VINICIUS CASTANHEIRA DO NASCIMENTO

SELEÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA, BASEADO NA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA ENTRE CHAPAS

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECANICA

2008

VINICIUS CASTANHEIRA DO NASCIMENTO

SELEÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA, BASEADO NA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA ENTRE CHAPAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Américo Scotti.

UBERLANDIA-MG
2008

FICHA CATALOGRÁFICA

N244a Nascimento, Vinicius Castanheira do, 1978-

Seleção de parâmetros de soldagem a ponto por resistência, baseado na medição da resistência elétrica entre chapas/ Vinicius Castanheira do Nascimento. - 2008.

130 f. : il.

Orientador: Américo Scotti.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui bibliografia.

1. Soldagem - Teses. I. Scotti, Américo. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621.791

VINICIUS CASTANHEIRA DO NASCIMENTO

SELEÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA, BASEADO NA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA ENTRE CHAPAS

Dissertação **APROVADA** pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Banca Examinadora:

_____

Prof. Dr. Américo Scotti – UFU – Orientador

_____

Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha – Poli-USP

_____

Prof. Dr. Valtair Antonio Ferraresi - UFU

_____

Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho - UFU

Uberlândia, ___ de _____ de 2008

Aos meus pais, Edson e Lélia.
Às minhas irmãs, Flávia e Ludmilla.

"Se fecharmos a porta a todos os erros, a verdade ficará de fora".

(Rabindranath Tagore - pensador indiano)

“Só algumas pessoas se interessam pelo que você tem a dizer, mas não faz mal. Não se julga a qualidade do Mestre pelo tamanho do seu público”.

(Richard Bach)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica, pela oportunidade de realizar este Curso;

Aos meus pais, por todos os ensinamentos, exemplo de vida e pelo apoio especial nas horas de maior dificuldade;

A CAPES pelo suporte financeiro, através de uma bolsa de estudo;

Ao Prof. Scotti pelos ensinamentos, a orientação, as discussões, por sua grande colaboração e atenção, e por sua amizade;

Aos professores do Laprosolda, Valtair e Louriel, pelos ensinamentos, ajuda técnica e por sua amizade;

Ao coordenador Márcio Bacci, à sua colaboradora Kelly e ao Colegiado do Programa de Pós-graduação;

Aos colegas do Laprosolda Daniel, Diandro, André, Marco Antonio, Alexandre Saldanha, Márcio Andrade, Rômulo, José Enrique, Douglas, Demostenes, Ricardo, Thiago, Elias, Adalto entre outros, pela colaboração no dia-a-dia.

NASCIMENTO, V.C. **Seleção de Parâmetros de Soldagem a Ponto por Resistência, Baseado na Medição da Resistência Elétrica entre Chapas.** 2008. 130f. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

A aplicação da solda a ponto por resistência elétrica em produção em série pode vir a requerer uma programação prévia de variação da regulagem de parâmetros, em função da demanda por mudança seqüencial, tanto devido ao tipo de material como a de sua espessura. Caso a operação seja manual, o operador é quem terá de fazer a troca de programa sempre que identificar diferentes condições numa mesma seqüência de pontos. Por se tratar de uma operação "on-line", torna-se uma fonte de erro em potencial. Dessa forma, a principal motivação deste trabalho foi a verificação da possibilidade de se regular os parâmetros de soldagem para soldas a ponto em produção, baseado na medição da resistência elétrica das combinações entre chapas. Uma série de experimentos foi realizada para verificar os parâmetros e o número mínimo de ciclos ideal para se medir a resistência elétrica entre chapas de aço com e sem revestimentos com diferentes combinações de espessura. Verificou-se que é possível se determinar a resistência elétrica de uma combinação de espessuras de chapas com apenas seis ciclos e que a variação da resistência era suficientemente repetitiva e diferenciada para justificar o uso deste princípio na separação de combinações por regiões definidas pela resistência elétrica, tanto pela diferença de espessura das combinações, como pelo tipo de revestimento da superfície. No trabalho também foi definida a técnica conhecida como Queima do Zinco ("burn-zinc") e apresentado um procedimento experimental para se conseguir os parâmetros ótimos para a realização da técnica para combinações entre chapas galvanizadas.

Palavras Chave: Soldagem a Ponto por Resistência. Resistência Elétrica. Resistência Dinâmica. Auto-regulagem. Queima do Zinco (Burn-Zinc).

NASCIMENTO, V.C. **Selection of Resistance Spot Welding Parameters, Based on the Measurement of the Electrical Resistance between sheets.** 2008. 128f. MSc. Dissertation, Federal University of Uberlandia, Uberlandia.

Abstract

Resistance Spot Welding applied in production lines may demand previous programming for welding parameter settings as a function of demanded sequential changes, due to as much as material type as thickness. In the case of a manual operation, the operator is the one in charge of changing the program when different welding conditions is identified in a same sequence of spots. Considering being an “online” operation, this is a potential source of error. Thus, the main motivation for this work was to verify the possibility of parameter regulation in a spot welding production line, based on measurement of the electrical resistance between the sheets. A series of experiments was carried out to verify the minimum number of cycles and the ideal electrical power needed to measure the electrical resistances between carbon steel and galvanized steel and between a different thickness sheets. The results showed that the electrical resistance can be determined from only six cycles and that it is possible to differentiate sheet combinations. They also reveal that the resistances variation amongst sheet combinations were repetitive and distinguished enough to claim the use of this principle to classify the material combinations by regions of electrical resistance, both by the difference in thickness and type of superficial coating. In this work, it was also defined the technique known as the “Burn Zinc” and presented an experimental procedure to achieve optimal parameters to use this technique.

Key words: Resistance Spot welding. RSW. Electrical Resistance. Dynamic Resistance. Burn-Zinc.

Lista de Figuras

FIGURA 2.1– EVOLUÇÃO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM AO LONGO DO TEMPO 6
FIGURA 2.2 – MR. ELIHU THOMSON 6
FIGURA 2.3 – ESBOÇO DO PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA 6
FIGURA 2.4 – RESISTÊNCIAS À PASSAGEM DE CORRENTE NO PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO 8
FIGURA 2.5 – TRANSFORMADOR PARA ELEVAR O VALOR DE CORRENTE 8
FIGURA 2.6 – FORMATO DE ONDA GERADO; A CIMA, CORRENTE ALTERNADA; EM BAIXO, CORRENTE CONTÍNUA 9
FIGURA 2.7 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO TEMPO DE SOLDAGEM 11
FIGURA 2.8 – MÚLTIPLOS IMPULSOS NO PROCESSO DE SOLDAGEM 12
FIGURA 2.9 – CURVA DE FORÇA APLICADA NO PROCESSO DE SOLDAGEM 14
FIGURA 2.10 – CARACTERÍSTICA DINÂMICA DA FORÇA EM UMA SOLDAGEM SEM EXPULSÃO 14
FIGURA 2.11 – CARACTERÍSTICA DINÂMICA DA FORÇA EM UMA SOLDAGEM COM EXPULSÃO 15
FIGURA 2.12 – DISTRIBUIÇÃO DO CALOR NO PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO 15
FIGURA 2.13 – REFRIGERAÇÃO DO ELETRODO 17
FIGURA 2.14 – PERFIL DE TEMPERATURA (°C) ESTIMADA DURANTE A SOLDAGEM 18
FIGURA 2.15 – CAMADAS DE ZINCO DIFUNDIDAS NO COBRE DO ELETRODO 19
FIGURA 2.16 – TIPOS MAIS UTILIZADOS DE ELETRODO NA SOLDAGEM A PONTO 19
FIGURA 2.17 – POSSÍVEIS PROBLEMAS NA REALIZAÇÃO DO PONTO DE SOLDA 24
FIGURA 2.18 – CURVA CARACTERÍSTICA DA RESISTÊNCIA DINÂMICA SEGUNDO CHIEN E KANNATEY 26
FIGURA 2.19 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS NA SOLDAGEM DE AÇO DOCE 27
FIGURA 2.20 – RESISTÊNCIA DINÂMICA SEGUNDO DICKINSON, FRANKLIN E STANYA 28

FIGURA 3.1 – FONTES PRESENTES NO LAPROSOLDA: (A) CORRENTE ALTERNADA E BAIXA FREQÜÊNCIA (LF/AC); (B) CORRENTE CONTÍNUA E MÉDIA FREQÜÊNCIA (MF/DC). 30
FIGURA 3.2 – PLACA DE AQUISIÇÃO E ADAPTADOR 31
FIGURA 3.3 – TELA PRINCIPAL DO PROGRAMA “AQUISIÇÃO.VI” 32
FIGURA 3.4 – TELA PRINCIPAL DO PROGRAMA “VISUALIZADOR DE DADOS.VI”. 32
FIGURA 3.5 – TOMADA DE TENSÃO PARA MONITORAÇÃO DO SINAL DE TENSÃO 33
FIGURA 3.6 – SINAL DE TENSÃO COM ACOPLADOR ÓTICO COM PICOS ANÔMALOS. 34
FIGURA 3.7 – SINAL DE TENSÃO SEM ACOPLADOR ÓTICO, SINAL ESPERADO. 34
FIGURA 3.8 – BOBINA DE ROGOWSKI 35
FIGURA 3.9 – BOBINA FLEXÍVEL 35
FIGURA 3.10 – BOBINA RÍGIDA 36
FIGURA 3.11 – BOBINA FLEXÍVEL UTILIZADA PARA MEDIR O SINAL DE CORRENTE NOS EXPERIMENTOS 36
FIGURA 3.12 – BOBINA RÍGIDA UTILIZADA PARA MEDIR O SINAL DE CORRENTE NOS EXPERIMENTOS 37
FIGURA 3.13 – MONTAGEM DAS BOBINAS NA PINÇA DE SOLDAGEM 37
FIGURA 3.14 – SINAL DE CORRENTE OBTIDO ATRAVÉS DE UMA BOBINA DE ROGOWSKI SEM A INTEGRAÇÃO DO SINAL 38
FIGURA 3.15 – FORMAS DE ONDA IDEAL NO CONTROLE DE FASE CA PARA ÂNGULOS DE RETARDO VARIANDO DE ENTRE 30º E 150º 38
FIGURA 3.16 – SINAL DE CORRENTE OBTIDO ATRAVÉS DE UMA BOBINA DE ROGOWSKI COM A INTEGRAÇÃO DO SINAL. 39
FIGURA 3.17 – CALIBRAÇÃO DA FORÇA APLICADA PELA PINÇA. 40
FIGURA 3.18 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DA FORÇA APLICADA PELA PINÇA, NA FAIXA ÚTIL DE TRABALHO (LINHA DE TENDÊNCIA LINEAR FORÇADA A PASSAR PELO ZERO) 41

FIGURA 3.19 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DA FORÇA APLICADA PELA PINÇA, NA FAIXA ÚTIL DE TRABALHO (SEM FORÇAR A PASSAGEM PELO ZERO) 41
FIGURA 3.20 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DA FORÇA APLICADA PELA PINÇA, NA FAIXA ÚTIL DE TRABALHO, COM LINHA DE TENDÊNCIA DO TIPO POTÊNCIA 42
FIGURA 3.21 – CURVA DE RESÍDUOS EM TORNO DA NORMAL PARA AS CURVAS DE AJUSTES 43
FIGURA 3.22 – (A) APARELHO MITUTOYO DIGI-DERM MODELO 979-745. (B) BLOCO PADRÃO E LAMINAS DE PLÁSTICO PARA CALIBRAÇÃO. 44
FIGURA 3.23 – (A) LOCAL DAS MEDIÇÕES NA PLACA DE TESTE. (B) REALIZAÇÃO DA MEDIÇÃO. 44
FIGURA 3.24 – DIMENSÕES (MM) DOS ELETRODOS UTILIZADOS NA SOLDAGEM 47
FIGURA 3.25 – (A) SUPORTE PARA FERRAMENTA DE USINAGEM DO ELETRODO; (B) APARÊNCIA DO ELETRODO. 48

FIGURA 4.1– PINÇA DE SOLDAGEM APOIADA SOBRE BANCADA E CHAPAS DE TESTE FIXADA NO SUPORTE COM ISOLANTE ELÉTRICO 50
FIGURA 4.2 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DE 24 DOS 25 CICLOS (ELIMINADO O PRIMEIRO) DAS 3 REPETIÇÕES DE CADA ENSAIO 53
FIGURA 4.3 – PERFIL DE DESVIO PADRÃO DOS ENSAIOS ENTRE CHAPAS "GALVANIZADA" X "GALVANIZADA" ... 54
FIGURA 4.4 – PERFIL DE DESVIO PADRÃO DOS ENSAIOS ENTRE CHAPAS "NÃO GALVANIZADO" X "NÃO GALVANIZADO" 55
FIGURA 4.5 – PERFIL DE DESVIO PADRÃO DOS ENSAIOS ENTRE "GALVANIZADO" X "NÃO GALVANIZADO" 55
FIGURA 4.6 – RESISTÊNCIA MÉDIA ENTRE DUAS CHAPAS (3º AO 6º CICLOS) 56
FIGURA 4.7 – RESISTÊNCIA MÉDIA DE APENAS UMA CHAPA (3º AO 6º CICLOS) 57
FIGURA 4.8 – COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA ENTRE DUAS CHAPAS E APENAS UMA (3º AO 6º CICLOS) 58
FIGURA 4.9 – RESISTÊNCIA MÉDIA (3º AO 6º CICLOS) ENTRE DUAS CHAPAS COM PRESENÇA DE ÓLEO 60
FIGURA 4.10 – RESISTÊNCIA MÉDIA (3º AO 6º CICLOS) ENTRE DUAS CHAPAS COM PRESENÇA DE ÓXIDO 60
FIGURA 4.11 – COMPARAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS (3º AO 6º CICLOS) NAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS ENTRE CHAPAS "NÃO GALVANIZADAS" COM "NÃO GALVANIZADAS" E "GALVANIZADAS" E "GALVANIZADAS" 62
FIGURA 4.12 – COMPARAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS (3º AO 6º CICLOS) NAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS ENTRE CHAPAS "GALVANIZADAS" COM "NÃO GALVANIZADAS" 62
FIGURA 4.13 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DAS TRÊS REPETIÇÕES DE CADA ENSAIO COM CHAPAS LIMPAS, CALCULADA ENTRE O 3° AO 6° CICLO 63
FIGURA 4.14 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DAS TRÊS REPETIÇÕES DE CADA ENSAIO COM CHAPAS COM PRESENÇA DE ÓLEO, CALCULADA ENTRE O 3° AO 6° CICLO 63
FIGURA 4.15 – MÉDIAS E DESVIOS PADRÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DAS TRÊS REPETIÇÕES DE CADA ENSAIO COM CHAPAS COM PRESENÇA DE ÓXIDO, CALCULADA ENTRE O 3° AO 6° CICLO 64
FIGURA 4.16 – RESISTÊNCIA DINÂMICA ENTRE CHAPAS GALVANIZADAS. 65
FIGURA 4.17 – RESISTÊNCIA DINÂMICA ENTRE CHAPAS NÃO GALVANIZADAS. 65
FIGURA 4.18 – RESISTÊNCIA DINÂMICA ENTRE CHAPA NÃO GALVANIZADA E GALVANIZADA 66
FIGURA 4.19 – RESISTÊNCIA MÉDIA (17º AO 25º) ENTRE DUAS CHAPAS LIMPAS 67
FIGURA 4.20 – RESISTÊNCIA MÉDIA (17º AO 25º) ENTRE DUAS CHAPAS COM PRESENÇA DE ÓLEO 67
FIGURA 4.21 – RESISTÊNCIA MÉDIA (17º AO 25º) ENTRE DUAS CHAPAS COM PRESENÇA DE ÓXIDO 68
FIGURA 4.22 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DAS TRÊS REPETIÇÕES DE CADA ENSAIO COM CHAPAS LIMPAS, CALCULADA ENTRE O 17º AO 25º CICLO 70
FIGURA 4.23 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DAS TRÊS REPETIÇÕES DE CADA ENSAIO COM CHAPAS LIMPAS, CALCULADA ENTRE O 17º AO 25º CICLO COM PRESENÇA DE ÓLEO 70
FIGURA 4.24 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DAS TRÊS REPETIÇÕES DE CADA ENSAIO COM CHAPAS LIMPAS, CALCULADA ENTRE O 17º AO 25º CICLO COM PRESENÇA DE ÓXIDO 71

FIGURA 5.1 – PARÂMETROS FÍSICOS DO AÇO E ZINCO 74
FIGURA 5.2 – DIREÇÃO LINEAR PARA MEDIÇÃO DA CAMADA DE ZINCO 76
FIGURA 5.3 – ESPESSURAS DA CAMADA DE ZINCO [μM] NA REGIÃO DO PONTO DE SOLDA, ENSAIO BZ01 78
FIGURA 5.4 – ESPESSURAS DA CAMADA DE ZINCO [μM] NA REGIÃO DO PONTO DE SOLDA, ENSAIO BZ02 78
FIGURA 5.5 – PARÂMETROS EXCESSIVOS PARA A ESPESSURA DA CHAPA (0,7 MM), ENSAIO BZ03 78
FIGURA 5.6 – ESPESSURAS DA CAMADA DE ZINCO [μM] NA REGIÃO DO PONTO DE SOLDA, ENSAIO BZ05 79
FIGURA 5.7 – NÃO HOUVE FORMAÇÃO DE PONTO NEM FUSÃO DE ZINCO, ENSAIO BZ06 79
FIGURA 5.8 – ESPESSURAS DA CAMADA DE ZINCO [μM] NA REGIÃO DO PONTO DE SOLDA, ENSAIO BZ07 79
FIGURA 5.9 – ESPESSURAS DA CAMADA DE ZINCO [μM] NA REGIÃO DO PONTO DE SOLDA, ENSAIO BZ08 80
FIGURA 5.10 – ESPESSURAS DA CAMADA DE ZINCO [μM] NA REGIÃO DO PONTO DE SOLDA, ENSAIO BZ10 80
FIGURA 5.11 – MACROGRAFIA DO ENSAIO BZ01 (ATAQUE NITAL 10%) 81
FIGURA 5.12 – MACROGRAFIA DO ENSAIO BZ07 (ATAQUE NITAL 10%) 82
FIGURA 5.13 – ENSAIO BZ09, FORMAÇÃO DA LENTE DE SOLDA PARA EFEITO DE COMPARAÇÃO 82
FIGURA 5.14 – MACROGRAFIA DA LENTE DE SOLDA PARA UNIÃO DE CHAPA DE 2,5 MM COM 2,0 MM, UTILIZANDO PARÂMETROS REAIS DE SOLDAGEM, PARA EFEITO DE COMPARAÇÃO 83
FIGURA 5.15 – QUADROS SEQÜENCIAIS (A) E (B) ILUSTRANDO O COMPORTAMENTO DA INTERFACE CHAPA-CHAPA DURANTE A APLICAÇÃO DA TÉCNICA "BURN-ZINC" POR 5 CICLOS, MAS COM PARÂMETROS (CORRENTE E/OU PRESSÃO) INSUFICIENTES PARA SE OBTER A QUEIMA DO REVESTIMENTO 84
FIGURA 5.16 – QUADROS SEQÜENCIAIS (A), (B) E (C) ILUSTRANDO O COMPORTAMENTO DA INTERFACE CHAPA-CHAPA DURANTE A APLICAÇÃO DA TÉCNICA "BURN-ZINC" POR 5 CICLOS, MAS COM PARÂMETROS (CORRENTE E/OU PRESSÃO) ADEQUADOS PARA SE OBTER A QUEIMA DO REVESTIMENTO. 86
FIGURA 5.17 – FILMAGEM DO PROCESSO DE SOLDAGEM UTILIZANDO DEZ CICLOS 90
FIGURA 5.18 – FILMAGEM DO PROCESSO DE SOLDAGEM COM A TÉCNICA DE "BURN-ZINC" 90

FIGURA 6.1 – DIVISÃO DOS GRUPOS DE CHAPAS POR TIPO DE REVESTIMENTO 94

Figuras do Anexo

FIGURA A 1 – VALORES DE RESISTÊNCIA DOS ENSAIOS (24 CICLOS) 101
FIGURA A 2 – VALORES DE RESISTÊNCIA DOS ENSAIOS COM PRESENÇA DE ÓXIDO (24 CICLOS) 101
FIGURA A 3 – VALORES DE RESISTÊNCIA DOS ENSAIOS COM PRESENÇA DE ÓLEO (24 CICLOS) 102

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 – CLASSIFICAÇÃO DOS ELETRODOS DE SOLDAGEM A PONTO PELA RWMA 20
TABELA 3.2 – VALORES DE ENTRADA NA MÁQUINA E FORÇA MEDIDA..... 41
TABELA 3.3 – CARACTERIZAÇÃO DAS CHAPAS DE TESTE 46
TABELA 3.4 – RESULTADOS DA MEDIÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DE ZINCO 47
TABELA 4.1 – COMBINAÇÕES DAS CHAPAS DE TESTE 51
TABELA 4.2 – DIFERENÇA ENTRE VALORES DE RESISTÊNCIA MÉDIA ENTRE CHAPAS "GALVANIZADAS X GALVANIZADAS"..... 68
TABELA 4.3 – DIFERENÇA ENTRE VALORES DE RESISTÊNCIA MÉDIA ENTRE CHAPAS "NÃO GALVANIZADAS X NÃO GALVANIZADAS" 69
TABELA 4.4 – DIFERENÇA ENTRE VALORES DE RESISTÊNCIA MÉDIA ENTRE CHAPAS "GALVANIZADAS X NÃO GALVANIZADAS"..... 69
TABELA 4.5 – DIFERENÇA ENTRE VALORES DE DESVIO PADRÃO ENTRE CHAPAS "GALVANIZADAS X GALVANIZADAS"..... 71
TABELA 4.6 – DIFERENÇA ENTRE VALORES DE DESVIO PADRÃO ENTRE CHAPAS "NÃO GALVANIZADAS X NÃO GALVANIZADAS"..... 71
TABELA 4.7 – DIFERENÇA ENTRE VALORES DE DESVIO PADRÃO ENTRE CHAPAS "GALVANIZADAS X NÃO GALVANIZADAS"..... 72
TABELA 5.1 – PARÂMETROS DOS ENSAIOS "BURN ZINC" 77
TABELA 5.2 – PARÂMETROS DE SOLDAGEM..... 87
TABELA 5.3 – PARÂMETROS PARA REALIZAR O "BURN-ZINC" COM 5 CICLOS..... 88
TABELA 5.4 – PARÂMETROS PARA REALIZAR O "BURN-ZINC" COM 3 CICLOS..... 88
TABELA 5.5 – PARÂMETROS PARA REALIZAÇÃO DA SOLDAGEM COM "BURN-ZINC" 89

Tabelas do Anexo

TABELA A 1 – DADOS EXPERIMENTAIS COM RESISTÊNCIA ELÉTRICA CALCULADA COM 25 CICLOS ENTRE CHAPAS "GALVANIZADAS" X "GALVANIZADAS" 102
TABELA A 2 – DADOS EXPERIMENTAIS COM RESISTÊNCIA ELÉTRICA CALCULADA COM 25 CICLOS ENTRE CHAPAS "NÃO GALVANIZADAS" X "NÃO GALVANIZADAS"..... 103
TABELA A 3 – DADOS EXPERIMENTAIS COM RESISTÊNCIA ELÉTRICA CALCULADA COM 25 CICLOS ENTRE CHAPAS "GALVANIZADAS" X "NÃO GALVANIZADAS" 103
TABELA A 4 – RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS CALCULADAS COM 24 CICLOS (ELIMINANDO-SE O 1º) ENTRE CHAPAS "GALVANIZADAS" X "GALVANIZADAS"..... 104
TABELA A 5 – RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS CALCULADAS COM 24 CICLOS (ELIMINANDO-SE O 1º) ENTRE CHAPAS "NÃO GALVANIZADAS" X "NÃO GALVANIZADAS"..... 105
TABELA A 6 – RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS CALCULADAS COM 24 CICLOS (ELIMINANDO-SE O 1º) ENTRE CHAPAS "GALVANIZADAS" X "NÃO GALVANIZADAS" 105
TABELA A 7 – RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS CALCULADAS ENTRE O 3º E 6º CICLOS COM CHAPAS "GALVANIZADAS" X "GALVANIZADAS" LIMPAS 106
TABELA A 8 – RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS CALCULADAS ENTRE O 3º E 6º CICLOS COM CHAPAS "NÃO GALVANIZADAS" X "NÃO GALVANIZADAS" LIMPAS 107
TABELA A 9 – RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS CALCULADAS ENTRE O 3º E 6º CICLOS COM CHAPAS "GALVANIZADAS" X "NÃO GALVANIZADAS" LIMPAS..... 107
TABELA A 10 – RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS CALCULADAS ENTRE O 3º E 6º CICLOS COM CHAPAS "GALVANIZADAS" X "GALVANIZADAS" COM FILME DE ÓLEO 108
TABELA A 11 – RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS CALCULADAS ENTRE O 3º E 6º CICLOS COM CHAPAS "NÃO GALVANIZADAS" X "NÃO GALVANIZADAS" COM FILME DE ÓLEO..... 109
TABELA A 12 – RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS CALCULADAS ENTRE O 3º E 6º CICLOS COM CHAPAS "GALVANIZADAS" X "NÃO GALVANIZADAS" COM FILME DE ÓLEO..... 109
TABELA A 13 – RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS CALCULADAS ENTRE O 3º E 6º CICLOS COM CHAPAS "GALVANIZADAS" X "GALVANIZADAS" COM PRESENÇA DE ÓXIDO 110
TABELA A 14 – RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS CALCULADAS ENTRE O 3º E 6º CICLOS COM CHAPAS "NÃO GALVANIZADAS" X "NÃO GALVANIZADAS" COM PRESENÇA DE ÓXIDO 111
TABELA A 15 – RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS CALCULADAS ENTRE O 3º E 6º CICLOS COM CHAPAS "GALVANIZADAS" X "NÃO GALVANIZADAS" COM PRESENÇA DE ÓXIDO..... 111

Lista de Símbolos

Q – Calor por efeito Joule;
I – Corrente;
U – Tensão;
R – Resistência elétrica total;
t – Tempo;
R_{B1} – Resistência elétrica do eletrodo;
R_{B2} – Resistência elétrica da chapa;
R_{B3} – Resistência elétrica da chapa;
R_{B4} – Resistência elétrica do eletrodo;
R_{C1} – Resistência de contato eletrodo-chapa;
R_{C2} – Resistência de contato chapa-chapa;
R_{C3} – Resistência de contato eletrodo-chapa;
μ – Micro (10^{-6});
Ω – Ohm;
A – Ampère;
kA – Quilo Ampère (10^{6});
V – Volts;
kVA – Quilo Volts Ampère;
D – Corrente máxima;
e – Neperiano (e = 2,71828182845904523536028 74....);
t1 – espessura da chapa mais fina;
A_{sec} – Área da seção transversal;
N – Newton;
F – Força;
P – Pressão;
J – Joule;
s – Segundos;
$Q_{liq.}$ – Calor líquido da soldagem, usado na formação da lente;
Q_{ent} – Quantidade de calor inserido no sistema;
Q_{perdas} – Calor perdido;
$Q_{amb.}$ – Perda de calor para o ambiente;
$Q_{Cond.Mat.}$ – Perda de calor devido à condutividade do material a ser soldado;
$Q_{Resf.Elet.}$ – Perda de calor devido à condutividade e resfriamento do eletrodo;
kg – Quilograma;
mm – Milímetros;
m – Metros;
°C – Graus Celsius;
% - Porcentagem;
Zn – Zinco;
Hz – Hertz;
R_{mat} – Resistência do material da chapa ao longo da espessura;
ρ – resistividade do material;
L – comprimento do percurso da corrente;
R_{pel} – Resistência do revestimento ou película;
ρt – resistividade do revestimento ou da película ;
ξ – fator pressão (0,2 para superfície consideravelmente elástica, 1,0 para totalmente plástica e 0,7 uma aproximação razoável) ;
H – dureza do material;
R_{con} – Resistência de constrição;
n – número de pontos de contato;
Σ – Somatório;

g – Gramas;
C – Carbono;
Si – Silício;
Mn – Manganês;
P – Fósforo;
S – Enxofre;
Al – Alumínio;
Cu – Cobre;
Nb – Nióbio;
V – Vanádio;
Ti – Titânio;
Cr – Cromo;
Ni – níquel;
Δ – Diferença (delta);

Sumário

Agradecimentos VI
Resumo VII
Abstract VIII
Lista de Figuras IX
Lista de Tabelas XII
Lista de Símbolos XIII

CAPÍTULO I 1
INTRODUÇÃO 1

CAPÍTULO II 5
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5
2.1 – INTRODUÇÃO À SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA 5
2.2 – PARÂMETROS DE REGULAGEM E VARIÁVEIS DO PROCESSO 7
2.2.1 – Resistência Elétrica 7
2.2.2 – Corrente 8
2.2.3- Tempo de Soldagem 10
2.2.4- Força (pressão) 12
2.2.5 – Refrigeração pelos eletrodos 15
2.2.6 – Eletrodos 18
2.2.7 – Espessura e tipo de material das chapas 21
2.3 - EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA 22
2.4 - DESAFIOS TECNOLÓGICOS NA SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA 23
2.5 – RESISTÊNCIA DINÂMICA 24

CAPÍTULO III 30
EQUIPAMENTOS, TÉCNICAS E MATERIAIS 30
3.1 – FONTES DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA 30
3.2 – MONITORAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DE SOLDAGEM 31
3.2.1 – Sistema de aquisição e tratamento de dados 31
3.2.2 – Medição da tensão de soldagem 33
3.2.3 – Medição da Corrente 34
3.2.4 – Cálculo de potência e resistência elétrica 39
3.3 – CALIBRAÇÃO DA FORÇA APLICADA PELAS PINÇAS 40
3.4 – MEDIÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DE ZINCO 43
3.5 – CHAPAS 45
3.6 – ELETRODOS 47

CAPÍTULO IV 49
METODOLOGIA, ENSAIOS E RESULTADOS 49
4.1 – FASES METODOLÓGICAS 49
4.2 – DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS E DEFINIÇÃO DAS COMBINAÇÕES DE CHAPAS UTILIZADOS NOS ENSAIOS 50
4.3 – DEFINIÇÃO DO NÚMERO MÍNIMO DE CICLOS E DIFERENCIAÇÃO DAS CLASSES DE CHAPAS PELOS VALORES DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA 52
4.4 – AVALIAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS DE FORMA INDEPENDENTES 57
4.5 – AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS SOBRE AS RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS ... 58
4.6 – OUTRA ABORDAGEM PARA O CÁLCULO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA 64

CAPÍTULO V 73
"BURN-ZINC" 73
(QUEIMA DA CAMADA DE ZINCO DO REVESTIMENTO) 73
5.1 – O ZINCO E A SOLDABILIDADE DOS AÇOS GALVANIZADOS POR SOLDA A PONTO POR RESISTÊNCIA ... 73
5.2 – O "BURN-ZINC", COMO MÉTODO DE MINIMIZAR OS PROBLEMAS CAUSADOS PELA PRESENÇA DO ZINCO 74
5.3 – PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA "BURN-ZINC" 75
5.4 – ILUSTRAÇÃO DA TÉCNICA DE "BURN-ZINC" 83
5.5 – VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA TÉCNICA "BURN-ZINC" 86
5.6 – CONCLUSÕES SOBRE A TÉCNICA "BURN-ZINC" 91

CAPÍTULO VI 92
DISCUSSÃO GERAL 92

CAPÍTULO VII 95
CONCLUSÃO 95

CAPÍTULO VIII 97
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 97

CAPÍTULO IX 98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 98

ANEXO 1 101

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A indústria automobilística vem sendo registrada na história do Brasil desde o final do século XIX. Documentação coletada e publicada (Portal do Governo do Estado de São Paulo, 2007) mostra que foi em novembro de 1891 que o primeiro carro motorizado chegou em solo brasileiro; um único exemplar de um Peugeot, importado por um jovem de dezoito anos chamado Alberto Santos Dumont (que viria a ser o Pai da Aviação). A partir de então, figuras ilustres da sociedade paulistana ficaram tentadas em adquirir este novo bem de consumo e mais importações começaram a se realizar. De olho nesse mercado, a empresa Ford decidiu em 1919 trazer uma unidade fabril para o Brasil. O próprio Henry Ford sentenciava: "O automóvel está destinado a fazer do Brasil uma grande nação". Em 1925, foi a vez da General Motors do Brasil abrir sua fábrica no bairro paulistano do Ipiranga.

Ainda de acordo com a descrição histórica (Portal do Governo do Estado de São Paulo, 2007), houve, neste momento, um aumento surpreendente na frota de veículos no Brasil. Porém as fábricas só montavam seus automóveis em território brasileiro e não produziam suas peças (as mesmas tinham que ser importadas). Surgiu, então, a vontade política de se desenvolver um parque automotivo brasileiro. O então presidente da República, Getúlio Vargas, proibiu a importação de veículos montados e criou obstáculos à importação de peças. Mas foi seu sucessor, Juscelino Kubitschek, quem deu o impulso necessário à implantação definitiva da indústria automotiva brasileira, ao criar o Geia - Grupo Executivo da Indústria Automobilística. Já em 1956, foi inaugurada, em São Bernardo do Campo, no ABC Paulista, a primeira fábrica de caminhões com motor nacional, com tecnologia da Mercedes-Benz. A indústria automobilística se transformaria, então, na maior mola propulsora da economia brasileira, em coerência ao que acontecia com a economia mundial

Em consonância com a globalização da produção, o Brasil hoje é um dos países que

mais sediam unidades fabris das chamadas montadoras de automóveis de passeio e utilitários. São atualmente 24 montadoras de carros e comerciais leves, caminhões, ônibus, tratores e outras máquinas agrícolas, com 45 fábricas montadas, principalmente no sul e sudeste brasileiro. Mesmo sendo fruto de investimento de capital essencialmente externo, em 2006 o faturamento líquido da indústria automobilística brasileira foi de 41,147 bilhões de dólares, o que representou 14,5% do PIB do Brasil (ANFAVEA, 2007). Para alcançar tais cifras, muita tecnologia de ponta vem sendo introduzida nos processos de fabricação, o que requereu (e vem requerendo) anos de pesquisa e desenvolvimento em todas as fases de fabricação que estão presentes na montagem de um veículo. Mesmo que a maioria destas pesquisas e desenvolvimentos seja feito principalmente nas matrizes, muito tem sido feito pelas unidades nacionais.

Em especial, a união em alta produção e sem defeitos entre chapas de aço é um desafio constante para projetistas e engenheiros. Mesmo já existindo concorrência (principalmente pela Soldagem a Laser), ainda hoje, o processo de Soldagem a Ponto por Resistência (RSW – Resistance Spot Welding) é o mais utilizado na indústria automobilística (como também na fabricação de eletrodomésticos). Este processo de fabricação tem grande aceitação na indústria porque é um processo utilizado para unir chapas finas, de alta confiabilidade, muito rápido de ser executado, não existe adição de metal e não é necessário um alto grau de experiência do operador.

Algumas características acima citadas do processo de soldagem a ponto por resistência podem dar a impressão de tratar-se de um processo quase sem custo, o que não justificaria aprimorá-lo. Se adicionarmos os custos totais, incluindo equipamentos, eletrodos e manutenção, o custo de cada ponto de solda é de apenas cerca de cinco centavos de dólar. Contudo, para se ter uma idéia, existem cerca de 3000 a 4000 pontos de solda em um veículo de passageiro (Relatório Interno, 2007). Desta forma, o custo somente do processo de soldagem de uma carroceria em aço é de cento e cinqüenta a duzentos dólares por automóvel, que é bem razoável considerando o custo total gasto na fabricação de um veículo. Entretanto, dependendo das taxas e da capacidade de produção e das práticas de soldagem, uma planta de montagem do setor automobilístico pode consumir mais do que um milhão de dólares com eletrodos de soldagem a ponto em um ano (Relatório Interno, 2007).

Apesar da simplicidade operacional do processo de soldagem a ponto por resistência, quando comparado a outros processos de soldagem, nem sempre é possível estabelecer condições paramétricas de soldagem que sejam genéricas ou que possam ser mantidas ao longo de uma produção em alta escala. Esta limitação se deve a diferentes fatores ou condições operacionais nas diversas regiões de um mesmo veículo, como as

variações energéticas necessárias para formação do ponto devido ao efeito da corrente derivativa (conhecido como “Efeito Shunt”), mudança nas espessuras, composição e/ou número das chapas, solda próxima às bordas das chapas, variação do tipo ou espessura do revestimento e películas não homogêneas entre chapas. Todos esses inconvenientes podem dar origem a um ponto de solda não satisfatório, ocorrendo a expulsão de material da região da lente de solda e ainda podendo desgastar excessivamente o eletrodo (MATUSCHEK; POELL, 2005).

A maneira de evitar que estas particularidades afetem a qualidade do ponto de solda é otimizando os parâmetros de soldagem para cada condição. Na prática, as indústrias de maior porte utilizam programas de soldagem inseridos nos controladores das fontes, no qual são definidos os parâmetros de soldagem para cada grupo de pontos a serem realizados. Esta seqüência é determinada através de ensaios com garantia de repetibilidade. Porém, nem sempre as condições de trabalho no chão de fábrica são as mesmas o tempo todo, ou seja, podem ocorrer intempéries, como pequenos desalinhamentos entre as chapas, presença não programada de películas de óleo, pó ou outro tipo de material entre as chapas, desgaste prematuro ou protelado em relação ao previsto pelo programa de soldagem, troca de fornecedores de matérias-prima, entre outros. Com isso, mesmo pontos “otimizados” de solda podem não se manter satisfatórios ao longo de um processo de fabricação.

Devido a estes limitadores, várias pesquisas estão sendo desenvolvidas para se ter um controle adaptável ou “controle inteligente” como forma de se garantir uma formação adequada do ponto de solda independente de intempéries. Algumas empresas já desenvolveram algumas unidades que ajustam automaticamente o nível de corrente em uma base contínua (Relatório Interno, 2007). A Medar Inc. tem uma unidade que percebe a formação do ponto e efetua controles baseados no fator de potência, enquanto que a Square D Co. está desenvolvendo um sistema de combinação pinça de soldagem/controle de soldagem baseado no monitoramento da expulsão de material fundido. A GM Corp. também desenvolveu um sistema de combinação de ajustador inteligente/retorno adaptável. A consideração da GM é baseada na alteração da resistência elétrica dinâmica devido à expulsão. Além de funcionar como um ajustador automático, estes sistemas podem também desempenhar seu papel em modo de retorno em tempo real de forma a controlar cada ponto de solda. Porém, mesmo que estes sistemas tenham sido testados em produção, ainda não são confiáveis, precisam de aprimoramentos.

Uma outra abordagem que pode ser utilizada para desenvolver um controle adaptativo, e que ainda não foi desenvolvida nos equipamentos, é a medição da resistência do conjunto “eletrodos – interfaces de contato – chapas”. Aparentemente existe uma forma

de se qualificar a resistência de uma solda antes de iniciá-la, através da monitoração da tensão e corrente no início da operação. Esta resistência depende das espessuras das chapas, das interfaces de contato, do tipo de material a ser utilizado, do ajuste de montagem entre as chapas, desgastes dos eletrodos, etc. Se houver uma relação entre esta resistência e os parâmetros de soldagem que devem ser usados para se conseguir uma solda em conformidade, poder-se-ia usar este princípio para que as soldagens manuais ou automáticas pudessem ter uma regulagem de parâmetros independentes e automáticos para cada ponto, reduzindo ao máximo o número de pontos refugados.

Desta forma, é proposto neste trabalho verificar a possibilidade do desenvolvimento de um sistema de auto-regulagem dos parâmetros de soldagem por resistência a ponto, aplicado em produção em série que demande trocas freqüentes de parâmetros de soldagem. Visa-se com isso uma regulagem automatizada e rápida, sem interferência do operador, o que permite obter pontos de solda com qualidade em todo o processo de fabricação sem que aumente o tempo no processo de soldagem, tendo um sistema confiável, robusto e que possa em um futuro próximo estar comercialmente disponível.

Para se alcançar esse objetivo é necessário, então, a realização de ensaios de simulação, para se definir os melhores parâmetros para o cálculo da resistência elétrica, tentando utilizar o menor tempo possível, e verificar se os valores de resistências elétricas calculadas definem grupos específicos que diferenciem a união a ser soldada por diferentes espessuras de chapas e/ou tipo de material de que são constituídas (materiais diferentes ou mesmo presença de revestimento na superfície).

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Introdução à Soldagem por Resistência

A evolução dos processos de soldagem ao longo do tempo é apresentada na Fig. 2.1, onde nota-se que a soldagem por resistência desenvolve-se quase que concomitantemente com o desenvolvimento dos fundamentos que levaram aos processos de soldagem a arco. Bernardos, em 1885, um dos pais do arco de soldagem, usou o eletrodo de carvão para fusão localizada do aço, realizando a primeira soldagem a ponto por resistência com o eletrodo de carvão.

Porém, o processo de soldagem por resistência na forma em que atualmente é utilizado foi inventado nos EUA em 1877 por Mr. Elihu Thomson (Fig. 2.2). Thomson foi projetista e fabricante de motores e transformadores e sua primeira demonstração prática da soldagem por resistência foi relaizada em 1879 e a primeira máquina de solda produzida em 1886; uma máquina Thomson-Gibb. O Laboratório Thomson veio a ter grande sucesso mais tarde já como Edison General Electric Company, se tornando finalmente General Electric Co. onde Thomson foi vice-presidente e diretor de pesquisas.

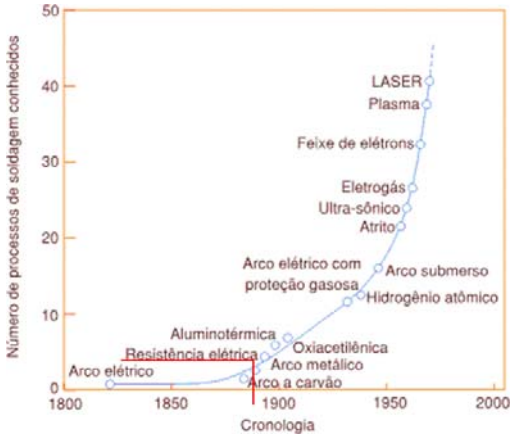


Figura 2.1– Evolução dos processos de soldagem ao longo do tempo (SOLDAGEM INDUSTRIAL, 2007)

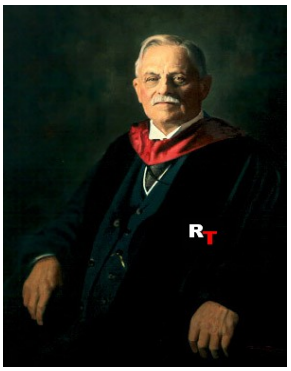


Figura 2.2 – Mr. Elihu Thomson

No processo de solda a ponto por resistência, chapas metálicas são unidas pelo coalescimento localizado das mesmas (fusão e posterior solidificação), devido ao calor gerado pela resistência do material à passagem de corrente elétrica (Efeito Joule). Uma pressão é aplicada pelo próprio eletrodo durante certo período de tempo para garantir que as chapas fiquem na posição enquanto se dá a solidificação. Com isso, uma lente de solda é formada, garantindo a união entre as chapas, conforme ilustrado no esboço da Fig. 2.3.

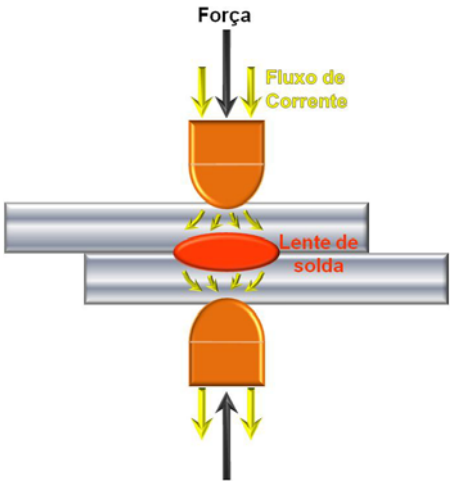


Figura 2.3 – Esboço do processo de soldagem a ponto por resistência

Atualmente, a soldagem a ponto por resistência é amplamente usada na indústria, principalmente na automobilística, em virtude da simplicidade, alta confiabilidade, rapidez de execução, não utilização de metal de adição e relativamente fácil controle. Obtém-se uma solda de qualidade e resistência satisfatórias quando comparado a outros processos de soldagem, não necessitando alto grau de experiência do operador (VARGAS, 2006).

2.2 – Parâmetros de Regulagem e Variáveis do Processo

A **resistência elétrica** no circuito da corrente é o fator governante da soldagem. Ela que vai determinar os valores demandados para outros parâmetros. Os principais parâmetros de regulagem do processo para uma formação adequada da lente de solda entre as partes metálicas (chapas) a serem soldadas são intensidade de **corrente**, **tempo** de fluxo de corrente e **força** entre os eletrodos. Além disto, existem variáveis de extrema importância para o desempenho do processo, muitas vezes negligenciadas, como refrigeração, material e forma dos eletrodos, espessura e material das chapas.

2.2.1 – Resistência Elétrica

A união das chapas no processo de solda a ponto por resistência se dá pelo calor gerado por efeito Joule ($Q = I^2.R.t$), o qual depende diretamente da corrente (I), da resistência elétrica e do tempo em segundos (t). Observa-se na Fig. 2.4 que esta resistência (R) é a soma de todas as resistências no circuito onde a corrente passa, como as resistências dos eletrodos (R_{B1} e R_{B4}), as resistências das chapas (R_{B2} e R_{B3}) e as resistências de contato (R_{C1}, R_{C2} e R_{C3}). Entretanto, o local onde se quer obter a maior temperatura é onde se deseja que ocorra a solda (lente), ou seja, no contato entre as duas chapas (R_{C2}). Para isso, os eletrodos são fabricados com materiais de baixa resistência elétrica, em sua maioria com ligas a base de cobre. São também fabricados de um material que se deforma facilmente, assentando melhor na superfície da chapa. Os dois fatos fazem diminuir as resistências elétricas R_{C1} e R_{C3}, minimizando o calor gerado nestas regiões.

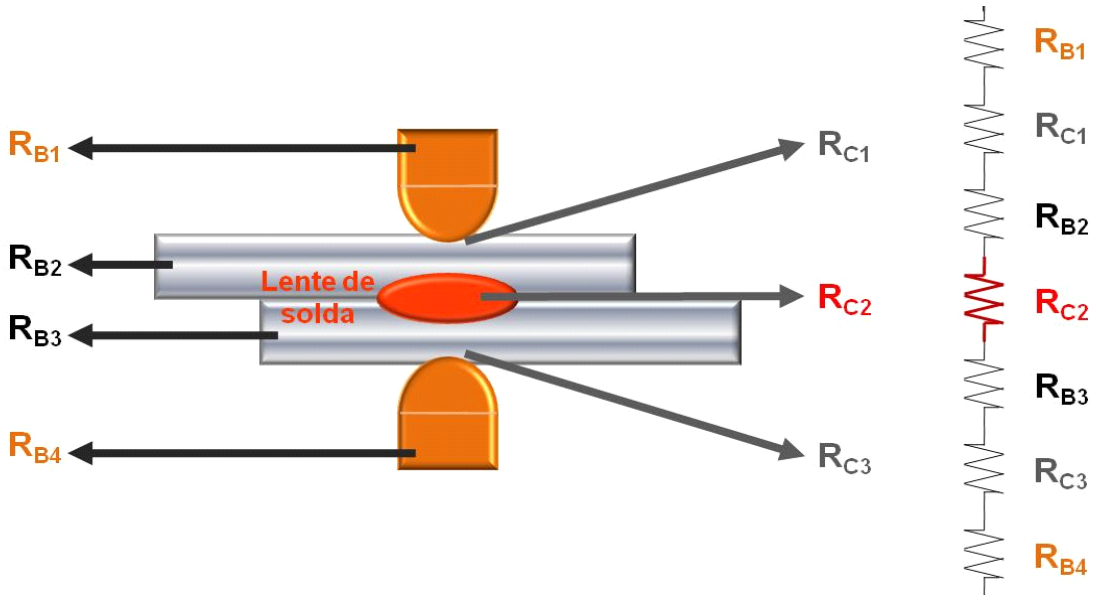


Figura 2.4 – Resistências à passagem de corrente no processo de soldagem a ponto

A resistência elétrica na interface entre as peças se situa geralmente no intervalo de 50 a 500 μΩ, mas pode alcançar valores tão baixos quanto 20 μΩ para o caso do alumínio. Quanto menor o valor da resistência, maior deve ser a intensidade de corrente. Mas é importante frisar que a resistência elétrica varia com o tempo durante a soldagem, como será visto no Item 2.5.

2.2.2 – Corrente

As correntes de soldagem utilizadas pelo processo variam entre valores bem baixos, no caso de soldas de componentes eletrônicos, até valores bastante elevados (indústria automobilística) podendo atingir níveis superiores a 15 kA. Um alto valor de corrente pode ser conseguido através de um transformador, como o mostrado na Fig. 2.5. A título de exemplo, esse transformador contém 100 espiras no primário e duas no secundário (razão de 50:1), ou seja, com uma corrente de 200 A no primário é, então, transformada (elevada) para 10.000 A no secundário.

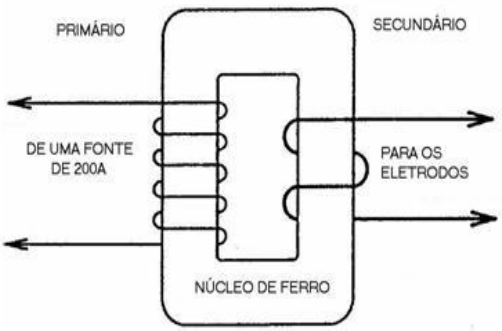


Figura 2.5 – Transformador para elevar o valor de corrente (RWMA modificado, 1989)

Os formatos de onda gerados, CA e CC, por estas fontes estão apresentados na Fig. 2.6. A corrente contínua é gerada por transformadores especiais, como será visto no Item 2.3.

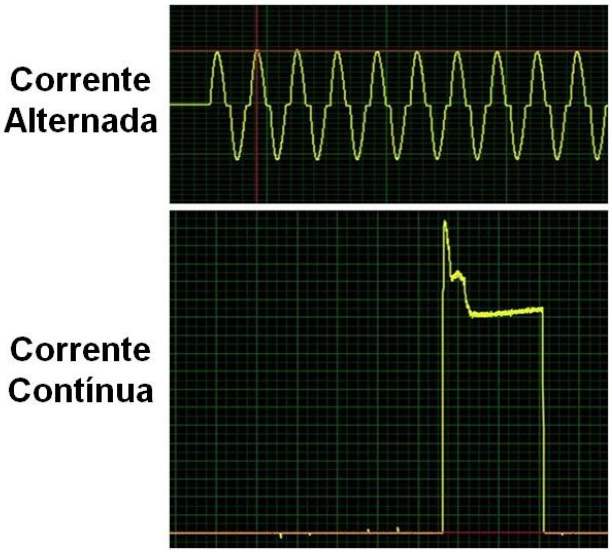


Figura 2.6 – Formato de onda gerado; a cima, corrente alternada; em baixo, corrente contínua

Tão importante quanto a corrente em si, a densidade de corrente na região de passagem de corrente na chapa também deve ser observada. Os limites superior e inferior para a densidade de corrente dependem da sua intensidade e do diâmetro e forma da ponta do eletrodo. Se a intensidade e densidade de corrente forem insuficientes, nunca ocorrerá fusão, mesmo com um longo tempo. Entretanto, sendo as mesmas excessivas, o eletrodo penetrará na peça, pois grande parte das chapas ou toda sua espessura estará na fase plástica. Assim, para uma dada força de aplicação dos eletrodos, há uma corrente máxima, acima da qual o metal sob os mesmos é expulso violentamente provocando soldas com defeito (PODRŽAJ e KARIŽ, 2005). Machado (1996) sugere como regra prática, para que o processo possa ocorrer no menor tempo possível e produzir pontos com a mais alta resistência mecânica, determinar a densidade de corrente máxima (D) exatamente anterior àquela que provocaria expulsão, a qual pode ser estimada pela equação 2.1 deduzida empiricamente:

$$D = 192 + 480 \times e^{-t1} \ (A/mm^2) \qquad (2.1)$$

onde “t1” (mm) é a espessura da chapa mais fina. Ou seja, ao se calcular a densidade de corrente limite, é possível a partir do diâmetro de ponto desejado calcular a corrente máxima (ou a partir da corrente, se achar o diâmetro mínimo do ponto).

Em geral, uma rampa de subida da corrente é utilizada para evitar sobre-aquecimento e expulsão do metal no início do tempo de soldagem, quando a resistência da interface do metal base ainda é alta. Já uma rampa de descida da corrente é normalmente usada para controlar a característica do resfriamento na região da solda. Essa característica inclui a solidificação e a taxa de resfriamento no estado sólido, mas Vargas (2006) mostra que tais rampas têm pouco efeito sobre o tamanho do ponto.

2.2.3- Tempo de Soldagem

O tempo de soldagem é outro parâmetro muito importante no processo e pode ser dividido em frações conforme mostrado na Fig. 2.7. O tempo de acostamento é o período que se leva do começo do movimento da pinça até quando os eletrodos encostam-se às chapas, quando garantem o assentamento das mesmas, atingindo o valor programado para a pressão no sistema. Em seqüência, o tempo de pré-pressão é quando a força já aplicada cria, em um dado tempo, as condições para que o conjunto chapas-eletrodos se acomode mecanicamente (sem passagem de corrente). Por outro lado, o tempo de subida da corrente ("slope-up") seria o intervalo que se leva para que a corrente atinja o valor programado (esse tempo só existe caso seja utilizado rampa de subida de corrente no processo de soldagem). Já o tempo de corrente (não confundir com o tempo total de soldagem) é quando realmente ocorre a passagem de corrente e ocorre o processo de soldagem, pelo aquecimento por efeito Joule principalmente no contato entre as chapas.

O tempo de corrente no processo deve ser mantido a menor possível (1/4 s em média), apesar de se demandar tempos mais longos para correntes mais baixas. Vargas et al. (2007) concluiram que mais altas correntes e tempos mais curtos favorecem a resistência e acabamento do ponto (resistência ao rasgamento e indentação). Quando se utiliza a rampa de descida, existe ainda o tempo de descida da corrente ("slope-down"), o qual seria aquele que se leva para o nível de corrente cair do valor programado até zero. A seguir, o tempo de retenção é o período em que a corrente já parou de passar pelo sistema, porém, ainda se mantém a pressão aplicada pelos eletrodos. É nesse período que o material que foi fundido (ou coalescido) se solidifica completando a união das chapas. Por fim, o tempo de abertura (cadência) é aquele que leva os eletrodos a descarregarem a força aplicada e se afastar das chapas até ficarem na posição inicial.

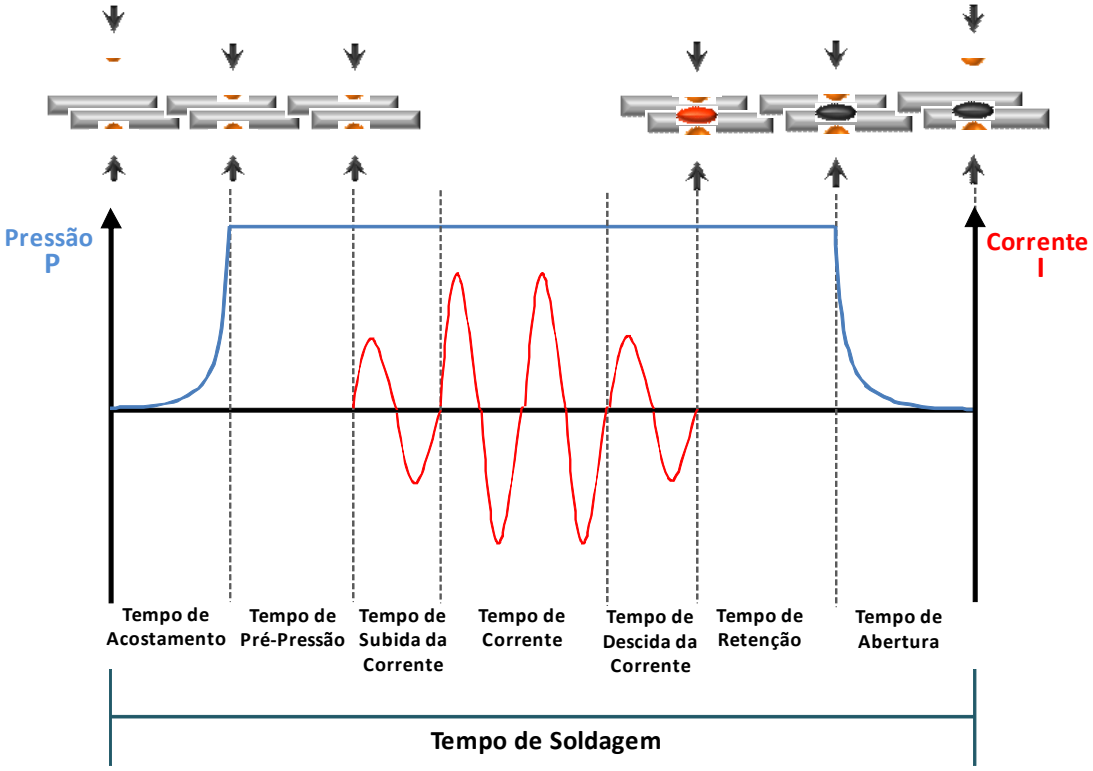


Figura 2.7 – Representação esquemática do tempo de soldagem

Quando se solda chapas espessas pelo processo a ponto por resistência é necessário a aplicação de maior energia (aumento do valor da corrente e/ou tempo de soldagem) e maior força. Maior energia representa maior calor a ser dissipado pela chapa. Por um lado, uma maior espessura facilita a dissipação do calor de forma mais tridimensional (também na direção Z). Por outro lado, este aquecimento na direção da espessura da chapa faz aumentar a resistência elétrica da mesma, conseqüentemente aquecendo-a mais ainda. A chapa aquecida torna-se mais dúctil e, como é necessária a aplicação de uma maior força, ocorre uma maior deformação, ou seja, maior indentação.

Uma prática que pode ser utilizada para soldar chapas espessas é a programação de mais de um tempo de soldagem para produzir um único ponto. Cada tempo destes é normalmente denominado de “impulso”. De acordo com a RWMA (1989 - “Resistance Welder’s Manufacturer’s Association”), na soldagem dessas chapas, ao invés de se deixar um tempo mais longo para a formação da lente, ou se usa uma corrente maior, ou múltiplos impulsos são freqüentemente usado. Esse múltiplo impulso nada mais é que a incorporação de mais um tempo de corrente (com subida e descida caso seja necessário) ao final do tempo de retenção, como apresentado na Fig. 2.8. A utilização dessa técnica minimiza as causa de indentação relatados no parágrafo acima quando se solda chapas espessas, pois, no intervalo entre um impulso e outro, ocorre o resfriamento, minimizando o problema.

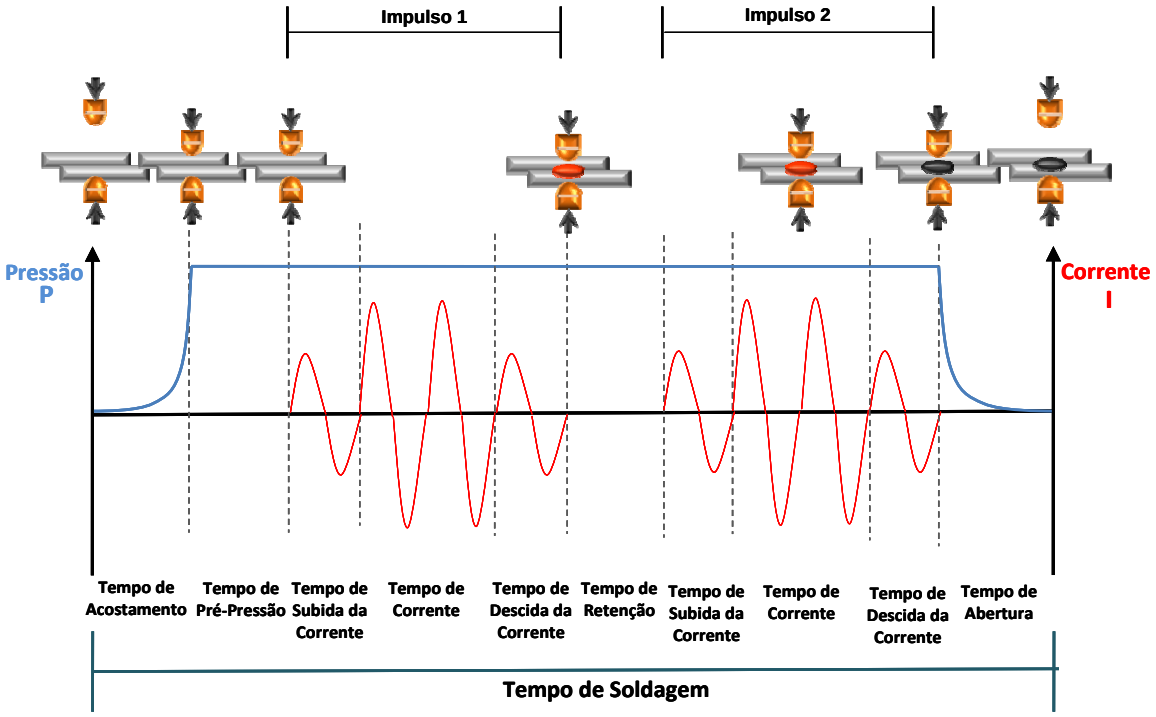


Figura 2.8 – Múltiplos impulsos no processo de soldagem

2.2.4- Força (pressão)

Uma variável não apresentada diretamente na equação do calor, mas de elevada influência na resistência elétrica do conjunto é a força exercida pelos eletrodos sobre a chapa. Numa máquina de soldagem a ponto por resistência, essa força é exercida, seja por sistemas mecânicos (equipamentos de baixa capacidade e manuais), pneumáticos (mais rápidos) ou sistemas hidráulico-pneumático (maior força). A força (F) exercida pela ponta do eletrodo é resultante da aplicação de uma pressão (P) num pistão (êmbolo) de uma dada área (A_{sec}) de seção transversal ($F = A_{sec}/P$). Sendo assim, nos equipamentos industriais, ao se tentar regular a força, se está regulando na verdade a pressão do sistema (pneumático). Equipamentos mais modernos possuem controladores de pressão (controle proporcional integral derivativo - PID) para manter as forças constantes na ponta do eletrodo, no caso de variação da pressão da linha. Também permitem, com estes controladores, regulagem remota da força através do painel de controle. Lembra-se que a força aplicada pelo eletrodo se transforma novamente em pressão sobre as chapas, em função da área de contato dos eletrodos. Assim, o leitor deve estar atento que ele regula no equipamento a pressão do pistão e não a força aplicada ou a pressão do eletrodo sobre as chapas.

A resistência elétrica aumenta quando a força nos eletrodos é pequena, devido ao contato incompleto entre as superfícies. Alta resistência elétrica entre eletrodos-chapas não é desejável, apesar de benéfico para a geração de calor entre as chapas. Uma elevada

força do eletrodo, por outro lado, deforma as asperezas e aumenta a área de contato (KAISER et al. 1982), reduzindo a resistência elétrica, mas podendo ocasionar marcas superficiais ou deformação excessiva no material de base (prejudicando o acabamento superficial). Assim, a força exercida pelos eletrodos caracteriza-se por limites inferior e superior, portanto, dentro de valores operacionais ótimos, a força do eletrodo se comporta de forma inversamente proporcional à resistência elétrica (MACHADO, 1996).

Com isso, no processo de soldagem a ponto por resistência, a resistência na interface chapa-chapa deve ser alta para que se possa gerar mais calor na região possibilitando a fusão (ou coalescimento) do metal, sendo ideal a aplicação de uma menor força. Porém, durante o início da soldagem (no início do tempo de corrente, onde começa a passagem de corrente), seria importante a aplicação de uma força maior para permitir que ocorra o caldeamento entre as chapas (ligação física através da aplicação de uma grande pressão a um metal aquecido). Por outro lado, esse caldeamento iria reduzir a resistência elétrica, razão pela qual o tempo de corrente não pode ser longo, pois se torna pouco efetivo. Mas como a corrente é alta suficiente para sobre-aquecer a região da solda nos tempos iniciais da passagem de corrente, ocorreria fusão (ou coalescimento) do metal e uma força entre as chapas ao final do tempo de corrente é requerida para evitar que as mesmas se separem, devido a tensões térmicas, e a região da lente de solda não se forme. Então, controlando-se a força, pode-se evitar a ocorrência de expulsão ou soldagens sem ligação.

Mas a força, mesmo assumindo ser a pressão mantida constante, pode variar com o tempo durante uma soldagem. Fonseca e Bracarense (1999) verificaram que a força exercida pelo eletrodo, medida por uma célula de carga posicionada no sistema mecânico de acionamento da pinça, varia ao longo da soldagem, como mostra a Fig. 2.9. A força parte de um valor inicial e cresce até o início do tempo de soldagem, quando se mantém praticamente constante. Durante o tempo de soldagem, estes autores acreditam que a força tenha sofrido uma pequena queda, creditadas por eles à expansão térmica do material. Concluído o tempo de soldagem, ela cresce subitamente no momento em que a corrente para de circular, atingindo um valor máximo. Finalmente a força vai reduzindo e cai a zero com o retorno do eletrodo à posição inicial, conforme ilustra a Fig. 2.9.

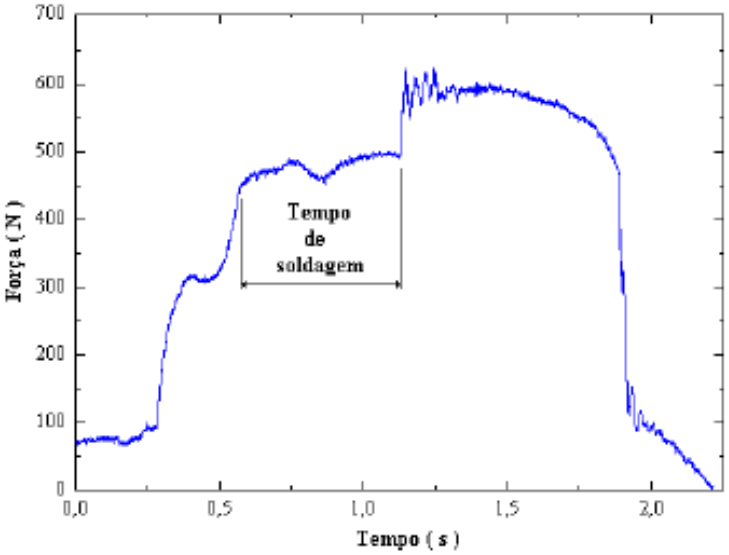


Figura 2.9 – Curva de força aplicada no processo de soldagem (FONSECA;BRACARENSE 1999)

Já Gedeon et al. (1984) monitoraram a força aplicada na chapa pelos eletrodos através de células de carga (“strain gauge”) em função do tempo e obtiveram as curvas da força dinâmica apresentadas na Fig. 2.10 e na Fig. 2.11. Nota-se que quando ocorre uma expulsão a força cai rapidamente (Fig. 2.11) caracterizando este efeito, podendo este distúrbio (característica) ser utilizado em um sistema de controle. Porém, o sinal apresentou ruídos e os autores citam que o método de medição utilizado não é tão acurado e um melhor método seria uma medição utilizando uma célula de carga piezo-elétrica ou um acelerômetro.

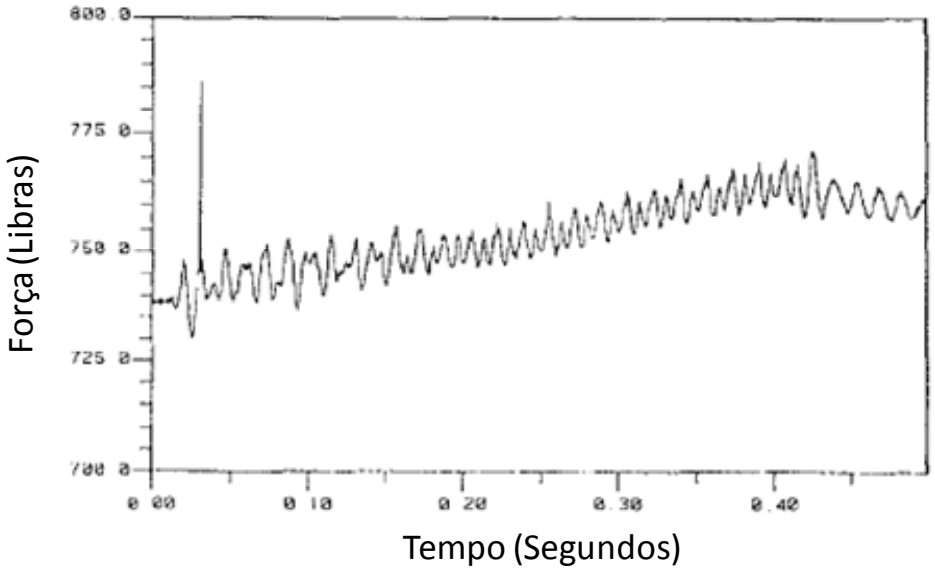


Figura 2.10 – Característica dinâmica da força em uma soldagem sem expulsão (GEDEON et al., 1984 traduzida)

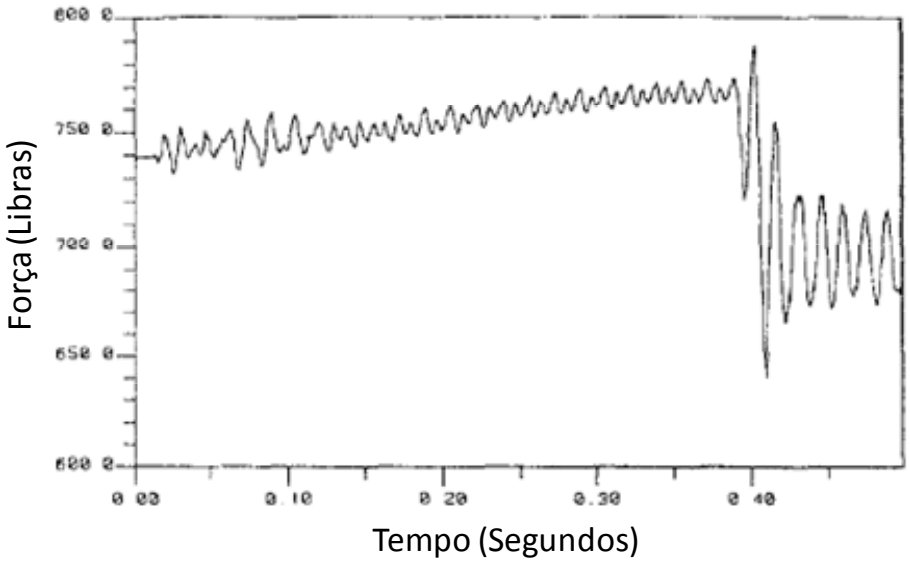


Figura 2.11 – Característica dinâmica da força em uma soldagem com expulsão (GEDEON et al., 1984 traduzida)

2.2.5 – Refrigeração pelos eletrodos

Como já especificado, o calor neste processo de soldagem se dá por efeito Joule e a maior parte do calor deve ser gerada na região da lente de solda. Porém, é necessário que o calor seja dissipado para se concretizar a solda, pelo resfriamento do ponto. Como o ponto se forma na interface interior das chapas, este calor, como mostra a Figura 2.12, tem que se dissiparem pelas regiões menos quente das chapas.

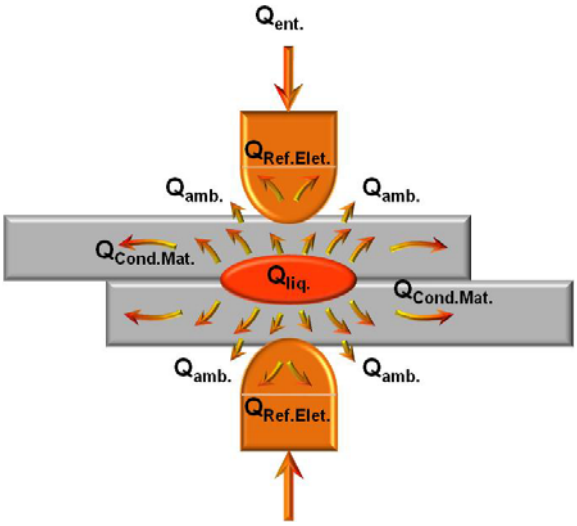


Figura 2.12 – Distribuição do calor no processo de soldagem a ponto

O balanço do calor no processo de soldagem é regido matematicamente por (BOTHFELD, 2005):

$$Q_{liq.} = Q_{ent.} - Q_{perdas} \quad (2.2)$$

Pela Lei de Joule:

$$Q_{ent.} = I^2.R.t \quad (2.3)$$

Perda de calor no sistema:

$$Q_{perdas} = Q_{amb.} + Q_{Cond.Mat.} + Q_{Resf.Elet.} \quad (2.4)$$

Onde:
$Q_{liq.}$ – Calor líquido da soldagem [J], usado na formação da lente.
Q_{ent} – Quantidade de calor inserido no sistema [J].
Q_{perdas} – Calor perdido [J].
I – Corrente elétrica [A].
R – Resistência total no circuito [Ohms].
t – Tempo de passagem da corrente elétrica [s].
$Q_{amb.}$ – Perda de calor para o ambiente [J].
$Q_{Cond.Mat.}$ – Perda de calor devido à condutividade do material a ser soldado [J].
$Q_{Resf.Elet.}$ – Perda de calor devido à condutividade e resfriamento do eletrodo [J].

Mas o aquecimento da região entre a lente de solda e os eletrodos vai fazer com que a resistência mecânica da chapa se reduza, facilitando sua deformação ("amassamento"), caracterizando um defeito denominado de indentação (além do aspecto visual ruim, há redução da área da seção das duas chapas). Mas há ainda outro efeito importante como conseqüência do aquecimento entre a lente de solda e os eletrodos. É que maior se torna a resistência elétrica neste trecho e mais aquecimento é gerado nesta região, dificultando a dissipação de calor pela lente de solda e facilitando ainda mais o "amassamento" (indentação).

Por isto, é muito importante a refrigeração dos eletrodos, ou seja, não para manter o eletrodo não aquecido pela passagem de corrente por ele (devido a grande área transversal e pequena resistividade elétrica, o aquecimento por efeito Joule é pequeno), mas principalmente para refrigerar as chapas e absorver o calor gerado entre chapas e eletrodos. Pode-se assumir que a perda de calor para o ambiente é pequena. Assim, uma característica muito importante e comum a todos os eletrodos nas operações de soldagem por resistência é a refrigeração a água (Fig. 2.13).

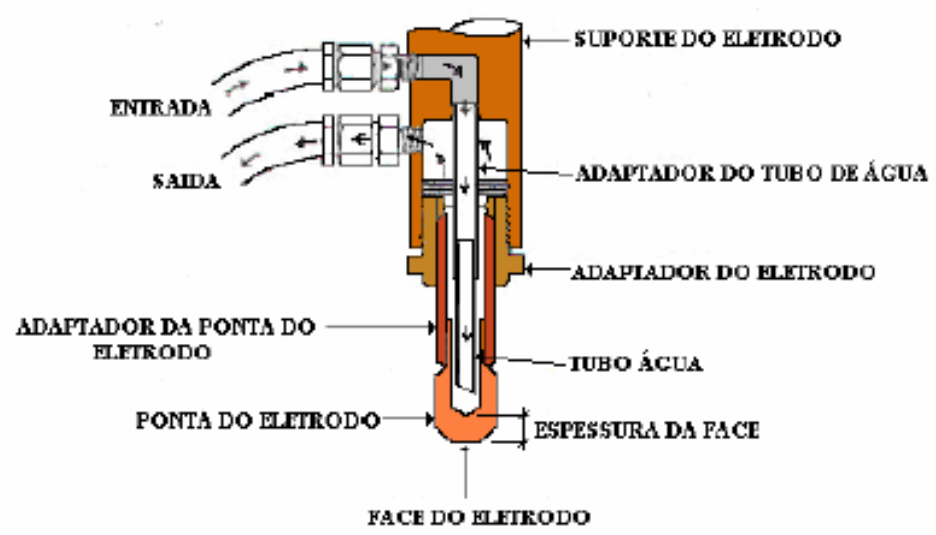


Figura 2.13 – Refrigeração do Eletrodo (Intermachinery, 2002 modificado)

Porém, por mais eficiente que seja a refrigeração, a interface eletrodos e chapas vai ficar sempre aquecida. Esta é a razão para que a vida útil dos eletrodos esteja diretamente relacionada com uma refrigeração adequada. Como recomendação complementar deve-se manter as mangueiras de água esticadas, a fim de evitar a formação de bolsas de vapor e não conectar a água de refrigeração em série com outros eletrodos, evitando com isto o superaquecimento do eletrodo.

Wolff e Scotti (2005) verificaram que o sistema de refrigeração (o mesmo utilizado nos ensaios deste trabalho) funciona com eficiência, uma vez que estabiliza as temperaturas no eletrodo em um valor não muito elevado, garantindo uma boa vida útil tanto ao equipamento quanto aos eletrodos e uma refrigeração eficiente para a realização de uma bateria de soldas em seqüência. Eles Mostraram ainda que o sistema trabalhando com a válvula “by-pass” fechada (com uma pressão maior 0,579 MPa, conseqüentemente, maior vazão, melhora a refrigeração), comparativamente com a válvula “by-pass” aberta (menor pressão na refrigeração 0,186 MPa), a temperatura máxima alcançada no corpo de eletrodo foi sempre menor no caso da válvula fechada, sendo que para uma corrente de 5 kA a temperatura diminuiu de 86,75°C para 56,21°C. Destas informações pode-se dizer que se o eletrodo aquece mais, menor a sua capacidade de troca de calor, afetando o desempenho da soldagem. Ou seja, a vazão da água, consequentemente a refrigeração pelo eletrodo, é de extrema importância neste processo.

2.2.6 – Eletrodos

Os eletrodos têm uma fundamental importância no processo de soldagem a ponto por resistência, pois são neles que se dá os contatos mecânico e elétrico entre as peças a serem soldadas. É também através deles que se aplica a força necessária para a formação do ponto de solda e onde flui a corrente de soldagem necessária para unir os materiais. Além disso, os eletrodos absorvem calor através da superfície da peça de trabalho.

Mas, por outro lado, os eletrodos devem manter a sua forma e características originais de condutividade térmica e elétrica sob severas condições de trabalho (GEDEON et al., 1984). As dificuldades para manter o bom desempenho do eletrodo se devem aos grandes gradientes de temperatura a que eles estão sujeitos (Fig. 2.14), além das grandes forças compressivas. Como conseqüência, os eletrodos estão constantemente mudando as geometrias de suas pontas (deformação elástica e plástica), levando ao desgaste e/ou alteração de forma.

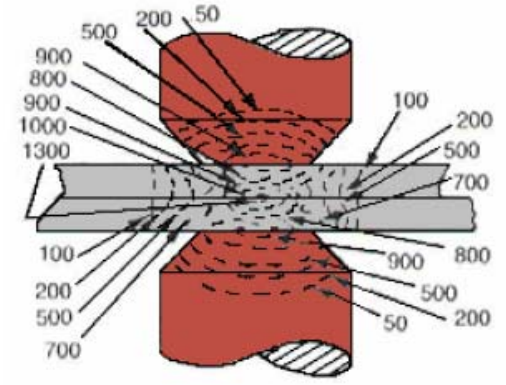


Figura 2.14 – Perfil de temperatura (°C) estimada durante a soldagem (RWMA, 1989)

Além disto, principalmente no caso da soldagem de chapas “galvanizada”, há ainda a difusão química na superfície do eletrodo. Guedes (2004), em seus ensaios, observou o depósito de zinco na superfície do eletrodo. Então, fez um estudo mais aprofundado e confirmou que em alguns casos, após o eletrodo ser utilizado várias vezes, surgiam três camadas distintas de material na superfície do eletrodo, sendo o metal de base (cobre), zinco depositado na superfície e, entre estas duas camadas, uma camada de latão (a Fig. 2.15 mostra as três camadas com marca das indentações que diferenciou o tipo de material). Em outros casos apareciam duas camadas, a do metal base (cobre) e a de latão. Essas camadas presentes na superfície dos eletrodos fazem com que tanto a resistividade elétrica quanto a resistência à deformação da ponta eletrodo sejam aumentadas, fazendo com que esta região aqueça além do projetado (previsto).

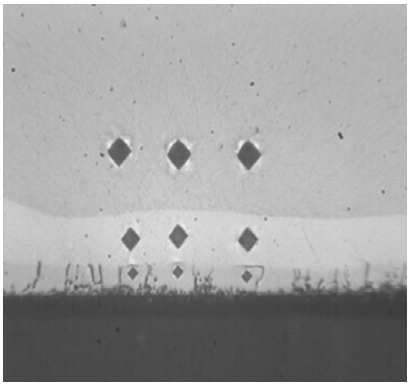


Figura 2.15 – Camadas de zinco difundidas no cobre do eletrodo (GUEDES, 2004)

Por ter um papel muito importante na soldagem, os eletrodos são construídos com diferentes geometrias, cada qual com sua finalidade e aplicação. Os mais utilizados são mostrados na Figura 2.16. Nota-se que existe uma grande diferença entre as geometrias da ponta do eletrodo, sendo que no eletrodo plano o contato se dá pela área total definida pelo diâmetro do corpo do eletrodo, enquanto que em outras configurações a área é bem menor que uma seção do corpo do eletrodo, como é o caso do truncado. Essa geometria define a densidade de corrente que vai passar pelas peças a serem soldadas.

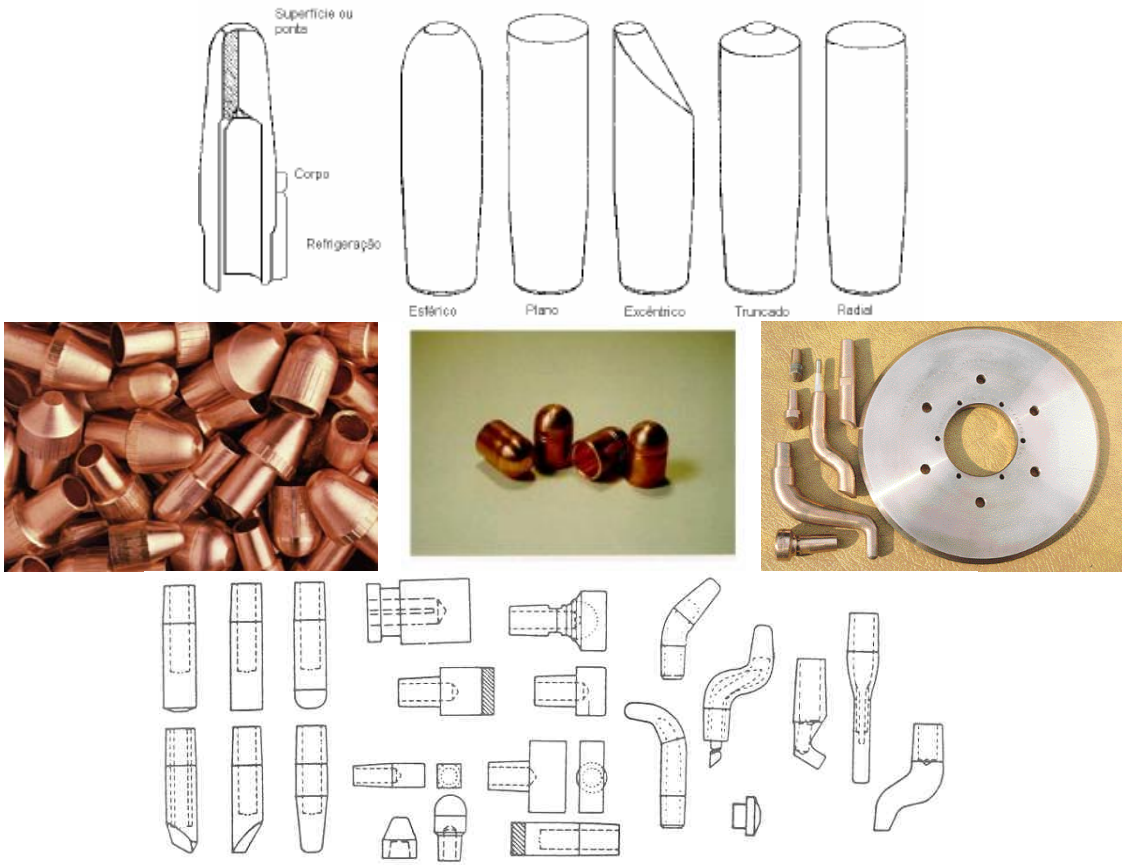


Figura 2.16 – Tipos mais utilizados de eletrodo na soldagem a ponto (Intermachinery, 2002)

Os materiais para eletrodos em soldagem por resistência são classificados pela RWMA ("Resistance Welder's Manufacturer's Association" - 1989) da seguinte forma:

GRUPO A – Ligas de cobre

GRUPO B – Materiais refratários e compósitos

GRUPO C – Materiais especiais

Dentro de cada Grupo, os eletrodos ainda são classificados por classes, ou seja:

Classe 1: É composta de materiais não tratáveis termicamente e endurecidos por trabalho a frio, que não afeta as altas condutibilidades térmica e elétrica;

Classe 2: É composta por materiais com propriedades mecânicas mais altas e condutibilidades elétrica e térmica mais baixa em relação aos eletrodos da Classe 1. As propriedades mecânicas e físicas requeridas são conseguidas por tratamento térmico ou por uma combinação de tratamento térmico e trabalho a frio. Os eletrodos da Classe 2 são os mais utilizados e podem se adequar a uma ampla faixa de metais e condições;

Classe 3: É composta por materiais com propriedades mecânicas mais altas e menores condutibilidades térmica e elétrica, quando comparadas com aquelas dos eletrodos da Classe 1 e 2. A Tab. 2.1 resume a classificação dos eletrodos por grupo e classes.

Tabela 2.1 – Classificação dos eletrodos de soldagem a ponto pela RWMA (1989)

GRUPO	CLASSE	Rockwell (HBR mín.)	Condutividade (% IACS mín.)	Material do eletrodo	Material a ser soldado
A	1	65	80	Cobre - Zircônio	ligas de alumínio, ligas de magnésio, materiais revestidos (galvanizados), latão e bronze.
	2	75	75	Cobre - Cromo	aços laminados a frio e a quente, aços inoxidáveis, latão e bronze de baixa condutividade e soldagem de aços galvanizados.
	3	90	45	Cobre - Cobalto - Berílio - Níquel	materiais de alta resistência como aços inoxidáveis, aços níquel-cromo.
B	10	72	45	Cobre - Tungstênio	materiais altamente condutores como ligas de Cu e Ag, eletro-conformação, eletro-forjamento. Materiais pouco condutores como os aços inoxidáveis, onde altas forças devem ser aplicadas.
	11	94	40	Cobre - Tungstênio	
	12	98	35	Cobre - Tungstênio	
	13	69	30	Tungstênio	
	14	85	30	Molibdênio	
C	20	75	75	Materiais especiais $CuAl_2O_3$	metais com revestimento metálico como aços galvanizados, aços doces e aços baixo carbono

Segundo Gedeon et al. (1984), em relação a eletrodos tipo tronco-cônico, a faixa de soldabilidade é aumentada em chapas galvanizadas. Já com eletrodos “circunferênciais” (esféricos), não há mudança na faixa de soldabilidade quando se utiliza chapas com ou sem revestimentos. Esses eletrodos (esféricos) também utilizam menores faixas de corrente quando comparados com os eletrodos truncados (tronco-cônico).

2.2.7 – Espessura e tipo de material das chapas

Em princípio, a soldagem a ponto por resistência foi desenvolvida para soldar chapas de aço ao carbono sem adição de ligas ou revestimentos. Os parâmetros de soldagem eram menos evoluídos, tanto pela falta de tecnologia da época quanto pelo grande campo de soldabilidade deste tipo de material, o que não demandava parâmetros mais sofisticados. Porém, com o desenvolvimento de novos materiais com adição de ligas para melhoria das propriedades mecânicas das chapas, ou mesmo pelo uso de revestimentos para proporcionar maior resistência à corrosão das mesmas, os campos de soldabilidade ficaram restritos e a soldagem ficou mais difícil de ser realizada, demandando o desenvolvimento tecnológico do processo.

A composição de um metal determina seu calor específico, temperatura de fusão, calor latente de fusão e condutibilidade térmica. Estas propriedades governam a quantidade de calor requerida para fundir o metal e produzir uma solda (AWS, 1998). Em metais de alta condutibilidade térmica, tais como cobre, pouco calor é desenvolvido mesmo sob altas densidades de corrente. A pequena quantidade de calor gerado é rapidamente transmitida para dentro do material circundante e para os eletrodos. Como enfatizado por Machado (1996), no caso do alumínio e suas ligas, também se tem a dependência marcante da condutividade térmica, exigindo uma maior intensidade de corrente para a realização da solda. Esses altos valores são limitados pelo equipamento de soldagem, já que aumentar o tempo de corrente não tem efeito significante. Estas características são as principais dificuldades de se soldar chapas de maiores espessura ou de alta condutividade.

A adição de ligas e/ou revestimentos no material das chapas influencia diretamente a resistividade elétrica do material e essas modificações afetam diretamente o aquecimento por resistência durante a soldagem. De acordo com a AWS (1998), para o caso de adição de alguns elementos de liga, ou combinações destes, na soldagem em aços baixo-carbono e aços baixa-liga de alta resistência os mesmos podem fornecer propriedades tanto indesejáveis quanto desejáveis, dependendo do elemento e de sua quantidade. Por exemplo, o fósforo, o enxofre, o titânio, o nitrogênio e o oxigênio, quando em excesso, favorecem a ruptura interfacial da solda quando esta é submetida ao ensaio de

arrancamento. O titânio, quando em quantidade superior a 0,18%, reduz o diâmetro máximo da lente de solda, a resistência à tração axial e cisalhante e a faixa de corrente. Já o efeito negativo do nitrogênio pode ser diminuído ou mesmo eliminado com a introdução de alumínio, como nos aços acalmados ao Al.

Em chapas galvanizadas, a camada de zinco presente na superfície do material faz com que a resistência elétrica diminua, pois o zinco apresenta uma resistividade menor quando comparado ao aço ao carbono. Devido a este fato (resistências de contato serem mais baixas nos aços galvanizados), para se produzir diâmetros satisfatórios de pontos de solda, tempos e níveis de corrente de soldagem são necessariamente mais altos, quando comparados aos aços não revestidos (BRANCO, 2004). Além disso, durante a formação de uma solda a ponto entre duas chapas de aço revestidos com Zn, o zinco na interface sobreposta se funde e é radialmente deslocado da zona de solda para formar uma auréola que circunda a solda (Intermachinery, 2002). De acordo com esta referência, esta auréola desvia a corrente para passar ao redor da zona de solda, deixando menos corrente disponível para a formação de lente. Com isso, é necessário aumentar o valor da corrente para gerar a solda. Já Gedeon et al. (1984) dizem em seu trabalho que pequenas variações na espessura do revestimento “hot-dipped” não afetam significantemente a faixa de soldabilidade aceitável.

Outro fator que influencia diretamente na resistência do conjunto a ser soldado é a espessura das chapas. Chapas mais espessas dissipam mais o calor e tenderia apresentar o mesmo efeito de um material com alta condutividade térmica. Porém, quanto maior a sua espessura, maior será a resistência total à passagem de corrente no início do processo (devido à resistência RB_2 e RB_3 da Fig. 2.4). Um aquecimento significativo ao longo da espessura da chapa, de forma concorrente com o mencionado acima, dificulta a dissipação de calor durante o tempo de corrente (Δt menor), facilitando a formação da lente. Por outro lado, faz diminuir a resistência mecânica das chapas, facilitando a indentação. O aumento da espessura em si também tem influência sobre o efeito mecânico, ou seja, quanto maior a espessura e/ou a resistência mecânica da chapa, maior será a força aplicada pela pinça para que se consiga o efeito de caldeamento, os efeitos conjuntos acima apontados levam à maior indentação.

2.3 - Equipamentos de Soldagem a Ponto por Resistência

Segundo Grunzel (2004) até o fim dos anos 80, a corrente em soldagem a ponto por resistência era gerada por um transformador na mesma freqüência da rede elétrica (50/60 Hz). Esta freqüência é considerada baixa e é designada por LF, do inglês “Low Frequency”.

Transformadores monofásicos produzem corrente alternada (no caso, representada por AC, do inglês “alternating current”), então as fontes que utilizam a freqüência da rede e produzem uma corrente alternada recebe a designação de LF/AC. Porém, esse tipo de transformador não atendia a maiores demandas de potência quando requeridas. Com isso transformadores trifásicos com pontes retificadoras gerando um uma corrente constante (CC) foram desenvolvidos para conseguir suprir a maior demanda. Entretanto, devido à alta indução dos transformadores trifásicos, a regulagem da corrente era dificultada não apresentando resultados apropriados, além disso, estes transformadores eram grandes e pesados.

Com a introdução de novos materiais na indústria automobilística (aço de alta resistência mecânica, alumínio, etc.), uma maior energia de soldagem passou a ser necessária, com modelagem e controle mais exato dos parâmetros de solda. O uso de robôs na soldagem exigiu a construção de pistolas de solda com transformadores integrados, a fim de superar os problemas de perda de energia pelos cabos secundários. Passou a ser necessário tornar o conjunto pistola-transformador o mais compacto e leve possível.

Como os transformadores trifásicos apresentavam os problemas citados, não conseguiam atender os avanços tecnológicos. Surgiu assim a idéia de operar o transformador a uma freqüência mais alta do que os 60 Hz da rede, para reduzir seu peso e dimensões e alcançar um melhor controle do processo. Essa freqüência foi sendo aumentada e descobriu-se que com 1 kHz tem uma otimização da relação rendimento e perda de potencia (GRUNZEL, 2004). Com isso, os transformadores puderam ser fabricados com menor quantidade de ferro-silício necessário no núcleo do transformador, além de melhorar o controle do processo de soldagem. Utilizando-se uma corrente contínua em média freqüência (1 kHz) e produzindo na saída um sinal de corrente praticamente constante, esses transformadores são conhecidos como MF/DC (do inglês Medium Frequency combinado com Direct Current).

2.4 - Desafios Tecnológicos na Soldagem a Ponto por Resistência

Apesar da simplicidade do processo de soldagem a ponto por resistência quando comparado a outros processos de soldagem, alguns distúrbios podem ocorrer no ponto de solda realizado. A Fig. 2.17 mostra possíveis dificuldades ou defeitos que podem aparecer durante a realização do ponto de solda.

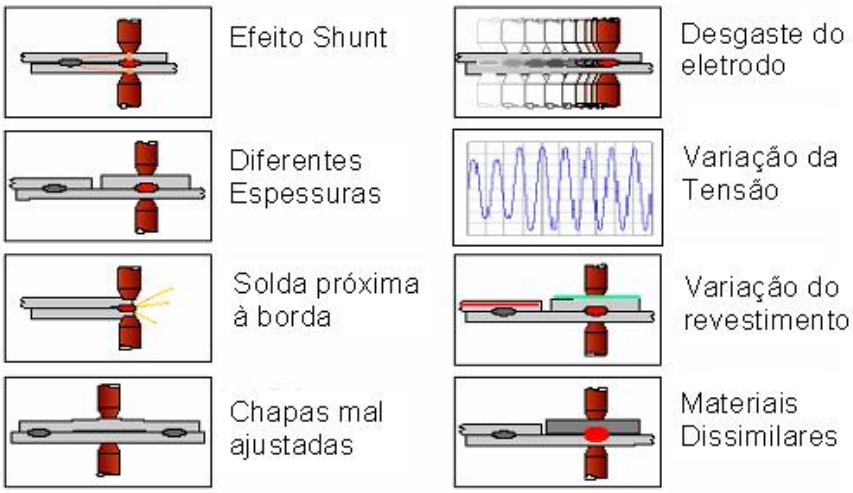


Figura 2.17 – Possíveis problemas na realização do ponto de solda (MATUSCHEK; POELL, 2005, traduzida)

Com o intuito de evitar ou minimizar os distúrbios que possa ocorrer durante o processo de soldagem, melhorias tecnológicas têm sido implantadas nas máquinas de solda a ponto, como novas fontes controladas eletronicamente; transformadores que trabalham com altas freqüências e com maior potência; transformadores que estão sendo colocados nos braços dos robôs, em automação; melhores sistemas de controle de força, etc (VARGAS, 2006).

Uma outra abordagem para melhorar o produto final em solda a ponto é controlar os parâmetros de solda, procurando compreender os efeitos destes sobre a geometria e resistência mecânica do ponto formado. Neste sentido, a literatura científica tem sido direcionada para pesquisas sobre a formação e crescimento da lentilha de solda e a influência dos parâmetros neste crescimento.

2.5 – Resistência Dinâmica

Uma característica muito importante a ser monitorada na soldagem a ponto é a resistência dinâmica, podendo ser utilizada como parâmetro em um sistema de controle. Kaiser et al. (1982) e Fonseca e Bracarense (1999) usam a definição de que e a resistência dinâmica é a razão entre os valores de pico da tensão e da corrente tomados em cada meio ciclo. Traçando-se esses valores em função do tempo, obtém-se uma curva característica para uma determinada aplicação. Já Tan et al (2004) dizem que o estudo das mudanças da resistência elétrica durante a soldagem (resistência dinâmica) pode ajudar a entender os mecanismos do processo, otimizar os parâmetros do processo e desenvolver estratégias para controle de qualidade da solda realizada. Ainda mostram que a resistência dinâmica pode ser calculada pela equação 2.5, variando ao longo do tempo:

$$R_{dinâmica} = R_{mat} + R_{pel} + R_{con} \quad (2.5)$$

Onde, de acordo com os autores:

R_{mat} – Resistência do material da chapa ao longo da espessura, calculada, por:

$$R_{Mat} = \rho . L / A \quad (2.6)$$

ρ – resistividade do material
L – comprimento do percurso da corrente
A – Área transversal do percurso da corrente

R_{pel} – Resistência do revestimento ou película (contaminante na superfície), calculada por:

$$R_F = \rho_t . \xi . H / F \quad (2.7)$$

ρ_t – resistividade do revestimento ou da película
ξ – fator pressão (0,2 para superfície consideravelmente elástica, 1,0 para totalmente plástica e 0,7 uma aproximação razoável)
H – dureza do material
F – força compressiva

R_{con} – Resistência de constrição

$$R_C = 0,89\rho . (\xi H/nF)^{1/2} \quad (2.8)$$

ρ – resistividade do ponto de contato
n – numero de pontos de contato

Esses últimos autores (TAN et al. 2004) ainda citam, de uma forma não muito esclarecedora da definição das resistências que apresentam, que a resistência de contato é igual à resistência de constrição para metais com superfície limpa. Por outro lado, definem no início do artigo que as resistências eletrodo-chapa e chapa-chapa são as resistências de contato.

Segundo Chien e Kannatey (2003), a curva de resistência dinâmica, calculada pela razão do pico de corrente pelo pico de tensão correspondente. Para uma chapa galvanizada, apresenta os pontos indicados na Fig. 2.18 e definidos na lista abaixo:

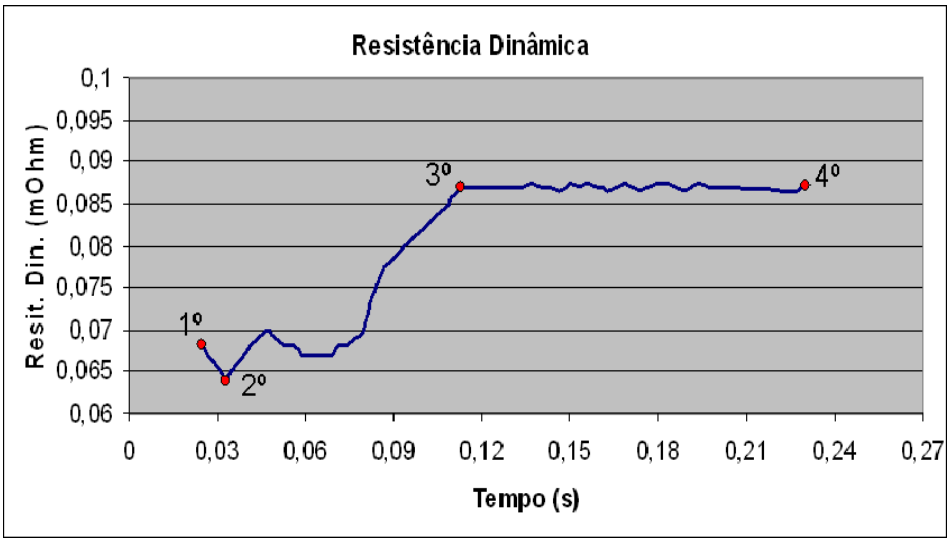


Figura 2.18 – Curva característica da Resistência Dinâmica segundo Chien e Kannatey (2003)

1º – A resistência do primeiro pico de corrente do primeiro meio ciclo;

2º – A menor resistência, quando a camada de zinco é totalmente fundida (no caso de uma chapa galvanizada);

3º – O pico de resistência, ou seja, o valor mais alto alcançado pela resistência (a faixa de crescimento da resistência entre o 2º e o 3º ponto é usado como indicação do crescimento da temperatura entre as chapas);

4º – A resistência ao final do ciclo de solda (o tempo relativo entre o 3º e o 4º ponto é muito utilizado como indicação de um bom tamanho do ponto de solda).

Dickinson et al. (1980) calculam de forma um pouco diferenciada a resistência dinâmica, ou seja, eles assumem que a resistência dinâmica deve ser computada dividindo-se os valores instantâneos de tensão pelos valores instantâneos de corrente correspondentes. Na revisão bibliográfica de seu artigo, citam que vários autores reportam variação dos parâmetros elétricos durante a soldagem de aços. E apresentam, pela Fig. 2.19, uma outra curva para a resistência dinâmica (um pouco diferenciada da apresentada na Fig. 2.18). Observa-se pelos oscilogramas de corrente e tensão que inicialmente a corrente diminui e a tensão começa a aumentar.

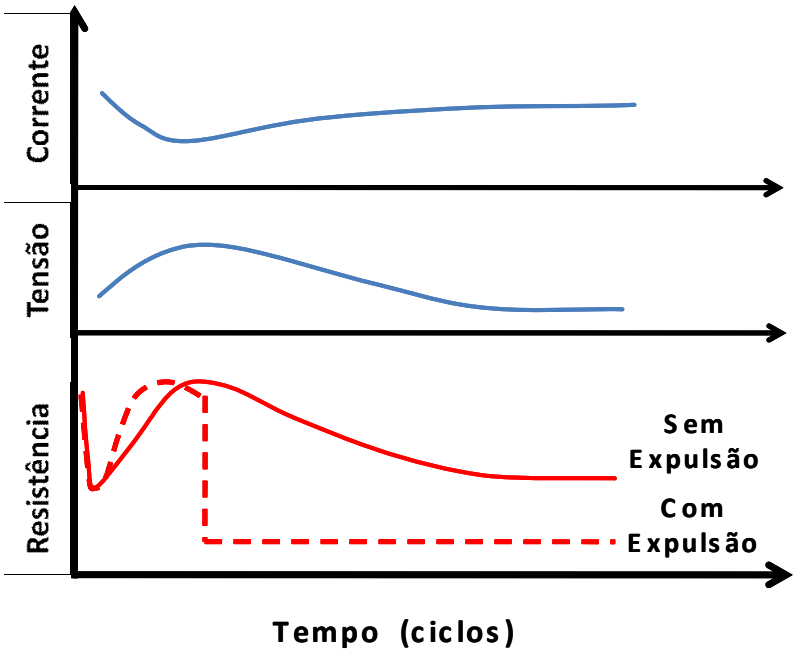


Figura 2.19 - Representação esquemática dos parâmetros elétricos na soldagem de aço doce (DICKINSON; FRANKLIN; STANYA, 1980 traduzida)

De acordo com os autores, o comportamento acima pode ser melhor representado por uma curva de típica de resistência dinâmica esquematizada, mostrada na Fig. 2.20. Nota-se que no início da soldagem (primeiro ciclo de soldagem) a resistência ainda é alta devido a fatores isolados ou em conjunto, tais como asperezas da superfície do material, possível filme (película) de óleo (que é utilizado para evitar oxidação no armazenamento das chapas), camada de oxidação e outros contaminantes que possam estar aderidos na superfície. Depois, a resistência cai rapidamente, quando a camada de zinco é fundida, e aumenta novamente para um maior valor. Após atingir esse máximo, a resistência vai caindo ao longo do tempo. Caso ocorra a expulsão de material, a resistência cai repentinamente a um valor bastante baixo.

Após o primeiro ciclo de soldagem, essa resistência começa a diminuir devido à quebra da superfície, tanto pela aplicação da força dos eletrodos sobre as chapas como pelo início da passagem de corrente (momento caracterizado no início da curva de resistência da Fig. 2.19 e pela região I da Fig. 2.20). Após essa quebra, ocorre o contato direto metal-metal na região onde se formará a lente de solda. Porém, a resistência ainda diminui um pouco devido ao amolecimento das asperezas e ao aumento da área de contato com os eletrodos. Concomitantemente, ocorre o aumento da temperatura, apesar da redução na resistividade da região de solda. A competição entre esses efeitos determina o mínimo da resistência no processo (Fig. 2.19 e região II da Fig. 2.20).

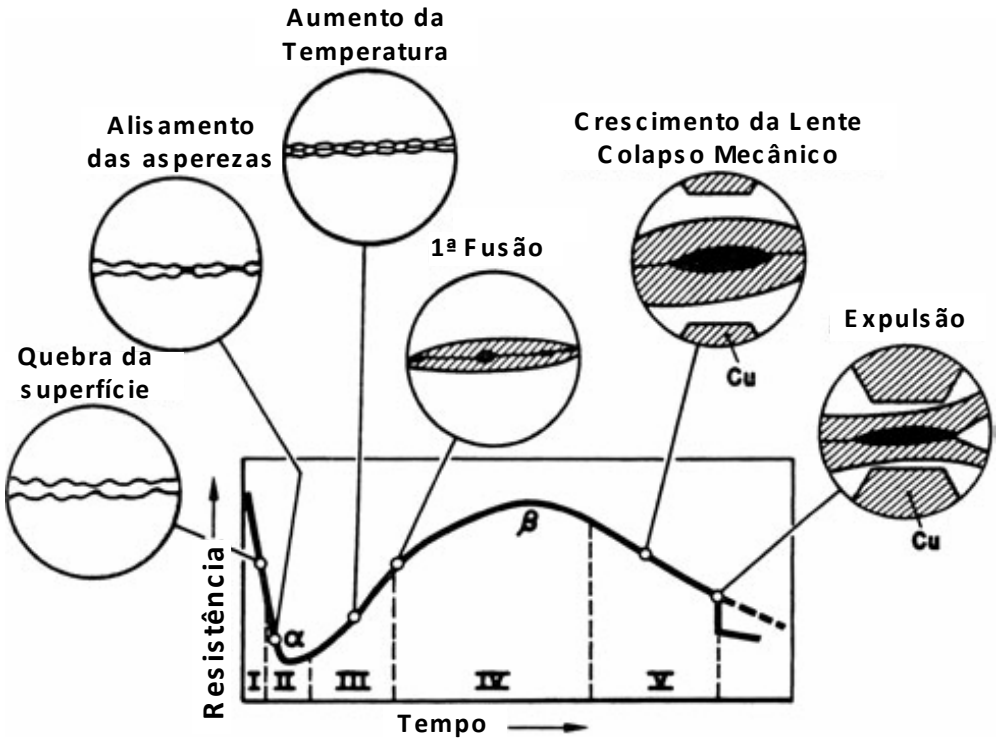


Figura 2.20 – Resistência dinâmica segundo Dickinson, Franklin e Stanya, (1980 traduzida)

Logo após, a resistência volta a aumentar continuamente, como conseqüência de um acréscimo na resistividade do material pelo crescimento da temperatura. Segundo Dickinson, Franklin e Stanya, (1980), esse ponto pode ser definido provavelmente próximo ao ponto de inflexão da curva no meio da região III da Fig. 2.20. O metal na região de contato chapa-chapa começa a coalecer e ocorre a chamada “primeira fusão”, ou seja, a lente de solda começa a ser formada (região III da Fig. 2.20). Em seguida a resistência continua a subir pelo mesmo efeito de incremento da resistividade. Porém, nesse período a lente de solda começa a crescer (aumento da região fundida) facilitando a passagem de corrente e passando a ter um efeito contrário, ou seja, tendência de diminuir a resistência. A temperatura se estabiliza em um valor máximo (temperatura de fusão do material) e com isso, não ocorre mais o aumento na resistividade. Entretanto, a lente de solda ainda esta crescendo, diminuindo cada vez mais resistência à passagem da corrente. Esse ponto se caracteriza por um pico da resistência (pico máximo da resistência da Fig. 2.19 e ponto β da região IV da Fig. 2.20). A partir daí a resistência tende a diminuir.

Finalmente, a lente de solda cresce até seu tamanho final com a curva de resistência decrescendo até a abertura da pinça. Nesta fase pode ocorrer o problema de expulsão, ou seja, o metal fundido na região da lente de solda é jogado violentamente para fora, ocasionando a falta de material no momento da solidificação fragilizando a união. Esse efeito é tipicamente demonstrado na curva de resistência dinâmica quando ocorre uma

queda brusca (instantânea) do valor da resistência, caracterizado pela curva tracejada da Fig. 2.19 e pela queda da curva na região V da Fig. 2.20.

Sendo assim, têm-se as regiões apontadas na Fig. 2.20 resumidamente como:

I – Quebra da superfície (que, pelo entendimento do presente revisor, poderia ser o início do tempo de pré-pressão, item 2.2.3)

I I – Aplainamento das asperezas por deformação plástica (que poderia ser o fim do tempo de pré-pressão, item 2.2.3)

I I I – Aumento da temperatura (que poderia ser os primeiros ciclos do tempo de soldagem, item 2.2.3)

IV – Primeira fusão (que poderia ser os ciclos intermediários do tempo de soldagem, item 2.2.3)

V – Crescimento da lente e colapso mecânico (que poderia ser os derradeiros ciclos do tempo de soldagem, item 2.2.3, sendo o colapso, quando houver, o efeito de indentação).

CAPÍTULO III

EQUIPAMENTOS, TÉCNICAS E MATERIAIS

Neste capítulo são apresentados os equipamentos utilizados no trabalho, bem como o sistema de monitoração, aquisição e tratamento dos dados de soldagem.

3.1 – Fontes de Soldagem a Ponto por Resistência

O Laboratório para o Desenvolvimento de Processos de Soldagem – Laprosolda - possui os dois tipos de fontes para soldagem a ponto por resistência, uma fonte de corrente alternada com baixa freqüência e uma com corrente contínua de média freqüência, como mostrado na Fig 3.1.

(a) (b)

Figura 3.1 – Fontes presentes no Laprosolda: (a) Corrente alternada e baixa freqüência (LF/AC); (b) Corrente contínua e média freqüência (MF/DC).

Nos ensaios realizados no presente trabalho, a fonte utilizada foi a de baixa freqüência e corrente alternada (LF/AC), mostrada na Fig. 3.1(a), com transformador

Soltronic HT75 2 MF, 440 V, 75 kVA e 170 A e sistema de controle tiristorizado marca Fase Saldatura, potência máxima 54 kVA. A pinça de acionamento é pneumática e o sistema de refrigeração é a base de água na temperatura ambiente, ou seja, não se resfria a água antes de bombeá-la no sistema.

3.2 – Monitoração dos Parâmetros Elétricos de Soldagem

3.2.1 – Sistema de aquisição e tratamento de dados

No Laprosolda, o sistema de monitoração é constituído de um sistema computadorizado de aquisição e tratamento de dados, de um sensor de corrente e de um sensor de tensão, todos dedicadamente desenvolvidos para monitorar os sinais de corrente e tensão. A aquisição destes sinais é feita através de uma placa A/D da National Instruments (PCI 6036E) com um adaptador CB - 68LP (Fig. 3.2), com uma freqüência de aquisição de 25kHz e 16 bits. Esta placa é comandada por dois programas desenvolvidos no ambiente LabVIEW e implementados com dois VI's (instrumento virtual) (NASCIMENTO, 2003). O primeiro programa, chamado de Aquisição.vi (Fig. 3.3) faz a aquisição e armazenamento dos dados relativos aos sinais (no caso, a integração do sinal de corrente, ver item 3.1.3, é feita já neste programa). No programa, pode-se regular os valores de freqüência de aquisição, o tempo de aquisição e os canais a serem utilizados. O segundo programa, denominado Visualizador de Dados.vi, permite, como ilustra a Fig. 3.4, abrir, manipular (selecionar faixas de tempo dos sinais que se deseja trabalhar) e tratar os dados (fator de conversão e calculo da resistência) gravados pelo primeiro programa. Ilustrações das telas principais dos dois programas são apresentadas nas Figs. 3.3 e 3.4.

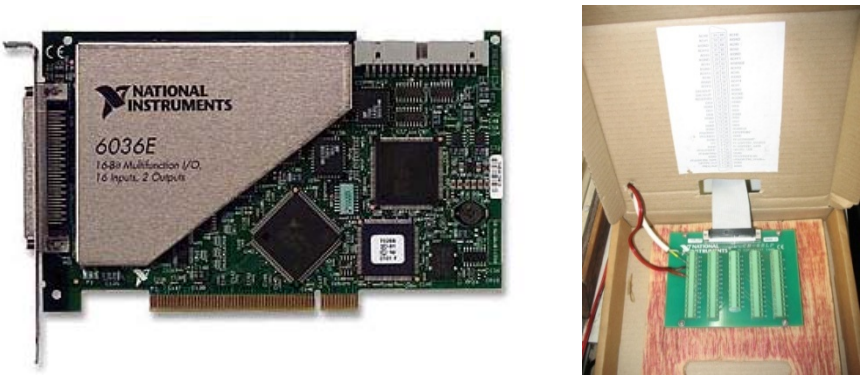


Figura 3.2 – Placa de Aquisição e Adaptador

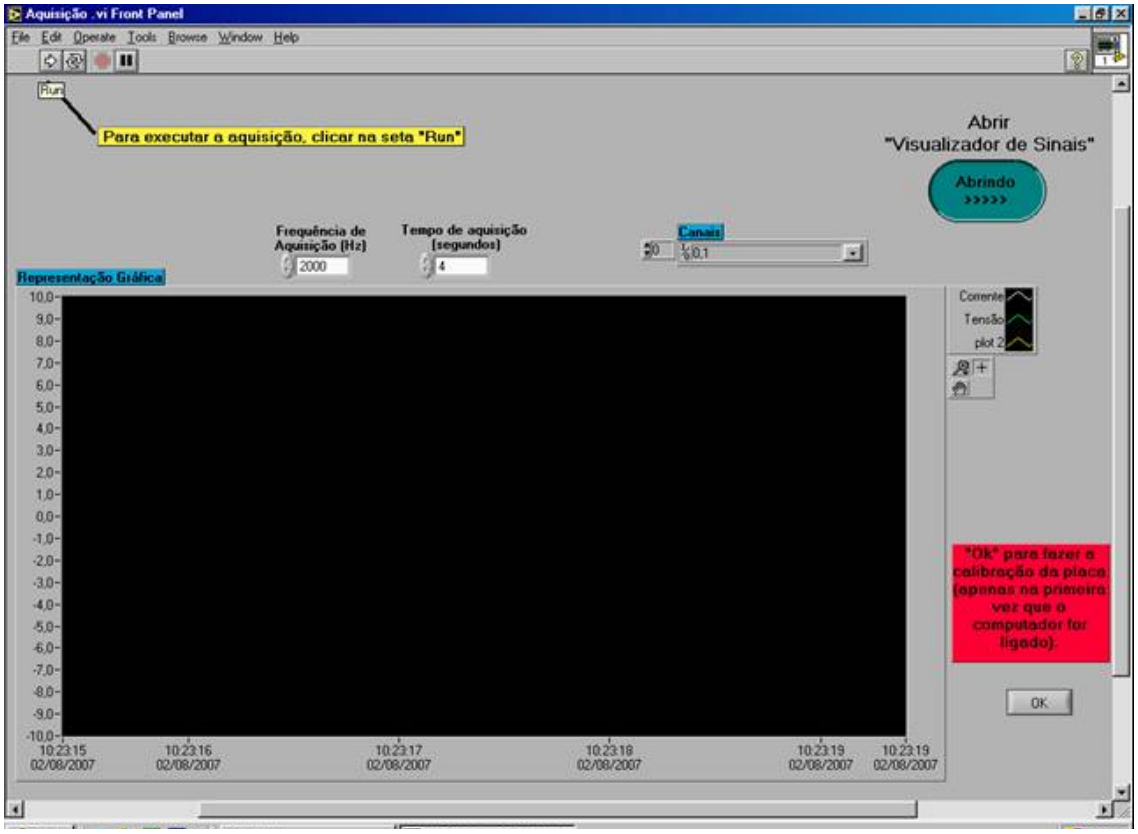


Figura 3.3 – Tela principal do programa “Aquisição.VI”

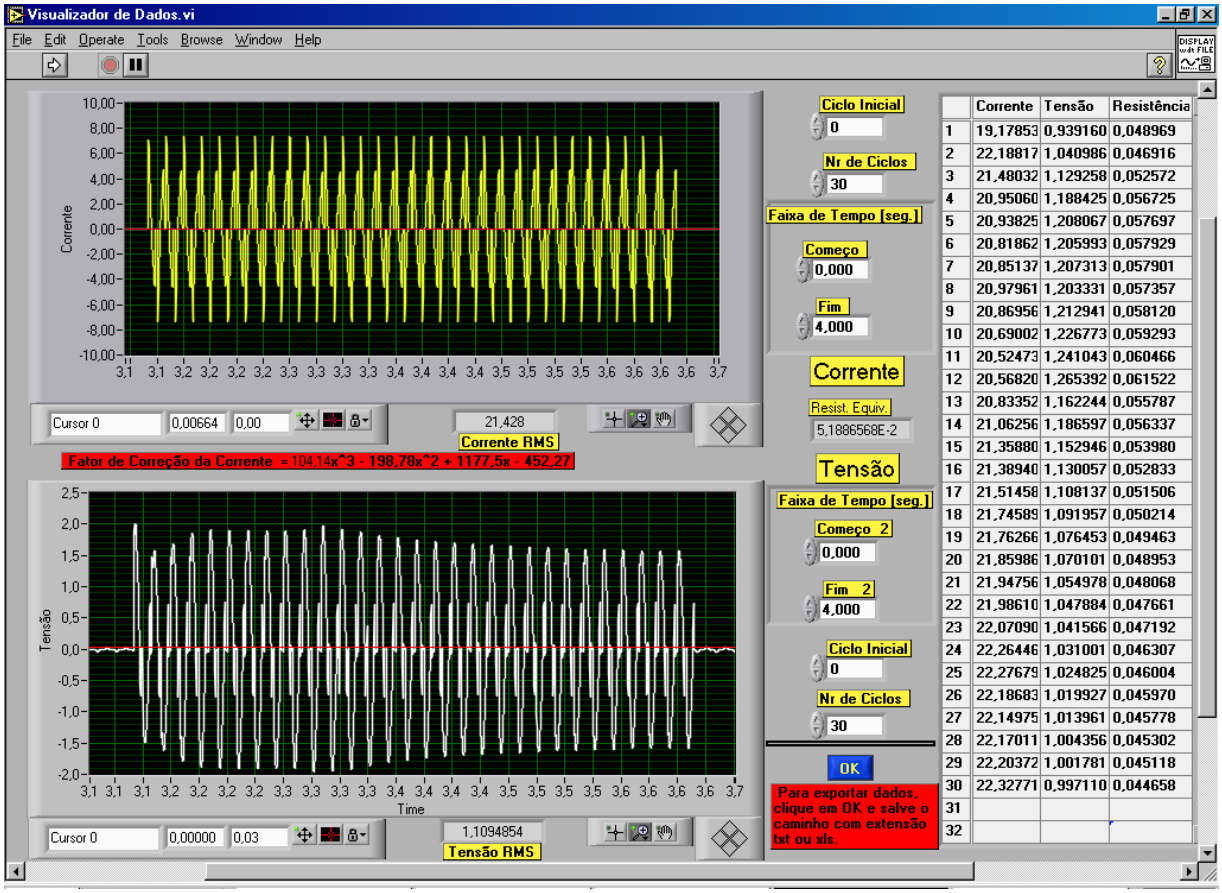


Figura 3.4 – Tela principal do programa “Visualizador de Dados.VI”.

3.2.2 – Medição da tensão de soldagem

O nível de tensão aplicado em soldagem por resistência é bastante baixo (1 a 5 V). Nesse caso, pode se adquirir o sinal de tensão diretamente da pinça sem a presença de qualquer dispositivo entre a pinça e a placa de aquisição. Com isso, para se fazer a aquisição do sinal de tensão de soldagem (excluindo as perdas nos cabos e outras conexões), foi brasado um fio de cobre na pinça de soldagem (Fig. 3.5), conectando sua outra extremidade na placa de aquisição.

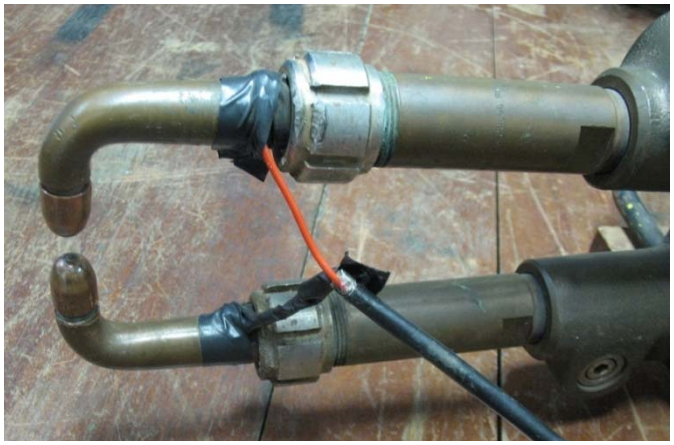


Figura 3.5 – Tomada de tensão para monitoração do sinal de tensão

Apesar do baixo nível de tensão, procurou-se incorporar no sistema, por segurança contra fuga de terra e contra sobre-tensão acima dos 10 V permitido na entrada da placa de aquisição, um circuito isolador baseado em acoplador ótico. A princípio foram realizados alguns ensaios com a utilização do circuito de isolação. Porém, percebeu-se que em várias aquisições ocorriam alguns picos no sinal de tensão que não eram comuns ao processo, como ilustrado pela Fig. 3.6. Ao relacionar a existência desses picos com o isolador, retirou-se o acoplador e foram repetidas solda nas mesmas condições realizadas preliminarmente. A Fig. 3.7 mostra o sinal de tensão adquirido sem o dispositivo de segurança (acoplador óptico), com os mesmos parâmetros de soldagem do ensaio realizado apresentado na Fig. 3.6. Nota-se que não ocorreram mais os picos no meio do sinal de tensão. Após esta análise, decidiu-se pela não utilização do acoplador ótico durante a aquisição dos sinais nos ensaios realizados, levando em conta que o aterramento do equipamento, que o transformador em si poderia servir de isolador e que a tensão normalmente cedida por este tipo de transformador nunca alcança os valores limites.

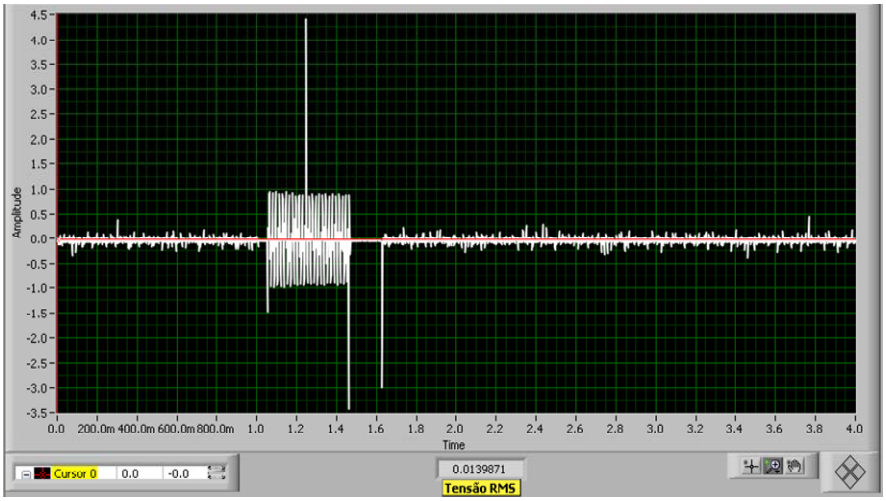


Figura 3.6 – Sinal de tensão com acoplador ótico com picos anômalos.

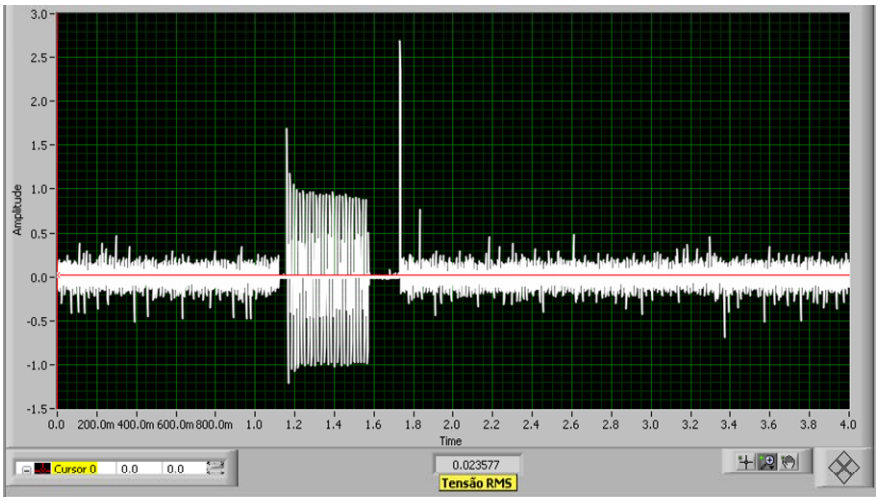


Figura 3.7 – Sinal de tensão sem acoplador ótico, sinal esperado.

3.2.3 – Medição da Corrente

Segundo Higashi (2006), encontram-se sensores de corrente que são constituídos de várias espiras enroladas em um núcleo de material ferromagnético (bobinas de indução). Apesar de sua confecção ser aparentemente simples, existe alguns problemas que estes núcleos podem apresentar. Higashi cita que devido à magnetização do núcleo, existe uma perda de energia, fato que determina estes transdutores como pouco precisos.

Uma alternativa segura e confiável para medida de corrente elétrica é o uso da bobina de Rogowski. Esta bobina, representada na Fig. 3.8, consiste de um núcleo toroidal, não magnético, que é colocado em torno do condutor. O campo magnético produzido pela corrente alternada no condutor induz uma tensão na bobina.

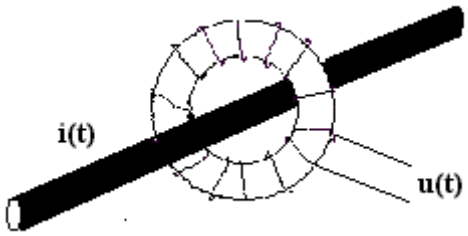


Figura 3.8 – Bobina de rogowski (HIGASHI, 2006)

Dentre as vantagens da bobina de Rogowski, pode-se citar (HIGASHI, 2006) a larga faixa de leitura em relação a um resistor shunt, a qual vai desde mA até alguns kA. A bobina não apresenta histerese, pois seu núcleo é de material não magnético. Possui boa linearidade, formato que facilita as medidas em lugares com acesso limitado, não possui contato físico com o circuito, um baixo consumo e uma baixa variação do sinal da saída com a temperatura. Além disso, a indutância mútua não depende da corrente nem da freqüência do sinal a medir. A única limitação em freqüência vem determinada pela ressonância da bobina, a qual depende do projeto.

Pode-se ressaltar dois tipos de bobinas de Rogowski, as bobinas flexíveis e as bobinas rígidas. No caso das bobinas flexíveis, ela se localiza sobre um núcleo flexível (Fig. 3.9). A bobina pode ser fechada ao redor do condutor que se deseja medir por meio da união de seus extremos. Neste caso, o importante é que a união se faça corretamente para obter um circuito fechado e minimizar desta forma toda a influência de correntes externas à bobina. Este tipo de construção é útil quando se trabalha com condutores largos e de difícil acesso, além de ser apropriado para medir a corrente sem ter que desconectar o condutor.

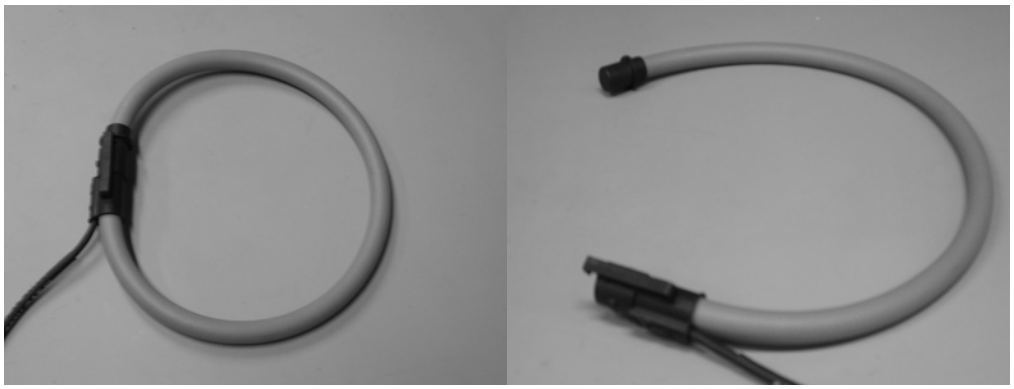


Figura 3.9 – Bobina Flexível (HIGASHI, 2006)

A bobina rígida é composta de um núcleo toroidal rígido de material não magnético sobre o qual se enrolam as espiras que formam o sensor (Fig. 3.10). Esta bobina é mais

indicada para medidas de grande precisão e para ser instalada de forma permanente. A indutância mútua é mais elevada e desta maneira, a tensão de saída é maior que nas flexíveis.

Figura 3.10 – Bobina Rígida (HIGASHI, 2006)

Nos experimentos realizados neste trabalho, para se fazer a medição da corrente foi utilizada uma bobina de Rogowski do tipo flexível, apresentada na Fig. 3.11. Entretanto, uma bobina rígida é usada pelo controlador do equipamento de soldagem, como ilustrado pela Fig. 3.12. A Fig. 3.13 ilustra a montagem das duas bobinas ao redor do cabo, próximas da pinça. A colocação das duas bobinas lado a lado (sobrepostas) visou garantir a mesma corrente medida. Observa-se que para minimizar erros de medida, usou-se na bobina rígida aros-sepadores para manter a mesma concêntrica ao cabo.

Figura 3.11 – Bobina flexível utilizada para medir o sinal de corrente nos experimentos

Figura 3.12 – Bobina rígida utilizada para medir o sinal de corrente nos experimentos

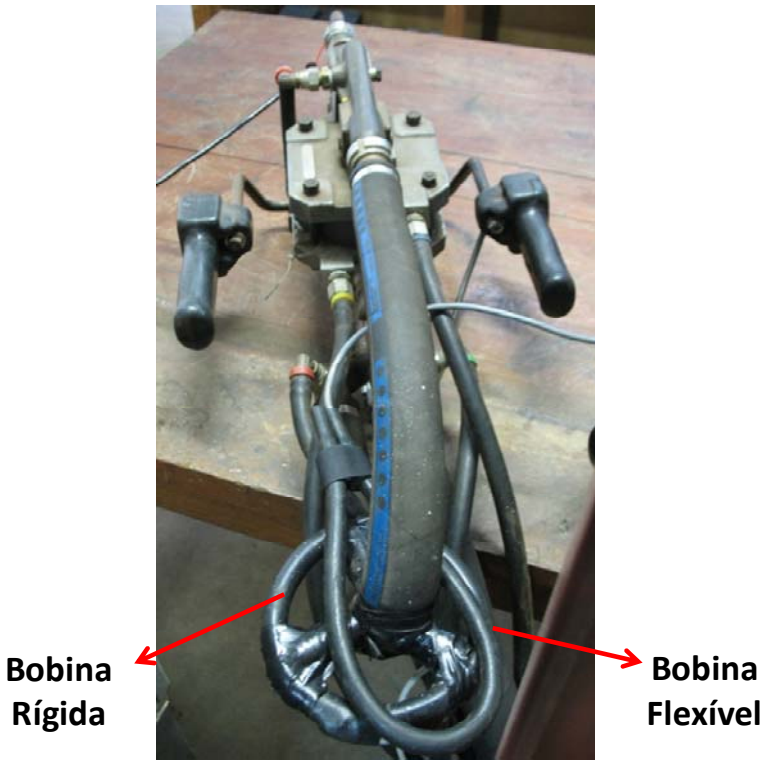


Figura 3.13 – Montagem das bobinas na pinça de soldagem

Um cuidado que se deve tomar ao utilizar uma bobina de Rogowski (não existente ao se utilizar shunts resistivos ou bobinas de indução) para a medição e aquisição do sinal de corrente, é que se deve fazer uma integração nos dados adquiridos para obter o sinal verdadeiro (Gedeon et al. 1987). A Fig. 3.14 apresenta o sinal ao longo do tempo como obtido na saída da bobina. Pode-se perceber que o sinal é estranho, considerando que o controlador é do tipo tiristorizado. Neste tipo de componente eletrônico, o chaveamento só pode se dar após uma inversão do sinal, de caráter irreversível até a próxima reversão (chama-se de ângulo de abertura de um tiristor o tempo angular em que se fecha o circuito para passagem de corrente). A Fig. 3.15 esquematiza como deveria ser um sinal ideal de corrente saída. Fica claro que o sinal da Fig. 3.14 não se assemelha com o sinal idealizado.

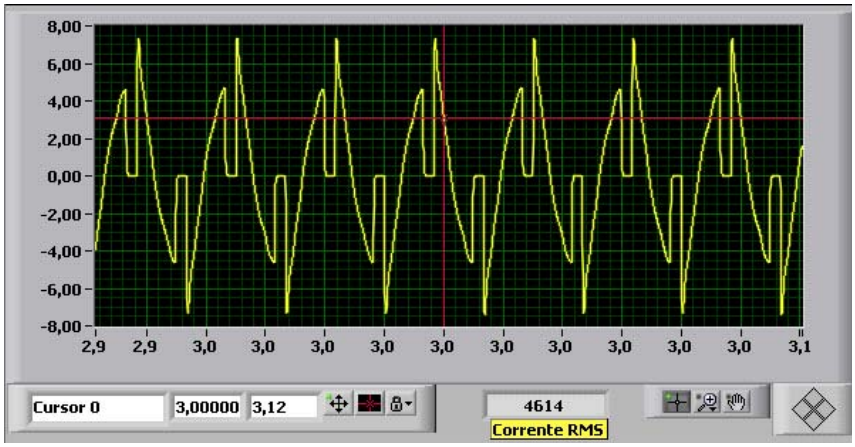


Figura 3.14 – Sinal de corrente obtido através de uma bobina de Rogowski sem a integração do sinal (GUEDES, 2004)

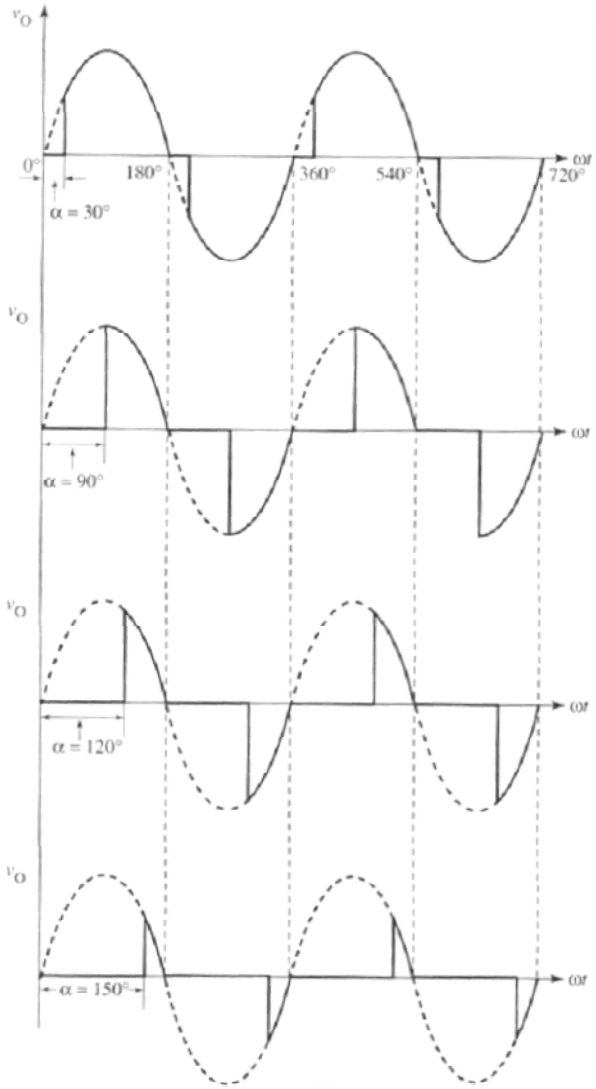


Figura 3.15 – Formas de onda ideal no controle de fase CA para ângulos de retardo variando de entre 30º e 150º (GUEDES, 2004)

Quando é feito a integração dos dados adquiridos de corrente, o sinal verdadeiro é conseguido como mostrado na Fig. 3.16 (senoidal interrompida). Observa-se a semelhança entre o sinal real (no caso, com um ângulo pequeno) e o sinal idealizado. Em vários trabalhos científicos é apresentada a utilização equivocada do sensor, como é o caso de Guedes (2004), que apresenta o sinal de corrente sem integração (é importante ressaltar que em seu trabalho, Guedes (2004) coloca essa questão em anexo para um posterior estudo).

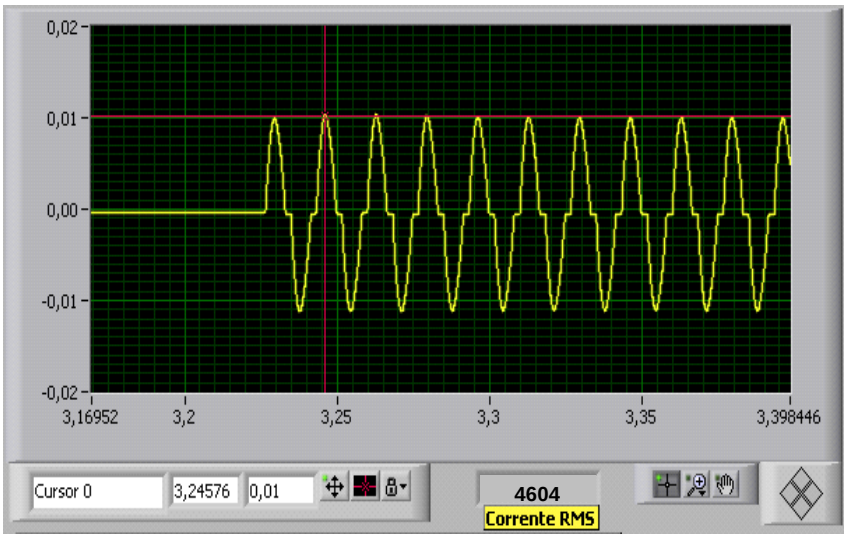


Figura 3.16 – Sinal de corrente obtido através de uma bobina de Rogowski com a integração do sinal.

3.2.4 – Cálculo de potência e resistência elétrica

Segundo Nascimento et al. (2006), a potência elétrica em soldagem é classicamente definida como o produto da tensão pela corrente, porém a forma correta de se calculá-la é utilizando a média aritmética do produto dos valores instantâneos de tensão e corrente, denominada de Potência Instantânea $P_{inst} = (\Sigma\ U_i \times I_i)/n$. Cunha et al (2006), em seu trabalho aplicam esta teoria no cálculo de potência de motores de uma fresadora, multiplicando os dados adquiridos de tensão e corrente instantâneos, fazendo-se uma média aritmética, obtendo a Potência (aparente) por fase, como foi utilizado em seu caso um motor trifásico, multiplica-se o valor por um fator 3, obtendo a Potência Total correspondente às três fases.

Seguindo o mesmo princípio, a resistência também é calculada por este método. Pela Lei de Ohm, U = RI, então R = U/I é calculado ponto a ponto (pode ser observado na terceira coluna da tabela da Fig. 3.4) pelos valores instantâneos de U e I. No final, faz-se a média aritmética de todos os valores de resistência pontual, obtendo assim o valor da resistência no sinal adquirido.

3.3 – Calibração da Força Aplicada pelas Pinças

Como visto no item 2.2.4, a força que a pinça aplica sobre as chapas para a realização do ponto de solda é função da pressão do ar comprimido. Ela tem, assim, seu valor regulado através do parâmetro de regulagem de pressão do equipamento (no presente caso, parâmetro P1 no controlador). Assim, para cada pinça demanda-se uma calibração para se ter uma relação entre o valor de pressão P1 e a força aplicada pela pinça de soldagem em Newton [N].

Para se fazer a calibração e a verificação da força entre os eletrodos, foi utilizado um dinamômetro digital marca Filizola, com sensor de força HBM modelo MB 35/1,76t, conforme mostrado na Fig. 3.17. Para tal, variou-se o valor de entrada P1 na máquina e mediu-se o valor da força aplicada pela pinça (sem a passagem de corrente, para não danificar o equipamento de medição).

Figura 3.17 – Calibração da força aplicada pela pinça.

Após variar o valor de entrada de pressão (sem unidade ou descalibrado) na máquina (entrada P1) de 2,0 até 6,0 com incrementos de 0,5 e medindo-se a força aplicada pela pinça, obteve-se os valores apresentados na Tab. 3.1. Esses valores foram apresentados em forma de gráfico na Fig. 3.18, com a sua respectiva curva de tendência linear (ajustada para passar pelo zero, por parecer mais lógico) e seu respectivo coeficiente de correlação. A Fig. 3.19 mostra o gráfico dos mesmos valores, porém sem forçar a linha de tendência a passar pelo zero. Já Fig. 3.20 apresenta a curva em forma de potência.

Tabela 3.2 – Valores de entrada na máquina e Força medida

Entrada na Máquina	Força em N
2	736
2.5	961
3	1197
3.5	1403
4	1619
4.5	1834
5	2080
5.5	2315
6	2511

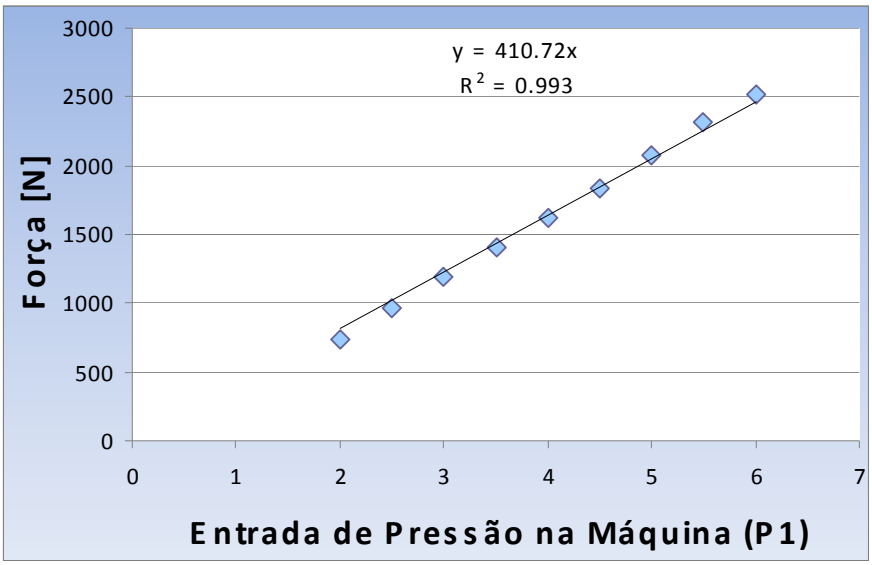


Figura 3.18 – Curva de calibração da força aplicada pela pinça, na faixa útil de trabalho (linha de tendência linear forçada a passar pelo zero)

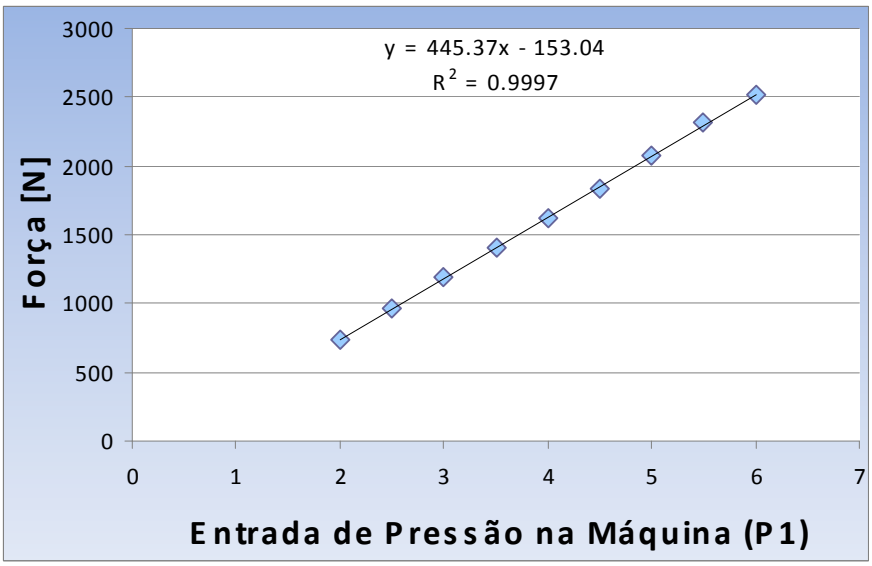


Figura 3.19 – Curva de calibração da força aplicada pela pinça, na faixa útil de trabalho (sem forçar a passagem pelo zero)

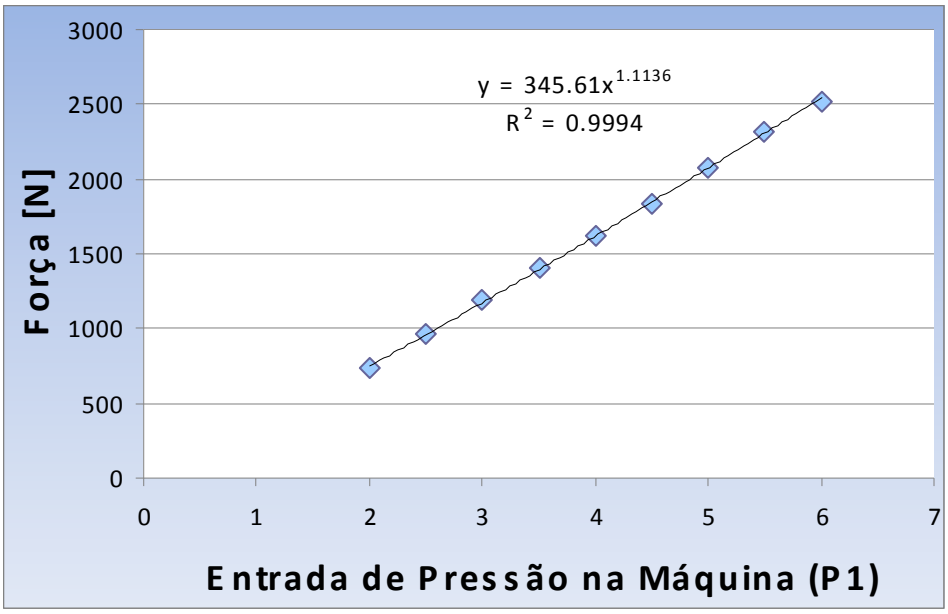


Figura 3.20 – Curva de calibração da força aplicada pela pinça, na faixa útil de trabalho, com linha de tendência do tipo potência

Percebeu-se que forçando a curva de ajuste a passar pelo zero, os valores apresentaram uma tendência que para valores menores de pressão os mesmos ficavam abaixo da curva e para pressões maiores os mesmo ficam acima da curva. Para verificar esse comportamento foi traçada a curva de resíduos (Fig. 3.21) tanto para o valor predito da curva passando pelo zero quanto para a curva de ajuste sem passar pelo zero. Observou-se que na curva “Resíduo 1” (forçada a passar pelo zero) que os resíduos ficaram abaixo da normal para valores de pressão em torno de 4.7 (entrada P1 na máquina) e para pressão acima deste valor o resíduo ficou positivo, mostrando que existe um comportamento tendencioso na curva de ajuste. Já a curva “Resíduo 2” (sem passar pelo zero), os valores de resíduos ficaram dispersos em torno da normal, o que mostra que não existe nenhuma tendência na curva de ajuste. Com isso, optou-se por utilizar essa curva de ajuste sem forçá-la a passar pelo zero.

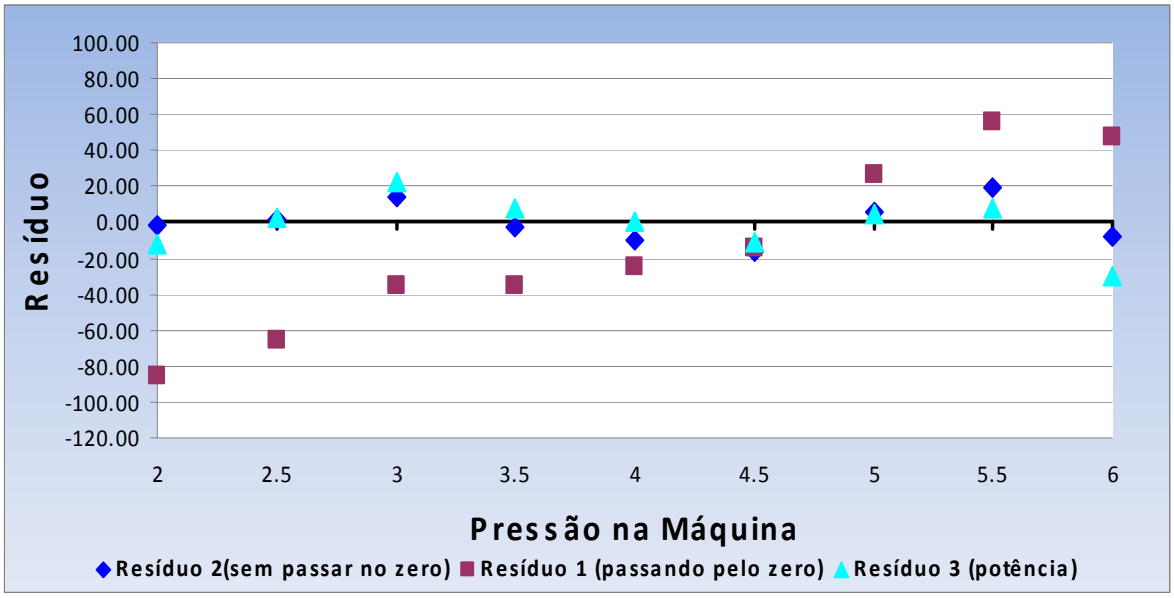


Figura 3.21 – Curva de resíduos em torno da normal para as curvas de ajustes

3.4 – Medição da Espessura da Camada de Zinco

Com o intuito de conferir o método de galvanização realizado nas placas de teste utilizadas nos ensaios, foram realizadas medições da camada de zinco, segundo Wolff (2006) a eletro-galvanização cria uma camada de zinco com espessura que variam em torno de 10 a 20 μm, já a galvanização a quente, esta faixa fica em torno de 40 a 60 μm.

Para a realização das medidas de espessura da camada de zinco, foi utilizado o aparelho Medidor Digital de Camadas DIGI-DERM Modelo 979-745, marca Mitutoyo (Fig. 3.22 (a)), capaz de realizar medidas de espessuras de materiais não magnéticos (revestimento de zinco) sobre materiais magnéticos (metal base), com uma precisão de 1 μm. A calibração do aparelho foi realizada no bloco padrão, fornecido juntamente com o mesmo, que consiste em uma placa de aço (material magnético) com acabamento superficial polido. Acima dela, foi colocada uma lâmina de plástico (material não magnético) de 22 μm (Fig. 3.22 (b)), procedendo-se assim com a aferição do aparelho. Este ajuste consiste em se obter a leitura no aparelho de 22 μm, que corresponde à espessura da lâmina de plástico, fornecida juntamente com o mesmo.

A calibração é obtida em duas etapas, ou seja, inicialmente a ponteira (sensor) deve ser colocada sobre a placa de aço, sem nenhuma lâmina e o mostrador do aparelho deve medir uma espessura de 0 μm. O ajuste é conseguido girando-se o botão ZERO presente na superfície frontal do mesmo. Em seguida, a ponteira deve ser colocada sobre a placa de aço com a lâmina e o mostrador do aparelho deve medir a espessura desta, no caso, 22 μm.

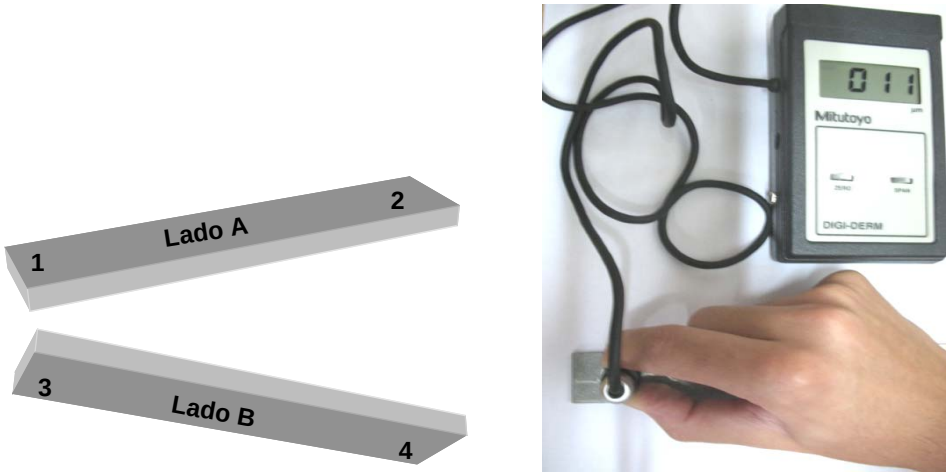
O ajuste é conseguido girando-se o botão SPAN presente na superfície frontal do mesmo.

Quando fora do bloco, ou seja, quando não se está medindo nada, o mostrador do aparelho deverá estar indicando o numero 1, que representa aparelho fora de aplicação.

(a) (b)

Figura 3.22 – (a) Aparelho Mitutoyo DIGI-DERM Modelo 979-745. (b) Bloco padrão e laminas de plástico para calibração.

Após a calibração do aparelho, foram retiradas cinco chapas aleatórias de cada espessura para a confirmação da espessura da camada de zinco. As dimensões das chapas eram de aproximadamente 25 x 150 mm, preparadas para a realização dos pré-testes de “soldagem”. Foram realizadas 2 medidas de cada lado das chapas, perfazendo um total de 4 medidas em cada uma delas. As medidas foram tomadas como ilustra a Fig. 3.23 (a) e a realização das medições conforme Fig. 3.23 (b). Os resultados obtidos na medição encontram-se na Tab. 3.3.



(a) (b)

Figura 3.23 – (a) Local das medições na placa de teste. (b) Realização da medição.

3.5 – Chapas

Neste trabalho foram utilizadas chapas de aço ao carbono galvanizadas, sendo que duas delas, a de 0,7 e 1,2 mm, com certificado. Pela indicação, as duas eram eletro-galvanizadas, porém, sem se ter garantia, entretanto, da autenticidade da relação chapa-certificado fornecido pelo distribuidor. As outras três chapas (1,5, 2,0 e 2,5 mm) vieram sem certificados, mas a granulação visível da superfície do zinco e espessura medida do revestimento sendo típicas de recobrimento do tipo eletro-galvanizacão. Foram também usadas chapas sem galvanização (chapa preta). Todas elas tinham dimensões de 150 x 25 mm nas diferentes espessuras. Abaixo encontram-se a numeração e a composição química dos matérias com certificados. Nesse material (chapa de 0,7 e 1,2 mm), o Zn foi eletro-depositado em células do tipo Gravitel, processo que permite o material receber camadas de Zn de espessuras diferentes em cada um dos lados da chapa (ou até mesmo a deposição de Zn em apenas um dos lados).

A espessura da camada de zinco, por convenção, é fornecida em massa por unidade de área (g/m²). Quando são fornecidos dois valores de espessura, para uma mesma chapa (por exemplo: espessura = 50/50g/m²), significa que o material recebeu a eletro-deposição nos dois lados. A Tab. 3.2 apresenta a caracterização deste material e a Tab 3.3 mostra os resultados da medição da espessura da camada de zinco. Verifica-se que quanto maior a espessura da chapa, menor a espessura do revestimento (Tab. 3.3), tendo uma coerência com os dados mostrados nos certificados.

Certificados das chapas:

Espessura da chapa = 0,70 mm

BEG 5212937 – amostrada dia 20/06/2003 na EGL
Espessura da camada (g/m²)= 59/59
BQ´s=762772004 e 762771007
Qualidade= ETC4BLF006IF
Composição química (%):

C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ti	Cr	Ni
0,0030	0,01	0,19	0,013	0,0011	0,0047	0,02	0,003	0,001	0,064	0,02	0,03
Mo	Sn	N	H	Co	As	O	B	Ca	At	Sb	-
0,00	0,002	0,0026	-	-	0,002	0,0005	0,0001	0,0001	-	0,00	-

Espessura da chapa = 1,20 mm

BEG 5265250 – amostrada dia 03/07/2003 na EGL

Espessura da camada (g/m²)= 43/43

BQ´s=765284002

Qualidade= NBR6658

Composição química (%):

C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ti	Cr	Ni
0,0548	0,02	0,38	0,019	0,017	0,039	0,01	0,002	0,001	0,004	0,02	0,02
Mo	Sn	N	H	Co	As	O	B	Ca	At	Sb	-
0,00	0,001	0,0030	-	-	0,001	-	0,0036	0,0001	-	0,00	-

Tabela 3.3 – Caracterização das chapas de teste

Referência	Descrição	Espessura chapa (mm)	Espessura revestimento (µm)
0,7 G	Eletro-Galvanizado	0,7	19
1,2 G	Eletro-Galvanizado	1,2	14
1,5 G	Eletro-Galvanizado	1,5	12
2,0 G	Eletro-Galvanizado	2,0	12
2,5 G	Eletro-Galvanizado	2,5	12
0,5 NG	Sem Galvanização	0,5	-
1,0 NG	Sem Galvanização	1,0	-
1,2 NG	Sem Galvanização	1,2	-
2,0 NG	Sem Galvanização	2,0	-

G – Galvanizada; NG – Não Galvanizada

Tabela 3.4 – Resultados da medição da espessura da camada de zinco

Espessura da chapa (mm)		Esp. Zinco Chapa 1 (µm)		Esp. Zinco Chapa 2 (µm)		Esp. Zinco Chapa 3 (µm)		Esp. Zinco Chapa 4 (µm)		Esp. Zinco Chapa 5 (µm)		**Média (µm) [lado]**	Desvio Padrão	**Média (µm) [total]**
0,7	Lado A	19	19	19	19	19	18	19	19	19	18	**19**	0,4	**19**
	Lado B	19	19	19	19	18	19	20	19	19	19	**19**	0,5	
1,2	Lado A	14	15	14	14	14	13	13	13	14	13	**14**	0,7	**14**
	Lado B	15	14	14	14	13	13	13	13	13	13	**14**	0,7	
1,5	Lado A	13	13	12	11	14	13	11	12	13	13	**13**	1,0	**12**
	Lado B	13	13	12	12	13	12	12	12	11	12	**12**	0,6	
2	Lado A	13	12	13	13	13	12	13	13	11	12	**13**	0,7	**12**
	Lado B	11	11	11	11	11	12	10	12	10	10	**11**	0,7	
2,5	Lado A	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	**12**	0,0	**12**
	Lado B	11	11	12	12	12	12	12	12	13	12	**12**	0,6	

3.6 – Eletrodos

Os eletrodos utilizados nos experimentos foram de Cobre Zircônio, FE16Z06, procedência Nippert – USA, classificados, segundo RWMA (1989), como sendo do grupo A, classe 1. Ambos eletrodos são do tipo “cap” fêmea, com as dimensões apresentadas na Fig. 3.24.

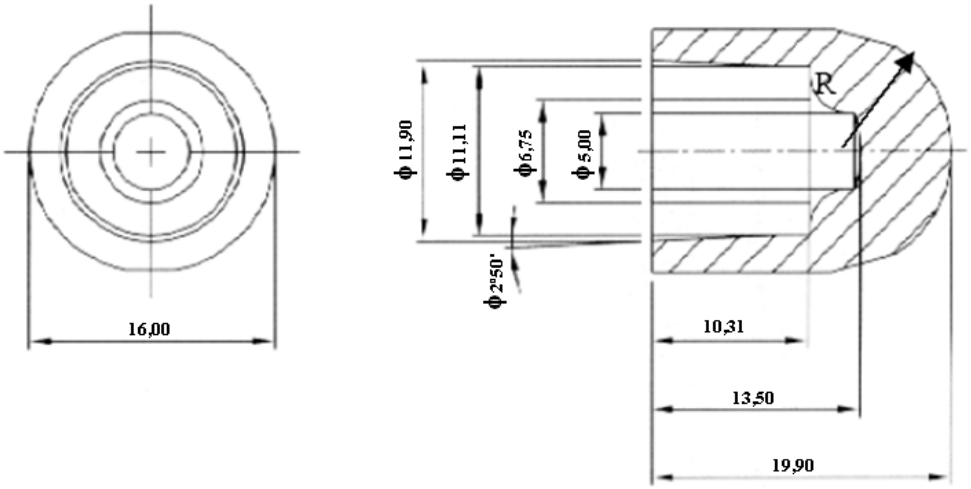
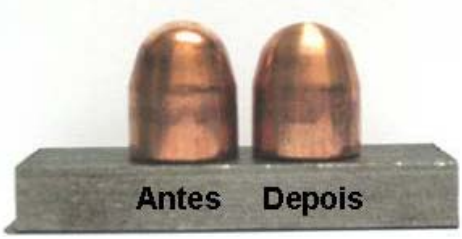


Figura 3.24 – Dimensões (mm) dos eletrodos utilizados na soldagem (AWS – D8.9, 2002).

Para garantir que os dois eletrodos utilizados na pinça tivessem a mesma geometria, foi realizado um processo de usinagem com o objetivo de deixar a ponta de ambos com a mesma forma esférica (Fig. 3.25 (b)). Para tal foi utilizado um suporte especialmente fabricado para a ferramenta de usinagem, Fig. 3.25 (a).

(a)



(b)

Figura 3.25 – (a) Suporte para ferramenta de usinagem do eletrodo; (b) aparência do eletrodo.

CAPÍTULO IV

METODOLOGIA, ENSAIOS E RESULTADOS

O presente trabalho tem com alvo final um dispositivo de auto-regulagem da corrente de soldagem por resistência a ponto em função da resistência elétrica equivalente da união. Com isto, no caso de procedimentos de soldagem que demandem trocas freqüentes de regulagem da corrente (por exemplo, por constante variação na espessura, acabamento ou material das chapas), este sistema poderia fazer uma regulagem automatizada e rápida, sem interferência do operador.

4.1 – Fases Metodológicas

As seguintes fases foram propostas para atingir os objetivos:

- Determinação dos parâmetros a serem utilizados;
- Definição das combinações de chapas;
- Definição do número mínimo de ciclos para se medir a resistência elétrica;
- Diferenciação das classes de chapas pelos valores de resistência elétrica;
- Estudo da influência de condições operacionais para soldagem nas classes de resistência elétrica e no conjunto de parâmetros de soldagem dos pontos;
- Simulação do ciclo de controle para as diferentes classes encontradas e determinação sistemática e confirmativa de um conjunto de parâmetros de soldagem (parametrização) para cada classe de resistência elétrica obtida na fase anterior deste projeto, em conformidade com critérios de resistência mecânica e medidas de indentação e diâmetro do ponto soldado.
- Avaliação de abordagens para medição da resistência elétrica.

Independentemente das fases, a base deste trabalho é o ensaio simulando uma etapa inicial do processo de solda a ponto por resistência, a saber, o tempo de pré-pressão. Nesta etapa do processo, há a aproximação dos eletrodos até as chapas, com pressionamento de ambas, sem energização. Na operação que doravante será denominada neste trabalho de “ensaio”, se simulada esta etapa, com a diferença da passagem de corrente em baixa amplitude, que é utilizada para determinar a resistência elétrica.

4.2 – Determinação dos Parâmetros e Definição das Combinações de Chapas Utilizados nos Ensaios

Para a realização dos ensaios, foi utilizada uma fonte de baixa freqüência e corrente alternada (LF/AC) como descrita no item 3.1. A pinça de soldagem pneumática foi apoiada sobre uma bancada e o corpo de prova fixado por um suporte. Com o objetivo evitar o efeito da corrente derivativa (Efeito Shunt) com fuga de corrente tanto para o suporte quanto para uma região não requerida, colocou-se um isolante elétrico (folha de papel) entre as chapas e também entre o suporte, deixando o contato apenas na região de interesse, como ilustrado na Fig. 4.1. O ponto de solda foi realizado no centro da região de interesse levando em consideração as recomendações da norma AWS D8.9M (2002) sendo que as chapas utilizadas e suas dimensões especificadas no item 3.5 do presente trabalho.

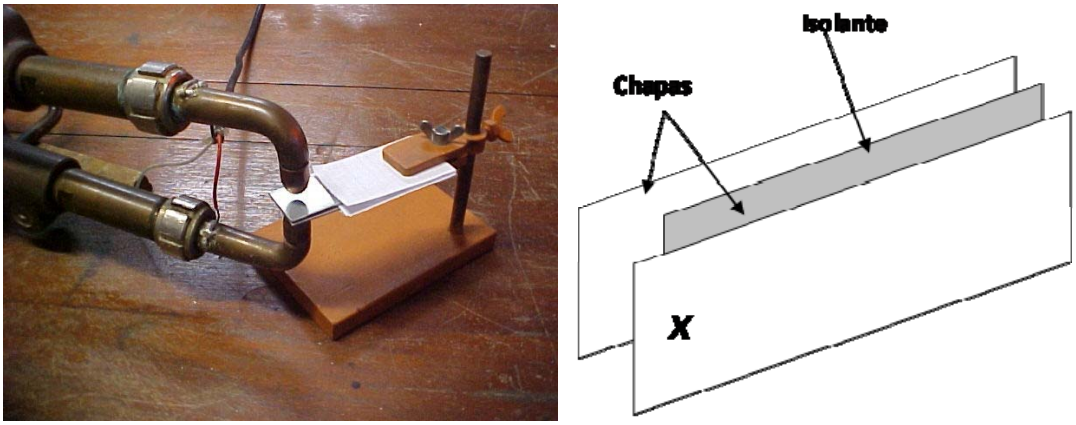


Figura 4.1– Pinça de soldagem apoiada sobre bancada e chapas de teste fixada no suporte com isolante elétrico

Com o intuito de distinguir as faixas de resistência elétrica das combinações de chapas, foram definidas as condições para a realização dos ensaios. A partir dos resultados encontrados no projeto exploratório de pesquisa anteriormente desenvolvido “Avaliação do Princípio de Auto-ajuste de Parâmetros de Soldagem a Ponto por Resistência, Baseado na Medição da Resistência Elétrica das Chapas” (NASCIMENTO; SCOTTI, 2004) definiu-se a

parametrização a ser utilizada nesta fase do trabalho, por apresentar uma maior sensibilidade na medição do valor da resistência elétrica, como apresentado a seguir:

Corrente = 1,2 kA;
Força = 1,4 kN (Entrada na máquina P1 = 3,5);
Tempo de encostamento = 9 ciclos;
Tempo de pré-pressão = 1 ciclo;
Tempo de solda (tempo de Corrente) = 25 ciclos;
Tempo de retenção = 1 ciclo.

Primeiramente pensou-se em realizar um planejamento experimental para conseguir a melhor distribuição entre as chapas. Porém, percebeu-se que não teria sentido fazer planejamento, já que o objetivo (resposta) era conseguir as combinações e não a melhor condição entre elas. Então as combinações entre os tipos de chapas que foram soldadas nesta primeira fase de testes estão apresentadas na Tab. 4.1. As amostras foram escolhidas aleatoriamente, mas tentando abranger a maioria das combinações de espessuras possíveis.

Tabela 4.1 – Combinações das chapas de teste

Amostra	Espessura 1 (mm)	Revest.	Espessura 2 (mm)	Revest.	Soma espessuras (mm)/combinação revestimento
01	0,7	Galv.	0,7	Galv.	1,4 GG
02	0,7	Galv.	2,0	Galv.	2,7 GG
03	1,2	Galv.	2,0	Galv.	3,2 GG
04	1,5	Galv.	2,0	Galv.	3,5 GG
05	1,2	Galv.	0,7	Galv.	1,9 GG
06	1,5	Galv.	0,7	Galv.	2,2 GG
07	2,5	Galv.	0,7	Galv.	3,2 GG
08	2,5	Galv.	2,0	Galv.	4,5 GG
09	0,5	Ñ	0,5	Ñ	1,0 NGNG
10	0,5	Ñ	2,0	Ñ	2,5 NGNG
11	1,2	Ñ	2,0	Ñ	3,2 NGNG
12	1,5	Ñ	2,0	Ñ	3,5 NGNG
13	1,2	Ñ	0,5	Ñ	1,7 NGNG
14	0,7	Galv.	0,5	Ñ	1,2 GNG
15	0,7	Galv.	2,0	Ñ	2,7 GNG
16	1,2	Galv.	1,2	Ñ	2,4 GNG
17	1,5	Galv.	0,5	Ñ	2,0 GNG

18	1,5	Galv.	1,5	Ñ	3,0 GNG
19	2,0	Galv.	0,5	Ñ	2,5 GNG
20	2,0	Galv.	2,0	Ñ	4,0 GNG
21	2,5	Galv.	0,5	Ñ	3,0 GNG
22	2,5	Galv.	2,0	Ñ	4,5 GNG

GG – “Galvanizado” com “Galvanizado”; NGNG – “Não Galvanizado” com “Não Galvanizado”; GNG – “Galvanizado” com “Não Galvanizado”.

4.3 – Definição do Número Mínimo de Ciclos e Diferenciação das Classes de Chapas pelos Valores de Resistência Elétrica

Depois de definidas as combinações entre as chapas, vinte e duas amostras foram preparadas. Para garantir uma repetibilidade dos valores, optou-se por realizar três ensaios para cada combinação (sessenta e seis ensaios). Nesses ensaios realizados foram adquiridos os sinais de corrente e tensão e, então, calculada a resistência dividindo-se o valor de tensão pela corrente de forma pontual. Fazendo-se a média aritmética dos resultados da divisão pontual, obteve-se a média da resistência elétrica de cada combinação.

Primeiramente, foi calculada a resistência levando em consideração todos os 25 ciclos aplicados durante a soldagem. Porém, como o primeiro ciclo se mostrou instável durante as repetições, o cálculo válido foi com os demais 24 ciclos. Esses valores de resistência são mostrados nas Fig. 4.2, onde aparecem os valores de resistência de cada uma das amostras e também os valores médios com os respectivos desvios padrões. Entretanto, como em muitos dos casos o desvio padrão é pequeno, no Anexo 1 é apresentada a mesma figura, porém com todas medições. Também em anexo estão os dados adquiridos e tratados.

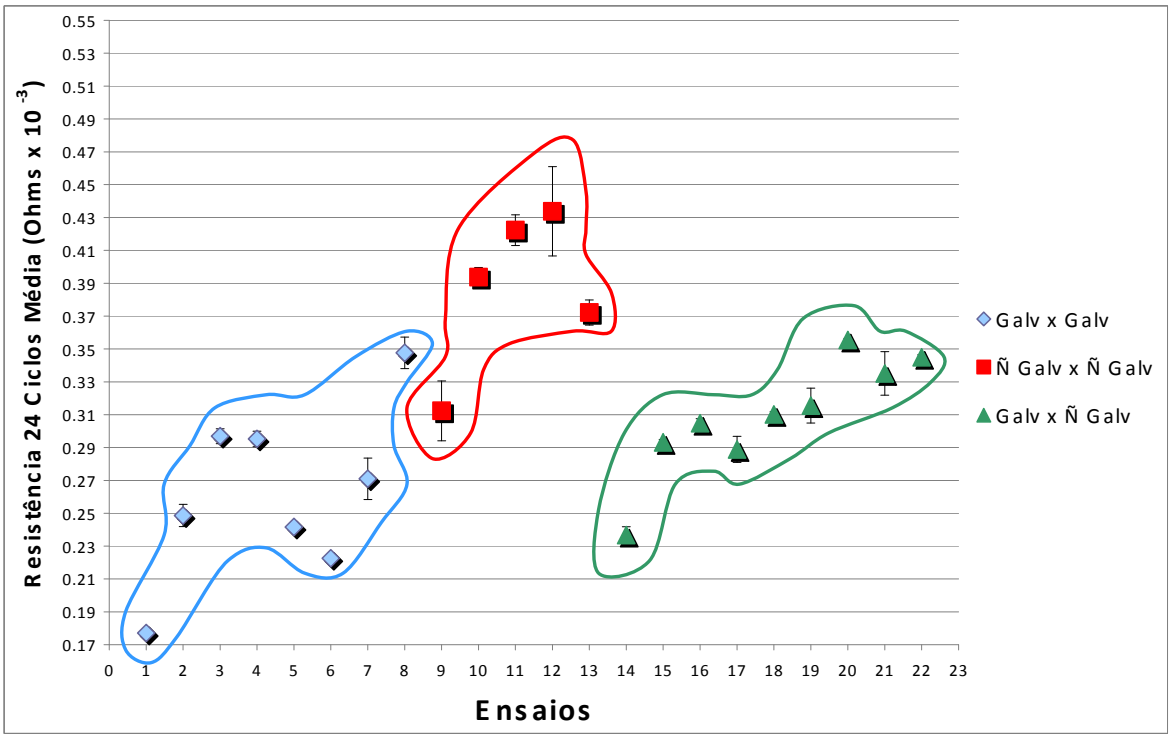


Figura 4.2 – Média e Desvio Padrão de 24 dos 25 ciclos (eliminado o primeiro) das 3 repetições de cada ensaio

Observa-se na Fig. 4.2 que ficam definidos três grupos, diferenciados por combinação de tipo de revestimentos das chapas. Observa-se também, eliminando pouquíssimos pontos fora de curva ("outliers"), que os valores de resistência ficaram em um nível menor para combinação entre chapas "galvanizada" com "galvanizada". Já entre chapas "não galvanizada" com "não galvanizada", os valores de resistências apresentaram um nível maior. Finalmente, quando se utilizou a combinação de chapas "não galvanizada" com "galvanizada", o nível do valor de resistência ficou em uma faixa intermediaria.

Porém, como o intuito do estudo é utilizar um sistema de controle usando como base o valor da resistência, é de fundamental importância minimizar o tempo de cálculo do valor da resistência, ou seja, utilizar o menor número de ciclos, mas mantendo a representatividade dos resultados. Com isso, foi realizado um estudo analisando o perfil do desvio padrão para saber o número mínimo de ciclos que poderia ser utilizado para se fazer o cálculo da resistência, dentre os vinte e cinco ciclos de soldagem, mantendo a representatividade dos dados. Para isso foi analisado o mesmo arquivo com os dados de soldagem e calculando as resistências, porém na seguinte ordem, eliminando os dois primeiros ciclos:

- somente do 3º ciclo;
- média da resistência entre o 3º e o 4º ciclos;
- média entre o 3º ao 5º ciclos;
- média entre 3º ao 6º ciclos;
- média entre 3º ao 7º ciclos;
- média entre 3º ao 10º ciclos;
- média entre 3º ao 15º ciclos;
- média entre 3º ao 20º ciclos;
- média entre 3º ao 25º ciclos.

Estas resistências foram compiladas e seus valores, e respectivos desvios padrões, são apresentados nas Figs. 4.3, 4.4 e 4.5.

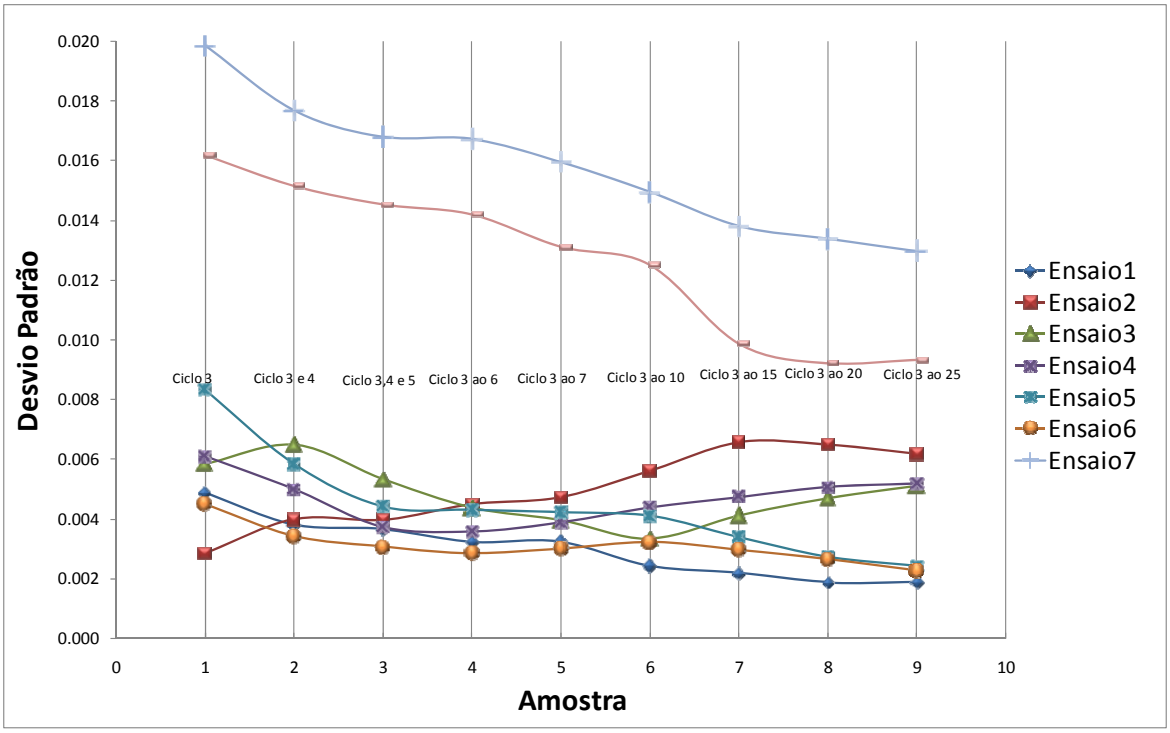


Figura 4.3 – Perfil de desvio Padrão dos ensaios entre chapas “galvanizada” x “galvanizada”

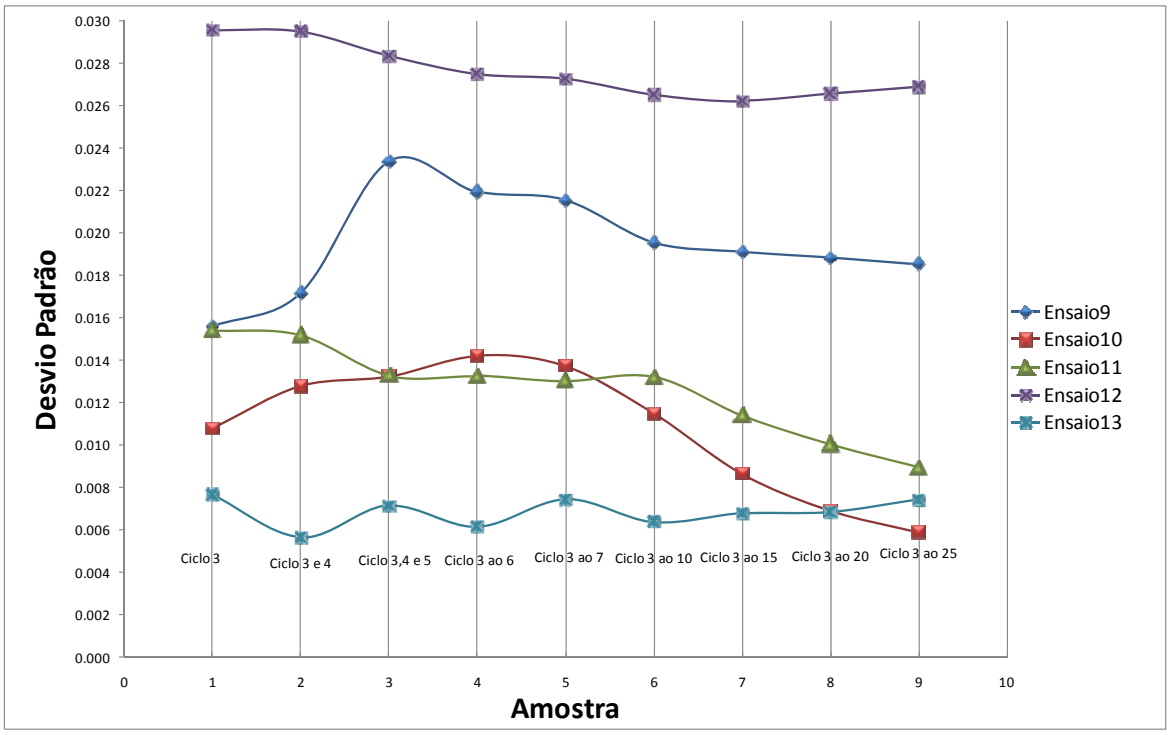


Figura 4.4 – Perfil de desvio Padrão dos ensaios entre chapas “não galvanizado” x “não galvanizado”

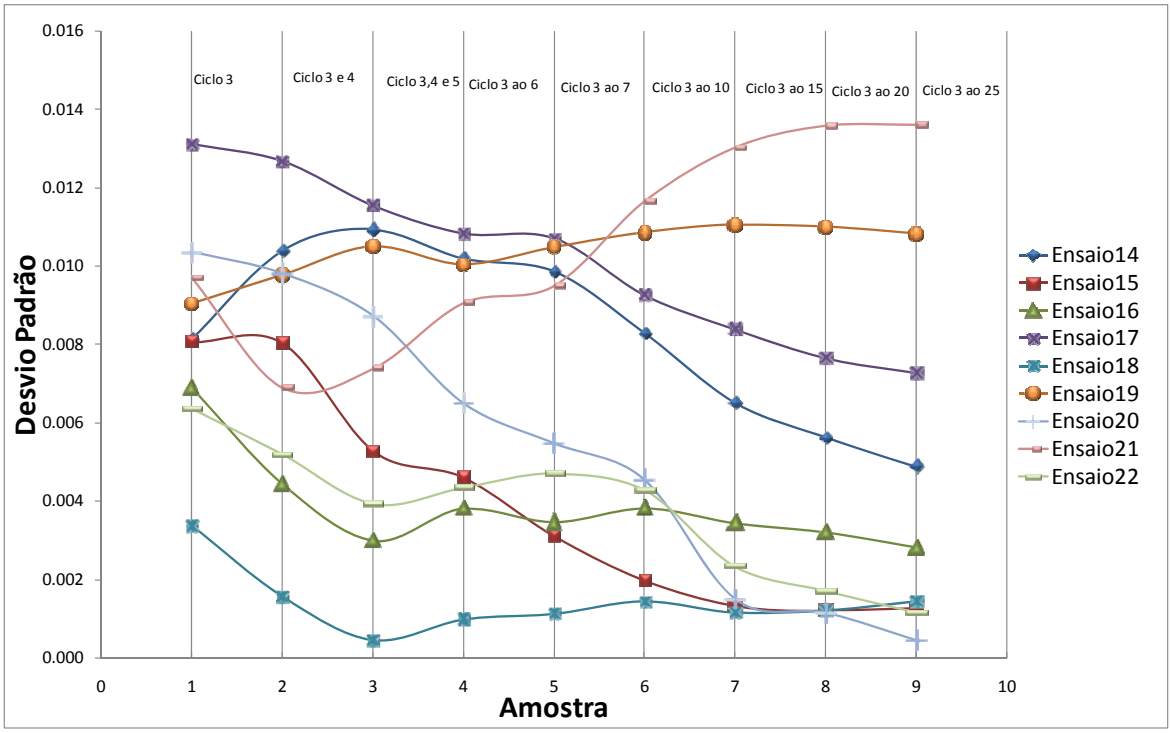


Figura 4.5 – Perfil de desvio Padrão dos ensaios entre “galvanizado” x “não galvanizado”

Analisando estes resultados, percebe-se que, em geral, quanto mais ciclos forem utilizados para o calculo de resistência, menor será o desvio padrão. Porém, ao se utilizar, para o cálculo de resistência, apenas os valores do 3º ao 6º ciclos, tem-se uma boa

representatividade do valor médio da resistência, já que o desvio padrão é baixo e tendendo, a grosso modo, a se estabilizar. Com isso, definiu-se que a resistência deve ser calculada utilizando apenas os 6 primeiros ciclos, eliminando-se os 2 primeiros (3º ao 6º ciclos). Com isso, não se demanda muitos ciclos para se ter um cálculo confiável da resistência, um dos objetivos do estudo.

Para visualizar melhor as regiões de valores de resistências citadas anteriormente, foi, então, traçado o gráfico da Fig. 4.6 com os valores de resistência calculados entre o 3ºe o 6º ciclos em função da soma das espessuras das chapas. Observa-se claramente que continuaram definidos os três grupos por valores de resistência. Naturalmente repetiu-se a tendência apresentada na Fig. 4.2, ou seja, o patamar mais alto foi quando soldou-se uma chapa “não galvanizada” com outra “não galvanizada”, o menor patamar para a soldagem de chapas “galvanizada”, e intermediariamente quando soldou-se a combinação de uma chapa “galvanizada” com outra “não galvanizada”.

Da Fig. 4.6 verifica-se que quanto maior a espessura combinada, maior a resistência (devido ao aumento do resistor, ou seja, a espessura das chapas). O comportamento das combinações de menor resistência (“galvanizada” x “galvanizada”) pode ser explicado, além da baixa resistividade do zinco em si, também pela coalescência do zinco (baixa temperatura de fusão), fazendo com que na interface entre as chapas a resistência à passagem de corrente seja a menor e, conseqüentemente, um menor valor da total da resistência calculada.

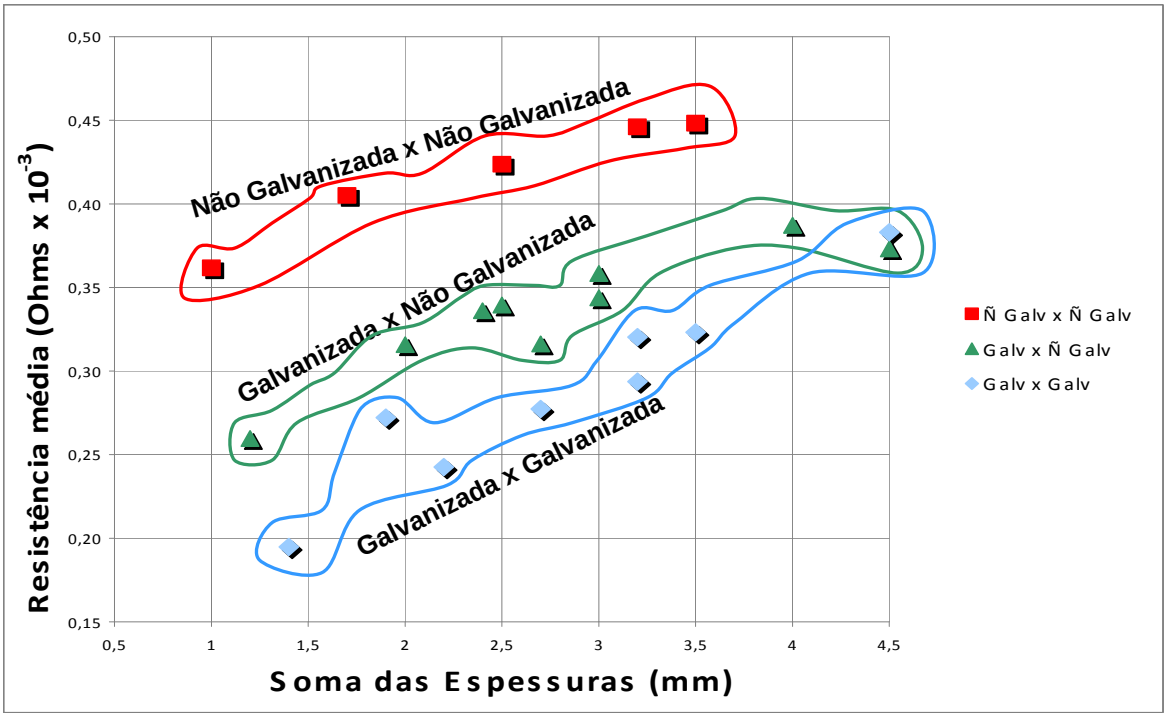


Figura 4.6 – Resistência média entre duas chapas (3º ao 6º ciclos)

4.4 – Avaliação das Resistências Elétricas de Forma Independentes

Para se ter evidência do nível dos valores de resistência ao longo das chapas e nas interfaces chapa-eletrodo foi realizado o mesmo procedimento, porém utilizando-se apenas uma chapa, “galvanizada” ou “não galvanizada”, cujas espessuras se equiparam aproximadamente com as das chapas combinadas, ou seja, só não existia a resistência do contato chapa-chapa. Como se vê na Fig. 4.7, quanto maior a espessura, maior a resistência, confirmando-se a hipótese da existência de resistência significativa ao longo da chapa. Também se vê que a chapa sem galvanização apresenta maior resistência, sugerindo haver também uma importante resistência no contato eletrodo-chapa.

Já a análise da relevância da resistência do contato chapa-chapa se faz comparando-se as resistências de chapas únicas com as das chapas combinadas em espessuras semelhantes, como ilustra a Fig. 4.8. Quando se faz comparação entre chapas “galvanizadas”, a resistência é aproximadamente a mesma, seja chapa única ou combinada. Por outro lado, quando se compara entre chapas “não galvanizadas”, a resistência aumenta nas chapas combinadas, comparativamente às chapas únicas. Assume-se, assim, que a galvanização reduz o efeito de aquecimento preferencial na região de contato. Justifica-se, assim a operação “burn-zinc” (ver Capítulo 5).

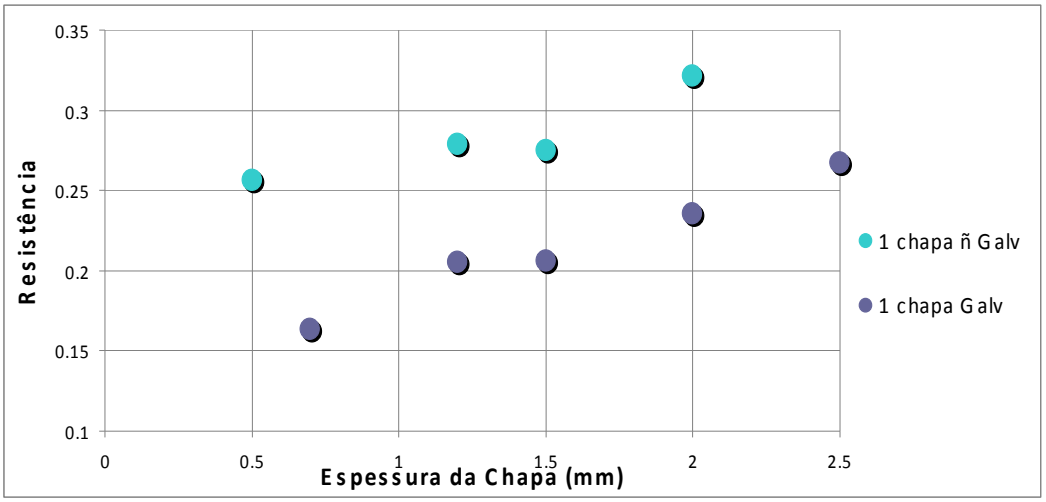


Figura 4.7 – Resistência média de apenas uma chapa (3º ao 6º ciclos)

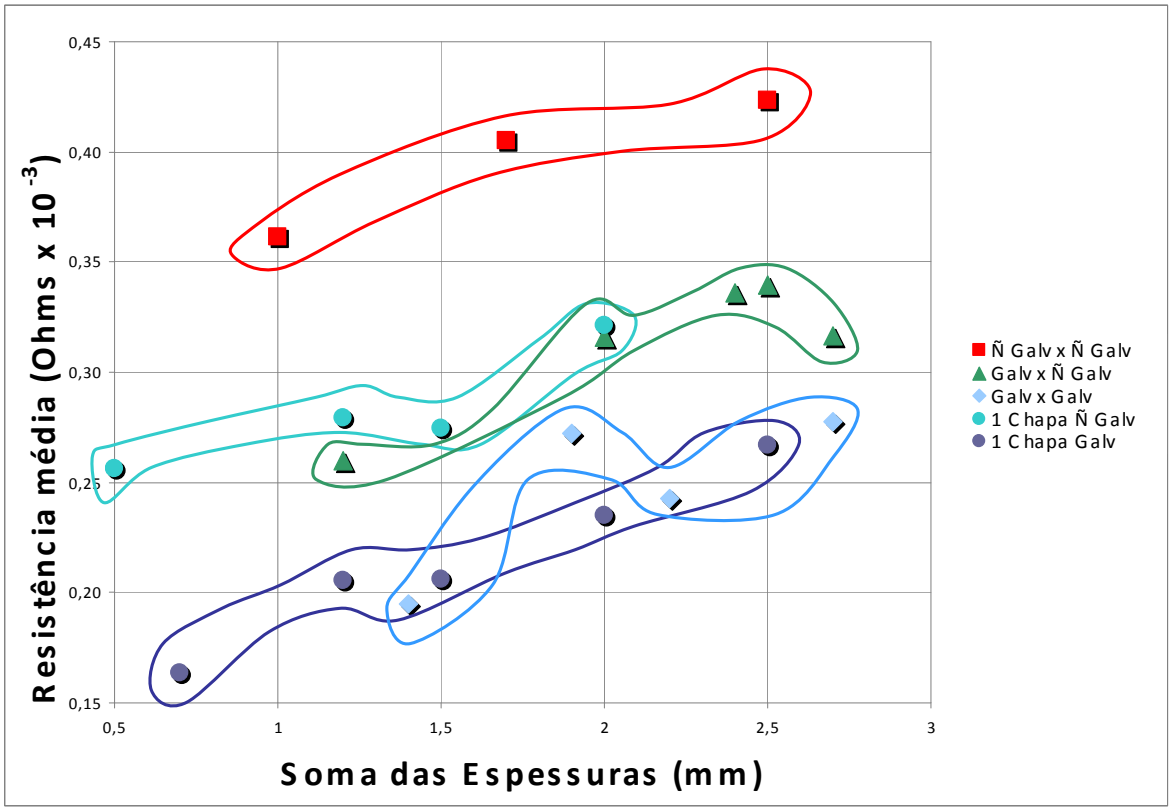


Figura 4.8 – Comparação da resistência entre duas chapas e apenas uma (3º ao 6º ciclos)

4.5 – Avaliação da Influência de Condições Operacionais sobre as Resistências Elétricas

Uma outra avaliação foi feita para verificar o efeito das condições superficiais das chapas, já que as mesmas influenciam na geração de calor na interface chapa-chapa (a resistência de contato é afetada por óxidos, sujeira, óleo e outros contaminantes na superfície). Propriedades mais uniformes da solda são obtidas quando as superfícies são limpas. Tais contaminantes podem ainda permanecer aderidos na face do eletrodo, causando rápida deterioração do mesmo (INTERMACHINERY, 2003) e podem ter alta resistência elétrica. Isto normalmente é uma condição incompatível na peça de trabalho e pode produzir variações no processo de soldagem, tais como expulsão de material, pontos de solda não circulares, pontos de solda com diâmetro abaixo do especificado, eletrodo aderindo na chapa e falta de fusão, etc.

Para estudar o comportamento do efeito das condições superficiais das chapas, foram realizados mais dois grupos de ensaios, sendo o primeiro com a presença de uma camada de óleo entre as chapas e o outro com presença de óxidos. Optou-se por essas condições de ensaio, pois, na indústria, as chapas a serem utilizadas chegam dos

fornecedores com película de óleo, com objetivo de formar uma camada protetora contra oxidação. Porém, algumas regiões das chapas podem estar expostas e sofrerem oxidação. Com isso, os dois grupos de ensaios simulariam condições operacionais reais, ou seja, ou a presença da camada fina de óleo ou a presença da camada de óxidos.

Para estes ensaios, as chapas foram preparadas com as mesmas dimensões especificadas no Item 3.4 (25 x 150 mm) e foram repetidas as mesmas combinações de espessuras e tipo de revestimento apresentadas na Tab. 4.1 do Item 4.2, com os mesmos parâmetros de soldagem (22 combinações com três repetições, totalizando 66 ensaios para cada grupo). No primeiro grupo de ensaios, foi inserida uma camada fina de óleo somente nas superfícies do contato chapa-chapa, estando limpa a superfície de contato eletrodo-chapa. Já no segundo grupo, foram preparadas amostras com oxidação em ambas superfícies. Para tal, as chapas cortadas foram deixadas ao ar livre por um longo período (cerca de 15 dias) até que se formassem óxidos sobre as superfícies. Naturalmente, as chapas sem galvanização apresentaram alto grau de oxidação, não havendo qualquer oxidação visível nas chapas galvanizadas.

O cálculo da resistência elétrica continuou sendo realizado da mesma maneira que o apresentado anteriormente, ou seja, calculando-se a média do 3º ao 6º ciclos. Observa-se na Fig. 4.9 que mesmo com a presença da película de óleo as três regiões continuaram definidas (não necessariamente com os mesmos valores), ainda apresentando menores resistências as combinações entre chapas “galvanizadas” e maiores resistências as combinações entre chapas “não galvanizadas” (as combinações ente chapas “não galvanizadas” com “galvanizadas” apresentaram valores intermediários). O mesmo comportamento ocorreu no segundo grupo de ensaios, como mostrado na Fig. 4.10.

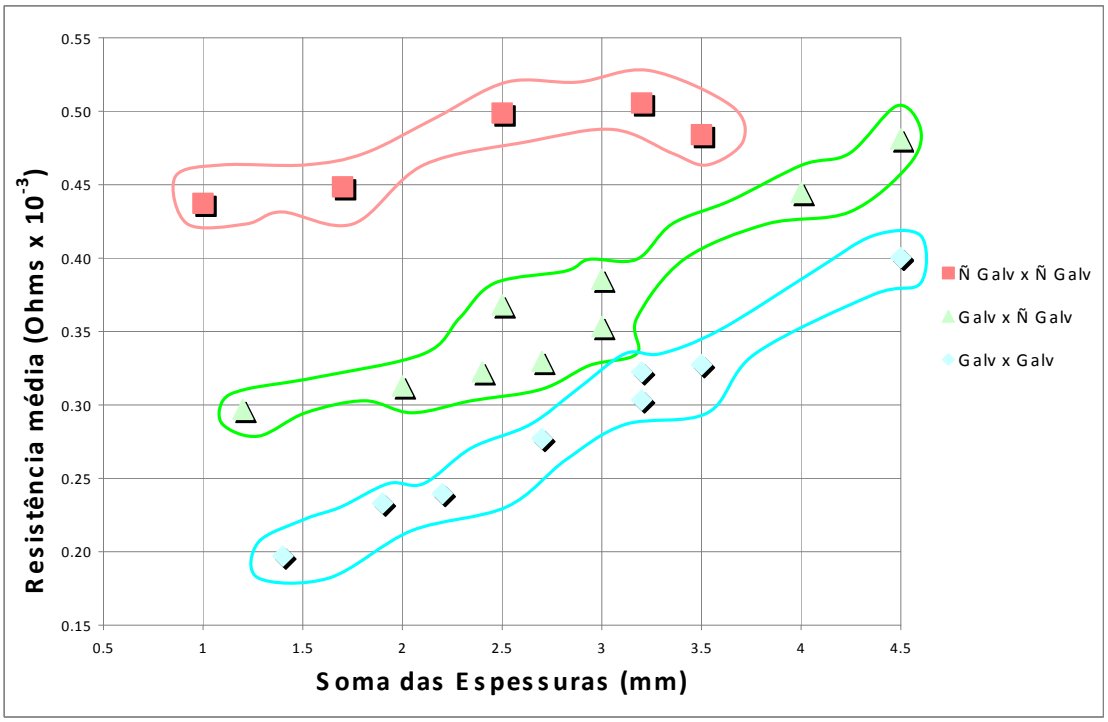


Figura 4.9 – Resistência média (3º ao 6º ciclos) entre duas chapas com presença de óleo

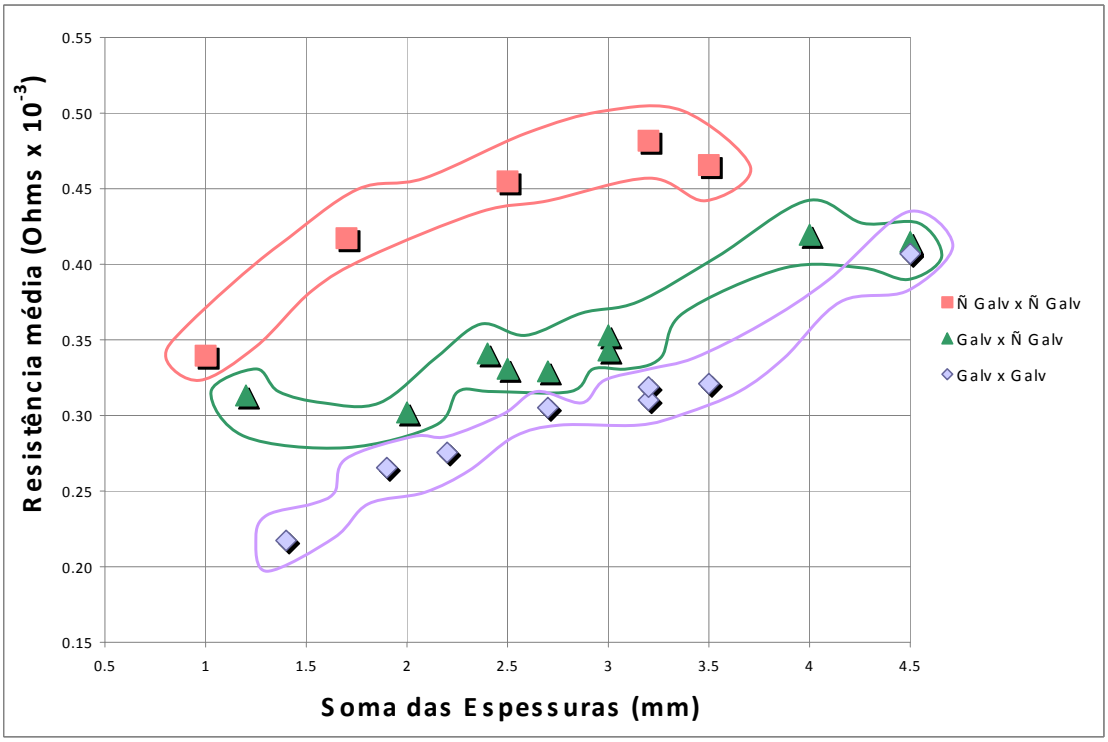


Figura 4.10 – Resistência média (3º ao 6º ciclos) entre duas chapas com presença de óxido

Para se fazer a análise dos resultados do efeito das condições superficiais de forma comparativa com as operações em chapas limpas, foram montados os gráficos apresentados nas Figs. 4.11. Para não poluir visualmente o gráfico, as condições para as

combinações “galvanizadas” com “não galvanizadas” são apresentadas separadamente (Fig. 4.12), mas mantendo-se as mesmas escalas. Observa-se que o efeito da condição superficial sobre a resistência elétrica (aumentando seu valor) mostrou alguma significância para a condição com filme de óleo no grupo de chapas “não galvanizadas” com “não galvanizadas” com valor de soma de espessura menor (acredita-se que o peso da resistência do filme de óleo em relação à resistência devido a espessura da chapa seja maior para chapas finas). A não expulsão do óleo pela pressão dos eletrodos pode ser explicado pelo efeito da película fina de óleo na superfície, o que sugere que diferentes tipos de óleos vão proporcionar diferentes resultados.

Quando se analisa a diferença de valores da resistência elétrica com a camada de óxido, no mesmo grupo de chapas “não galvanizadas” com “não galvanizadas”, observa-se um efeito menor da condição superficial, provavelmente devido ao fato de que o óxido não cobria por completo a superfície da chapa (e não havia constância da oxidação de chapas para chapas). O efeito da camada de óxido sobre a resistência elétrica vai se tornando menor à medida que se avalia o grupo de chapas “galvanizadas” com “não galvanizadas” e torna-se inexistente para o grupo de chapas “galvanizadas” com “galvanizadas”. Deve-se lembrar de que a oxidação não existia nas chapas galvanizadas. Além disto, a menor resistência de contato entre chapas galvanizadas se faz prevalecer sobre algum aumento da resistência devido a oxidação. Este comportamento é também observado em relação ao filme de óleo, cuja diferença de resistência se reduz no sentido de se usar chapas galvanizadas. Além disto, pode-se esperar que a aderência do filme de óleo sobre a superfície de uma chapa galvanizada seja menor e, assim, reduzindo a espessura da camada após a pressão dos eletrodos.

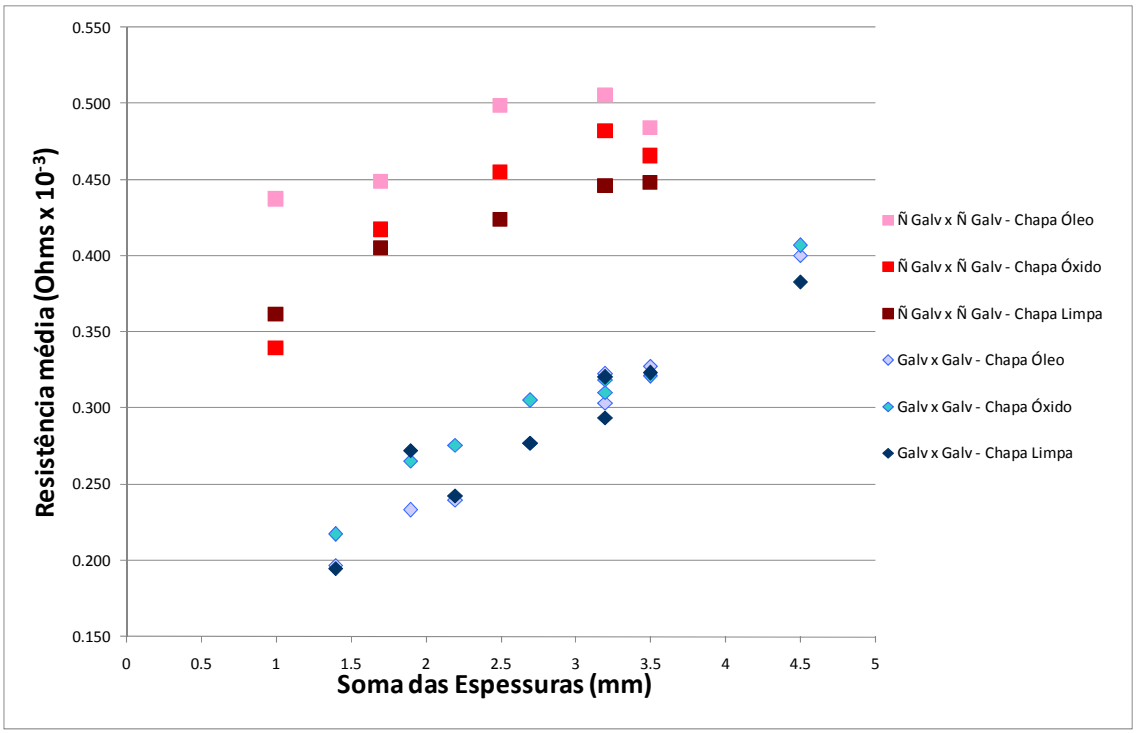


Figura 4.11 – Comparação das resistências elétricas (3º ao 6º ciclos) nas condições operacionais entre chapas "não galvanizadas" com "não galvanizadas" e "galvanizadas" e "galvanizadas"

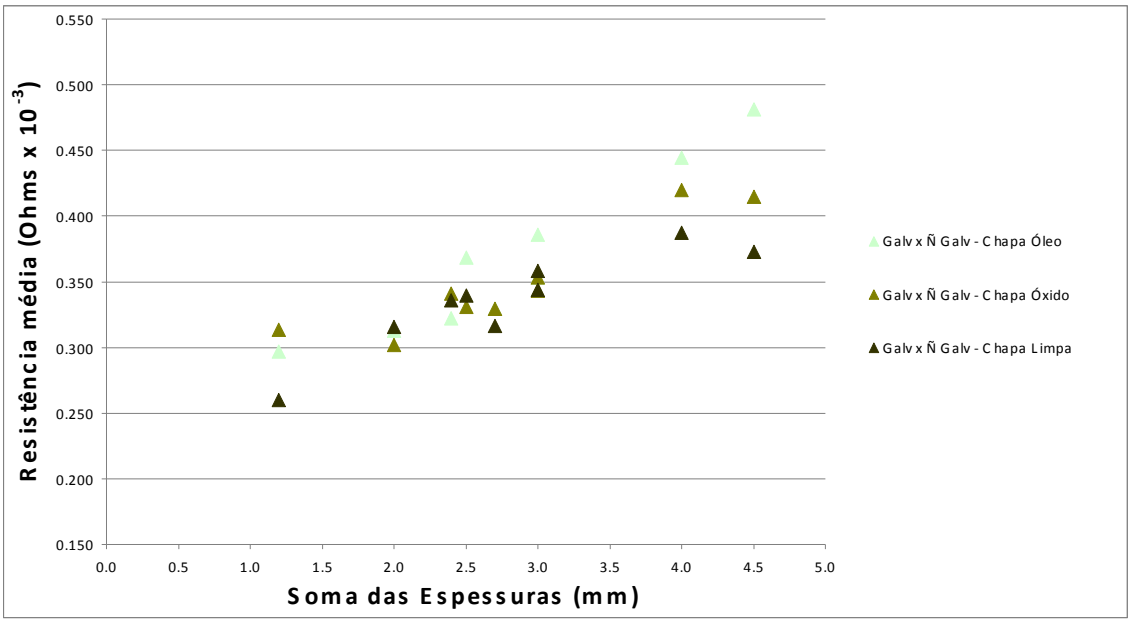


Figura 4.12 – Comparação das resistências elétricas (3º ao 6º ciclos) nas condições operacionais entre chapas "galvanizadas" com "não galvanizadas"

Além de alguma diferença entre os valores médios de resistência para cada condição de superfície, foi observada também dispersão variada das médias referentes às três repetições de cada ensaio. As Figs. 4.13, 4.14 e 4.15 apresentam, respectivamente, a média e os desvios padrão para as 3 combinações entre tipos de chapas, nas 3 condições

superficiais (limpas, com película de óleo e oxidadas). Pode-se perceber que os desvios padrão da “não galvanizada” com “não galvanizada” é maior, mas sempre aumentam quando a superfícies da chapa é modificada.

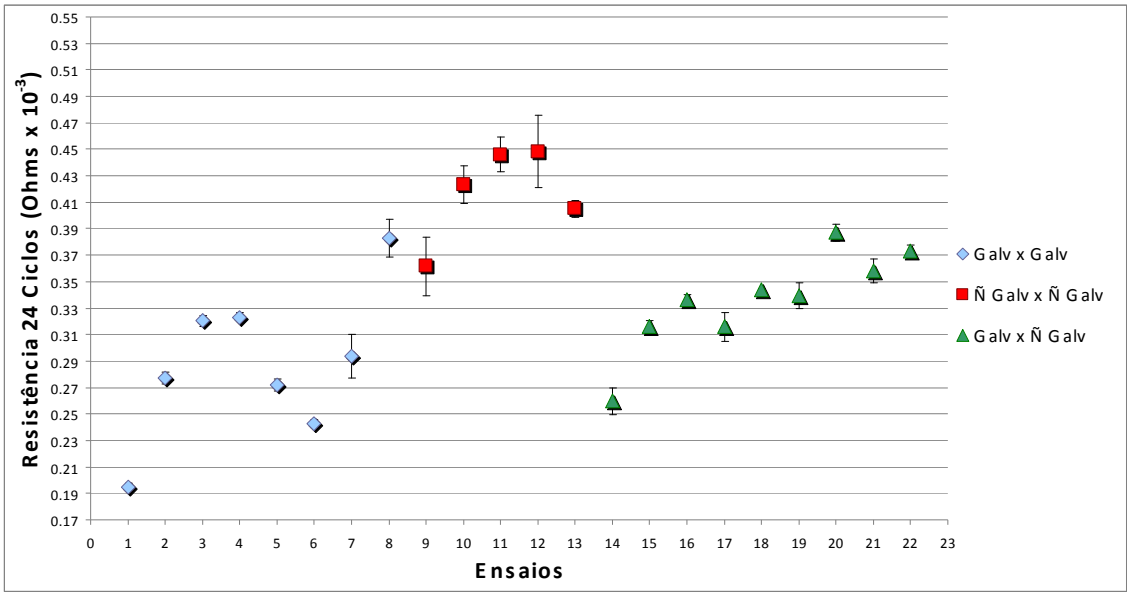


Figura 4.13 – Média e Desvio Padrão da resistência elétrica das três repetições de cada ensaio com chapas limpas, calculada entre o 3° ao 6° ciclo

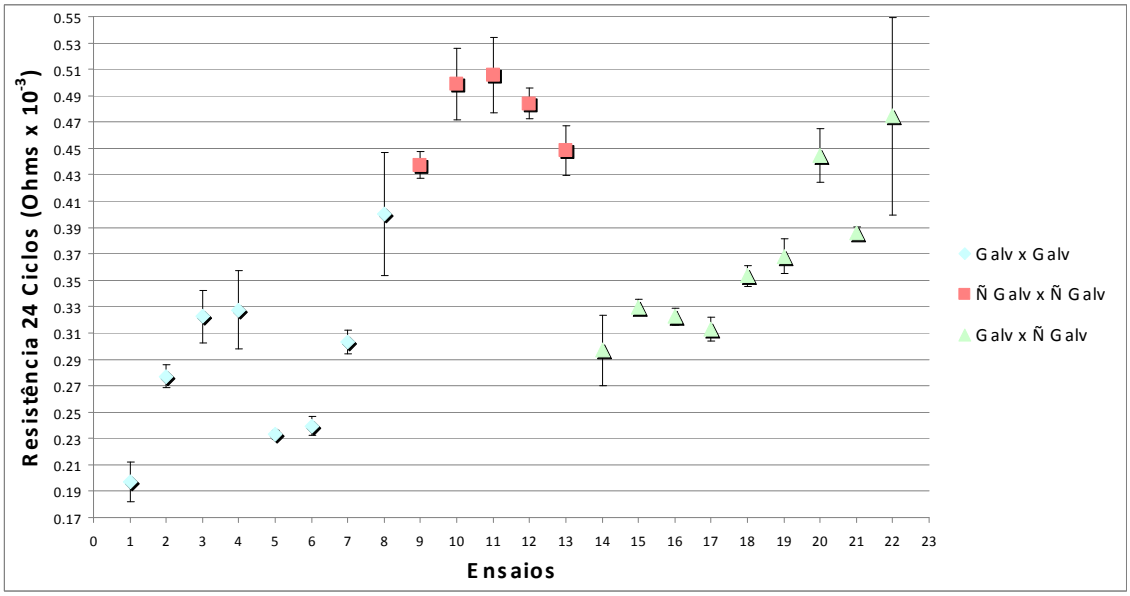


Figura 4.14 – Média e Desvio Padrão da resistência elétrica das três repetições de cada ensaio com chapas com presença de óleo, calculada entre o 3° ao 6° ciclo

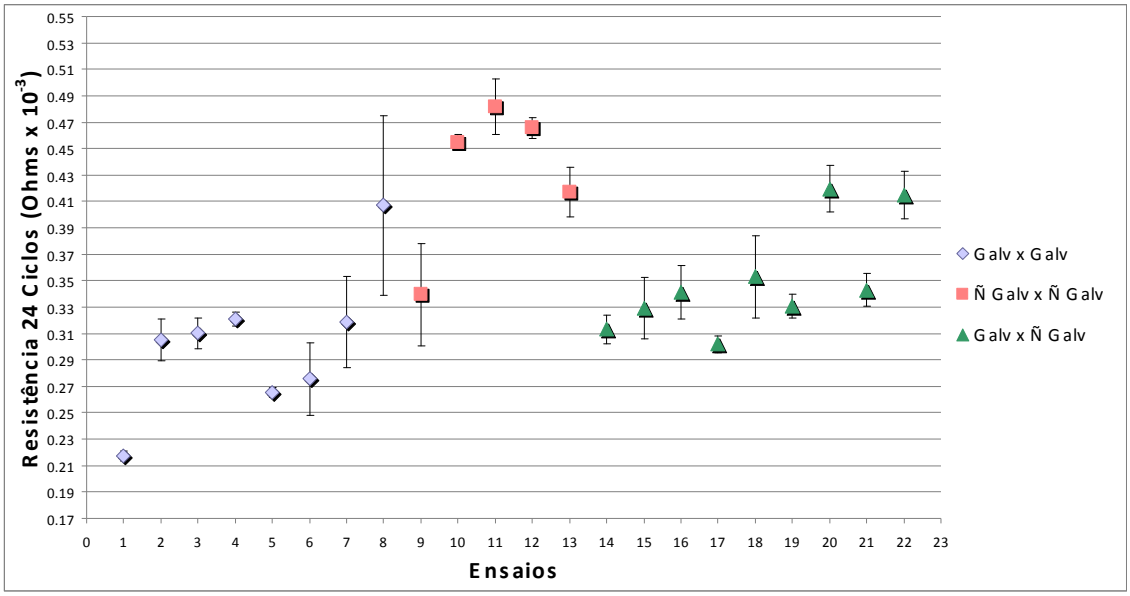


Figura 4.15 – Médias e Desvios Padrão da resistência elétrica das três repetições de cada ensaio com chapas com presença de óxido, calculada entre o 3° ao 6° ciclo

4.6 – Outra Abordagem para o Cálculo da Resistência Elétrica

Outra abordagem foi estudada neste trabalho para verificar a representatividade dos resultados. Ao invés de escolher os ciclos para o cálculo da resistência elétrica através da análise do perfil do desvio padrão, foi analisado o perfil da resistência dinâmica dos 25 ciclos de solda durante a passagem de corrente. Sabe-se que a resistência dinâmica é sempre mais alta no início, passando a decair ao longo do tempo, até se estabilizar (este comportamento só é esperado ao se usar correntes baixas como nestes experimentos, quando há formação da lente de solda). O que se procura com esta nova abordagem é medir a resistência elétrica somente após a estabilização (média de valores de um dado número de ciclos após este ponto). Assim, espera-se que os respectivos valores médios de cada ensaio apresentem menor dispersão (desvios padrão). Mas nada vai garantir que a média entre ensaios apresente menores desvios padrão.

As Figs. 4.16, 4.17 e 4.18 apresentam o perfil da resistência em função do tempo dos experimentos realizados. Nota-se que para os três grupos de combinações de chapas os valores de resistência tendem a ficar estáveis após o 17º ciclo. Com isso, a resistência elétrica foi calculada do 17º ao 25º e foram realizadas as mesmas análises apresentadas no item anterior.

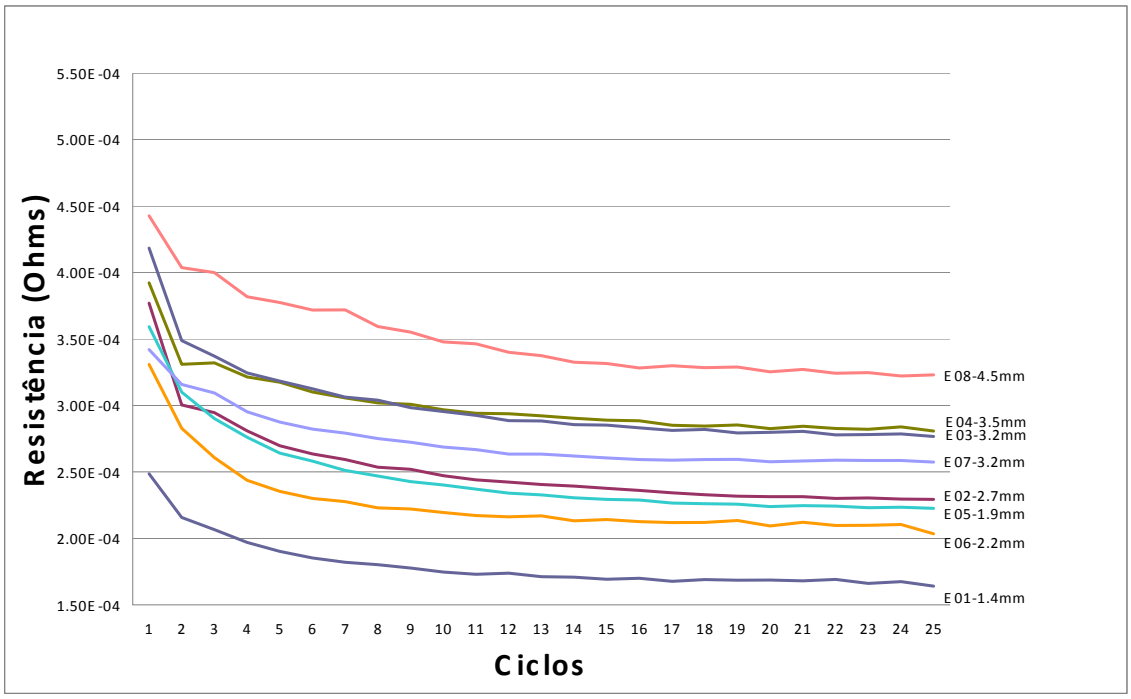


Figura 4.16 – Resistência Dinâmica entre chapas galvanizadas.

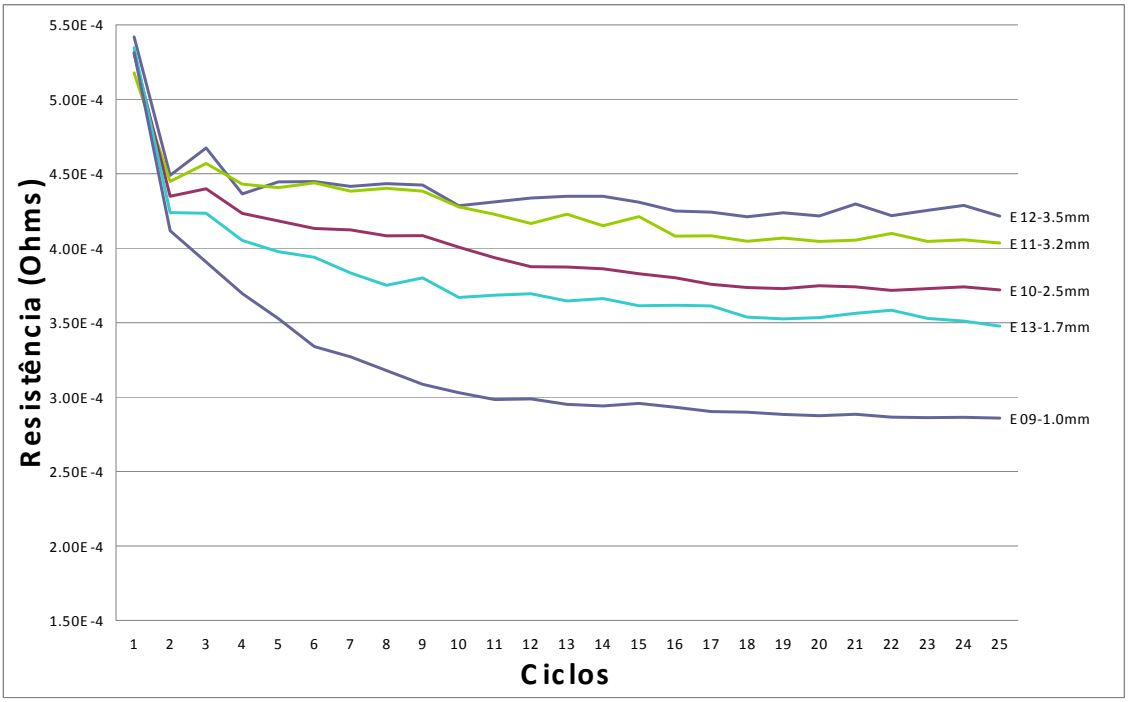


Figura 4.17 – Resistência Dinâmica entre chapas não galvanizadas.

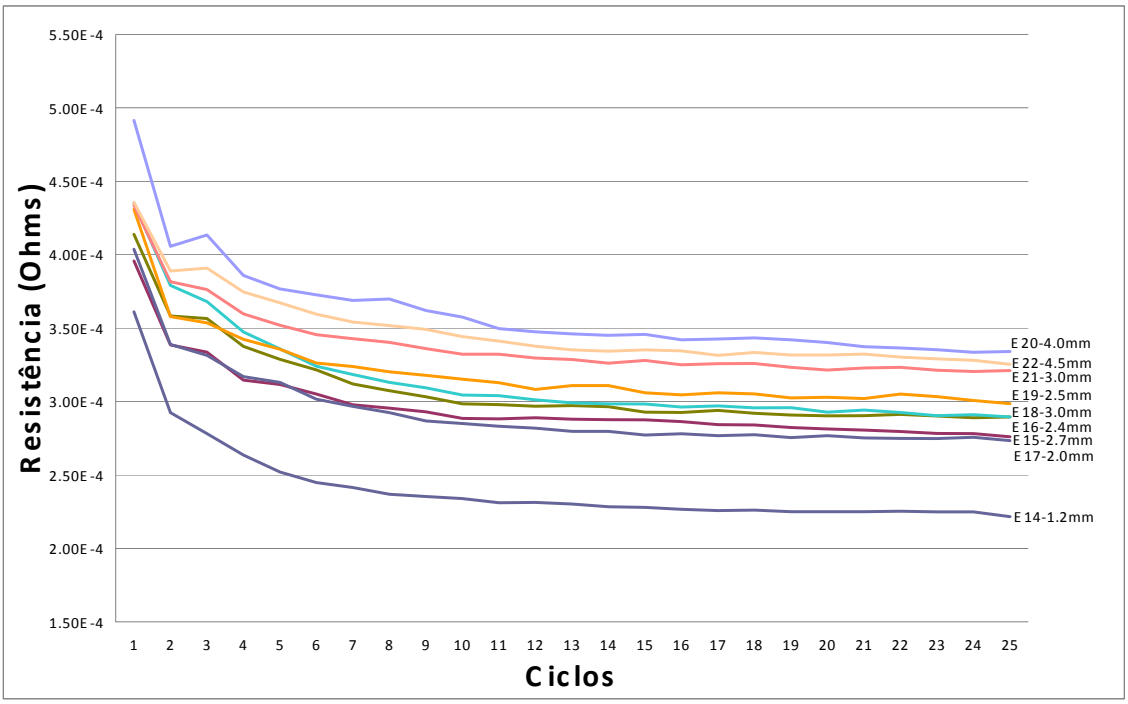


Figura 4.18 – Resistência Dinâmica entre chapa não galvanizada e galvanizada

Observa-se nas Figs. 4.19, 4.20 e 4.21 que continuaram definidos os três grupos por valores de resistência (coerente com o perfil de queda da resistência com o tempo). Comparando-se com as Figs. 4.6, 4.9 e 4.10, respectivamente, verifica-se que esses valores são um pouco menores quando comparados aos calculados no começo da passagem de corrente (entre o 3º e o 6º ciclos). Porém, a faixa de separação de um grupo para o outro não mostrou grandes diferenças (garantindo-se a mesma sensibilidade de medição), como se quantifica através dos dados das Tabs. 4.2, 4.3 e 4.4, onde Δ se refere à diferenças entre os cálculos das médias de resistências medidos entre “3º ao 6º ciclos” e “17º ao 25º ciclos”. Assim, valores positivos indicam que o cálculo pelos primeiros ciclos fornece valores mais altos do que pelos últimos ciclos.

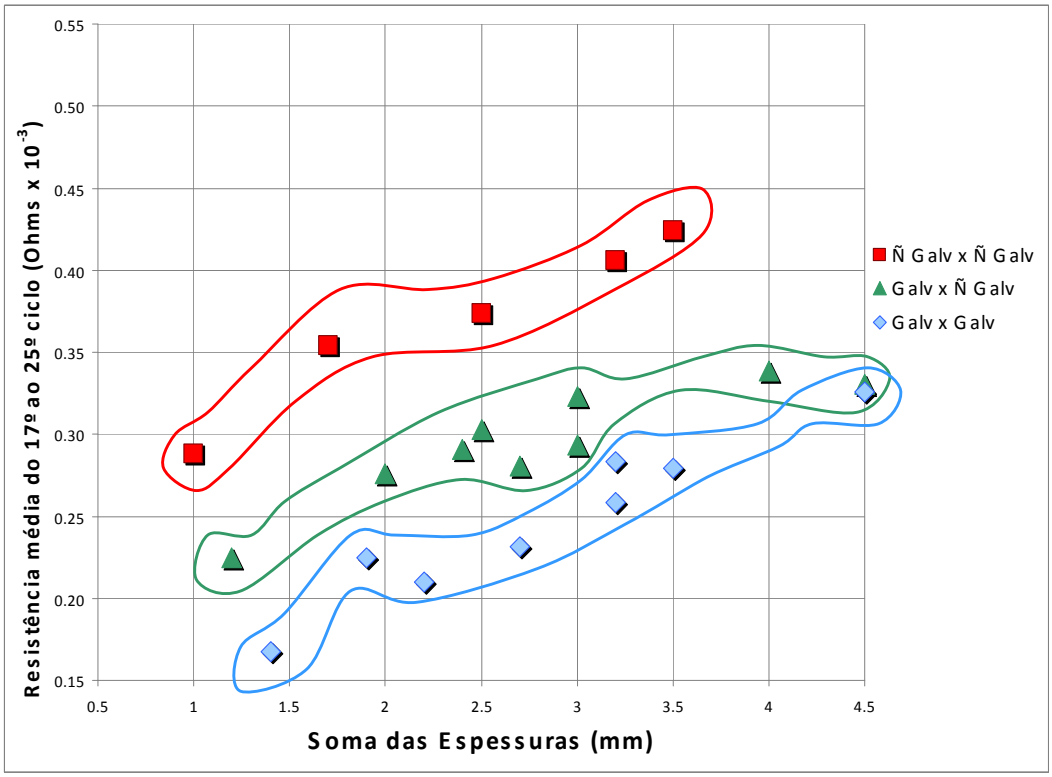


Figura 4.19 – Resistência média (17º ao 25º) entre duas chapas limpas

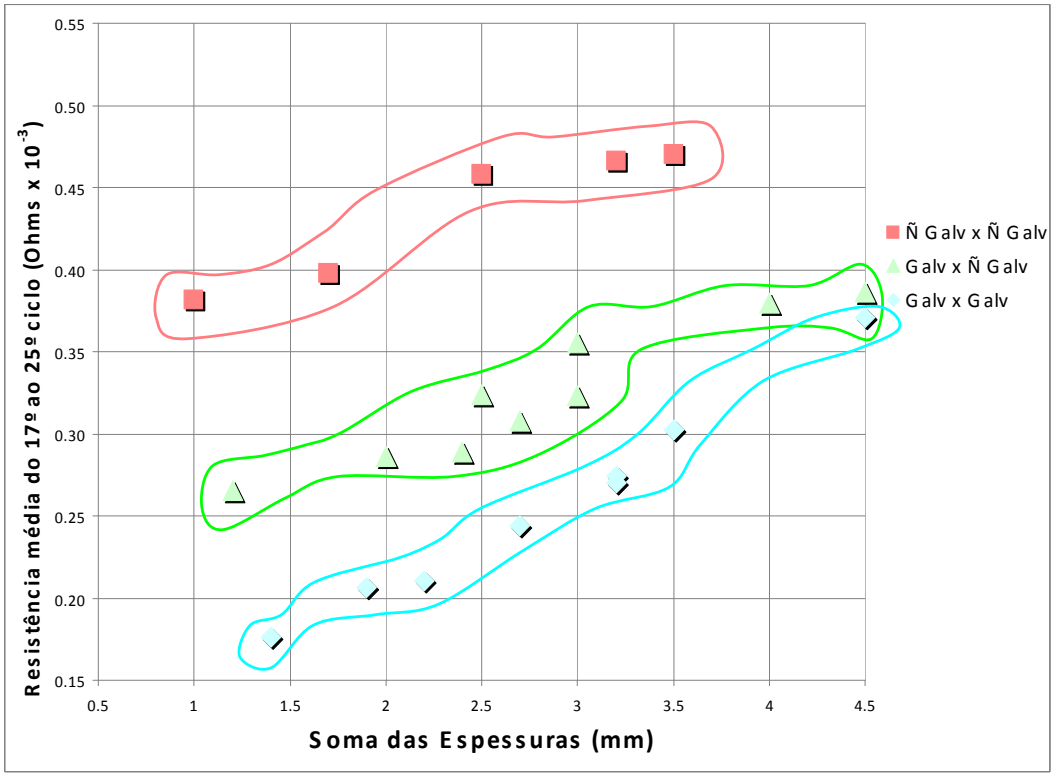


Figura 4.20 – Resistência média (17º ao 25º) entre duas chapas com presença de óleo

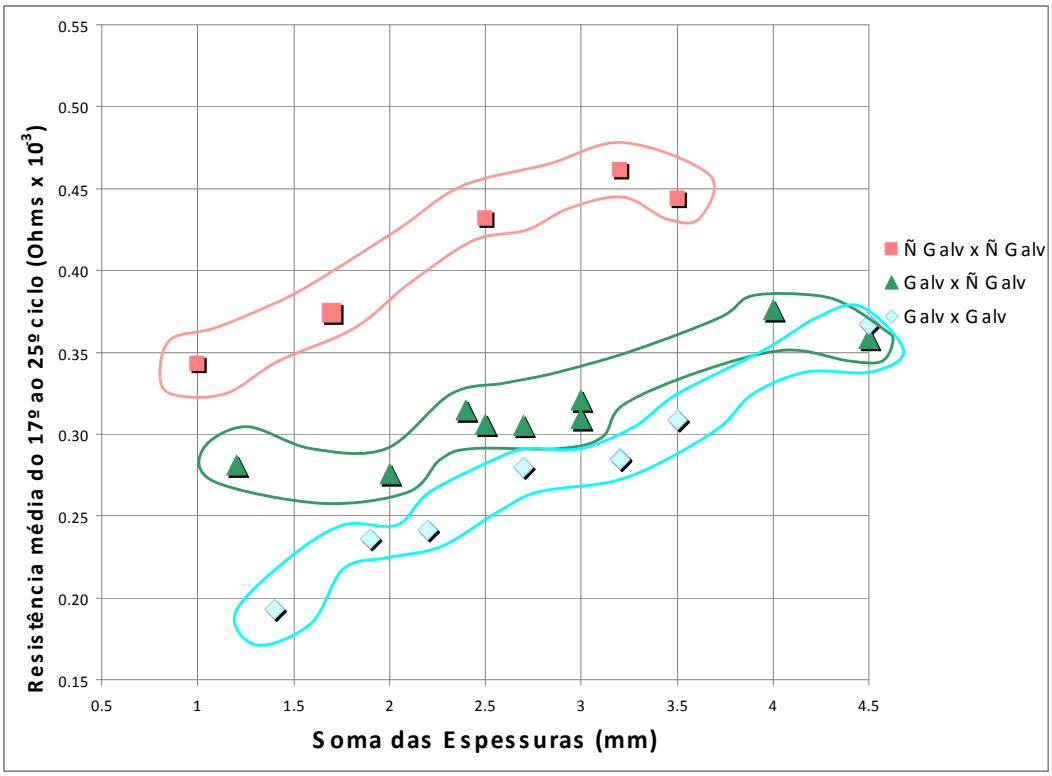


Figura 4.21 – Resistência média (17º ao 25º) entre duas chapas com presença de óxido

Tabela 4.2 – Diferença entre valores de resistência média entre chapas "Galvanizadas x Galvanizadas"

	LIMPA			ÓLEO			ÓXIDO		
	3º ao 6º	17º ao 25º		3º ao 6º	17º ao 25º		3º ao 6º	17º ao 25º	
Ensaio	**Média**	**Média**	**Δ**	**Média**	**Média**	**Δ**	**Média**	**Média**	**Δ**
E01-0.7-0.7	0,19478	0,16763	0,027	0,19698	0,17621	0,021	0,21727	0,19310	0,024
E02-0.7-2.0	0,27729	0,23121	0,046	0,27706	0,24393	0,033	0,30517	0,27955	0,026
E03-1.2-2.0	0,32035	0,28347	0,037	0,32245	0,26987	0,053	0,31021	0,28513	0,025
E04-1.5-2.0	0,32321	0,27934	0,044	0,32740	0,30256	0,025	0,32099	0,30872	0,012
E05-0.7-1.2	0,27213	0,22448	0,048	0,23307	0,20627	0,027	0,26546	0,23616	0,029
E06-1.5-0.7	0,24255	0,21022	0,032	0,23957	0,21063	0,029	0,27554	0,24156	0,034
E07-2.5-0.7	0,29369	0,25847	0,035	0,30334	0,27391	0,029	0,31880	0,28476	0,034
E08-2.5-2.0	0,38292	0,34598	0,037	0,40034	0,37104	0,029	0,40694	0,37721	0,030
		Média Δ	0,038		Média Δ	0,031		Média Δ	0,028

Tabela 4.3 – Diferença entre valores de resistência média entre chapas “Não Galvanizadas x Não Galvanizadas”

	LIMPA			ÓLEO			ÓXIDO		
	3º ao 6º	**17º ao 25º**		**3º ao 6º**	**17º ao 25º**		**3º ao 6º**	**17º ao 25º**	
Ensaio	Média	Média	Δ	Média	Média	Δ	**Média**	**Média**	Δ
E09-0.5-0.5	0,36170	0,28771	0,074	0,43728	0,38151	0,056	0,33955	0,34261	-0,003
E10-0.5-2.0	0,42367	0,37347	0,050	0,49878	0,45830	0,040	0,45486	0,43162	0,023
E11-1.2-2.0	0,44611	0,40590	0,040	0,50568	0,46595	0,040	0,48174	0,46120	0,021
E12-1.5-2.0	0,44822	0,42418	0,024	0,48405	0,47038	0,014	0,46562	0,44368	0,022
E13-1.2-0.5	0,40504	0,35409	0,051	0,44851	0,39736	0,051	0,41723	0,37419	0,043
		Média Δ	0,048		Média Δ	0,040		Média Δ	0,021

Tabela 4.4 – Diferença entre valores de resistência média entre chapas “Galvanizadas x Não Galvanizadas”

	LIMPA			ÓXIDO			Óleo		
	3º ao 6º	**17º ao 25º**		**3º ao 6º**	**17º ao 25º**		**3º ao 6º**	**17º ao 25º**	
Ensaio	Média	Média	Δ	Média	Média	Δ	**Média**	**Média**	Δ
E14-0.7-0.5	0,25966	0,22485	0,035	0,29698	0,26526	0,032	0,31328	0,28107	0,032
E15-0.7-2.0	0,31625	0,28055	0,036	0,32962	0,30802	0,022	0,32919	0,30538	0,024
E16-1.2-1.2	0,33610	0,29082	0,045	0,32251	0,28884	0,034	0,34103	0,31501	0,026
E17-1.5-0.5	0,31579	0,27564	0,040	0,31293	0,28642	0,027	0,30207	0,27543	0,027
E18-1.5-1.5	0,34383	0,29325	0,051	0,35334	0,32343	0,030	0,35308	0,30955	0,044
E19-2.5-0.5	0,33946	0,30293	0,037	0,36815	0,32401	0,044	0,33089	0,30630	0,025
E20-2.0-2.0	0,38715	0,33832	0,049	0,44467	0,37957	0,065	0,41955	0,37578	0,044
E21-2.5-0.5	0,35837	0,32283	0,036	0,38559	0,35549	0,030	0,34293	0,32108	0,022
E22-2.5-2.0	0,37306	0,33036	0,043	0,47453	0,38605	0,088	0,41485	0,35837	0,056
		Média Δ	0,041		Média Δ	0,041		Média Δ	0,033

Pode-se observar que os valores de Δ são muito pequenos, apesar de serem majoritariamente positivos. Este fato indica que não se pode considerar diferenças entre as abordagens de cálculo, mesmo reconhecendo uma tendência para que o cálculo pelos primeiros ciclos apresentem valores minimamente maiores do que pelos últimos ciclos. A semelhança entre os valores de Δ para um mesmo grupo de acabamento superficial, ou mesmo entre grupos, indica que não há influência do tipo de revestimento ou das condições superficiais sobre a abordagem de se calcular a resistência, a menos de uma disposição das condições com óleo e com óxidos, pela ordem, reduzirem ligeiramente a diferença entre as abordagens de cálculo. Outro aspecto importante observado na análise das referidas tabelas é o fato de que, apesar da tendência do valor da resistência crescer com o aumento das espessuras combinadas (Fig. 4.6), o mesmo não ocorre com os valores de Δ, apontando que também a espessura combinada não influi sobre a abordagem de cálculo.

Por último, foi analisada a dispersão do cálculo das médias referentes às três repetições de cada ensaio, apresentadas nas Figs. 4.22, 4.23 e 4.24. A Tab. 4.5, 4.6 e 4.7 quantifica melhor as diferenças entre os desvios padrão entre as médias. Observa–se que não houve redução ou ampliação dos desvios padrão para as diferentes abordagens de cálculo da resistência elétrica, ou seja, não houve melhora de repetibilidade.

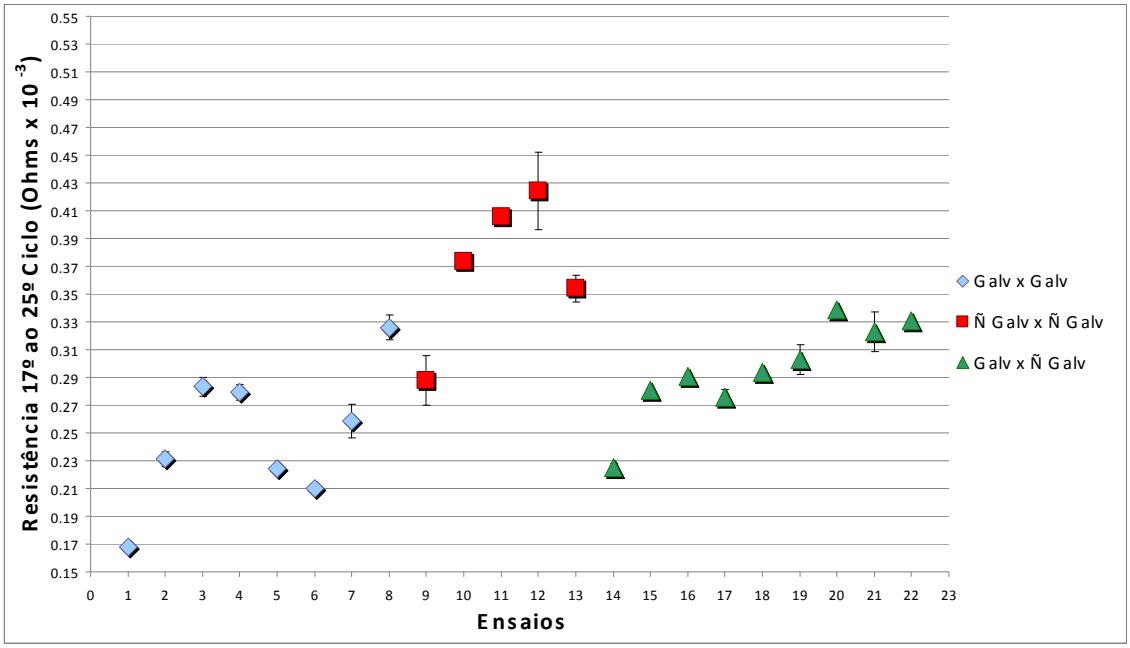


Figura 4.22 – Média e Desvio Padrão da resistência elétrica das três repetições de cada ensaio com chapas limpas, calculada entre o 17º ao 25º ciclo

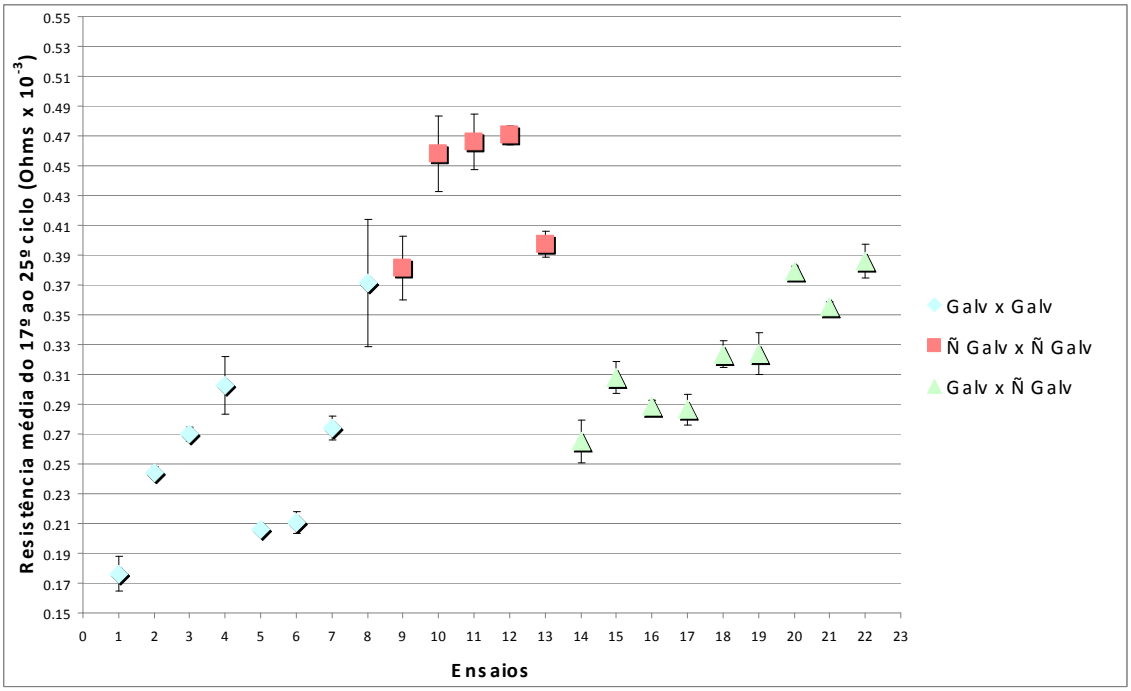


Figura 4.23 – Média e Desvio Padrão da resistência elétrica das três repetições de cada ensaio com chapas limpas, calculada entre o 17º ao 25º ciclo com presença de óleo

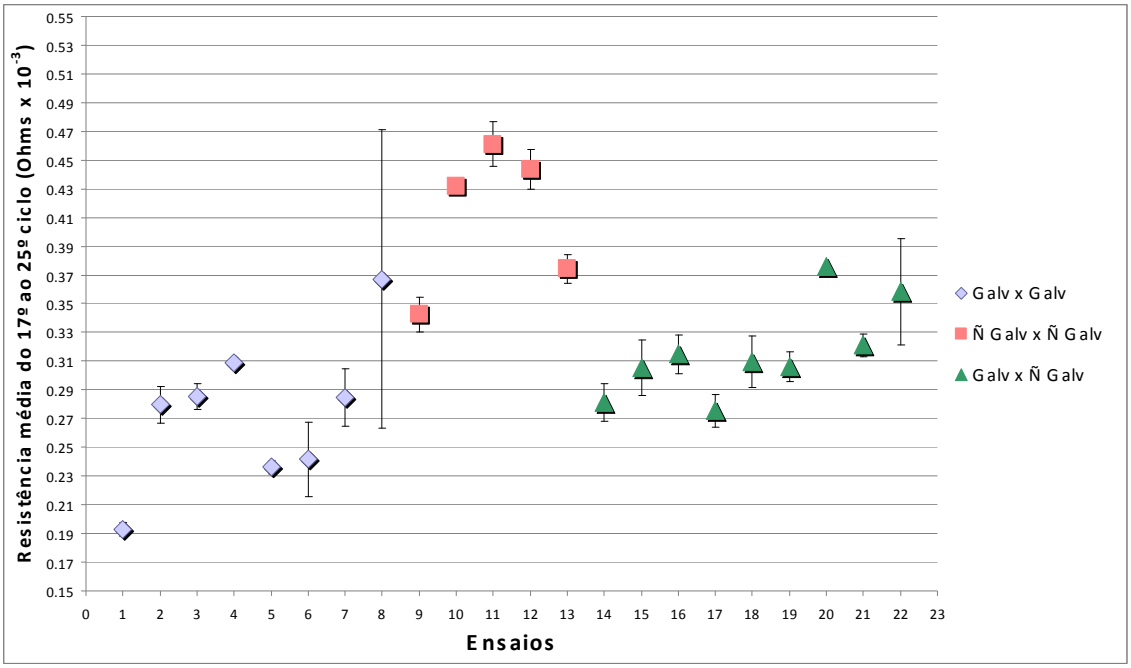


Figura 4.24 – Média e Desvio Padrão da resistência elétrica das três repetições de cada ensaio com chapas limpas, calculada entre o 17º ao 25º ciclo com presença de óxido

Tabela 4.5 – Diferença entre valores de desvio padrão entre chapas "Galvanizadas x Galvanizadas"

	LIMPA			ÓLEO			ÓXIDO		
	3º ao 6º	17º ao 25º		3º ao 6º	17º ao 25º		3º ao 6º	17º ao 25º	
Ensaio	σ	σ	Δ	σ	σ	Δ	σ	σ	Δ
E01-0.7-0.7	0,00325	0,00170	0,002	0,01513	0,01154	0,004	0,00391	0,00484	-0,001
E02-0.7-2.0	0,00449	0,00550	-0,001	0,00860	0,00413	0,004	0,01594	0,01245	0,003
E03-1.2-2.0	0,00438	0,00672	-0,002	0,01984	0,00479	0,015	0,01149	0,00895	0,003
E04-1.5-2.0	0,00360	0,00576	-0,002	0,02965	0,01953	0,010	0,00535	0,00378	0,002
E05-0.7-1.2	0,00432	0,00123	0,003	0,00351	0,00316	0,000	0,00379	0,00461	-0,001
E06-1.5-0.7	0,00285	0,00191	0,001	0,00728	0,00739	0,000	0,02744	0,02621	0,001
E07-2.5-0.7	0,01674	0,01216	0,005	0,00918	0,00813	0,001	0,03479	0,02029	0,015
E08-2.5-2.0	0,01419	0,00886	0,005	0,04657	0,04264	0,004	0,06783	0,10423	-0,036

Tabela 4.6 – Diferença entre valores de desvio padrão entre chapas "Não Galvanizadas x Não Galvanizadas"

	LIMPA			ÓLEO			ÓXIDO		
	3º ao 6º	17º ao 25º		3º ao 6º	17º ao 25º		3º ao 6º	17º ao 25º	
Ensaio	σ	σ	Δ	σ	σ	Δ	σ	σ	Δ
E09-0.5-0.5	0.02195	0.01787	0.004	0.01028	0.02129	-0.011	0.03855	0.01211	0.026
E10-0.5-2.0	0.01422	0.00571	0.009	0.02723	0.02534	0.002	0.00589	0.00424	0.002
E11-1.2-2.0	0.01326	0.00583	0.007	0.02867	0.01859	0.010	0.02092	0.01576	0.005
E12-1.5-2.0	0.02750	0.02809	-0.001	0.01182	0.00628	0.006	0.00788	0.01390	-0.006
E13-1.2-0.5	0.00616	0.00954	-0.003	0.01874	0.00871	0.010	0.01874	0.00975	0.009

Tabela 4.7 – Diferença entre valores de desvio padrão entre chapas “Galvanizadas x Não Galvanizadas”

	LIMPA			ÓLEO			ÓXIDO		
	3º ao 6º	17º ao 25º		3º ao 6º	17º ao 25º		3º ao 6º	17º ao 25º	
Ensaio	σ	σ	Δ	σ	σ	Δ	σ	σ	Δ
E14-0.7-0.5	0.01019	0.00270	0.007	0.02665	0.01428	0.012	0.01085	0.01316	-0.002
E15-0.7-2.0	0.00460	0.00174	0.003	0.00594	0.01049	-0.005	0.02300	0.01957	0.003
E16-1.2-1.2	0.00380	0.00226	0.002	0.00620	0.00382	0.002	0.02014	0.01341	0.007
E17-1.5-0.5	0.01082	0.00573	0.005	0.00905	0.01012	-0.001	0.00643	0.01157	-0.005
E18-1.5-1.5	0.00098	0.00243	-0.001	0.00808	0.00909	-0.001	0.03110	0.01820	0.013
E19-2.5-0.5	0.01003	0.01053	-0.001	0.01293	0.01424	-0.001	0.00905	0.01029	-0.001
E20-2.0-2.0	0.00650	0.00148	0.005	0.02058	0.00341	0.017	0.01780	0.00180	0.016
E21-2.5-0.5	0.00905	0.01417	-0.005	0.00461	0.00319	0.001	0.01252	0.00800	0.005
E22-2.5-2.0	0.00434	0.00162	0.003	0.07507	0.01157	0.064	0.01771	0.03691	-0.019

Com isso, pode se concluir que fazendo o cálculo da resistência elétrica utilizando-se dos últimos ciclos (quando se esperava mais estabilidade dos valores) ao invés dos primeiros, não apresentou qualquer vantagem em termos de sensibilidade ou repetibilidade das medições. Além disto, o tempo maior demandado pela segunda abordagem para se fazer a medição e calcular a média traz como conseqüência uma menor produtividade (maior tempo de soldagem por ponto), não sendo adequado para um sistema de auto-regulagem para o controle do processo de solda a ponto por resistência.

CAPÍTULO V

"BURN-ZINC"

(Queima da camada de zinco do revestimento)

5.1 – O Zinco e a soldabilidade dos aços Galvanizados por Solda a Ponto por Resistência

Os problemas do zinco em relação à soldabilidade dos aços galvanizados por solda a ponto por resistência elétrica podem ser caracterizados por sua atuação. A primeira característica se relaciona com a metalurgia. O zinco, por si só, pode causar problemas metalúrgicos no material quando ocorre a fusão e formação do ponto de solda. Como ele não é solúvel no aço, pode se disseminar e ocupar os interstícios nas frentes de solidificação (contornos de grãos primários), fragilizando a região e dando origem a trincas de solidificação.

A segunda característica tem relação com a operacionalidade do processo. O zinco apresenta uma menor resistividade elétrica (5,920 x $10^{-8}\Omega$) do que a do aço (0,159 x $10^{-8}\,\Omega$) (MatWeb, 2007). Assim, a resistência elétrica na interface chapa-chapa é menor entre chapas galvanizadas do que entre chapas sem revestimento. Como conseqüência, é necessário utilizar correntes em maior nível para que se consiga aquecer a região de contato e a formação da lente de solda. Esse aumento da corrente pode ocasionar problemas durante o processo de soldagem, como, por exemplo, um aumento excessivo da indentação na superfície pelo ponto de solda ou mesmo a ocorrência de expulsão de material na região do ponto.

Além disto, o zinco da superfície da chapa que faz contato com o eletrodo de cobre pode se difundir para os mesmos, formando uma camada de latão na região de contato eletrodo-chapa. O latão, além de apresentar maior dureza do que o cobre, apresenta uma

resistência elétrica relativamente alta e, com isso, pode provocar um maior aquecimento na região eletrodo-chapa, que também não é bom para o processo (provoca indentação e/ou expulsão), já que o objetivo é aquecer a região de contato chapa-chapa. Outro inconveniente é que o latão formado tem também menor condutividade térmica, dificultando a refrigeração sobre a chapa e, da mesma forma, facilitando a indentação do ponto. Portanto, todos esses inconvenientes causados pela presença do zinco na camada de revestimento dificultam a soldabilidade do aço galvanizado. As propriedades do zinco comparadas com as do aço estão apresentadas na Fig. 5.1, lembrando que os dados são para o metal puro. No caso do revestimento os valores sofrem alterações, mas tem-se uma comparação qualitativa do zinco presente no revestimento em relação ao aço ao carbono.

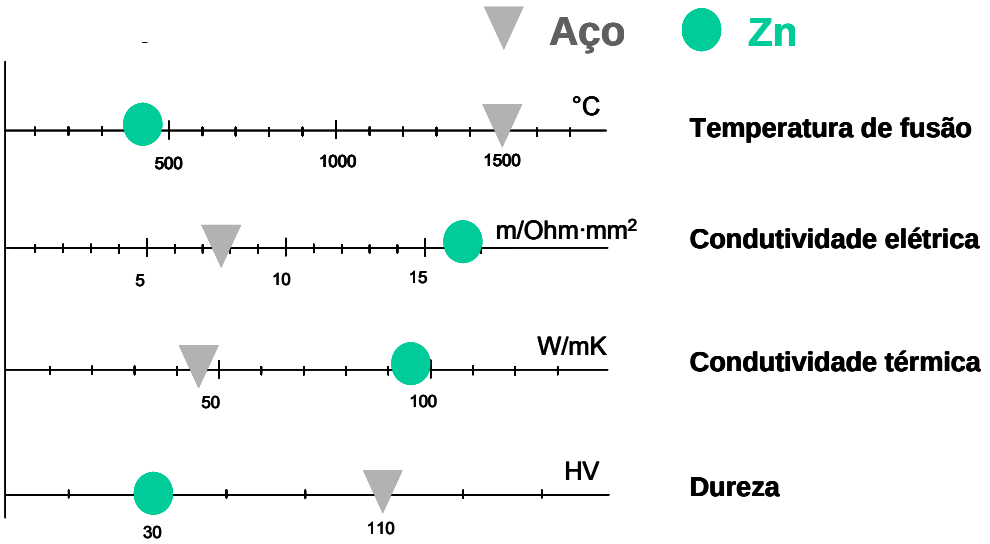


Figura 5.1 – Parâmetros Físicos do aço e zinco (BOSCH REXROTH, 2005)

5.2 – O "burn-zinc", Como Método de Minimizar os Problemas Causados pela Presença do Zinco

O "burn-zinc" é um impulso adicionado início do ciclo total de soldagem, no qual é aplicada uma corrente mais alta que a usada na soldagem propriamente dita por um período curto de tempo. Em teoria, esse procedimento deve fazer com que o zinco seja fundido (ou até evaporado) e, devido à pressão aplicada, expulso da região onde se formará a lente de solda, deixando um contato somente entre aço sem revestimento. Neste momento, o zinco tende a ser expulso para uma região ao redor do local onde se formará o ponto de solda, solidificando-se posteriormente. É importante ressaltar que entre esse impulso ("burn-zinc") e o ciclo da soldagem é indicado deixar um curto espaço tempo sem passagem de corrente.

Esta técnica faz com que a resistência à passagem de corrente aumente, pois o contato se dará diretamente entre aços sem revestimento e, por conseqüência, aquecerá mais e mais rápido a região entre as chapas, formando a lente de solda de forma mais adequada.

5.3 – Procedimento para determinação dos parâmetros para "burn-zinc"

Com intuito de determinar parâmetros adequados para o "burn-zinc" de uma dada junta a ser unida pelo processo de soldagem a ponto por resistência, foi proposto neste trabalho um procedimento padrão, através de um ensaio de simulação. Procura-se achar o envelope operacional para a aplicação da técnica numa dada condição, cujas etapas do procedimento são abaixo descritas:

- Inicialmente, prepararam-se corpos de prova com dimensões padronizadas (25 x 150 x espessuras) nas diferentes espessuras a serem utilizadas (ou combinação entre chapas finas e espessas), fixando-os por uma das extremidades (insere-se uma lâmina delgada de material não condutor entre as duas chapas na região de fixação para evitar o efeito da corrente derivativa "efeito shunt");

- Realizam-se, então, impulsos de "burn-zinc", variando-se o tempo de duração do impulso*, o nível de corrente e a pressão aplicada pela pinça.

- Caso ocorra a união entre as chapas em algum dos ensaios, fazer embutimento da amostra, cortá-la na região do ponto, atacar com um reagente próprio para o tipo de material e fazer a macrografia, para verificar se formou a lente de solda ou, caso não tenha formado, verificar se o zinco foi fundido ou deslocado para a região em torno do ponto.

- Separar as chapas e fazer uma varredura da camada de zinco em uma direção linear na região onde houve ação do burn-zinc**, conforme Fig. 5.2, com a utilização de um medidor digital de camadas (ver item 3.4);

**Como o tempo utilizado é bastante curto, na maioria dos ensaios não ocorre a união entre as chapas, sendo possível separá-las manualmente e analisar a região de interesse (se houver soldagem entre as chapas é porque a corrente e/ou o tempo foram excessivos para fazer só o "burn-zinc", descartando-se as respectivas condições de parâmetros).*

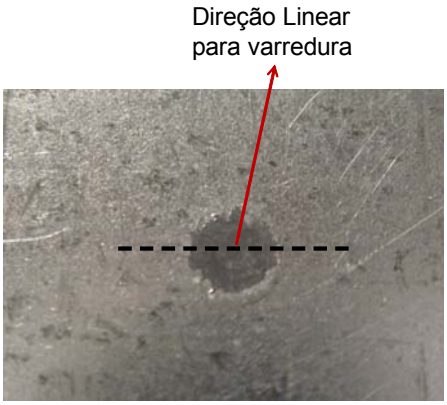


Figura 5.2 – Direção linear para medição da camada de zinco

Nesta fase do trabalho foi, então, utilizado o procedimento padrão. Como forma de pesquisar o ponto de trabalho procurou-se trabalhar sob um planejamento experimental (Fatorial completo - Tab. 5.1) constituído de três níveis de corrente, 3,0, 5,0 e 7,0 kA, tempo de “burn-zinc” de 5 ciclos e três níveis de pressão aplicados pela pinça, 2,0, 3,5 e 6,0 (parâmetro P1 de entrada no equipamento). Preparou-se os corpos de prova nas dimensões padronizadas em diferentes espessuras a serem utilizadas (ou combinação entre chapas finas e espessas), ou seja, união de chapas finas (0,7 com 0,7 mm) e de chapas espessas (2,0 com 2,5 mm). A Fig. 5.5 apresenta o resultado do ensaio BZ03. Os parâmetros foram tão excessivos que a chapa apresentou uma grande região com fuligem, além de que na região do ponto de solda ficou aderido o cobre do eletrodo. Como os parâmetros foram excessivos para as chapas finas, preferiu-se nem realizar o ensaio BZ04. Com isso, pode concluir que para as quatro combinações de parâmetros utilizados em chapas finas, não se conseguiu a queima completa do zinco, não sendo estes os parâmetros adequados para a técnica de “burn-zinc” para a chapa de 0,7 mm.

*** A análise da medição de espessura da camada de zinco deve ser feita comparando o valor médio medido na chapa fora da região do ponto (espessura média da camada de zinco em toda a chapa), com os valores medidos na região linear que atravessa o ponto formado. Com isso, é possível verificar se a espessura do zinco diminuiu, aumentou ou manteve-se constante.*

Tabela 5 – Parâmetros dos ensaios “Burn Zinc”

Ensaio	Esp. Chapas [mm]	Corrente [kA]	Pressão
BZ01	0,7 - 0,7	3,0	2,0
BZ02	0,7 - 0,7	3,0	6,0
***BZ03	0,7 - 0,7	7,0	2,0
****BZ04	0,7 – 0,7	7,0	6,0
BZ09	0,7 – 0,7	5,0	3,5
BZ05	2,0 – 2,5	3,0	2,0
BZ06	2,0 – 2,5	3,0	6,0
BZ07	2,0 – 2,5	7,0	2,0
BZ08	2,0 – 2,5	7,0	6,0
BZ10	2,0 – 2,5	5,0	3,5

*** - descartada da análise, por parâmetros excessivos;
**** - não realizado por ser a combinação de parâmetro também excessiva para chapa de 0,7 mm

Dos oitos ensaios válidos nesta fase, três deles apresentaram união entre as chapas, sendo eles o ensaio BZ01, BZ07 e BZ09. Porém, nos ensaios BZ01 e BZ07 esta união estava fraca (solda fria), soltando-se com leve esforço no sentido de abrir (somente o ensaio BZ09 apresentou uma união forte, ou seja, ocorreu a formação da lente de solda). Estas características foram confirmadas refazendo-se os três ensaios. Um outro corpo de prova foi soldado com parâmetros reais de soldagem, para servir de comparação na formação da lente de solda. Assim, essas amostras foram embutidas e preparadas para realizar a macrografia, para analisar o comportamento do zinco na região da solda.

Como o tempo utilizado foi bastante curto, nos demais ensaios não ocorreu a união entre as chapas, sendo possível a separação das mesmas para análise da região de interesse, fazendo a medição da camada de zinco utilizando o medidor de espessuras de camada de zinco. Os quatro primeiros ensaios foram realizados utilizando chapas fina (0,7 x 0,7 mm), variando-se dois níveis de corrente e dois níveis de pressão. Nota-se na Fig. 5.3, referente ao ensaio BZ01, que na região central onde o ponto se formaria, o zinco foi removido em parte, mas não completamente, já que a espessura da camada do zinco na chapa original era de 19 μm e após a passagem de corrente foi verificado que a espessura da camada caiu para uma faixa de 8 a 10 μm. Já a Fig. 5.4, ilustrando o ensaio BZ02, mostra uma situação em que não ocorreu a queima do zinco; observa-se que mesmo tendo formado uma região do contato dos eletrodos (região de formação do ponto), a camada de zinco não foi removida (houve apenas uma pequena variação no valor da espessura).

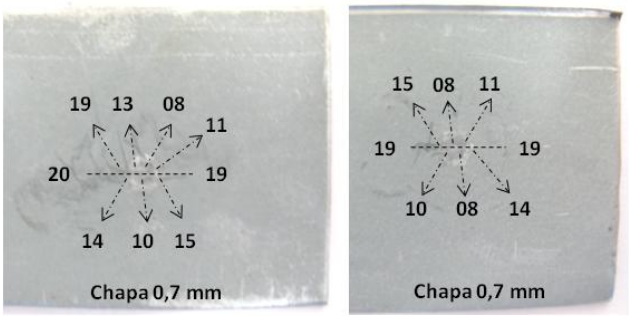


Figura 5.3 – Espessuras da camada de zinco [μm] na região do ponto de solda, ensaio BZ01

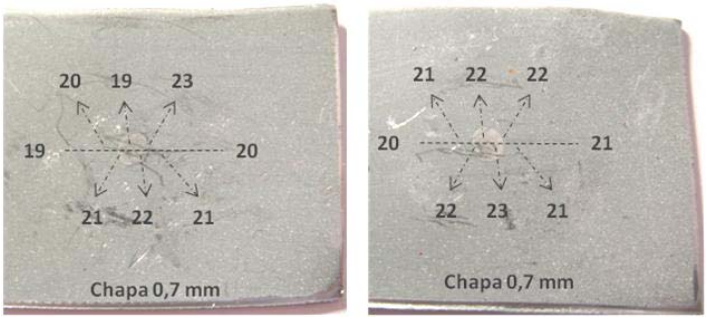


Figura 5.4 – Espessuras da camada de zinco [μm] na região do ponto de solda, ensaio BZ02

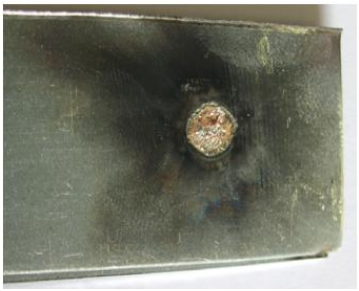


Figura 5.5 – Parâmetros excessivos para a espessura da chapa (0,7 mm), ensaio BZ03

Na seqüência foram analisados os próximos quatro ensaios com chapas espessas (2,5 x 2,0 mm). Observa-se na Fig. 5.6, referente ao ensaio BZ05, que na chapa de 2,5 mm não foi retirada qualquer camada de zinco, pelo contrário, a camada média da chapa original era de 13 μm e teve região que apresentou uma camada com 21 e até 23 μm de espessura de zinco. Por outro lado, na outra chapa (2,0 mm) observa-se que, na região central onde o ponto se formaria, o zinco foi retirado, ou seja, passou de uma espessura de 12 para 4 a 3 μm. Pode-se concluir então que o zinco de uma chapa passou para a outra, porém ainda permaneceu na região onde o ponto seria formado, o que não caracteriza a técnica de “burn-zinc”. A Fig. 5.7 mostra o comportamento do ensaio BZ06. Percebe-se que a espessura da camada de zinco manteve-se contaste em toda a região da chapa, não ocorrendo nenhuma marcação de onde os eletrodos tocavam a chapa por onde a corrente passou.

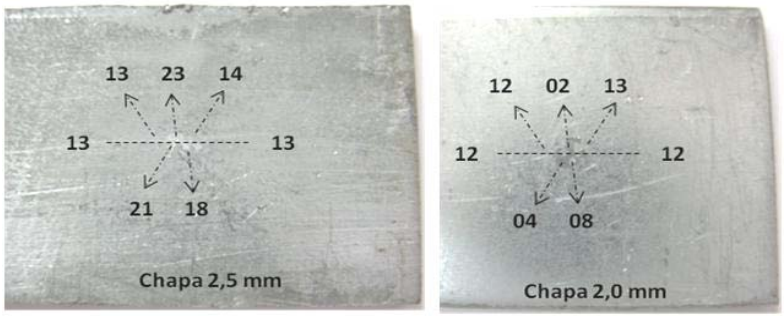


Figura 5.6 – Espessuras da camada de zinco [μm] na região do ponto de solda, ensaio BZ05

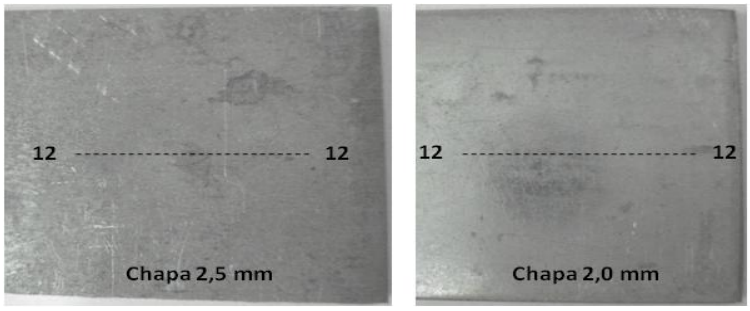


Figura 5.7 – Não houve formação de ponto nem fusão de zinco, ensaio BZ06

A Fig. 5.8 apresenta a análise do ensaio BZ07, onde nota-se que, na região por onde se passou a corrente, o zinco foi retirado, pois na região central a espessura do zinco caiu para uma faixa entre 1 e 4 μm, sendo que a espessura média na chapa de 2,5 mm era de 11 μm e o da chapa de 2,0 mm era de 12 μm. É importante ressaltar, também, que houve uma região onde provavelmente houve fuga da corrente (corrente derivativa – região onde nota-se a retirada de zinco, porém afastada do ponto onde se formaria a lente de solda), observada pela retirada do zinco da chapa de 2,0 mm (faixa de 1 a 5 μm) que foi deslocada para a chapa de 2,5 mm, onde a camada aumentou de 11 μm para uma faixa de 20 a 22 μm. Já a Fig. 5.9 ilustra o ensaio BZ08 e neste caso observa-se que ocorreu o “burn-zinc”, sendo que a espessura média da camada de zinco das chapas era de 12 μm e na região central do ponto essa espessura caiu para uma faixa de 1 a 5 μm, o que caracteriza a queima do zinco.

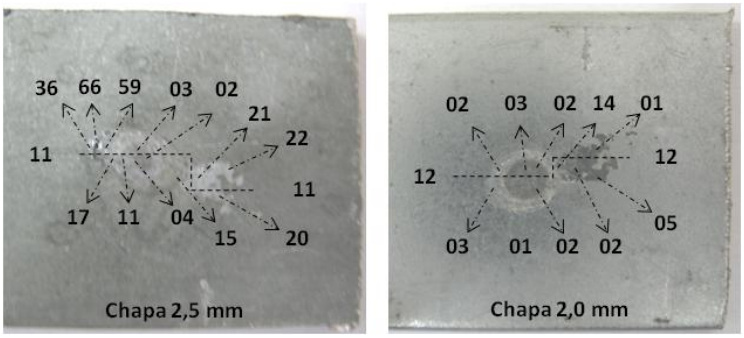


Figura 5.8 – Espessuras da camada de zinco [μm] na região do ponto de solda, ensaio BZ07

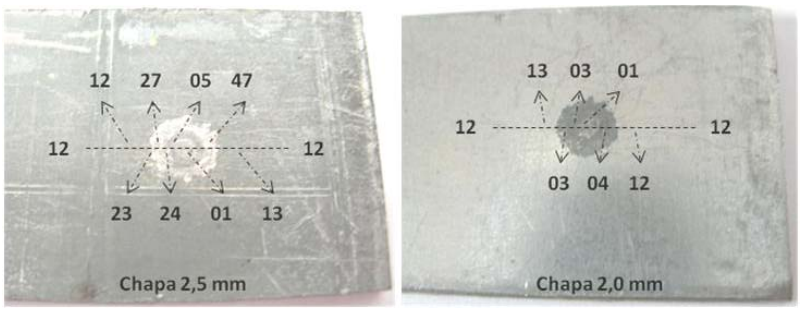


Figura 5.9 – Espessuras da camada de zinco [μm] na região do ponto de solda, ensaio BZ08

Por último foram analisadas as superfícies dos últimos dois ensaios, com parâmetros intermediários aos dos ensaios anteriores (5 kA e 3,5), aplicados na combinação de chapas finas (0,7 com 0,7 mm) e chapas espessas (2,5 com 2,0 mm). Como já mencionado, no ensaio BZ09 os parâmetros utilizados foram suficientes para a formação de lente de solda na chapa fina (ocorrendo a soldagem entre as chapas); com isso, não foi possível a separação das mesmas para medição da camada de zinco. O ensaio BZ10, apresentado na Fig. 5.10, por outro lado, se caracteriza pela ocorrência do “burn-zinc”, ou seja, o zinco na região central do ponto foi retirado, uma vez que no centro do ponto a espessura caiu para 1 a 3 μm (contra um valor médio de 12 μm do revestimento da chapa em questão). É interessante observar que, na região ao redor do ponto, a camada de zinco aumentou para até 32 μm (chapas de 2,5 mm), mostrando que na técnica “burn-zinc” boa parte do material do revestimento é retirado para a região ao redor do ponto de solda, deixando a região central com contato diretamente entre aço sem revestimento.

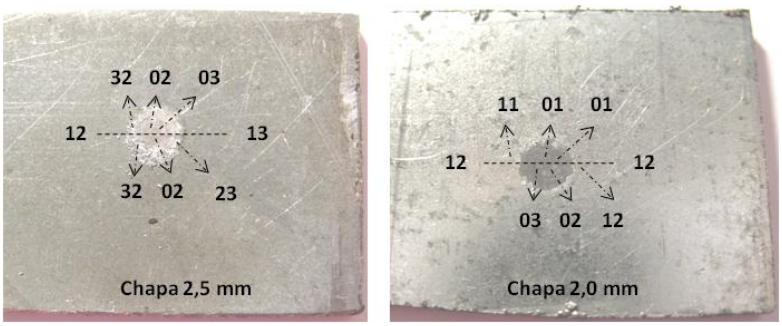


Figura 5.10 – Espessuras da camada de zinco [μm] na região do ponto de solda, ensaio BZ10

Para os três ensaios onde ocorreu a união entre as chapas (BZ01, BZ07 e BZ09), foram então embutidos os corpos de prova e realizada a macrografia. A Fig. 5.11 apresenta o ensaio BZ01 entre chapas finas e verifica-se que não existe nenhuma evidência de que tenha ocorrido a queima total do zinco na região onde o ponto se formaria, apesar da pouca ampliação conseguida na macrografia, mas observa que na lateral esquerda de onde o

ponto se formaria, parece ter ocorrido uma pequena fusão de zinco nessa região, o que poderia ser a razão da “união fraca” entre as chapas, ou seja, apesar de não ter ocorrido a queima total do zinco no centro do ponto (evidenciado pela medição da camada de zinco realizada anteriormente e mostrada na Fig. 5.3) a queima parcial do zinco pode ter sido suficiente para “colar” as chapas finas.

A Fig. 5.12 mostra o ensaio BZ07 entre chapas espessas. É importante ressaltar que o ataque com nital 10% reagiu diferentemente nas duas chapas. Nota-se que na chapa mais espessa (2,5mm) o nital atacou bastante, revelando uma região bem mais escura quando comparada ao ataque na chapa de 2,0 mm, onde o ataque foi bastante fraco. Porém, dá para observar que a lente de solda não foi formada e que existe a presença de pequenos pontos (em forma de esferas) que podem ser o zinco fundido da camada do revestimento, que no mesmo caso anterior pode ter sido a causa da união fraca entre as chapas, ou seja, o zinco fundiu e “colou” as duas chapas porém com pouca resistência. Já a Fig. 5.13 (ensaio BZ09), mostra a formação da lente de solda, sendo que os parâmetros utilizados no ensaio foram suficientes para se soldar as chapas finas; neste caso a união entre as chapas foi forte (ocorreu a soldagem) e não fraca como nos dois ensaios anteriores.

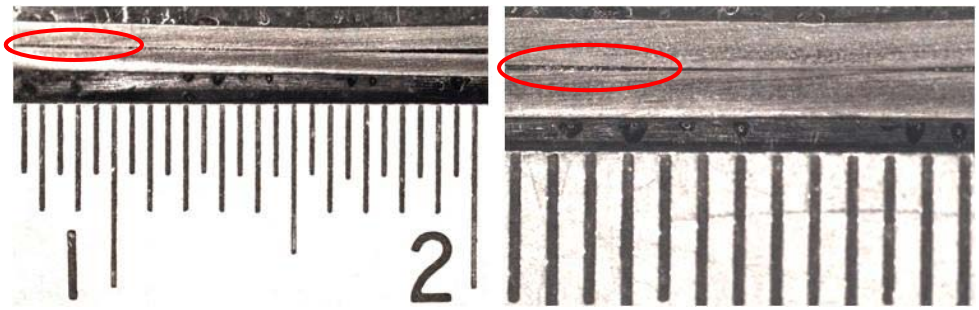


Figura 5.11 – Macrografia do ensaio BZ01 (ataque Nital 10%)

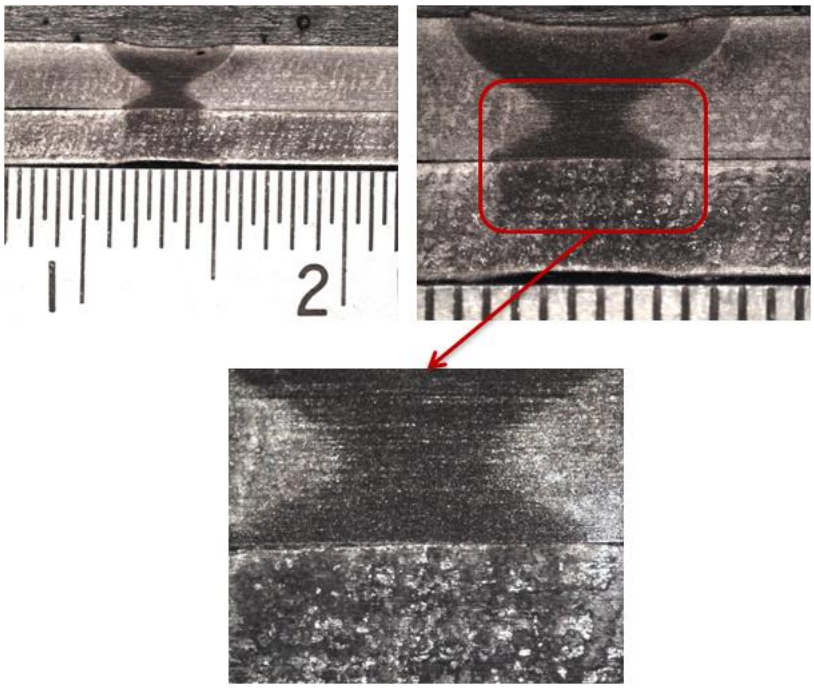


Figura 5.12 – Macrografia do ensaio BZ07 (ataque Nital 10%)

Por último, só para efeito de comparação, foi realizado mais um ensaio entre as chapas espessas, com os mesmos parâmetros do ensaio BZ07, porém com um tempo maior (15 ciclos). Novamente foi embutido o corpo de prova, cortado, atacado e realizada a macrografia. Observa-se que, mesmo o ataque atuando de maneira diferente nas duas chapas, nesse caso formou-se o ponto de solda e na lateral esquerda do ponto de solda aparece um metal fundido que provavelmente é o zinco que foi expulso para a região em torno do ponto.

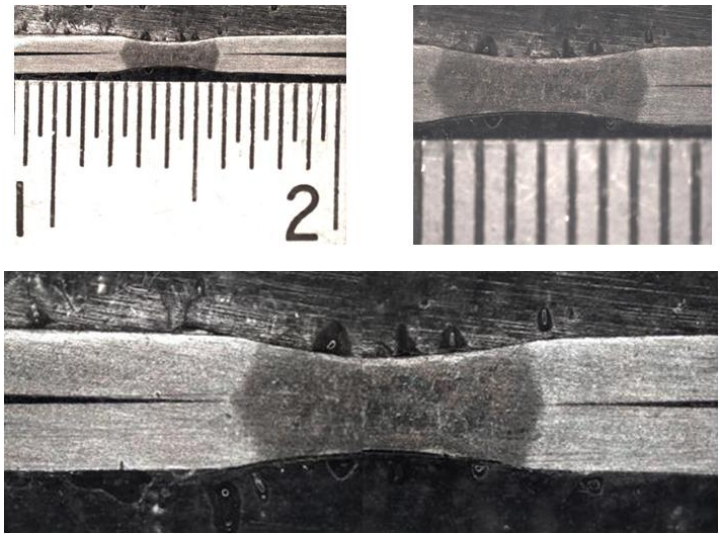


Figura 5.13 – Ensaio BZ09, formação da lente de solda para efeito de comparação

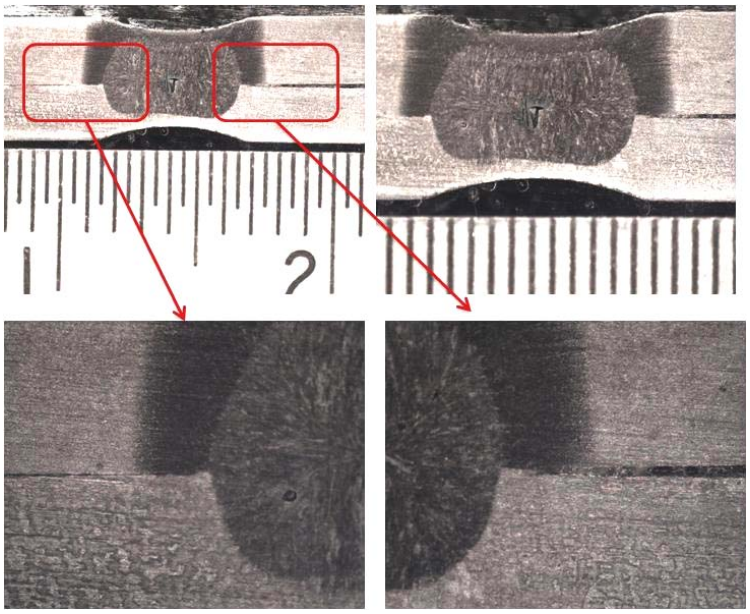


Figura 5.14 – Macrografia da lente de solda para união de chapa de 2,5 mm com 2,0 mm, utilizando parâmetros reais de soldagem, para efeito de comparação

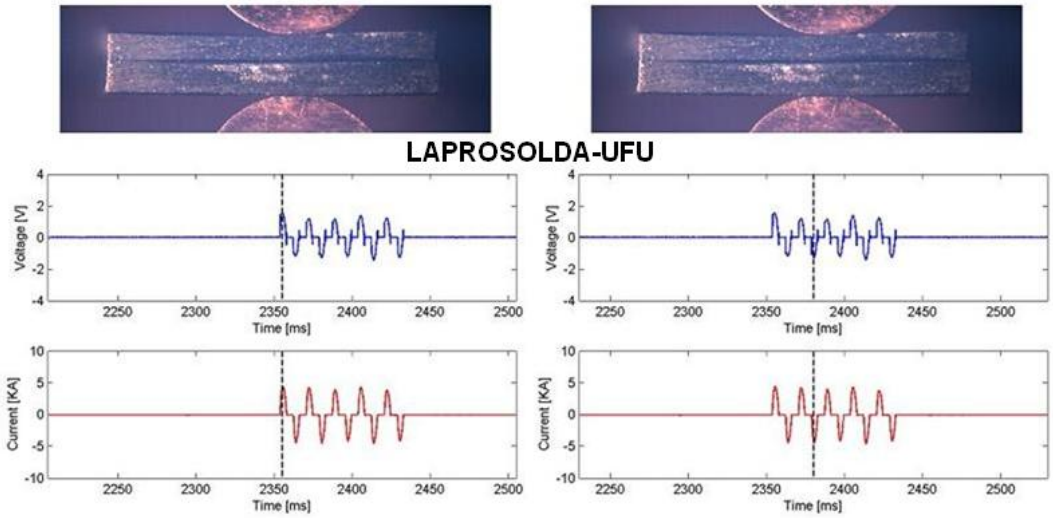
Observa-se na macrografia da Fig. 5.12 a presença de um grande poro próximo à superfície da chapa superior, nota-se também que na Fig.5.14 existe um vazio (em forma de T) bem na região central da lente de solda e alguns pequenos poros na região lateral da lente formada, esse comportamento pode ser explicado devido ao zinco que foi evaporado durante a soldagem e ficou aprisionado no interior do material ou ainda na reação química durante o ataque do nital para a revelação da macrografia, o zinco poderia ter sido atacado fortemente sendo retirado da região, permanecendo somente o vazio. Porém, não é o objetivo do presente trabalho analisar estas descontinuidades ou defeitos.

Assim, utilizando esse procedimento, é possível identificar o envelope operacional de parâmetros de “burn-zinc” (tempo, corrente e pressão) que realmente conseguem retirar a camada para cada tipo de combinação de material.

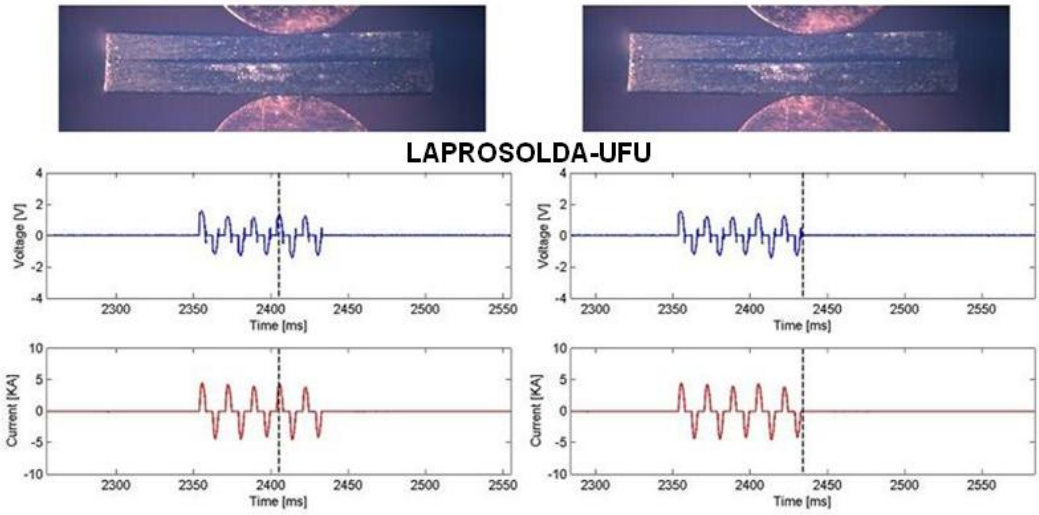
5.4 – Ilustração da Técnica de “burn-zinc”

Para ilustrar o fenômeno em si, procurou-se também filmar impulsos para “burn-zinc”, utilizando-se uma câmera de alta velocidade, com imagens sincronizadas com sinais de tensão e corrente. Com a filmagem a análise é mais completa, pois se pode ver quadro a quadro a formação do fenômeno e ainda fazer uma comparação com a corrente e a tensão. As Figs. 5.15 (a) e (b) ilustra o ensaio BZ06 com uma corrente de 3 kA com uma pressão de 6,0, verificou-se que não ocorreu a expulsão e nem evaporação de zinco, sendo os

parâmetros impróprios para a esta combinação de chapas espessas (2,5 com 2,0 mm). Observa-se no oscilograma que foi utilizado um tempo de cinco ciclos, porém a corrente não teve um valor suficiente para que ocorresse o “burn-zinc”. É também importante ficar atento ao fato da tensão praticamente não se alterar durante todo o tempo de passagem de corrente, sugerindo não haver mudança na resistência de contato.



(a)

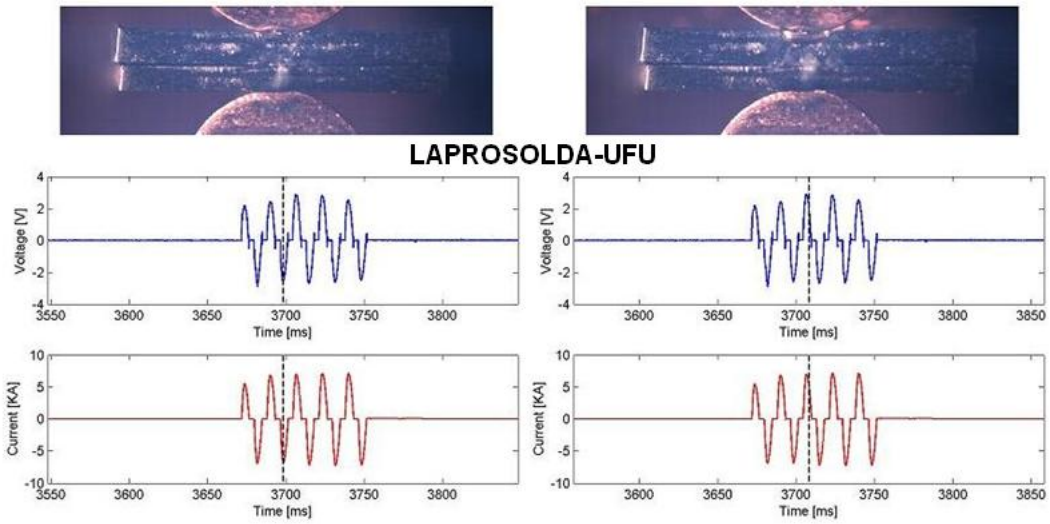


(b)

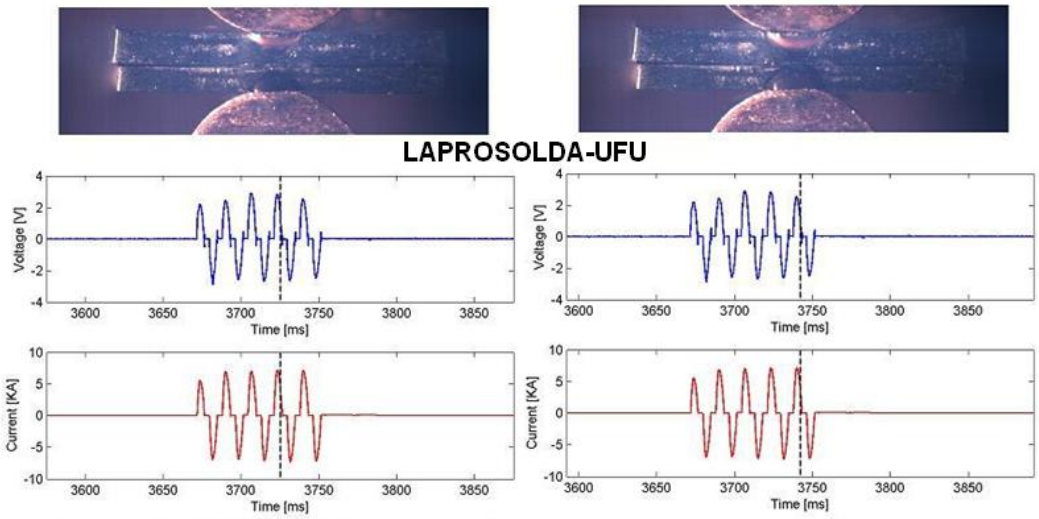
Figura 5.15 – Quadros seqüenciais (a) e (b) ilustrando o comportamento da interface chapa-chapa durante a aplicação da técnica “burn-zinc” por 5 ciclos, mas com parâmetros (corrente e/ou pressão) insuficientes para se obter a queima do revestimento

As Figs. 5.16 (a), (b) e (c) ilustrando o ensaio BZ10, por outro lado, mostra a ocorrência com sucesso da técnica de “burn-zinc”. Nota-se no oscilograma que foram utilizados também cinco ciclos, mas que a corrente regulada foi maior (5 kA) e a pressão menor (3,5). Já nos primeiros ciclos ocorre um aquecimento na região de contato chapa-

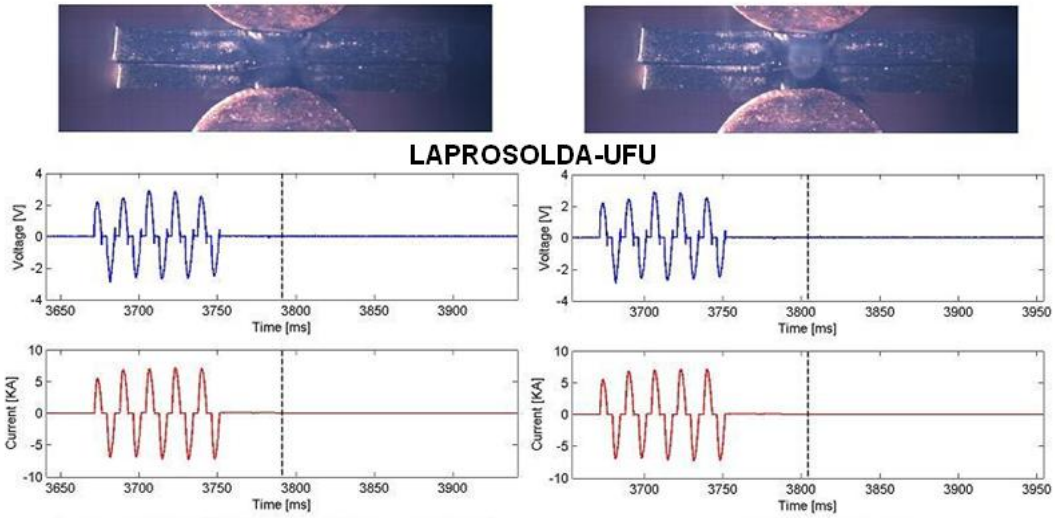
chapa. Ao passar do tempo, o material da chapa na região entre os eletrodos aquece bastante sofrendo alterações metalúrgicas. É interessante observar que depois de um curto tempo após o final da passagem de corrente, surge uma fumaça esbranquiçada saindo do interior da região de contato chapa-chapa, caracterizando a evaporação do zinco presente na região. Percebe-se também que a tensão aumenta até o terceiro ciclo, sugerindo que a resistência de contato está aumentando coerentemente.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.16 – Quadros seqüenciais (a), (b) e (c) ilustrando o comportamento da interface chapa-chapa durante a aplicação da técnica “burn-zinc” por 5 ciclos, mas com parâmetros (corrente e/ou pressão) adequados para se obter a queima do revestimento.

5.5 – Verificação da Eficiência da Técnica “burn-zinc”

Outra abordagem para este tipo de estudo é verificação da eficiência real do uso da técnica. Para tal, foram realizados ensaios com o objetivo de se comparar uma solda completa com e sem o uso da técnica de “burn-zinc”. É que evidências têm demonstrado que nem para todas as combinações de chapas a soldar (espessura de tipo de galvanização) a técnica “burn-zinc” é vantajosa ou necessária. Há casos em que se aplicando a técnica o tempo para se conseguir um ponto com a mesma dimensão é maior do que quando não se aplica a técnica. O tempo entre o impulso para o “burn-zinc” e a aplicação da corrente de soldagem é uma variável importante e deve ser avaliada. A metodologia aplicada para fazer a verificação da eficiência da técnica “burn-zinc” foi a de, a partir de uma parametrização do “burn-zinc”, como mostrada no item anterior, soldar as chapas de interesse (usando parâmetros adequados para a união) com e sem a técnica para queimar zinco, mas com o mesmo número de ciclos na fase de soldagem (repetir no mínimo 3 vezes cada solda).

Após medir o tamanho do ponto (após o teste de rasgamento - AWS D8.9M), toma-se a decisão (a indentação e aparência do ponto devem ser critérios importantes nesta decisão). Se o ponto com “burn-zinc” ficou maior do que sem queimar zinco, a técnica mostrou-se eficiente. Mas novas soldagens devem ser feitas, agora com tempos de soldagem menores, até que se atinja o tamanho equivalente do ponto (ou o tamanho de ponto desejado). Mas no caso do ponto com “burn-zinc” ficar menor do que sem a queima

do revestimento, a técnica é bem provável ser ineficiente para a combinação tipo chapa/espessura, uma vez que será necessário aumentar o tempo de soldagem para se obter o mesmo tamanho de ponto (além do aspecto de produtividade, tempos longos favorecem indentação). Mas antes de se tomar a decisão, testar novamente variando-se o tempo entre o impulso para o “burn-zinc” e a aplicação da corrente de soldagem para cima e para baixo para ver o efeito destes parâmetros ou confirmar a tendência. É importante lembrar que a queima do zinco não é importante só no quesito operacional (em que a redução do tempo de soldagem seria o objetivo), mas também metalúrgico, ou seja, evitar fragilização devido à difusão do zinco para dentro do ponto.

Foi ainda realizado mais um experimento com ensaios utilizando chapas com espessura intermediária, nessa fase foram usadas chapas com 1,2 mm. Para se comparar a eficiência da técnica foi então realizados os ensaios apresentados na Tab. 5.2, lembrando que o valor de pressão utilizado foi de 4 no equipamento equivalente a uma força de 1619 N. Nota-se que o melhor parâmetro para soldar as chapas de 1,2 mm foram de 10 ciclos de soldagem com uma corrente de 5 kA. Já que quando se soldou com oito ciclos ou o ponto foi formado parcialmente ou ocorreu expulsão.

Tabela 6 – Parâmetros de soldagem

Chapa Intermediária (1,2 x 1,2 mm)		
Ciclos	**Corrente (kA)**	**Tamanho do ponto (mm)**
5	4	0
	5	0
	6	0
8	4	0
	5	3,48 (parcial)
	6	5,70 (expulsão)
10	4	0
	5	**5,55**
	6	5,75 (expulsão)

Tamanho mínimo do ponto 3,38mm

Para encontrar os parâmetros otimizados para a realização da técnica de “burn-zinc” para as chapas de 1,2 mm, foram realizados os ensaios apresentados na Tab. 5.3. Observa-se que utilizando-se cinco ciclos com uma corrente de 4 kA, nos três níveis de pressão, ocorreu o “burn-zinc”, já para a corrente de 5 kA e para a de 6 kA, os parâmetros foram excessivos e ocorreu a solda. Assim, optou-se por diminuir o tempo para três ciclos, e

repetir as condições. Os ensaios estão apresentados na Tab. 5.4. Nota-se que para uma corrente de 4 kA, o “burn-zinc” ocorreu parcialmente, ou seja, a camada de zinco não foi completamente retirada. Com a corrente de 5 kA na pressão mais baixa, ocorreu a solda, com uma pressão intermediária (3), ocorreu somente a queima parcial do zinco. Já com a pressão mais alta (5) o zinco foi queimado e retirado da superfície. Para o último nível de corrente usada (6 kA), na pressão mais baixa ocorreu a solda, o mesmo aconteceu quando se utilizou uma pressão de 3 , por fim, na pressão de 4 foi onde se notou a melhor condição para a realização do “burn-zinc”, sendo os parâmetros ideais para essa combinação de chapas.

Tabela 7 – Parâmetros para realizar o “burn-zinc” com 5 ciclos

Chapa Intermediária – 5 ciclos				
Ensaio	Corrente [kA]	Pressão	Burn-Zinc	Condição
BZ5-01-2	4	2	BZ	Boa
BZ5-02-2	4	3	BZ	Boa
BZ5-03-2	4	4	BZ	Boa
BZ5-04-2	5	2	Soldou	-
BZ5-05-2	5	3	Soldou	-
BZ5-06-2	5	4	Soldou	-
BZ5-07-2	6	2	Soldou	-
BZ5-08-2	6	3	Soldou	-
BZ5-09-2	6	4	Soldou	-

Tabela 8 – Parâmetros para realizar o “burn-zinc” com 3 ciclos

Chapa Intermediária – 3 ciclos				
Ensaio	Corrente [kA]	Pressão	Burn-Zinc	Condição
BZ3-01-2	4	2	BZ	Parcial
BZ3-02-2	4	3	BZ	Parcial
BZ3-03-2	4	4	BZ	Parcial
BZ3-04-2	5	2	Soldou	Expulsão
BZ3-05-2	5	3	BZ	Parcial
BZ3-06-2	5	4	BZ	Boa
BZ3-07-2	6	2	Soldou	Expulsão
BZ3-08-2	6	3	Soldou	Expulsão
BZ5-09-2	**6**	**4**	**BZ**	**Ideal**

Para efeito de comparação foi então, realizados mais um ciclo de ensaios, sendo que fixou-se a condição de “burn-zinc” como sendo de três ciclos com a corrente de 6 kA e uma pressão de 4 . O tempo de corrente, ou seja, o tempo que ocorrerá a soldagem em si após os três ciclos do “burn-zinc”, foi utilizado 10, 8 e 5 ciclos, e variou-se também o tempo entre os três primeiros ciclos (“burn-zinc” e os ciclos reais de soldagem, chamado de tempo de espera, foram utilizados 3, 5 e 10 ciclos, conforme ensaios apresentados na Tab. 5.5. Observa-se que a condição ideal para a soldagem com a utilização da técnica de “burn-zinc” para uma combinação de chapas de 1,2 mm, foi oito ciclos de soldagem e uma espera de três ciclos entre o “burn-zinc” e a soldagem.

Tabela 9 – Parâmetros para realização da soldagem com “burn-zinc”

CHAPA INTERMEDIÁRIA (1,20 x 1,20 mm)								
	Burn-Zinc 3 ciclos		**Solda 10 ciclos**					
Ensaio	Corrente [kA]	Pressão	Corrente [kA]	Pressão	Espera entre impulsos	Tam. Ponto1 [mm]	Tam. Ponto2 [mm]	Média Tam. Ponto
BZ310-01	6	4	5	4	3	5,8	5,75	5,78
BZ310-02	6	4	5	4	5	4,5	4,3	4,40
BZ310-03	6	4	5	4	10	4,2	4,9	4,55
	Burn-Zinc 3 ciclos		**Solda 8 ciclos**					
BZ38-1	**6**	**4**	**5**	**4**	**3**	**5,3**	**5,6**	**5,45**
BZ38-2	6	4	5	4	5	4,0	4,2	4,10
BZ38-3	6	4	5	4	10	0	0	0
	Burn-Zinc 3 ciclos		**Solda 5 ciclos**					
BZ35-01	6	4	5	4	3	0	0	0
BZ35-02	6	4	5	4	5	0	0	0
BZ35-03	6	4	5	4	10	0	0	0

*Ponto mínimo de 4,38 mm

Para uma melhor visualização da técnica de “burn-zinc” foi então filmado o procedimento de soldagem, primeiramente somente com a solda com os dez ciclos (Fig. 5.17) e posteriormente a soldagem com o “burn-zinc” com os parâmetros idéias (Fig. 5.18).

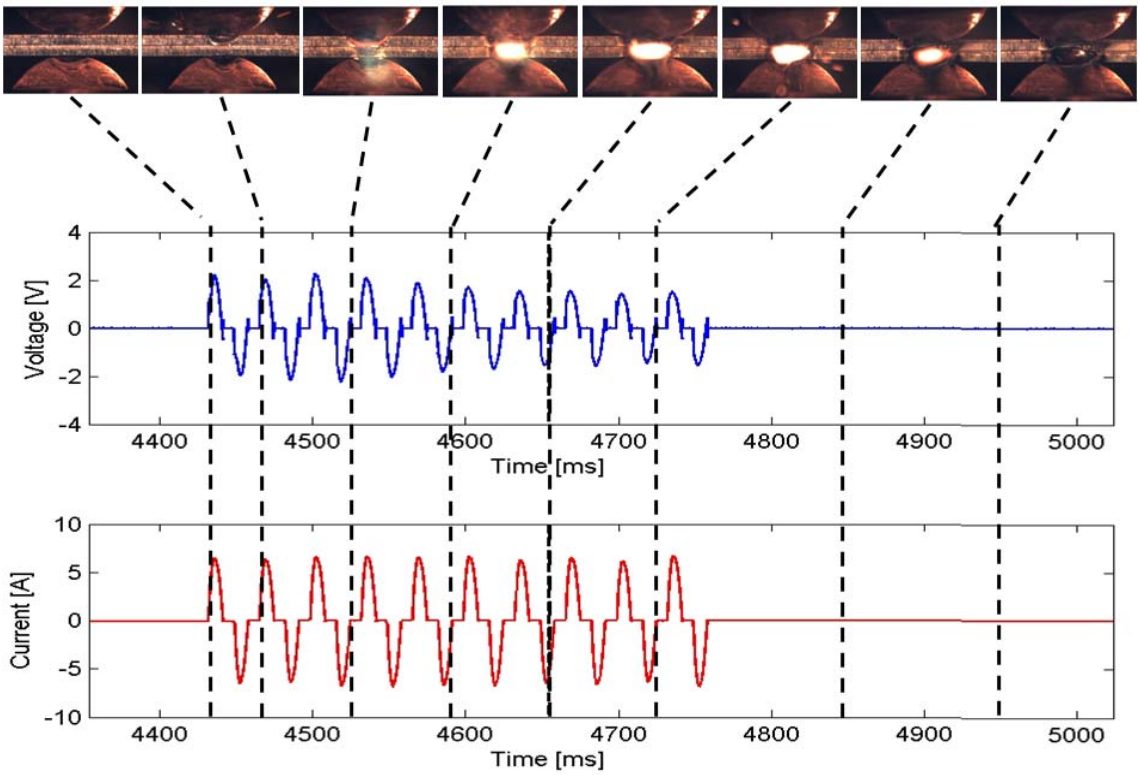


Figura 5.17 – Filmagem do processo de soldagem utilizando dez ciclos.

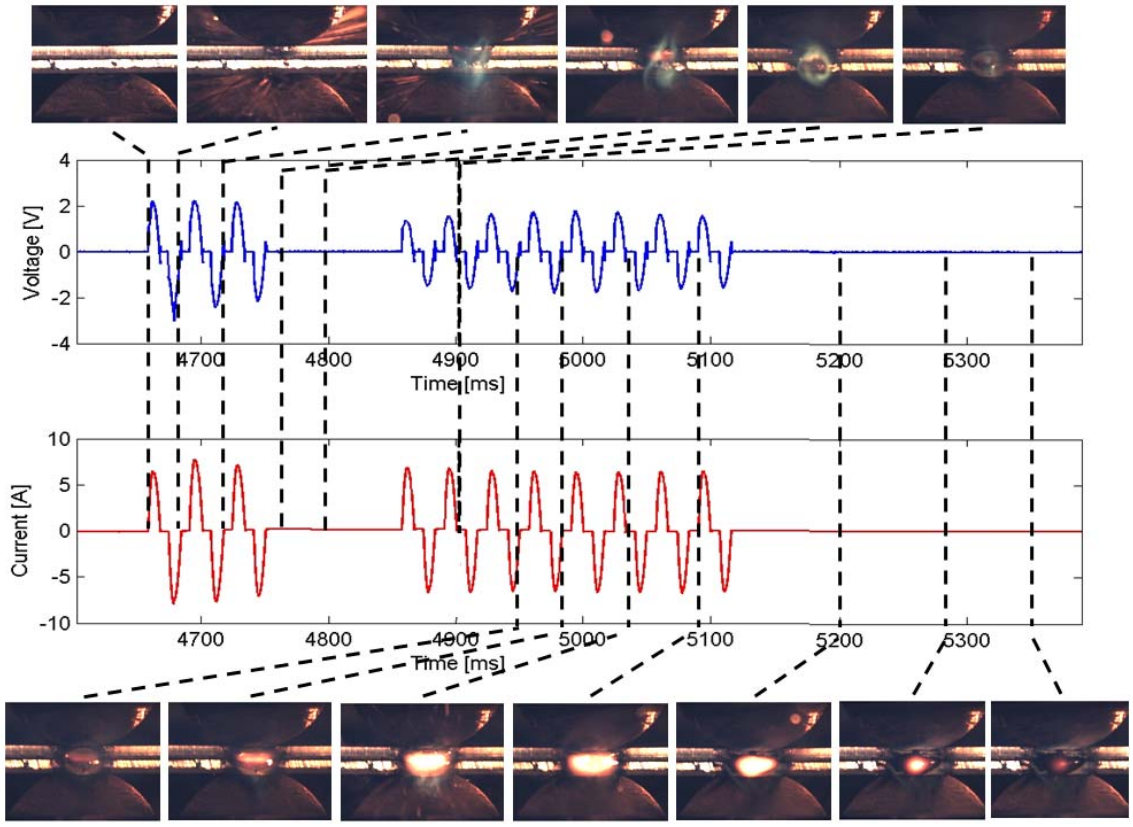


Figura 5.18 – Filmagem do processo de soldagem com a técnica de “burn-zinc”

5.6 – Conclusões sobre a técnica “burn-zinc”

A utilização da técnica “burn-zinc” pode ser uma importante ferramenta nas soldagens de chapas com revestimento de zinco (galvanizada). Entretanto, a aplicação da técnica deve ser feita com critério. Primeiro, tem de se verificar o envelope de parâmetros que garanta o efeito real de queima do zinco para cada condição de soldagem (tipo e espessura de chapa). Em seguida, tem de se verificar se a eficiência da técnica se confirma para esta dada condição (o grau da eficácia do “burn-zinc” vai depender de várias variáveis presentes no processo, principalmente a espessura e tipo de galvanização das chapas a serem soldadas e do tempo entre o impulso para o “burn-zinc” e a soldagem propriamente dita). Os procedimentos experimentais para essas verificações, adotados pelo grupo Laprosolda da Universidade Federal de Uberlândia e descritos acima, têm mostrado ser simples e eficientes.

CAPÍTULO VI

DISCUSSÃO GERAL

Em estudos anteriores realizados no Laboratório para o Desenvolvimento de Processos de Soldagem (Laprosolda), pelo autor deste trabalho, notou-se a possibilidade da utilização da medição da resistência elétrica entre as chapas a serem soldadas em um possível sistema de controle para auto-regulagem dos parâmetros de soldagem em um equipamento de solda a ponto por resistência. A motivação para o presente trabalho é a confirmação desses resultados e o aprofundamento científico de suas bases.

O primeiro ponto a ser discutido neste capítulo são os parâmetros a serem utilizados para se fazer a medição da resistência elétrica do conjunto a ser soldado. No estudo anterior, verificou-se que a corrente ideal para ser utilizada foi de 1,2 kA, uma força de 1,4 kN (equivalente à 3,5 no equipamento de soldagem) e o tempo a ser utilizado não tinha sido definido. Após um estudo mais detalhado, realizado neste trabalho, chegou-se a conclusão de que um tempo de 4 ciclos é suficiente para ser utilizado na medição da resistência elétrica do conjunto de chapas ainda no tempo de pré-pressão. E que os dois primeiros ciclos devem ser eliminados dos cálculos por apresentarem grande instabilidade. Os resultados também mostraram que não se obtém vantagens ao se fazer esta medição muito após o 3º ciclo ou com tempo mais longo, ou seja, utilizar, por exemplo, os últimos ciclos do período (do 17º ao 25º ciclos). Não se obteve ganhos com este procedimento nem em relação a uma possível maior sensibilidade do sistema de medição e nem maior repetibilidade. Por isto, sugere-se usar a medição do 3º ao 6º ciclos do tempo de pré-pressão, sem afetar a produtividade do processo, já que para esse tempo são utilizados normalmente 25 ciclos, ou até mais dependendo da espessura ou tipo do material.

Outro ponto a ser discutido é o nível da corrente utilizada para se fazer a medição da resistência. Neste trabalho verificou-se que um valor de corrente de 1,2 kA, já definido em

trabalho anterior, é bastante adequado por ser um valor relativamente baixo para o processo de soldagem, mesmo para as chapas mais finas, não ocorre nenhuma transformação metalúrgica, muito menos fusão ou queima do material da chapa a ser soldada. Desta forma, não há interferência no acabamento da região aonde o ponto irá se formar, não interferindo no resultado final da solda. Além disto, não há aquecimento excessivo das chapas ao longo de suas espessuras, o que faria mudar em muito a resistência elétrica durante o período de medição.

Outra questão de fundamental importância estudada no presente trabalho foi a separação das regiões definidas por valores de resistência elétrica, tanto pela diferença de espessura das combinações entre chapas, como também pelo tipo de revestimento presente na superfície. Concluiu-se com as análises dos dados apresentados que existe uma tendência de que quando maior for a soma das espessuras das combinações de chapas a serem soldadas, maior será o valor da resistência elétrica do conjunto. Esse comportamento esta de acordo com a teoria de que quanto maior for a espessura, maior será a resistência à passagem da corrente. A outra tendência também apresentada no trabalho é que a comparação feita entre chapas galvanizadas e chapas sem galvanização mostrou que sempre as combinações entre chapas sem revestimento (não galvanizadas) apresentaram maiores valores de resistência elétrica quando comparadas na mesma faixa de espessura. Sendo que também ficou definida uma região intermediária quando fez-se a combinação entre uma chapa galvanizada com outra sem galvanização e por conseqüência a região com menor valor de resistência foi a de combinação entre chapas galvanizadas. Mais uma vez essa diferença pode ser associada ao menor valor de resistividade elétrica (ou maior condutividade elétrica, ver Fig. 5.1 do item 5.1) do zinco quando comparado ao do aço. Assim, a corrente consegue fluir mais facilmente quando se tem a presença do revestimento a base de zinco, apresentando uma região com menor valor de resistência.

A Fig. 6.1 mostra as regiões definidas por valor de resistência elétrica diferenciadas por tipo de revestimento da superfície das chapas, nota-se que as maiores resistências elétricas foram para as combinações entre chapas sem revestimento, variando de 0,36 μΩ para a menor espessura até 0,45 μΩ para a maior espessura das chapas. Já os valores mais baixos de resistência foram das combinações entre chapas galvanizadas, variando de 0,19 μΩ até 0,37 μΩ. Entre estas duas faixas de valores (região) encontra-se a combinação entre uma chapa sem revestimento com outra galvanizada, com um valor mínimo de 0,26 μΩ até 0,38 μΩ.

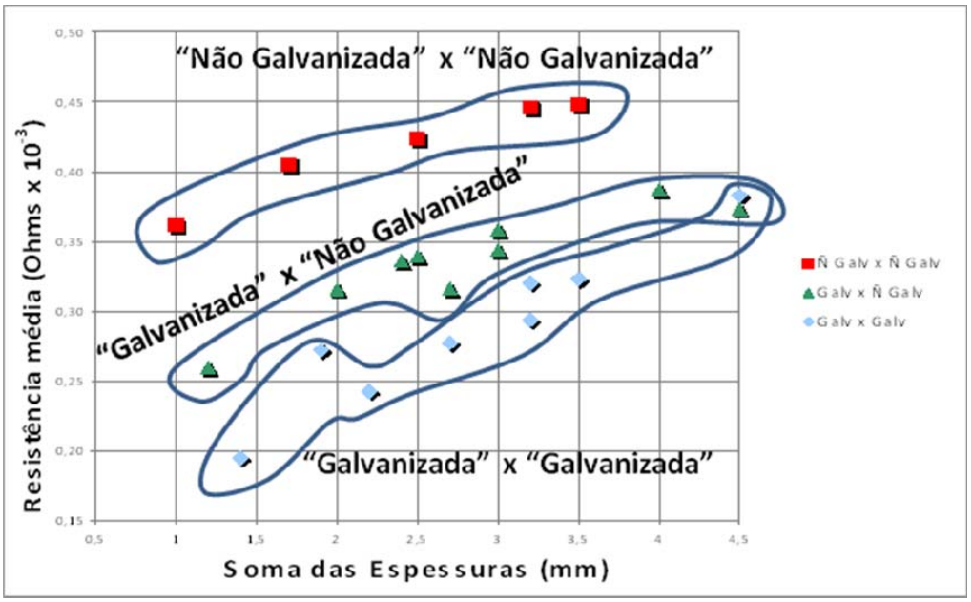


Figura 6.19 – Divisão dos grupos de chapas por tipo de revestimento

Outra análise foi realizada no trabalho levando-se em consideração os efeitos das condições superficiais que pode ser alteradas no chão de fábrica. No estudo em questão, foram comparadas a presença de uma camada fina de óleo e também a presença de uma camada de óxido formada nas chapas sem revestimento com a condição de chapas limpas. Concluiu-se que mesmo com a presença de óleo ou de óxidos entre as chapas a serem soldadas, ocorre uma pequena modificação nos valores de resistência medidos (maior diferença apresentada nas combinações entre chapas não galvanizadas), mas ainda assim ficam definidas as regiões por valor de resistência elétrica, sendo possível separá-las por grupos.

Por último foi estudada a técnica de "burn-zinc", por ser esta utilizada para soldar algumas combinações de chapas galvanizadas, porém, seus fundamentos e dados operacionais não são divulgados na literatura técnica. Verificou-se que realmente é possível a retirada do zinco bem na região aonde o ponto vai se formar. E que na verdade não acontece uma queima propriamente dita, mas sim um deslocamento de uma massa fundida para as laterais da região onde o eletrodo está posicionado e pressionando. Mas que para se conseguir este feito é necessário escolher os parâmetros adequados. Acredita-se que o procedimento apresentando para determinação dos parâmetros ótimos da utilização da técnica de "burn-zinc" no processo de soldagem a ponto por resistência para chapas galvanizadas seja eficiente e possa ajudar usuários a determinar a operacionalidade para se obter sucesso com esta técnica.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÃO

Após as análises dos dados apresentados no presente trabalho, foi possível concluir que é possível medir um parâmetro baseado na média da resistência elétrica e, com ele, separar em grupos combinações de chapas que formam uma junta para ser soldada a ponto por resistência. Para tal é preciso aplicar uma corrente baixa durante um curto tempo no período de pré-pressão.

Foi encontrado um indicativo de que para se obter este parâmetro de controle (resistência elétrica média do 3º ao 6º ciclo do tempo pré-pressão) não se pode usar correntes altas, pois o material iria sofrer alterações metalúrgicas, aqueceria demasiadamente e a resistividade do material sofreria alteração, assim, o valor de resistência elétrica não se manteria constante. A pressão a ser utilizada deve ser a mesma da realização da solda, evitando variação de pressão durante o processo e ainda pelo fato do controlador da fonte utilizada não permitir a entrada de dois valores de pressão em um mesmo impulso ou em mais de um impulso. Finalmente, foi demonstrado que o tempo de medição necessário é pequeno (4 ciclos são suficientes) e pode ser tomado bem no início do período de pré-carga, sem prejudicar a capacidade de produção do processo (não aumentaria o tempo normal para a realização de um ponto de solda). Deve-se, por outro lado, descartar medições dos dois primeiros ciclos, por serem muito instáveis.

Para as condições deste trabalho, definiram-se os seguintes parâmetros para a operação de determinação do parâmetro de controle:

- Corrente de 1,2 kA;
- Força de 1,4 kN (3,5 de regulagem na pressão do equipamento de soldagem utilizado);
- Tempo de seis ciclos, sendo os dois primeiros eliminados no cálculo.

Desta forma, foram apresentados os fundamentos para se criar um sistema de controle para a auto-regulagem dos parâmetros de soldagem em um equipamento de solda a ponto por resistência, baseado na medição da resistência elétrica do conjunto a ser soldado, sem aumentar qualquer tempo no processo de soldagem, já que a medição é feita no tempo de pré-pressão, podendo o sistema ser retroalimentado antes mesmo de se concluir esse período do processo de soldagem. Através desse procedimento as chapas podem ser identificadas em relação a sua espessura e tipo de revestimento, podendo ser criado um banco de dados com os parâmetros ótimos para cada grupo. Com isso, tem-se uma parametrização otimizada para cada ponto realizado, aumentando consideravelmente a qualidade da solda.

De uma forma mais específica quanto a operacionalidade do processo de solda a ponto por resistência elétrica, verificou-se que:

- Existe influência do efeito Joule ao longo da espessura da junta, pelo menos em baixas correntes, sobre a resistência elétrica da junta, o que faz aumentar a tensão de soldagem, mas com mais calor gerado em região indesejada para a soldagem (as chapas mais finas apresentam menores valores de resistência para um mesmo tipo de acabamento e parâmetro de controle);
- Existe influência do efeito do acabamento das chapas, pelo menos em baixas correntes, sobre a resistência elétrica da junta, o que faz aumentar a tensão de soldagem, mas com mais calor gerado nas regiões de contato, não necessariamente no contato chapa-chapa, não desejada para a soldagem (chapas galvanizadas apresentam valores de resistência menores quando comparadas com chapas galvanizada com outra sem galvanização e menor ainda do que com as chapas sem revestimento);
- A influência do efeito da condição da superfície, pelo menos em baixas correntes, sobre a resistência elétrica da junta, é muito pequena (presença de camada de óleo ou de óxido modificam apenas ligeiramente os valores de resistência elétrica), mostrando que este fator, pelo menos do ponto de vista de geração de calor nas regiões de contato chapa-chapa e chapa-eletrodo é insignificante (mas pode ser fator de contaminação e fragilização do ponto de solda, características não estudadas no presente trabalho).

CAPÍTULO VIII

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade nos estudos realizados neste trabalho, sugerem-se os seguintes assuntos:

- Repetir o procedimento apresentado no trabalho retirando o revestimento só de uma lado das combinações de chapa, ora no contato chapa-chapa, ora no contato chapa-eletrodo (só de um lado e os do dois), para verificar se o efeito da redução da resistência de contato é mais pronunciado no contato chapa-chapa ou nos contatos chapa-eletrodo;
- Repetir o procedimento apresentado no trabalho para um maior número de combinações de chapas. Com isso, aumentaria a faixa de espessuras analisadas abrangendo as possíveis combinações que a indústria automobilística utiliza no chão da fábrica;
- Repetir o procedimento apresentado no trabalho para diferentes tipos de materiais das chapas, pois, novas tecnologias são aplicadas para desenvolvimento de chapas mais resistentes e com diferentes características modificando a resistividade do material e por conseqüência os valores de resistência elétrica.
- Determinar um conjunto de parâmetros de soldagem (parametrização) para cada classe de resistência elétrica, obtida em conformidade com critérios de resistência mecânica e medidas de indentação e diâmetro do ponto soldado, e verificar se consegue soldar cada classe com este mesmo conjunto de parâmetros e, assim, simular o sistema de controle proposto.

CAPÍTULO IX

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANFAVEA – Anuário Estatístico - Anuário da Indústria Automobilística Brasileira <http://www.anfavea.com.br/anuario2007/Cap00_2007.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2007.

AWS. Welding Handbook. Vol. 2: Welding Process, 8º ed. International Standard Book Number: 0-87171-354-3. American Welding Society. 1998. 550 N. W. LeJeune Rd., P.O. Box 351040, Miami, FL 33135. 1998.

AWS/SAE D8.9M. Recommended Practices for Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials. International Standard Book Number: 0-87171-672-0. 2002. American Welding Society. 550 N. W. LeJeune Road, Miami, Florida 33126. Printed in the U.S.A. 2002.

BOSCH REXROTH, Apresentação sobre Soldagem MFDC, 2005, 20p.

BOTHFELD, R. IQR – Quality Regulation System for Spot Welding. In: IIW Annual Assembly and International Conference of International Institute of Welding, 58., 2005, Praga. Anais Rep. Tcheca: 2005. p.1-16.

BRANCO, H. L. O. X. Avaliação de capas de eletrodos utilizadas na soldagem por resistência de chapas galvanizadas automotivas. 2004.113f. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. 2004.

CHIEN, C. S. ; KANNATEY-ASIBU, E. Jr. Investigation of Monitoring System for Resistance Spot Welding. Welding Journal, USA, V.81, n.9, p.195s-199s, Sep. 2003.

CUNHA, F. ; SANTOS, G. C. ; SILVA, R. B. ; MACHADO, A. R. Metodologia para Medição de Potência de Corte (ativa) em Processo de Usinagem. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 4., 2006, Recife. Anais Recife: ABCM, 2006. p. 1-10.

DICKINSON, D. W.; FRANKLIN, J. E.; STANYA, A. Characterization of Spot Welding Behavior by Dynamic Electrical Parameter Monitoring, Welding Journal, USA, v. 59(6): p. 170-176, jun.1980.

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

GEDEON, S. A. ; SEHROCK, D. ; LAPOINTE, J. ; EAGAR, T. W. Metallurgical and Process Variable Affecting the Resistance Spot Weldability of Galvanized Sheet Stells. In: SAE Inc., 1984, USA. Anais Massachusetts : MIT, 1984. p. 1-9.

GEDEON, S. A.; SORENSEN, C. D.; ULRICH, K. T.; EAGAR, T. W. Measurement of Dynamic Eletrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welding. In: WRC Bulletin 322, Apr. 1987, USA. Welding Research Supplement , p.378s-385s. 1987.

GRUENZEL, R. Solda por Resistência com Média Freqüência: Benefícios e Campos de Aplicação. In: Congresso Nacional de Soldagem, 30. 2004, Rio de Janeiro. Anais Rio de Janeiro: ABS, 2004. p.1-13.

GUEDES, J. B. P. Uma Contribuição ao Estudo da Soldabilidade de Aços Galvanizados pelo Processo Solda a Ponto por Resistência. 2004. 125f. Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2004.

HIGASHI, E. M. Modelagem da Bobina de Rogowski para Medidas de Pulsos de Corrente Elétrica. 2006. 82f. Dissertação (Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais). Universidade Federal do Paraná, 2006.

KAISER, J. G. ; DUNN, G. J. ; EAGAR, T. W. The Effect of Electrical Resistance on Nugget Formation During Spot Welding. In: AWS Welding Research, 1982, USA. Anais USA: Supplement to the Welding Journal, 1982.

MACHADO, I. G. Soldagem & Técnicas conexas: Processos. 1ª Edição, Editora UFRGS Porto Alegre, 1996, 477p.

MATUSCHEK, U. ; POELL, K. Spot Welding With Adaptative Process Control. In: IIW Annual Assembly Meeting, Praga. Anais Rep. Tcheca:2005. p.1-19.

MatWeb – Material Property Data <http://www.matweb.com>. Acesso em: 18 Jul. 2007.

NASCIMENTO, A. S. ; BATISTA, M. A. ; NASCIMENTO, V. C. ; SCOTTI, A. Avaliação dos Métodos de Cálculo de Potência Elétrica em Soldagem a Arco e as Conseqüências sobre as Previsões Geométricas, Térmicas e Metalúrgicas da Junta. In: Congresso Nacional de Soldagem – CONSOLDA, 32., 2006, Anais Belo Horizonte: ABS, 2006. p. 1-13.

NASCIMENTO, V. C. Instalação e Desenvolvimento de Software para Controle da Placa de Aquisição NI PCI6036E – Aplicação em Soldagem por Resistência. Relatório Interno LAPROSOLDA/UFU 2/2003. Uberlândia, MG: UFU, 2004.

NASCIMENTO, V. C.; SCOTTI, A. Avaliação do Princípio de Auto-ajuste de Parâmetros de Soldagem a Ponto por Resistência, Baseado na Medição da Resistência Dinâmica. In: XXX Congresso Nacional de Soldagem, 2004, Rio de Janeiro. XXX Congresso Nacional de Soldagem. São paulo : ABS, 2004. v. CT6.

PODRŽAJ, P. ; KARIŽ, Z. The Influence of Welding Current Shape on Expulsion Occurrence during Resistance Spot Welding. In: Conference on the Joining of Materials & International Conference on Education in Welding, 12. 2005, Helsingϕr. Anais Denamark: 2005. p.1-5.

Portal do Governo do Estado de São Paulo - Indústria Automobilística <http://www.saopaulo.sp.gov.br/saopaulo/historia/ind_autom.htm>. Acesso em: 26 fev. 2007.

Relatório Interno - Indústria Automobilística Estabelece o Ritmo Para a Soldagem a Ponto de Novos Aços Galvanizados (relatório interno), 2007.

RWMA – Resistance Welding Manual, Resistance Welder Manufacturing Association. U.S.A., 4th Ed., Nov. 1989. 443 p.

SOLDAGEM INDUSTRIAL - 1ª PARTE - BREVE HISTÓRICO DA SOLDAGEM <http://www.mecatronicafacil.com.br/artigos/soldagem01/sold01.htm>. Acesso em: 27 fev. 2007.

TAN, W.; ZHOU, Y.; KERR, H. W.; LAWSON, S. A Study of Dynamic Resistance During Small Scale Resistance Spot Welding of Thin Ni Sheets. Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, 200 University Avenue W., Waterloo, Ontario, Canada N2L 3G1 Published 30 June 2004.

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. In: Soldagem & Inspeção, 2007. São Paulo, Vol. 12, No. 4, p.262-268, Out/Dez 2007.

VARGAS, J. E. Estudo da formação, geometria e Resistência do ponto na Soldagem por Resistência: Uma Abordagem Estatística. 2006. 164f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos). Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2006.

WOLFF, M. A. Avaliação das Espessuras das Camadas de Zinco das Chapas Galvanizadas a Serem Soldadas por Resistência a Ponto. Relatório Interno LAPROSOLDA/UFU. Uberlândia, MG: UFU, 2006.

WOLFF, M. A.; SCOTTI, A. Medidas da Variação de Temperatura Durante a Solda na Máquina de Soldagem a Pontos - LAPROSOLDA. Relatório Interno LAPROSOLDA/UFU 04/2005. Uberlândia, MG: UFU, 2005.

ANEXO 1

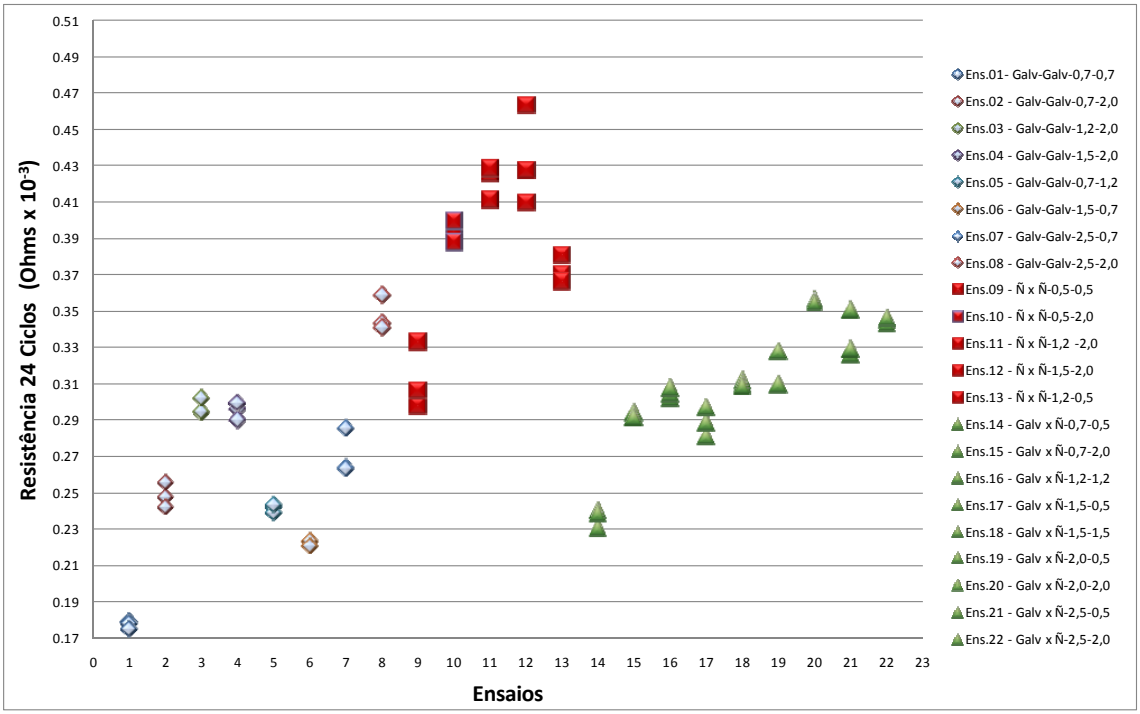


Figura A 1 – Valores de resistência dos ensaios (24 ciclos)

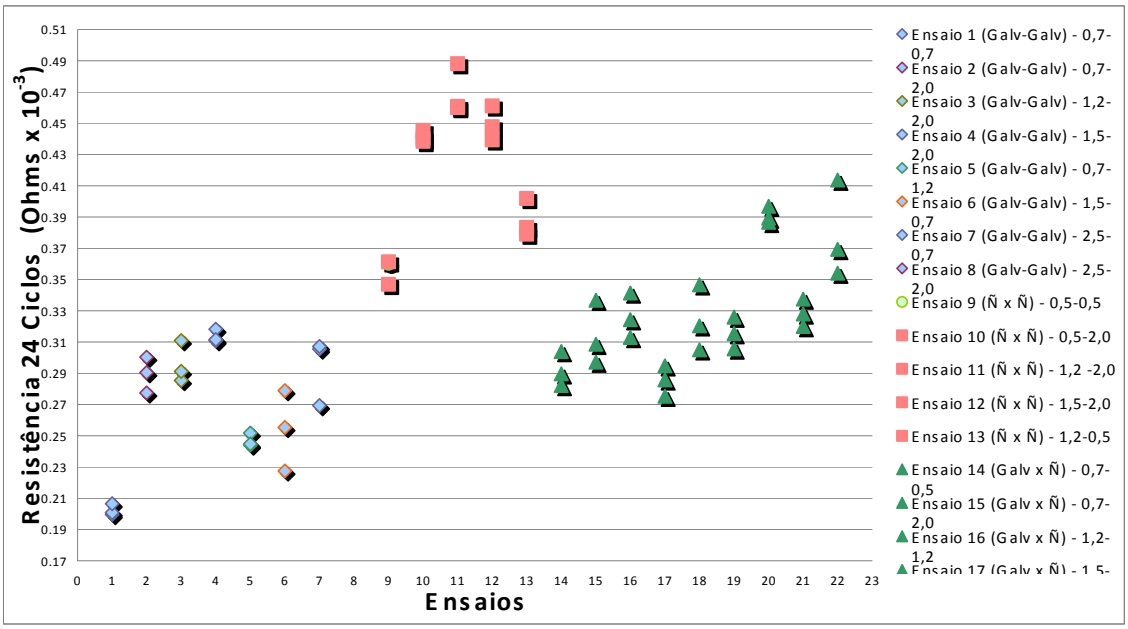


Figura A 2 – Valores de resistência dos ensaios com presença de óxido (24 ciclos)

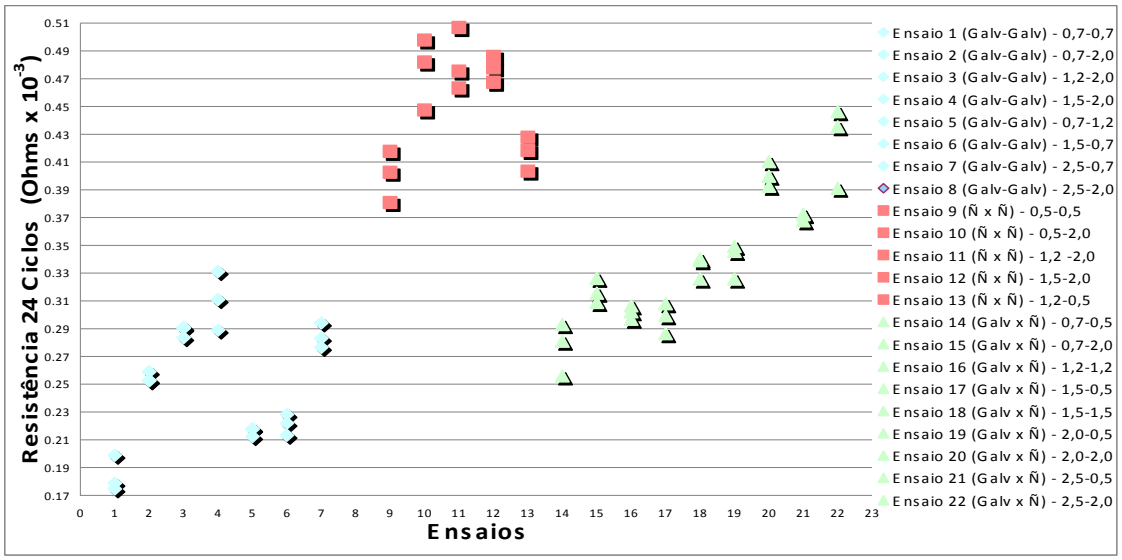


Figura A 3 – Valores de resistência dos ensaios com presença de óleo (24 ciclos)

Tabela A 1 – Dados experimentais com resistência elétrica calculada com 25 ciclos entre chapas “Galvanizadas” x “Galvanizadas”

Chapa Galvanizada x Galvanizada								
						25 ciclos		
Ensaio		**Chapa A (mm)**	**Chapa B (mm)**	**Corrente (A)**	**Tensão (V)**	**Resistência ($\Omega*10^{-3}$)**	**Média**	**Desv. Pad. 25 Ciclos**
E01-07-07	A	0.7	0.7	1215	0.2202	0.18106		
	B			1210	0.2186	0.18069	0.17983	0.00182
	C			1203	0.2136	0.17774		
E02-07-20	A	0.7	2.0	1169	0.2944	0.25205		
	B			1178	0.2907	0.24701	0.25283	0.00625
	C			1169	0.3029	0.25943		
E03-12-20	A	1.2	2.0	1152	0.3419	0.29695		
	B			1158	0.3464	0.29888	0.30043	0.00447
	C			1157	0.3537	0.30547		
E04-15-20	A	1.5	2.0	1168	0.3531	0.30239		
	B			1161	0.3426	0.29481	0.30014	0.00464
	C			1160	0.3520	0.30323		
E05-07-12	A	0.7	1.2	1182	0.2920	0.24692		
	B			1170	0.2841	0.24289	0.24613	0.00293
	C			1172	0.2911	0.24859		
E06-15-07	A	1.5	0.7	1176	0.2681	0.22822		
	B			1176	0.2680	0.22804	0.22639	0.00302
	C			1181	0.2630	0.22290		
E07-25-07	A	2.5	0.7	1166	0.3366	0.28834		
	B			1165	0.3100	0.26584	0.27328	0.01304
	C			1162	0.3092	0.26566		
E08-25-20	A	2.5	2.0	1150	0.3980	0.34566		
	B			1149	0.4164	0.36219	0.35059	0.01008
	C			1150	0.3963	0.34393		

Tabela A 2 – Dados experimentais com resistência elétrica calculada com 25 ciclos entre chapas “Não Galvanizadas” x “Não Galvanizadas”

Chapa Não Galvanizada x Não Galvanizada								
Ensaio						**25 ciclos**		
		Chapa A (mm)	**Chapa B (mm)**	**Corrente (A)**	**Tensão (V)**	**Resistência ($\Omega*10^{-3}$)**	**Média**	**Desv. Pad. 25 Ciclos**
E09-05-05	A	0.7	0.7	1158	0.3539	0.30530		
	B			1149	0.3938	0.34244	0.32044	0.01950
	C			1150	0.3611	0.31357		
E10-05-20	A	0.7	2.0	1148	0.4580	0.39885		
	B			1153	0.4672	0.40442	0.39875	0.00572
	C			1155	0.4544	0.39299		
E11-12-20	A	1.2	2.0	1156	0.4812	0.41552		
	B			1152	0.4960	0.42983	0.42605	0.00924
	C			1160	0.5025	0.43279		
E12-15-20	A	1.5	2.0	1154	0.4995	0.43236		
	B			1150	0.4761	0.41340	0.43788	0.02766
	C			1143	0.5349	0.46788		
E13-12-05	A	0.7	1.2	1142	0.4295	0.37571		
	B			1150	0.4290	0.37231	0.37850	0.00795
	C			1152	0.4472	0.38747		

Tabela A 3 – Dados experimentais com resistência elétrica calculada com 25 ciclos entre chapas “Galvanizadas” x “Não Galvanizadas”

Chapa Galvanizada x Não Galvanizada								
Ensaio						**25 ciclos**		
		Chapa A (mm)	**Chapa B (mm)**	**Corrente (A)**	**Tensão (V)**	**Resistência ($\Omega*10^{-3}$)**	**Média**	**Desv. Pad. 25 Ciclos**
E14-07-05	A	0.7	0.7	1190	0.2808	0.23526		
	B			1165	0.2861	0.24585	0.24157	0.00558
	C			1163	0.2830	0.24359		
E15-07-20	A	0.7	2.0	1150	0.3420	0.29747		
	B			1154	0.3446	0.29839	0.29703	0.00163
	C			1151	0.3401	0.29523		
E16-12-12	A	1.2	2.0	1155	0.3544	0.30646		
	B			1153	0.3568	0.30905	0.30915	0.00274
	C			1153	0.3599	0.31193		
E17-15-05	A	1.5	2.0	1157	0.3305	0.28533		
	B			1151	0.3379	0.29318	0.29054	0.00451
	C			1112	0.3343	0.29312		
E18-15-15	A	0.7	1.2	1152	0.3655	0.31704		
	B			1155	0.3638	0.31458	0.31485	0.00206
	C			1156	0.3622	0.31294		
E19-25-05	A	1.5	0.7	1112	0.3492	0.30836		
	B			1153	0.3835	0.33242	0.31827	0.01258
	C			1153	0.3625	0.31404		

E20-20-20	A	2.5	0.7	1153	0.4165	0.36117		
	B			1155	0.4162	0.35970	0.35812	0.00408
	C			1091	0.3930	0.35348		
E21-25-05	A	2.5	2.0	1153	0.4085	0.35375		
	B			1150	0.3802	0.33046	0.33902	0.01281
	C			1148	0.3825	0.33285		
E22-25-20	A	2.5	2.0	1152	0.4022	0.34870		
	B			1166	0.4050	0.34664	0.34830	0.00150
	C			1159	0.4058	0.34955		

Tabela A 4 – Resistências elétricas calculadas com 24 ciclos (eliminando-se o 1º) entre chapas “Galvanizadas” x “Galvanizadas”

Chapa Galvanizada x Galvanizada						
				24 ciclos		
Ensaio		**Chapa A (mm)**	**Chapa B (mm)**	**Resistência ($\Omega*10^{-3}$)**	**Média**	**Desv. Pad. 24 Ciclos**
E01-07-07	A	0.7	0.7	0.17873		
	B			0.17791	0.17714	0.00208
	C			0.17479		
E02-07-20	A	0.7	2.0	0.24777		
	B			0.24238	0.24865	0.00675
	C			0.25580		
E03-12-20	A	1.2	2.0	0.29391		
	B			0.29476	0.29694	0.00453
	C			0.30215		
E04-15-20	A	1.5	2.0	0.29622		
	B			0.29011	0.29527	0.00476
	C			0.29948		
E05-07-12	A	0.7	1.2	0.24225		
	B			0.23923	0.24167	0.00221
	C			0.24354		
E06-15-07	A	1.5	0.7	0.22360		
	B			0.22386	0.22260	0.00196
	C			0.22035		
E07-25-07	A	2.5	0.7	0.28548		
	B			0.26400	0.27098	0.01256
	C			0.26346		
E08-25-20	A	2.5	2.0	0.34331		
	B			0.35860	0.34762	0.00958
	C			0.34096		

Tabela A 5 – Resistências elétricas calculadas com 24 ciclos (eliminando-se o 1º) entre chapas “Não Galvanizadas” x “Não Galvanizadas”

Chapa Não Galvanizada x Não Galvanizada						
Ensaio				24 ciclos		
		Chapa A (mm)	Chapa B (mm)	Resistência ($\Omega*10^{-3}$)	Média	Desv. Pad. 24 Ciclos
E09-05-05	A	0.7	0.7	0.29801		
	B			0.33286	0.31238	0.01821
	C			0.30626		
E10-05-20	A	0.7	2.0	0.39337		
	B			0.39979	0.39376	0.00585
	C			0.38811		
E11-12-20	A	1.2	2.0	0.41163		
	B			0.42646	0.42232	0.00934
	C			0.42888		
E12-15-20	A	1.5	2.0	0.42773		
	B			0.41009	0.43377	0.02721
	C			0.46349		
E13-12-05	A	0.7	1.2	0.36984		
	B			0.36605	0.37223	0.00765
	C			0.38079		

Tabela A 6 – Resistências elétricas calculadas com 24 ciclos (eliminando-se o 1º) entre chapas “Galvanizadas” x “Não Galvanizadas”

Chapa Galvanizada x Não Galvanizada						
				24 ciclos		
Ensaio		Chapa A (mm)	Chapa B (mm)	Resistência ($\Omega*10^{-3}$)	Média	Desv. Pad. 24 Ciclos
E14-07-05	A	0.7	0.7	0.23090		
	B			0.24038	0.23673	0.00510
	C			0.23890		
E15-07-20	A	0.7	2.0	0.29431		
	B			0.29396	0.29320	0.00163
	C			0.29132		
E16-12-12	A	1.2	2.0	0.30221		
	B			0.30468	0.30483	0.00269
	C			0.30759		
E17-15-05	A	1.5	2.0	0.28104		
	B			0.28863	0.28887	0.00795
	C			0.29693		
E18-15-15	A	0.7	1.2	0.31191		
	B			0.31004	0.31017	0.00167
	C			0.30857		
E19-25-05	A	1.5	0.7	0.30916		
	B			0.32786	0.31557	0.01064
	C			0.30970		

E20-20-20	A	2.5	0.7	0.35652		
	B			0.35537	0.35550	0.00096
	C			0.35462		
E21-25-05	A	2.5	2.0	0.35035		
	B			0.32621	0.33512	0.01325
	C			0.32880		
E22-25-20	A	2.5	2.0	0.34514		
	B			0.34343	0.34494	0.00142
	C			0.34625		

Tabela A 7 – Resistências elétricas calculadas entre o 3º e 6º ciclos com chapas "Galvanizadas" x "Galvanizadas" limpas

Chapa *Limpa* Galvanizada x Galvanizada						
				3º ao 6º ciclos		
Ensaio		**Chapa A (mm)**	**Chapa B (mm)**	**Resistência ($\Omega*10^{-3}$)**	**Média**	**Desv. Pad. 3º ao 6º Ciclos**
E01-07-07	A	0.7	0.7	0.19698		
	B			0.19632	0.19478	0.00325
	C			0.19105		
E02-07-20	A	0.7	2.0	0.27854		
	B			0.27230	0.27729	0.00449
	C			0.28102		
E03-12-20	A	1.2	2.0	0.32449		
	B			0.31577	0.32035	0.00438
	C			0.32079		
E04-15-20	A	1.5	2.0	0.32633		
	B			0.31928	0.32321	0.00360
	C			0.32403		
E05-07-12	A	0.7	1.2	0.27254		
	B			0.26762	0.27213	0.00432
	C			0.27624		
E06-15-07	A	1.5	0.7	0.24511		
	B			0.24306	0.24255	0.00285
	C			0.23947		
E07-25-07	A	2.5	0.7	0.31214		
	B			0.27947	0.29369	0.01674
	C			0.28946		
E08-25-20	A	2.5	2.0	0.38019		
	B			0.39828	0.38292	0.01419
	C			0.37029		

Tabela A 8 – Resistências elétricas calculadas entre o 3º e 6º ciclos com chapas “Não Galvanizadas” x “Não Galvanizadas” limpas

Chapa *Limpa* Não Galvanizada x Não Galvanizada						
Ensaio				**3º ao 6º ciclos**		
		Chapa A (mm)	**Chapa B (mm)**	**Resistência ($\Omega*10^{-3}$)**	**Média**	**Desv. Pad. 3º ao 6º Ciclos**
E09-05-05	A	0.7	0.7	0.34480		
	B			0.38651	0.36170	0.02195
	C			0.35378		
E10-05-20	A	0.7	2.0	0.43520		
	B			0.42803	0.42367	0.01422
	C			0.40778		
E11-12-20	A	1.2	2.0	0.43082		
	B			0.45308	0.44611	0.01326
	C			0.45444		
E12-15-20	A	1.5	2.0	0.44587		
	B			0.42198	0.44822	0.02750
	C			0.47682		
E13-12-05	A	0.7	1.2	0.40935		
	B			0.39799	0.40504	0.00616
	C			0.40779		

Tabela A 9 – Resistências elétricas calculadas entre o 3º e 6º ciclos com chapas “Galvanizadas” x “Não Galvanizadas” limpas

Chapa *Limpa* Galvanizada x Não Galvanizada						
				3º ao 6º ciclos		
Ensaio		**Chapa A (mm)**	**Chapa B (mm)**	**Resistência ($\Omega*10^{-3}$)**	**Média**	**Desv. Pad. 3º ao 6º Ciclos**
E14-07-05	A	0.7	0.7	0.24815		
	B			0.26756	0.25966	0.01019
	C			0.26326		
E15-07-20	A	0.7	2.0	0.32097		
	B			0.31602	0.31625	0.00460
	C			0.31177		
E16-12-12	A	1.2	2.0	0.33171		
	B			0.33826	0.33610	0.00380
	C			0.33832		
E17-15-05	A	1.5	2.0	0.30468		
	B			0.31638	0.31579	0.01082
	C			0.32630		
E18-15-15	A	0.7	1.2	0.34390		
	B			0.34282	0.34383	0.00098
	C			0.34478		
E19-25-05	A	1.5	0.7	0.33387		
	B			0.35104	0.33946	0.01003
	C			0.33347		

E20-20-20	A	2.5	0.7	0.39331		
	B			0.38036	0.38715	0.00650
	C			0.38778		
E21-25-05	A	2.5	2.0	0.36881		
	B			0.35282	0.35837	0.00905
	C			0.35347		
E22-25-20	A	2.5	2.0	0.37206		
	B			0.36930	0.37306	0.00434
	C			0.37781		

Tabela A 10 – Resistências elétricas calculadas entre o 3º e 6º ciclos com chapas "Galvanizadas" x "Galvanizadas" com filme de óleo

Chapa Óleo Galvanizada x Galvanizada						
				3º ao 6º ciclos		
Ensaio		**Chapa A (mm)**	**Chapa B (mm)**	**Resistência ($\Omega*10^{-3}$)**	**Média**	**Desv. Pad. 3º ao 6º Ciclos**
E01-07-07	A	0.7	0.7	0.21438		
	B			0.18958	0.19698	0.01513
	C			0.18697		
E02-07-20	A	0.7	2.0	0.28686		
	B			0.27078	0.27706	0.00860
	C			0.27354		
E03-12-20	A	1.2	2.0	0.30342		
	B			0.34301	0.32245	0.01984
	C			0.32093		
E04-15-20	A	1.5	2.0	0.31924		
	B			0.30269	0.32740	0.02965
	C			0.36028		
E05-07-12	A	0.7	1.2	0.23635		
	B			0.22937	0.23307	0.00351
	C			0.23350		
E06-15-07	A	1.5	0.7	0.23360		
	B			0.24768	0.23957	0.00728
	C			0.23744		
E07-25-07	A	2.5	0.7	0.31329		
	B			0.30154	0.30334	0.00918
	C			0.29519		
E08-25-20	A	2.5	2.0	0.34668		
	B			0.42406	0.40034	0.04657
	C			0.43028		

Tabela A 11 – Resistências elétricas calculadas entre o 3º e 6º ciclos com chapas “Não Galvanizadas” x “Não Galvanizadas” com filme de óleo

Chapa *Óleo* Não Galvanizada x Não Galvanizada						
Ensaio				**3º ao 6º ciclos**		
		Chapa A (mm)	**Chapa B (mm)**	**Resistência ($\Omega*10^{-3}$)**	**Média**	**Desv. Pad. 3º ao 6º Ciclos**
E09-05-05	A	0.7	0.7	0.42541		
	B			0.44332	0.43728	0.01028
	C			0.44310		
E10-05-20	A	0.7	2.0	0.51263		
	B			0.46741	0.49878	0.02723
	C			0.51629		
E11-12-20	A	1.2	2.0	0.53490		
	B			0.47760	0.50568	0.02867
	C			0.50453		
E12-15-20	A	1.5	2.0	0.48283		
	B			0.49644	0.48405	0.01182
	C			0.47289		
E13-12-05	A	0.7	1.2	0.45279		
	B			0.42800	0.44851	0.01874
	C			0.46474		

Tabela A 12 – Resistências elétricas calculadas entre o 3º e 6º ciclos com chapas “Galvanizadas” x “Não Galvanizadas” com filme de óleo

Chapa *Óleo* Galvanizada x Não Galvanizada						
				3º ao 6º ciclos		
Ensaio		**Chapa A (mm)**	**Chapa B (mm)**	**Resistência ($\Omega*10^{-3}$)**	**Média**	**Desv. Pad. 3º ao 6º Ciclos**
E14-07-05	A	0.7	0.7	0.27019		
	B			0.32349	0.29698	0.02665
	C			0.29727		
E15-07-20	A	0.7	2.0	0.33637		
	B			0.32732	0.32962	0.00594
	C			0.32518		
E16-12-12	A	1.2	2.0	0.31666		
	B			0.32901	0.32251	0.00620
	C			0.32187		
E17-15-05	A	1.5	2.0	0.30498		
	B			0.31102	0.31293	0.00905
	C			0.32278		
E18-15-15	A	0.7	1.2	0.34403		
	B			0.35745	0.35334	0.00808
	C			0.35855		
E19-25-05	A	1.5	0.7	0.35357		
	B			0.37266	0.36815	0.01293
	C			0.37823		

E20-20-20	A	2.5	0.7	0.42468		
	B			0.46580	0.44467	0.02058
	C			0.44353		
E21-25-05	A	2.5	2.0	0.38116		
	B			0.38526	0.38559	0.00461
	C			0.39036		
E22-25-20	A	2.5	2.0	0.57956		
	B			0.41739	0.48120	0.08643
	C			0.44665		

Tabela A 13 – Resistências elétricas calculadas entre o 3º e 6º ciclos com chapas "Galvanizadas" x "Galvanizadas" com presença de óxido

Chapa Óxido Galvanizada x Galvanizada						
				3º ao 6º ciclos		
Ensaio		**Chapa A (mm)**	**Chapa B (mm)**	**Resistência ($\Omega*10^{-3}$)**	**Média**	**Desv. Pad. 3º ao 6º Ciclos**
E01-07-07	A	0.7	0.7	0.21473		
	B			0.21531	0.21727	0.00391
	C			0.22178		
E02-07-20	A	0.7	2.0	0.30758		
	B			0.31976	0.30517	0.01594
	C			0.28816		
E03-12-20	A	1.2	2.0	0.29985		
	B			0.32257	0.31021	0.01149
	C			0.30820		
E04-15-20	A	1.5	2.0	0.31924		
	B			0.32699	0.32099	0.00535
	C			0.31673		
E05-07-12	A	0.7	1.2	0.26977		
	B			0.26262	0.26546	0.00379
	C			0.26400		
E06-15-07	A	1.5	0.7	0.24615		
	B			0.30050	0.27554	0.02744
	C			0.27996		
E07-25-07	A	2.5	0.7	0.28071		
	B			0.34891	0.31880	0.03479
	C			0.32679		
E08-25-20	A	2.5	2.0	0.38935		
	B			0.58184	0.44028	0.12419
	C			0.34964		

Tabela A 14 – Resistências elétricas calculadas entre o 3º e 6º ciclos com chapas “Não Galvanizadas” x “Não Galvanizadas” com presença de óxido

Chapa *Óxido* Não Galvanizada x Não Galvanizada						
Ensaio				**3º ao 6º ciclos**		
		Chapa A (mm)	**Chapa B (mm)**	**Resistência ($\Omega*10^{-3}$)**	**Média**	**Desv. Pad. 3º ao 6º Ciclos**
E09-05-05	A	0.7	0.7	0.38319		
	B			0.31011	0.33955	0.03855
	C			0.32536		
E10-05-20	A	0.7	2.0	0.45290		
	B			0.46148	0.45486	0.00589
	C			0.45019		
E11-12-20	A	1.2	2.0	0.46803		
	B			0.47137	0.48174	0.02092
	C			0.50582		
E12-15-20	A	1.5	2.0	0.47372		
	B			0.46516	0.46562	0.00788
	C			0.45797		
E13-12-05	A	0.7	1.2	0.43781		
	B			0.40115	0.41723	0.01874
	C			0.41273		

Tabela A 15 – Resistências elétricas calculadas entre o 3º e 6º ciclos com chapas “Galvanizadas” x “Não Galvanizadas” com presença de óxido

Chapa *Óleo* Galvanizada x Não Galvanizada						
				3º ao 6º ciclos		
Ensaio		**Chapa A (mm)**	**Chapa B (mm)**	**Resistência ($\Omega*10^{-3}$)**	**Média**	**Desv. Pad. 3º ao 6º Ciclos**
E14-07-05	A	0.7	0.7	0.30436		
	B			0.31011	0.31328	0.01085
	C			0.32536		
E15-07-20	A	0.7	2.0	0.31085		
	B			0.35500	0.32919	0.02300
	C			0.32172		
E16-12-12	A	1.2	2.0	0.34822		
	B			0.35659	0.34103	0.02014
	C			0.31829		
E17-15-05	A	1.5	2.0	0.30629		
	B			0.29467	0.30207	0.00643
	C			0.30525		
E18-15-15	A	0.7	1.2	0.32870		
	B			0.38811	0.35308	0.03110
	C			0.34244		
E19-25-05	A	1.5	0.7	0.33031		
	B			0.32215	0.33089	0.00905
	C			0.34022		

E20-20-20	A	2.5	0.7	0.44009		
	B			0.40974	0.41955	0.01780
	C			0.40881		
E21-25-05	A	2.5	2.0	0.35445		
	B			0.32960	0.34293	0.01252
	C			0.34475		
E22-25-20	A	2.5	2.0	0.42723		
	B			0.39456	0.41485	0.01771
	C			0.42276		