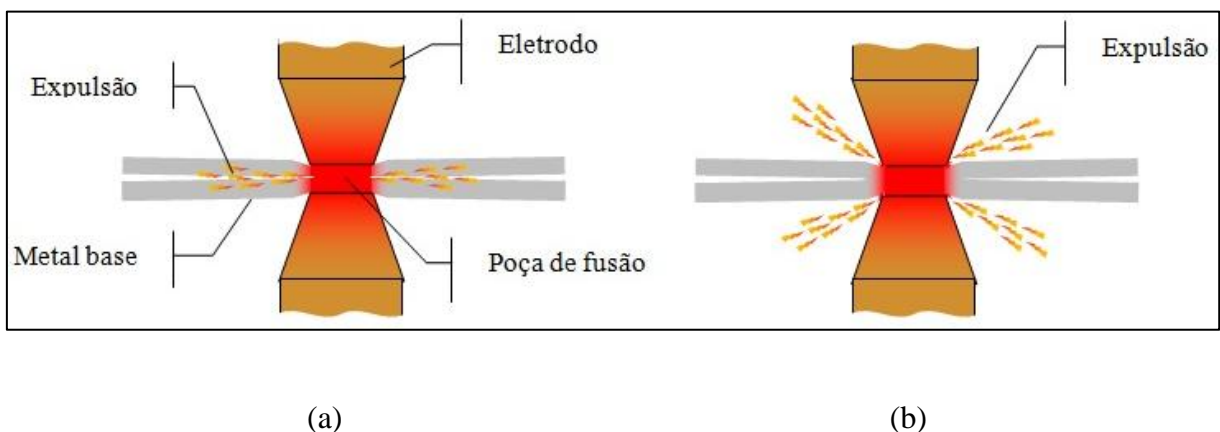


Figura 2.3 - Esboço da expulsão. (a) Interface interna. (b) Interface externa.

2.2.1.1. Corrente de preaquecimento e pós-aquecimento

O preaquecimento constitui-se de uma corrente elétrica aplicada durante o processo RSW que antecede a passagem da corrente programada. Normalmente esta regulagem tem sua importância aumentada no caso de chapas de aço galvanizados. Segundo Gedeon & Eagar (1986^a), a corrente necessária para efetuar uma solda com tamanho do ponto aceitável é

proporcional à espessura do revestimento de zinco. Este fato também foi observado por Diebold (1962) e Williams (1972). Sabe-se, todavia, que quando a corrente ultrapassa o limite mínimo para a formação do ponto, o cobre do eletrodo começa a migrar para a superfície da chapa e o zinco migra para a superfície do eletrodo (efeito indesejável), iniciando, assim, a degradação do eletrodo, comprometendo a durabilidade do mesmo. Esta migração é maior quando ocorre a expulsão de material da região de solda.

Também se observou no preaquecimento e no pós-aquecimento que ambos apresentam efeitos semelhantes tanto na subida da corrente (*upslope*) quanto na descida (*downslope*) da corrente de solda (GEDEON & EAGAR, 1986^a; GEDEON & EAGAR, 1986^b). Sabe-se, todavia, que o principal problema apresentado durante a tentativa de soldar o aço galvanizado é o fato de que a resistividade elétrica e o ponto de fusão do aço e do zinco são diferentes conforme se vê na **Figura 2.4** abaixo.

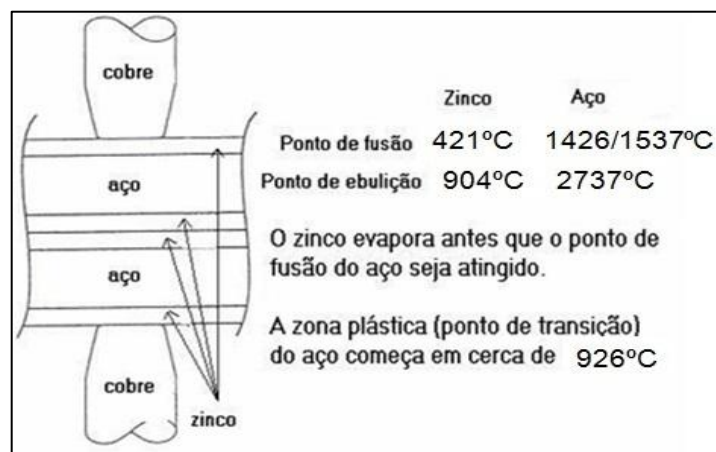


Figura 2.4 - Revestimento de zinco sobre o metal base. Fonte: Usiminas (2010).

Neste contexto, a corrente de preaquecimento torna-se muito útil para remover a camada revestida de zinco e garantir que a corrente de solda seja aplicada inteiramente na realização da soldagem, como também do ponto de vista metalúrgico evita-se a fragilização pela difusão do zinco para dentro do ponto (NASCIMENTO, 2008; SANTOS, 2006).

De certa forma, quando correntes de preaquecimento são adicionadas ao processo, observa-se que:

- Menos cobre é deixado sobre a superfície da chapa.
- A distância entre a zona fundida e a auréola de zinco é aumentada, o que evita a presença do zinco dentro na zona fundida.

O preaquecimento consiste em fundir e retirar o revestimento metálico, possibilitando aos eletrodos se posicionarem antes que a alta corrente de solda comece a fluir. Isto significa que menos revestimento estará disponível para a formação de liga. Outras aplicações do preaquecimento destina a diminuição da diferença de temperatura até o momento da aplicação da corrente de solda. Assim é possível obter redução de formação de trinca no ponto.

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).

2.2.1.2. Subida e descida da corrente

O tempo de subida da corrente (*upslope*) é o intervalo que se leva para que a corrente atinja o valor programado. Este parâmetro também evita o faiscamento, pois a inserção da corrente é de forma suave e, pode ser utilizado em situações onde a densidade de corrente é maior ocasionada pela diminuição do diâmetro da ponta do eletrodo. Nestes casos a subida de corrente diminui a ocorrência de expulsão e o aquecimento dos eletrodos (AWS, 1998).

Por outro lado, o tempo de descida da corrente (*downslope*) é o intervalo de tempo utilizado para que a corrente caia a um valor próximo de zero. A utilização desses recursos aumenta a vida útil do eletrodo, pois possui efeitos similares ao preaquecimento e ao pós-aquecimento segundo Gedeon & Edgar (1986^a) como também podem ser utilizados para controlar a solidificação do ponto de fusão do metal base (AWS, 1998). Um esquema do ciclo de soldagem com subida e descida de corrente pode ser observado na **Figura 2.5**.

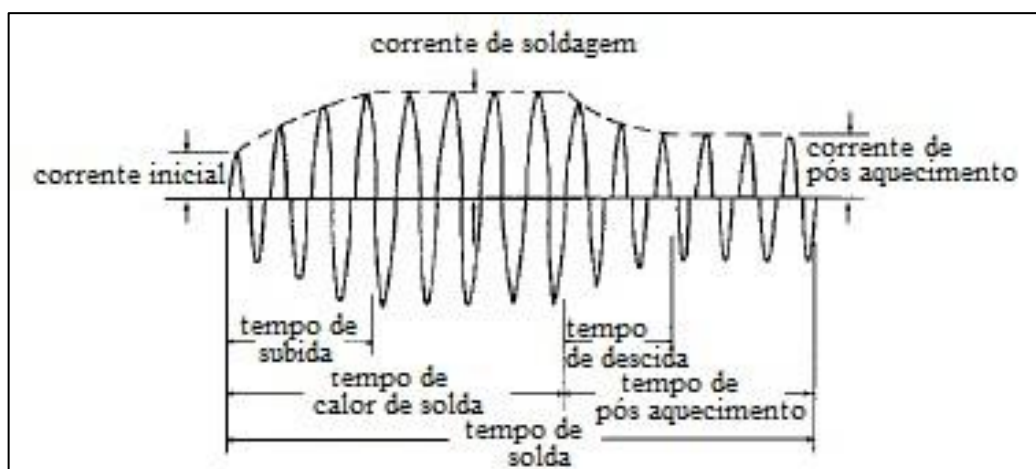


Figura 2.5 - Subida e descida da corrente. Adaptado de: Willians (2004).

2.2.1.3. Impulsos de Solda

Quando se solda chapas de altas espessuras pelo processo RSW, há necessidade de aumentar os valores dos parâmetros para que haja a fusão. Neste caso o material se torna mais dúctil facilitando o aumento da indentação. Sendo assim, para minimizar a indentação, é necessária a utilização de impulsos de solda. Os impulsos de solda podem ser caracterizados como sendo a aplicação de mais um tempo de corrente ao final do tempo de retenção. Nos seus intervalos, entre cada impulso, ocorre o resfriamento da solda, portanto o aporte térmico é menor (AWS, 1998).

2.2.1.4. Efeito *Shunt* ou desvio de corrente

O efeito de circuitos derivados (*shunt*) é um fenômeno, segundo o qual, apenas parte da corrente total de solda passa por meio do ponto desejado, fazendo com que seja produzida uma solda de má qualidade (BRACARENSE, 2000). A corrente sempre percorre um caminho, que se caracteriza pela passagem de um eletrodo para o outro por meio do ponto de menor resistência. Realizado o primeiro ponto de solda, menor será a corrente do ponto seguinte. Desta forma acarretará que o segundo ponto terá um diâmetro e penetração menor que o primeiro, conforme observado na **Figura 2.6**. Na prática a partir do 3º ponto, a fuga da corrente fica constante para os pontos seguintes (CHANG, 1990).

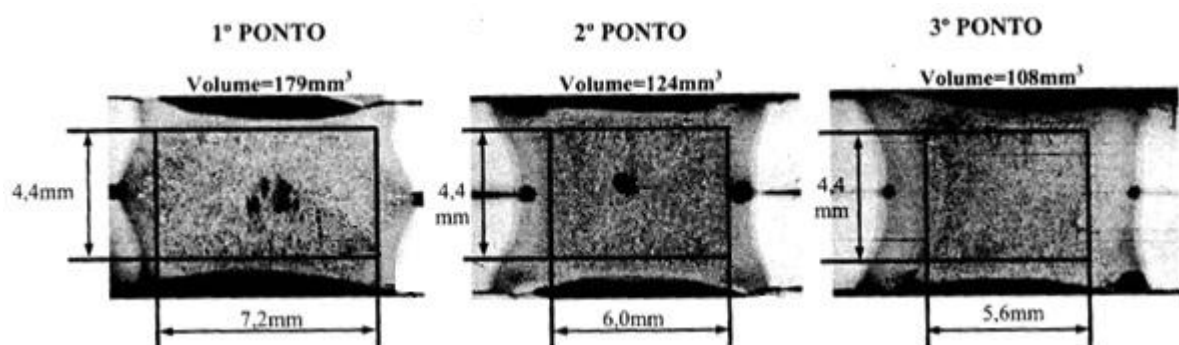


Figura 2.6 - Pontos de solda realizados em sequência. Fonte: Usiminas (2010).

Outro tipo de fuga de corrente, que ocorre durante o processo RSW é ocasionado no momento de contato do braço ou porta eletrodo com a peça ou dispositivo de solda. Essa fuga de corrente ocasiona problemas na soldagem, por exemplo: pontos soltos ou com diâmetro

abaixo dos especificados por norma (TECNOWELDING, 2004). Neste trabalho esse efeito não será considerado pelo fato dos experimentos serem conduzidos em amostras com um único ponto de solda.

2.2.2. Tempo de soldagem e preaquecimento

O tempo total do processo de soldagem inicia com o a descida do eletrodo (ou movimento da pinça) até encostar-se às chapas e a este chamamos de tempo de pré-pressão. Em seguida, a força é aplicada em um período de tempo, para que a chapa se acomode de forma adequada uma sobre outra (sem passagem da corrente). Neste momento ocorre a deformação da rugosidade, conforme mostrado na **Figura 2.7**, para chapas com revestimento de zinco.

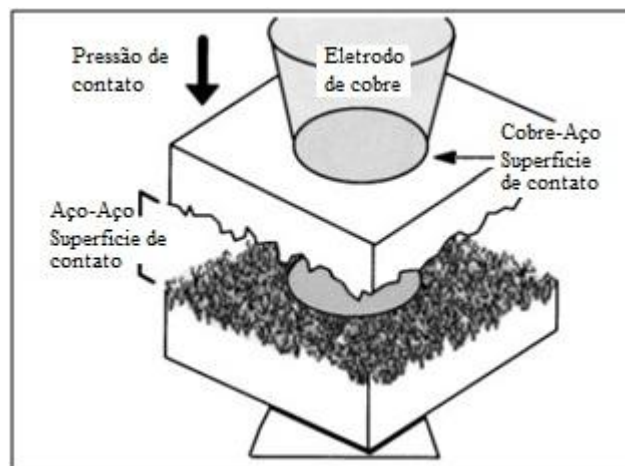


Figura 2.7 - Amassamento das asperezas. Adaptado de: Babu *et al.* (2001).

A **Figura 2.8** mostra o momento em que o tempo de pressão ocorre. Quando a força atingiu o seu valor máximo, é o momento de aplicar o tempo de subida da corrente (para aço não revestido). Tal tempo é considerado como o intervalo em que a corrente leva para atingir o valor programado. Por outro lado, quando o material a ser soldado possui revestimento de zinco, o tempo de preaquecimento deve ser aplicado, sendo este em combinação com a corrente de preaquecimento, para que seja suficiente para afastar a camada de zinco das interfaces (interna e externa) da chapa e do eletrodo (WILLIANS, 1972; GEDEON & EAGAR, 1986^a).

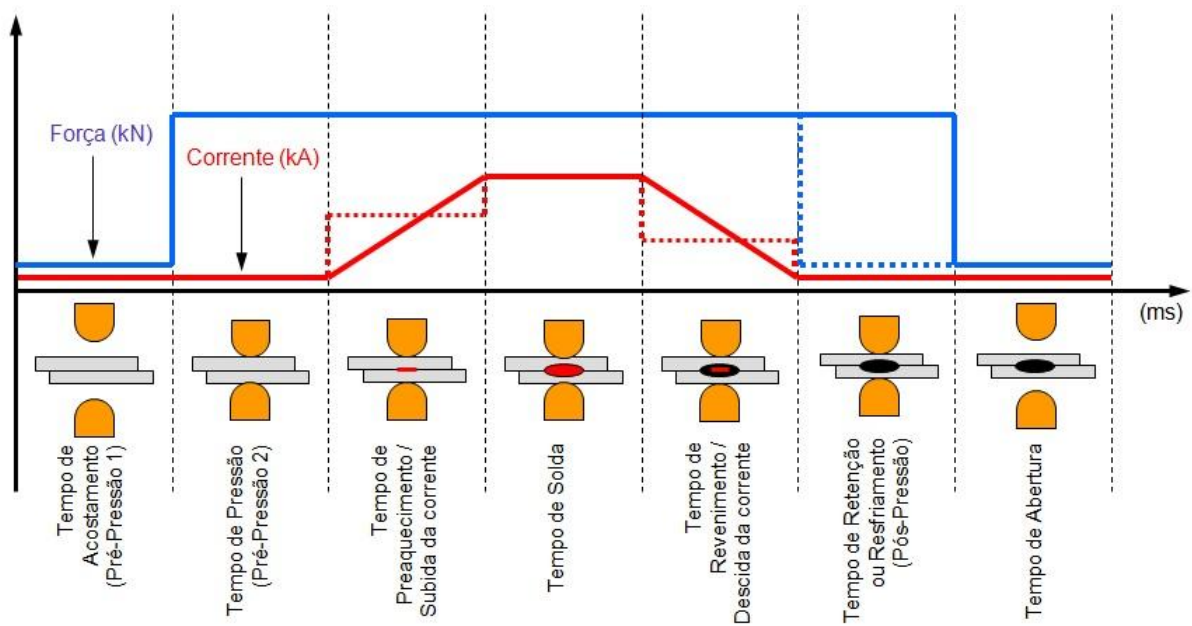


Figura 2.8 - Esboço dos tempos totais do processo de soldagem. Fonte: Usiminas (2010).

Na **Figura 2.8** a linha pontilhada refere-se à inserção do preaquecimento para materiais com revestimento de zinco. Já o tempo de solda é o tempo decorrente em que acontece exclusivamente a passagem da corrente de soldagem. Segundo Vargas *et al.* (2007), correntes mais altas e tempos mais curtos (em torno de 1/4 segundo) favorecem a resistência e o acabamento do produto. O tempo de descida da corrente pode ser usado com ou sem rampa de descida, ou como corrente de revenimento (linha pontilhada). Neste caso uma corrente menor é aplicada por um determinado período para que o revenimento ocorra. Na sequência, o tempo de resfriamento ajuda na solidificação da poça de fusão, completando assim, a união das chapas. Finalmente, temos o tempo de abertura, onde os eletrodos se afastam das chapas voltando à posição inicial. O ajuste do tempo de soldagem varia de acordo com o tipo de material soldado, espessura das chapas e tratamento superficial, devendo ser otimizado em função dos demais parâmetros de soldagem (AURES, 2006). Na soldagem a ponto por resistência, este tempo é definido por ciclos de corrente alternada de alimentação local. No Brasil, cada ciclo tem um tempo (período) de 16,66 ms (0,01666 s) conforme mostrado na **Figura 2.9**, pois a frequência de geração de corrente alternada é de 60 Hz, ou 60 ciclos por segundo.

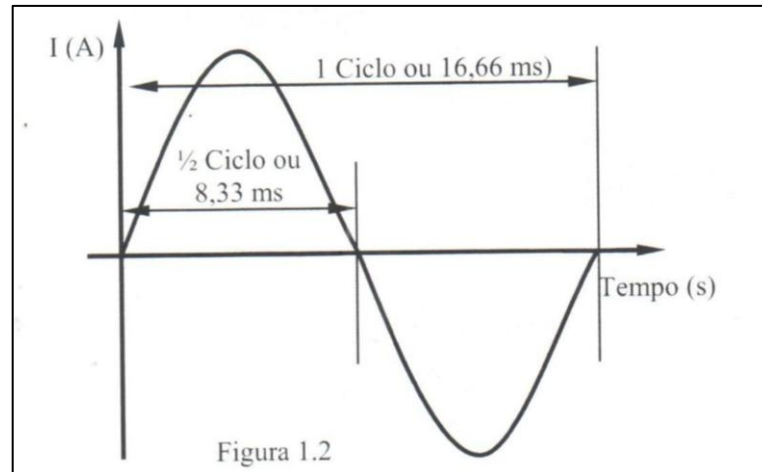


Figura 2.9 - Curva senoidal da frequência Hz. Fonte: Medar (2005).

2.2.3. Força/Pressão entre eletrodos e resistência de contato

O sistema mecânico presente no equipamento de soldagem é responsável pela aplicação da pressão sobre as peças. Esta pressão pode ser aplicada por um sistema elétrico, manual, hidráulico ou pneumático. Desta forma, a força (N), que é a resultante da pressão, pode ser medida na ponta do eletrodo por um dinamômetro. Muito embora seja necessária para garantir bom contato elétrico entre as partes a serem soldadas e mantê-las firmes até que o metal fundido, tenha tempo de se solidificar, também está diretamente ligada à resistência de contato (*Figura 2.10*). Assim, quando o valor da força diminui, a resistência de contato aumenta e conseqüentemente há um aumento no calor gerado entre chapas, (SANTOS, 2006).

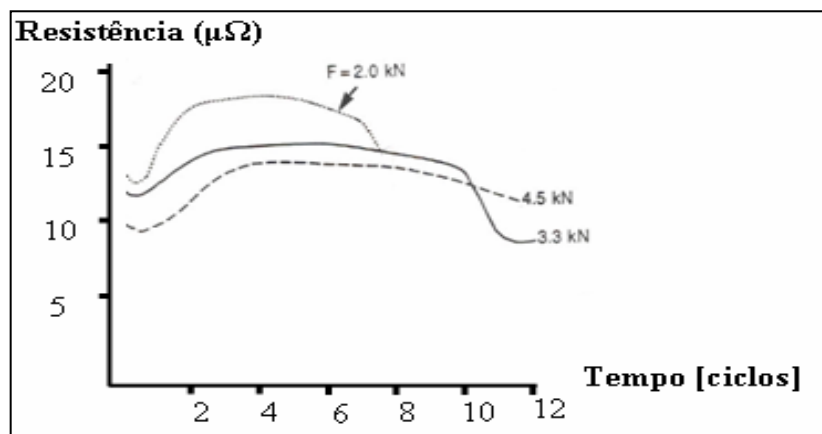


Figura 2.10 - A força em função da resistência ômica. (General Motors, 1996).

As impurezas como óleos e graxas, poeira, e qualquer tipo de sujeira também podem interferir na resistência de contato, pois impedem a passagem de corrente. O bom assentamento entre as chapas a serem soldadas, é outro fator determinante para formação da solda, porque 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, à abertura de arco elétrico entre as peças.

Sabe-se, todavia, que quanto maior a força aplicada, maior será o contato entre as chapas e menor será a resistência de contato (BABU *et al.*, 2001). Mesmo assumindo uma pressão constante, a força pode variar durante a solda.

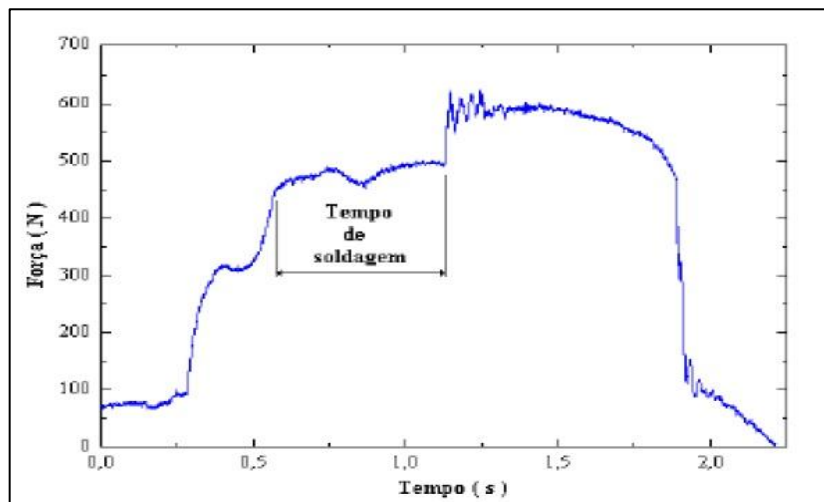


Figura 2.11 - A variação da força. Fonte: Fonseca & Bracarense (1999).

Fonseca & Bracarense (1999) observaram que a força exercida pelo eletrodo, varia ao longo da soldagem, conforme se pode ver na **Figura 2.11**. Pode-se dizer que esta variação está ligada à expansão térmica da chapa de aço.

2.2.3.1. Pré-pressão e Pós-pressão

A pré-pressão e a pós-pressão aplicadas nas chapas podem influenciar na qualidade do ponto da solda. Todavia, se a corrente for liberada, antes de atingir a pressão adequada (pré-pressão), existe risco de formação de arco elétrico, entre os eletrodos, pois a resistência de contato é muito alta, quando não existe a pressão dos eletrodos sobre a chapa. Após a

passagem da corrente, a pós-pressão garante que durante a solidificação do material não exista a formação de espaços vazios no ponto (SANTOS, 2006).

Na **Figura 2.12**, pode-se observar, de forma resumida, o momento adequado da pré-pressão e da pós-pressão em um processo de solda comum para garantir a formação adequada do ponto de solda à passagem da corrente de soldagem. Um detalhe importante a ser mencionado, remete ao pequeno intervalo de tempo antes do início e após o fim da corrente de soldagem que poderia ser eliminado, visando uma redução do tempo de produção.

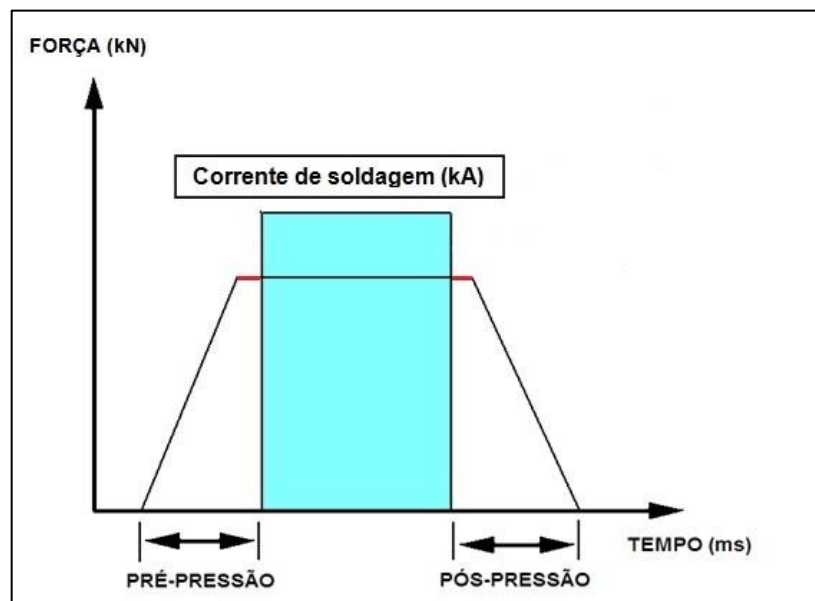


Figura 2.12 - Tempo da pré-pressão e pós-pressão no processo RSW. Fonte: Santos (2006).

2.2.4. Os eletrodos

O eletrodo é o componente da máquina de solda responsável por diversas funções. Entre elas estão a transferência de corrente elétrica para as peças, a delimitação da área de contato nas interfaces internas e externas, a densidade de corrente e o auxílio no resfriamento do ponto soldado. Estes eletrodos também devem possuir qualidades mecânicas e elétricas que lhes permitam não sofrer muito aquecimento e resistir a pressões sem um desgaste elevado ao longo do período de trabalho. A forma e a composição química dos eletrodos são determinadas de acordo com os materiais a serem soldados. A norma RWMA (2003) especifica as características mínimas existentes nos diversos tipos de materiais utilizados na confecção de eletrodos.

2.2.4.1. A refrigeração dos eletrodos

Devido ao alto aquecimento causado pela fusão do material, todo calor é dissipado pelo metal base e pelo eletrodo. Temperaturas elevadas deformam os eletrodos alterando suas propriedades mecânicas e físicas e, como consequência, aumenta a área de contato na ponta do eletrodo, reduzindo a densidade da corrente de soldagem (VARGAS, 2006). Desta forma, detalhes importantes como o posicionamento dos tubos, são mostrados na **Figura 2.13**.

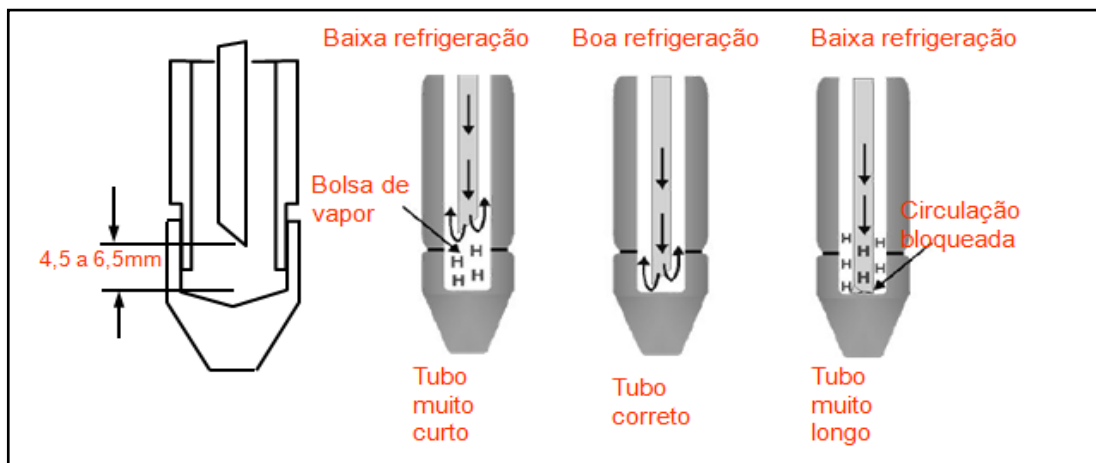


Figura 2.13 - Posicionamento do tubo de refrigeração. Fonte: Medar (2005).

Quando a temperatura aumenta, ocorre, portanto, a migração do zinco para sua superfície do cobre do eletrodo, como também a migração do cobre para superfície da chapa. Assim, pode-se dizer que a refrigeração do eletrodo auxilia na redução desta migração de zinco e cobre, entre eletrodo e a chapa de aço galvanizada. A vazão de água recomendada para os eletrodos superior e inferior varia geralmente de 4 a 6 litros por minuto e, deve ser adequada para resfriá-los a valores próximos à temperatura ambiente entre duas soldas sucessivas (TECNOWELDING, 2004).

2.2.4.2. O desgaste dos eletrodos e a influência na solda

O tempo de vida dos eletrodos normalmente é determinado em função do número de soldas que ele pode realizar. Durante o processo de soldagem, os eletrodos são submetidos a altas intensidades de correntes, forças de compressão e altas temperaturas. Estes fatores

contribuem diretamente na diminuição do tempo de vida dos eletrodos devido à alteração provocada em suas características físicas, mecânicas e geométricas (VARGAS, 2006).

Por outro lado, um equipamento de compensação da corrente denominada curva de “*stepper*” pode ser utilizado para retardar a frequência de restauração, proporcionando, assim, maior vida útil ao eletrodo pelo acréscimo automático da energia transferida para a fusão, no decorrer do número de soldas executado. Desta forma, com o intuito de garantir que a qualidade do ponto não se perca durante a soldagem, uma frequência de restauração em que o eletrodo retorna ao seu diâmetro original pode resolver o problema.

Alguns controladores de solda possuem contadores programáveis que quantificam o número de soldas realizadas pelo eletrodo, em que internamente é programada uma curva de incremento de corrente elétrica, que acrescenta um valor pré-programado na corrente de solda, conforme ocorre o desgaste do eletrodo. Quando o contador de pontos atinge o final da curva de incremento de corrente, o controlador envia um sinal ao processo para que seja realizado o reparo (afiação do eletrodo) ou a troca do eletrodo. A afiação é feita por meio de afiadores pneumáticos com o objetivo de manter um padrão, visto que uma variação no diâmetro da zona de contato, fora do padrão estabelecido coloca em risco a qualidade da solda (WILLIAMS & PARKER, 2004^b). Para estes autores, o eletrodo usado possui uma área de contato maior que a do eletrodo novo. Tal fato é mostrado na **Figura 2.14** para um número de pontos de solda entre 1500 e 2000.

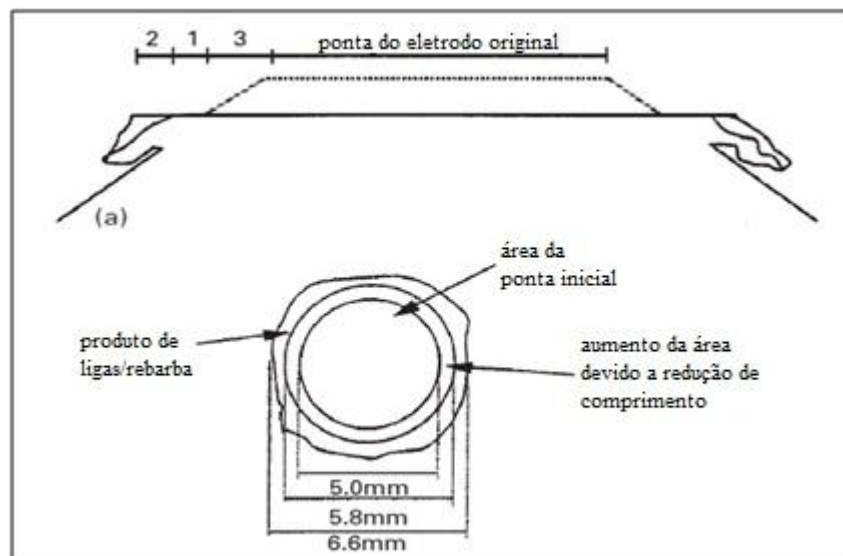


Figura 2.14 - Desgaste da face do eletrodo. Adaptado de: William & Parker (2004^b).

Ainda neste contexto, a **Figura 2.15** (as dimensões apenas ilustrativas, variam com o tipo de eletrodo e processo escolhido) revela um exemplo de inspeção visual para a vida útil do eletrodo como um método de controle rápido da continuidade do processo de soldagem.



Figura 2.15 - Desgaste do eletrodo. Adaptado de: Usiminas (2010).

2.2.4.3. O desalinhamento dos eletrodos e seu formato

O desalinhamento angular e axial entre os eletrodos implica redução da região de contato na interface entre os eletrodos e a peça. Conforme mostrado na **Figura 2.16**.

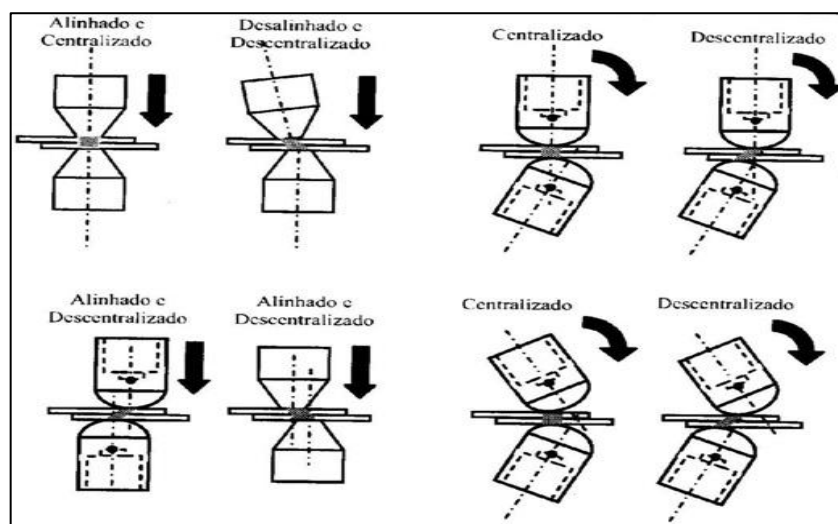


Figura 2.16 - Desalinhamento dos eletrodos. Fonte: Medar (2005).

Segundo Karagoulis (1994), um desalinhamento do eixo dos eletrodos leva a uma diminuição da área de contato, o que causa aumento da densidade de corrente. Assim, devido à redução da área de contato, a intensidade de corrente de solda torna-se elevada, como consequência, os eletrodos penetram profundamente nas chapas causando a expulsão do material fundido, reduzindo a vida útil dos eletrodos e, por fim, soldas com baixa qualidade (ROSSI, 2007). A maioria das empresas produtoras de eletrodos fornece modelos padronizados onde se destacam como os de mais utilização no mercado, os mostrados na **Figura 2.17** (dimensões apenas ilustrativas, variam com o tipo de eletrodo e processo escolhido). Para chapas de mesma espessura, os eletrodos devem possuir áreas de contato iguais, já para chapas de maior espessura, os eletrodos devem possuir uma área de contato maior para que haja distribuição uniforme de calor. Um exemplo deste ajuste é ilustrado pela **Figura 2.18**.

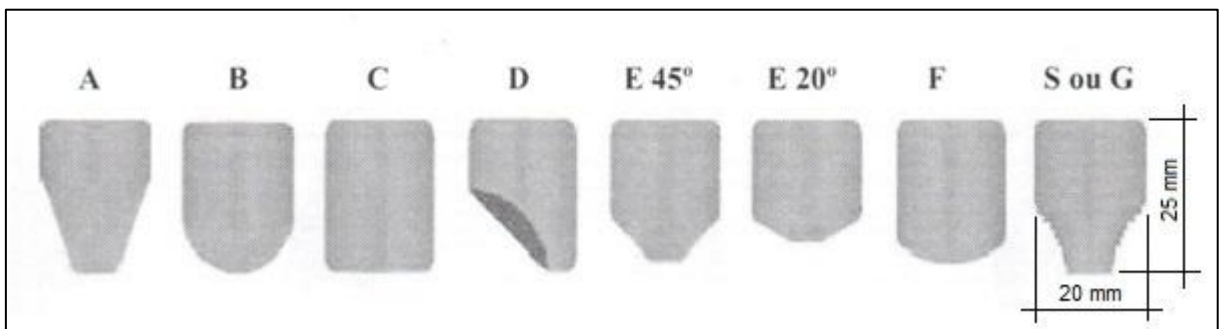


Figura 2.17 - Tipos de eletrodos mais utilizados. Adaptado de: Intermachinery (2002).

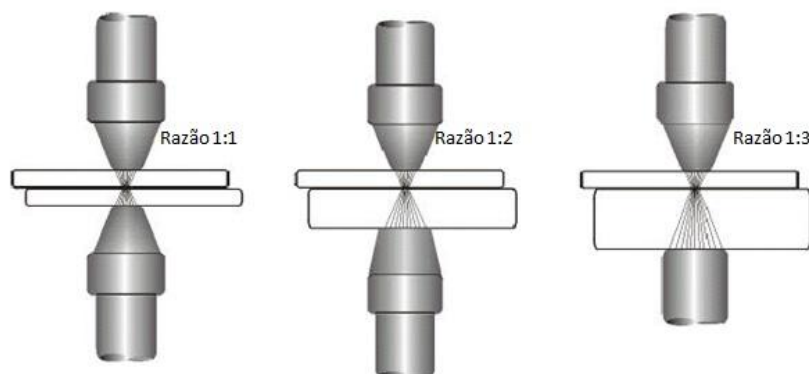


Figura 2.18 - Tipo de eletrodo pela espessura do metal base. Fonte: Medar (2005).

O formato dos eletrodos depende muito do tipo de pinça, do posicionamento do ponto de solda, da espessura da chapa, da composição e revestimento do produto, da força e corrente de solda e do ângulo de ataque. A corrente elétrica deve circular de forma que o aquecimento seja distribuído homoganeamente no volume de material a ser fundido. Essa região depende fundamentalmente do formato dos eletrodos.

2.3. A geometria do ponto soldado e a avaliação da qualidade da solda

A qualidade do ponto de solda é influenciada por vários fatores que ocorrem durante a produção. Segundo Zhou (2003), o entendimento destes fatores e seus efeitos são importantes para se garantir a qualidade da solda a ponto. Tais fatores podem ser, ditos controláveis, podem ser a corrente de solda, a pressão do eletrodo, o tempo de solda bem como os outros relativos à regulagem do próprio processo e já citados anteriormente. Por outro lado, os fatores incontroláveis, podem ser identificados como o encaixe das chapas, o desgaste no eletrodo e as impurezas presentes nos processos industriais como óleos e graxas e os óxidos, sempre aparentes nas superfícies das chapas. A combinação destes fatores influencia na geometria e por consequência, na qualidade final do ponto soldado e desta forma necessitam ser avaliados adequadamente seguindo para tanto especificações de normas vigentes. Sendo assim, a necessidade de monitorar a qualidade dos pontos de solda se torna mais evidente.

2.3.1. Caracterização da geometria do ponto de solda

O ponto de solda apresenta uma geometria específica conforme se pode ver na **Figura 2.19**. Durante o processo de soldagem, a chapa de aço quando aquecida, torna-se dúctil. Desta forma, a pressão do eletrodo vence a resistência do aço e, a ponta do eletrodo penetra na superfície do metal, gerando o que se chama de indentação. Quanto maior o aquecimento maior é a indentação (por penetração nas interfaces externas) causada pelo eletrodo na chapa, é desejável, porém, que ela seja mínima possível dentro de um limite tolerável dependendo do setor industrial (ZHOU *et al.*, 2003). O limite máximo de aceitação da indentação observado pelas indústrias automobilísticas corresponde a 20% da espessura das chapas soldadas (ASLANLAR, 2006). Por outro lado, a AWS SAE D8.9 (2002) não indica nenhuma

referência, desta forma, tem-se a liberdade de variação do mesmo pela aparência e resistência exigidas. Já para a formação do ponto soldado (zona de fusão), o calor se espalha por condutividade térmica para as regiões vizinhas, formando a zona termicamente afetada (ZTA).



Figura 2.19 - Geometria do ponto de solda. Fonte: Zhou *et al.* (2003).

Durante a avaliação por microscopia que define a indentação, também é observada a penetração do ponto de solda (caracterizado pela zona de fusão da **Figura 2.19**) no conjunto soldado. Jou (2003) afirma que uma penetração adequada do ponto de solda deve preencher 0,6-0,7 da espessura total somada do conjunto soldado. Goodarzi (2009) afirma que a penetração da solda tem forte influência da corrente e tempo de solda. Um método de avaliação rápido que define se houve uma boa penetração da solda é determinado pelo modo de ruptura. Este método revela uma boa penetração da solda, após o teste de cisalhamento, quando a falha ocorre pela combinação de arrancamento do ponto com rasgamento da chapa, conforme mostrado na **Figura 2.20 (c), (d)**.



(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 2.20 - Modos de ruptura: (a) interfacial (b) arrancamento do ponto (c) rasgamento da chapa (d) arrancamento do ponto com rasgamento da chapa. Fonte: Amaral (2011).

Na maioria das vezes, o diâmetro mínimo requerido para uma solda de boa qualidade obedece à norma ISO/DIS 14373 (2004). Tal norma remete que este diâmetro é dado pela **Equação 2.3**:

$$D = 5\sqrt{e} \quad (2.3)$$

onde 'D' é o diâmetro mínimo aceitável para o ponto de solda e "e" é o valor da espessura da menor chapa utilizada no conjunto soldado. Segundo Ma *et al.* (2006) um padrão mínimo aceitável utilizado pode ser determinado pela **Equação 2.4**. Este padrão também é utilizado pela Mercedes-Benz onde é mencionado na norma MB 10382.

$$D = 4\sqrt{e} \quad (2.4)$$

A medição do ponto de solda é realizada após a separação das chapas ocasionada pelo teste de cisalhamento. Tais medições são mais bem explicadas na **Figura 2.21**, em que o resultado provém da média do diâmetro referenciada em duas direções deve ser igual ou maior ao valor determinado pela **Equação 2.4**.

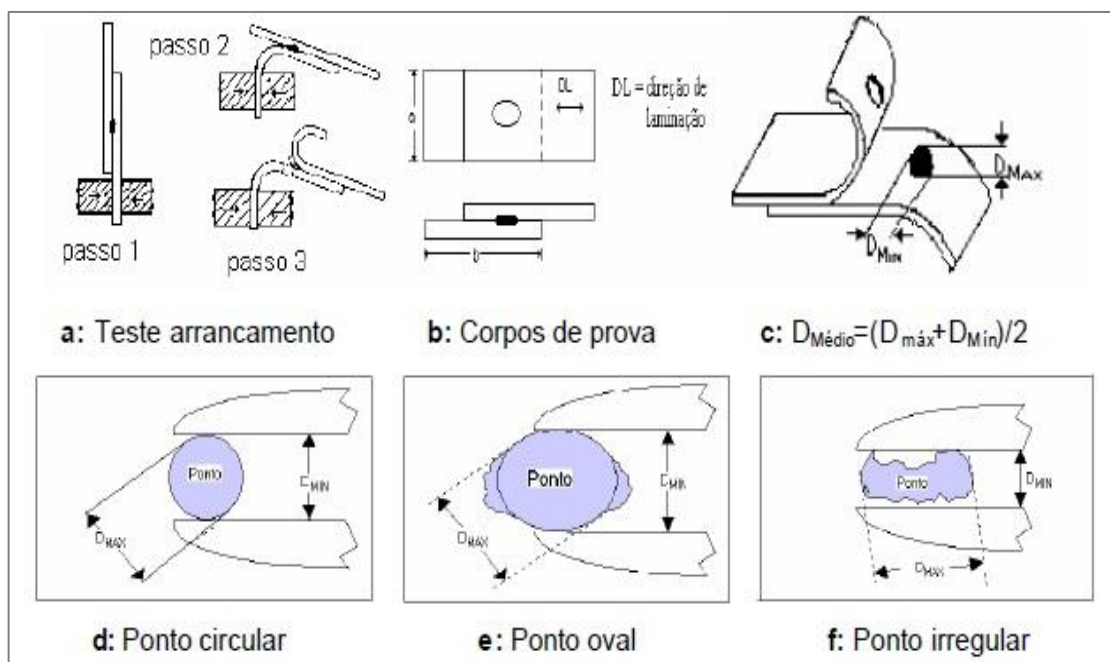


Figura 2.21 - Tipos de medições do ponto de solda Fonte: Branco (2004).

2.4. Testes destrutivos

A geometria da solda definirá as características do ponto de solda que por sua vez influenciará na qualidade final. Para checar se o ponto obtido atende os requisitos exigidos, deve-se realizar a sua inspeção através de ensaios específicos. Nesta linha, duas formas de inspeções são mencionadas na literatura. A primeira baseado na utilização de ensaios destrutivos, tem por objetivo verificar se o ponto atinge o nível de desempenho mínimo exigido em uma aplicação específica, estabelecidos por normas ou exigências industriais. Nos ensaios destrutivos o ponto de solda é submetido a testes que destroem sua condição atual para análises laboratoriais dos efeitos obtidos. Neste contexto, no meio industrial o teste é realizado por amostragem. Estes métodos de monitoramento e garantia de qualidade do ponto de solda estão descritos na AWS (2002) e envolvem desde testes destrutivos até inspeções microscópicas do ponto de solda. Desta forma, levando-se em conta que é inviável a destruição de produtos acabados para avaliar a qualidade da solda, muitos dos testes são realizados por meio de corpos de prova que não retratam, de forma real, o encaixe entre as chapas existentes nos dispositivos de montagem. Contudo, a possibilidade de monitoramento, em tempo real, dos pontos de solda é uma realidade presente e vem sendo desenvolvida por vários autores como uma demanda natural do processo RSW (MEI *et al.*, 2009).

2.4.1. Teste de cisalhamento

Este teste consiste na aplicação de duas forças nas extremidades do corpo de prova, em direções opostas, conforme ilustrado na **Figura 2.22**.

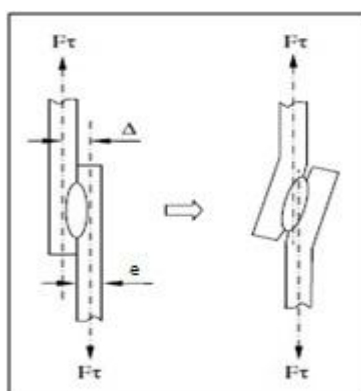


Figura 2.22 - Esquema para ensaio de cisalhamento. Adaptado de: Luo *et al.* (2009).

A preparação do corpo de prova para este teste está descrita pela AWS (2002). Neste contexto, após sua fixação no equipamento, o corpo de prova é carregado até a sua ruptura, em uma máquina de ensaio de tração. A avaliação da solda é feita em função do valor máximo da carga utilizada para romper (*por cisalhamento*) o corpo de prova.

2.4.2. Teste de arrancamento

Ao contrário do teste de cisalhamento, o teste de arrancamento é muito prático, tem alta confiabilidade, é de fácil execução e tem baixo custo de investimento (AURES, 2006). Neste contexto, os corpos de prova ou produtos acabados (sendo este menos frequente) são fixados a um dispositivo, por meio de morças ou parafusos e com auxílio de uma ferramenta apropriada são dobrados, fazendo-se um esforço (por arrancamento) entre as chapas, com o intuito de separá-las. Um exemplo disto pode ser observado na **Figura 2.23**. As ferramentas utilizadas no processo vão desde uma simples talhadeira com martelo até marteletes pneumáticos e alicates hidráulicos, sendo estes últimos utilizados para o caso de um alto volume de produção. Em seguida, mede-se o diâmetro da lente de solda, conforme descrito na **Figura 2.21**. A qualidade da solda é avaliada pelo diâmetro da lente de solda (**Equação 2.4**) que ficará aderido a uma das partes, após separação (BRANCO, 2004), e pelo modo de ruptura obtido, este inclusive considerado adequado, na ocorrência do arrancamento do ponto juntamente com rasgamento da chapa, conforme observado na **Figura 2.20 (c), (d)**. O modo de ruptura possui uma correlação direta com os valores obtidos no ensaio de tração. Desta forma, valores de alta resistência são obtidos por modos de ruptura em que ocorrem o arrancamento do ponto e o rasgamento da chapa conforme descrito por Amaral (2011).

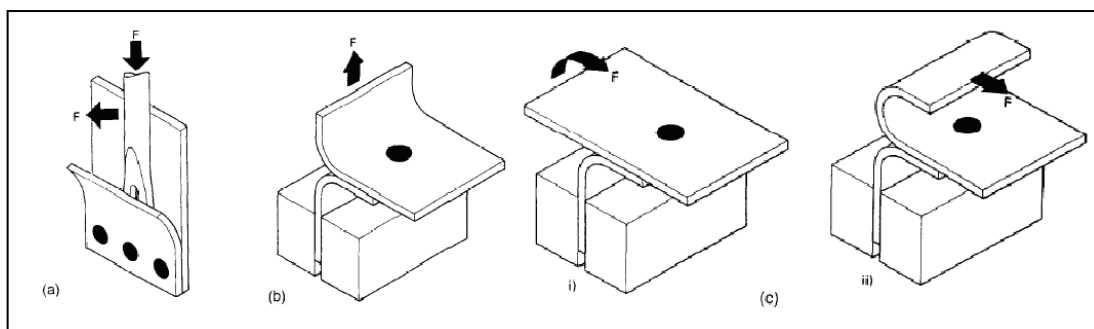


Figura 2.23 - Rotina de testes para arrancamento: a) Com chave tipo pé de cabra, b) Teste mecânico e c) Teste tipo descascamento Fonte: Aures, 2006.

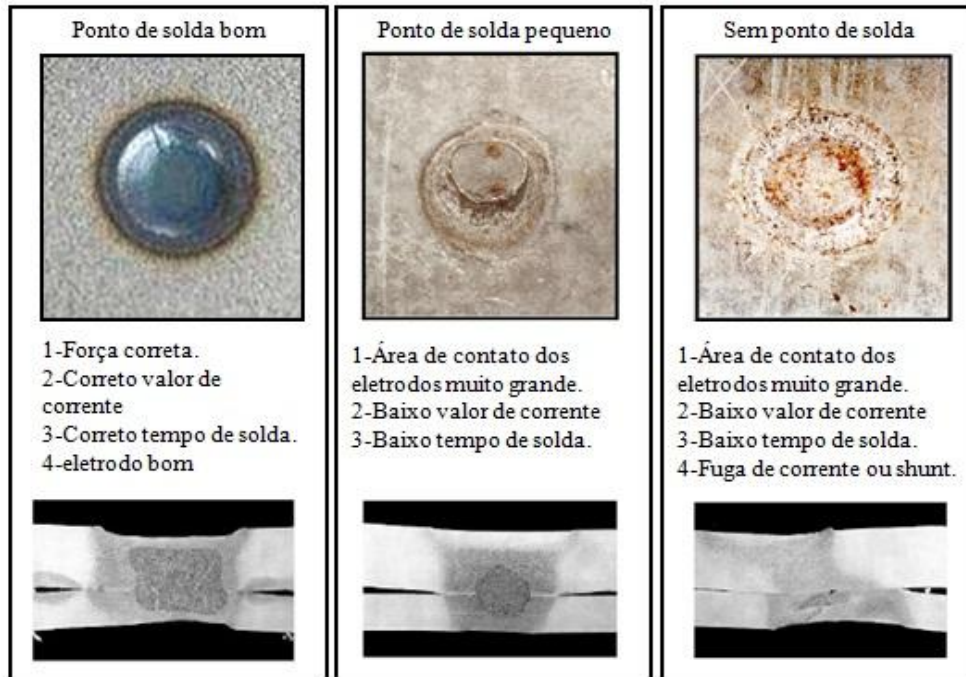
2.5. Ensaaios não destrutivos

Os ensaios destrutivos são bastante utilizados e confiáveis, porém, são feitos por amostragem, têm um alto custo pelas peças que são destruídas e dificilmente relatam a realidade da produção, pois as amostras não são peças acabadas. Desta forma, não há a garantia de que todas as soldas estejam na qualidade requerida. Segundo Andrews (1975), as condições de soldagem podem variar de uma solda para outra por diversas razões. Neste contexto, entram os vários métodos de inspeção não destrutivos, com o intuito de fornecer uma estimativa da qualidade do ponto de solda. Dentre estes se destacam a inspeção visual, a resistência dinâmica, sinais ultrassônicos, os sinais acústicos e os sinais de deslocamento do eletrodo. Todos estes testes têm sido abordados na literatura em diversos setores industriais. Entretanto, em função de que este trabalho de pesquisa tem o objetivo de avaliar as potencialidades do deslocamento do eletrodo na remoção de camada de zinco e formação do ponto soldado em chapas de aço galvanizados, a seguir será apresentado uma revisão da literatura dando um enfoque neste método bem como na inspeção visual para melhor caracterização do ponto soldado.

2.5.1. Inspeção Visual

A aparência superficial não é sempre um indicador confiável da qualidade da solda, já que alguns fatores incontroláveis não deixam efeitos visíveis nas chapas. Na **Figura 2.24** e na **Figura 2.25**, observa-se de forma mais clara, alguns destes detalhes.

A superfície de um ponto de solda deve ser uniforme na forma, relativamente plana 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 (AURES, 2006).

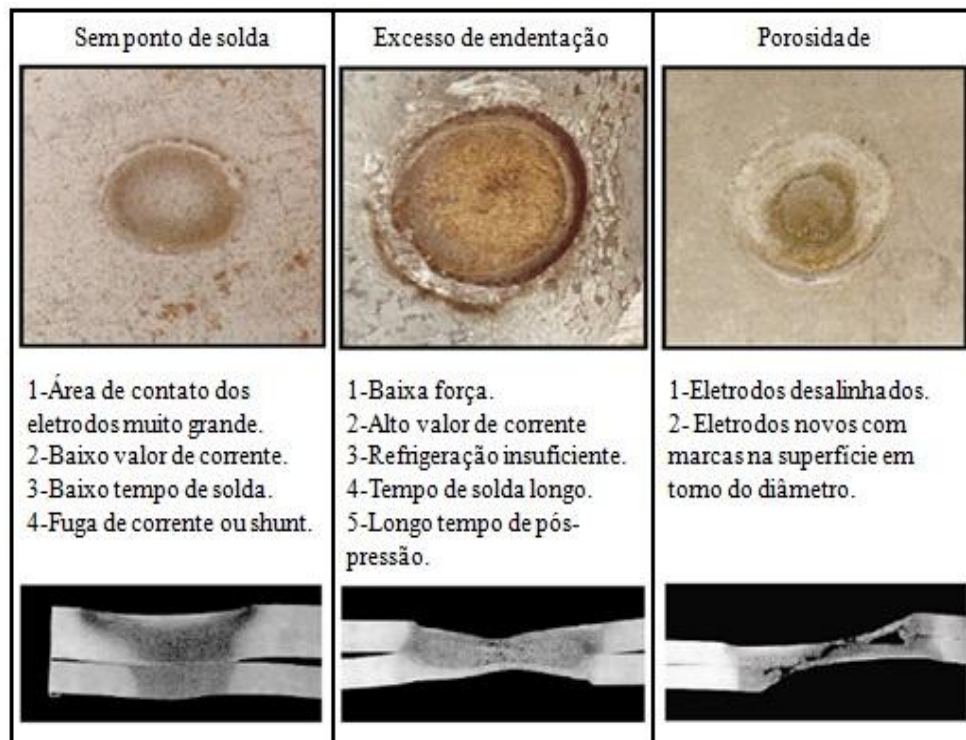


(a)

(b)

(c)

Figura 2.24 - Defeitos e possíveis causas do ponto de solda. Fonte: Medar (2005).



(a)

(b)

(c)

Figura 2.25 - Defeitos e possíveis causas do ponto de solda. Fonte: Medar (2005).

2.5.2. Sinal de deslocamento do eletrodo

Este método consiste em analisar a dilatação térmica do material durante do processo de soldagem. Para tanto, utiliza-se um sensor que irá captar esta dilatação e sua variação, ao longo do processo e por meio de um transdutor, estes dados são decodificados em dados numéricos e assim, por meio de uma interface gráfica todo processo de soldagem é demonstrado por um gráfico que revela todo o deslocamento do eletrodo durante o processo de solda RSW. Alguns autores como Lee *et al.* (2001) observaram que o sinal de deslocamento do eletrodo está diretamente ligado à formação do ponto de solda. Ainda neste contexto Gedeon & Eagar (1986^a) disseram ser possível utilizar as curvas de deslocamento do eletrodo para caracterizar fisicamente a remoção da camada de zinco.

Comparadas as curvas geradas pela resistência dinâmica, as curvas do deslocamento do eletrodo são mais fáceis de entender uma vez que existem dois mecanismos que regem o processo: dilatação térmica e remoção de material na interface interna (chapa com chapa) e na interface externa (chapa com eletrodo). Estas observações tiveram suas bases fundamentadas na expansão térmica do material soldado que ocorre durante o processo RSW. Desta forma, quando a corrente é aplicada à elevação na temperatura gerada pela resistência de contato existente entre as chapas induz-se a expansão térmica do material.

Esta dilatação térmica, por sua vez movimenta o eletrodo de cobre durante o processo, vencendo a pressão mecânica exercida pelo conjunto mecânico do equipamento. Com o passar do tempo, a fusão do metal base ocorre entre as chapas. Neste momento, as chapas perdem a rigidez e a força do eletrodo vence a resistência do aço, os eletrodos penetram no metal base (LEE *et al.*, 2001). Esta penetração nas interfaces externas é denominada indentação. Por outro lado, quando a corrente é cessada, a temperatura cai e o metal base se contrai. Toda esta movimentação é captada por meio de um transdutor diferencial de deslocamento linear (LVDT), e, por meio deste, obtêm-se informações que indicam a qualidade do ponto de solda, no momento em que ela ocorre. Existem também outras maneiras de se medir o sinal de deslocamento do eletrodo, como por exemplo, a utilização de encoder linear (JOU, 2003) e sensor de fibra ótica (CHEN, 2004). A **Figura 2.26** esboça uma idéia de todo o sistema.

Gedeon & Eagar (1986^a) realizaram um estudo mais detalhado sobre o ponto de solda, avaliando, com precisão, a remoção da camada de zinco. Neste trabalho, eles observaram que o tempo é um fator importante para a fusão completo da camada de zinco conforme observado na **Figura 2.27**.

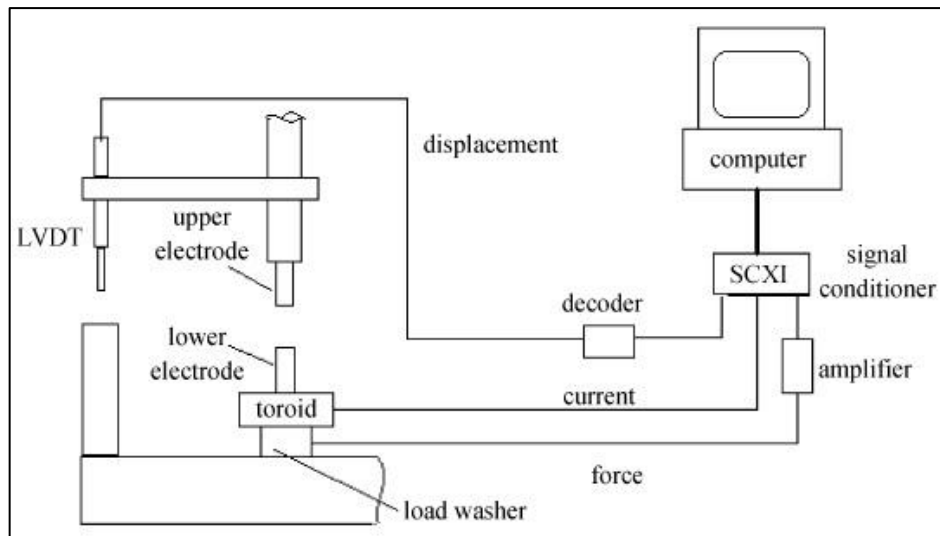


Figura 2.26 - Sistema de deslocamento do eletrodo adaptado. Fonte: Chuntão 2010.

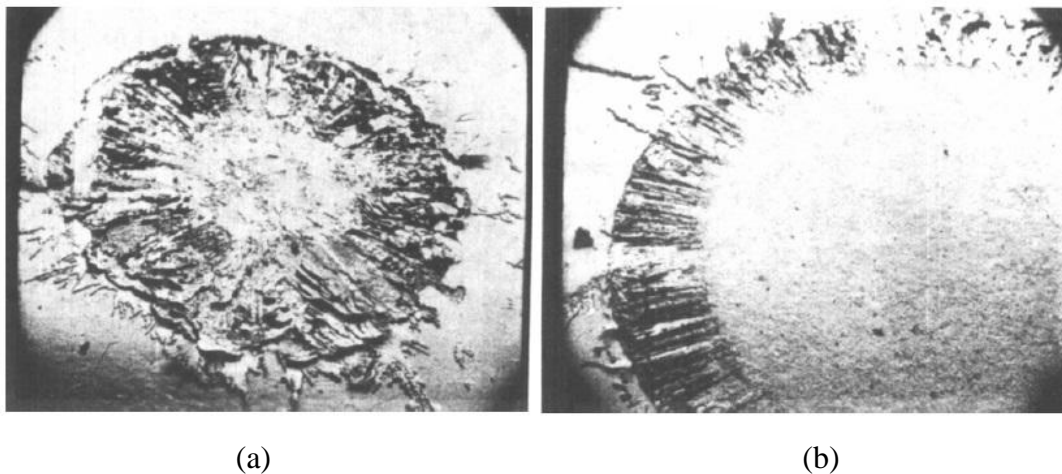


Figura 2.27 - Remoção do zinco na interface das chapas para uma mesma corrente. (a) após 2 ciclos, (b) após 7 ciclos Fonte: Gedeon & Eagar (1986^a).

Observa-se nas macrografias que o zinco quando fundido, é empurrado para fora da zona de contato, pela força exercida pelos eletrodos, formando uma espécie de auréola. Esta por sua vez forma um selo de zinco ao redor da zona de contato que ajuda na retenção da poça de fusão durante a solda. Recentemente, Nascimento (2008) também observou este acúmulo de zinco ao redor da zona de contato nas interfaces. Gedeon & Eagar (1986^a) avaliaram a fusão do zinco e todo processo de soldagem em cima dos sinais de deslocamento do eletrodo caracterizado pela *Figura 2.28*.

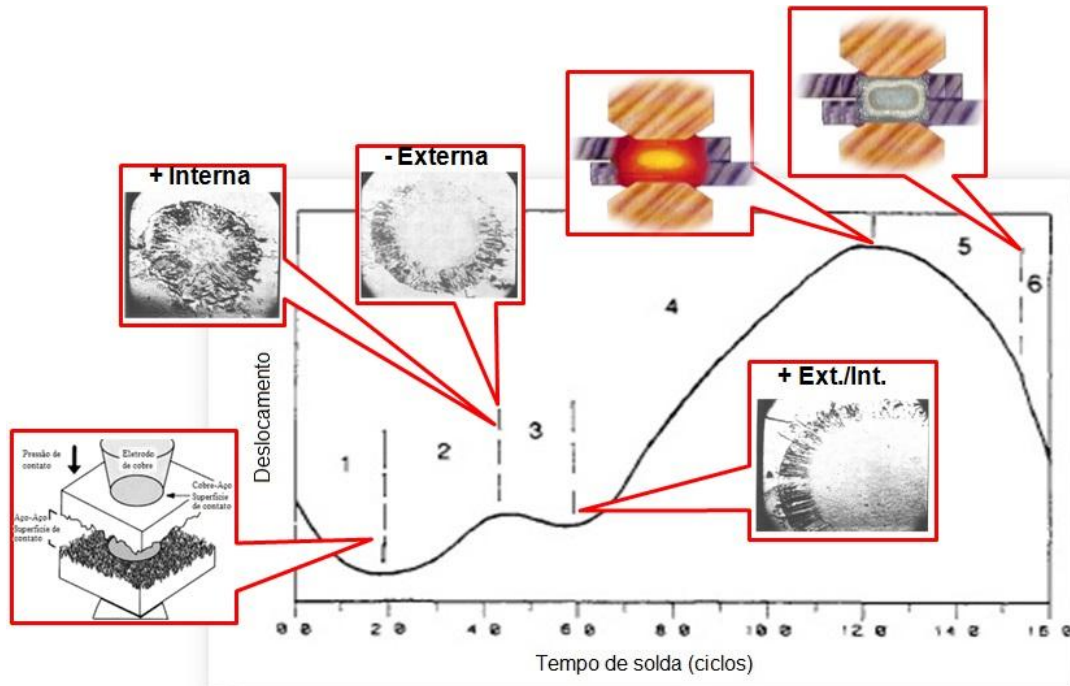


Figura 2.28 - Curva de deslocamento do eletrodo. Adaptado de: Gedeon & Eagar (1986^a).

O gráfico presente na **Figura 2.28** foi dividido em seis fases que compõem todo o processo de soldagem para aço revestido com zinco. Na 1ª fase, observa-se o achatamento das asperezas, na superfície do material, pela aplicação da pré-pressão. Na 2ª fase, ocorre a expansão térmica com maior intensidade da camada de zinco em comparação ao material base. Na 3ª fase, a camada de zinco torna-se líquida e afasta da zona de contato dos eletrodos rapidamente. Na 4ª fase, o zinco já não existe mais, o preaquecimento sai de cena e a corrente de solda é liberada. Observa-se um grande deslocamento do eletrodo pelo alto aporte térmico liberado. Na 5ª fase, observa-se que o aço ao tornar-se macio pelo alto aquecimento, à força do eletrodo vence sua rigidez e o deslocamento começará a decrescer, formando a indentação no ponto de solda. Deste momento em diante torna-se eminente à possibilidade de ocorrer uma expulsão para altos níveis de corrente e tempo (o que não é desejado), ou baixos níveis de pressão do eletrodo que contribui para o aumento da resistência de contato, fato detectado pelo rápido declínio no deslocamento (CHUNTÃO & LINPENG, 2010; Jou 2003). Ma *et al.* (2006) observou que quando a expulsão ocorre, outros métodos não destrutivos, além do deslocamento do eletrodo como resistência dinâmica e força também apresentam queda súbita. Na 6ª fase, sendo a corrente desligada, o material vai esfriar rapidamente e a curva de deslocamento cairá. O deslocamento final será sempre inferior ao inicial devido ao recuo dos

eletrodos (GEDEON & EAGAR, 1986^a). Jou (2003) observou que quanto maior o aporte térmico imposto ao material, mais acentuada é a inclinação da curva de deslocamento do eletrodo, que de certa forma, se mostra bem sensível a variação de calor aplicado. Entende-se, portanto, que pode haver a expulsão de material caracterizado pela linha pontilhada conforme mostrado pela **Figura 2.29**.

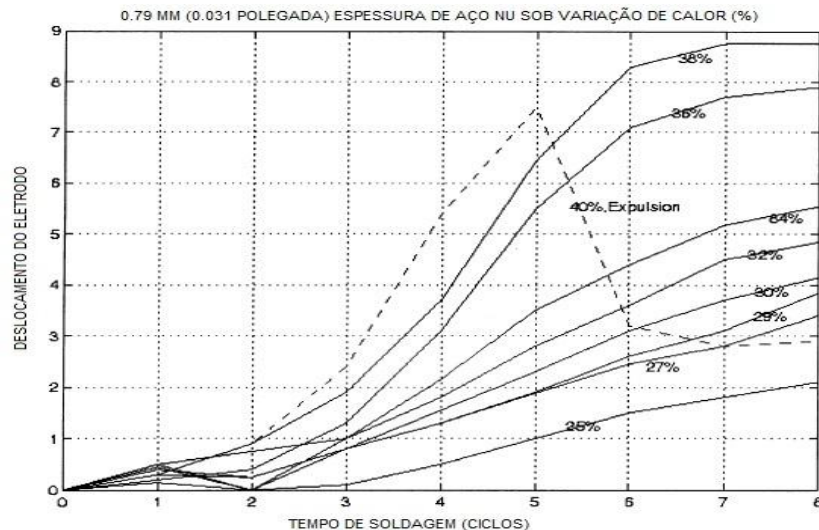


Figura 2.29 - Curva de deslocamento do eletrodo. Adaptado de: Jou (2003).

Neste contexto, há dúvidas sobre a possibilidade de existência de limites superiores e inferiores, denominado envelope de parâmetros por Nascimento (2008), em que, dentro destes, haja uma adequada remoção do zinco e um crescimento do ponto de solda satisfatório. Em razão disto, autores como Jou (2003) e Amaral (2011) trabalharam neste contexto.

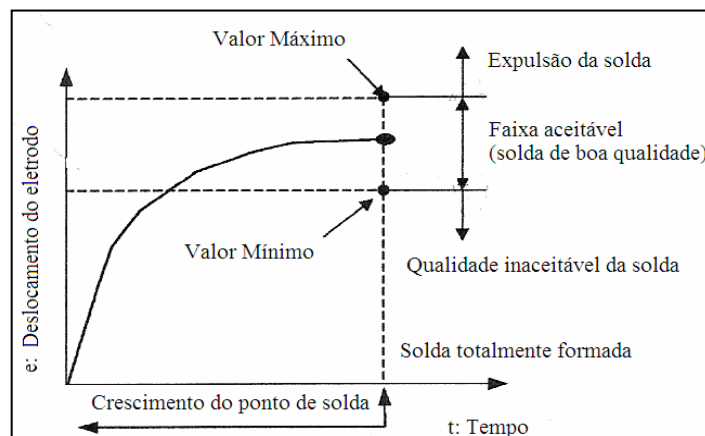


Figura 2.30 - Deslocamento do eletrodo para uma solda de qualidade. Jou (2003).

Na **Figura 2.30** observa-se que é possível determinar parâmetros limites da curva de deslocamento do eletrodo e que dentro destes, seja possível se obter um ponto de solda o qual obedece aos padrões de qualidade. Em seu estudo, Jou (2003), também observou que a curva do deslocamento do eletrodo apresenta variações para os mesmos parâmetros, quando utilizados:

- eletrodos novos e usados,
- superfícies contaminadas com óleos e graxas,
- diferentes peças mas com os mesmos parâmetros,
- diferentes tipos de revestimentos,
- diferentes tipos de metal base.

Assim, pode-se dizer que o deslocamento do eletrodo apresenta variação em diversos sentidos e sua avaliação deve ser feita com critério. A aplicabilidade, portanto, deste método, na indústria, foi questionada por alguns autores devido a complicações que podem ser encontradas dependendo do tipo de equipamento utilizado para ler e transmitir o deslocamento do eletrodo (LING *et al.*, 2009). Pesquisas recentes, porém, descritas anteriormente, revelam ser um método não destrutivo confiável para avaliar a qualidade do ponto de solda, no momento em que ocorre, razão pela qual será utilizado como base no desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

2.5.2.1. Classificação das pesquisas quanto à data de publicação

Uma pesquisa nas principais bases de dados, envolvendo publicações científicas, foi realizada com o objetivo de se fazer um levantamento das publicações em RSW que utilizam o método do deslocamento do eletrodo como avaliador da qualidade da solda. Neste contexto, na busca pelos trabalhos, utilizou-se expressão “*electrode displacement in resistance spot welding*”, definida como palavras-chave ou palavras contidas nos títulos dos artigos. Entre artigos e dissertações abordando o tema, em análise a estas pesquisas classificaram-se os trabalhos quanto à data de publicação cujos maiores detalhes encontram-se abaixo. A **Figura 2.31** apresenta a classificação das pesquisas anteriores quanto ao período de publicação.

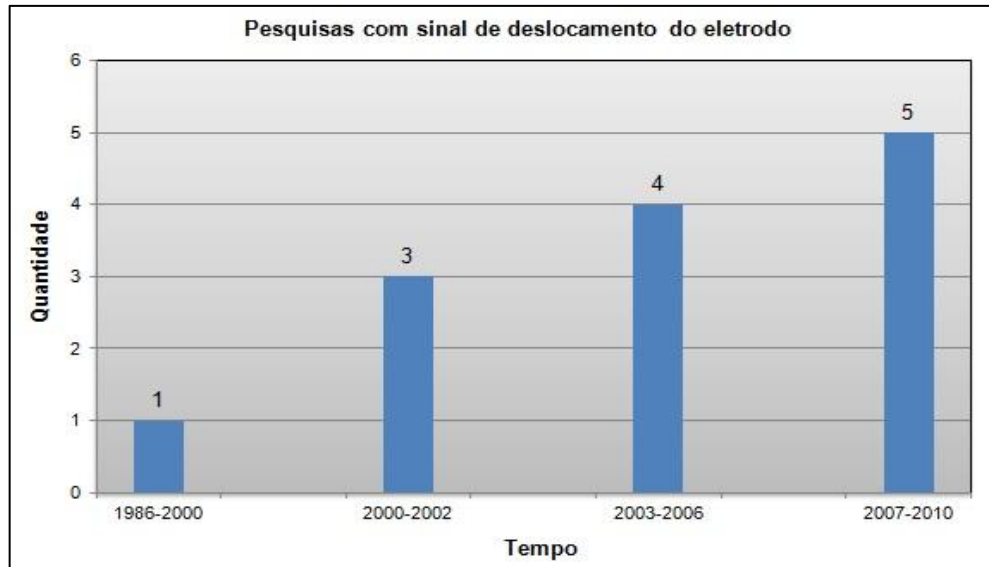


Figura 2.31 - Publicações abordando o método de deslocamento do eletrodo.

Observa-se que o número de publicações abordando o método de deslocamento do eletrodo vem crescendo nos últimos anos. Este fato pode ser devido ao desenvolvimento tecnológico que permitiu o desenvolvimento de equipamentos eletrônicos de pequeno porte, porém robustos para aplicações industriais. Conseqüentemente, o aumento do interesse industrial também aumenta a necessidade por investigações científicas que permitam melhor compreender os fenômenos que envolvem o respectivo método. Por outro lado, esta constatação vai de encontro ao que se expôs anteriormente, em se tratando do fato de que o método teria sua aplicabilidade questionada pela indústria (LING *et al.*, 2009). Considerando que Gedeon & Eagar (1986^a) utilizaram o sinal de deslocamento do eletrodo para complementar as análises realizadas com relação à resistência dinâmica, pode-se dizer que, na condição de avaliador da qualidade do processo RSW, o método do deslocamento do eletrodo tem sido analisado como uma linha de pesquisa de relevância científica.

2.6. Planejamento e Análise de Experimentos

Os processos de planejamento e análise de experimentos (DOE) são utilizados para otimizar os parâmetros de qualidade e processo, bem como os recursos de uma empresa. Segundo Konda *et al.* (1999), o meio industrial utiliza esta técnica para a resolução de seus problemas e para melhorar a dispersão existente. A utilização do método DOE está na

necessidade de se estudar simultaneamente o efeito dos fatores, bem como de suas interações, com diferentes níveis de regulagens.

2.6.1. Início do planejamento do projeto de experimentos

Os métodos estatísticos baseados no projeto e análise de experimentos têm sido largamente utilizados na análise de influência dos principais parâmetros bem como na otimização das soldagens a ponto. Para iniciar o planejamento, alguns passos devem ser seguidos visando garantir a confiabilidade das análises.

1. Definição do objetivo do experimento;
2. Seleção da resposta;
3. Seleção dos parâmetros do processo;
4. Determinação dos níveis de cada fator;
5. Escolha do projeto de experimento adequado;
6. Planejamento do experimento que consiste em selecionar a matriz experimental com os fatores e níveis escolhidos;
7. Execução;
8. Análise e interpretação dos resultados.

Uma vez selecionados os fatores e seus respectivos níveis, gera-se uma combinação desses fatores sob a forma de arranjos experimentais. Um resumo das principais ferramentas utilizadas no planejamento de experimentos é mostrado no *Quadro 2.1*.

O arranjo mais comum é o fatorial completo, para o qual o número de experimentos é igual ao número de níveis experimentais, elevado ao número de fatores. Fatoriais completos cobrem todo o espaço experimental. Entretanto, devido ao seu crescimento exponencial, arranjos com grande número de fatores podem tornar um processo de experimentação inviável. Para esses casos se houver pouco interesse nas interações, pode-se negligenciá-las, gerando-se frações do experimento completo sem comprometer, entretanto, a detecção da presença de fatores influentes (MONTGOMERY & RUNGER, 2003).

Quadro 2.1 - Características fundamentais do Projeto e Análise de Experimentos.

Projeto experimental	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Fatorial Completo 2^k	Permite a varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis.	Não identifica variação intermediária, pois só trabalha em dois níveis (-1,+1). Necessita de um alto número de corridas para problemas com grande número de parâmetros.	Processos em que já se tem um prévio domínio e onde a realização das corridas não demandam maior tempo ou custo
Fatorial Fracionado $2^{(k-1)}$	Permite uma pré-análise do processo com um número reduzido de corridas.	Não promove a varredura completa da região experimental.	Processos onde se deseja um pré-conhecimento e onde a literatura é limitada. Corridas que demandam maior tempo ou custo
Taguchi	Permite a análise de um processo com muitos parâmetros de entrada com um número extremamente reduzido de experimentos.	Fornecer uma ideia do processo, porém pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis.	Processos onde há pouco ou quase nenhum conhecimento prévio de comportamento. Processos com alta dispersão ou que as corridas demandem alto custo ou tempo
Metodologia de Superfície de Resposta	Permite a verificação de variações intermediárias do processo	Pode apresentar erros na extrapolação dos pontos estrela, já que são realizadas poucas corridas nestes níveis.	Otimização de processos, principalmente bem conhecidos e com baixa dispersão.

Fonte: Adaptado de NILO JÚNIOR (2003).

2.6.2. Arranjo Fatorial e Superfície de Resposta

A metodologia de superfície de resposta (MSR) é um agrupamento de ferramentas matemáticas e estatísticas para avaliar a influência entre as respostas e os parâmetros, com objetivo de otimizar essas respostas. Neste contexto na grande maioria dos problemas de MSR, não se conhece a relação entre os fatores de entrada e saída. Desta forma, um fatorial fracionado deve ser escolhido com o objetivo de determinar os parâmetros mais influentes no processo. Em seguida em cima dos resultados obtidos, um arranjo fatorial completo é gerado com o intuito de determinar se existe curvatura para as respostas escolhidas. Esta relação deve ser aproximada usando, geralmente, polinômios de primeira ordem mostrado na **Equação 2.5**.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2.5)$$

Onde: y – Resposta de interesse; x_i – Parâmetros independentes; β_i – Coeficientes a serem estimados; k – Número de parâmetros independentes; ε – Erro experimental.

Caso a curvatura se confirme, os pontos axiais podem ser inseridos no arranjo e, um polinômio de segunda ordem (MONTGOMERY, 2005; MYERS, 2009) pode ser utilizado conforme mostrado na **Equação 2.6**.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.6)$$

Na escolha do arranjo experimental, o arranjo mais comum é o CCD (CCD - Central Composite Design), podendo utilizar um fatorial completo ou fracionado. O CCD pode ser: circunscrito (CCC), inscrito (CCI) e de face centrada (CCF), conforme caracterizado na **Figura 2.32**. O arranjo CCC corresponde ao CCD original, e explora o maior espaço experimental possível, por este motivo, este arranjo é o mais adequado para o experimento requerido, para tanto, será utilizado neste trabalho. Já o arranjo CCI é indicado quando os limites conhecidos não podem ser ultrapassados. Finalmente o arranjo CCF têm seus pontos axiais sobre o centro de cada face do espaço fatorial.

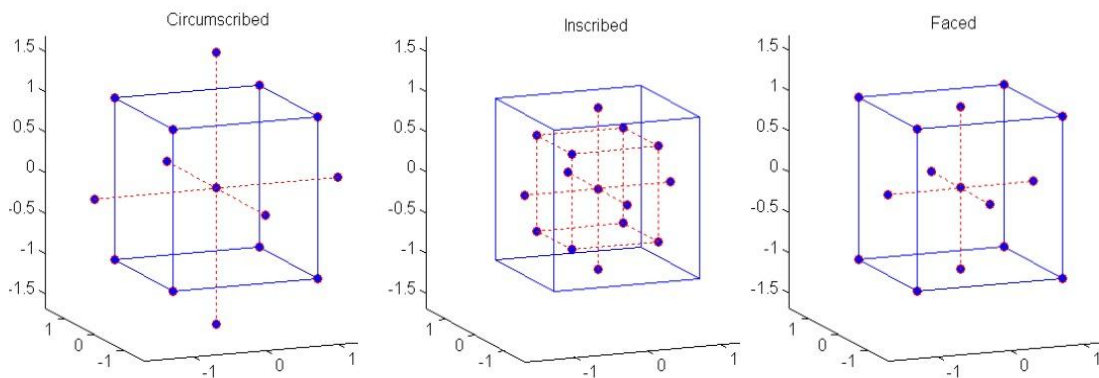


Figura 2.32 - Tipos de arranjos experimentais ortogonais. Fonte: Prasad *et al.* (2012).

Para avaliar a significância do modelo escolhido como também quais entre os termos do modelo são significativos e quais podem ser removidos utiliza-se a ANOVA. O ajuste dos modelos é representado pelo coeficiente de determinação (R^2), que representa o percentual de variação na resposta explicada pelo modelo construído. Quanto maior o valor de R^2 mais explicativa é o modelo, melhor o modelo se ajusta a amostra. Neste contexto, outras análises também são importantes como o teste de falta de ajuste (Lack-of-fit > 0,05) e a análise de

resíduos que segundo Montgomery (2005), devem ser normais, aleatórios e não correlacionados.

Pela sua natureza multivariável e múltiplas respostas envolvidas, os métodos de otimização baseados na utilização da Função *Desirability*, MSR (DARWISH & AL-DEKHAL, 1999), Erros Quadráticos Médios Multivariados (EQMM), algoritmos genéticos, entre outros, tem sido citados na literatura como se pode ver nos trabalhos de Amaral (2011), Darwish & Al-Dekhial (1999), Tseng (2005), entre outros.

Todavia com o intuito de avaliar as potencialidades existentes das combinações estatísticas permissíveis para este trabalho de pesquisa e, também por se tratar de um projeto de múltiplas respostas, foi escolhido o método de otimização baseado na Função *Desirability*. Este método tem a capacidade de avaliar um conjunto das respostas escolhidas de forma simultânea, fato este, que permite determinar os parâmetros otimizados, sendo um dos primeiros métodos propostos na otimização de múltiplas respostas. Desta forma, utilizando o *software MINITAB®* na função Response Optimizer tem-se à opção de selecionar os parâmetros limites das respostas (y). Assim, os parâmetros do modelo (x) podem ser estimados com eficácia. Para tanto dependendo da aplicação do experimento, há três tipos de respostas desejáveis: quanto maior, melhor (Maximização); quanto menor, melhor (Minimização) e quanto mais no alvo, melhor (Target).

Por meio da combinação dos valores d_i , encontra-se o D global, conforme observa-se na **Equação 2.7**.

$$D = [d_1(Y_1) \times d_2(Y_2) \times \dots \times d_k(Y_k)]^{\frac{1}{k}} \quad (2.7)$$

Neste contexto o índice global D está contido no intervalo [0;1] e quanto mais próximo D estiver de 1 mais próximas às respostas estão do valor especificado. Já Y corresponde ao valor ajustado da resposta. O ponto de ótimo é alcançado pela maximização da média geométrica (**Equação 2.7**) calculada por meio de funções *Desirability* individuais.

Capítulo 3

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo descreve todas as etapas do procedimento experimental realizadas tais como adaptação do banco de ensaios, conjugadas com a utilização de um sensor de deslocamento indutivo para avaliação do deslocamento dos eletrodos durante o período de preaquecimento e soldagem. Este capítulo descreve também os materiais e equipamentos utilizados e o planejamento experimental desenvolvido para avaliação da influência dos parâmetros do processo de solda a ponto aplicado em soldagens de chapas de aço galvanizados AISI 1006. Para se atingir os objetivos estabelecidos, este trabalho se dividirá em três etapas distintas. Vale ressaltar que o ponto crucial do processo de solda a ponto de aço galvanizados se refere à quebra da camada de zinco.

Em sua primeira etapa, este trabalho procurou validar uma metodologia baseada em um sensor de deslocamento para caracterizar a ação de quebra da camada de zinco, considerando para isto informações descritas em Gedeon & Eagar (1986^a). Estabelecida a metodologia para caracterização da quebra da camada de zinco, a segunda etapa do trabalho pretende avaliar a influência dos parâmetros na pré-fase (dita preaquecimento) sua eficiência na remoção da camada de zinco combinada com condições adequadas na fase de soldagem, de tal forma a desenvolver um envelope operacional para ajuste dos parâmetros influentes da fase do preaquecimento. Nesta etapa as condições de soldagem adotadas tiveram como base o trabalho desenvolvido por Amaral (2001). Na terceira etapa, foi utilizado um método estatístico baseado no DOE para o desenvolvimento de uma superfície de resposta que avalie

a influência dos parâmetros de preaquecimento e de soldagem na resistência ao cisalhamento, deformação da solda e indentação, buscando estabelecer condições otimizadas, bem como o desenvolvimento de superfícies de contorno para regulagem dos parâmetros. Sendo assim a **Figura 3.1** apresenta um fluxograma que resume todas as principais etapas desta metodologia científica.

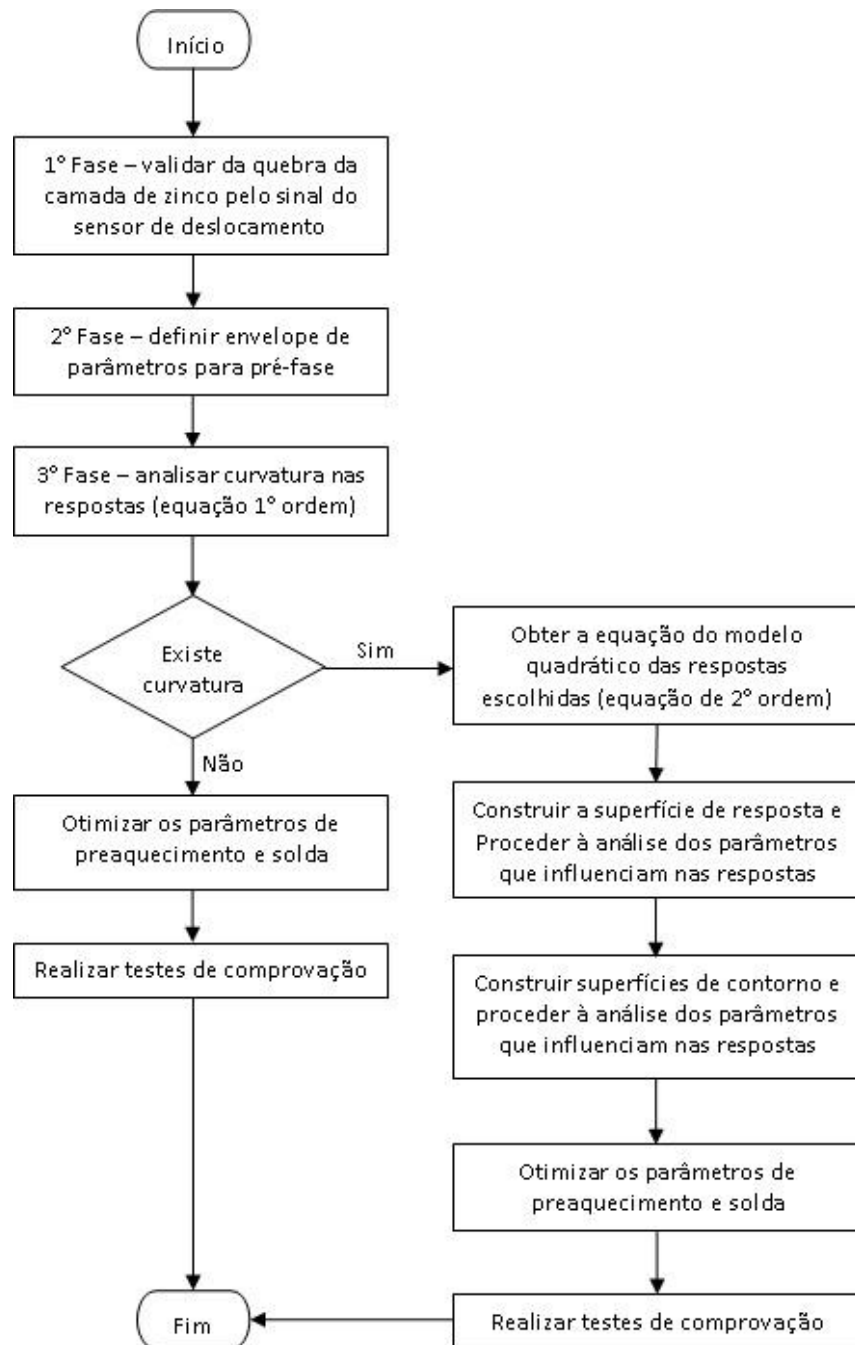
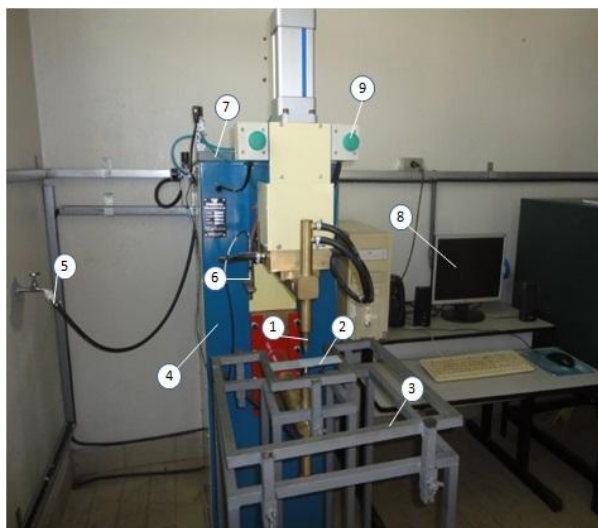


Figura 3.1 – Procedimento para realização da etapa experimental

3.1. Banco de ensaios, materiais e equipamentos utilizados

Para o desenvolvimento deste trabalho, todos as soldas foram realizados no Laboratório de Soldagem – LSO da Unifei, em uma máquina de solda a ponto estacionária marca Presol Transweld®, modelo TWPRV50, com potência nominal de 50 kVA, CA, alimentação de 220V e corrente máxima de 6kA, cujos detalhes de seus principais acessórios são mostrados na **Figura 3.2**. Este equipamento possui a capacidade de ajuste de 15 parâmetros diferentes, durante execução das soldagens, permitindo assim, isolar as diferentes etapas da soldagem. Caso se queira executar apenas a fase referente ao preaquecimento em uma solda, bastará fixar-se o ciclo de preaquecimento e corrente de preaquecimento, mantendo-se todos os parâmetros pós este ciclo com valores zero. Esta possibilidade de ajuste se mostrou fundamental no desenvolvimento da 1ª e 2ª etapas do trabalho.



1. Eletrodo
2. Corpo de prova
3. Dispositivo para fixar o corpo de prova
4. Estacionária Presol TWPRV50 6kA
5. Água de refrigeração
6. Sensor LVDT Metrolog
7. Condicionador digital Metrolog SD 20
8. Interface
9. Botão de acionamento pneumático

Figura 3.2 - Equipamento de soldagem RSW utilizado.

Acoplado ao equipamento de soldagem a ponto, foi utilizado um transdutor diferencial de deslocamento linear (LVDT), modelo GA-HD LBB315PA-100-M, fabricante *Metrolog*®, 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. O sensor do sistema de medição foi adaptado ao cabeçote móvel da máquina de solda. Este por sua vez está conectado ao cilindro pneumático que efetua o movimento do eletrodo superior. O ajuste da referência do sensor se dá por um parafuso sextavado de cabeça chata que está fixado em uma base parafusada na parte fixa da carcaça da máquina de solda conforme é mostrado na **Figura 3.3**. O deslocamento linear do transdutor é medido por meio de uma interface composta por um sistema de aquisição dos dados composto por um condicionador digital *Metrolog*®, modelo SD20 com saída USB para aplicação com sensores LVDT e conversor A/D 24-bits.



Figura 3.3 - Acoplamento do sensor LVDT ao cabeçote móvel.

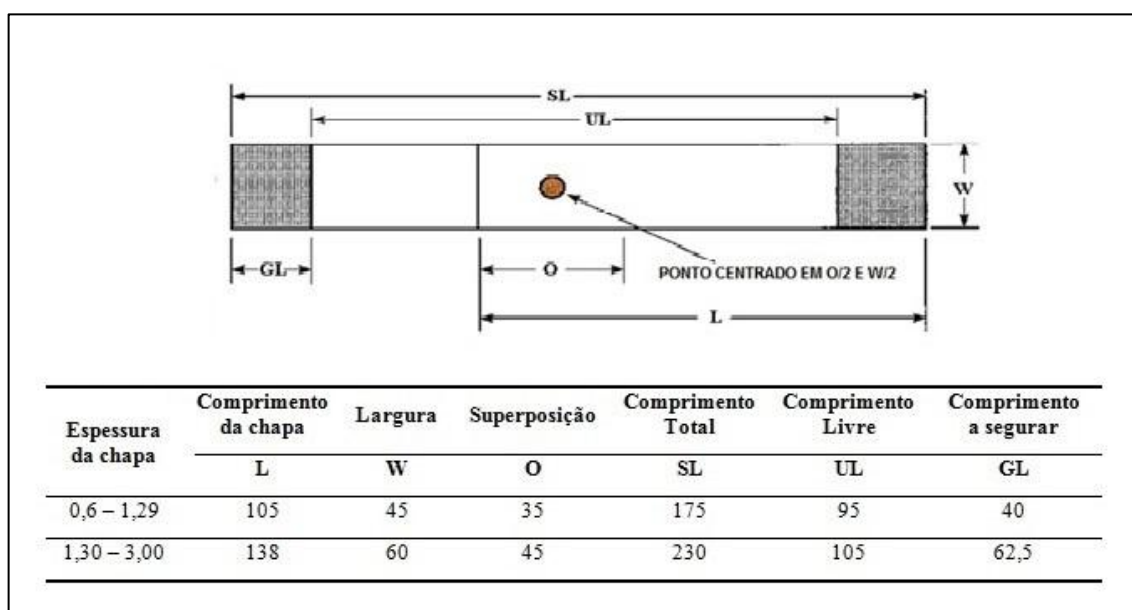
Os corpos de prova utilizados neste estudo foram constituídos de chapas de aço carbono AISI 1006 galvanizados por eletrodeposição e com espessura de 1 mm, laminada a frio. A **Tabela 3.1** mostra a composição química do material utilizado. O **Quadro 3.1** mostra as especificações dimensionais dos corpos de prova para análises em aplicações utilizando RSW.

Tabela 3.1 – Composição química do aço utilizado.

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

Fonte: Usiminas, 2010

Quadro 3.1 - Especificações dimensionais dos corpos de prova. Valores em (mm). Fonte: AWS (2002) Modificada.



Para a realização dos testes, os corpos de prova foram cortados nas dimensões 105 x 45 mm (*Figura 3.4*) e, posteriormente limpos de impurezas e óleos e dispostos para a soldagem, seguindo recomendações da norma AWS/SAE 8.9M (2002).

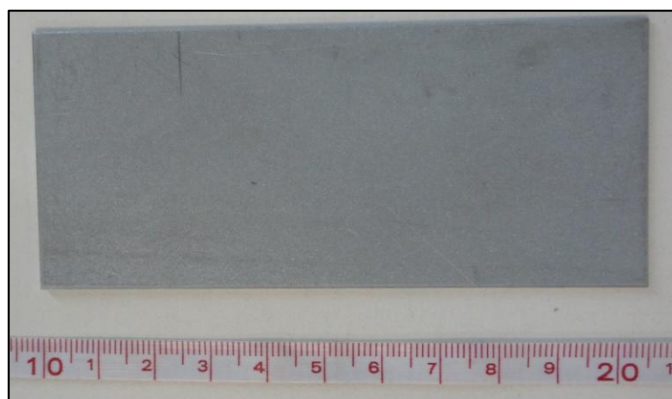


Figura 3.4 - Chapa de aço AISI 1006 galvanizado

A **Figura 3.5** mostra a disposição do sistema de interface com o *software* de parametrização e visualização on-line do deslocamento do eletrodo na tela de um computador.

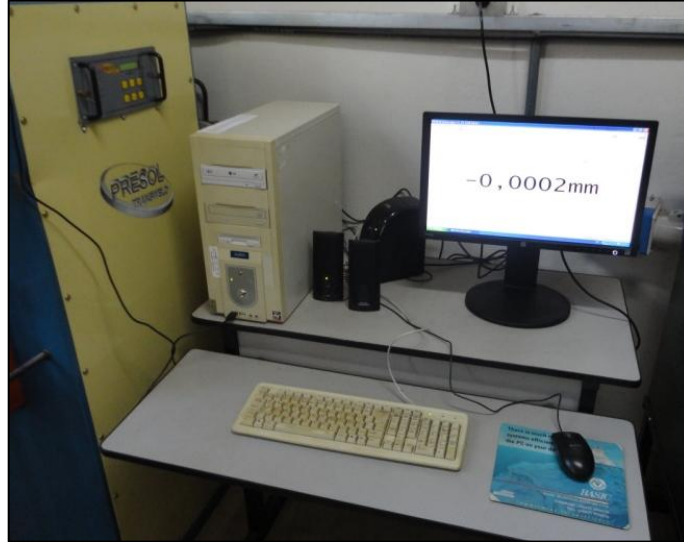


Figura 3.5 - Interface de leitura do deslocamento do eletrodo.

Para o desenvolvimento dos trabalhos foram utilizados eletrodos de cobre cromo zircônio, Grupo A, classe 2, com formato cone truncado a 15° , com diâmetro da ponta de 5mm, diâmetro do corpo $5/8''$ e comprimento total de 70 mm, conforme **Figura 3.6**. Os eletrodos, para atingir um desempenho adequado, necessitam ser refrigerados para evitar a sua degradação sendo este um procedimento fundamental, recomendado por fabricantes, a ser checado antes da realização das soldagens.

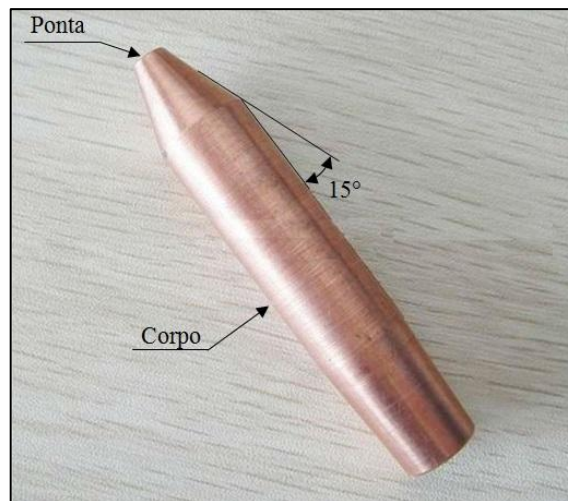


Figura 3.6 - Eletrodo utilizado no experimento.

Uma vazão mínima de água de refrigeração de 5,0 l/min (TECNOWELDING, 2004) por eletrodo foi garantida antes do início dos experimentos. Foi também utilizada uma distância máxima de 4,5 a 6,5 mm entre a ponta do tubo interno de refrigeração e o fundo do eletrodo, conforme recomendações e detalhes já mostrados na **Figura 2.13**. Dependendo da etapa de desenvolvimento do trabalho, após a soldagem os corpos de prova foram submetidos ao teste de cisalhamento para avaliar a resistência máxima de ruptura, bem como a deformação nesta condição. Tal procedimento foi realizado no Laboratório de Ensaios Destrutivos da UNIFEI, por meio da utilização de uma máquina de tração EmicDL2000®, cujos detalhes da montagem e medições são mostrados na **Figura 3.7**. Uma célula de carga de 500 kg foi adaptada na máquina utilizada para o experimento.

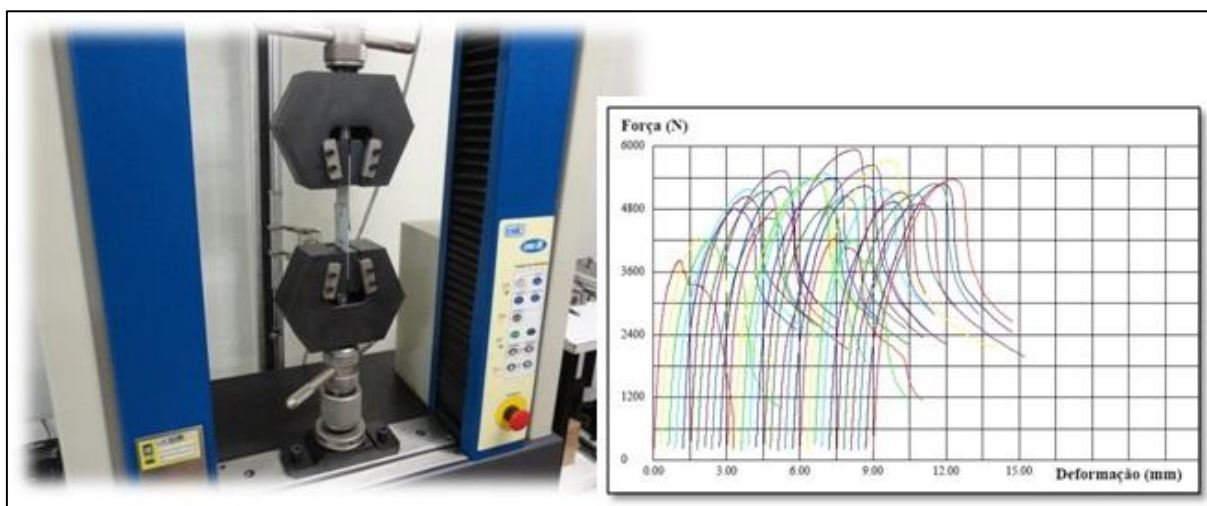


Figura 3.7 - Realização do ensaio de ruptura nos corpos de prova.

Para a caracterização geométrica dos pontos de solda foi avaliada a indentação sofrida pelo mesmo após o ciclo da solda, visto ser esta uma resposta fundamental adotada nos meios industriais como fator de aceitação da solda. Esta medição foi realizada de duas formas distintas. Na primeira forma, conforme detalhado na **Figura 3.8**, utilizou-se um relógio apalpador analógico Mitutoyo com resolução de 0,01 mm, juntamente com 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.

Na segunda forma de avaliação, foi utilizado o sensor LVDT (**Figura 3.3**) cujo deslocamento aquisitado durante realização do ponto de solda permitiu determinar a indentação pela verificação do deslocamento entre o último ponto mais profundo e o primeiro

vale do gráfico de deslocamento do eletrodo. Ainda com relação ao aspecto geométrico do ponto soldado, procurou-se também determinar o seu diâmetro após o teste de cisalhamento conforme procedimento mostrado na *Figura 2.21*.

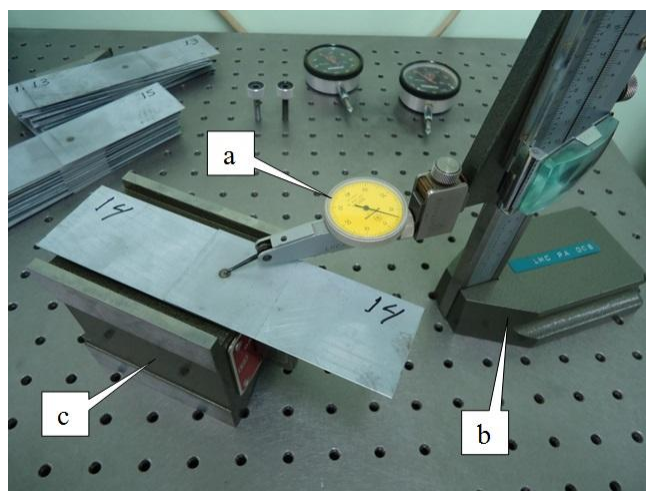


Figura 3.8 - Medição da indentação da solda.(a) Relógio apalpador, (b) Traçador de altura, (c) Bloco magnético.

3.2. Parametrização da máquina de solda

Como afirmado anteriormente, o equipamento utilizado permite a regulação de 15 parâmetros independentes como mostrado na *Tabela 3.2*. Em função das diferentes etapas do trabalho, e conseqüentemente de seus objetivos, cada etapa apresentou uma configuração de ajuste diferente os quais serão descritos a seguir.

Tabela 3.2 - Parâmetros reguláveis no equipamento de solda ponto.

Pré-pressão 1.	Corrente solda.	Pós-pressão.
Pré-pressão 2.	Intervalo.	Impulsos.
Ciclo de Preaquecimento.	Resfriamento.	Subida da corrente.
Corrente de aquecimento.	Ciclo revenimento.	Descida da corrente.
Solda ciclo.	Corrente revenimento.	Pressão da rede de ar comprimido

3.3. Primeira etapa: Validação da quebra da camada de zinco pelo sinal de um sensor de deslocamento.

Nesta 1ª etapa objetivou-se a validação de um método como indicador da qualidade da remoção da camada de zinco (também denominado como *burn-zinc*). Procurou-se nesta etapa validar uma metodologia baseada no deslocamento do eletrodo conforme descrito em Gedeon & Eagar (1986) considerando para isto apenas a fase de preaquecimento. Para estes testes, os eletrodos foram usinados antes das soldagens sem a realização de um procedimento de “amaciamento”. Nesta etapa foram realizados 10 experimentos de simulação física para o diâmetro da superfície de contato do eletrodo de 5 mm, variando de forma aleatória o tempo de preaquecimento (T_{preaq}) e corrente de preaquecimento (I_{preaq}) em condições diversas que permitissem verificar a reação do sensor ante as diferentes expansões térmicas coletadas. Os impulsos de solda se referem à subdivisão do tempo de aplicação da corrente ao final do tempo de retenção do eletrodo e, os mesmos, foram incluídos com o intuito de avaliar a sua influência na aplicação da corrente de preaquecimento. Assim também, foram incluídos os ciclos de subida de corrente, que é o intervalo que se leva para que a corrente atinja o valor programado. Após a realização dos experimentos, os parâmetros que apresentaram influência no preaquecimento foram utilizados na segunda etapa do experimento.

Para a primeira etapa, bem como nas demais, antes da realização das soldagens foram feitos os procedimentos de calibração do sistema do sistema de deslocamento do eletrodo conforme recomendações do fabricante *Metrolog*® e demais ajustes do modo de aquisição (**Figura 3.9**).

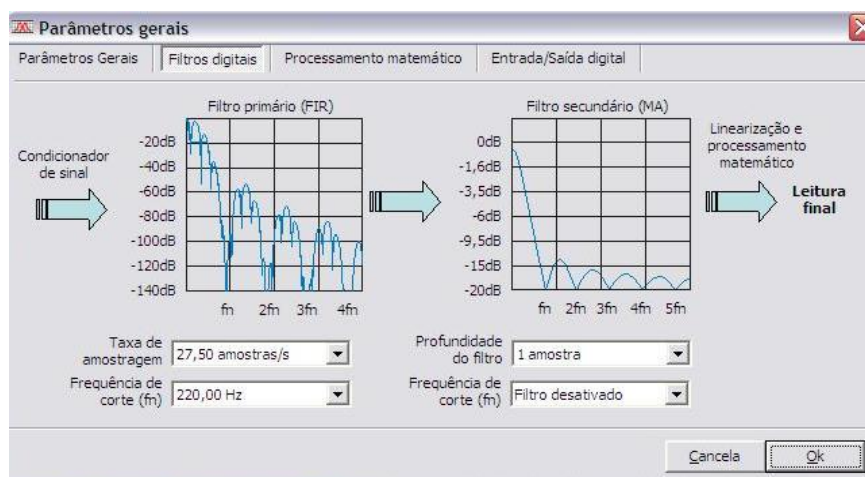


Figura 3.9 - Critério de ajuste para os filtros e amostragem.

Após estes procedimentos as aquisições serão realizadas e dados referentes aos sinais de deslocamento por unidade de tempo serão gravados e, posteriormente, processados para análises pelo *Excel* que é um aplicativo do pacote *Microsoft Office*. Em todos os experimentos foi utilizado um tempo de aquisição de 10 s com uma taxa de amostragem de 27,5 amostras/s.

3.4. Segunda etapa: Desenvolvimento de um envelope operacional.

Após a validação da confiabilidade do método, inicia-se a segunda etapa dos experimentos. Nesta etapa, procurou-se aprofundar as análises da influência dos parâmetros na limpeza da camada de zinco utilizando para tanto o monitoramento do deslocamento do eletrodo como forma de caracterização desta remoção. Como também, as influências dos parâmetros do tempo de preaquecimento e sua intensidade, na fase de soldagem e, na resistência e na indentação da solda realizada, complementando os estudos desenvolvidos por Amaral (2011). Este autor avaliou a influência dos principais parâmetros de solda por meio de métodos estatísticos baseados no DOE, e considerando a corrente máxima do equipamento de soldagem igual a 6kA, o autor conseguiu atingir uma região de ótimo definido pela seguinte condição de soldagem: corrente de solda: 88 %kA da corrente máxima do equipamento de soldagem; tempo de solda: 11 ciclos; pressão dos eletrodos: 4,3 bar; preaquecimento: 9 ciclos a 50 %kA da corrente máxima do equipamento de soldagem. Entretanto, em seus estudos, a fase da solda relativa ao preaquecimento foi de certa forma, negligenciada, visto haver uma combinação única tanto do ciclo de preaquecimento quanto do nível da corrente utilizada. No presente trabalho, esta fase foi mais bem explorada, visto ser a mesma de fundamental importância na qualidade final do ponto de solda, bem como ainda haver dúvidas quanto a este comportamento real dos parâmetros.

Para tanto, foram realizados vários experimentos de simulação física utilizando um diâmetro de superfície de contato do eletrodo de 5mm. Assim, considerando os resultados obtidos na primeira etapa, a corrente de preaquecimento foi variada em 5 níveis diferentes e, dentro de cada nível, também diferentes ciclos de preaquecimento foram testados. Procurou-se também, avaliar a influência do dito “amaciamento” dos eletrodos, após usinagem dos mesmos. Esta avaliação foi feita mediante a impressão da zona de contato do eletrodo no papel carbono, imediatamente após a usinagem, e após a realização do processo de “amaciamento”. O “amaciamento” se resume na realização de 30 a 50 pontos de solda

(Informativo, 1994; AZAMBUJA, 1987), com o eletrodo usinado. Para este “amacramento”, foram considerados os valores ótimos de soldagem encontrados por Amaral (2011). Neste contexto, foram criados envelopes operacionais, que permitiram avaliar dinamicamente a movimentação do eletrodo, com e sem “amacramento”, em comparação aos limites de remoção estabelecidos pelos padrões visuais na primeira etapa do experimento.

3.5. Terceira etapa: Análise da influência dos parâmetros de preaquecimento e soldagem e as condições otimizadas.

Para a terceira etapa dos experimentos, procurou-se, por meio de métodos estatísticos, avaliar a influência da variação dos parâmetros de corrente (I_{preaq} e I_{solda}) e o tempo (T_{preaq} e T_{solda}), bem como, a possibilidade de existência de curvatura nas respostas escolhidas que são a resistência à ruptura, a deformação na força máxima e a indentação. Esta etapa culminou com o estabelecimento de condições otimizadas, utilizando para este fim, um fatorial completo, uma superfície de resposta e o desenvolvimento de superfícies de contorno para regulagem dos parâmetros. A fixação dos níveis de trabalho foi feita com a análise das pesquisas anteriores (AMARAL, 2011), bem como os resultados obtidos nas etapas 1 e 2 anteriormente descritas. Assim, os testes preliminares foram realizados para estabelecer as condições extremas de cada variável. Finalmente, após alguns ajustes, chegou-se aos limites para as faixas de trabalho de cada parâmetro. Vale ressaltar, a importância da utilização de uma pós-pressão de 40 ciclos para obter uma melhor formação do ponto (SANTOS, 2006). Nesta terceira etapa tomou-se o cuidado de promover um “amacramento” dos eletrodos após a retificação dos mesmos.

3.6. Condução dos experimentos

Como descrito anteriormente, o trabalho todo foi dividido em três etapas. Antes do início de cada etapa, os eletrodos foram usinados para que suas dimensões voltassem ao formato original. Em seguida, foi feito o ajuste da base referencial do eletrodo (*Figura 3.2*). Esta medida se faz necessária, pois, a usinagem diminui o tamanho do eletrodo. Todavia, a

partir da segunda etapa o processo de “amaciamento” foi inserido nos experimentos. Também o alinhamento e centralização das faces de contato dos eletrodos foram garantidos, conforme descrito na **Figura 2.16**, evitando falhas na formação do ponto e desgaste prematuro dos eletrodos.

Capítulo 4

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo descreve os resultados obtidos em todas as etapas programadas, bem como procede às devidas análises dos resultados.

4.1. Validação da quebra da camada de zinco pelo sinal de um sensor de deslocamento

Conforme descrito no capítulo 2, Gedeon & Eagar (1986^a) afirmaram ser possível caracterizar fisicamente a remoção da camada de zinco baseada no deslocamento linear do eletrodo de cobre, antes da soldagem do ponto propriamente dita. Esta metodologia proposta foi neste trabalho explorada com o intuito de caracterizar esta mesma remoção, visto que nas indústrias, de forma geral, tais avaliações são via de regra, realizadas empiricamente. De posse de um aparato experimental constituído por um sensor LVDT e uma interface para aquisição de dados, conforme descritos no capítulo 3, esta metodologia foi avaliada e explorada em detalhes para poder caracterizar de forma mais aprofundada a etapa de remoção da camada de zinco e os efeitos dos parâmetros ciclo e intensidade de preaquecimento nesta remoção para o aço galvanizado aqui estudado. Esta caracterização é de fundamental importância, não apenas para a qualidade final do ponto de solda, mas também para a garantia

de uma maior vida dos eletrodos antes de uma reafiação. Para tanto, houve a necessidade de validar esta metodologia, o que será descrito na sequencia.

A validação do método se mostra pela comprovação da remoção da camada de zinco, indicada pelo deslocamento linear do eletrodo por unidade de tempo de aquisição. Desta forma, em função da variação dos parâmetros na fase de preaquecimento caracterizados pelo nível de corrente utilizado e número de ciclos ajustados no equipamento de soldagem, é possível caracterizar as etapas correspondentes à remoção da camada superficial de zinco na interface externa e na interface interna. Para a realização dos experimentos foram preparados dez corpos de prova com dimensões conforme recomendação da norma AWS (2002) e montagem de acordo com o mostrado no **Quadro 3.2**. O equipamento de soldagem foi ajustado para realizar a pré-pressão (aproximação das peças) em duas fases (4,5 bar, 30 ciclos) e execução apenas da etapa de preaquecimento, sem, contudo realizar a fase de soldagem do ponto, visto que o objetivo desta etapa ser a avaliação da limpeza da região a ser soldada. A **Tabela 4.1** mostra os testes realizados nesta segunda etapa

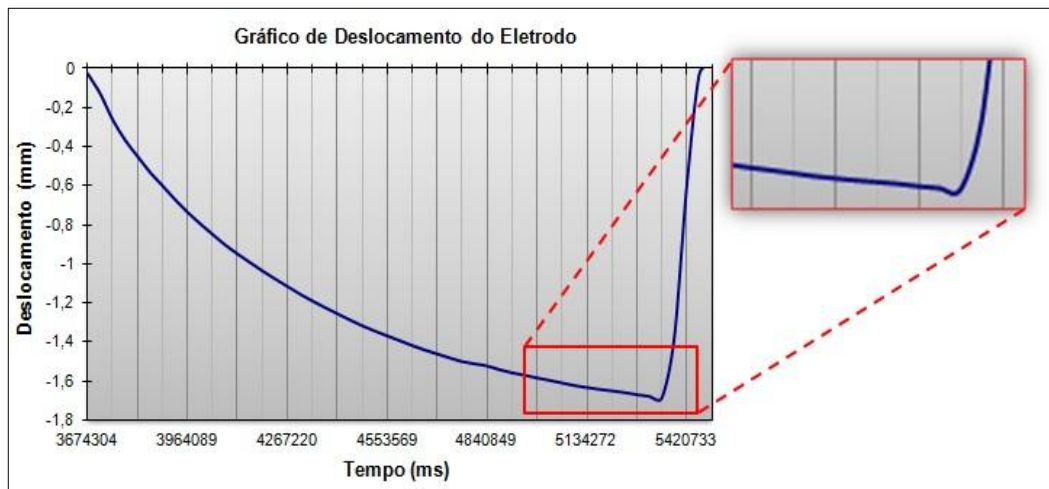
Tabela 4.1 - Valores programados no equipamento de soldagem e os resultados obtidos.

Teste	Ipreaq	Tpreaq	Queima do zinco	Impulsos	Subida da Corrente	Observações da Interface Interna	Observações da Interface Externa
	% kA	ciclos					
1	20	30	Não	1	0	Não removeu	Não removeu
2	50	30	Sim	1	0	Remoção Parcial	Não removeu
3	70	30	Sim	1	0	Remoção Ideal	Remoção Ideal
4	90	30	Sim	1	0	Solda	Solda
5	90	30	Sim	1	10	Solda	Solda
6	75	30	Sim	1	0	Remoção Excessiva	Remoção Excessiva
7	75	30	Sim	1	10	Remoção Excessiva	Remoção Excessiva
8	75	30	Sim	2	10	Remoção Excessiva	Remoção Excessiva
9	75	30	Sim	2	0	Remoção Excessiva	Remoção Excessiva
10	75	10	Sim	1	0	Remoção ideal	Remoção parcial

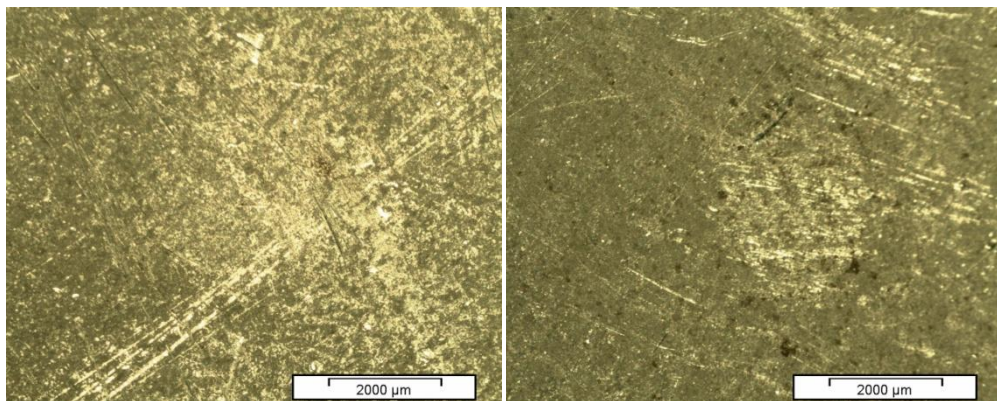
Nota: 6 kA = 100% da corrente.

À medida que os experimentos foram realizados, o nível da corrente de preaquecimento (Ipreaq) foi ampliado até atingir um limite mínimo onde ocorresse a remoção do zinco, considerando um nível de tempo de preaquecimento (Tpreaq) de 30 ciclos. Após esta etapa, a

corrente foi aumentada em escalas menores, procurando assim, encontrar uma condição satisfatória de remoção do zinco, e também o limite máximo, onde que, a partir dele, ocorre à fusão do aço propriamente dita. Observa-se na **Tabela 4.1** que, a variação na subida da corrente observada entre o teste 6 e o teste 7 não apresentou uma diferença significativa para a fase do preaquecimento. O mesmo ocorre entre o teste 8 e o teste 9 em que a variação nos impulsos também não apresentou grandes diferenças visuais na remoção do zinco. A **Figura 4.1** mostra o deslocamento do eletrodo no teste 1.



(a)



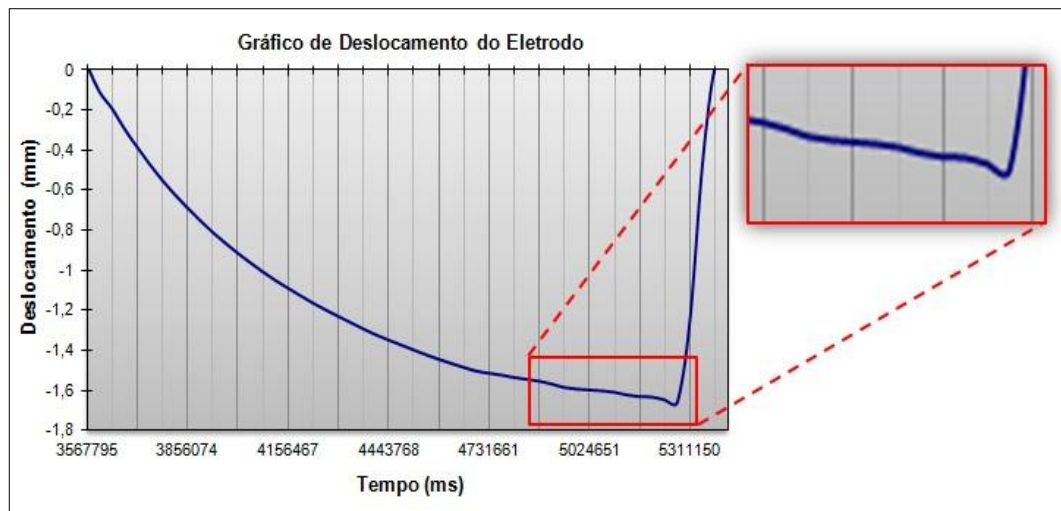
(b)

(c)

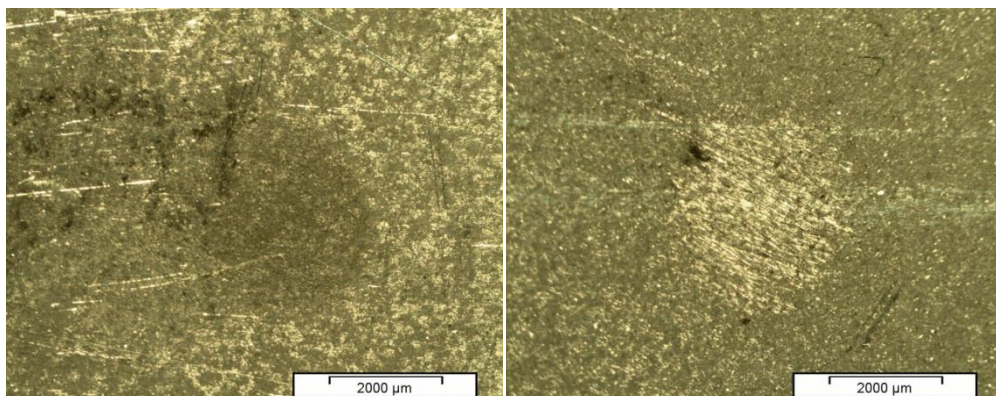
Figura 4.1 - Teste 1. (a) Deslocamento do eletrodo, (b) Interface Interna e (c) Interface Externa, considerando 20 %kA e 30 ciclos.

Nesta condição de preaquecimento não se observou nenhuma remoção da camada de zinco, fato este que pode ser retratado pelo gráfico sem a ocorrência de nenhuma perturbação

no comportamento do deslocamento do eletrodo. Desta forma, a zona de contato da **Figura 4.1(b)**, mostra uma queima insuficiente, mas sem remoção do zinco. Aumentando-se a corrente para 50% da corrente máxima e 30 ciclos (teste 2), observou-se um início de uma pequena remoção da camada de zinco na superfície interna, cujo deslocamento do eletrodo correspondente pode ser visto em detalhe na **Figura 4.2(a)**. Nota-se a presença de uma pequena oscilação que, conforme Gedeon & Eagar (1986), pode retratar o início da remoção da camada de zinco. Porém, os parâmetros de preaquecimento utilizados não foram satisfatórios para uma remoção aceitável do zinco (determinada pela formação da auréola de zinco ao redor da zona de contato chapa com chapa e eletrodo com chapa).



(a)

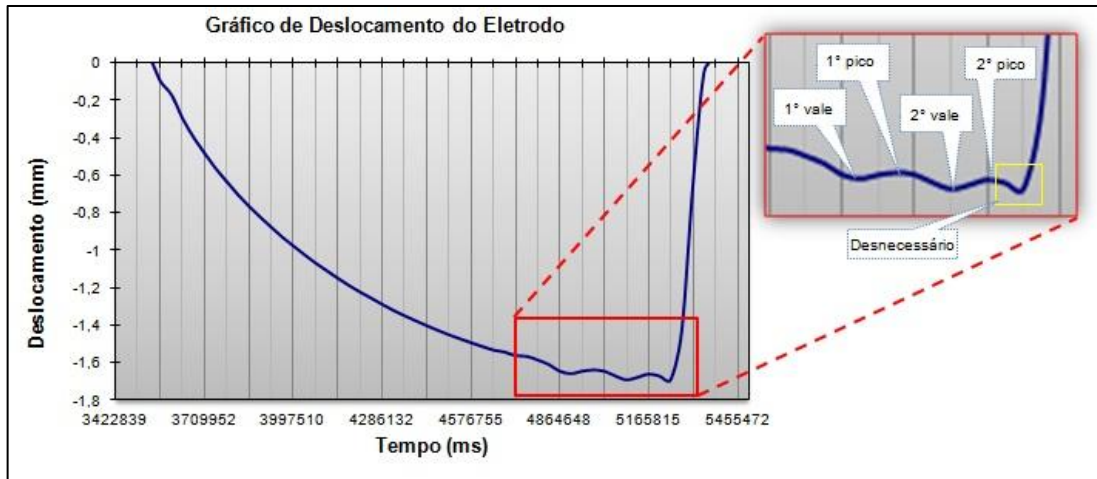


(b)

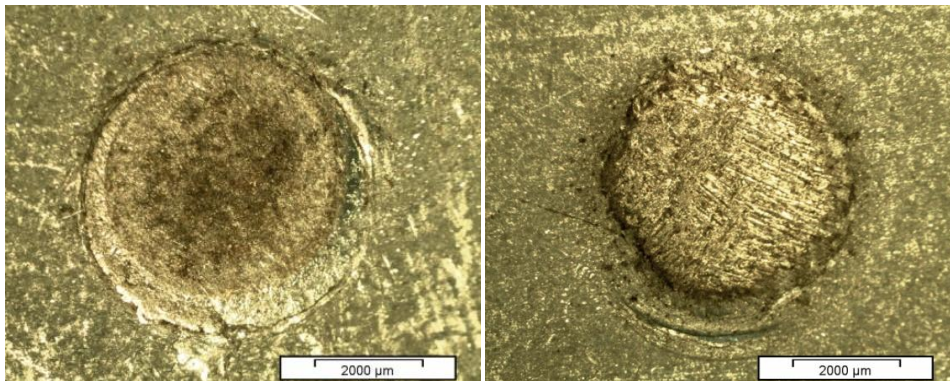
(c)

Figura 4.2 - Teste 2. (a) Deslocamento do eletrodo, (b) Interface Interna e (c) Interface Externa, considerando 50 %kA e 30 ciclos.

Todavia, o deslocamento do eletrodo tem na sua variação do movimento linear uma ligação proporcional com a variação da intensidade de corrente (CHUNTAO, 2010). Portanto, observa-se no teste 3 *Figura 4.3(a)*, uma maior perturbação no comportamento do deslocamento do eletrodo devido o aumento da corrente de 50% para 70%.



(a)



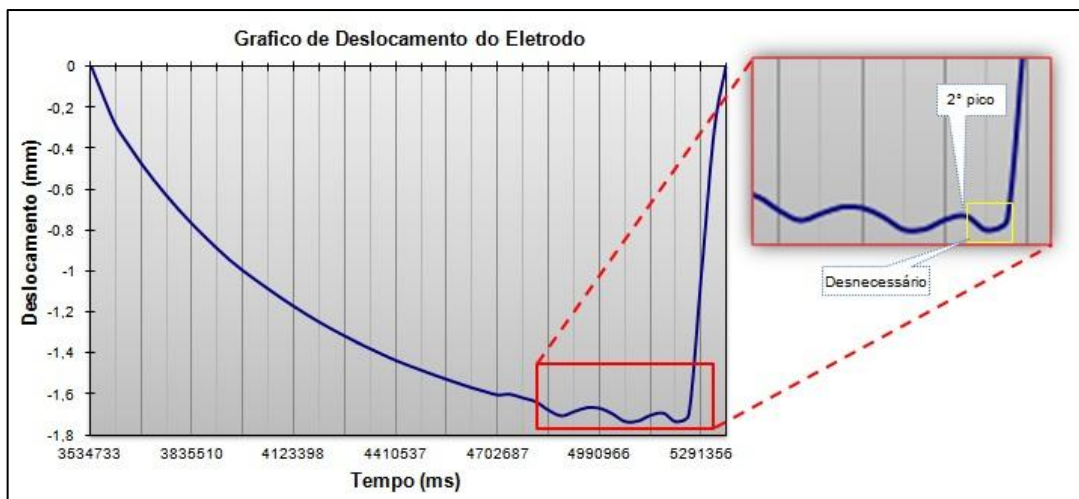
(b)

(c)

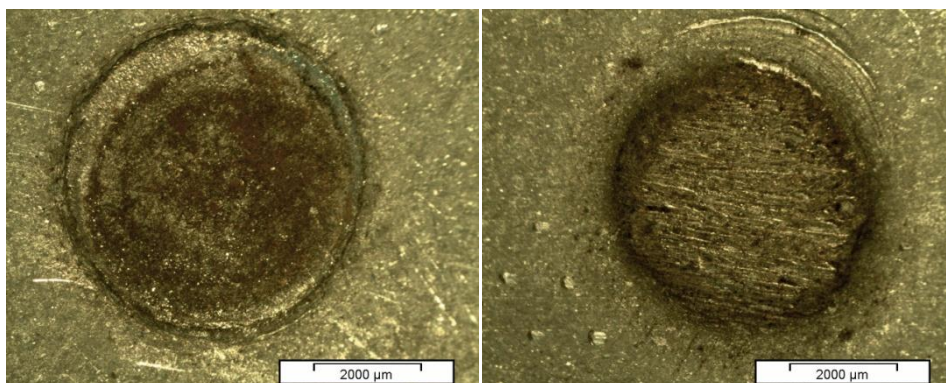
Figura 4.3 - Teste 3. (a) Deslocamento do eletrodo, (b) Interface Interna e (c) Interface Externa, considerando 70 %kA e 30 ciclos.

Tais variações são a presença nítida de vales e picos nas ondulações do gráfico de deslocamento do eletrodo correspondente ao preaquecimento. O primeiro vale corresponde ao achatamento das asperezas da camada do zinco na face interna (entre chapas), seguido por uma pequena expansão térmica do zinco. Em seguida no primeiro pico, o zinco atinge seu ponto de fusão, primeiramente na interface chapa-chapa (ponto de maior resistência a passagem da corrente) e mais tarde na interface eletrodo-chapa. Desta forma, o eletrodo

avança em direção à chapa de aço empurrando todo o zinco da interface chapa-chapa, para fora da zona de contato, formando um halo ou auréola ao redor, o que corresponde ao 2º vale. Assim, ocorreu a eliminação da camada de zinco na interface interna. Neste contexto, nota-se pela observação do teste 10, que a remoção do revestimento de zinco na interface externa, ocorre muito mais tarde do que na interface interna, esta afirmação também foi observada por Gedeon (1986). Desta forma, o segundo pico foi escolhido para determinar a remoção na interface externa. Ao final do segundo pico, houve a remoção completa do zinco na interface interna e externa, mostrado nas **Figuras 4.3 (b) e (c)**. Por outro lado, aumentando a corrente para 75%, observa-se na **Figura 4.4 (a)** um deslocamento excedente do eletrodo.



(a)



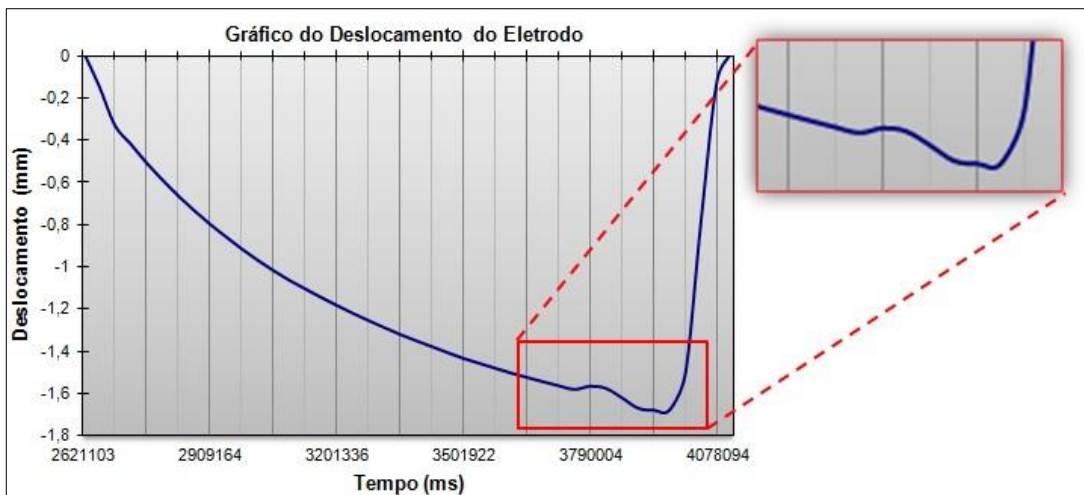
(b)

(c)

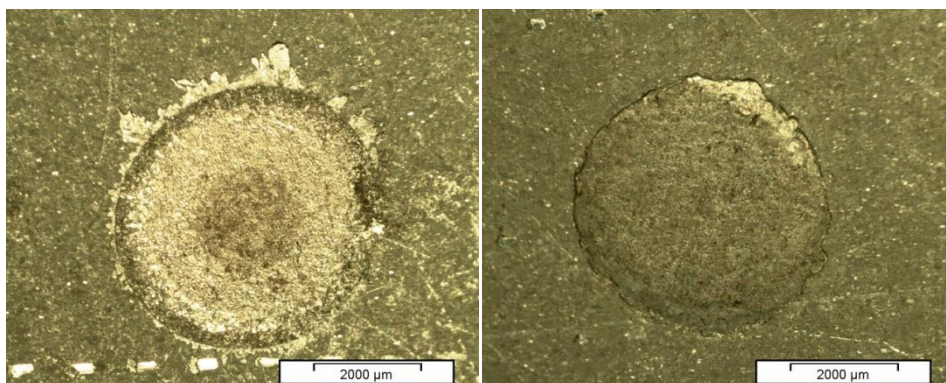
Figura 4.4 - Teste 6. (a) Deslocamento do eletrodo, (b) Interface Interna e (c) Interface Externa, considerando 75 %kA e 30 ciclos.

Este deslocamento desnecessário registrado após o segundo pico (também observado no teste 3). justifica uma remoção excessiva caracterizada pelo escurecimento das auréolas de zinco, mostrado nas **Figuras 4.4 (b) e (c)**.

Observa-se com este resultado que os vales se aprofundam devido a maior deformação térmica oriunda de um maior aquecimento, e mostrando também ser a corrente um fator bastante significativo na limpeza. Este resultado mostra que o sensor é capaz de registrar estas pequenas variações, permitindo com isto ampliar a capacidade de análises em testes não destrutivos. Isto pode ser observado na **Figura 4.5**, em que é mostrado o efeito da limpeza com uma redução do tempo de ciclo para 10 ciclos.



(a)

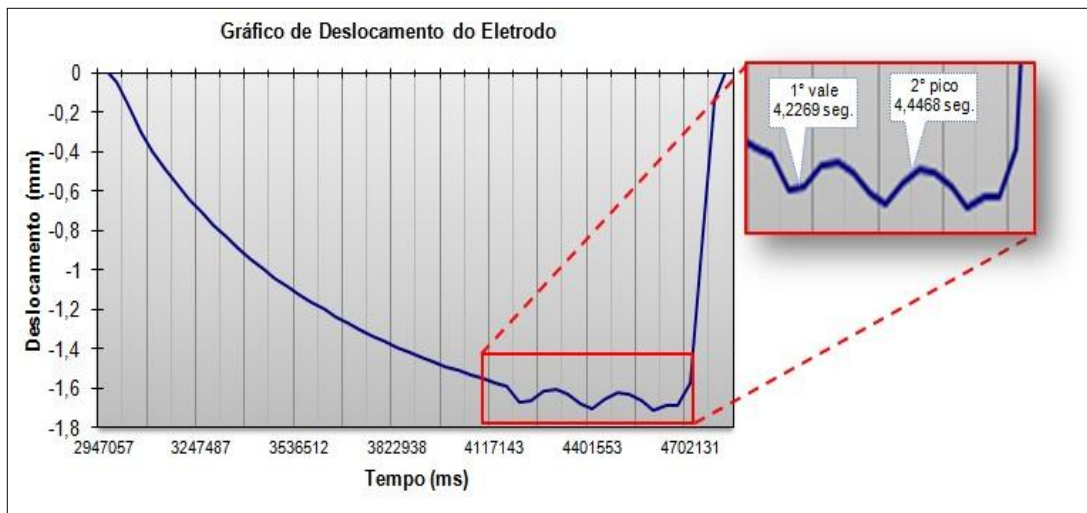


(b)

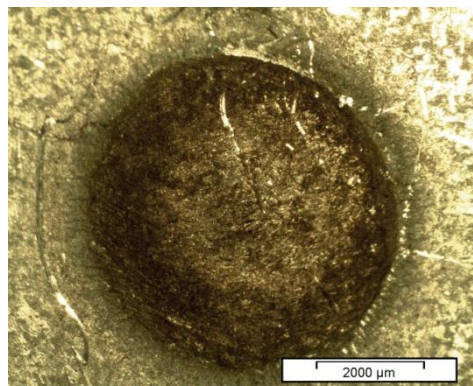
(c)

Figura 4.5 - Teste 10. (a) Deslocamento do eletrodo, (b) Interface Interna e (c) Interface Externa, considerando 75 %kA e 10 ciclos.

Neste caso é nítido que a limpeza apenas ocorreu na interface interna (*Figura 4.5 b*), não havendo tempo suficiente para a limpeza da interface externa (*Figura 4.5 c*). Por outro lado, caso ocorra um aumento da corrente para 90% da capacidade da máquina e um tempo de 30 ciclos, percebe-se pela *Figura 4.6(a)*, que esta condição gera a ação de limpeza nas interfaces interna e externa maior do que a necessária, pelo deslocamento excedente do eletrodo após o segundo pico, bem maior que os deslocamento registrado nas *Figuras 4.3 e 4.4*, resultando no início do processo de fusão do metal base (*Figura 4.6 b*).



(a)



(b)

Figura 4.6 - Teste 4. (a) Deslocamento, (b) Interface Externa (ocorrência de solda).

Entretanto a fusão do metal base não é interessante neste momento, podendo vir a contaminar o eletrodo. Por outro lado, percebe-se pela mesma figura ser possível determinar o

tempo necessário para a ocorrência da limpeza ideal para um dado nível de aplicação de corrente.

Em função dos resultados observados e do diâmetro da zona de contato do eletrodo utilizado nesta etapa, pode-se auferir que a remoção ideal do zinco iniciou a partir de um nível mínimo de corrente de 70% de I_{preaq} utilizando 30 ciclos de T_{preaq} , considerando as dimensões do eletrodo utilizado, e que, a partir deste nível, quanto maior a intensidade, menor o tempo de aplicação da corrente, o que vem de acordo com AWS (1998).

Desta forma, percebe-se na **Figura 4.6** tal nível de tempo de preaquecimento poderia ser determinado pela **Equação 4.1**.

$$Y = (t_f - t_i) * f \quad (4.1)$$

Onde: Y - número de ciclos necessários [ciclos]; t_f - tempo do segundo vale [ms]; t_i - tempo do primeiro vale [ms]; f - frequência elétrica da fonte alimentadora - 60 [Hz].

Portanto, considerando a metodologia proposta observa-se que para o teste 4 realizado, um nível de corrente de 90% necessitaria para uma limpeza efetiva das superfícies interna e externa um tempo de 13 ciclos ao invés dos 30 ciclos utilizados. Todavia, esta metodologia permite a determinação das exigências de tempo de limpeza em função do nível de corrente utilizada, condição esta que pode ser representada pelo desenvolvimento de um envelope operacional.

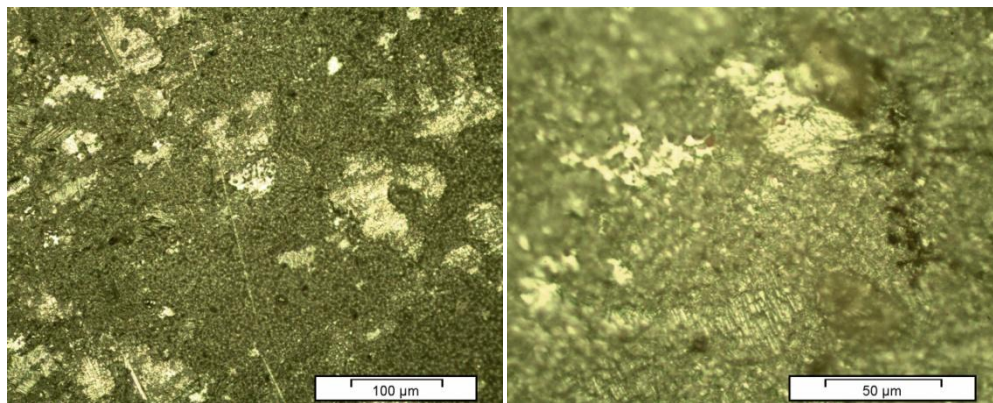
4.2. Desenvolvimento de um envelope operacional

Nesta segunda etapa do trabalho, procurou-se desenvolver um envelope operacional formado por um conjunto de parâmetros de preaquecimento onde o valor escolhido pode resultar em uma remoção da camada de zinco na interface interna e externa da chapa de aço. Todavia para uma melhor compreensão dos resultados, o desenvolvimento do envelope será apresentado em dois momentos: O primeiro momento se resume à formação de uma condição visual padrão que permite diferenciar uma remoção satisfatória do zinco ante uma remoção insatisfatória. Em um segundo momento, os registros da expansão térmica do material

coletados pelo sensor LVDT serão plotados em um gráfico juntamente com os níveis de corrente (%kA) e tempo (ciclos) estabelecidos nos padrões visuais descritos acima, com o intuito comparativo, para encontrar menores parâmetros de preaquecimento em que ocorra a remoção do zinco nas duas interfaces do corpo de prova.

4.2.1. Formação dos padrões: visual e do sensor de deslocamento

Neste primeiro momento, considera-se como condição visual padrão de remoção do zinco, a formação de uma auréola de zinco ao redor da zona de contato e a diferença aparente de tonalidade entre a chapa de aço e o zinco, na medida em que o revestimento é removido. Estas características também podem ser observadas em experimentos conduzidos por Nascimento (2008), mostrando a ocorrência da queima do zinco, evidenciando que, na técnica do “Burn Zinc”, o zinco é deslocado para a região ao redor do ponto de solda em que, neste caso, está representado pela zona de contato presente nas interfaces interna e externa. A **Figura 4.7** mostra nitidamente o revestimento de zinco (representado pela cor escura) está depositado na superfície de uma chapa de aço galvanizado.



(a)

(b)

Figura 4.7 - Revestimento de zinco. Ampliações: (a) 200 vezes, (b) 500 vezes.

O zinco é representado pela cor escura e a chapa de aço pela cor clara. Nas **Figuras 4.7 (a) e (b)** observa-se que a superfície está toda tomada pelo zinco, devido a grande incidência da cor escura. Desta forma, para efeito comparativo, as **Figuras 4.8 e 4.9** mostram uma condição visual padrão em que, um aumento gradativo do tempo (ciclos) de preaquecimento mantendo-se a corrente (%kA) constante, pode resultar na formação da auréola de zinco,

caracterizando a remoção do zinco propriamente dita. Na **Figura 4.8(a) e (b)**, observa-se pouca diferença entre as cores clara e escura. Neste caso não houve remoção do zinco, mas somente uma pequena queima do revestimento. Isto é evidenciado comparando a **Figura 4.8(c)** com a **Figura 4.7(a)**.

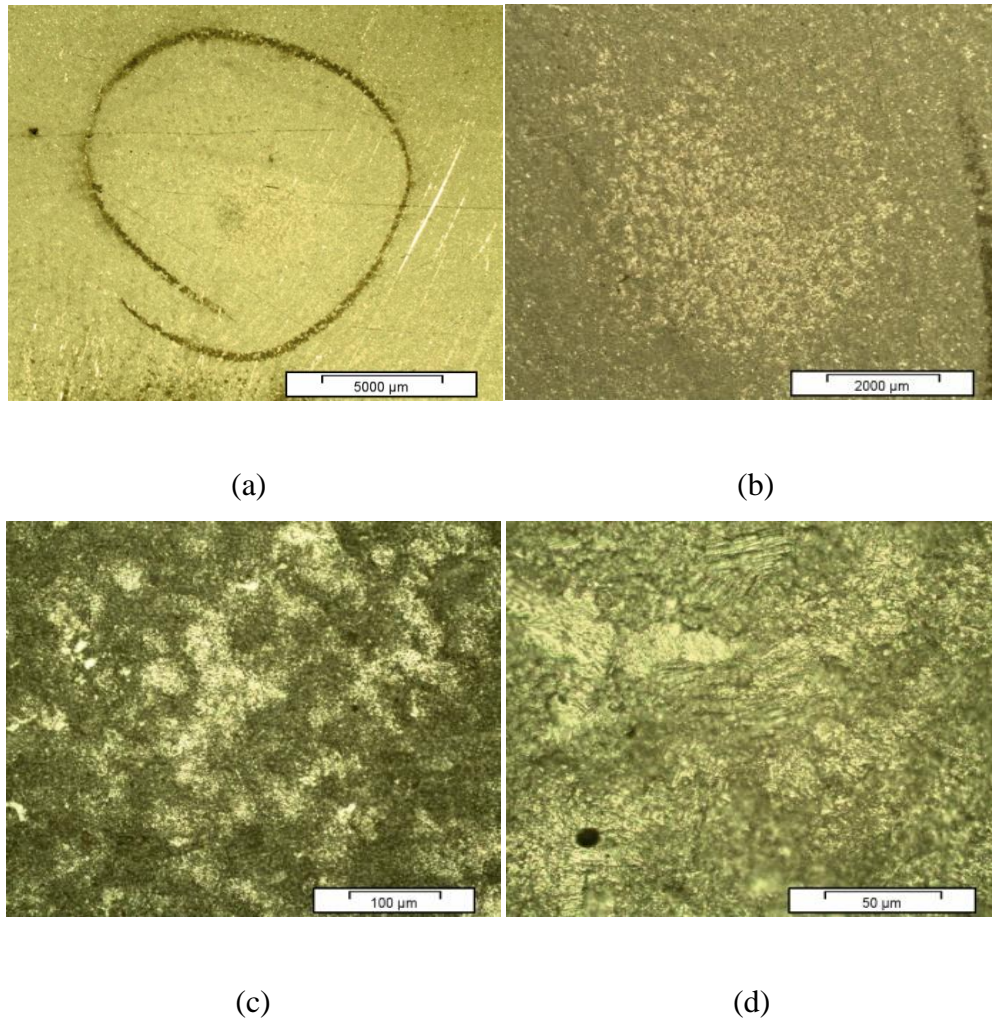


Figura 4.8 - Remoção parcial com 10 ciclos e 70% da I max. Ampliações na zona de contato: (a) 6.7 vezes, (b) 15 vezes, (c) 200 vezes, (d) 500 vezes.

Aumentando o tempo para 20 ciclos, observa-se na **Figura 4.9 (a) e (b)** uma grande diferença entre a cor clara e a escura, após a aplicação do preaquecimento. Neste exemplo, é nítida a formação de uma auréola de zinco ao redor da zona de contato na interface interna que comprova, uma adequada remoção do zinco para esta interface. Comparativamente a **Figura 4.7 (b)**, a **Figura 4.9(d)** apresenta pouco revestimento de zinco (representado pela cor escura). Todavia, uma pequena quantidade de zinco residual se mantém sobre o metal base na zona de contato, resultado este em concordância com observado por Gedeon (1986). Em

função dos resultados observados e, de posse das condições visuais padrão de remoção do zinco, procurou-se na obter os limites inferiores e superiores de “BZ”. Desta forma o equipamento de soldagem foi ajustado para realizar apenas a etapa de preaquecimento. A preparação das amostras e realização dos testes seguiu conforme descrito anteriormente.

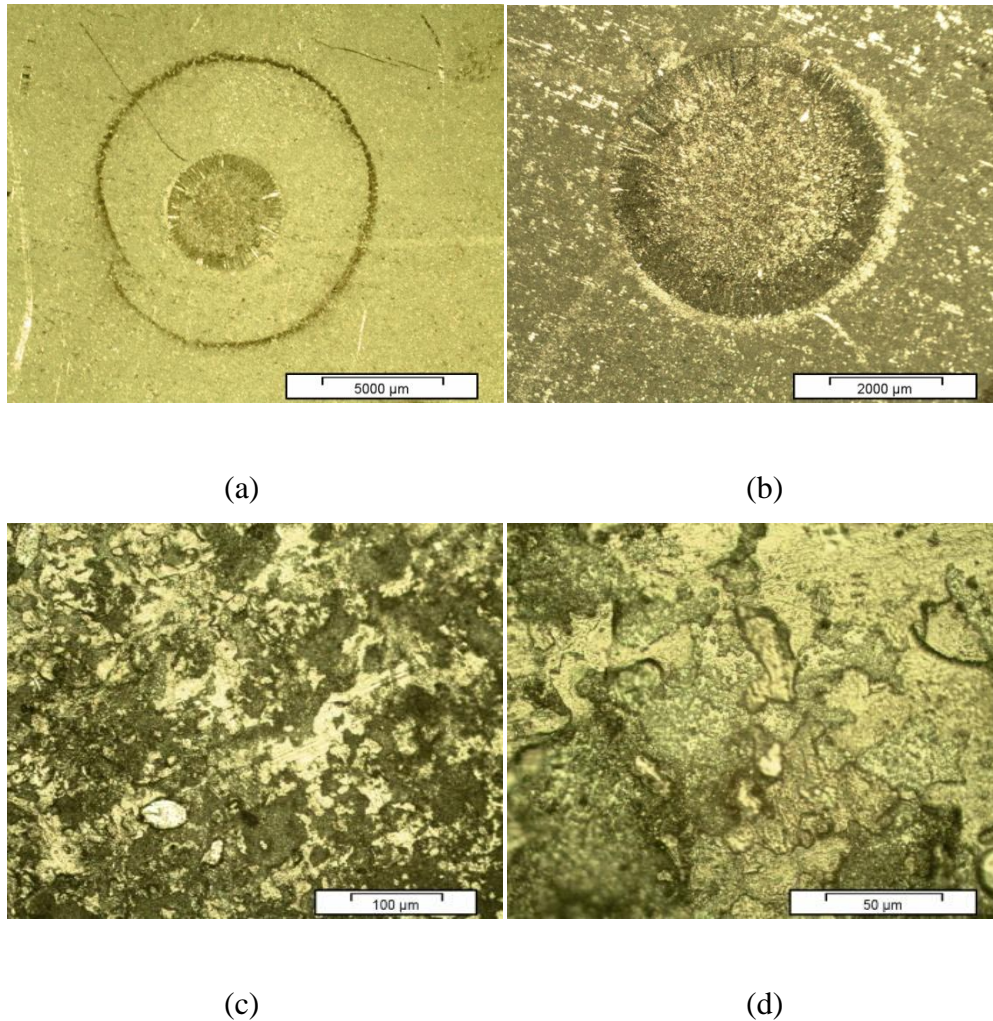


Figura 4.9 - Remoção ideal com 20 ciclos e 70% da I max. Ampliações: (a) 6.7 vezes, (b) 15 vezes, (c) 200 vezes, (d) 500 vezes.

Da mesma forma após cada experimento realizado, nas amostras em que não ocorreu a união, as chapas foram separadas umas das outras para avaliação. O comportamento da expansão térmica foi adquirido pelo sensor LVDT e, processado dos dados, foi utilizado o aplicativo *Microsoft Office*, o *Excel*® para estratificar os resultados obtidos pelo sensor. Estes resultados foram quantificados pela **Equação 4.1** e, a resultante Y juntamente com as observações visuais das interfaces foram registradas na **Tabela 4.2** e na **Tabela 4.3**, sendo que, para esta última, o eletrodo foi amaciado.

Tabela 4.2 - Valores de preaquecimento obtidos para eletrodo sem “amaciamento”.

Testes	Ipreak <i>% kA</i>	Tpreak <i>ciclos</i>	Queima do zinco	Y <i>ciclos</i>	Observação da interface interna	Observação da interface externa
01	60	40	Não	-	Não removeu	Não removeu
02	60	50	Sim	-	Remoção parcial	Remoção parcial
03	70	10	Não	-	Não removeu	Não removeu
04	70	17	Sim	13	Remoção ideal	Remoção parcial
05	70	20	Sim	15	Remoção ideal	Remoção parcial
06	70	35	Sim	15	Remoção ideal	Remoção ideal
07	70	40	Sim	13	Remoção excessiva	Remoção excessiva
08	70	50	União	15	Solda	Solda
09	80	7	Sim	-	Remoção parcial	Remoção parcial
10	80	10	Sim	14	Remoção ideal	Remoção parcial
11	80	20	Sim	17	Remoção ideal	Remoção ideal
12	80	30	União	16	Solda	Solda
13	90	3	Não	-	Não removeu	Não removeu
14	90	5	Sim	-	Não removeu	Não removeu
15	90	8	Sim	11	Remoção ideal	Remoção parcial
16	90	14	Sim	11	Remoção ideal	Remoção ideal
17	90	20	União	14	Solda	Solda

Nota: 6 kA = 100% da corrente.

Tabela 4.3 - Valores de preaquecimento para eletrodo com “amaciamento”.

Testes	Ipreak <i>% kA</i>	Tpreak <i>ciclos</i>	Queima do zinco	Y <i>ciclos</i>	Observação da interface interna	Observação da interface externa
01	60	12	Não	-	Não removeu	Não removeu
02	60	16	Sim	21	Remoção ideal	Remoção parcial
03	60	20	Sim	21	Remoção ideal	Remoção ideal
04	60	30	Sim	28	Remoção ideal	Remoção ideal
05	70	08	Sim	13	Remoção ideal	Remoção ideal
06	70	10	Sim	13	Remoção ideal	Remoção ideal
07	70	14	Sim	10	Remoção ideal	Remoção ideal
08	80	03	Não	-	Não removeu	Não removeu
09	80	05	Sim	07	Remoção ideal	Remoção ideal
10	80	09	Sim	09	Remoção ideal	Remoção ideal
11	80	10	Sim	09	Remoção excessiva	Remoção excessiva
12	90	04	Sim	06	Remoção ideal	Remoção ideal
13	90	07	Sim	06	Remoção ideal	Remoção ideal
14	90	10	Sim	07	Remoção excessiva	Remoção excessiva

Nota: 6 kA = 100% da corrente.

Alguns testes apresentaram remoção parcial na interface interna devido à presença visual de zinco na superfície do metal base, que não é desejado para este experimento. Sendo assim, apenas os testes que apresentaram remoção ideal, ao menos na interface interna, foram utilizados para a construção do envelope de parâmetros.

Observa-se na **Tabela 4.3** que após o “amaciamento”, obteve-se remoção ideal do zinco utilizando 60 % de I_{preaq} , fato este que, não foi observado na **Tabela 4.2**. Esta mudança pode ser explicada pela redução da área de contato do eletrodo em torno de 0,2 a 0,4 décimos de milímetro, que foi observada na impressão da ponta do eletrodo em papel carbono. Fato este que vai de encontro à observação de William & Parker (2004). Assim pode-se dizer que esta pequena redução da área de contato do eletrodo, foi o suficiente para aumentar a densidade de corrente e a geração de calor em níveis mais baixos de corrente.

4.2.2. Determinação do envelope operacional

No segundo momento, foram utilizados os valores da **Tabela 4.2**, referentes ao T_{preaq} em que houve a remoção ideal do zinco (caracterizado pela formação da auréola de zinco ao redor da zona de contato) em uma das interfaces e, os valores de Y (caracterizado pela quantidade necessária de ciclos a pré-fase), foram plotados em um gráfico, com o intuito encontrar a diferença entre ambos os envelopes, conforme mostrados na **Figura 4.10**.

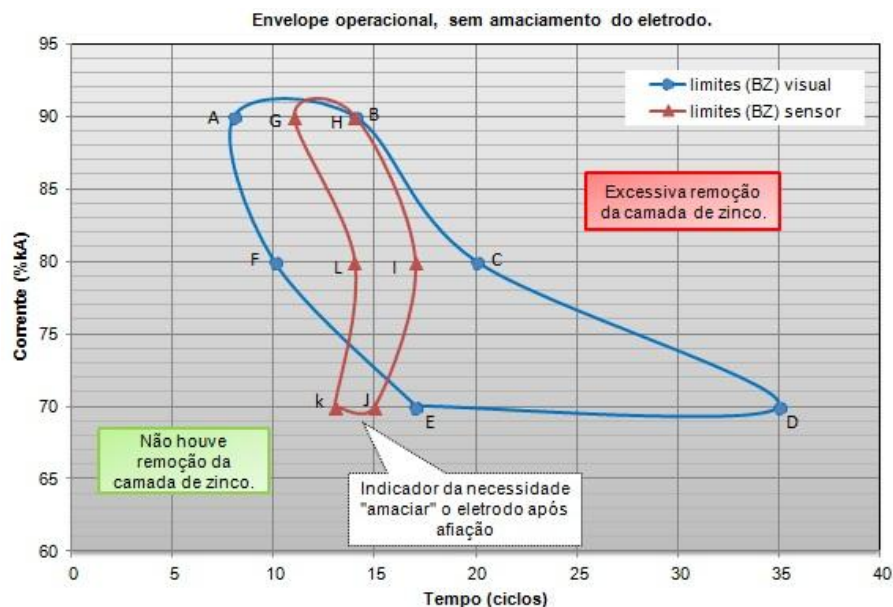


Figura 4.10 - Deslocamento do eletrodo não amaciado durante a fase de preaquecimento.

Os parâmetros de T_{preaq} (ciclos) e I_{preaq} (%kA) na **Figura 4.10**, que estão próximos à linha delimitada pelos pontos AFE, apresentaram uma remoção ideal do zinco na interface interna pelo padrão visual. Extrapolando mais a esquerda desta linha; e também, abaixo da linha representada pelos pontos ED; encontram-se menores níveis de corrente e tempo de preaquecimento, não suficientes para a remoção do zinco. Por outro lado, os parâmetros de T_{preaq} e I_{preaq} que estão próximos à linha delimitada pelos pontos BCD, apresentaram uma remoção do zinco, nas duas interfaces, tanto na interna quanto na externa pelo padrão visual. Neste contexto, extrapolando mais a direita desta linha, encontram-se maiores níveis de corrente e tempo de preaquecimento, onde se percebeu uma remoção excessiva do zinco, iniciando até mesmo a fusão do metal base em alguns testes, como por exemplo, o Teste 12 da **Tabela 4.2**, que, não é interessante para esta fase de preaquecimento.

Entretanto, com a observação do envelope ABCDEF, algumas dúvidas como a possibilidade da existência de mais pontos, em que, os parâmetros escolhidos levem a uma remoção do zinco nas duas interfaces ao mesmo tempo, utilizando um menor nível de T_{preaq} , surgem naturalmente. Para comprovar isto, os valores de Y (**Tabela 4.2**) foram inseridos na **Figura 4.10**, formando o envelope operacional gerado pelo sinal do deslocamento do eletrodo, representado pelos pontos GHIJKL, porém, um desvio apresentado nos pontos KJ para níveis de corrente abaixo de 80%, não remove o revestimento de zinco nas duas interfaces, como também extrapolaram a linha limite mínima de condição visual padrão de remoção do zinco, estabelecida entre os pontos FE. Todavia, na medida em que os experimentos foram conduzidos e os ciclos de preaquecimento foram aplicados, é evidente a existência de uma sobreposição do envelope GHIJKL ao envelope ABCDEF. Isto pode ser explicado pelo processo de migração gradual de zinco da superfície da chapa para o cobre da ponta do eletrodo a cada experimento realizado.

Esta migração forma uma película de Cu/Zn (latão) que, além de fragilizar o material da ponta do eletrodo, apresenta uma maior resistividade elétrica, contribuindo para um aumento na temperatura na ponta do eletrodo (AZAMBUJA, 1987). Por outro lado, este aumento na temperatura intensifica a capacidade em remover o zinco nas duas interfaces durante a fase do preaquecimento. Desta forma, pode-se dizer que, a partir dos níveis de corrente de 80% de I_{preaq} (pontos LI na **Figura 4.10**), a película de Cu/Zn, já está formada. A este efeito, já observado por outro autor no passado (AZAMBUJA, 1987), dá-se o nome de “amaciamento” do eletrodo. Assim pode-se dizer que os parâmetros T_{preaq} e I_{preaq} utilizados somente entre os pontos GHIL, apresentam remoção ideal em ambas às interfaces da chapa de aço galvanizada para o envelope da **Figura 4.10**. Entende-se, contudo, que uma avaliação

microestrutural tipo EDS, na ponta do eletrodo, poderia mostrar com precisão a formação da liga de Cu/Zn para um estudo mais aprofundado deste trabalho. Desta forma, pode-se dizer que o desvio à esquerda nos pontos KJ em relação à linha limite, representado pelos pontos FE, em valores abaixo de 80% de I_{preaq} , indicam a necessidade de aplicação do processo de “amaciamento” no eletrodo, após a retificação do mesmo.

Portanto, para comprovar a influência do processo de “amaciamento” no sinal gerado pelo deslocamento do eletrodo, e também, se a regra da inversão proporcional entre tempo e corrente de solda (AWS, 1998), possa ser utilizada para a fase do preaquecimento, um novo envelope foi gerado, desta vez com o eletrodo amaciado. Assim, os valores da **Tabela 4.3**, referentes ao T_{preaq} em que houve a remoção ideal do zinco em uma das interfaces e, os valores de Y, foram plotados na **Figura 4.11** abaixo.

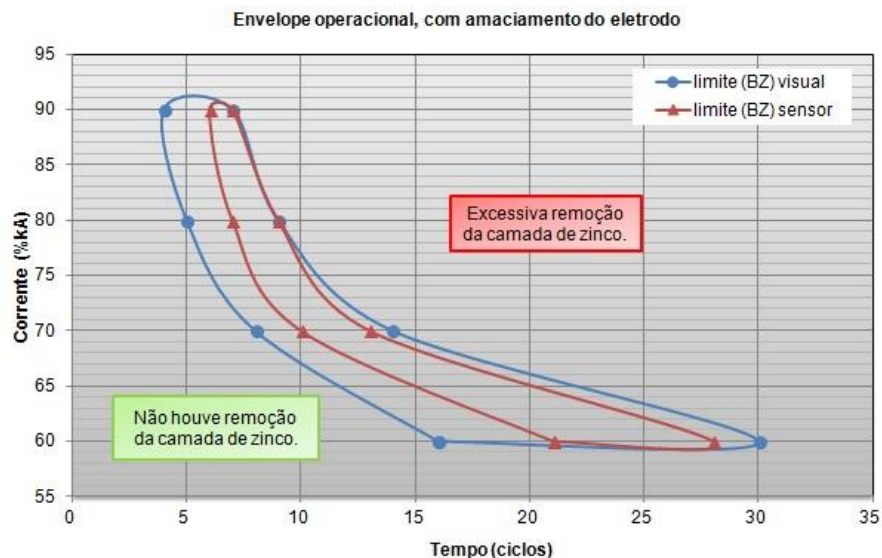


Figura 4.11 - Deslocamento do eletrodo amaciado na fase de preaquecimento

Observa-se em ambos os envelopes que, o deslocamento segue uma tendência descendente suave para a direita. Assim pode-se dizer que a regra da inversão proporcional entre corrente e tempo é válida também para a fase do preaquecimento. Entende-se, todavia que, quanto menor o nível de corrente, maior é o tempo utilizado necessário para atingir uma remoção mínima do revestimento de zinco. Na **Figura 4.11** nota-se que os envelopes não apresentam nenhum desvio que indique a falta de “amaciamento” do eletrodo. Atualmente no meio industrial existe uma busca constante pela redução de custo do produto o que motiva cada vez mais, o desenvolvimento de chapas de aço galvanizadas com máxima resistência e

mínima espessura. Neste contexto, há uma necessidade de utilização de diâmetros da ponta do eletrodo, cada vez menores, para o processo RSW. Esta redução, além de aumentar a densidade de corrente (*Equação 2.2*), requer a utilização de níveis de tempo de preaquecimento bem menores. Desta forma, uma avaliação mais aprofundada no que diz respeito à escolha correta, da taxa de amostragem de leitura do sensor pela análise do sinal gerado, se faz necessário.

4.3. Análise da influência do preaquecimento na solda

Como se observou dos resultados obtidos anteriormente, a natureza do processo de soldagem por resistência em aço galvanizado é bastante dinâmica uma vez que existem diferentes fases durante todo o processo RSW. Até agora, foi avaliado as influências dos parâmetros de preaquecimento na remoção da camada de zinco. Entretanto, questões relativas à interação do revestimento de zinco durante a soldagem aparecem naturalmente, como por exemplo:

- Um tempo maior de limpeza exige um tempo menor de soldagem?
- Uma melhor limpeza reflete na resistência final do ponto soldado?

Desta forma, questões como essas se tornam difíceis de serem respondidas sem avaliar a interação entre os parâmetros utilizados. Portanto, devido à necessidade de avaliar o ciclo de preaquecimento e o ciclo de solda, optou-se por realizar um DOE. Como de certa forma, todos os desenvolvimentos realizados até o momento tiveram a pretensão de caracterizar melhor o processo em questão, e, ainda respaldado pelo trabalho desenvolvido por Amaral (2011), optou-se por trabalhar com a metodologia baseada na superfície de respostas, visto que tais condições utilizadas nos testes preliminares mostraram claramente estar em uma região próxima do ótimo. O valor de α adotado foi 2,0.

4.3.1. Escolha das respostas de interesse

As respostas escolhidas no experimento estatístico foram à resistência ao cisalhamento (RC), deformação observada na força máxima de ruptura (DF_{máx.}), indentação medida pelo sensor de deslocamento do eletrodo (IS) e a indentação medida pelo relógio apalpador (IM).

4.3.2. Matriz experimental e resultados obtidos

Sabe-se, para tanto, que os parâmetros mais influentes no processo RSW são a corrente, o tempo e a pressão. Assim, com base pelas **Tabelas 3.3 e 3.4**, um arranjo fatorial completo com center points foi escolhido para comprovar a existência de curvatura nas respostas (MYERS, 2009). Este arranjo é mostrado na **Tabela 4.4**.

Tabela 4.4 - Arranjo experimental de um fatorial completo com center points.

Corpo de Prova	Tipo de ponto	Parâmetros				Respostas			
		Tpreaq	Ipreaq	Tsolda	Isolda	RC	DFmáx.	IS	IM
		<i>ciclos</i>	<i>%</i>	<i>ciclos</i>	<i>%</i>	<i>N</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>
1	1*	5	70	10	84	3826	1,57	0,16	0,15
2	1	11	70	10	84	4250	1,55	0,18	0,19
3	1	5	80	10	84	4243	1,76	0,17	0,17
4	1	11	80	10	84	5184	2,97	0,21	0,25
5	1	5	70	14	84	4816	2,15	0,21	0,21
6	1	11	70	14	84	5048	2,34	0,27	0,30
7	1	5	80	14	84	5148	2,82	0,22	0,26
8	1	11	80	14	84	5540	3,13	0,30	0,33
9	1	5	70	10	90	4633	2,35	0,19	0,20
10	1	11	70	10	90	5240	2,56	0,23	0,27
11	1	5	80	10	90	4813	2,20	0,20	0,21
12	1	11	80	10	90	5418	3,44	0,32	0,41
13	1	5	70	14	90	5378	2,92	0,23	0,26
14	1	11	70	14	90	5483	3,11	0,31	0,29
15	1	5	80	14	90	5395	3,12	0,25	0,30
16	1	11	80	14	90	5947	3,68	0,45	0,59
17	0**	8	75	12	87	4948	2,66	0,30	0,37
18	0	8	75	12	87	5134	2,65	0,28	0,32
19	0	8	75	12	87	5084	2,94	0,29	0,37
20	0	8	75	12	87	4904	2,88	0,28	0,26
21	0	8	75	12	87	5283	3,13	0,29	0,28
22	0	8	75	12	87	5285	3,19	0,28	0,34
23	0	8	75	12	87	5380	3,25	0,29	0,36

Nota: *pontos fatoriais, ** pontos centrais. 6 kA = 100% da corrente.

Para avaliar o arranjo experimental utilizando um fatorial completo visualizaram-se o *center-point* com o intuito de observar se o modelo apresenta curvatura e se as variáveis de

controle são significativas. Os resultados dos coeficientes são mostrados na **Tabela 4.5**.

Tabela 4.5 - Coeficientes obtidos no modelo fatorial completo para as respostas escolhidas.

Termo	Valor <i>p-value</i>			
	RC	DFmáx.	IS	IM
Corrente de solda	0,002	0,007	0,000	0,003
Tempo de solda	0,006	0,003	0,000	0,013
Corrente de preaquecimento	0,000	0,003	0,000	0,010
Tempo de preaquecimento	0,001	0,002	0,000	0,011
Desvio padrão (S)	180,092	0,244	0,007	0,046
Curvatura	0,18	0,01	0,00	0,04

Assim também, todos os coeficientes dos quatro parâmetros analisados tiveram os valores de *p-value* abaixo de 0,05, o que mostra significância destes parâmetros em relação às respostas RC, DFmáx., IS e IM. O índice de curvatura obtido foi abaixo de 0,05 para as respostas DFmáx., IS e IM, por outro lado RC não apresentou curvatura.

Considerando a existência de curvatura na região avaliada, principalmente para as respostas DFmáx. (*p-value* = 0,01), IS (*p-value* = 0,00) e IM (*p-value* = 0,04), verifica-se a necessidade de modelagem do efeito não linear de uma forma mais eficaz através de um modelo quadrático completo a todas as respostas. Desta forma, os pontos axiais foram inseridos no modelo, considerando um arranjo CCD completo, tendo em composição para sete pontos centrais, oito pontos axiais, dezesseis pontos fatoriais e 1 replicação, totalizando 31 combinações mostrados na **Tabela 4.6**.

É importante observar que, de acordo com os trabalhos desenvolvidos por Aslanlar (2004) e Darwish & Al-Dekhial (1999), um ponto de solda de boa qualidade realizada em chapas de aço galvanizado, pode resistir a forças superiores a 3500N. Os pontos que apresentaram esta condição aceitável de rompimento possuem diâmetro igual ou maior que $4\sqrt{t}$ onde "t" é a espessura da chapa mais fina conforme descrito por Intermachinery (2002). Após teste de cisalhamento observou-se também, que as amostras tiveram um rompimento caracterizado por rasgamento da chapa em geral na maioria dos experimentos. Dos 31 experimentos realizados, 26 deles apresentaram diâmetros aceitáveis, totalizando 83% de aprovação.

Tabela 4.6 - Arranjo experimental CCD.

Corpo de Prova	Tipo de ponto	Parâmetros				Respostas			
		Tpreaq	Ipreaq	Tsolda	Isolda	RC	DFmáx.	IS	IM
		<i>ciclos</i>	<i>% kA</i>	<i>ciclos</i>	<i>% kA</i>	<i>N</i>	<i>Mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>
1	1*	5	70	10	84	3826	1,57	0,1637	0,15
2	1	11	70	10	84	4250	1,55	0,1768	0,195
3	1	5	80	10	84	4243	1,76	0,1725	0,175
4	1	11	80	10	84	5184	2,97	0,2122	0,255
5	1	5	70	14	84	4816	2,15	0,2079	0,215
6	1	11	70	14	84	5048	2,34	0,2716	0,3
7	1	5	80	14	84	5148	2,82	0,2213	0,265
8	1	11	80	14	84	5540	3,13	0,3034	0,33
9	1	5	70	10	90	4633	2,35	0,193	0,205
10	1	11	70	10	90	5240	2,56	0,2263	0,275
11	1	5	80	10	90	4813	2,2	0,2048	0,21
12	1	11	80	10	90	5418	3,44	0,3203	0,415
13	1	5	70	14	90	5378	2,92	0,2342	0,265
14	1	11	70	14	90	5483	3,11	0,3058	0,295
15	1	5	80	14	90	5395	3,12	0,2534	0,305
16	1	11	80	14	90	5947	3,68	0,4453	0,59
17	-1***	2	75	12	87	4853	2,37	0,2255	0,19
18	-1	14	75	12	87	5639	3,78	0,3637	0,465
19	-1	8	65	12	87	5046	2,43	0,2556	0,27
20	-1	8	85	12	87	5250	2,96	0,3432	0,485
21	-1	8	75	8	87	4246	1,35	0,2189	0,195
22	-1	8	75	16	87	5731	3,44	0,3677	0,55
23	-1	8	75	12	81	4229	1,61	0,2287	0,245
24	-1	8	75	12	93	5186	2,54	0,2982	0,32
25	0**	8	75	12	87	4948	2,66	0,2978	0,375
26	0	8	75	12	87	5134	2,65	0,277	0,325
27	0	8	75	12	87	5084	2,94	0,2915	0,375
28	0	8	75	12	87	4904	2,88	0,2822	0,26
29	0	8	75	12	87	5283	3,13	0,2925	0,28
30	0	8	75	12	87	5285	3,19	0,2806	0,34
31	0	8	75	12	87	5380	3,25	0,2937	0,365

Nota: *pontos fatoriais, ** pontos centrais, *** pontos axiais. 6 kA = 100% da corrente.

Vale ressaltar que com o intuito de garantir o aspecto dimensional dos eletrodos, a cada experimento realizado o ponto de solda, foi impresso em papel carbono, cujos perfis obtidos

são mostrados na **Figura 4.12**, onde se comprova que tais diâmetros não sofreram grandes alterações em escala milimétrica.

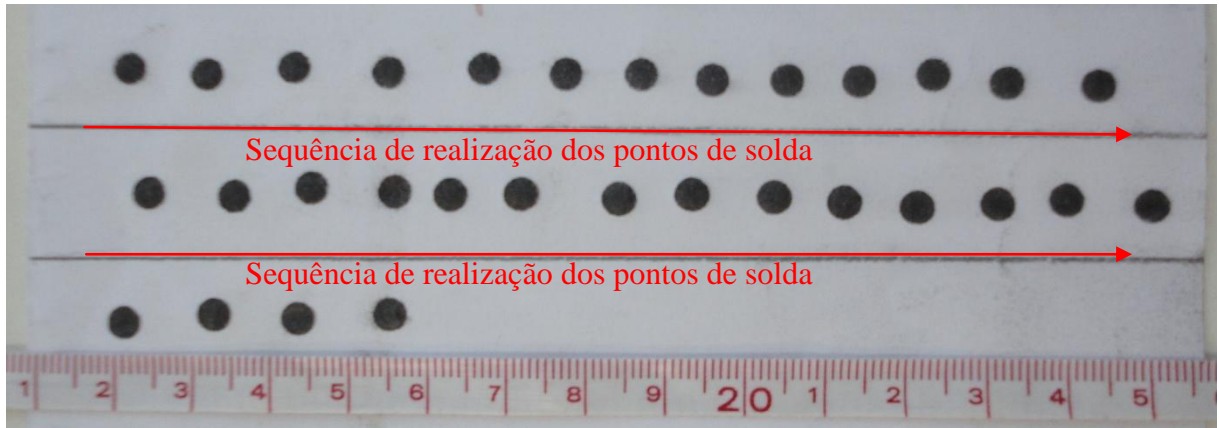


Figura 4.12 - Impressão em carbono da ponta do eletrodo, durante os 31 experimentos.

Avaliando com mais cuidado o diâmetro e o tempo de solda, pode-se observar uma relação entre ambos. Isto é mostrado na **Figura 4.13** em que o crescimento do diâmetro do ponto de solda é proporcional ao tempo ajustado no equipamento. Tal observação está de acordo com observado por Wang (2011).

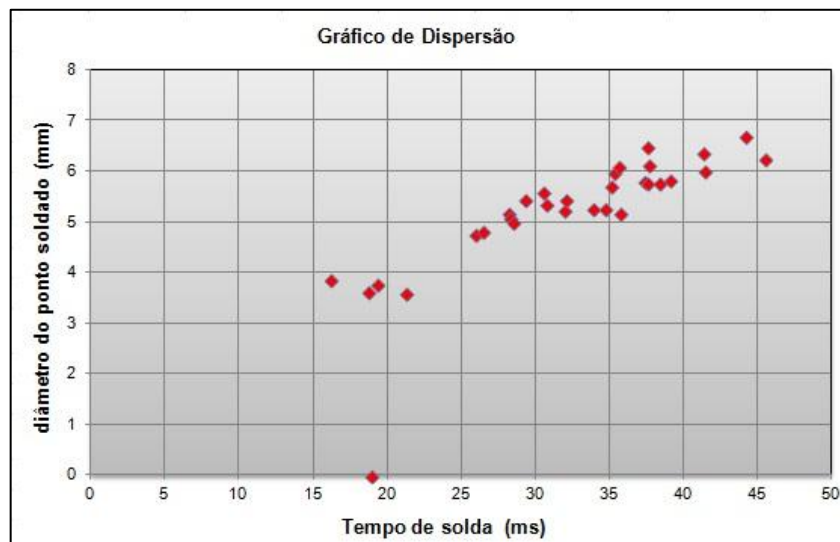


Figura 4.13 - Gráfico de crescimento do ponto de solda.

A indentação (IS) foi analisada com intuito comparativo à indentação (IM). Assim a **Figura 4.14**, mostra o método de avaliação de IS, caracterizado pela diferença entre os pontos B e A, referentes ao deslocamento do eletrodo devido ao aporte térmico no metal base.

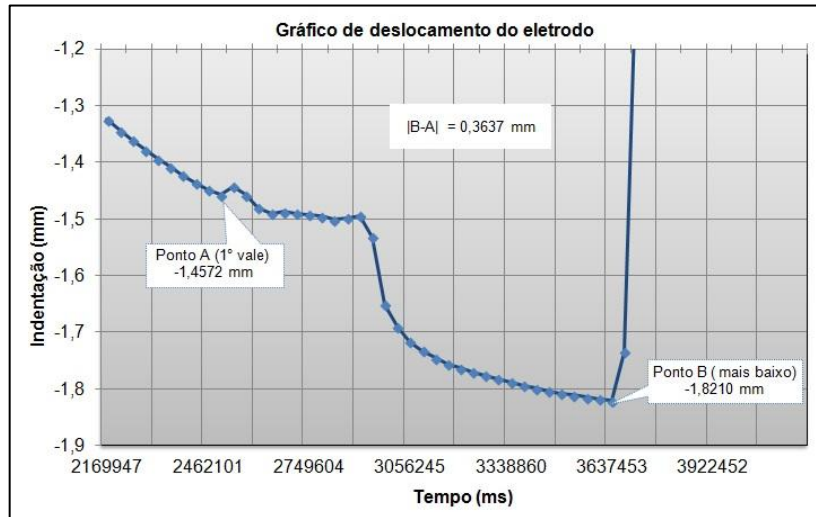


Figura 4.14 - Teste 18. Gráfico de deslocamento do eletrodo.

Considerando que a diferença em módulo entre o valor final e o valor inicial de profundidade nos pontos A e B, a resultante representa a penetração do eletrodo no metal base. Questões relativas à confiabilidade desta resultante podem ser sanadas pela avaliação comparativa entre os valores de IS e IM representados na **Figura 4.15**.

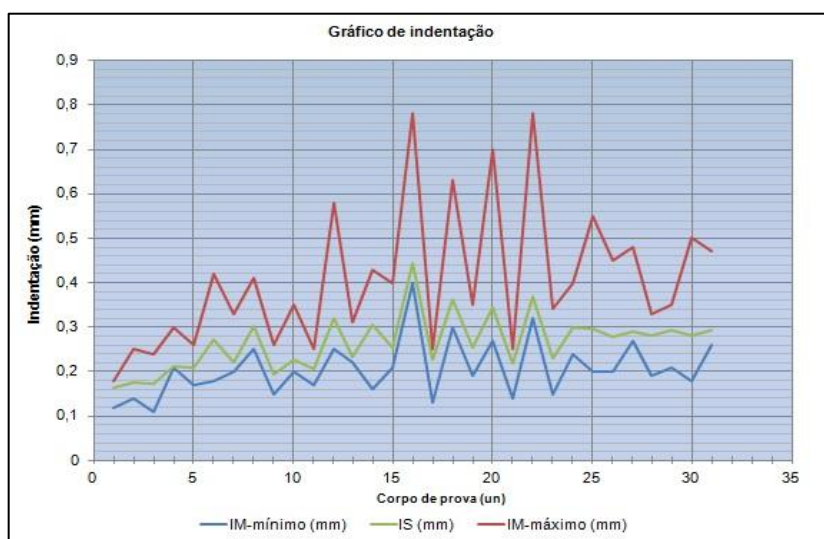


Figura 4.15 - Gráfico comparativo entre IS e IM.

Observa-se que, os valores de IS estão entre os valores máximos e mínimos de IM. Visto que nenhum valor de IS extrapolou os limites de IM, pode-se dizer que os valores de IS conseguem representar a indentação do ponto de solda. Todavia para melhor detalhar esta diferença entre IS e IM, um estudo estatístico mais poderia mostrar a variação de uma resposta em relação à outra (que não é o foco deste trabalho).

4.3.3. Adequação dos modelos

Após a verificação da equação dos modelos, estes foram reduzidos pela remoção dos termos não significativos. O critério adotado para a remoção dos termos não significativos foi o aumento do valor de $R^2(\text{adj.})$ e a redução do desvio padrão (S) dos modelos. Os resultados da **Tabela 4.7** indicam que os modelos finais desenvolvidos se caracterizam como expressões de grande confiabilidade em representação ao modelo real, por apresentarem valores acima de 80%, com exceção do IM que apresentou um valor pouco satisfatório.

Tabela 4.7 - Comparação entre os modelos.

RESPOSTA	$R^2(\text{adj.})$ (%)		S	
	Modelo completo	Modelo reduzido	Modelo completo	Modelo Reduzido
RC	89,72%	90,58%	157,271	150,527
DFmáx.	83,78%	86,27%	0,2576	0,23703
IS	79,96%	82,18%	0,0284	0,0268
IM	65,91%	73,01%	0,0627	0,0559

A **Tabela 4.8**, apresenta por meio do *software* estatístico MINITAB® os coeficientes estimados para os modelos matemáticos, em que, observa-se que todos os parâmetros isolados A, B, C, D apresentam efeito significativo ($P\text{-values} < 0,05$) nas respostas escolhidas, porém, nem todas as interações apresentaram valores significativos. Para a resistência ao cisalhamento (RC) apenas as interações D^2 , AC e BD apresentaram $p\text{-values}$ significativos. Na deformação na força máxima (DFmáx.) as interações C^2 , D^2 e AB tiveram significância. Para os valores de indentação coletada pelo sensor (IS), apenas D^2 e AB foram significantes. Já para indentação medida com o relógio apalpador (IM), somente a interação D^2 apresentou valor significativo. Para todas as respostas os níveis de confiança R^2 (adj) e os valores de ($Lack\text{-of-fit} > 0,05$) apresentaram-se adequados com exceção IS, que revelou um valor de LOF 0,001. Este valor nos chama a atenção para três fatores de influência, que podem ter causado

este resultado baixo para LOF. A primeira hipótese é que os “*center points*” não estejam em uma região de ótimo, ou seja, uma região de curvatura da curva de ótimo. A segunda hipótese é que os valores coletados durante o deslocamento do eletrodo podem estar muito próximos dos valores registrados nos center points (iguais nas duas primeiras casas decimais após a vírgula). A terceira hipótese é que a variação gerada na expansão térmica da chapa durante a aplicação dos sinais de preaquecimento, e a variação gerada pelo sensor de deslocamento na leitura dos sinais sejam muito altas.

Tabela 4.8 – Coeficientes e suas interações no modelo reduzido.

Termos	Coeficientes da RC		Coeficientes da DFmáx.		Coeficientes da IS		Coeficientes da IM	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P	Coef	P
<i>Constant</i>	5134,16	0,000	2,99479	0,000	0,27470	0,000	0,33240	0,000
<i>Tpreaq (A)</i>	226,25	0,000	0,27958	0,000	0,03697	0,000	0,05896	0,000
<i>Ipreaq (B)</i>	142,58	0,000	0,23458	0,000	0,02205	0,001	0,04479	0,001
<i>Tsolda (C)</i>	338,25	0,000	0,37708	0,000	0,03629	0,000	0,05812	0,000
<i>Isolda (D)</i>	256,92	0,000	0,28958	0,000	0,02470	0,000	0,03438	0,007
<i>Tpreaq*Tpreaq (A*A)</i>							-0,01145	0,281
<i>Ipreaq*Ipreaq (B*B)</i>			-0,06206	0,174				
<i>Tsolda*Tsolda (C*C)</i>			-0,13706	0,006				
<i>Isolda*Isolda (D*D)</i>	-108,29	0,001	-0,21706	0,000	-0,01193	0,025	-0,0227	0,039
<i>Tpreaq*Ipreaq (A*B)</i>	70,13	0,076	0,17188	0,009	0,01547	0,031	0,02531	0,084
<i>Tpreaq*Tsolda (A*C)</i>	-81,00	0,043	-0,08688	0,158	0,01298	0,067		
<i>Tpreaq*Isolda (A*D)</i>					0,01336	0,060	0,01969	0,173
<i>Ipreaq*Isolda (B*D)</i>	-83,50	0,038	-0,09812	0,113	0,01094	0,118	0,01969	0,173
<i>Tsolda*Isolda (C*D)</i>	-59,37	0,13						
<i>S</i>	150,527		0,23703		0,0268		0,0559	
<i>R²</i>	93,41%		90,85%		87,53%		81,11%	
<i>R²(adj)</i>	90,58%		86,27%		82,18%		73,01%	
<i>LOF</i>	0,818		0,587		0,001		0,278	

Avaliando as três hipóteses descritas anteriormente, observa-se que o fato de que todos os valores de indentação média coletada pelo sensor não apresentaram resultados muito próximos e o fato de que todas as outras respostas, dentre elas a resistência ao cisalhamento, à deformação máxima e a indentação medida apresentaram um resultado de LOF aceitável (*Lack-of-fit* > 0,05). Pode-se dizer que o terceiro fator de influência é o mais provável ocorrido. Todavia, para melhor interpretar este caso, uma avaliação de R&R e a geração de uma curva

de calibração (que não são o foco deste trabalho) talvez pudesse mostrar com precisão, o erro acumulado gerado que ocasionou este LOF muito baixo.

4.3.4. Modelagem matemática das respostas

A partir dos dados experimentais apresentados pela **Tabela 4.8**, é possível estabelecer relações matemáticas entre as respostas analisadas e os parâmetros do processo. Assim, a seção 2.6.2 apresentou a Eq. (2.6) como o modelo de superfície de resposta de segunda ordem utilizado para representar a relação aproximada entre uma dada resposta de interesse e os parâmetros de entrada. Dessa forma, considerando o processo abordado pelo presente trabalho, e, de posse dos valores presentes na **Tabela 4.8** onde são mostrados os efeitos os coeficientes dos modelos reduzidos, escrevem-se a Eq. (2.5) conforme indica a Eq. (4.2) a seguir.

$$y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_4 D + \beta_{11} A^2 + \beta_{22} B^2 + \beta_{33} C^2 + \beta_{44} D^2 + \beta_{12} AB + \beta_{13} AC + \beta_{14} AD + \beta_{24} BD + \beta_{34} CD \quad (4.2)$$

onde: y – Resposta de interesse

$\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ – Coeficientes a serem estimados ($i = 1, 2, 3, 4$ e $i < j$).

A – Tempo de preaquecimento

B – Corrente de preaquecimento

C – Tempo de solda

D – Corrente de solda

Em função da redução dos modelos, as **equações 4.3; 4.4, 4.5 e 4.6** apresentam os modelos reduzidos finais obtidos para a resistência ao cisalhamento (RC), a deformação na força máxima (DFmáx.), a indentação coletada pelo sensor (IS), e a indentação medida pelo relógio (IM), respectivamente.

$$RS = 5134,16 + 226,25A + 142,58 B + 338,25C + 256,92D - 108,29D^2 + 70,13AB - 81AC - 83,5BD - 59,37CD \quad (4.3)$$

$$DFmáx. = 2,99479 + 0,27958A + 0,23458B + 0,37708C + 0,28958D - 0,06206B^2 - 0,13706C^2 - 0,21706D^2 + 0,17188AB - 0,08688AC - 0,09812BD \quad (4.4)$$

$$IS = 0,27470 + 0,03697A + 0,02205B + 0,03629C + 0,02470D - 0,01193D^2 + 0,01547AB + 0,01298AC + 0,01336AD + 0,01094BD \quad (4.5)$$

$$IM = 0,3324 + 0,05896A + 0,04479B + 0,05812C + 0,03438D - 0,01145A^2 - 0,0227D^2 + 0,02531AB + 0,01969AD + 0,01969BD \quad (4.6)$$

4.3.5. Análise de resíduos

Os resíduos analisados pelo *software* estatístico *MINITAB*® são definidos pela diferença entre o valor previsto do modelo e o valor experimental. Tais valores devem ser normais, aleatórios e não correlacionados (MONTGOMERY, 2005). Na **Tabela 4.09** pode-se observar que os resíduos são normais para todas as respostas, visto que apresentaram coeficientes de *Anderson-Darling* (AD) < 1 e, *p-values* > 0,05. A análise de aleatoriedade dos resultados foi feito pelo teste *Run Chart* indicando assim que não há correlação entre os resíduos com exceção para a resposta IS que apresentou valores de Clustering < 0,05. A aleatoriedade é valida para todos os valores maiores que 0,05 para *Clustering, Mixtures, Trends e Oscillation*, descritos na **Tabela 4.10**. Finalmente, o teste *Autocorrelation* indicou que a autocorrelação é valida para todas as respostas, menos para os valores de IS que fogem dos limites requeridos.

Tabela 4.9 - Análise dos Resíduos

Análise dos resíduos		RC	DFmáx.	IS	IM
Teste de normalidade	AD	0,287	0,628	0,669	0,121
	<i>p-value</i>	0,598	0,093	0,073	0,987

Tabela 4.10 - Indicadores “*Run Chart*”

Respostas	Approx P-value for:			
	Clustering	Mixtures	Trends	Oscillation
RC	0,430	0,570	0,279	0,721
DFmáx.	0,575	0,425	0,153	0,847
IS	0,001	0,999	0,442	0,558
IM	0,051	0,949	0,615	0,385

Ao final desta análise, verificou-se que os resíduos de todas as respostas encontram-se normais, não correlacionados e aleatórios, com exceção para IS, onde os resultados se diferenciam pela correlação e aleatoriedade.

4.3.6. Análise dos efeitos principais dos parâmetros

A partir do desenvolvimento dos modelos completos, torna-se possível analisar a maneira como as respostas do processo se comportam. Sendo assim, as influências dos parâmetros do processo RSW sobre, a resistência ao cisalhamento, à deformação máxima, a indentação medida pelo sensor de deslocamento do eletrodo, a indentação medida pelo relógio apalpador das chapas de aço galvanizado, são discutidas na seção a seguir.

4.3.6.1. Resistência ao cisalhamento e a deformação na força máxima

As *Figuras 4.16 e 4.17* apresentam os efeitos principais dos parâmetros na resistência ao cisalhamento (RC) e na deformação pela força máxima (DF_{máx.}). Observa-se um comportamento similar dos efeitos dos parâmetros nas duas respostas provavelmente pela correlação entre os efeitos físicos, onde uma maior deformação deve resultar em uma maior resistência ao cisalhamento e vice-versa. Assim também o aumento do tempo de preaquecimento (T_{preaq}) e do tempo de solda (T_{solda}) implica em maiores valores para RC e DF_{máx.} Isto ocorre devido provavelmente ao fato de que com o aumento do tempo de preaquecimento e de solda, o diâmetro do ponto de solda aumenta, gerando um maior valor de RC e DF_{máx.}

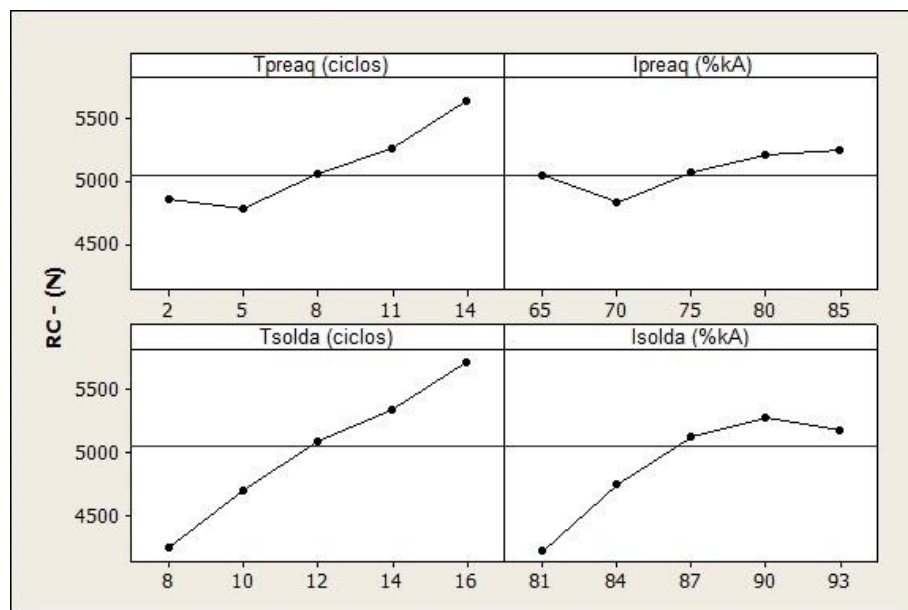


Figura 4.16 - Efeito dos parâmetros na resistência ao cisalhamento.

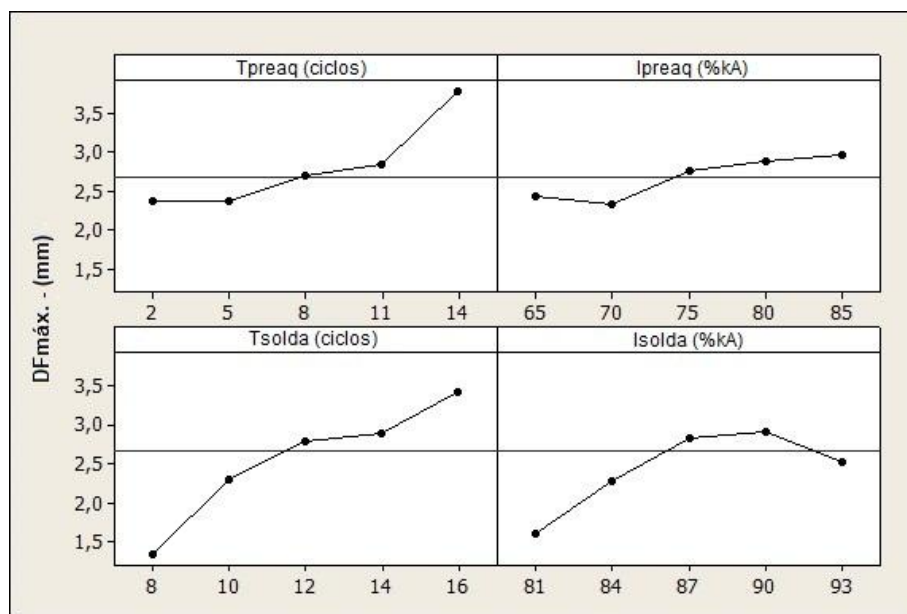


Figura 4.17 - Efeito dos parâmetros na deformação na força máxima.

Nota-se que para ambas as respostas que os valores de tempo são mais significativos comparados aos valores de corrente. Ainda neste contexto também se observa, que intensidades superiores a 90% da corrente máxima provocam uma redução na RC e DFmáx. Pode-se dizer que, valores superiores a 90% de corrente podem levar a uma degradação da ponta do eletrodo pelo intenso aquecimento, e que, pode conduzir a intensificação na formação da película de Cu/Zn (latão) aumentando a resistividade elétrica na ponta dos eletrodos.

4.3.6.2. Indentação medida pelo sensor de deslocamento e relógio apalpador

Observa-se nos gráficos das *Figuras 4.18 e 4.19* que os valores de tempo de solda (tsolda) e os parâmetros de preaquecimento (Tpreaq e Ipreaq) são influentes para o aumento de IS e IM. Já para valores acima de 87% de Isolda, a influência na IM é menor. Entende-se, portanto que, quanto mais tempo aplicado, maior aporte térmico no metal base, e como consequência uma maior indentação. Talvez para valores mais baixos de parâmetros de tempo de preaquecimento e de tempo de solda podem-se obter valores menores de indentação, o que é desejável pela indústria. Deve-se, portanto atentar, para o fato da possibilidade de diminuição na resistência ao cisalhamento nestas condições.

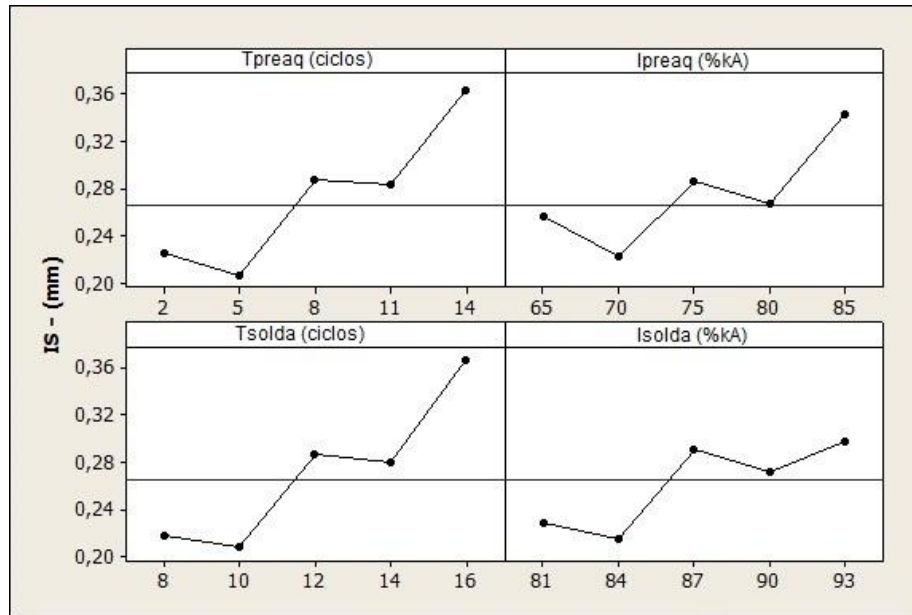


Figura 4.18 - Efeito dos parâmetros na indentação medida pelo sensor.

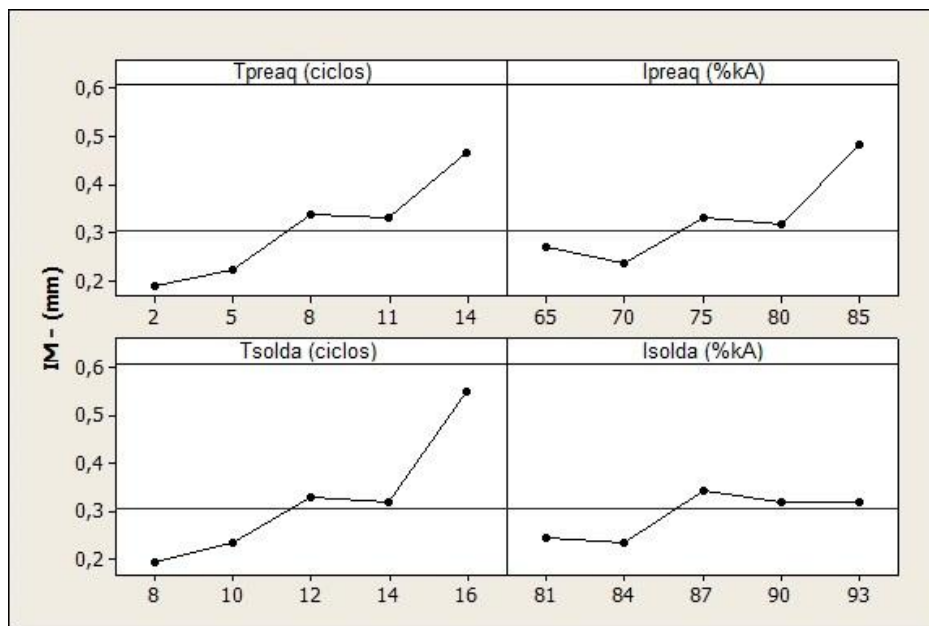


Figura 4.19 - Efeito dos parâmetros na indentação medida pelo relógio apalpador.

4.3.7. Análise dos efeitos das interações entre os parâmetros

Na *Tabela 4.8*, observa-se que o efeito conjunto de alguns parâmetros influencia de forma significativa os resultados do processo. As *Figuras 4.20 – 4.23* apresentam a interação do tempo de solda e do tempo de preaquecimento sobre as respostas escolhidas.

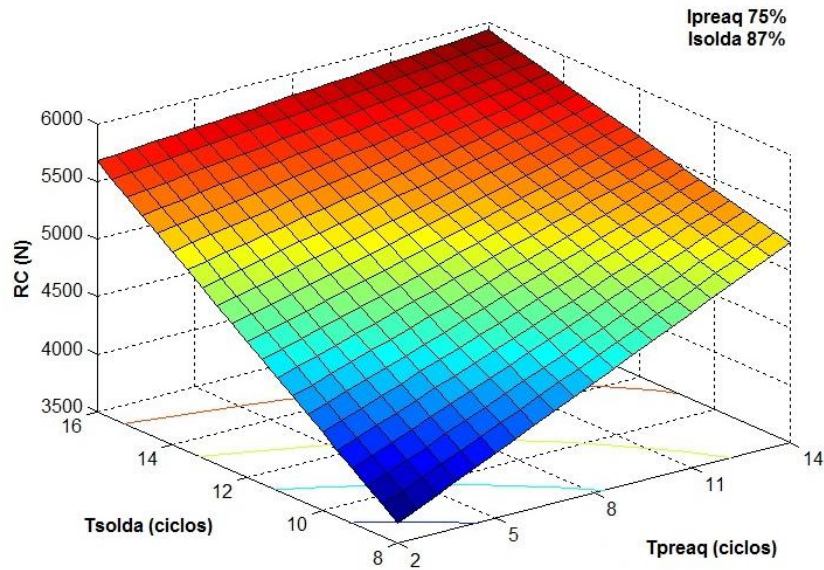


Figura 4.20 - Influência da interação significativa par RC.

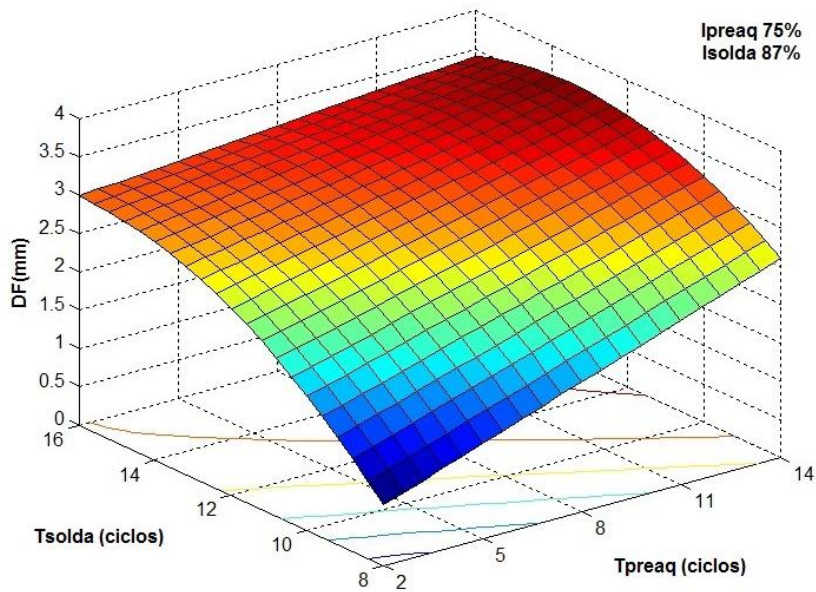


Figura 4.21 - Influência da interação significativa para DFmáx.

Na **Figura 4.20** o aumento de RC ocorre devido o crescimento do diâmetro do ponto que está relacionado ao tempo de aporte térmico. Observa-se que o tempo de solda tem maior influência devido a maior inclinação da superfície de resposta ao lado correspondente a este parâmetro. O mesmo ocorre para IS e IM nas **Figuras 4.22 e 4.23**, em que a inclinação da superfície de resposta também é maior para o tempo de solda.

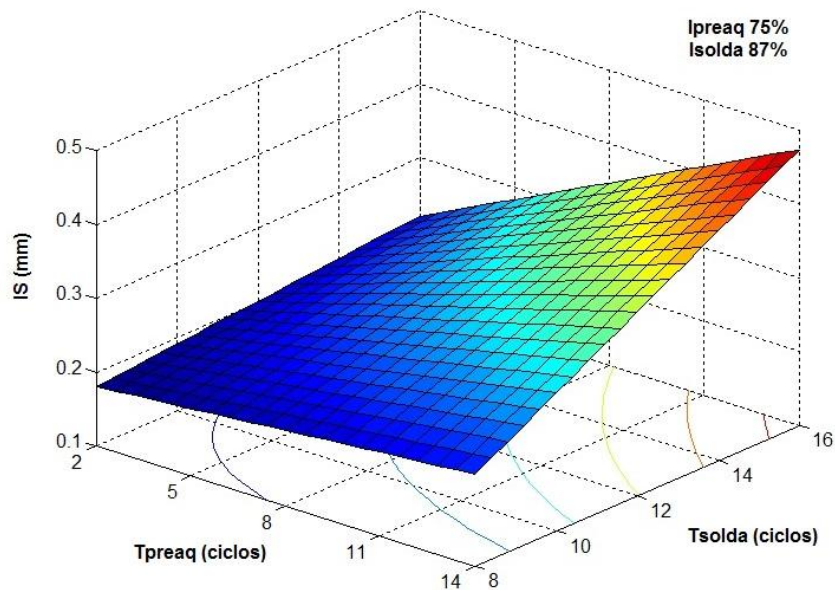


Figura 4.22 - Influência da interação significativa para IS.

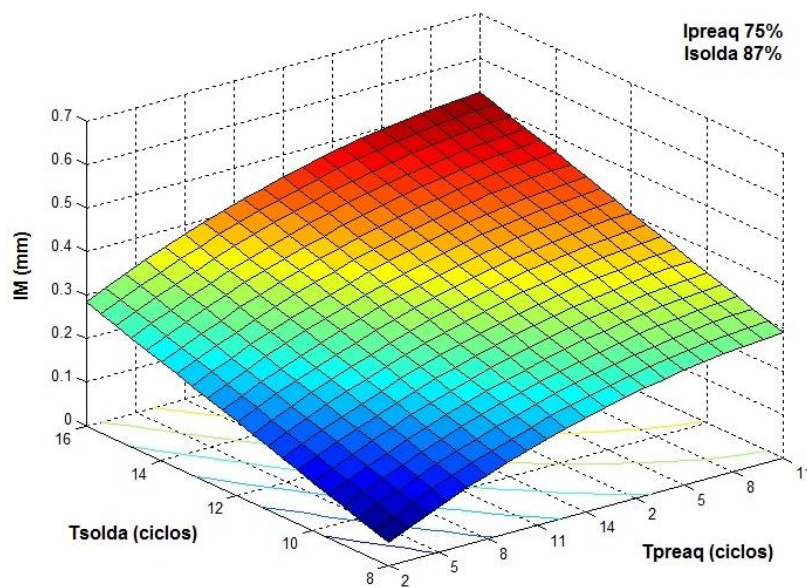


Figura 4.23 - Influência da interação significativa para IM.

4.4. Otimização no processo de soldagem

Considerando a confiabilidade dos modelos matemáticos desenvolvidos, procurou-se nesta etapa final realizar uma otimização dos resultados no sentido de obter uma condição de regulação dos parâmetros ao impor algumas restrições. Neste sentido, considerando os dados da **Tabela 4.6**, foi utilizado a ferramenta Desirability (D) do *software MINITAB®*, cujas condições estabelecidas estão mostradas na **Tabela 4.11**.

Tabela 4.11 - Parâmetros da otimização.

Parametrização prevista		Respostas escolhidas	Alvo	Limites estabelecidos			Respostas previstas	D	CD
Parâmetros	Valores			Mín.	Target	Máx.			
Tpreaq. (ciclos)	2	RC (N)	Target	5000	5200	5400	5202	0,98	
Ipreaq. (Amperes)	70	DFmáx. (mm)	Máx.	2,80	3,00	3,00	2,98	0,90	0,96
Tsolda (ciclos)	14	IM (mm)	Target	0,15	0,20	0,25	0,20	1,00	
Isolda (Amperes)	89	*	*	*	*	*	*	*	*

Nota: **D** = Desirability; **CD** = Composite Desirability. 6 kA = 100% da corrente.

Como se pode perceber, não se incluiu entre as respostas a identificação obtida pelo sensor (IS) pelo baixo valor de LOF observado no modelo matemático. Assim, realizaram-se três experimentos de confirmação, com o intuito de comparar os resultados reais com os resultados calculados para a condição otimizada. Os testes foram feitos utilizando os parâmetros previstos fornecidos pelo *MINITAB®*. Os resultados obtidos são mostrados na **Tabela 4.12**.

Tabela 4.12 - Resultados obtidos.

Corpo de prova	RC	DFMÁX.	IM (mm)		
	N	Mm	Min.	Max.	Méd.
CP1	5076	2,8	0,22	0,37	0,295
CP2	5072	3	0,25	0,41	0,33
CP3	4941	2,9	0,22	0,52	0,37
Média	5029,67	2,90	0,23	0,43	0,33
Previsão	5202,00	2,98	*	*	0,20
Erro	3,31%	2,68%	*	*	39,4%

Para o valor de IM o erro encontrado, já era esperado. Isto acontece porque o valor de $R^2(\text{adj.})$, descrito na **Tabela 4.9**, se apresenta como o menor valor entre as respostas, o que significa que o nível de confiança do modelo matemático para IM, é o menor entre os outros, e que, provavelmente devido à variação no sistema de medição (procedimento de medição). Para efeito de cálculo dos valores de IM foi considerada a média do valor.

Considerando que a norma AWS/SAE D 8.9 não relata um limite para a indentação máxima permissível (Wolf, 2010), e que, o resultado ótimo real de RC e DFmáx. se aproximam dos resultados teóricos já que a maior diferença entre eles é de 3,31%, e que, outras respostas como diâmetro do ponto de solda, apresentaram valores superiores a 4 mm, e também que o modo de ruptura apresentou-se como adequado para esta confirmação, ficam validados os resultados obtidos pela otimização.

4.4.1. Regiões ótimas dos parâmetros de soldagem

Considerando os parâmetros pré-estabelecidos de corrente de preaquecimento e de solda para valores mínimos, médios e máximos, e também os limites requeridos nas respostas escolhidas, foram gerados gráficos representados nas **Figuras 4.24 – 4.26** com a utilização do *software* estatístico MINITAB®.

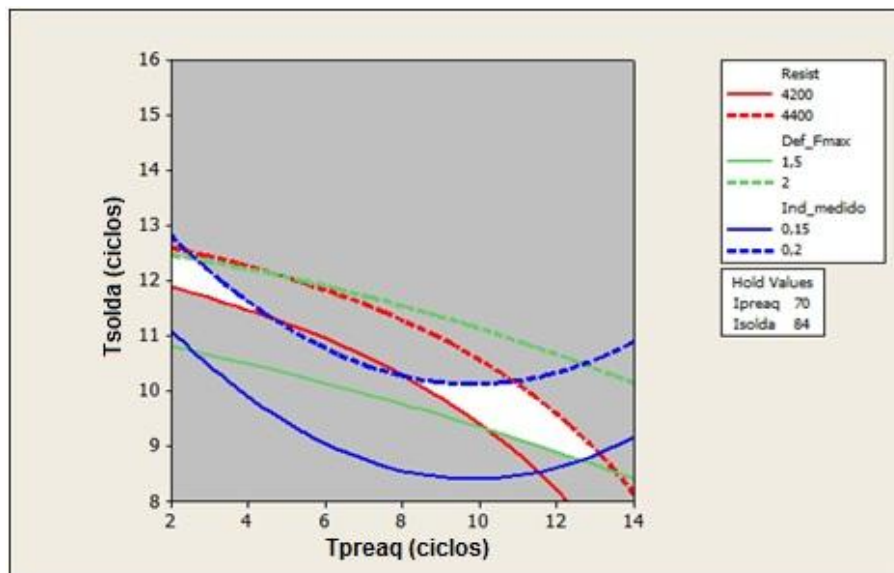


Figura 4.24 - Região otimizada de soldagem considerando níveis baixos de corrente.

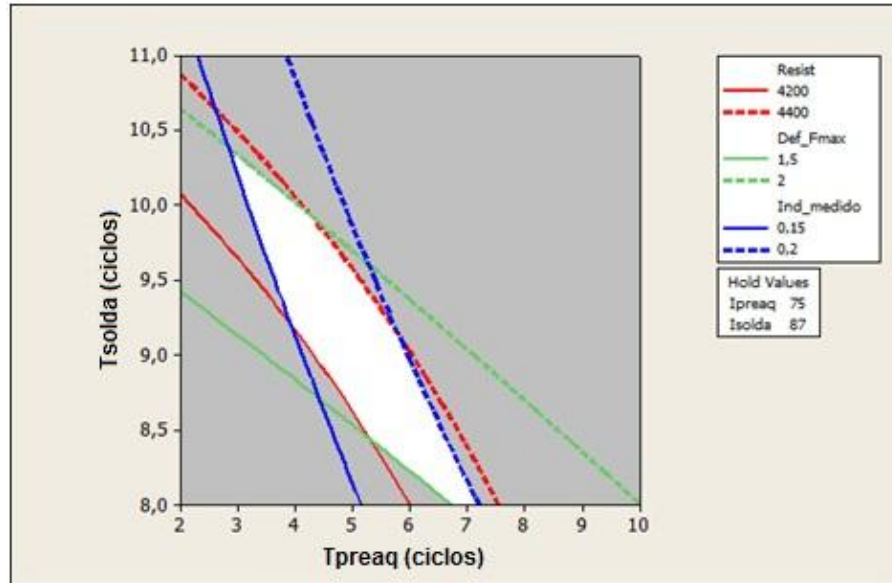


Figura 4.25 - Região otimizada de soldagem considerando níveis médios de corrente.

A região que contém a cor branca representa as zonas ótimas em que os parâmetros são adequados para se obter uma solda de qualidade. Um resultado comum observado nas **Figuras 4.24 – 4.26** é que o tempo de solda é inversamente proporcional ao tempo de preaquecimento.

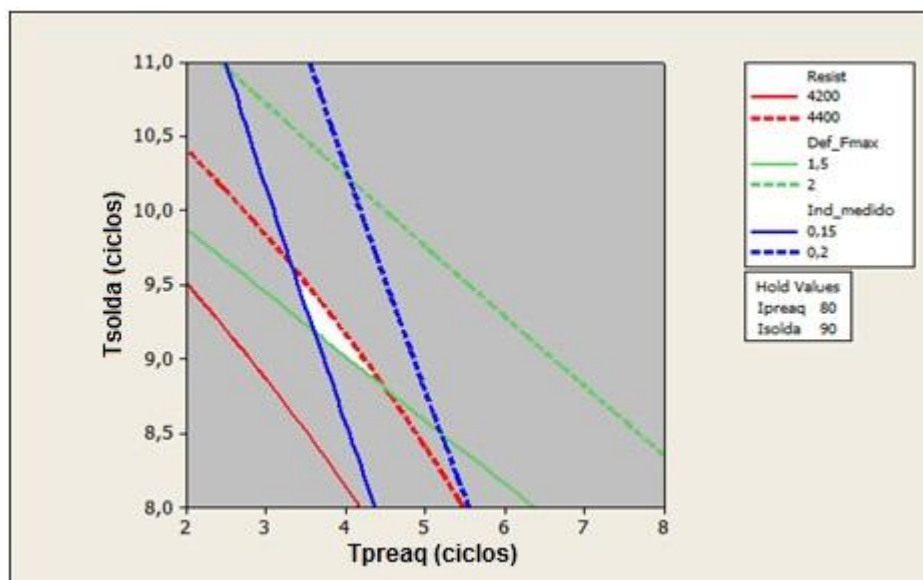


Figura 4.26 - Região otimizada de soldagem considerando níveis altos de corrente.

Desta forma, pode-se dizer que as figuras acima mostram nitidamente que para um tempo maior de preaquecimento necessita-se de um menor tempo de solda. Esta afirmação é mais bem visualizada na **Figura 4.24** e, pode ser muito interessante para o meio industrial, onde a busca constante por redução de tempos de produção é intensa. Assim também, considerando a média da resistência ao cisalhamento, os testes da **Tabela 4.6** que possuem o tempo e, corrente de preaquecimento dentro dos limites dos envelopes da **Figura 4.11**, têm valores mais altos em comparação aos os testes que tem o tempo e a corrente de preaquecimento fora dos limites deste envelope.

Entende-se, portanto que, juntamente com a observação das **Figuras 4.24 – 4.26** que, para obter-se um ponto de solda de qualidade satisfatória, com a utilização de níveis maiores de tempo e corrente de preaquecimento, necessita-se de níveis menores de tempo e corrente de solda, ou, vice-versa. Todavia, maiores níveis de preaquecimento se mostraram mais adequados, tanto para o aumento da resistência, como também, porque a remoção do zinco diminui a formação de ligas de Cu_Zn na ponta do eletrodo, fato este, que, aumenta a sua vida útil (KONDO *et al.*, 2010).

Capítulo 5

5. CONCLUSÕES

5.1. Conclusões Gerais

De posse dos resultados apresentados e discutidos, ao longo do capítulo anterior, descrevem as seguintes conclusões:

- O sinal de deslocamento do eletrodo mostrou ser um método confiável e preciso na indicação de parâmetros de tempo necessários para a remoção eficaz do zinco, tanto na interface interna quanto externa.
- Os resultados gerados durante a validação do método mostraram que a remoção ideal do zinco inicia-se a partir de nível mínimo de corrente de 70% de I_{preaq} utilizando 30 ciclos de T_{preaq} , considerando um diâmetro de 5 mm na ponta do eletrodo.
- Após o processo de “amaciamento”, o diâmetro da face do eletrodo apresenta uma redução extremamente pequena, mas suficiente para aumentar a densidade de corrente.
- As análises estatísticas permitiram avaliar que os parâmetros de tempo de preaquecimento e de solda, se mostraram mais influentes na análise da resistência ao cisalhamento.
- A formação de uma auréola de zinco ao redor da zona de contato, tanto na interface interna como na externa da chapa de aço galvanizada é um excelente indicador visual

de que, o zinco foi afastado para as bordas da zona de contato, ou seja, houve uma remoção adequada do zinco.

- A regra da inversão proporcional entre o tempo (ciclos) e a corrente (%kA) de solda, pode ser utilizada durante a fase de preaquecimento, ou seja, quanto maior o nível de corrente menor o tempo de pré-aquecimento.
- Quando se considera a qualidade do ponto soldado observa-se que a fase do preaquecimento conjuntamente com a fase de solda se mostraram influentes.

5.2. Sugestão de Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, ficam as seguintes considerações:

- Utilizar métodos de análise de sinais para filtrar as interferências apresentadas no sinal de deslocamento do eletrodo quando se utilizada uma alta taxa de amostragem.
- Estender a metodologia desenvolvida neste trabalho para o processo RSW de chapas de aço galvanizados por imersão.
- Avaliar as variações presentes no método de deslocamento do eletrodo com intuito de aumentar a precisão dos resultados.
- Verificar a influência dos níveis baixos e altos de preaquecimento, na vida útil do eletrodo.
- Analisar o sinal de deslocamento do eletrodo para outros materiais como cobre, alumínio e suas ligas e aço inoxidável.
- Analisar a hipótese de ocorrência de magnetização do aço galvanizado durante o processo RSW por meio da expansão térmica da chapa e deformação detectada pelo sensor de deslocamento.
- Utilizar a MEV e MO para classificar e quantificar a morfologia da camada de zinco nas chapas de aço galvanizados pelo processo de eletrodeposição e por imersão.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ANDREWS, D. R. & BROOMHEAD, J. Quality Assurance for Resistance Spot Welding. *Welding Journal*, v.54, no.6, pp. 431-435, June, 1975.

ASLANLAR, S. The effect of Nucleus Size on Mechanical Properties in electrical Resistance Spot Welding of Sheets used in Automotive Industry. *Materials and Design*. v.25, pp. 125-131, 2006.

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

AZAMBUJA, S. & BARCELOS, E. J. Soldagem de Chapas Zincadas Convencionais pelo Processo a Ponto por Resistência Elétrica. *XII Encontro Nacional sobre Tecnologia de Soldagem*, Rio de Janeiro, pp. 1-18, 1987.

AWS. Welding Handbook, Miami: *American Welding Society* . v.2, 8th ed., 1995.

AWS. Welding Handbook. Miami: *American Welding Society*, v.4, p. 233-332, 1998.

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

BABU, S. S.; SANTELLA, M. L.; FENG, Z.; RIEMER, B. W.; COHRON, J. W. Empirical Model of Effects of Pressure and Temperature on Electrical Contact Resistance of Metals. *Science and Technology of Welding and Joining*, v.6, no. 3, 2001.

BRACARENSE, A. Q. & ROGANA, W. G. Fixadores e Posicionadores para Soldagem Robotizada. *Revista Soldagem e Inspeção, ABS*, Belo Horizonte, v.6, nos. 2 e 3, pp.23-26, 2000.

BRANCO, H. L. O. *Avaliação de Capas de Eletrodos Utilizadas na Soldagem de Chapas Galvanizadas na Indústria Automobilística*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, 116p, 2004.

CHANG, H. S. & CHO, H. S. A Study on the Shunt Effect in Resistance Spot Welding. Article published source: *Welding Journal*, August, p.308s-318s, August 1990.

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.

CHUNTÃO, J. & LIPENG, D. Quality Control Based on Electrode Displacement and Force in Resistance Spot Welding. *School of Materials Science and Engineering*, v.5, no. 4, pp. 412-416, June, 2010.

DARWISH, S.M. & AL-DEKHAL, S.D. Statistical Models for Spot Welding of Commercial Aluminium Sheets. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. v.39, no. 10, p.1589-1610, 1999.

DIEBOLD, J. M. Welding Galvanized Steel in Automotive Applications – *Metal Progress*, p.72-77, March, 1962.

AMARAL, F. F. *Monitoramento da Qualidade na Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica de Chapas de Aço Galvanizadas Baseado em Análise de Experimentos*, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, 72p., 2011.

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

FURLANETTO, V. *Proposta e Validação Experimental de um Modelo para Máquina de Solda a Ponto CA*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 88p., 2005.

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

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

GENERAL MOTORS. Handbook, 1996.

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.

INFORMATIVO. Soldagem de Chapas Zincadas, *Soldagem e Materiais*, vol. 6, no. 4, 1994.

INTERMACHINERY. *Manual de Soldagem por Resistência a Ponto*, pp. 41, 2002.

ISO / DIS 14373. Welding Resistance Spot Welds: Procedure for Spot Welding of Uncoated and Coated Low Carbon and High Strength Steels. *International Standard Organization*, Genebra, October, 2004.

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, 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.

KONDA, R.; RAJURKAR, K. P.; BISHOP, R. R.; GUHA, A.; PARSON, M. Design of Experiments to Study and Optimize Process Performance. *International Journal of Quality & Reability Management*, v.16, no. 1, pp.56-71, 1999.

KONDO, M.; KONISHI, T.; NOMURA, K.; KOKAWA, H. Degradation Mechanism of Electrode Tip during Alternate Resistance Spot Welding of Zinc Coated and Uncoated Steel Sheets. *Science and Technology of Welding and Joining*, v.15, no. 1, pp. 76-80, 2010.

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

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; no. 5; pp. 320-328, 2001.

LUO, Y.; LIU J.; XU, H.; XIONG, C.; LIU, L. Regression modeling and process analysis of resistance spot welding on galvanized steel sheet. *Materials and Design*. No. 30, pp. 2547-2555, 2009.

MA, C.; BHOLE, S. D.; CHEN, D. L.; LEE, A.; BIRO, E.; BOUDREAU, G. Expulsion Monitoring in Spot Welded Advanced High Strength Automotive Steels. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 11, no. 4, p.486, 2006.

MBN 10 382. Resistance Spot Welding of Steel, Thickness up to 3mm. *Mercedes-Benz*, no. 37, 20p, 2005.

MEDAR. *Treinamento Básico do Processo de Soldagem por Resistência para Operadores e Preparadores de Máquina*. Pouso Alegre: Usiminas, 81p, 2005.

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.

MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q.; MARQUES, P. Q. *Soldagem Fundamentos e Tecnologia*. Belo Horizonte: UFMG, pp. 293 - 296, 1996.

MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. New York: John Wiley, 643p, 2005.

MONTGOMERY, D. C. & RUNGER, G. C. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. Rio de Janeiro: LTC, 514p, 2003.

MYERS R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C.M. *Response Surface Methodology*, 3th Edition, John Wiley & Sons, 2009.

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

NILO JÚNIOR, L. P. *Otimização de um Processo de Solda MIG/MAG para Aplicação na Indústria Automobilística através da utilização da Técnica do Projeto e Análise de Experimentos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, 111p, 2003.

PAIVA, A. P. *Metodologia de Superfície de Resposta e Análise de Componentes Principais em Otimização de Processo de Manufatura com Múltiplas Respostas Correlacionadas*. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 229p, 2006.

PODRZAJ; P.; POLAJNAR, I.; DIACI, J.; KARIZ, Z. Overview of Resistance Spot Welding Control. *Science and Technology of Welding and Joining*, v.13, no. 3, pp. 215-224, 2008.

PRASAD, K. S.; RAO, C.S.; RAO, D.N. Application of Design of Experiments to Plasma. Arc Welding Process: a Review. *Journal of the Brazilian Soc. Mech. Sci. & Eng*, v.34, no. 1, pp.1-7, January, 2012.

REU. Schweißtechnik GmbH – *Recycling Entwicklungs Unternehmen. Grundlagen der Widerstandsschweißtechnik*, p. 336, 1997.

ROSSI, G. P. *Estudo de Correlação do Comportamento de Pontos de Solda em Corpos de Prova pelo Método dos Elementos Finitos*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 113p, 2007.

RWMA - Resistance Welder Manufacturers Association. Eletrodos e Ferramentas Utilizadas no Processo de Soldagem por Resistência Elétrica, p. 1-13, 2002.

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

TECNOWELDING COMÉRCIO LTDA. *Fundamentos do Processo de Soldagem a Resistência*. 70 p., 2004.

TSENG, H.U. Welding Parameters Optimization for Economic Design using Neural Approximation and Genetic Algorithm. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, v.27, pp.897-911, 2005.

USIMINAS. *Material de Treinamento Introdutório aos Conhecimentos Básicos do Processo de Soldagem por Resistência.* Pouso Alegre: Automotiva Usiminas, 34 p, 2010.

VARGAS, J. E. *Estudo da Formação, Geometria e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistência.* Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, 143 p., Universidade de Brasília, 2006.

VARGAS, J. E.; ALFARO, S. C. A.; VILARINHO, L. O. Avaliação das Características Geométricas e de Propriedades Mecânicas do Ponto na Soldagem por Resistência Via Planejamento Robusto. *Soldagem & Inspeção*, v.12, no. 4, pp.262-268, Out/Dez, 2007.

WEINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. *Soldagem: Processos e Metalurgia.* São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1992.

WILLIAMS N. T. Problems in the Resistance Welding of Coated Steels. *Sheet Metal Industries*. pp. 625-638, October, 1972.

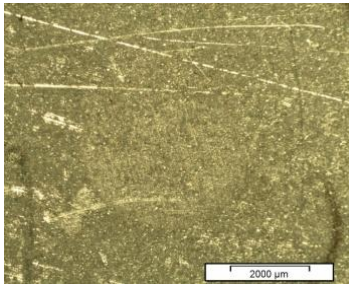
WILLIAMS, N. F. & PARKER, J. D. Review of Resistance Spot Welding of Steel Sheets, Part 1: Modeling and Control of Weld Nugget Formation. *Int. Mat. Review*, v.49, no2, p.45-75, 2004^a.

WILLIAMS, N. F. & PARKER, J. D. Review of Resistance Spot Welding of Steel Sheets, Part 2: Factors influencing Electrode Life. *Int. Mat. Review*, v.49, no2, p.77-108, 2004^b.

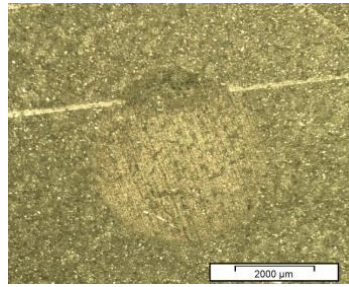
ZHOU, M; ZHANG, H.; HU, S. J. Relationships between Quality and Attributes of Spot Welds. *Welding Journal*, p. 72s-77s, April, 2003.

ANEXOS

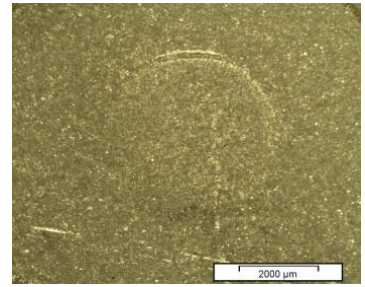
ANEXO I – Formações de auréola de zinco observadas nos experimentos da Tabela 4.2. (a) Interface externa, (b) Interface interna.



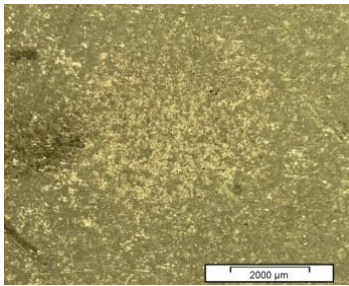
Experimento 1(a)



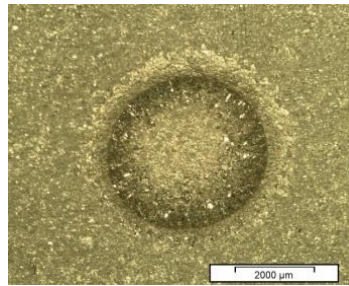
Experimento 2(a)



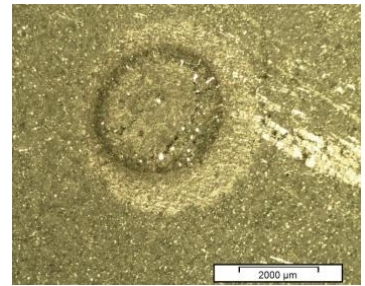
Experimento 3(a)



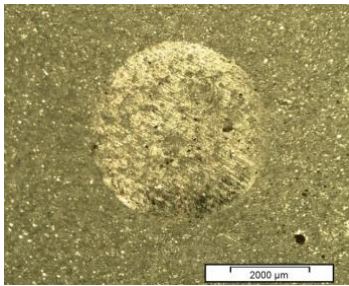
Experimento 1(b)



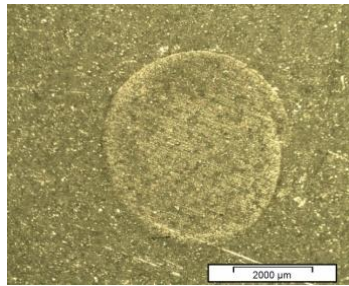
Experimento 2(b)



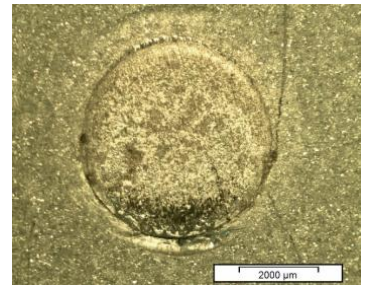
Experimento 3(b)



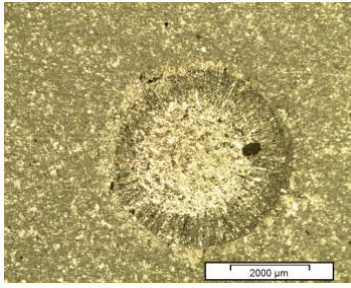
Experimento 4(a)



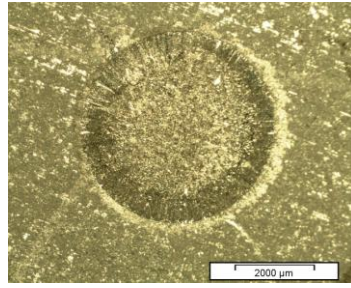
Experimento 5(a)



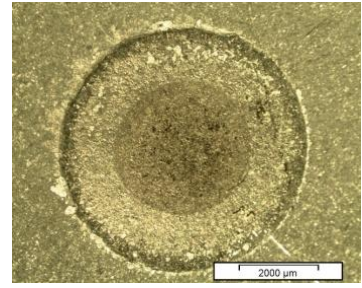
Experimento 6(a)



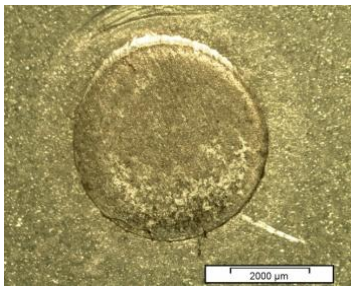
Experimento 4(b)



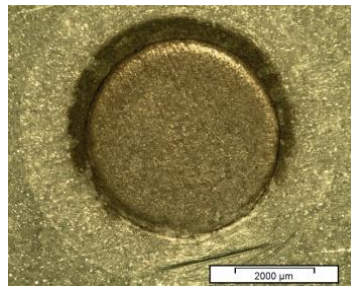
Experimento 5(b)



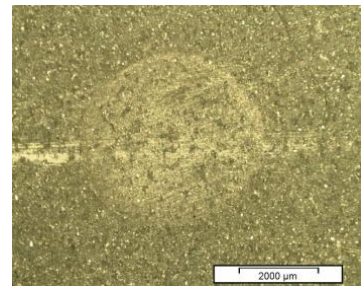
Experimento 6(b)



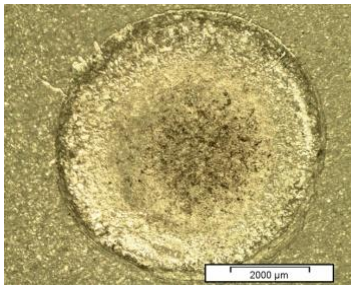
Experimento 7(a)



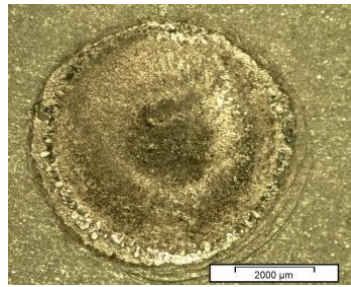
Experimento 8(a)



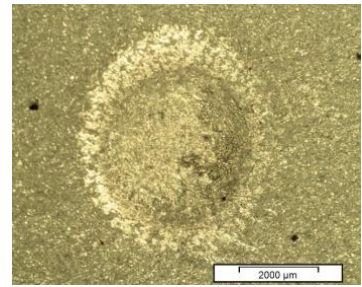
Experimento 9(a)



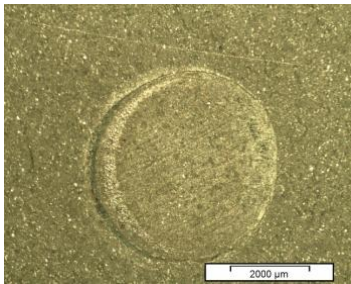
Experimento 7(b)



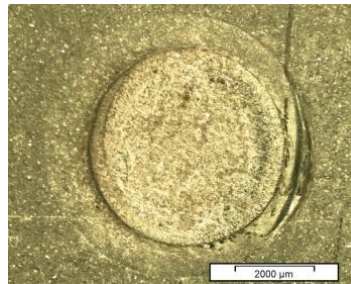
Experimento 8(b)



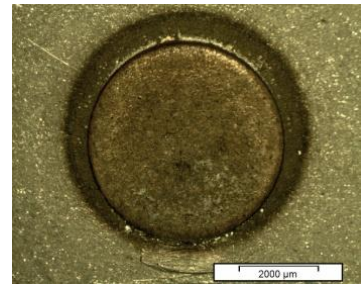
Experimento 9(b)



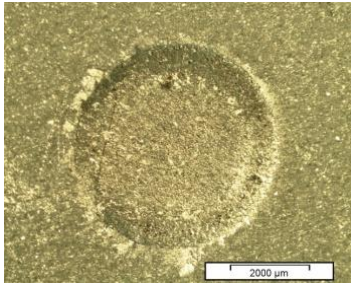
Experimento 10(a)



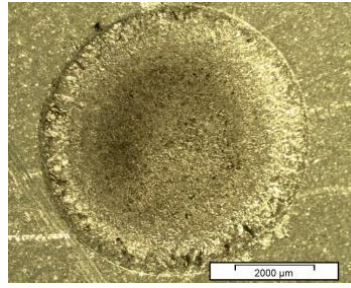
Experimento 11(a)



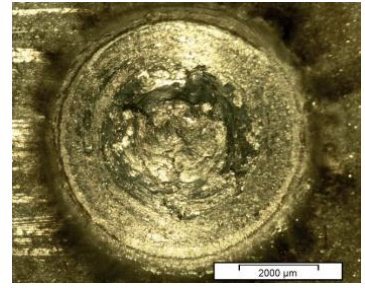
Experimento 12(a)



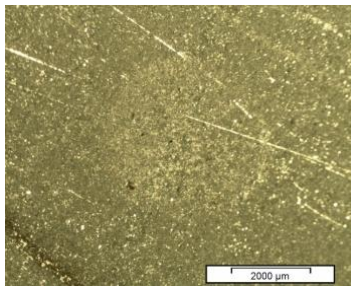
Experimento 10(b)



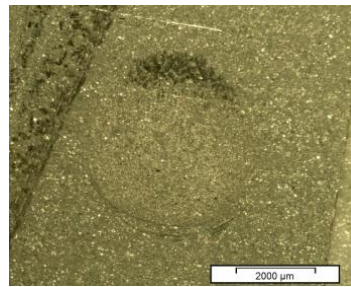
Experimento 11(b)



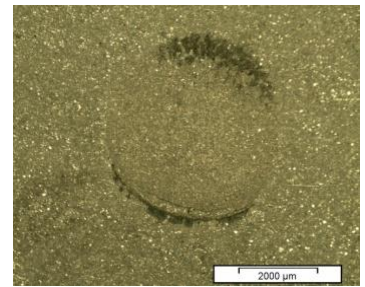
Experimento 12(b)



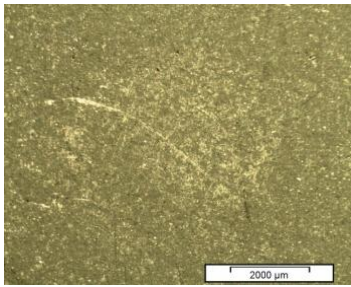
Experimento 13(a)



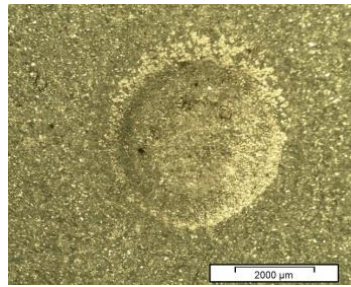
Experimento 14(a)



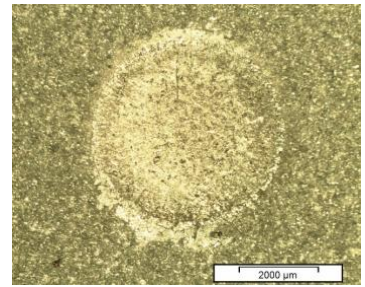
Experimento 15(a)



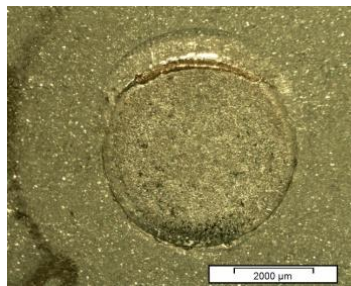
Experimento 13(b)



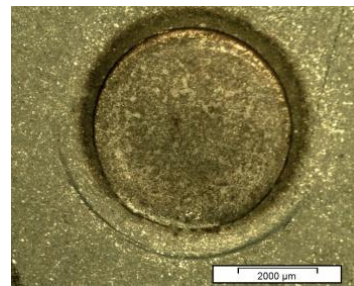
Experimento 14(b)



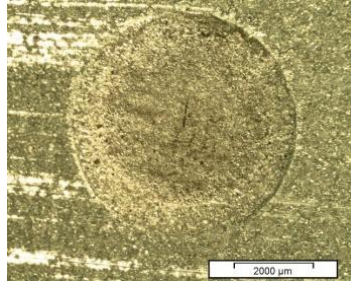
Experimento 15(b)



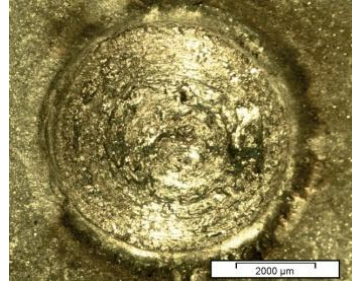
Experimento 16(a)



Experimento 17(a)



Experimento 16(b)



Experimento 17(b)