

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DA FORMAÇÃO, GEOMETRIA E RESISTÊNCIA
DO PONTO NA SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA: UMA
ABORDAGEM ESTATÍSTICA**

JOSÉ ENRIQUE VARGAS AURES

ORIENTADOR: SADEK CRISOSTOMO ABSI ALFARO

CO-ORIENTADOR: LOURIEL OLIVEIRA VILARINHO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

PUBLICAÇÃO: DM-05/2006

BRASÍLIA/DF: MAIO – 2006

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA FORMAÇÃO, GEOMETRIA E RESISTÊNCIA DO
PONTO NA SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA: UMA ABORDAGEM
ESTATÍSTICA

JOSÉ ENRIQUE VARGAS AURES

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

APROVADA POR:

Prof. Sadek Crisostomo Absi Alfaro, PhD (ENM-UnB)
(Orientador)

Prof. Guilherme Caribé de Carvalho, PhD (ENM-UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Paulo José Modenesi, PhD (UFMG)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 05 DE MAIO DE 2006

FICHA CATALOGRÁFICA

VARGAS AURES, JOSÉ ENRIQUE

Estudo da Formação, Geometria e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistência: Uma Abordagem Estatística [Distrito Federal] 2006.

xxi, 143p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2006).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Solda por Resistência

2. Ciclo de solda

3. Chapas de aço galvanizado

4. Filmagem de alta velocidade

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VARGAS, JOSÉ ENRIQUE (2006). Estudo da Formação, Geometria e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistências: Uma Abordagem Estatística. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação: DM-05/2006, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 143p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: José Enrique Vargas Aures.

TÍTULO: Estudo da Formação, Geometria e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistência: Uma Abordagem Estatística.

GRAU: Mestre

ANO: 2006

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

José Enrique Vargas Aures
QNP 19 – Conj G – Casa 06 – P Norte.
72241807-Ceilândia – Brasília - Brasil.

Este trabalho está dedicado para:

- **Wendy e José: por que eles são o meu incentivo para continuar a luta do dia a dia.**
- **Meus Pais: Carmen e Enrique, pelo carinho, apoio e sacrifício.**
- **Meus Irmãos: Miriam, Ruth, Lucho e Migalitos que sempre estão ao meu lado.**

AGRADECIMENTOS

A Deus por me permitir ter o que eu tenho e por ter-me permitido chegar até aqui.

Vá meu agradecimento especial para o Professor Sadek, como orientador e como pessoa, Pela orientação acadêmica, pela ajuda e bons conselhos que evitaram que os momentos difíceis me fizeram fraquejar.

Meu maior agradecimento para o Professor Louriel Vilarinho, co-orientador deste trabalho, pelas orientações no desenvolvimento do mesmo, pela disposição sempre de ajudar e trabalhar, pela paciência que teve para me orientar, pela amizade mostrada.

Para o Professor Américo Scotti, de quem foi a idéia do tema da dissertação: “Análise pelo método da energia”. Por me dar a oportunidade de chegar a esta universidade, UFU, na modalidade de intercâmbio. Pelo exemplo de disposição ao trabalho, algo digno de elogiar, pelos conselhos e ajuda.

Para o Professor Valtair Ferrarese, pelos conselhos, dicas e ajuda que desde o inicio fizeram o trabalho ficar mais leve e descontraído.

Para os Professores da UnB, Guilherme Caribé e José Maurício, sempre dispostos a ajudar e guiar encaminhando nossos trabalhos.

A LAPROSOLDA, um grupo de pessoas com muito potencial, sempre trabalhando. A Clayton pela amizade e ajuda desde a minha chegada a este laboratório, um bom amigo. Aos alunos de IC: Marco António Wolff pela ajuda no desenvolvimento e realização do trabalho, na realização das verificações da máquina, dos ensaios e pelas dicas direcionadas a um melhor entendimento da máquina, a Daniel novo membro desta equipe. Para, Tiago Adriano, o “Engenheiro”, todos eles que de uma forma ou de outra fizeram que eu me sentisse em casa. Ao pessoal da oficina da UFU e todos aqueles que direta ou indiretamente ajudaram neste trabalho.

A GRAÇO laboratório onde há muitos amigos, sob a vigia do MARROCOS e onde cada um deles é tão importante quanto o outro.

Vá um agradecimento especial ao LABMOV e a sua equipe. Ao meu Professor: **Reynaldo Turquetti Filho** (IN MEMORIAN) pela ajuda prestada desde os meus inícios, pela oportunidade que de fazer parte dessa equipe, dessa família, meu agradecimento eterno. Ao Professor Itiro Iida, grande pessoa e orientador e ao Professor Walter Genary, pela compreensão em este meu trabalho. A Valéria, companheira de trabalho, boa amiga que com sua ajuda e desprendimento fez que este trabalho fosse terminado. A Vagner e Carolina, Isabel, Marco. Ao pessoal da oficina no bloco SG-9, bons amigos: Pereira, Arthur, Xavier, Carlão, Tharsis, Ricardo, Marção. Meus agradecimentos a todos eles.

RESUMO

ESTUDO DA FORMAÇÃO, GEOMETRIA E RESISTÊNCIA DO PONTO NA SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA: UMA ABORDAGEM ESTATÍSTICA.

Autor: José Enrique Vargas Aures

Orientador: Sadek C. Absi Alfaro

Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos

Brasília, Maio de 2006

O processo de Soldagem a Ponto por Resistência é largamente empregado na indústria automobilística, pois possui uma alta produtividade (mais de 30 pontos/minuto) e boa qualidade. Entretanto, a introdução de aços galvanizados nas linhas de produção trouxe dificuldades para o correto ajuste dos parâmetros de soldagem. Desta forma, este trabalho apresenta, numa primeira etapa, um estudo detalhado sobre a formação da lentilha de solda e a queima do revestimento utilizando-se uma câmera de filmagem em alta velocidade sincronizada com os sinais elétricos de tensão e corrente. Numa segunda etapa, é investigada, com uso de dois planejamentos experimentais, a influência de parâmetros do processo (Tempo de Subida, Tempo de Corrente, Tempo de Descida, Força do Eletrodo e Vazão de Água) na geometria (indentação e diâmetro) e resistência mecânica do ponto em chapas galvanizadas. Três diferentes configurações (espessuras) de chapas galvanizadas são utilizadas. Numa abordagem inédita, a análise neste trabalho será feita mantendo a mesma energia por unidade de resistência elétrica (energia específica) para cada configuração. São também confrontados os resultados de ambos os planejamentos (Planejamento Robusto – Taguchi e Planejamento Composto Central – PCC). O Taguchi fornece o ponto mais robusto de trabalho, enquanto que o PCC fornece um modelo de regressão que alimenta um algoritmo de otimização que fornece o ponto ótimo de trabalho para cada resposta analisada. Os resultados indicam que o principal parâmetro que afeta o processo é o Tempo de Corrente e em segundo plano a Força do Eletrodo. O Tempo de Subida tem influência na queima do revestimento. Os resultados apontaram na direção da literatura técnica que sugere usar um menor tempo de solda e maior nível de corrente. Pela comparação entre os resultados obtidos pelos dois planejamentos, os valores encontrados por ambas metodologias foram próximos, o que significa que o ponto ótimo de trabalho é também um ponto robusto, o que para a aplicação na indústria é extremamente interessante.

ABSTRACT

STUDY OF FORMATION, SHAPE AND STRENGTH OF THE SPOT IN RESISTANCE SPOT WELDING: A STATISTICAL APPROACH.

Autor: José Enrique Vargas Aures

Orientador: Sadek C. Absi Alfaro

Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos

Brasília, May of 2006

Resistance Spot Welding is largely used in the automotive industry due to its high production rates (over 30 spots/minute) and good quality. However, the introduction of galvanized plates on production lines has brought difficulties on the welding parameters setup. Thus, this work presents, as a first stage, a detailed study on the nugget formation and coating burning by using a high-speed camera synchronized with electrical signals. As the second stage, two experimental designs (Robust design – Taguchi and Central Composite Design – CCD) are used to assess the parameters influence (Upslope Time, Weld Time, Downslope Time, Electrode Time and Water Flow) on the spot geometry (indentation and diameter) and mechanical resistance. Three different galvanized plate configurations (different thicknesses) are used. These experimental designs are carried out in an original approach: the energy per electrical resistance unit (specific energy) is kept the same for each plate configuration. Also, the results from both designs are compared: the Taguchi ones provide the most robust point of work, whereas the CCD provides a regression model (empirical model) that feeds an optimization algorithm, which calculates the optimum point of work for each response. The results indicate that the main factor (welding parameter) is the Weld Time and the Electrode Force plays a secondary role. The Upslope Time influences the coating (zinc) burning. The results also confirmed the technical literature concerning the use of the lowest possible time and the highest possible current. The comparison between the two experimental designs suggests that both methodologies led to similar results, i.e., the optimum working point is also the most robust one, what is very important for industrial application.

RESUMEN

ESTUDIO DE LA FORMACIÓN, GEOMETRÍA Y RESISTENCIA DEL PUNTO EN SOLDADURA POR RESISTENCIA: UNA ABORDAJE ESTADÍSTICA.

Autor: José Enrique Vargas Aures

Orientador: Sadek C. Absi Alfaro

Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos

Brasília, Mayo de 2006

El proceso de soldadura a punto por resistencia es grandemente utilizado en la industria automovilística (más de 30 puntos/minuto), pues el proceso posee una alta productividad y buena calidad. Entretanto, la introducción de aceros galvanizados en la línea de producción trajo dificultades para el correcto ajuste de los parámetros de soldadura. De esta forma, este trabajo presenta, en una primera etapa, un estudio detallado sobre la formación del lente de soldadura y la quema del revestimiento utilizándose una cámara de filmación en alta velocidad sincronizada con las señales eléctricas de tensión e corriente. En una segunda etapa, es investigado, con el uso de planeamientos experimentales, la influencia de los parámetros del proceso (Tiempo de subida, Tiempo de Corriente, Tiempo de bajada, Fuerza del electrodo e Caudal de agua) en la geometría (profundidad y diámetro) y resistencia mecánica de los puntos en planchas galvanizadas. En un abordaje inédito, es mantenida la misma energía por unidad de resistencia eléctrica (energía específica) para cada configuración de planchas. También son confrontados los resultados de ambos planeamientos (Planeamiento Robusto – Taguchi e Planeamiento Compuesto Central – PCC). El Taguchi provee el punto mas robusto del trabajo, en cuanto que el PCC provee un modelo de regresión que alimenta un algoritmo de optimización que provee el punto óptimo de trabajo para cada desposta analizada. Los resultados indican que el principal parámetro que afecta el proceso es el Tiempo de corriente y en segundo plano la Fuerza del electrodo. El Tiempo de subida tiene influencia en la quema del revestimiento. Los resultados apuntan en la dirección de la literatura técnica que sugiere usar un menor tiempo de soldadura y mayor nivel de corriente. Por la comparación entre los resultados obtenidos por los dos planeamientos, los valores encontrados por ambas metodologías fueran próximos, lo que significa que el punto óptimo de trabajo es también un punto robusto, lo que para la aplicación en la industria es extremadamente interesante.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 - SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA.....	5
2.1.1 - Fundamentos do processo.....	5
2.1.2 -Vantagens e limitações	7
2.2 - MÁQUINAS DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA.....	7
2.3 - ELETRODOS	8
2.3.1 - Geometria dos eletrodos.....	10
2.3.2 - Materiais dos eletrodos	11
2.3.3 - Refrigeração dos eletrodos.....	12
2.4 - GERAÇÃO DE CALOR EM SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA... 	14
2.5 - PARÂMETROS DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA.....	16
2.5.1 - Corrente de soldagem.....	16
2.5.2 - Força do eletrodo	17
2.5.3 - Tempo de soldagem	17
2.5.4 - Resistência de contato	17
2.6 - EFEITOS DOS PARÂMETROS DE SOLDA NA GERAÇÃO DE CALOR	18
2.6.1 - Efeitos da corrente de soldagem.....	18
2.6.2 - Efeito do força do eletrodo.....	20
2.6.3 - Efeito dos parâmetros no ciclo de soldagem	21
2.6.3.1 - Tempo de compressão	21
2.6.3.2 - Tempo de soldagem.....	22
2.6.3.3 - Tempo de subida da corrente (Upslope).....	22
2.6.3.4 - Tempo de corrente máxima	23
2.6.3.5 - Tempo de descida da corrente (Downslope)	23
2.6.4 - Efeito do tempo de retenção	24
2.6.5 - Efeito do tempo de pausa ou intervalo	24
2.6.6 - Efeito da resistência de contato	25
2.7- OUTROS FATORES QUE INFLUENCIAM NA GERAÇÃO DE CALOR.....	25
2.7.1 - Condições da superfície do material base	25

2.7.2 - Influência dos eletrodos	26
2.7.3 - Dissipação do calor	26
2.7.4 - Influência da composição do metal	27
2.8 - PROBLEMAS OPERACIONAIS NA SOLDAGEM A PONTO	27
2.8.1 - Materiais e espessuras das chapas dissimilares	27
2.8.2 - Efeito Shunt.....	28
2.8.3 - Indentação	28
2.8.4 - Desalinhamento do eletrodo	29
2.9 - AÇOS GALVANIZADOS	30
2.9.1 - Processos de Galvanização.....	30
2.9.2 - Soldabilidade por solda a ponto de chapas galvanizadas	31
2.10 - CONTROLE DE QUALIDADE DA SOLDA	33
2.11 - MÉTODOS PARA AVALIAR A QUALIDADE DA SOLDA.....	34
2.11.1 - Inspeção Visual	35
2.11.2 - Ensaaios não destrutivos	35
2.11.3 - Ensaaios destrutivos	36
2.11.3.1 - Teste por tensão cisalhante.....	36
2.11.3.2 - Teste por tração axial	38
2.11.3.3 - Teste de torção.....	39
2.11.3.4 - Teste de arrancamento	39
2.11.3.5 - Teste metalográfico	39
2.12 - PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	40
2.12.1 - Planejamento Robusto (Taguchi).....	40
2.12.2 - Planejamento Composto Central (PCC)	42
2.12.3 - Otimização.....	43
3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	45
3.1 - MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	45
3.1.1 - Máquina de soldagem a ponto.....	45
3.1.2 - Chapas de teste	46
3.1.3 - Sistema de fixação.....	47
3.1.4 - Sistema de aquisição e monitoração dos parâmetros de soldagem.....	48
3.1.4.1 - Sistema de monitoração dos parâmetros	49

3.1.4.2 - Sensores de monitoração	50
3.1.5 - Limitações da máquina de soldagem	52
3.2 - TESTES PRELIMINARES	52
3.2.1 - Calibrações	52
3.2.1.1 - Sistema de refrigeração	52
3.2.1.2 - Sistema de força	53
3.2.1.3 - Sistema de aquisição de dados	55
3.2.1.4 - Verificação do número de ciclos no sistema de aquisição e no controlador de solda	56
3.2.2 - Desalinhamento dos eletrodos	60
3.2.3 - Envelopes operacionais	61
3.2.4 - Filmagem de alta velocidade (queima do revestimento)	64
3.3- PROPOSIÇÃO DO MÉTODO DA ENERGIA ESPECÍFICA.....	73
3.3.1 - O que é Energia Específica (em função da espessura da chapa).....	73
3.3.2 - Modelamento matemático (demonstração da Energia)	74
3.3.3 - Valor Irms no processo e no terminal de programação.....	76
3.3.4- Cálculo do Fcorr	77
3.3.5- Testes Irms utilizando o Fcorr	78
3.4 - PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO	79
3.4.1 - Definição de Parâmetros.....	80
3.4.2 - Planejamento Robusto (Taguchi).....	80
3.4.3 - Planejamento Composto Central - PCC.....	82
3.4.4 - Valores das Energias a utilizar em cada configuração de chapa	84
3.4.5 - Otimização do modelo de regressão (empírico) do PCC	86
3.5 - METODOLOGIA E CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS.....	87
3.5.1 - Profundidade de indentação	88
3.5.2 - Diâmetro da indentação	89
3.5.3 - Testes de resistência	90
3.5.4 - Testes de Cizalhamento/Rasgamento	91
3.5.5 - Testes de Tração/Rasgamento	92
3.5.6- Medição dos pontos de solda após testes de arrancamento	94
4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	95
4.1 - INDENTAÇÃO	96

4.1.1 - Configuração A (TAGUCHI x PCC).....	97
4.1.2 - Configuração B (TAGUCHI x PCC).....	103
4.1.3 - Configuração C (TAGUCHI x PCC).....	106
4.2 - DIÂMETRO DO PONTO	109
4.2.1 - Configuração A (TAGUCHI x PCC).....	110
4.2.2 - Configuração B (TAGUCHI x PCC).....	114
4.2.3 - Configuração C (TAGUCHI x PCC).....	117
4.3 - RESISTÊNCIA MECÂNICA	120
4.3.1 - Configuração A (TAGUCHI x PCC).....	121
4.3.2 - Configuração B (TAGUCHI x PCC).....	125
4.3.3 - Configuração C (TAGUCHI x PCC).....	129
4.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	132
5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	134
6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	136
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
APÊNDICES	141
A – TABELAS COM OS VALORES CODIFICADOS DAS VARIÁVEIS DOS PLANEJAMENTOS: MÉTODO TAGUCHI E PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL (PCC).....	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades físicas dos materiais da RWMA	12
Tabela 2.2 – Dimensões dos corpos de prova para teste de tensão cizalhante	37
Tabela 3.1 – Composição química das chapas de aço galvanizado.....	47
Tabela 3.2 - Valores de força ajustadas no controlador e valores de força obtidos pelo dinamômetro para a pinça pneumática	54
Tabela 3.3 – Resultados dos ensaios para a construção dos 3 envelopes ($I_s - F_{el}$).....	63
Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios para a construção dos 3 envelopes ($I_s - T_s$).	63
Tabela 3.5 – Valores das 5 condições selecionadas dos envelopes operacionais. O valor V_{rms} foi medido pelo sistema de aquisição. Todas as corridas foram de $T_s =$ 30 ciclos e 4,5 kN.	67
Tabela 3.6 – Resultado dos testes da I_{rms}	79
Tabela 3.7 – Planejamento robusto (Taguchi) L'16 utilizado.....	81
Tabela 3.8 – Planejamento PCC $2^{(5-1)}$ usado	82
Tabela 3.9 – Tabela com os valores das correntes a serem ajustadas para o Taguchi	85
Tabela 3.10 – Tabela com os valores das correntes a serem ajustadas para o PCC.....	85
Tabela 4.1 – Resultados das medições da profundidade de indentação para o Planejamento Robusto (Taguchi) para as três configurações de chapas.....	96
Tabela 4.2 – Resultados das medições da profundidade de indentação para o PCC para as três configurações de chapa.....	97
Tabela 4.3 – Modelo de regressão encontrado pelo PCC para a indentação na chapa A.....	99
Tabela 4.4 – Compilação dos resultados para a indentação na chapa A.....	102
Tabela 4.5 – Modelo de regressão encontrado pelo PCC para a indentação na chapa B.....	104
Tabela 4.6 – Compilação dos resultados para a indentação na chapa B.....	106
Tabela 4.7 – Modelo de regressão encontrado pelo PCC para a indentação na chapa C.....	107
Tabela 4.8 – Compilação dos resultados para a indentação na chapa C.....	109
Tabela 4.9 – Resultados das medições do diâmetro do ponto para o Planejamento Robusto (Taguchi) para as três configurações de chapa.....	109
Tabela 4.10 – Resultados das medições do diâmetro do ponto para o PCC para as três configurações de chapa.....	110
Tabela 4.11 – Modelo de regressão encontrado pelo PCC para o diâmetro do ponto na chapa A.....	112

Tabela 4.12 – Compilação dos resultados para o diâmetro do ponto na chapa A.....	114
Tabela 4.13 – Modelo de regressão encontrado pelo PCC para o diâmetro do ponto na chapa B.....	115
Tabela 4.14 – Compilação dos resultados para o diâmetro do ponto na chapa B.....	117
Tabela 4.15 – Modelo de regressão encontrado pelo PCC para o diâmetro do ponto na chapa C.....	118
Tabela 4.16 – Compilação dos resultados para o diâmetro do ponto na chapa C.....	120
Tabela 4.17 – Resultados das medições de resistência mecânica para o Planejamento Robusto (Taguchi) para as três configurações de chapa.....	120
Tabela 4.18 – Resultados das medições de resistência mecânica para o PCC para as três configurações de chapa.....	121
Tabela 4.19 – Modelo de regressão encontrado pelo PCC para a resistência mecânica na chapa A.....	123
Tabela 4.20 – Compilação dos resultados para a resistência mecânica do ponto na chapa A.....	125
Tabela 4.21 – Modelo de regressão encontrado pelo PCC para a resistência mecânica na chapa B.....	126
Tabela 4.22 – Compilação dos resultados para a resistência mecânica do ponto na chapa B.....	128
Tabela 4.23 – Modelo de regressão encontrado pelo PCC para a resistência mecânica na chapa C.....	130
Tabela 4.24 – Compilação dos resultados para a resistência mecânica do ponto na chapa C.....	132
Tabela 4.25 – Compilação final dos resultados com os fatores e interações estatisticamente significativos.....	133
Tabela A1 – Valores codificados das variáveis para o método TAGUCHI.....	142
Tabela A2 – Valores codificados das variáveis para o PCC.....	143

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Representação esquemática do trabalho	3
Figura 2.1 - Ciclo de solda.	6
Figura 2.2 - Corte transversal de uma junta de solda a ponto por resistência	6
Figura 2.3 - Temperaturas instantâneas estimadas de soldagem a ponto em Graus Celsius no instante de finalização da solda.	9
Figura 2.4 - Tipos de eletrodos mais utilizados em soldagem a ponto.....	10
Figura 2.5 - Sistemas de refrigeração do eletrodo.	13
Figura 2.6 - Pontos principais de calor nos eletrodos e gradiente de temperatura após 20% do tempo de soldagem e no final do processo.	15
Figura 2.7 - Ciclo de solda básico em solda a ponto	18
Figura 2.8 - Curva de soldabilidade.	20
Figura 2.9 - Esquema do efeito Shunt.	28
Figura 2.10 - Efeitos dos Upslope e Downslope na soldabilidade em um tipo de aço.....	33
Figura 2.11 - Teste por tensão cisalhante.	36
Figura 2.12 - Tipos de falha em teste de resistência ao cisalhamento como função da rotação do corpo de prova..	37
Figura 2.13 - Formato do corpo de prova utilizado no teste de tração axial.	38
Figura 2.14 - Rotina de testes para arrancamento.	39
Figura 3.1- Pinça de soldagem.	46
Figura 3.2 - Sistemas e acessórios da máquina de soldagem: Controlador de solda, Transformador, Sistema pneumático, sistema de refrigeração, Chave geral, Cabeamento	46
Figura 3.3 - Marcação do ponto onde a solda será feita.....	47
Figura 3.4- Sistema de fixação e o isolamento das chapas para evitar o efeito "Shunt".....	48
Figura 3.5 - Centralização da chapa no momento da solda.	48
Figura 3.6 - Tela do "Fazer_aquisição.avi".	49
Figura 3.7 - Tela do "Visualizador_de_dados.avi".....	50
Figura 3.8 - Terminal da Placa de aquisição A/D PCI 6036 da National Instruments.....	51
Figura 3.9 - Sensores de: Corrente (Toróide) e Tensão.....	51
Figura 3.10 - Rotina para integração do sinal de corrente.....	52

Figura 3.11 - Sequência de calibração do sistema de força da pinça	55
Figura 3.12 - Curva de calibração do sistema de força da pinça da máquina	55
Figura 3.13 - Quantidade de pulsos adquiridos no sistema de aquisição de acordo com a quantidade de pulsos inseridos no terminal de programação. (S_Up:04- Sold:08-S_Dw:01).....	57
Figura 3.14 - T _{BZ} :4 - S_Up:04 - S_Dw:02.	57
Figura 3.15 - Contagem de ciclos para uma corrente I _{rms} = 6kA, onde T _{sub} = 10 ciclos; T _{cor} = 13 ciclos; T _{des} = 7 ciclos; T _{total} = 30 ciclos. Neste caso ajustou-se T _s = 30 ciclos no controlador, ou seja o T _s ajustado engloba o tempo de subida de corrente e de descida.....	58
Figura 3.16 - Variação dos valores rms para cada ciclo.....	59
Figura 3.17- Valores rms para cada ciclo de corrente, tensão e resistência elétrica	59
Figura 3.18 - FFT do sinal de corrente mostrando as frequências de 60, 180, 300 e 420 Hz ..	60
Figura 3.19 - Marcas deixadas pelo desalinhamento das pinças a) Inferior e b) Superior	61
Figura 3.20 - Faísca ou expulsão do material.....	62
Figura 3.21 - Expulsão do material e exagerada indentação	62
Figura 3.22 - Envelopes operacionais para os parâmetros (Fel - Irms) e (Ts - Irms).....	64
Figura 3.23 - Equipamento experimental para filmagem de alta velocidade	65
Figura 3.24 - a) Localização das chapas e eletrodos para o procedimento de solda e b) Aspectos geométricos da comparação entre uma situação real e o da visualização	66
Figura 3.25 - Capas de eletrodos cortadas.....	66
Figura 3.26 - Ponto comum dos envelopes operacionais encontrados.....	67
Figura 3.27 - Imagens de alta velocidade sincronizadas com sinais elétricos para a corrida 4735 (esquerda) e 4736 (direita).....	70
Figura 3.28 - Imagens de alta velocidade sincronizadas com sinais elétricos para a corrida 4737 (esquerda) e 4739 (direita).....	71
Figura 3.29 - Imagens de alta velocidade sincronizadas com sinais elétricos para a corrida 4740	72
Figura 3.30 - Ensaio com T _{sub} = T _{des} = 0	76
Figura 3.31 - Ensaio para valores diferentes de T _{sub} , T _{des} e T _{cor}	77
Figura 3.32 - Relação entre os tempos de subida, corrente e descida	77
Figura 3.33- Chapas codificadas segundo características das corridas	84
Figura 3.34 - Listagem do programa otimiz.m	86

Figura 3.35 - Listagem da função funcaominimizar.m	87
Figura 3.36- Posição e solda das chapas	88
Figura 3.37 - Corpos de prova para os testes de tração/rasgamento e cizalhamento/rasgamento	88
Figura 3.38 - Medição da profundidade da indentação 1	89
Figura 3.39- Medição da profundidade da indentação 2	89
Figura 3.40 - Equipamento para medição do diâmetro do ponto de solda	90
Figura 3.41 - Medição do diâmetro de indentação	90
Figura 3.42 - Equipamento utilizado nos testes de resistência	91
Figura 3.43 - Esquemas dos problemas ocorridos nos ensaios Cizalhamento/Rasgamento (A) e (B) e o ensaio de Tração/Rasgamento (C)	92
Figura 3.44 - Problemas no ensaio Cizalhamento/Rasgamento	92
Figura 3.45 - Realização do ensaio de Tração/Rasgamento	92
Figura 3.46 - Fim do ensaio com rasgamento da chapa, no caso de ponto de solda resistente	93
Figura 3.47 - Gráfico mostrando pontos de máxima força de resistência das chapas.....	93
Figura 3.48 - Medições dos pontos de solda sem fratura A e B e com fratura C	94
Figura 4.1 - Sistemática de apresentação dos resultados.....	95
Figura 4.2 - Efeito dos fatores sobre a indentação da configuração A para o Taguchi	98
Figura 4.3 - Gráfico de probabilidade normal para a indentação na chapa A.	100
Figura 4.4 - Valores observados versus preditos para a indentação na chapa A.....	100
Figura 4.5 - Gráfico de resíduos para a indentação na chapa A.	101
Figura 4.6 - Efeito dos fatores sobre a indentação da configuração B para o Taguchi.	103
Figura 4.7 - Gráfico de probabilidade normal para a indentação na chapa B	104
Figura 4.8 - Valores observados versus preditos para a indentação na chapa B.	105
Figura 4.9 - Gráfico de resíduos para a indentação na chapa B.	105
Figura 4.10 - Efeito dos fatores sobre a indentação da configuração C para o Taguchi	106
Figura 4.11 - Gráfico de probabilidade normal para a indentação na chapa C	107
Figura 4.12 - Valores observados versus preditos para a indentação na chapa C.	108
Figura 4.13 - Gráfico de resíduos para a indentação na chapa C.	108
Figura 4.14 - Efeito dos fatores sobre o diâmetro do ponto para a chapa A para o Taguchi.	111
Figura 4.15 - Gráfico de probabilidade normal para o diâmetro do ponto na chapa A.....	112
Figura 4.16 - Valores observados versus preditos para o diâmetro na chapa A.....	113
Figura 4.17 - Gráfico de resíduos para o diâmetro no ponto na chapa A.....	113

Figura 4.18 - Efeito dos fatores sobre o diâmetro do ponto para a configuração B para o Taguchi.....	114
Figura 4.19 - Gráfico de probabilidade normal para o diâmetro do ponto na chapa B.....	115
Figura 4.20 - Valores observados versus preditos para o diâmetro no ponto na chapa B.....	116
Figura 4.21 - Gráfico de resíduos para o diâmetro do ponto na chapa B.....	116
Figura 4.22 - Efeito sobre o diâmetro do ponto para a configuração C no Taguchi.....	117
Figura 4.23 - Gráfico de probabilidade normal para o diâmetro do ponto na chapa C.....	118
Figura 4.24 - Valores observados versus preditos para o diâmetro do ponto na chapa C.....	119
Figura 4.25 - Gráfico de resíduos para o diâmetro do ponto na chapa C.....	119
Figura 4.26 - Efeito sobre a resistência mecânica para a configuração A do Taguchi.....	122
Figura 4.27 - Gráfico de probabilidade normal para a resistência mecânica do ponto na chapa A.....	123
Figura 4.28 - Valores observados versus preditos para a resistência mecânica do ponto na chapa A.....	124
Figura 4.29 - Gráfico de resíduos para a resistência mecânica do ponto na chapa A.....	124
Figura 4.30 - Efeito dos fatores sobre a resistência mecânica para a configuração B para o Taguchi.....	125
Figura 4.31 - Gráfico de probabilidade normal para a resistência mecânica da chapa B.....	127
Figura 4.32 - Valores observados versus preditos para a resistência mecânica da chapa B.....	127
Figura 4.33 - Gráfico de resíduos para a resistência mecânica do ponto na chapa B.....	128
Figura 4.34 - Efeito dos fatores sobre a resistência mecânica para a configuração C para o Taguchi.....	129
Figura 4.35 - Gráfico de probabilidade normal para a resistência mecânica do ponto na chapa C.....	130
Figura 4.36 - Valores observados versus preditos para a resistência mecânica do ponto na chapa C.....	131
Figura 4.37 - Gráfico de resíduos para a resistência mecânica do ponto na chapa C.....	131

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Amper
AC	Corrente Alternada.
° C	Graus Centígrados.
DC	Corrente Continua
D_{el}	Diâmetro do eletrodo.
E	Energia total;
Enc	Tempo de encostamento
E_{esp}	Energia específica;
Fcorr	Fator de correção
g	gramas
Hz	Hertz
IACS	International Annealed Cooper Standard.
I_{ajust}	Corrente ajustada
I_{rms}	Corrente eficaz;
l	Litros
J	Joule
L	Longitude do material no qual se vá medir a resistência.
M	Mega (10^6)
Min	minuto
Pa	Pascal
P_{re}	Tempo de pré-pressão.
R	Resistencia do material.
Ret	Tempo de retenção
rms	root mean square
RWMA	Resistance Welder Manufacturer's Association
s	Segundos
S_{Up}	Rampa de subida da corrente dentro do tempo de solda.
S_{Dw}	Rampa de descida da corrente dentro do tempo de solda.
t	Espessura da chapa
T_{BZ}	Tempo de Burn Zinc.
T_{cor}	Tempo de corrente (máxima)
T_{des}	Tempo de descida

Ts	Tempo de solda, incluído S_Up e S_Dw.
TWI	Technology Welding Institute
V	Volts
Vaz	Vazamento da água.
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
ΔT	Incremento de temperatura.
μ	micro (10^{-3})
Ω	Ohm
ρ	Coefficiente de resistividade de um material.

1 – INTRODUÇÃO

A Soldagem a Ponto por Resistência (RSW) é um dos processos de fabricação mais utilizados na indústria automobilística. Neste processo, chapas metálicas são unidas pelo coalescimento de pontos de solda a partir da fusão localizada devido ao calor gerado pela resistência do material à passagem de corrente elétrica (Efeito Joule) sob pressão dos eletrodos. A solda a ponto é um processo para soldar chapas finas, de alta confiabilidade, muito rápido de ser executado, sem adição de metal e não necessita alto grau de experiência do operador.

Visando melhorar o produto, a indústria automobilística tem introduzido materiais alternativos como plásticos, compósitos e alumínio com a idéia de diminuir o peso e custo no produto final. O material da chapa normalmente empregado é o aço comum ao carbono. Entretanto, nos últimos anos o aço galvanizado tem sido utilizado devido à sua maior resistência à corrosão. Esta inovação da indústria trouxe dificuldades para atingir a qualidade do processo, como o correto ajuste dos parâmetros de soldagem e do processo como a influência do revestimento e sua espessura na formação e resistência do ponto, na vida útil do equipamento, em especial o eletrodo, na robustez do produto, etc. Todas estas variações demandam atualizações e/ou melhorias na tecnologia para melhorar o produto, o que, por sua vez, demanda novas linhas de pesquisa.

Melhorias tecnológicas têm sido implantadas nas máquinas de soldagem a ponto: novas fontes controladas eletronicamente; transformadores que trabalham com altas frequências com o intuito de diminuir o tamanho e o peso deles, visando poupar energia, e com maior potência; transformadores que estão sendo colocados nos braços dos robôs, na automação, o que poupa o uso de cabos no circuito secundário eliminando problemas na indutância devido à alta corrente transportada; melhores sistemas de controle de força, etc.

Uma outra abordagem para melhorar a qualidade do ponto de solda é controlar os parâmetros de soldagem, 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. Diferentes pesquisadores (Dickinson et al., 1980; Kaiser, et al., 1982 e mais recentemente Cho & Rhee, 2003) têm focado seus

esforços na análise, monitoramento e melhoria dos mecanismos de formação da lentilha de solda sob diferentes condições, parâmetros e materiais, visando um entendimento do sentido físico da resistência dinâmica e do mecanismo de formação da lentilha, e, conseqüentemente, otimizar o processo de soldagem.

Desta forma, é proposto estudar neste trabalho o mecanismo de formação da lentilha utilizando-se filmagem em alta velocidade sincronizada com sinais de corrente e tensão e, a partir dos resultados desta primeira etapa, verificar, com auxílio de planejamentos experimentais, a influência de parâmetros do processo na geometria e resistência mecânica do ponto em chapas galvanizadas. Para cumprir este objetivo global, que consta de duas etapas, alguns objetivos específicos devem ser atingidos:

- Executar ensaios preliminares para encontrar “envelopes de trabalho” adequados para três combinações de espessura de chapas a serem utilizadas no trabalho;
- Compreender o fenômeno de formação, crescimento e desenvolvimento da lente de solda com auxílio de filmagens em alta velocidade sincronizada com sinais elétricos. Neste item, deve-se verificar também a queima do revestimento galvanizado da chapa;
- Propor e executar dois planejamentos experimentais (Planejamento Robusto - Taguchi e Planejamento Composto Central - PCC) de forma a reduzir o número de ensaios e garantir a confiabilidade estatística. Com estes planejamentos pretende-se verificar a influência de parâmetros do processo (Tempo de Subida - T_{sub} , Tempo de Corrente - T_{cor} , Tempo de Descida - T_{des} , Força do Eletrodo - F_{el} e Vazão de água - V_{az}) sobre a geometria (indentação e diâmetro) e resistência mecânica do ponto;
- Confrontar os resultados advindos de cada planejamento, numa abordagem inédita: O Taguchi deve fornecer um conjunto de parâmetros para uma dada resposta, denominado de ponto robusto de trabalho. O PCC deve fornecer um modelo de regressão (empírico) que será utilizado em um algoritmo de otimização de forma a fornecer um ponto ótimo de trabalho. Ao fim, devem-se comparar estas duas abordagens: robustez versus otimização. Para melhor entendimento, a figura 1.1 procura ilustrar esquematicamente a abordagem proposta;

Ressalta-se que para se utilizar os planejamentos, um enfoque diferente dos tradicionais será utilizado: o método da energia específica. Diferentemente de outros autores, que

utilizam a corrente como um fator do planejamento, neste trabalho manter-se-á a mesma energia por unidade de resistência elétrica (energia específica) para cada configuração de chapa. Esta abordagem permite um estudo mais detalhado e conclusões mais aprofundadas e menos óbvias do que aquelas que se verificam na literatura, como, por exemplo, “um aumento da corrente implica num aumento do diâmetro do ponto”.

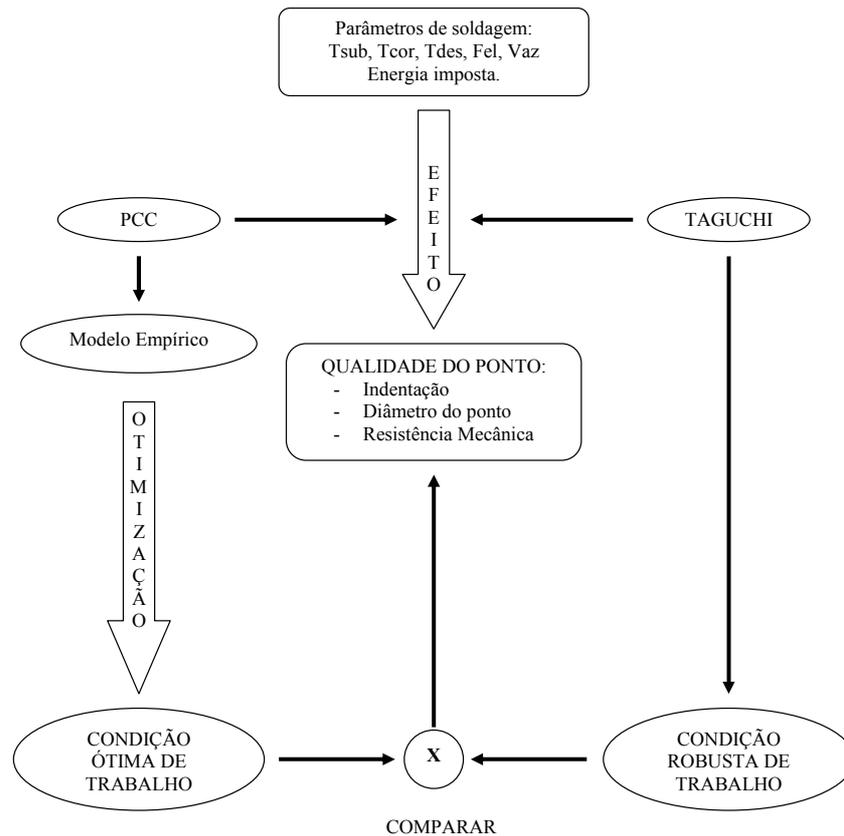


Figura 1.1 - Representação esquemática do trabalho.

Com relação à organização da dissertação, esta consta das seguintes partes:

No Capítulo 1, são escritos alguns comentários sobre soldagem a ponto e avanços na tecnologia e se justifica o que se pretende fazer no trabalho e o que se quer conseguir no processo utilizando planejamentos e filmagem de alta velocidade.

No Capítulo 2, são apresentadas informações detalhadas do processo, fundamentos, equipamentos e seus sistemas, parâmetros e uma análise da influência destes parâmetros na geração de calor, alguns problemas que acontecem no decorrer do processo também são

detalhados. Também é apresentada uma descrição dos aços revestidos e a técnica de revestimento, bem como os planejamentos utilizados.

O Capítulo 3, que se refere aos procedimentos experimentais, consta da descrição da máquina a utilizar, dos sistemas envolvidos na máquina: mecânico, elétrico, pneumático, aquisição e monitoramento em forma detalhada. Uma verificação de bom funcionamento dos sistemas é realizado antes dos ensaios começarem a serem feitos assim o processo terá a confiabilidade necessária. A metodologia dos ensaios preliminares é detalhada com o qual se atinge os parâmetros reais a se utilizar no processo. Uma filmagem é realizada para monitorar o fenômeno de criação, formação e desenvolvimento da lentilha de solda e uma sincronização com os sinais elétricos é mostrado. Os ensaios ou realizações da soldagem são efetivados seguindo dois planejamentos experimentais, Taguchi e PCC.

Já no Capítulo 4, as respostas indentação, diâmetro e resistência mecânica do ponto são analisadas pelos Taguchi e PCC, mostrando-se os resultados, gráficos e tendências, a otimização do modelo estatístico é realizada e efetuando a comparação dos resultados, concluindo-se acerca do melhor método a utilizar em soldagem a ponto, verificando-se também se o método da energia é um método bom de utilizar no processo de soldagem.

O Capítulo 5 mostra as conclusões e recomendações para um melhor enfoque da análise em trabalhos futuros e no Capítulo 6 são propostos alguns futuros trabalhos.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA

2.1.1 – Fundamentos do processo

No processo de Soldagem a ponto por resistência (Resistance Spot Welding), as peças sobrepostas a serem soldadas são pressionadas uma contra a outra por meio de eletrodos movimentados por forças: mecânica, pneumática, hidráulica ou uma mistura delas. Em seguida, um curto pulso de baixa tensão e alta corrente é fornecido e passa pelos eletrodos, não consumíveis, através do material base. A resistência deste material base à passagem da corrente ocasiona uma quantidade de calor nas superfícies de contato das peças proporcional ao tempo, resistência elétrica e intensidade de corrente a qual deverá ser suficiente para permitir que esta região atinja o ponto de fusão do material formando-se uma região fundida que recebe o nome de *lente de solda* (Metals Handbook, 1983).

Quando o fluxo de corrente cessa, a força dos eletrodos ainda é mantida enquanto o metal de solda rapidamente resfria e solidifica. Os eletrodos são retraídos após cada ponto de solda. A área por onde passa a corrente de soldagem, a forma e o diâmetro das lentilhas de solda geradas são limitados pelo diâmetro e contorno da face do eletrodo (Metals Handbook, 1983).

A resistência elétrica na interface entre as peças se situa geralmente no intervalo de 50 a 500 $\mu\Omega$ - mas pode ser tão baixa quanto 20 $\mu\Omega$ para o alumínio -, sendo necessária corrente com intensidade entre 5000 e 100.000 A para ocorrer fusão, o que também depende da condutividade térmica do metal envolvido, a qual é relativamente pequena para o aço e alta para o alumínio, por exemplo. As tensões empregadas variam de 1 a 20 V – muito raramente alcançam 30 V – com o tempo de aplicação da corrente variando entre menos de 0,01 s para folhas (chapas muito finas) até vários segundos para peças mais espessas (Machado, 1996).

Cada ponto de solda é realizado em um ciclo de soldagem, como mostrado na figura 2.1. Sendo que a frequência da rede é de 60 Hz, 1 pulso terá a duração de: $1/60 = 0,0167s$.

Este processo é ideal para soldar chapas finas, até de 3 mm. Maiores espessuras de chapas podem ser soldadas, mas máquinas especiais devem ser utilizadas. A indústria automotiva, a principal usuária deste processo utiliza na construção dos automóveis entre 3000 e 4000 pontos de solda (Karagoulis, 1994).

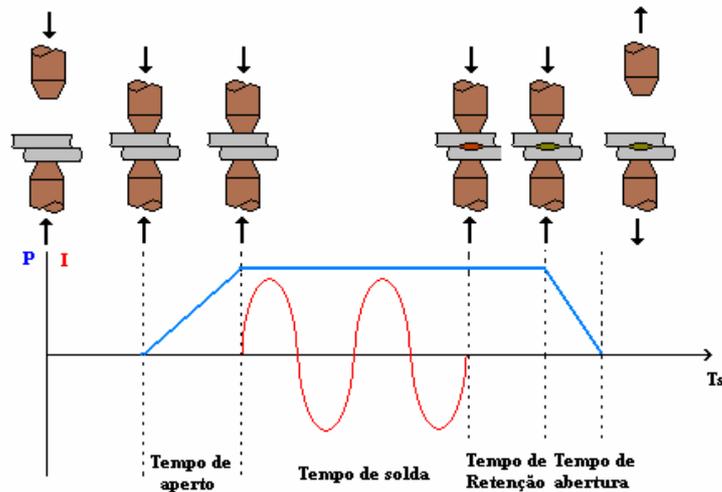


Figura 2.1 – Ciclo de solda (Branco 2004, modificado)

Diferentes materiais podem ser soldados por este processo: Aços baixa liga e baixo carbono, revestidos, inoxidáveis, alumínio e suas ligas entre outros. Titânio, Cobre e suas ligas, Magnésio e alguns metais refratários também podem ser soldados (TWI, 2005). Existe uma diversidade de formas de realizar pontos de solda: solda a ponto simples, solda múltipla, solda em série, solda em paralelo e soldas indiretas. Um corte transversal de uma típica solda a ponto é mostrado na figura 2.2.

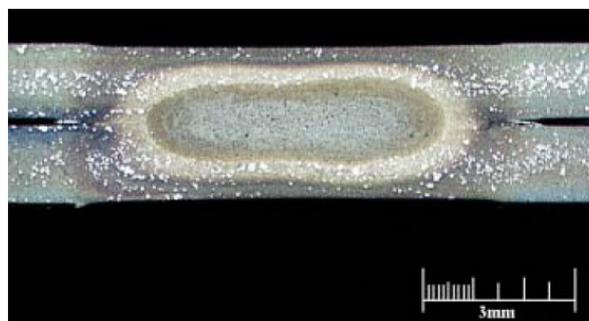


Figura 2.2. Corte transversal de uma junta de solda a ponto por resistência (EWI, 2002).

2.1.2 – Vantagens e limitações

Como as principais vantagens da soldagem a ponto por resistência podem-se citar:

- Maior resistência a vibrações mecânicas.
- Não há necessidade de acabamento final na união soldada, pois, este processo não produz escória, nem respingo, isso quando a solda por resistência é executada corretamente.
- Alta velocidade, alta adaptabilidade para automatização em produção.
- Menor habilidade para ser executada.
- Tipicamente cada automóvel possui entre 3000 e 5000 pontos de solda e o custo com equipamento essencial, eletrodos e manutenção é cerca de 5 centavos de dólar por solda. Portanto, o custo para montagem de uma carroceria de um automóvel é cerca de \$150 a \$200 por automóvel, o que é considerado razoável, considerando o custo total de produção de um veículo.

O processo também apresenta algumas limitações tais como:

- Só se podem soldar entre si metais de naturezas diferentes quando suscetíveis a formar uma liga ou quando se introduz entre eles um material intermediário que pode ligar-se aos metais base.
- Desmontagem das peças soldadas para manutenção ou reparo é muito difícil;
- Os custos de equipamento são geralmente mais altos do que os custos da maioria dos equipamentos de soldagem a arco;
- Soldas a ponto têm baixos limites de resistência à tração e à fadiga por causa do entalhe entre as chapas.

2.2 – MÁQUINAS DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA

A seleção do equipamento de soldagem por resistência é usualmente determinada pelo projeto da junta, os materiais de construção, requerimentos de qualidade, normas de produção e considerações econômicas.

Todas as máquinas de solda a ponto por resistência apresentam basicamente três componentes fundamentais: sistema mecânico, circuito elétrico e o sistema de controle (Wainer, *et. al.*, 1992):

- Sistema mecânico: É composto de sistemas hidráulicos, pneumáticos e/ou mecânicos e são responsáveis pela aplicação da força do eletrodo para segurar a peça. Este sistema deve controlar a velocidade de aproximação do eletrodo a qual deve ser rápida, mas controlada, de modo que as faces do eletrodo não sejam deformadas a partir de batidas repetidas. Características mecânicas de máquinas de soldagem a ponto por resistência, tal como: rigidez, atrito, e movimento de massa, tem influências complexas sobre o processo de soldagem por resistência e qualidade de solda (Tan, *et.al*, 2004).
- Circuito Elétrico: É composto de um circuito primário que abrange a linha de alimentação incluindo um bobinado primário no transformador de soldagem, e um circuito secundário que inclui um bobinado secundário, os cabos que conduzem a corrente de soldagem através das pinças e os eletrodos até o material. Este circuito encarrega-se de fornecer a corrente aos eletrodos.
- Sistema de controle: É responsável pelo controle do processo de soldagem e fornece as seguintes funções principais: iniciar ou cessar a corrente para o transformador da máquina, controlar a magnitude da corrente a aplicar e liberar o mecanismo de força do eletrodo no tempo adequado.

Esses três componentes (mecânico, elétrico e controle) regulam as variáveis mais importantes na soldagem por resistência: a força do eletrodo, a intensidade da corrente e o tempo de passagem da corrente de soldagem (Wainer, *et. al.*, 1992).

2.3 – ELETRODOS

Os eletrodos são a parte física mais importante do equipamento. Cobre é o metal base utilizado na sua construção por ser um bom condutor elétrico, térmico e ter uma baixa resistência de contato. A efetividade do processo depende em uma considerável medida das condições e da vida do eletrodo.

Vida do eletrodo é geralmente definida como o número de soldas que podem ser feitas, sem a necessidade de se concertar a ponta do eletrodo, antes da medida de solda diminuir sob níveis aceitáveis. Uma baixa vida do eletrodo pode limitar a taxa de produção devido à necessidade de freqüentes concertos do eletrodo e/ou operações de troca dos eletrodos (Holliday, *et. al.*, 1995).

O propósito do eletrodo é conduzir a corrente de soldagem para a peça de trabalho, aplicar força para juntar as peças a serem soldadas e retirar ou reduzir o calor da superfície da peça de trabalho além de manter a sua forma e características originais de condutor térmico e elétrico sob severas condições de trabalho.

Soldagem por resistência tem um papel dominante na montagem automotiva e o incremento de aplicação de chapas revestidas de zinco (> 60%) tem destacado a importância da vida do eletrodo em operações de soldagem a ponto (Holliday, *et. al*, 1995).

Durante a operação de soldagem, altas correntes, grandes forças compressivas e altas temperaturas (900°C) são atingidas (figura 2.3) na superfície de contato do eletrodo/chapa (RWMA, 1989). Grande parte do desgaste do eletrodo é devido à alta temperatura de trabalho e a permanência na mesma (Machado, 1996). Essa permanência é consequência de excesso no tempo de soldagem. Roswell (1976) demonstrou para um mesmo tipo de aço e com os mesmos parâmetros, que maior vida do eletrodo é atingida para pequenos tempos de soldagem (4 ciclos) que para tempos maiores (8 ciclos). Algumas indústrias utilizam a técnica de comando programado na qual a soldagem é interrompida em função de um número de pontos de solda pré-determinado e a cada interrupção a corrente é aumentada e, com isso, a vida do eletrodo é aumentada. Isto é devido a que cada certo número de pontos de solda o eletrodo se desgasta, o diâmetro da face do eletrodo aumenta e a densidade de corrente é menor, logo se necessita maior corrente para compensar este desgaste.

Os eletrodos desempenham um papel vital na geração de calor porque eles conduzem a corrente de soldagem até o material.

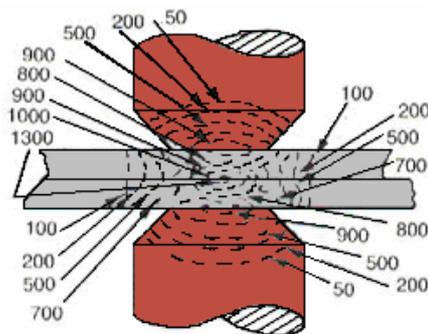


Figura 2.3 – Temperaturas Instantâneas estimadas de soldagem a ponto em Graus Celsius no instante de finalização da solda (RWMA 1989, modificado).

As propriedades elétricas de cobres de alta condutividade (“C copper”) foram padronizadas em 1913 pela “International Electrotechnical Commission”, a qual definiu o padrão “International Annealed Copper Standard” (IACS).

Os eletrodos devem estar projetados para suportar densidades de correntes entre 800 – 10.000 A/cm² e pressões entre 70 – 400 MPa (Wainer, *et. al.*, 1992).

2.3.1 – Geometria dos eletrodos

Um eletrodo para soldagem a ponto (figura 2.4) possui 4 características geométricas:

- A – Face: é a parte que mantém contato com a peça de trabalho e na soldagem é a parte mais importante do eletrodo por que ela determina o valor da densidade de corrente a aplicar na realização do ponto de solda, assim como também determina o valor da pressão a utilizar para atingir a força necessária na realização da solda.
- B – O corpo: deve ter a suficiente massa, área ou espessura para suportar a força aplicada nas chapas e também para carregar a corrente de solda.
- C – Conexão: é a forma como ele vai conectado no porta eletrodo ou suporte do eletrodo.
- D – Cavidade para refrigeração: é a parte oca interna do eletrodo que está conectado ao porta eletrodo, serve para a refrigeração do eletrodo, não pode ser muito pequena para não dificultar a passagem da água de refrigeração e nem muito larga para não debilitar a estrutura do eletrodo (AWS, 1998).

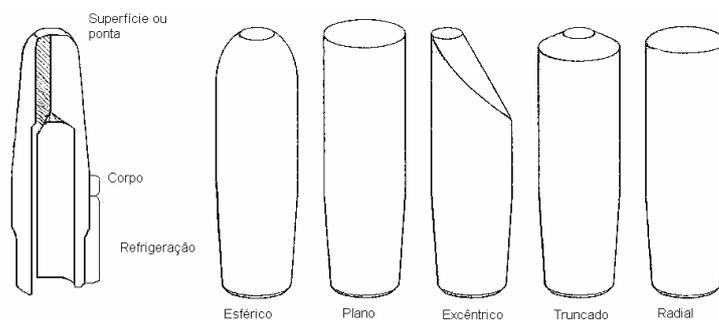


Figura 2.4 - Tipos de eletrodos mais utilizados em soldagem a ponto (Metals Handbook 1983, modificado).

Para a realização do ponto de solda, corrente tem que ser adicionada através do eletrodo. A quantidade de corrente a passar e o calor gerado pela corrente nas superfícies de contato das peças está em função direta do diâmetro do eletrodo. Este efeito é chamado “Densidade de Corrente” que é a quantidade de corrente que pode passar por uma determinada superfície (A/mm^2). Se o diâmetro do eletrodo é pequeno a densidade de corrente será alta, maior quantidade de corrente será aplicada em uma área menor, maior calor será gerado e afundamento do eletrodo na chapa (indentação) pode acontecer. Se o diâmetro do eletrodo é maior a densidade de corrente será menor, pouco calor será gerado, a pressão do eletrodo diminuirá e a solda pode não ser realizada ou será fraca e expulsão de metal pode acontecer. Logo o diâmetro da face do eletrodo tem um rol importante na realização do ponto de solda.

Em geral, eletrodos cônicos truncados apresentam maior tempo de vida e os mais comuns em soldagem de chapas galvanizadas incluem ângulos entre 90 e 140 graus (Gedeon, 1984), embora os esféricos possam ser favorecidos quando o alinhamento é difícil (Powell, 1996).

2.3.2 – Materiais dos eletrodos

O material dos eletrodos deve possuir as seguintes propriedades (Machado, 1996):

- a) – Alta condutividade térmica e elétrica.
- b) – Baixa resistência de contato
- c) – Grande resistência mecânica e ao desgaste nas temperaturas de trabalho.

Numerosos elementos têm sido pesquisados para otimizar a composição do material a usar nos eletrodos. Um material duro, por exemplo, pode ter melhor resistência ao desgaste, mas com o aumento do teor de ligas e conseqüentemente das suas durezas, a condutividade elétrica é geralmente diminuída. Uma combinação entre condutividade elétrica e térmica, junto com adequada dureza mecânica e resistência às temperaturas de operação são os requerimentos essenciais para um adequado material do eletrodo (Holliday *et al.*, 1995).

O Cobre, material de construção do eletrodo, pode ser endurecido por diferentes mecanismos, entre eles: endurecimento a frio, por solução sólida, por precipitação e por dispersão, os quais originam mudanças na estrutura cristalina do metal. Devido às

condições de trabalho extremas a capa do eletrodo sofre deformação plástica devido à formação de um grão grosseiro durante essas condições. O Cobre endurecido por dispersão prevê o crescimento desse grão. O benefício desta família de Cobre conta com a habilidade de prever este grão grosseiro em temperaturas aproximadas ao ponto de fusão do cobre (Villafuerte, Julio 2003).

Os materiais da RWMA utilizados para eletrodos apresentam as melhores combinações de resistência, desgaste mecânico, condutibilidade elétrica e térmica (Machado, 1996). Esta entidade classifica os eletrodos, pela composição química e propriedades mecânicas, segundo a tabela 2.1, em:

Tabela 2.1 – Propriedades físicas dos materiais da RWMA (Intermachinery, 2002)

Classe RWMA	Rockwell B Mínima	Condutibilidade (% IACS mínima)	Material
1	65	80	Cobre-Cádmio
2	75	75	Cobre-Cromo
3	90	45	Cobre-Cobalto-Berílio

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 baixas 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 (Metals Handbook, 1983).

2.3.3 – Refrigeração dos eletrodos

Como mostrado na figura 2.5, a distância do final do furo de refrigeração à face do eletrodo é denominada “espessura da face”. Para uma dado nível de extração de calor

devido ao líquido de refrigeração, corrente e ciclos de soldagem, existe uma “espessura crítica” para a qual a temperatura do eletrodo é mínima (Machado, 1996).

Para uma ótima refrigeração dos eletrodos recomenda-se que o fluxo de água seja no mínimo de 4 l/min para efetuar soldagem de chapas de aço sem revestimento e com espessura de até 3 mm. O fluxo de água deverá ser maior, cerca de 6 a 7 l/min, caso as chapas sejam de aço revestido e/ou grande espessura. O tubo interno de alimentação do sistema de refrigeração deve ser disposto de tal forma a assegurar que a água entre pela parte oposta à face de trabalho dos eletrodos (Powell, *et al.*, 1996).

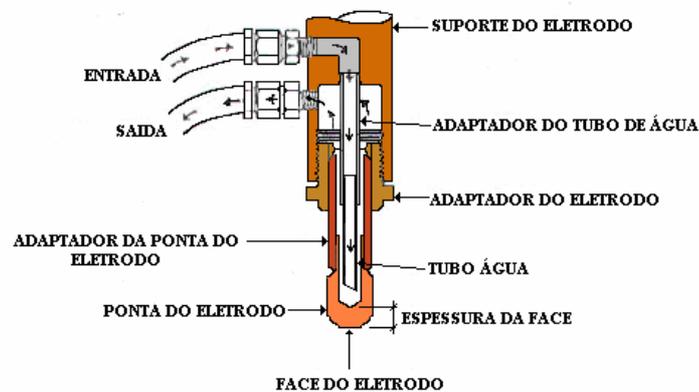


Figura 2.5 – Sistema de refrigeração do eletrodo (Intermachinery 2002, modificado)

Um nível bom da temperatura de entrada da água, no sistema de refrigeração, deverá ser de 20⁰C e na saída de 30⁰C. Para manter estes níveis de temperatura, o fornecimento de água de refrigeração para os eletrodos deve ser independente do sistema de refrigeração do transformador e do tiristor. Circuitos de água separados devem ser usados tanto para os eletrodos superiores quanto para os inferiores (Powell, *et. al.*, 1996). Para que os eletrodos tenham uma boa vida útil é necessário que a velocidade de soldagem esteja na faixa de 20 a 30 pontos/min. (Intermachinery, 2002)

Yeung (1999) encontrou no seu trabalho que, para pequenos tempos de aquecimento, nenhuma cambio foi encontrado na temperatura máxima atingida pelo decrescimento de fluxo de refrigeração de 3,79 l/min até 2,24 l/min ou pela diminuição da espessura da face de 9,00 para 6,35 mm.

2.4 – GERAÇÃO DE CALOR EM SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA

O circuito secundário de uma máquina de soldagem a ponto, incluindo a peça de trabalho sendo soldada, é uma série de resistências (figura 2.6) e o valor delas afeta o fluxo de corrente. A corrente deve ser a mesma em qualquer ponto do circuito de tal forma que o calor gerado em qualquer ponto é diretamente proporcional à resistência nesse ponto (Metals Handbook, 1983).

Em um condutor elétrico, a quantidade de calor gerado depende de três fatores:

1. Corrente elétrica;
2. Resistência do condutor (incluindo resistência da interface);
3. Duração da corrente.

Estes três fatores afetam o calor gerado ou Energia como expresso na equação:

$$E = I^2 R t \quad (1)$$

onde: E - calor gerado [J]; I - corrente em [A]; R - resistência do material [Ohms]; t - tempo de duração da corrente [s].

Na soldagem por resistência então, o calor gerado é proporcional ao quadrado da corrente de soldagem e diretamente proporcional à resistência e o tempo. Parte do calor gerado é utilizado para gerar a solda e parte é perdida por condução, convecção e radiação para o material de base e eletrodo. A magnitude destas perdas é geralmente desconhecida.

Da equação 1 pode-se ver que a corrente de soldagem exigida para produzir uma dada solda é, aproximadamente, inversamente proporcional à raiz quadrada do tempo. Assim, se o tempo for extremamente curto, a corrente exigida será muito alta. (AWS, 1998).

A figura 2.6 mostra os efeitos compostos de geração de calor e dissipação nas peças de trabalho e eletrodos. Como se pode ver há 7 resistências conectadas em série:

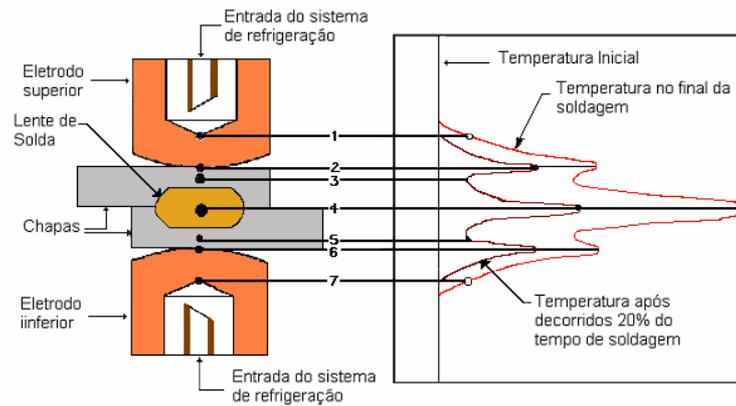


Figura 2.6 – Pontos principais de calor nos eletrodos e gradiente de temperatura após 20% do tempo de soldagem e no final do processo (Metals Handbook 1983, modificado).

- 1 e 7: resistência elétrica do material do eletrodo;
- 2 e 6: resistência de contato entre o eletrodo e o metal base. A magnitude desta resistência depende da condição da superfície do metal base e do eletrodo, do tamanho e do perfil da face do eletrodo e da força de eletrodo. Este é um ponto de alta geração de calor, mas a superfície do metal não atinge sua temperatura de fusão durante a passagem de corrente devido à alta condutibilidade térmica dos eletrodos (1 e 7) e ao fato de que eles são usualmente refrigerados a água;
- 3 e 5: resistência total do próprio metal base, que é inversamente proporcional à área da seção transversal por onde a corrente passa;
- 4: resistência do metal base da interface no local onde a solda deve ser formada. É o ponto de mais alta resistência e, portanto, o ponto de maior geração de calor.

O calor é gerado em todos esses locais. Entretanto, tal calor é requerido apenas nas interfaces dos metais bases e o calor gerado nos outros locais devem ser minimizados. Já que a maior resistência está localizada em 4, o calor é mais rapidamente desenvolvido nesse local (AWS, 1998).

Após cerca de 20% do tempo de soldagem ter transcorrido, o gradiente térmico é representado pela curva à esquerda na figura 2.6. A curva à direita representa o gradiente térmico no final do tempo de soldagem (AWS, 1998).

Quando as condições de soldagem são adequadamente controladas, a temperatura de soldagem é primeiramente alcançada em locais perto de 4, na interface entre as chapas.

Durante o período de aquecimento, a região fundida cresce e se torna contínua para formar a lentilha de solda (AWS, 1998).

2.5 – PARÂMETROS DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA

Parâmetros de soldagem são aquelas condições que com um determinado valor e uma adequada combinação entre eles é realizado um ponto de solda, efetivando a junção de uma junta. Os valores certos desses parâmetros são os responsáveis de uma boa ou má qualidade da solda.

Em soldagem a ponto por resistência existem três parâmetros principais: Corrente de soldagem, Força do eletrodo e Tempo de soldagem os quais são aplicados em um ciclo de soldagem. A resistência elétrica da peça não é um parâmetro, mas tem muita importância, pois ela é responsável da geração de calor devido à oposição à passagem da corrente (efeito Joule).

2.5.1 – Corrente de soldagem

É fornecida pela rede de alimentação, passando pelo circuito primário do transformador, logo pelo circuito secundário chegando até a peça de trabalho. Ambas, AC e DC são utilizadas para produzir a solda (AWS, 1998).

Ocasionalmente são encontrados na literatura de soldagem conceitos e fatos os quais são utilizados somente para tensão e corrente senoidal o qual diz muito pouco em relação à real condição elétrica em soldagem por resistência. Na maioria dos artigos, por exemplo, não está claro que valores rms de corrente e tensão são utilizados nos cálculos (Weber, G., 1994). Isto foi considerado neste trabalho e será mostrado mais adiante.

Um Toróide (bobina) ou um Sensor de efeito Hall podem ser usado para medir a corrente. O toróide, o mais usado, mede tensão induzida pelo campo magnético variável que envolve os condutores que conduzem corrente. Só pode ser usado para medir corrente AC. Este sinal de tensão pode ser eletronicamente integrado e assim fornecer uma medida indireta da corrente de soldagem. Variações na posição e orientação do Toróide podem causar

variações na área efetiva logo também nos valores medidos da corrente. Estudos mostram que este erro pode ser até 5% da medição quando o Toroide não está fixo na máquina de soldagem (Gedeon, *et. al.*, 1987).

A tensão medida no secundário é muito pequena e pode ser muito fácil de ter interferência por ruídos. O pulso de voltagem pode ser medido através da peça de trabalho (Gedeon, *et. al.*, 1987), como mostrado no próximo capítulo.

2.5.2 – Força do eletrodo

É a força que se encarrega de juntar, segurar e unir as peças de trabalho, exercendo pressão antes, durante e depois do fornecimento da corrente. Esta força também serve para forjar os metais quando eles se encontram no estado plástico. Este parâmetro está subdividido em: pré-pressão (compressão ou aperto), pressão de soldagem e pós-pressão (retenção).

2.5.3 – Tempo de soldagem

É a duração de fornecimento da corrente de soldagem para a realização do ponto de solda. Deve-se ter em conta que se tempos de solda muito curtos são aplicados a corrente de soldagem tem de ser muito alta para poder atingir o calor necessário para fundir o material a soldar.

2.5.4 – Resistência de contato

A resistência de contato na interface das chapas a serem soldadas é a fonte fundamental de aquecimento pelo efeito Joule para metais de alta condutibilidade elétrica. É dependente da resistividade intrínseca da camada de revestimento e da dureza, do contorno e da limpeza da superfície.

Medições de resistência estática indicam que a resistência de contato depende do revestimento da superfície e da diminuição da força nos pontos de contato. É sabido que a resistência de contato entre duas superfícies lisas não tem valor tão alto como com as superfícies com materiais estranhos e que a diminuição da força do eletrodo aumenta a resistência (Kaiser, *et. al.*, 1982).

Houlcroft (1979) diz que a resistência depende da resistividade e da geometria do condutor. Desde que a resistividade do material da peça de trabalho é fixa é usual criar um local de alta resistência providenciando um caminho restrito à passagem da corrente entre as partes a serem soldadas, um procedimento conhecido como concentração de corrente.

2.6 – EFEITOS DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NA GERAÇÃO DE CALOR

Na prática normal, para obter uma condição de calor desejada, a corrente de soldagem, pressão aplicada na peça de trabalho e o tempo de soldagem são pré-selecionados para uma particular aplicação, dependendo das propriedades do material da peça de trabalho a ser soldada e a geometria da ponta do eletrodo (Chang, *et al.*, 1990).

As combinações desses parâmetros formam um ciclo de soldagem o qual pode durar de meio ciclo (1/120 segundos) em chapas muito finas e até vários segundos em chapas mais grossas. Este ciclo de solda está dividido em 4 partes características, como mostrado na figura 2.7, mas existem ciclos com impulsos múltiplos para determinadas condições e propriedades do tipo de material a soldar o que será utilizado neste trabalho. A seguir estes parâmetros serão definidos assim como os seus efeitos no ciclo de soldagem.

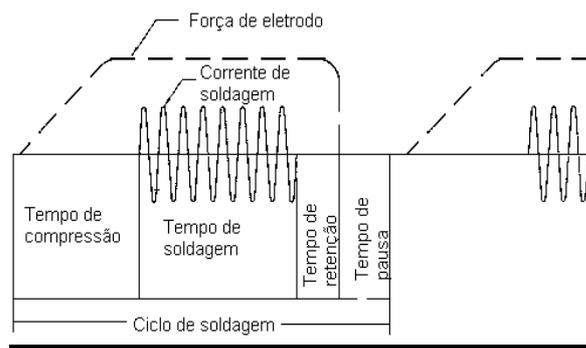


Figura 2.7 – Ciclo de solda básico em solda a ponto (AWS 1998, modificado).

2.6.1 – Efeito da Corrente de soldagem

Na equação 1, a corrente tem um efeito muito maior na geração de calor do que a resistência ou o tempo. Sendo assim, é uma importante variável a ser controlada. Os dois fatores que causam variação na corrente de soldagem são: flutuações na tensão da linha de

transmissão da energia elétrica e variações na impedância do circuito secundário quando se utiliza máquinas à corrente alternada. Variações de impedância são causadas por mudanças na geometria do circuito ou pela introdução de massas metálicas magnéticas no circuito fechado secundário da máquina. Máquinas a corrente contínua não são significativamente afetadas por massas metálicas magnéticas no circuito secundário e são pouco afetadas pela geometria do circuito (RMWA, 1989).

A condutibilidade térmica do aço é cerca de 12% da do Cu; portanto, se uma corrente de soldagem suficiente for usada na soldagem de aço com eletrodos à base de Cu, o calor gerado ao longo da interface entre as chapas (ponto 4 na figura 2.6) será conduzido para longe da zona de solda mais lentamente do que o calor gerado nas pontas dos eletrodos (pontos 2 e 6 na figura 2.6) o qual é conduzido para sua direção longitudinal (pontos 1 e 7 na figura 2.6). Assim, a interface entre as chapas atinge primeiramente a temperatura de fusão e uma solda é produzida na interface (Metals Handbook, 1983).

As variações na magnitude da corrente podem afetar a densidade de corrente na interface da solda. Existe um limite inferior para a densidade de corrente abaixo do qual a fusão não ocorre. Calor suficiente deve ser gerado para compensar as perdas, por condução, para o metal base adjacente, os eletrodos e o meio ambiente. Existe, também, um limite superior para a densidade de corrente de soldagem. Se esta for muito alta, a espessura total das chapas entre os eletrodos é aquecida até a região plástica enquanto a zona de solda atinge a temperatura de fusão e os eletrodos penetram profundamente nas chapas. As superfícies externas dos eletrodos podem também ser aquecidas e até queimadas. Isto realmente ocorre quando a corrente é alta o suficiente para produzir expulsão de material de zona fundida. O resultado é uma baixa vida útil do eletrodo e soldas com baixa qualidade (RMWA, 1989).

A resistência máxima das soldas é obtida pela soldagem com densidade de corrente logo abaixo do valor no qual ocorre expulsão (Metals Handbook, 1983). A figura 2.8 mostra um gráfico de soldabilidade (LOBE CURVE) e os níveis: inferior e superior da corrente entre os quais a solda é realizada.

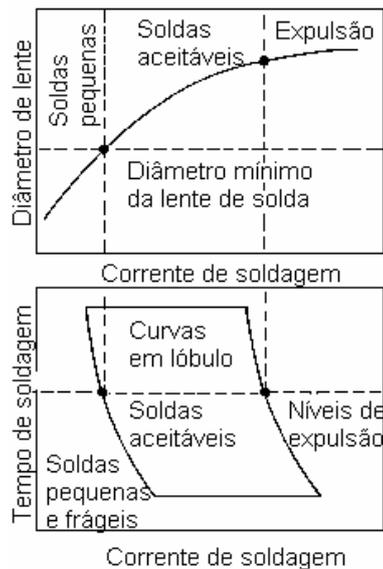


Figura 2.8 - Curva de soldabilidade. (Metals Handbook 1983, modificado)

2.6.2 – Efeito da Força do eletrodo

As superfícies metálicas, mesmo as mais polidas ou com acabamento cuidadoso, apresentam uma grande rugosidade em escala atômica da ordem de 500 Å. Isto impede que as superfícies como um todo, se aproximem efetivamente. Além dessas irregularidades das superfícies existem ainda as camadas de óxidos, umidade, gordura, poeira, etc., o que impede a ligação metal/metal (Marques, 1991).

Todos esses defeitos e impurezas na superfície da chapa diminuem a área pela qual a corrente deve passar o que aumenta a densidade de corrente dando lugar a um aquecimento rápido do material o que ocasiona uma variação do processo, da configuração da lentilha e a qualidade da solda. Para melhorar o contato entre estas superfícies se aplica força antes, durante e após o processo de soldagem.

A força do eletrodo usualmente é medida e expressa como um valor estático, mas é uma força dinâmica em operação e é afetada pela fricção e inércia das partes em movimento da máquina de soldagem (Metal Handbook, 1983).

As peças de trabalho a serem soldadas devem ser fortemente seguras, juntas na localização onde será feita a solda para permitir a passagem da corrente. Um incremento da força do eletrodo diminui a resistência de contato do metal de trabalho, e assim, decresce a geração

de calor entre as superfícies de contato da peça (Metal Handbook, 1983). Para aumentar o calor até um nível suficiente, corrente ou tempo de soldagem deve ser aumentado para compensar a diminuição na resistência (AWS, 1998).

A força do eletrodo deve ser compatível com a corrente de soldagem e o metal base deve estar em razoável contato na área de solda sem uma excessiva força do eletrodo (Metal Handbook, 1983). Na maioria das aplicações, o material do eletrodo é mais macio do que as chapas. Conseqüentemente, uma aplicação adequada da força do eletrodo produzirá melhor contato nas interfaces eletrodo/chapa do que na interface chapa/chapa (AWS, 1998).

2.6.3 – Efeitos dos Parâmetros no ciclo de soldagem

Durante a operação de soldagem, um tempo mínimo é requerido para atingir a temperatura de fusão dependendo da densidade de corrente. A taxa de geração de calor deve ser tal que uma solda com resistência adequada deve ser produzida (AWS, 1998). O tempo de soldagem, no ciclo de soldagem, está dividido em sub-tempos e cada um deles têm influências no processo.

2.6.3.1 – Tempo de compressão

É o intervalo de tempo do processo entre a aplicação inicial da força do eletrodo na chapa metálica e a primeira aplicação da corrente (Parmar, 1995). O tempo de compressão se divide em duas etapas: tempo de acostamento e tempo de pré-pressão. O tempo de acostamento é o tempo que os eletrodos demoram desde a sua posição inicial, afastado das chapas, até tocar nelas - este tempo deve ser o suficientemente longo para evitar fortes batidas no momento dos eletrodos encostar na chapa. E o tempo de pré-pressão que é o tempo que o sistema de força demora desde o encostamento até a pressão de trabalho. O tempo de compressão é utilizado para atrasar a corrente até que o metal base tenha sido submetido ao valor de força de eletrodo determinada. Se a corrente de soldagem for ligada antes que esta força seja atingida, haverá expulsão de metal fundido e a solda será de má qualidade. Se a corrente for ligada antes que os eletrodos entrem em contato com a chapa metálica, quando o fizerem, haverá forte expulsão de metal, podendo causar danos ao ferramental e ferimentos nas pessoas localizadas perto da área. Se a corrente for ligada após do início da pressão de soldagem, a solda poderá até ser de boa qualidade, mas tempo

é gasto desnecessariamente e o custo de produção pode aumentar significativamente, logo uma correta sincronização entre o tempo de compressão e o início da corrente de soldagem deve ser feita. Muitos defeitos da solda podem ser atribuídos à soldagem com curto tempo de aperto (Rivett, 1984).

2.6.3.2 – Tempo de soldagem

É o tempo de aplicação da corrente máxima que fornece o calor necessário para conseguir a junção da peça de trabalho.

Neste parâmetro aparecem desencontros entre as definições dadas pela literatura. Alguns autores apresentam o “Tempo de soldagem” somente como o tempo de aplicação da corrente de soldagem, já outros autores apresentam o “Tempo de soldagem” como o tempo de aplicação da corrente de soldagem incluindo um tempo de subida (upslope) mais um tempo de descida (downslope) e em alguns casos até com um pulso de corrente de pós-aquecimento.

Estas definições do “Tempo de soldagem” serão verificadas para a máquina de soldagem a utilizar neste trabalho no capítulo seguinte.

2.6.3.3 – Tempo de subida da corrente (Upslope)

“Upslope” é o tempo de aumento gradual da corrente desde o início do processo até um valor máximo onde a aplicação da corrente máxima se inicia. É geralmente utilizado para evitar sobreaquecimento e expulsão do metal no início do tempo de soldagem, quando a resistência da interface do metal base ainda é alta (AWS, 1998).

Entretanto, não há vantagem para a vida do eletrodo no uso desse aumento gradual da corrente quando se solda aços revestidos com Zn por imersão a quente. Isto é devido às resistências eletrodo/chapa e chapa/chapa serem muito pequenas durante a parte inicial do período de aquecimento da soldagem. Isto indica que uma alta corrente seria necessária para o Zn ser removido do plano sobreposto da solda (interface chapa/chapa) por volatilização (AWS, 1998). Este procedimento não é, geralmente, empregado nas

indústrias automobilísticas por não estarem disponíveis nas máquinas de solda ou porque tempos mais longos de solda diminuirão a produtividade.

2.6.3.4 – Tempo de corrente máxima

É o intervalo de tempo, relativamente curto, de aplicação da corrente máxima de soldagem. Da equação 1 pode-se ver que quando se usa intervalos de tempo de soldagem (corrente máxima) muito pequenos o valor da corrente de soldagem aumenta consideravelmente para se conseguir a energia ou calor necessário para fundir o metal base. Este conceito será considerado na hora de analisar os resultados.

Este tempo é controlado por sistemas eletrônicos, mecânicos, manuais ou pneumáticos. Para máquinas de energia armazenada, tipo magnética ou de capacitor, o tempo de soldagem é determinado pela constante elétrica do sistema (AWS, 1998).

Um outro limitante da aplicação prolongada da corrente é que o aquecimento se transfere ao longo da espessura da chapa. Com o aquecimento do material de base, a resistência elétrica nestas regiões aumenta e mais calor é gerado. Os pontos 3 e 5 se tornarão plásticos, permitindo a deformação da chapa e provocando o afundamento dos eletrodos dando lugar à indentação. Mesmo sem a deformação, haverá um crescimento exagerado da lente da solda e da zona afetada pelo calor (ZAC).

O calor total desenvolvido é proporcional ao tempo de soldagem. Essencialmente calor é perdido por condução no resto da chapa e pelos eletrodos, uma pequena quantidade é perdida por radiação. Essas perdas se incrementam com o aumento do tempo de soldagem (AWS, 1998).

2.6.3.5 – Tempo de descida da corrente (Downslope)

O “Downslope” é a diminuição gradual da corrente no final do tempo de soldagem. Ele é utilizado para controlar a solidificação da lente de solda e para evitar a rachaduras em metais que são endurecidos por têmpera ou sujeitos a fissuração em quente (AWS, 1998).

2.6.4 – Efeito do tempo de retenção

É o tempo durante o qual os eletrodos continuam na sua posição mantendo a força na peça de trabalho após o último impulso de corrente ter finalizado; durante este tempo a lentilha de solda se solidifica e é esfriada até a sua adequada resistência mecânica (AWS, 1998).

Se os eletrodos forem removidos da solda rapidamente após a corrente de soldagem ter cessado pode acontecer empenamento da região de solda nas chapas finas. Com chapas espessas, o tempo deve ser o suficiente para esfriar e solidificar a ampla lente de solda sob pressão. É melhor, então, ter os eletrodos em contato com o material até que a solda esfrie completamente de modo que esta tenha a resistência suficiente para resistir ao carregamento imposto quando a pressão dos eletrodos for retirada (AWS, 1998).

2.6.5 – Efeito do Tempo de pausa ou intervalo

É o tempo durante o qual o eletrodo é separado da peça de trabalho, a qual é movimentada até a próxima localização de solda; este termo é geralmente aplicado quando o ciclo de solda é repetitivo (Parmar, R. S., 1995).

Dentro do ciclo de soldagem, diferentes configurações de pulsos de corrente podem ser utilizadas. Isto deve ser feito dependendo do projeto, especificamente do material base a utilizar. No caso de chapas galvanizadas a Zinco, um primeiro impulso pode ser adicionado no ciclo de soldagem com a idéia de fundir o Zinco do revestimento antes da corrente de soldagem (corrente máxima) ser aplicada e conseguir um melhor contato entre as superfícies das chapas. Este primeiro impulso pode ser definido como tempo de “Burn Zinc” e tem um alto valor de corrente e um tempo de aplicação muito curto. Assim que o tempo de Burn Zinc terminar, um pequeno tempo de pausa será aplicado com o intuito de deixar esfriar a chapa antes de aplicar a corrente de solda. Deve ficar claro que tudo isso acontece em milésimos de segundo (Intermachinery, 2002).

2.6.6 – Efeito da resistência de contato

Existe uma relação entre a resistência de contato, corrente mínima de soldagem e vida útil do eletrodo. Se a resistência de contato for baixa, uma corrente elevada será necessária e, conseqüentemente, a vida útil do eletrodo será menor.

Aumentando a dureza e a rugosidade da superfície resulta em um aumento da resistência de contato e, conseqüentemente, da quantidade de calor desenvolvido para o mesmo fluxo de corrente, exigindo, desta forma, correntes de soldagem mais baixas.

Na soldagem por resistência de aços com revestimento de Zn por imersão a quente, a resistência de contato é consideravelmente menor do que em aços não revestidos por causa da alta condutibilidade elétrica do revestimento de zinco, sua relativa maciez e baixo ponto de fusão. As últimas características conferem um melhor contato elétrico e, pelo tanto uma resistência elétrica inferior é criada entre as superfícies.

2.7 – OUTROS FATORES QUE INFLUENCIAM NA GERAÇÃO DE CALOR

Mesmo que as variáveis da máquina são fixadas em uma desejada condição há geralmente considerável variação em qualidade de solda de parte a parte. Isto é devido à variação na corrente de soldagem causado pela mudança em: condição de superfície da peça de trabalho, diâmetro da ponta do eletrodo e na impedância no circuito de solda (Chang *et al.*, 1990) e em outros fatores os quais são descritos a seguir:

2.7.1 – Condições da superfície do material base

A existência de corpos estranhos na superfície do material base tais como: poeira, óxidos, óleos, graxas, etc., fazem com que a resistência de contato entre a superfície da chapa e a face do eletrodo aumente. Se a resistência neste ponto é muito alta, na realização da solda, a temperatura nesta região aumentará tão rapidamente como na superfície de contato entre chapas. Nessas circunstâncias, os corpos estranhos se fundem ou consomem de diferentes formas e tempos ocasionando variações da resistência o que pode resultar em variações na qualidade da solda assim com incrustações no eletrodo deteriorando-o.

2.7.2 – Influência dos eletrodos

A área da face do eletrodo controla amplamente a densidade de corrente de soldagem. Com a deformação do eletrodo pelo uso o diâmetro da face aumenta, a pressão do eletrodo diminui e as resistências de contato também aumentam gerando mais calor na peça. Uma taxa de geração de calor maior será formada se a força do eletrodo for baixa já que a resistência de contato e a força de eletrodo variam inversamente (AWS, 1998).

No processo de soldagem calor também é gerado na superfície de contato entre a ponta do eletrodo e a chapa. Esse calor e as soldas repetitivas fazem com que incrustações ou ligas, entre o cobre do eletrodo e o material base, aconteçam. Quando o material base soldado tem revestimento (Zinco, Alumínio ou outro tipo de revestimento) essas ligas acontecem mais rapidamente o que gera uma capa de latão na ponta do eletrodo. O latão é um material de menor condutividade elétrica e térmica, o que faz que essa parte do eletrodo se aqueça rapidamente ocasionando um desgaste prematuro do mesmo com as seguintes falhas nas dimensões e características do ponto de solda e, por tanto, na qualidade da solda.

2.7.3 – Dissipação do calor

Durante a soldagem, o calor é perdido por condução para o metal base adjacente e para os eletrodos como mostrado na figuras 2.3. A dissipação de calor se produz em taxas variáveis durante a aplicação da corrente assim como também após a corrente tenha terminado de ser aplicada, até a solda ser esfriada completamente.

Quando o material é de alta condutividade, alta corrente de soldagem é necessária para produzir uma solda satisfatória e compensar a perda de calor. A soldagem a ponto nestes materiais se torna muito difícil.

Os eletrodos ao permanecerem em contato com o material após a corrente de soldagem ter cessado, eles rapidamente resfriam a lente de solda. A taxa de dissipação de calor no metal base circundante decresce com tempos de soldagem mais longos porque um volume maior de metal base terá sido aquecido (AWS, 1998)

2.7.4 – Influência da composição do metal

A resistividade elétrica de um metal influencia diretamente no aquecimento por resistência durante soldagem. Em metais de alta condutibilidade térmica tais como Ag e Cu, pouco calor é desenvolvido mesmo sob altas densidades de corrente. A pequena quantidade de calor gerado é rapidamente transmitida para dentro do material circundante e para os eletrodos (AWS, 1998).

A composição de um metal determina seu calor específico, temperatura de fusão, calor latente de fusão e condutibilidade térmica. Estas propriedades governam a quantidade de calor requerida para fundir o metal e produzir uma solda (AWS, 1998).

Alguns elementos de liga ou combinações destes podem fornecer propriedades desejáveis à solda em aços baixo-carbono e aços baixa-liga de alta resistência. 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. (AWS, 1998).

2.8 – PROBLEMAS OPERACIONAIS NA SOLDAGEM A PONTO

2.8.1 – Materiais e espessuras das chapas dissimilares

Dissimilares materiais são de vez em quando difíceis de soldar por causa de suas diferentes propriedades térmicas e elétricas, temperaturas de fusão, faixas plásticas e pelas ligas que podem formar no ponto de solda. Modificações dos planos de solda e o uso de um eletrodo com uma menor área e menor condutividade elétrica e térmica em contato com o material de maior condutividade tenderá a melhorar o balanço de calor. É conveniente fazer teste de solda para determinar a qualidade da solda obtida para um determinado projeto (RMWA, 1989).

Gedeon (1984) também indica que quando o material base é muito fino diminui a vida dos eletrodos. Isto tem a sua explicação no fato de que perdas de calor desde a superfície de contato das chapas pela água de refrigeração dos eletrodos são maiores em materiais finos. Isto resulta em um grande aquecimento do eletrodo aumentado pela presença de zinco, na

superfície da chapa, o qual incrementa a condutividade térmica através da interface do eletrodo.

2.8.2 – Efeito Shunt

Em situações práticas, uma solda é feita após outra e, dessa forma, a solda adjacente afeta a qualidade da solda subsequente devido ao efeito de desvio da corrente que flui através de ponto de solda existente. Este efeito é o chamado efeito shunt e é uma fonte de variação de qualidade (Chang, *et. al.*, 1990).

Na figura 2.9 o metal entre os eletrodos se transforma em um divisor de corrente; parte da corrente passa pelo caminho “A” enquanto que o resto da corrente passa pelo caminho “B”. Se a distância de “A” é muito longa a resistência comparada com “B” será muito alta e o efeito shunt será desprezível. Se a distância de “A” for curta, uma apreciável porção da corrente total será desviada. Outro fator a se levar em conta é que se no ponto “B” aumenta a temperatura, a sua resistência também aumenta adicionando o efeito de desvio para o caminho A (RMWA, 1989).

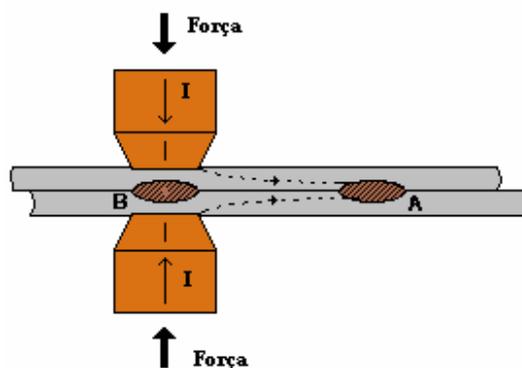


Figura 2.9 – Esquema do efeito Shunt (RMWA 1989, modificado)

2.8.3 – Indentação

Ocorre quando a resistência compressiva do material em contato com o eletrodo diminui à medida que a fusão avança, permitindo, deste modo, que a face do eletrodo se movimente para dentro da superfície da peça de trabalho. Esta indentação pode ser grande quando um eletrodo com uma área superficial pequena for empregado com pressão e densidade de

corrente excessivamente altas. Além de prejudicar o aspecto da superfície da peça de trabalho, a indentação excessiva pode diminuir a resistência mecânica da solda.

Wu (1968) mostra no seu trabalho uma relação linear entre a corrente de soldagem e a indentação do eletrodo. A indentação varia com o material a soldar e a dureza da solda se incrementa com a indentação, em um nível aceitável, até a expulsão do material fundido acontecer. Wu sugere ainda a possibilidade de usar a indentação com um sentido de controle de solda a ponto o que poderia indicar ao operador a dureza do ponto de solda relacionada a uma especificação dada. Figuras deste fenômeno serão mostradas no próximo capítulo

Indentação assimétrica, que usualmente produz uma aresta semicircular na periferia da solda, é causada ou pelo deslocamento lateral do eletrodo em relação à superfície ou por um eletrodo com o contorno da face simétrico que se aproxima da superfície de trabalho em ângulo. Observe que o eixo do eletrodo não tem que ser normal à superfície de trabalho caso a superfície da ponta do eletrodo tiver um contorno que propicie esta posição (AWS, 1998).

2.8.4 – Desalinhamento do eletrodo

Idealmente, os eletrodos devem ser alinhados durante a soldagem visto que um desalinhamento induz uma característica desfavorável do processo e qualidade da solda. O desalinhamento, seja axial ou angular, pode causar formas irregulares e medidas reduzidas do ponto de solda resultado de assimétricas distribuições da aplicação da força do eletrodo e da passagem de corrente. Um desalinhamento pode resultar de uma deflexão sob uma força aplicada durante o processo ou pode estar presente mesmo na aparência de eletrodos alinhados sem carga ou muito pouca carga. Tal desalinhamento é geralmente ignorado na prática, mas ocasiona uma redução na área de contato o que afeta na densidade de corrente e uma errada distribuição de pressão devido à deflexão induzida (Tang *et al.*, 2003).

Karagoulis (1994) afirma que com um desalinhamento de 40% do eixo dos eletrodos a área de contato diminui aproximadamente 50% da área total da face do eletrodo. Isto leva a uma maior densidade de corrente.

Quando o alinhamento de eletrodos é um problema, eletrodos esféricos são tipicamente recomendados (Gedeon 1984).

2.9 – AÇOS GALVANIZADOS

A atual ênfase em proteção da corrosão tem dirigido a uma gradual substituição de aço doce (baixo carbono) por aço revestido o que lhe confere uma maior resistência à corrosão, com aplicação nas indústrias automobilísticas, de linha branca e de construção civil. O revestimento pode ser por processo eletrolítico ou por imersão a quente. Segundo Roswell (1976), o maior problema que ocasionam estes aços em soldagem a ponto por resistência é o desgaste do eletrodo.

Tem-se encontrado que chapas galvanizadas por imersão a quente tem uma maior faixa de soldabilidade quando comparadas com as galvanizadas por processo eletrolítico (Gedeon, S. A., 1984).

Roswell (1976) demonstrou que chapas de aço comum, unidas por solda a ponto e expostas num ambiente marítimo ficaram corroídas totalmente em 12 meses e que as chapas de aço galvanizado soldadas pelo mesmo processo e expostas em ambientes marítimo e rural tiveram corrosão desprezível durante os primeiros 2 anos.

Na industria automotiva chapa galvanizada por imersão a quente é muito utilizada com o intuito de diminuir gastos e peso no produto final.

2.9.1 – Processos de Galvanização

A galvanização pode ser feita por processo eletrolítico ou eletrogalvanização (EG) ou por imersão a quente, também chamado *hot dip galvanized* (HDG).

Eletrogalvanização ou galvanização eletrolítica é um processo eletrolítico no qual o zinco é transferido de um ânodo para uma chapa de aço negativamente carregada e aplica uma camada de zinco em apenas uma das faces da chapa de aço, podendo-se controlar a espessura do revestimento por modelo matemático (Mineração e Metalurgia, 2000).

O processo de galvanização por imersão a quente consiste basicamente em mergulhar peças de ferro ou aço em zinco líquido à temperatura de 450 °C. Quando mergulhado no banho de galvanização as peças reagem imediatamente formando uma camada de liga de ferro e zinco. A parte mais importante da galvanização ocorre neste período inicial, após esta fase a reação diminui de intensidade e a espessura do revestimento não aumenta significativamente assim a peça fique por um período maior de tempo no banho de zinco. Quando a peça é removida do banho, uma porção de zinco fundido é removida por arraste formando uma camada de zinco sobre as outras camadas de ligas de ferro-zinco já formadas. O tempo normal de imersão no processo é de 1 ou 2 minutos. O controle da espessura se dá por meio da velocidade da passagem do aço no banho quente, conseguindo espessuras de 6 e 52 μm por face (Mineração e Metalurgia, 2000) e um peso de 40 – 366 g/m^2 (AWS, 1998)

Testes em aço por imersão a quente indicam que os eletrodos da soldagem a ponto por resistência resistem a metade do número do esperado de pontos para aço eletro galvanizado antes de ser necessário reparar ou trocar o eletrodo.

Chapas eletro galvanizadas tendem a serem mais soldáveis que chapas galvanizadas por imersão a quente por que os revestimentos são mais finos e mais uniformes Chapas eletro galvanizadas (menos que 20 g/m^2) podem ser soldadas da mesma forma de chapas sem revestimento (AWS, 1998).

Estudos mostram que, quando se soldam aços galvanizados, a maioria das variações da resistência durante o fluxo de corrente ocorre nas interfaces eletrodo/chapa e não na interface chapa/chapa. Assim, pelo menos no aço galvanizado, variações de tensão de solda a solda podem estar relacionadas mais ao desgaste do eletrodo do que à geração de calor na interface chapa/chapa, onde a lente se forma.

2.9.2 – Soldabilidade da soldagem a ponto de chapas galvanizadas

A soldabilidade das chapas com revestimento de Zn e de liga Zn-Fe é conhecida como sendo inferior àquela das chapas de aço laminadas a frio. Isto é devido à reação entre o Cu do eletrodo e o Zn do revestimento levando à formação de ligas na ponta do eletrodo. Isto

resulta em consumo do eletrodo e, conseqüentemente, em uma diminuição da sua vida útil (Intermachinery, 2002).

Na soldagem dos aços revestidos com Zn por imersão a quente, elevadas temperaturas são alcançadas na interface eletrodo/chapa. Tem sido observado que esta temperatura atinge valores numa faixa de 500 - 800°C, dependendo, sobretudo da velocidade de soldagem, da eficiência do resfriamento dos eletrodos e da resistência de contato eletrodo/chapa (Intermachinery, 2002)..

No caso específico de chapas zincadas, uma remoção do revestimento de zinco poderá ocorrer como conseqüência da temperatura atingida na interface eletrodo/chapa já que o ponto de fusão do zinco é 419,5°C, sendo ainda favorecida pela força dos eletrodos na superfície da chapa (Intermachinery, 2002)..

Devido ao fato das resistências de contato serem mais baixas nos aços com revestimento de zinco, para se produzir diâmetros satisfatórios de lente de solda, tempos e níveis de corrente de soldagem são necessariamente mais altos, quando comparados aos aços não revestidos.

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. Esta auréola desvia alguma corrente 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 (Intermachinery, 2002).

Quanto aos aços revestidos com Zn pelo processo de eletro galvanização, as mesmas condições usuais que se aplicam aos aços não revestidos são utilizadas. O fino revestimento de zinco não afeta apreciavelmente o processo de soldagem, mas se um filme de fosfato estiver presente, a força de soldagem deve ser aumentada para reduzir o seu efeito isolante (Intermachinery, 2002).

Segundo Gedeon (1984), o acréscimo de Downslope e Upslope aumenta a soldabilidade de chapas galvanizadas por imersão a quente (figura 2.10).

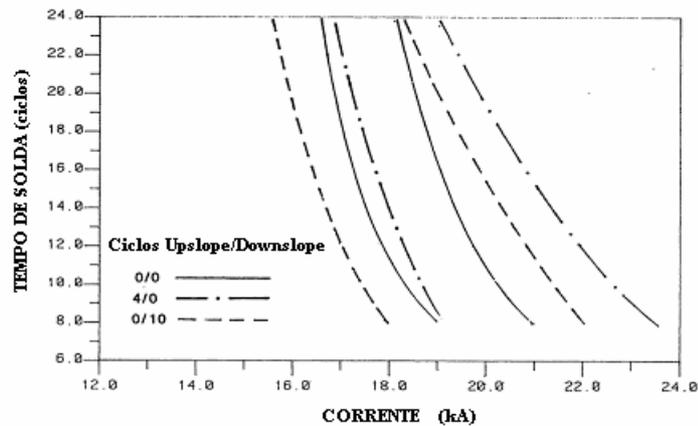


Figura 2.10– Efeitos dos Upslope e Downslope na soldabilidade em um tipo de aço (Gedeon 1984, modificado).

2.10 – CONTROLE DA QUALIDADE DA SOLDA

Uma prática geral no controle da qualidade em soldagem a ponto por resistência elétrica é baseado na análise das propriedades do ponto de solda e na uniformidade e consistência dos resultados. Um critério utilizado nos testes com uma dada amostragem é que os resultados aceitáveis caíam dentro de $\pm 10\%$ de tolerância em relação à média. (Metals Handbook. 1991).

Tipicamente, a resistência de uma junta por solda a ponto é geralmente relacionada às características físicas: medida do ponto de solda, da ZAC, indentação e propriedades do material. De qualquer forma as medidas do ponto de solda têm sido extensivamente relacionados com resistência da junta (Zhou, et. al., 2003).

Existe uma diversidade de medidas recomendadas pelos autores considerada como medida ótima do ponto de solda, a forma mais utilizada é considerar o diâmetro do ponto como $D = 5\sqrt{t}$, sendo t = espessura da chapa. Segundo Zhou (2003) e AWS (1998) o máximo útil da medida do ponto é difícil de especificar em termos gerais. Cada usuário pode estabelecer seus limites de acordo com os requerimentos do projeto e a experiência das práticas (Intermachinery, 2002).

A mínima profundidade (indentação) é geralmente aceita como 20% da espessura da chapa mais fina. Se for menor que este valor, a solda é dita de “fria” por motivo do calor gerado na zona de solda ser muito baixo. O máximo valor da profundidade não deve ultrapassar o 80% da chapa mais fina. Grandes profundidades de indentação resultam em expulsão e rápido desgaste do eletrodo (AWS, 1998). Já Wu (1968) afirma que indentação entre 5% – 10% da espessura da chapa garantem uma boa resistência à solda.

Zhou, (2003) no seu trabalho de simulação computacional encontrou que a medida da ZAC tem um papel importante na análise da resistência da solda devido a altas concentração de tensões dentro e ao redor da ZAC. Espessura da chapa (produzindo maior ponto de solda), resistência do metal base, além da ZAC, são os parâmetros críticos para determinar a qualidade de um ponto de solda.

2.11 – MÉTODOS PARA AVALIAR A QUALIDADE DA SOLDA

Uma solda por resistência pode ser examinada usando procedimentos de ensaios destrutivos e não destrutivos. As dificuldades inerentes a este último ensaio são amplamente conhecidas. Além disso, um procedimento de amostragem segundo o qual um número de componentes são testados para destruição não providencia segurança que todas as soldas sejam de qualidade requerida, toda vez que condições de soldagem podem variar desde uma solda a outra por muitas razões (Andrews, 1975).

Estes testes são ensaios mecânicos utilizados para se obter informações quantitativas sobre o comportamento mecânico de pontos de solda.

Satonara (2000) fez um trabalho de revisão dos métodos de análise da qualidade da solda e concluiu que monitoramento de parâmetros e testes destrutivos são os melhores métodos.

Dentro da idéia de monitorar o processo de solda a ponto, sensores são dispostos ou montados sobre a máquina de solda. Corrente é monitorada por um toróide (bobina) e a tensão monitorada por 2 cabos medindo a diferença de potencial. Esses dois cabos podem ser montados na ponta dos eletrodos, nas pinças ou porta-eletrodos e na carcaça da máquina perto do transformador (Needham, J. C., 1983).

Needham (1983), mostra que com a conexão dos cabos nas pontas dos eletrodos, menores distorções na aquisição dos sinais elétricos são conseguidas.

Uma outra técnica de monitoração é a de filmagem. Cho, (2003) fez uma filmagem com câmera digital de alta velocidade observando os efeitos dos parâmetros do processo na formação e desenvolvimento da lentilha de solda. O trabalho de Cho (2003) será utilizado como base para realizar a filmagem neste trabalho.

O estudo da transferência metálica em solda utilizando o método *synchronized Shadowgraphy* proposto por Balsamo (2000), é um exemplo das técnicas criadas para melhorar a qualidade da solda.

2.11.1 – Inspeção Visual

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

Todas essas conseqüências da solda, além de degradarem o aspecto da superfície, podem dar a impressão de que a solda é defeituosa, como o caso da descoloração ao redor da solda, evidente em aço revestido, mas é um fato que não pode ser eliminado.

2.11.2 – Ensaio não destrutivo

O que tem feito algum sucesso nos últimos anos é o ensaio ultra-sônico. Nesse ensaio a qualidade da solda é avaliada pela observação da forma de onda sonora, que foi previamente aplicada, quando esta retorna ao se deparar com algum obstáculo. Essa observação é feita em um osciloscópio. A desvantagem deste tipo de ensaio é a complexidade das formas de ondas obtidas e a interpretação delas as quais podem ser

complexas e podem demandar muito tempo, o que é não é desejado em uma linha de montagem, motivo pelo qual esse método não está sendo usado extensivamente.

Raios infravermelhos, emissões acústicas são outras técnicas que podem ser utilizadas, mas são muito caras e muito demoradas.

O que está sendo utilizado na atualidade é um acompanhamento on-line do processo, isso quer dizer um monitoramento de parâmetros tais como: corrente e tensão de solda, resistência dinâmica, força do eletrodo entre as principais além do monitoramento do crescimento e da formação da lentilha de solda.

2.11.3 – Ensaios destrutivos

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

2.11.3.1 – Teste por tensão cisalhante

O teste por tensão cisalhante consiste na aplicação de forças de separação nas duas peças unidas. Estas forças são opostas e agem em uma direção paralela à superfície da peça, conforme ilustrado na Figura 2.11.

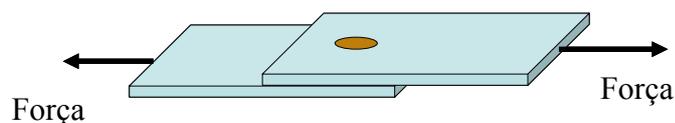
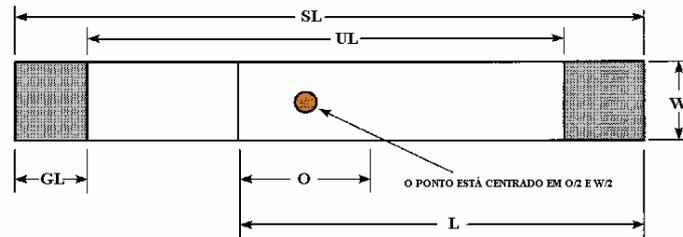


Figura 2.11 – Teste por tensão cisalhante

O corpo-de-prova é carregado até a sua ruptura sob tensão numa máquina padrão para o teste. As dimensões do corpo-de-prova para este teste são especificados pela norma AWS/SAE 8.9M (2002) e são apresentadas na Tabela 2. A avaliação da solda é feita em função do valor máximo da carga utilizada para romper o corpo-de-prova, assim como o modo de ruptura do ponto que, em chapas de até 2 mm de espessura deve apresentar arrancamento da lente de solda de uma das chapas.

Tabela 2.2 - Dimensões dos corpos-de-prova para teste de tensão cisalhante (AWS/SAE D8.9:2002, modificado)



Espessura da chapa (mm)	Comprimento da chapa (L) (mm)	Largura (W) (mm)	Superposição (O) (mm)	Comprimento total (SL) (mm)	Comprimento livre (UL) (mm)	Comprimento a segurar (GL) (mm)
0,60 – 1,29	105	45	35	175	95	40
1,30 a 3,00	138	60	45	230	105	62.5

A junta, quando submetida a tensões cisalhantes, pode falhar através da lente de solda, o que é associado à baixa resistência da lente, ou pelo rompimento do metal base adjacente à lente de solda, o que é associado com alta resistência da solda (Figura 2.12). Exige-se, em geral, um diâmetro de lente de solda de cerca de $4\sqrt{t}$, onde t é a espessura da chapa, para que a falha por rompimento do metal base ocorra. Tal diâmetro, que pode ser menor que $4\sqrt{t}$, depende da finalidade a que tal solda se destina (Intermachinery, 2002).

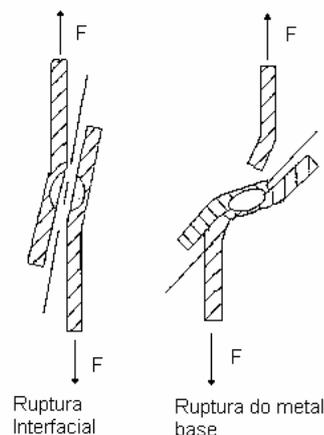


Figura 2.12 - Tipos de falha em teste de resistência ao cisalhamento como função da rotação do corpo-de-prova (AWS 1998, modificado).

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

A dureza da zona de fusão exerce algum efeito na resistência por tensão cisalhante, mas ela contribui ainda mais para a falha na solda quando esta é submetida a forças de impacto ou vibração. Para esta situação, uma dureza excessiva pode resultar em falhas devido a trincas e fadiga. Em alguns casos é empregado um intervalo de pós solda com a finalidade de evitar um esfriamento muito rápido do material onde as trincas ou rachaduras podem aparecer (Intermachinery, 2002).

2.11.3.2 – Teste por tração axial

Neste teste, a solda é tensionada na direção normal à superfície do material. O procedimento adotado a nível industrial pode ser visto na Figura 2.13: o corpo-de-prova é dividido em três regiões iguais e suas bordas são dobradas a 90° num dispositivo adequado formando um “U”. Este corpo-de-prova é soldado a um outro corpo-de-prova com a mesma forma, formando uma estrutura em forma de “H” e o conjunto assim formado é, então, tracionado axialmente.



Figura 2.13 - Formato do corpo-de-prova utilizado no teste de tração axial (Intermachinery, 2002).

2.11.3.3 – Teste de torção

O procedimento utilizado é o mesmo do item sobre teste por tensão cisalhante, sendo que o corpo-de-prova é levado a um dispositivo adequado para sofrer uma torção. Após a ruptura, a lente de solda fica aderida a uma das chapas e recebe o nome de botão de solda, cujo diâmetro é medido por um paquímetro.

2.11.3.4 – Teste de arrancamento

É o tipo de teste mecânico mais comumente usado em soldas a ponto. Ele é usado para determinar a soldabilidade a ponto em todas as espécies automobilísticas. Existem várias razões para o amplo uso de teste: (a) facilidade de execução, (b) baixo custo, (c) utilização em chão de fábrica como um teste de controle de qualidade.

Neste teste, após os corpos-de-prova terem sido soldados, eles são levados a um dispositivo de fixação e com auxílio de uma ferramenta apropriada, são dobrados fazendo-se o arrancamento da lente, como pode ser observado na Figura 2.14(a). Em seguida mede-se, com um paquímetro, o diâmetro do botão de solda em duas direções perpendiculares. A qualidade da solda é avaliada pelo diâmetro da lente de solda que ficará aderida a uma das partes após separação (Powell, H. J., *et. al.*, 1996).

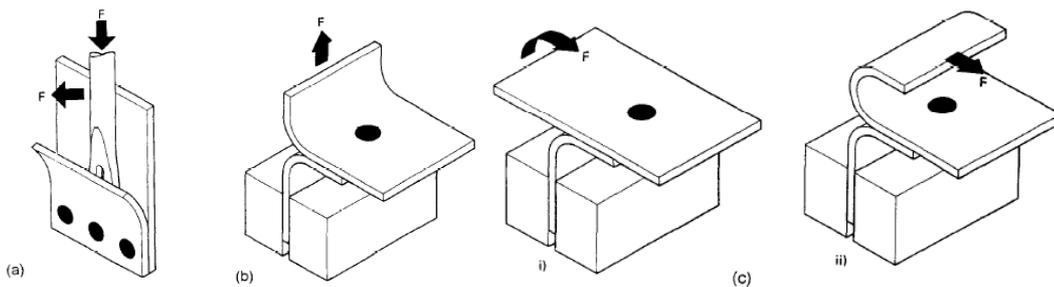


Figura 2.14 – Rotina de testes para arrancamento: a) Com chave tipo pé de cabra, b) Teste mecânico e c) Teste tipo descascamento (Powell, 1996, modificado)

2.11.3.5 – Teste metalográfico

O teste metalográfico é utilizado para medir o diâmetro da lente de solda. O corpo-de-prova é submetido ao teste de torção e o botão de solda é lixado e polido e levado ao microscópio para a determinação de seu diâmetro (Intermachinery, 2002).

2.12 – PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

De forma a garantir repetibilidade e confiabilidade estatística de uma medição, bem como analisar a influência de determinados fatores em repostas com um número factível de ensaios, torna-se extremamente necessário o uso de planejamentos experimentais.

Neste trabalho, além da função de reduzir o número de ensaios, garantir confiabilidade e analisar influência de fatores sobre repostas, os dois planejamentos a serem utilizados (Planejamento Robusto – Taguchi e Planejamento Composto Central - PCC) indicarão os pontos (conjunto de fatores) robusto e ótimo de trabalho, respectivamente. Um ponto robusto é um conjunto de parâmetros menos sensíveis a ruídos do processo. Um ponto ótimo é um conjunto de parâmetros que levam a um valor desejado para a resposta analisada.

No caso do PCC, deverá se fazer uso de um método de otimização acoplado. Estas técnicas e métodos são discutidos a seguir.

2.12.1 – Planejamento Robusto (Taguchi)

O método Taguchi é uma metodologia experimental que tem como objetivo reduzir a variabilidade no desempenho de um processo através da escolha de um método adequado, chamado método robusto. Seu principio fundamental consiste em minimizar o efeito das causas de variação de qualidade sem, contudo, eliminar estas causas. O projeto é implementado através de realizações de experimentos nos quais se introduzem modificações sistemáticas nos fatores de controle, a fim de tornar as repostas insensíveis a presença de ruídos. Os fatores de controle são os parâmetros do Projeto, enquanto os ruídos são fatores não controláveis ou cujo custo de controle seja oneroso (Phadke, 1989).

A maioria dos produtos tem grande quantidade de características de desempenho, as quais são chamadas de repostas. O valor ideal da característica é chamado “Valor ou desempenho alvo” e a variação da resposta em torno do valor alvo é chamado de “variação do desempenho”. O método Taguchi baseia-se em aperfeiçoar somente os mais influentes.

As duas ferramentas usadas no Projeto Robusto são os Arranjos Ortogonais, usados para estudar vários parâmetros do projeto simultaneamente, e as Razões sinal/ruído, que fornecem uma medida quantitativa de qualidade. (Phadkle, 1989).

Um arranjo ortogonal é uma matriz experimental com os parâmetros do processo que se desejam estudar. Existe uma série de Arranjos Ortogonais (L9, L16, L25, etc) e a escolha de um ou outro depende do número de fatores e seus níveis, da conveniência da mudança dos níveis de um determinado fator e das possíveis interações a serem estudadas. Aqui a Ortogonalidade dos arranjos é interpretada como de forma combinatória, ou seja, para qualquer par de colunas da matriz, todas as combinações de níveis de fatores ocorrem, e ocorrem um igual número de vezes (Phadke, 1989).

Com relação à razão sinal/ruído (S/N), esta é uma medida de qualidade, usada para quantificar os efeitos de diferentes fatores na robustez do sistema. O uso da razão S/N tem a vantagem de, uma vez obtido o melhor ajuste que minimize a sensibilidade ao ruído para um dado valor médio de um parâmetro estudado, esse ajuste também é válido para outro valor médio deste parâmetro (Phadke, 1989).

Os problemas no Projeto Robusto podem ser divididos em duas classes principais: problemas estáticos, onde o valor alvo para a característica de qualidade é fixo, e problemas dinâmicos, onde espera-se que a característica de qualidade siga um fator. Para cada classe de problema, tem-se um conjunto de funções específicas. No caso da soldagem, são mais comuns os problemas estáticos e têm-se como exemplos de funções as seguintes: menor-é-o-melhor, nominal-é o-melhor e maior-é-o-melhor (Phadke, 1989).

Deve-se ter em mente que para experimentos padronizados é comum a prática dos ensaios serem executados em ordem aleatória para evitar qualquer tendência (bias) devido a flutuações no processo.

2.12.2 – Planejamento Composto Central – PCC

O PCC é sem dúvida o mais popular planejamento de segunda ordem. Foi introduzido por Box e Wilson (1951). Um PCC para k fatores, devidamente codificados como (x_1, x_2, \dots, x_k) , é formado de três partes:

- 1 – Uma parte fatorial (ou cúbica), contendo um total de n_{fat} pontos de coordenadas $x_i = -1$ ou $x_i = +1$, para todos os $i = 1, \dots, k$;
- 2 – Uma parte axial (ou em estrela), formada por $n_{\text{ax}} = 2k$ pontos com todas as coordenadas nulas exceto uma, que é igual a um certo valor α (ou $-\alpha$);
- 3 – Um total de n_{centr} ensaios realizados no ponto central, onde, é claro, $x_1 = \dots = x_k = 0$.

Para realizar um PCC, é necessário definir como será cada uma dessas três partes. É necessário decidir quantos e quais serão os pontos cúbicos, qual o valor de α , e quantas repetições serão realizadas no ponto central. A localização dos pontos estrela determinam se o planejamento é ortogonal (se os efeitos dos fatores são ortogonais) ou rotável. Rapidamente, rotatibilidade do planejamento se refere a características que o planejamento possa extrair a maior quantidade de informação (fazer predições com a mesma soma de precisão) em todas as direções de superfície ajustada. Um planejamento é ortogonal se os cálculos de todos os termos do modelo de segunda ordem são não correlacionados. Neste bloco experimentos de dois fatores, o mesmo ponto estrela (alfa) poderá ser calculado por qualquer caminho.

Há muitas situações onde a região de interesse é cúbica particularmente quando a região de análise pode ser esférica. Nesses casos, uma variação do uso do PCC é o Planejamento Composto Central de face centrada no qual $\alpha = 1$ deve ser utilizado. Este planejamento localiza ou coloca o ponto central ou axial no centro das faces do cubo. Esta variação do PCC é importante pois algumas vezes um experimento requer somente três níveis de cada fator, e na prática é, freqüentemente, difícil mudar os níveis dos fatores (níveis inteiros ou qualitativos). Isto pode ser vantajoso quando os pontos na extremidade do cubo representam combinações de nível de fatores que são proibitivamente caros ou impossíveis de testar por causa de problema no processo físico. De qualquer forma deve ser anotado que o Planejamento Composto Central – face centrada – não é rotável (Montgomery, 2001).

O cubo face centrada não requer muitos pontos centrais como o PCC esférico. Na prática, 2 ou 3 pontos são suficientes para possibilitar boa variância de predição em toda a região experimental. Isto pode ser notado algumas vezes por que às vezes mais corridas centrais deverão ser empregadas para dar um razoável calculo do erro experimental.

As repetições no ponto central têm duas finalidades: fornecer uma medida do erro puro e estabilizar a variância da resposta prevista. Para estabilizar a variância, uma regra prática é fazer de 3 a 5 ensaios repetidos se α estiver próximo de \sqrt{k} , onde k é o número de fatores, e somente 1 ou 2 se α for próximo a 1. Para obter uma estimativa do erro, quanto mais repetições melhor (Barros Neto *et al.*, 2002).

2.12.3 – Otimização

Otimizar é melhorar o que já existe, projetar o novo com mais eficiência e menor custo. A otimização visa então determinar a melhor configuração de projeto sem ter que testar todas as possibilidades envolvidas.

Um modelo de otimização é composto de uma ou mais funções objetivos, as quais procurão atingir um mínimo/máximo global, através do uso de métodos de otimização (as equações 1 a 4 representam um problema geral de otimização). Estes métodos poden ser diretos e indiretos ou mesmo randômicos (Simulated Annealing e Algoritmos Genéticos) (Vanderplaats, 1984). Existem ainda as funções de restrições laterais e a delimitação do espaço de busca.

$$\text{Minimizar: } F(X), \quad X = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T \quad X \in \mathfrak{R}^n \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a: } g_j(X) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (2)$$

$$h_k(X) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (3)$$

$$X_i^{(L)} \leq X \leq X_i^{(U)}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

onde, $F(X)$ é a função objetivo a ser minimizada para n variáveis de projeto X , no espaço de busca da Equação 4. Esta função objetivo é restringida por J restrições de desigualdade g_j e por K restrições de igualdade h_k .

Um exemplo recente de aplicação de técnicas de otimização em processos de soldagem é o trabalho de Vilarinho et al. (2000), que utilizaram o programa comercial DOT (Vanderplaats, 1984), cuja linguagem é o Fortran, e calcularam os parâmetros de pulso otimizados para o processo MIG pulsado de alumínio (eletrodo ER 4043 - 1,0 mm) e aço inoxidável (eletrodo ER 308LSi - 1,2 mm). Para tanto, foram empregados dois modelos para a velocidade de alimentação (retangular e trapezoidal) e dois métodos de otimização com restrição: um direto (Método das Direções Viáveis - MDV) e um indireto (Método do Multiplicador de Lagrange Aumentado - MMLA). Esta decisão foi tomada devido às equações serem do tipo polinomial, podendo, assim, ser utilizados os métodos clássicos (Vanderplaats, 1984).

No presente trabalho procurar-se-á definir o modelo de otimização, ou seja, deverá ser definida a função objetivo a ser minimizada; as restrições laterais e o método de otimização. Este modelo de otimização deve estar acoplado ao modelo de regressão obtido pelo PCC, onde os dados são gerados estatisticamente e avaliados na faixa operacional de trabalho, de tal forma que o ótimo do modelo seja encontrado.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental deste trabalho consta de duas etapas:

- Primeira Etapa: Verificações de funcionamento dos sistemas da máquina de solda a ponto foram feitos, assim como também os ensaios preliminares para achar a faixa de valores dos parâmetros reais a utilizar neste trabalho, o que é chamado de “envelopes de trabalho”. Um trabalho adicional de filmagem será feito verificando-se a queima do revestimento da chapa, assim como também da formação da lente de solda.
- Segunda Etapa: Com a faixa operacional já definida, são propostos dois planejamentos experimentais (Planejamento Robusto - Taguchi e Planejamento Composto Central - PCC) de forma a reduzir o número de ensaios e garantir a confiabilidade estatística. Os resultados advindos de cada planejamento serão confrontados de forma a se comparar duas abordagens: robustez versus otimização. Ressalta-se que a otimização de uma resposta será conseguida através da utilização do modelo empírico advindo do PCC em um algoritmo de otimização.

3.1 – MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

As soldagens foram executadas na Universidade Federal de Uberlândia, em específico no LAPROSOLDA, que conta com um laboratório voltado para o processo RSW no bloco 5H.

3.1.1 - Máquina de soldagem a ponto.

A máquina utilizada neste trabalho é um equipamento comercial do tipo suspenso com as seguintes características:

- Transformador, de fabricação: Soltronic HT75 2 MF, 440 V, 75 kVA e 170 A;
- Controlador de manufatura: Fase Saldatura, Potência Máx. 54 kVA;
- Pinça de solda movida por cilindro pneumático (figura 3.1);
- Comando eletrônico dos intervalos de tempo, potência e corrente;
- Sistema hidráulico da água de refrigeração;
- Sistema Pneumático;
- Válvulas;

- Chave Geral;
- Cabos primários e secundários.

Os acessórios e/ou sistemas da máquina aparecem na figura 3.2.

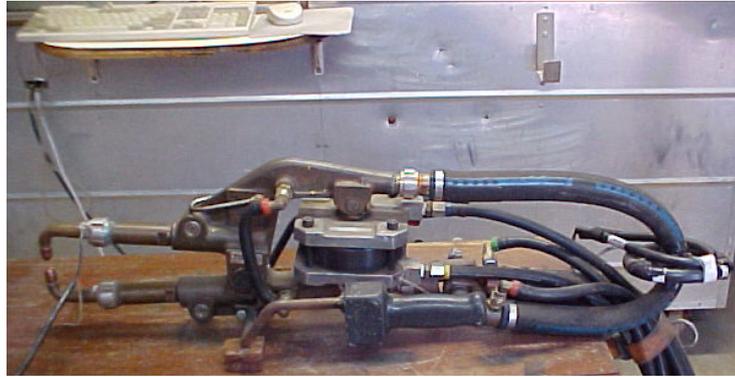


Figura 3.1 – Pinça de soldagem.

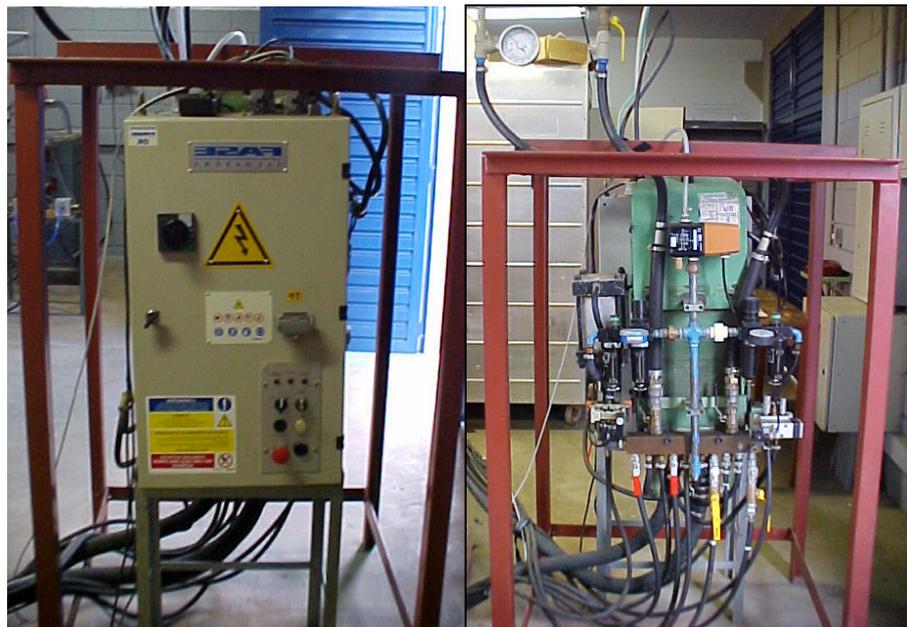


Figura 3.2 – Sistemas e acessórios da máquina de soldagem: Controlador de solda, Transformador, Sistema pneumático, Sistema de refrigeração, Chave geral, Cabeamento.

3.1.2 – Chapas de teste.

As chapas utilizadas neste trabalho foram de aço galvanizado por imersão a quente comercial com dimensões: 25mm x 150mm e espessuras de 1,2 e 2,0mm e revestimento galvanizado de 40 μm , cuja composição química é mostrada Tabela 3.1.

As chapas foram compradas já cortadas nas dimensões desejadas numa empresa local e antes dos realizar os ensaios foram retiradas as rebarbas remanescentes (com lima e esmeril) e as superfícies foram lavadas com sabão para retirar os materiais estranhos, poeira, graxa, óleos, etc, e posteriormente secas com ar comprimido.

Tabela 3.1 – Composição química das chapas de aço galvanizado.

Espessura(mm)	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni
1,5	0,040	0,270	0,014	0,005	0,010	0,018	0,060
2,0	0,056	0,290	0,020	0,014	0,006	0,005	0,050

Espesura(mm)	Cr	Mo	Sn	Al	Nb	V
1,5	0,009	0,002	0,002	0,033	-	-
2,0	0,012	0,002	0,012	0,046	0,001	0,001

Como o projeto é analisar os efeitos da soldagem a ponto em diferentes configurações de chapas, foram feitas 3 configurações de chapas: Configuração A = (2,0 – 2,0)mm; Configuração B = (2,0 – 1,2)mm e Configuração C = (1,2 – 1,2)mm.

Para que o ponto de solda tenha o mínimo de variações e seja realizado nas mesmas condições, foi marcado um ponto no centro em cada configuração de chapa seguindo o seguinte critério: como a chapa tem 25 mm de largura, foi considerada a metade 12,5 mm medidos na frente e nos dois lados laterais (direita e esquerda) assim pelos menos nesses 3 lados a dissipação de calor será similar. Este detalhe está mostrado na figura 3.3.



Figura 3.3 – Marcação do ponto onde a será feita.

3.1.3 – Sistema de fixação.

Um sistema de fixação foi utilizado, com a finalidade de fixar as chapas a soldar visando que todos os ensaios fossem realizados no mesmo sentido e nas mesmas condições, ou

seja, com o mínimo de variações. As chapas são colocadas no meio das garras do sistema de fixação, apertadas por um parafuso fixando-as e logo colocadas na frente das pinças de modo que quando as pinças fecharem atinjam o ponto central marcado nas chapas anteriormente. Para evitar o efeito Shunt (desvio da corrente) as chapas foram isoladas uma da outra e também do sistema de fixação, colocando-se papel entre as superfícies de contato como mostram as figuras 3.4 e 3.5.



Figura 3.4 – Sistema de fixação e o isolamento das chapas para evitar o efeito “Shunt”.



Figura 3.5 – Centralização da chapa no momento da solda.

3.1.4 – Sistema de aquisição e de monitoração dos parâmetros de soldagem.

Os valores de corrente e tensão caracterizam um processo de soldagem. O gráfico desses valores, em função do tempo, fornece a forma verdadeira da onda em cada corrida neste processo. Para aquisição desses valores, foi utilizado um sistema de monitoração dos parâmetros de soldagem que é constituído de um sistema computadorizado de aquisição e tratamento de dados, e de sensores de monitoração de corrente e tensão.

3.1.4.1 – Sistema de monitoração dos Parâmetros

A aquisição dos sinais de corrente e tensão é feita através de uma placa A/D da National Instruments (PCI 6036) com 100 MHz por canal e 16bits, instalada num computador com processador AMD K6-2 450 MHz. Esta placa é comandada por dois programas desenvolvidos no ambiente LabView e implementados com dois VI's (Virtual Instrument = Instrumento Virtual). O primeiro programa, denominado “Fazer_aquisição.vi”, faz a aquisição e armazenamento dos dados relativos aos sinais e o segundo, denominado “Visualizador_de_dados.vi”, permite abrir e tratar os dados salvos pelo primeiro programa. As figuras 3.7 e 3.8 mostram as telas principais dos dois programas. Nele os valores de Corrente, Tensão e Resistência (calculada por: $R = V/I$), são mostrado numa tabela ao lado direito.

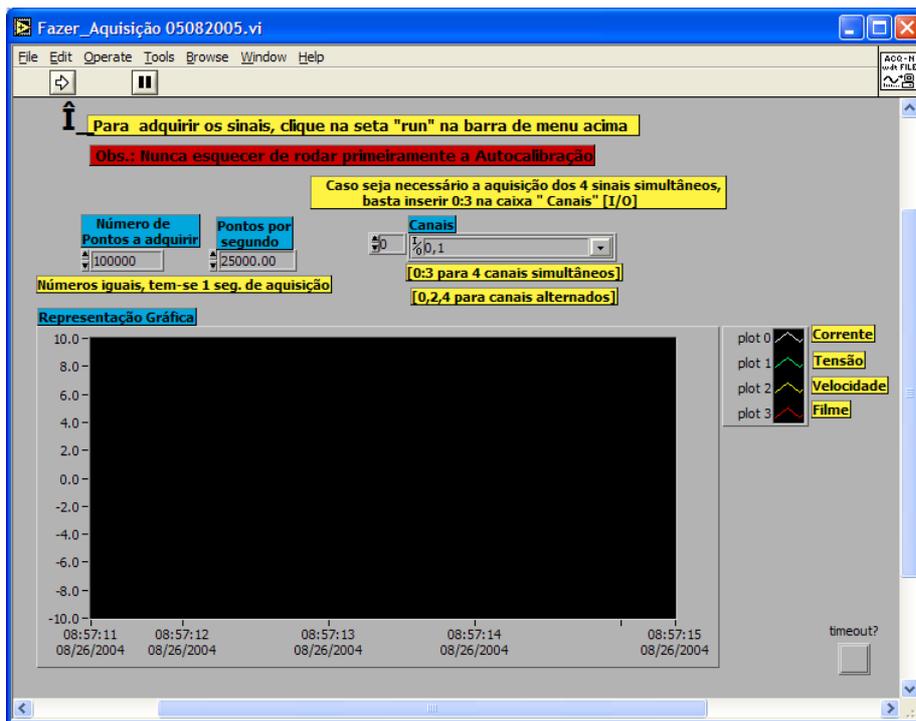


Figura 3.6 – Tela do “Fazer_aquisição.vi”.

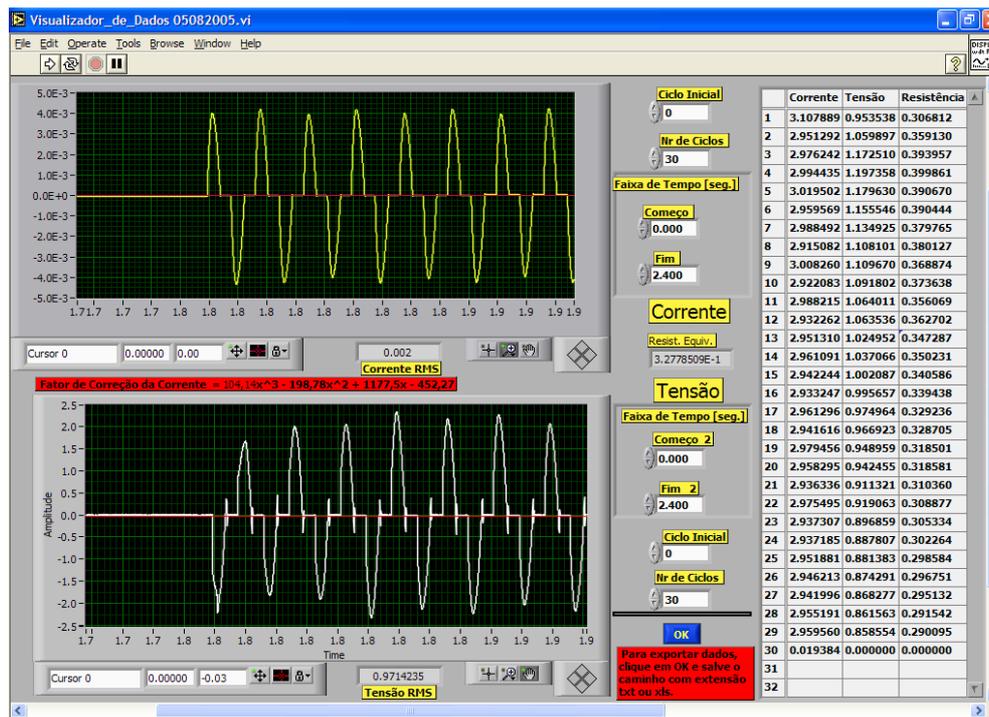


Figura 3.7 – Tela do “Visualizador_de_dados.avi”.

3.1.4.2 – Sensores de monitoração:

Para monitorar os dois parâmetros de soldagem, são utilizados dois canais de entrada da placa A/D, figura 3.8. O sensor utilizado para monitorar os valores de corrente é um toróide, que já estava instalado antes do início dos ensaios preliminares deste projeto.

O toróide mede a tensão induzida pela variação do campo magnético ao redor da corrente que carrega o condutor. O toróide apresenta uma área de núcleo conhecida a qual adquire uma voltagem induzida desde a variação no tempo do campo magnético, logo só pode ser utilizada em medição de AC (Gedeon et. Al., 1987).

O valor máximo da tensão de entrada no terminal da placa é de 10 V. Para a monitoração da tensão foram conectados 2 cabos nos porta eletrodos como mostra a figura 3.9.

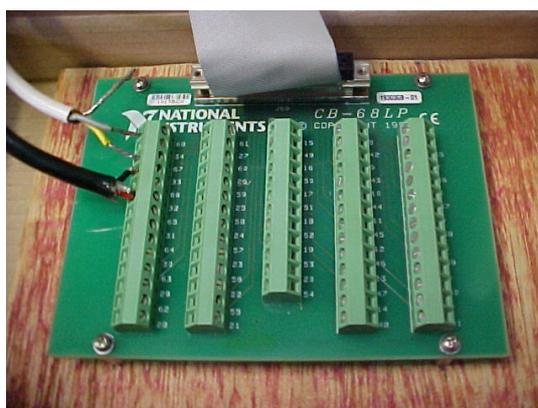


Figura 3.8 – Terminal da Placa de aquisição A/D PCI 6036 da National Instruments.

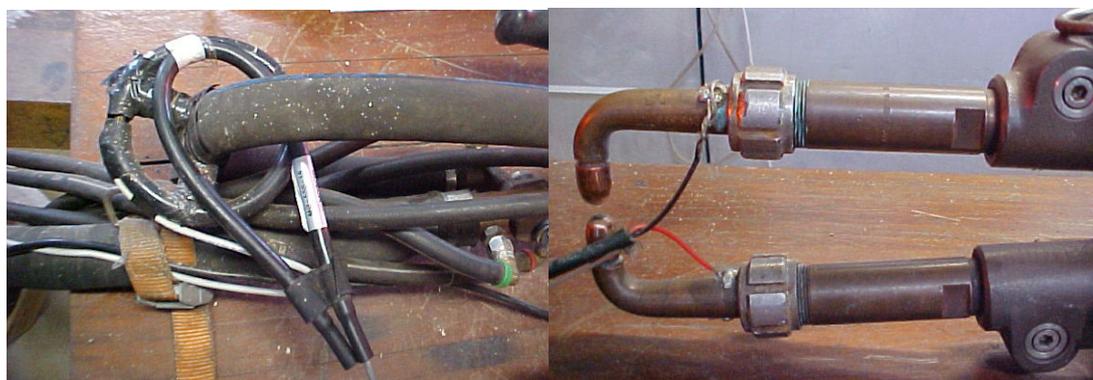


Figura 3.9 – Sensores de: Corrente (Toroide) e Tensão

Cabe ressaltar aqui toda a dificuldade de se adquirir os sinais de tensão e corrente. Como citado na Revisão Bibliográfica (Item 2.9), o sinal de tensão deve ser adquirido o mais próximo possível dos eletrodos, devido ao efeito indutivo do secundário alterar a forma de onda e o valor da tensão. Já o sinal da corrente deve ser integrado antes de ser analisado, pois o princípio de funcionamento de um toróide é a variação do campo magnético, ou seja, a variação (derivada) de corrente. Pela figura 3.10, que retrata a rotina de integração do sinal de corrente feita em LabView, é possível compara o sinal de corrente original e o sinal de corrente integrado. O sinal de corrente passa a ser mais próximo do sinal de tensão, o que é esperado para este processo.

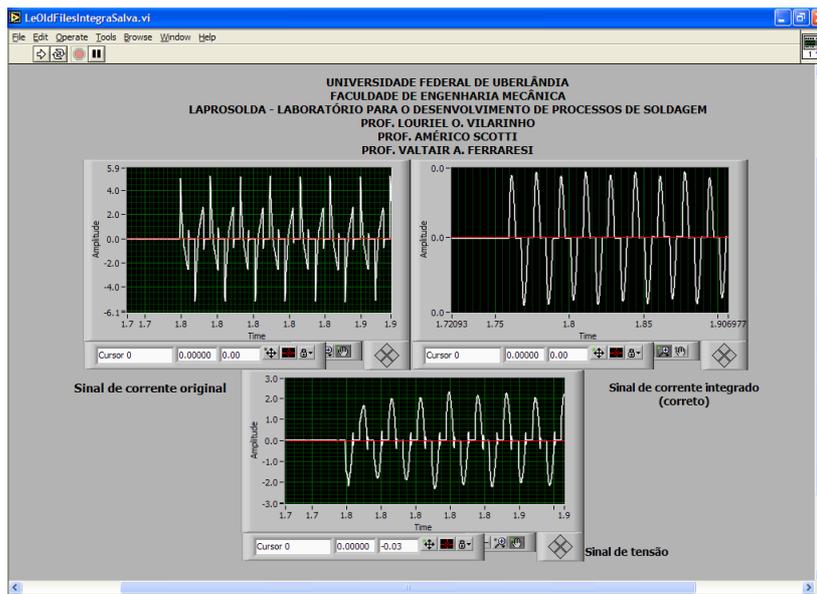


Figura 3.10 – Rotina para integração do sinal de corrente.

3.1.5 – Limitações da máquina de soldagem.

Antes de realizar os ensaios é preciso considerar que a máquina só pode trabalhar sobre uma faixa de corrente de 1 a 6 kA e uma força de eletrodos de 2 a 6 kN como será verificado no 3.2.1.2. Acima dessa corrente, o sistema de proteção da máquina é acionado e acima desta força há vazamento na sanfona da pinça da máquina.

3.2 – TESTES PRELIMINARES

Antes de iniciar os ensaios preliminares para encontrar os parâmetros de soldagem reais a utilizar neste trabalho, teve-se cuidado de verificar que todos os sistemas da máquina de soldagem estavam em bom funcionamento: sistema de aquisição, sistema de força, sistema de refrigeração, números de ciclos para a realização de um ponto de solda, a forma da onda e os valores reais adquiridos pelo sistema de monitoração da placa e do programa. Para cada um desses sistemas da máquina foi feito um teste preliminar com os parâmetros respectivos em cada caso como mostrado a seguir.

3.2.1 – Calibrações.

3.2.1.1 – Sistema de refrigeração.

O sistema de refrigeração da máquina consta de uma bomba da água, um tanque reservatório ao lado dela e o sistema de refrigeração da máquina de soldagem. Na saída da bomba tem uma válvula reguladora de fluxo e na entrada da máquina tem um medidor de pressão (manômetro em kgf/cm^2). Quando a válvula está totalmente fechada o fluxo total é direcionado para a máquina de solda, quando totalmente aberta, o fluxo é dividido entre a máquina de solda e o reservatório. Em cada um desses casos, a pressão é lida no manômetro na entrada da máquina.

A calibração do sistema de refrigeração foi realizada para verificar o valor da vazão no sistema e para determinar uma relação entre as unidades de vazão e as de pressão no manômetro. Aqui não se contava com um equipamento ou sensor específico para fazer a medição, logo, foi feito de forma manual:

- Foi desligada a mangueira do sistema de refrigeração na entrada no controlador de solda, assim a vazão a medir em diferentes regulagens da válvula seria a mesma da entrada na máquina.
- Um recipiente com as medidas em litros, equivalentes ao volume colocado dentro dele, foi utilizado.
- A bomba foi ligada com a mangueira colocada em outro recipiente com a válvula de controle de vazão totalmente aberta e efetuada a leitura do manômetro ($5,8 \text{ kg/cm}^2$). No momento de colocar a mangueira no recipiente de medição o tempo foi medido com um cronômetro, parando o mesmo no momento da água alcançar um volume determinado. O ensaio foi repetido 3 vezes e foi realizado nas 3 posições da válvula: totalmente aberta, totalmente fechada e meio aberta:
 - Pressão máxima = $5,8 \text{ kg/cm}^2 = 0,06 \text{ l/seg}$ (Válvula totalmente fechada).
 - Pressão média = $3,7 \text{ kg/cm}^2 = 0,043 \text{ l/seg}$ (Válvula fechada na metade).
 - Pressão mínima = $1,6 \text{ kg/cm}^2 = 0,03 \text{ l/seg}$ (Válvula totalmente aberta).

3.2.1.2 – Sistema de força.

A calibração da força na pinça de soldagem tem por objetivo achar uma relação entre as unidades dos valores de força, inseridos no terminal de programação da máquina de soldagem, em kN para valores em Kgf aplicados nas chapas no momento da realização da solda.

Para este teste foi utilizado um dinamômetro digital Crown Filizola, e o procedimento de calibração foi o seguinte:

- Foi retirada uma capa de eletrodo da pinça da máquina de solda por que o espaço entre eletrodos era muito pequeno e as orelhas do dinamômetro não cabiam (Este fato pode mudar o verdadeiro valor lido no dinamômetro mas num valor mínimo). A válvula reguladora do sistema de refrigeração deve ser fechada para evitar vazamento.
- O painel de controle foi ajustado do modo só pressão (chave seletora de 3 posições na tampa do controlador de solda).
- Um valor definido, mínimo, foi inserido no terminal de programação, o dinamômetro foi colocado entre as pinças da máquina e foi apertado o start sendo realizado o ensaio e mostrado o valor equivalente no display do equipamento do dinamômetro.
 - Este ensaio foi repetido para diferentes valores dentro do limite da máquina, inseridos no terminal de programação e foram lidos os respectivos valores equivalentes no dinamômetro com os quais foi feita a curva de calibração para este sistema. A figura 3.11 mostra a realização da calibração.
- Pode-se verificar que para valores menores de 2 kN (no terminal de programação) a pinça não fechava e para valores maiores que 6 kN o sistema acusava perdas de ar, vazamento que ia aumentando com o aumento do valor no terminal, sendo por esse motivo considerado os valores 2 e 6 kN como valores limites.
- Com os valores definidos das forças colocadas no controlador e das forças medidas pelo dinamômetro, foi realizada a Tabela 3.2 e a figura 3.12, que exhibe a curva de calibração de forças para a máquina de trabalho.

Tabela 3.2 - Valores de força ajustadas no controlador e valores de força obtidos pelo dinamômetro para a pinça pneumática.

Valor ajustado no controlador (kN)	Valor lido na Pinça 1 (kgf)
2	76
2,5	99
3	124
3,5	143
4	165
4,5	187
5	209
5,5	234
6	257



Figura 3.11 – Seqüência de calibração do sistema de força da pinça.

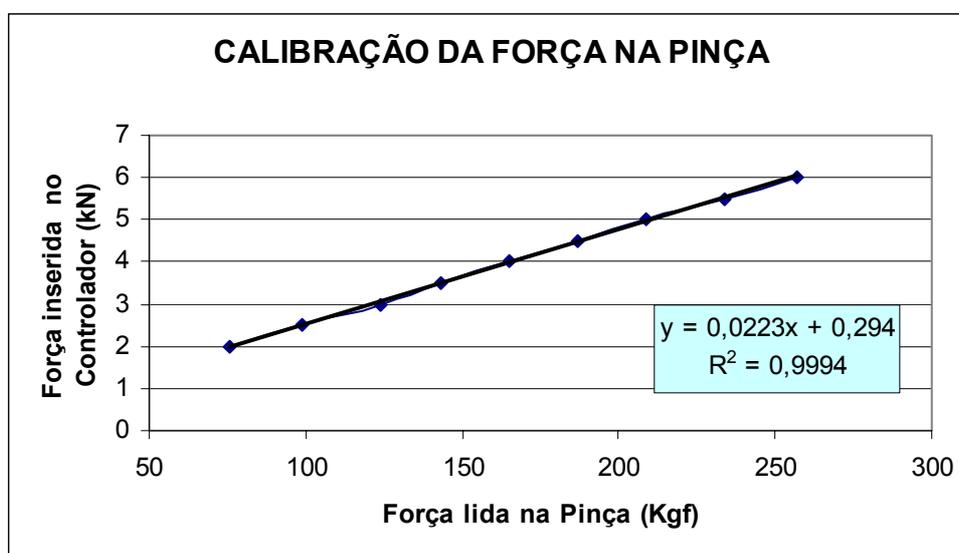


Figura 3.12 – Curva de calibração do sistema de força da pinça da máquina.

3.2.1.3 – Sistema de aquisição de dados.

Com relação ao sistema de aquisição, primeiramente se queria ter certeza se o programa de aquisição do sistema de monitoração da máquina, em ambiente LabView, estava adquirindo os mesmos valores de corrente e tensão inseridos no terminal de programação.

Para esta verificação foi montado o seguinte teste:

- Foram utilizados um osciloscópio com freqüência de aquisição de 100 MHz, um gerador de sinais e o sistema de aquisição da placa a testar.
- Foram retirados os cabos do toróide, que fornecem os valores da corrente na realização da solda, do terminal da placa A/D e colocado no seu lugar o gerador de sinais.
- O osciloscópio foi colocado na saída no terminal da placa A/D em paralelo com a saída que leva o sinal para o computador.

- Foi gerado um sinal com uma forma de onda determinada e de valores de corrente, tensão e número de ciclos definidos no gerador de sinais.
- O sistema de aquisição da placa, assim como o osciloscópio, mostrou os mesmos valores de corrente e tensão assim como a mesma forma de onda.
- Desta forma, conclui-se que a verificação foi bem sucedida.

3.2.1.4 – Verificação dos números de ciclos e dos tempos no ciclo de soldagem.

Estes testes foram realizados para verificar se os números de ciclos inseridos no terminal de programação da máquina de soldagem eram os mesmos adquiridos pelo sistema de aquisição da placa, assim como também verificar se o T_{sub} e T_{des} estavam incluídos no tempo de soldagem inseridos no terminal de programação da máquina, como visto no item 2.6.3.2. No terminal de programação o $T_{sub} = S_Up$ e $T_{des} = S_Dw$ e Tempo de soldagem = Sold.

Para isso foram efetuados ciclos de soldagem com diferentes valores inseridos no terminal de programação sendo verificado que essa quantidade de ciclos era a mesma adquirida pelo sistema de aquisição. Isto pode ser verificado no gráfico que o programa de aquisição mostra para cada processo de solda realizado.

Na figura 3.13 mostra-se o gráfico de aquisição da realização de um ponto de solda e a quantidade de pulsos (ciclos) adquiridos de acordo com os valores inserido no terminal de programação ($S_Up:04 - Sold:08 - S_Dw:01$). Aqui pode-se ver os 4 ciclos da rampa de subida (sendo o quarto ciclo de valor um pouco menor, algo normal em solda, processo aleatório), tem 1 pulso de rampa de descida e pela diferença ($8 - 4 - 1 = 3$) pode-se ver que 3 é o tempo de aplicação da corrente máxima (constante).

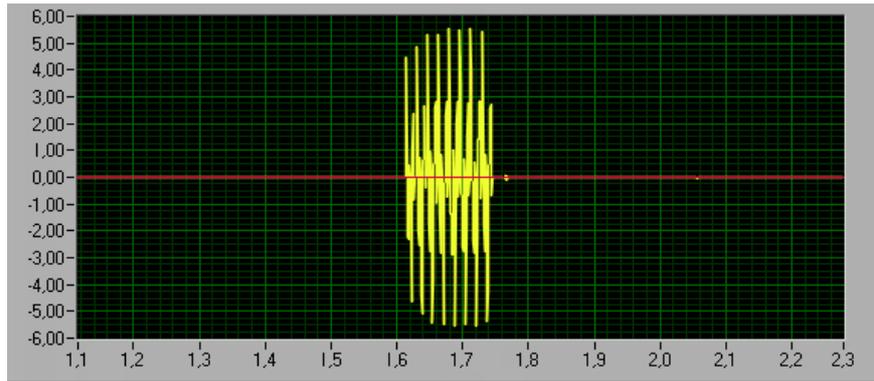


Figura 3.13 – Quantidade de ciclos adquiridos no sistema de aquisição de acordo com a quantidade de ciclos inseridos no terminal de programação.
(S_Up:04 – Sold:08 – S_Dw:01)

Foi também verificado o funcionamento do valor I_{nt} (Intervalo) colocando dois pulsos no tempo total de solda sendo o primeiro um pulso de T_{BZ} mostrado na figura 3.14.

T_{BZ} (Tempo de Burn Zinc) é o tempo, em ciclos, de aplicação de um valor de corrente com a finalidade de queimar o Zinco do revestimento para se obter uma boa superfície de contato entre chapa e chapa.

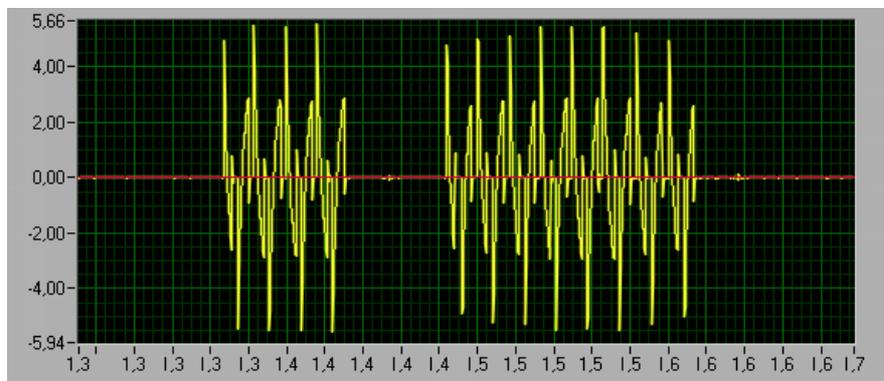


Figura 3.14 – $T_{BZ}:4$ – S_Up:04 – Sold:08 – S_Dw:02.

Deste modo foi verificado e definido que S_Up e S_Dw estão dentro do parâmetro Sold no terminal de programação ou seja o tempo de subida e tempo de descida estão incluídos dentro do tempo de soldagem. Um outro exemplo de contagem de ciclos é mostrado na figura 3.15.

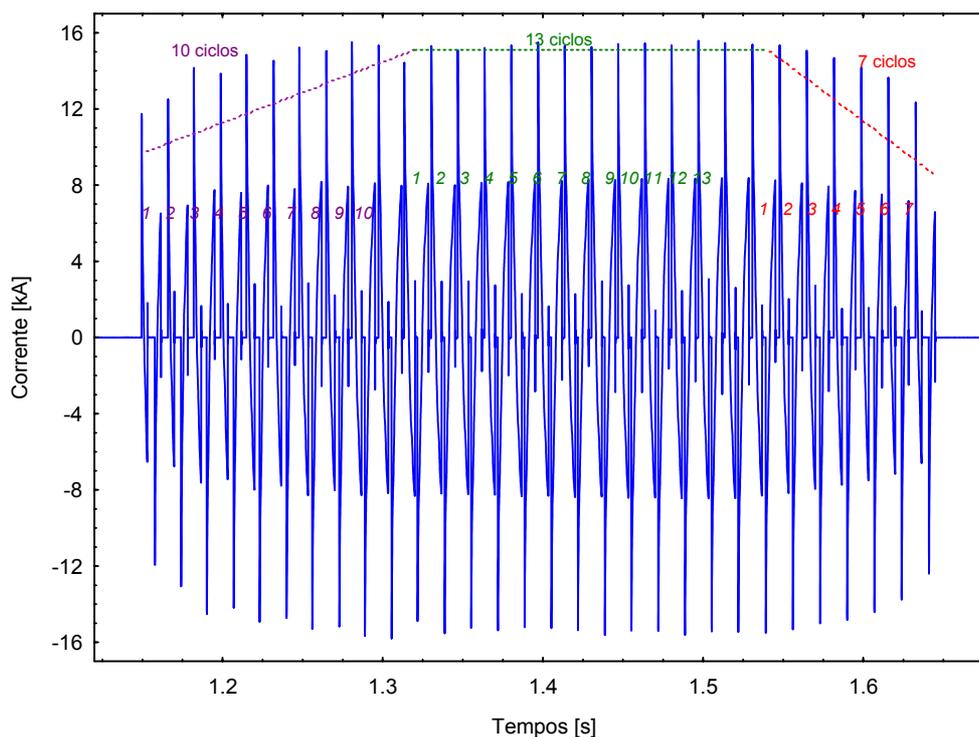


Figura 3.15 - Contagem de ciclos para uma corrente $I_{rms} = 6\text{kA}$, onde $T_{sub} = 10$ ciclos; $T_{cor} = 13$ ciclos; $T_{des} = 7$ ciclos; $T_{total} = 30$ ciclos. Neste caso ajustou-se $T_s = 30$ ciclos no controlador, ou seja, o T_s ajustado engloba o tempo de subida, de corrente e de descida.

É possível ainda mostrar a variação dos valores rms para cada ciclo, como mostrado na Figura 3.16. Nesta figura foram retratados os valores rms dos ciclos da figura 3.14 mais o impulso inicial para a queima do zinco (Burn Zinc). Como forma de validar os cálculos, dois procedimentos foram usados: medição via Labview e via Matlab. Pelos resultados pode-se concluir que a metodologia empregada para cálculo rms é válida.

Embora não seja objeto deste trabalho, a figura 3.17 mostra a variação dos valores rms da tensão e da resistência. Este cálculo poderia ser aplicado no estudo da resistência dinâmica do processo como em Cho & Rhee (2000 e 2002) e Tan et al (2004).

Por fim, a figura 3.18 traz a Transformada Rápida de Fourier (FFT) do sinal de corrente, mostrando que o sinal possui realmente a frequência de 60 Hz e seus harmônicos.

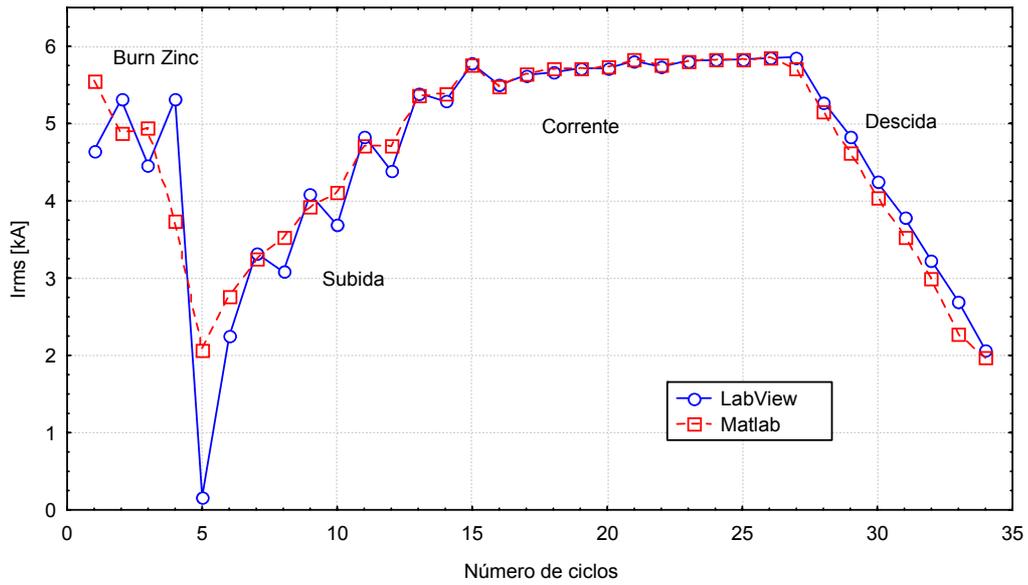


Figura 3.16 – Variação dos valores rms para cada ciclo.

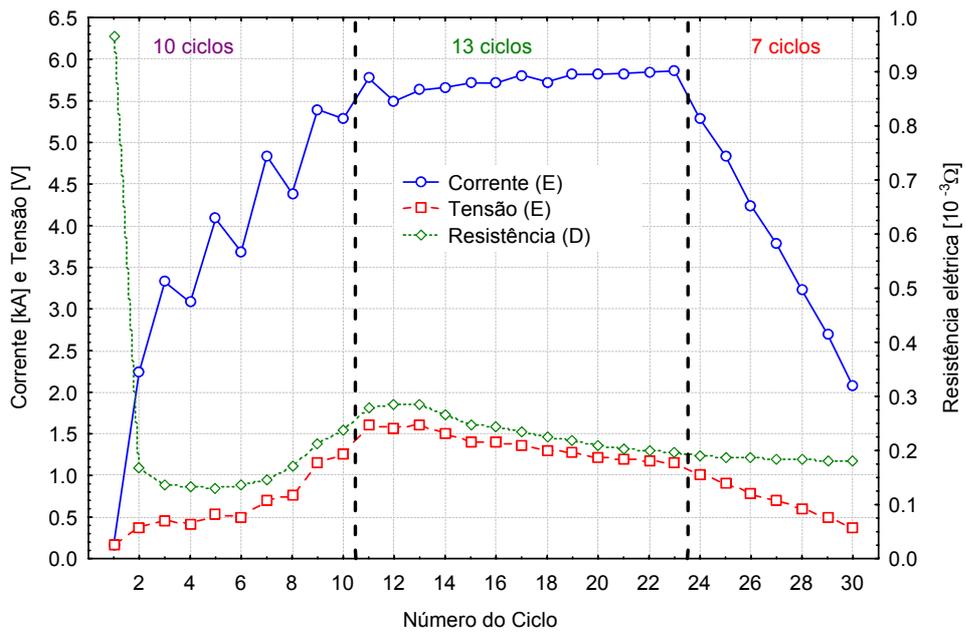


Figura 3.17 - Valores rms para cada ciclo de corrente, tensão e resistência elétrica.

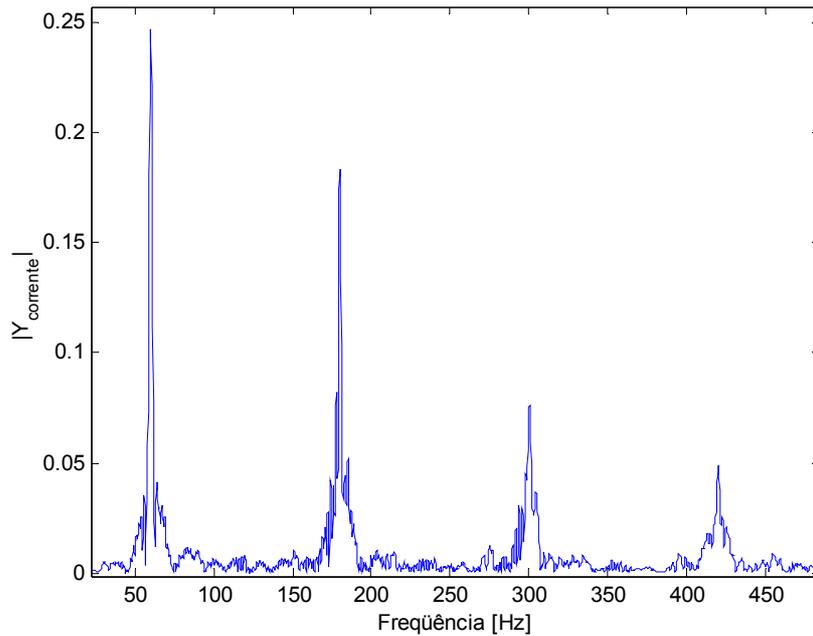


Figura 3.18 – FFT do sinal de corrente mostrando as frequências de 60, 180, 300 e 420 Hz.

3.2.2 – Desalinhamento dos eletrodos

Antes de começar os ensaios preliminares se fez alguns testes para verificar o funcionamento da máquina. Usinou-se a face dos eletrodos com diâmetro de 6 mm, adotou-se valores entre os limites de corrente e pressão e se fez as soldas tentando verificar se a solda podia ser feita com esse diâmetro de eletrodo. Os resultados aparecem na figura 3.19.

Pode-se ver que de um lado das chapas que corresponde ao eletrodo inferior aparece a marca só da metade da face do eletrodo e do outro lado no eletrodo superior aparece uma marca quase imperceptível. Pode-se deduzir do fato que, uma das pinças que desloca os eletrodos estava desalinhada e a face do eletrodo inferior não estava fazendo um contato total. Tentou-se fazer as correções pertinentes, mas o problema continuou da mesma forma. Esta marca inferior poderia mascarar os resultados finais, toda vez que a densidade de corrente ia aumentar de valor. Após saber deste problema decidiu-se trabalhar com eletrodo esférico. Isto foi verificado na revisão bibliográfica de Karagoulis (1994) e Gedeon (1982).



Figura 3.19 – Marcas deixadas pelo desalinhamento das pinças: a) Inferior e b) Superior.

3.2.3 – Envelopes operacionais.

Uma vez que todos os sistemas que conformam o equipamento a utilizar foram testados e verificando-se o bom funcionamento dos mesmos, procedeu-se a fazer primeiro os ensaios preliminares com a intenção de achar as faixas de valores entre os quais se poderia trabalhar. Os resultados destes ensaios preliminares foram gráficos entre os valores máximo e mínimo dos parâmetros de funcionamento da máquina de solda nos quais a solda é realizada da melhor forma, gráficos estes que serão chamados de “envelopes operacionais”.

O procedimento para achar estes envelopes foi o seguinte:

- Os ensaios foram feitos tomando os parâmetros principais: F_{el} (Força do eletrodo), I_s (Corrente de soldagem) e T_s (Tempo de soldagem).
- Se fixou o $T_s = 30$ ciclos. Considerando os valores limites dos parâmetros: $I_s = (2 - 6)$ kA e $F_{el} = (2 - 6)$ kN, se fez a maior combinação possível entre esse parâmetros (F_{el} , I_s) para realizar as soldas, exemplo: (2, 2), (2, 3), etc.
- Os valores considerados como válidos para definir os envelopes de trabalho foram: como valor mínimo o valor no qual a união das chapas é efetivada e como valor máximo um valor abaixo do valor de expulsão do material.
- O material utilizado foram as mesmas chapas de aço galvanizado segundo item 3.1.2., e os parâmetros considerados constantes foram:
 - Vaz (Vazão de água) = 0,06 l/s
 - T_{sub} (Tempo de subida) = 0 ciclo
 - T_{des} (Tempo de descida) = 0 ciclo
 - T_{BZ} (Tempo de Burn Zinc) = 0 ciclo

- Outros parâmetros utilizados e que se mantém constante ao longo do trabalho são Tempo de acostamento (Enc) = 30 ciclos, Tempo de pré-pressão = 30 ciclos e Tempo de retenção = 30 ciclos.

Deve-se ter em conta que o valor inicial de T_s para começar os ensaios foi tomado do trabalho do Guedes (2004).

Nas figuras 3.20 pode-se ver a faísca ou expulsão do material acontecendo no momento da efetivação da soldagem assim como parte do material expulso aderido na chapa.

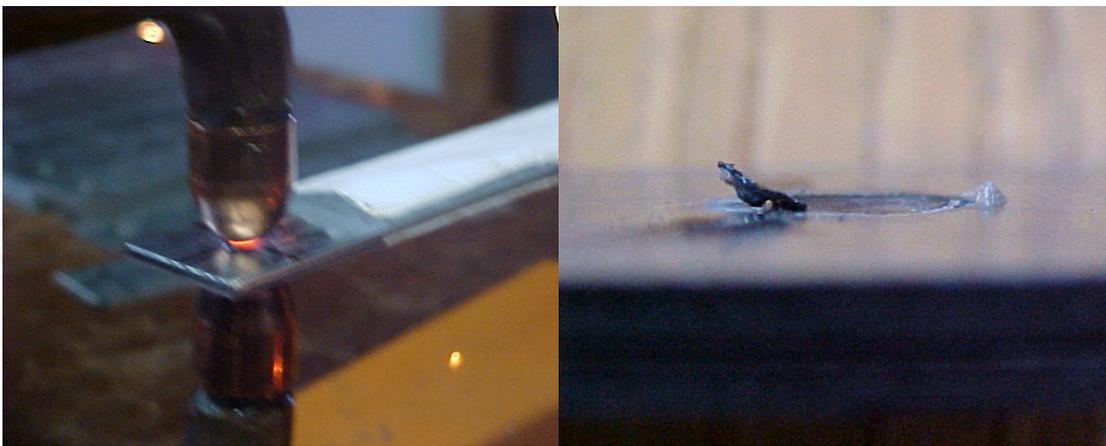


Figura 3.20 – Faísca ou expulsão do material

Na figura 3.21 pode-se ver a expulsão acontecida nas chapas o que origina maior indentação pelo qual esses parâmetros não foram considerados para a elaboração do envelope de trabalho.



Figura 3.21 – Expulsão de material e exagerada indentação.

A tabela 3.3 mostra os valores válidos dos parâmetros para a construção dos envelopes de trabalho onde “x” é a realização de um ponto aceitável em cada realização de solda sendo feita 3 repetições em cada configuração de chapa e em cada combinação de parâmetros. Os quadrados em branco indicam que o ponto de solda não foi conseguido ou teve expulsão do material e/ou a indentação exagerada.

Tabela 3.3 – Resultados dos ensaios para a construção dos 3 envelopes ($I_s - F_{el}$).

F_{el} (kN)	I_s (kA)														
	Configuração A					Configuração B					Configuração C				
	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6
2				xxx	xxx			xxx	xxx	xxx			xxx	xxx	xxx
3				xxx	xxx			xxx	xxx	xxx			xxx	xxx	xxx
4				xxx	xxx			xxx	xxx	xxx			xxx	xxx	xxx
5				xxx	xxx			xxx	xxx	xxx			xxx	xxx	xxx
6				xxx	xxx			xxx	xxx	xxx			xxx	xxx	xxx

Com estes resultados foram criados os 3 primeiros envelopes de trabalho ($I_s - F_{el}$), na parte esquerda da figura 3.22. Visualizando os envelopes se tomou o critério de fixar o valor $F_{el} = 4$ kN. Com o valor F_{el} fixo, procedeu-se a fazer os envelopes para ($I_s - T_s$) mantendo-se parâmetros com os mesmos valores do anterior procedimento. A tabela 3.4 é mostrada a seguir utilizando o mesmo critério para aceitação do ponto de solda.

Com estes resultados foram construídos os outros 3 envelopes de trabalho, na parte direita da figura 3.22.

Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios para a construção dos 3 envelopes ($I_s - T_s$).

T_s (ciclos)	I_s (kA)														
	Configuração A					Configuração B					Configuração C				
	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6
5										xxx					xxx
10					xxx			xxx	xxx	xxx				xxx	xxx
20				xxx	xxx			xxx	xxx	xxx			xxx	xxx	xxx
30				xxx	xxx		xxx	xxx	xxx	xxx			xxx	xxx	xxx
40			xxx	xxx	xxx		xxx	xxx	xxx	xxx			xxx	xxx	xxx
50			xxx	xxx	xxx		xxx	xxx	xxx	xxx			xxx	xxx	xxx
60															

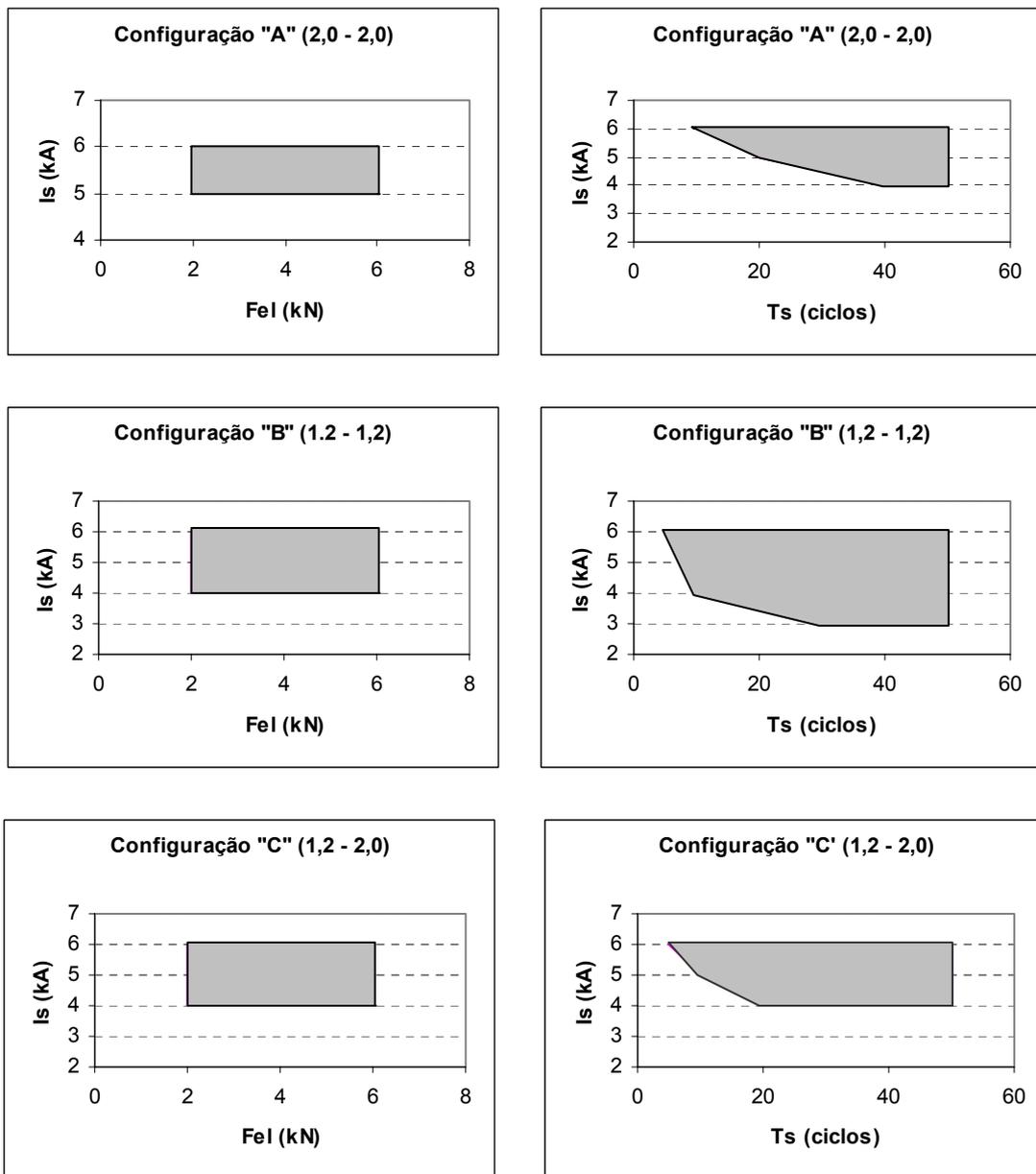


Figura 3.22 – Envelopes operacionais para os parâmetros (Fel – Irms) e (Ts – Irms).

3.2.4 - Filmagem de alta velocidade (queima do revestimento).

A idéia de fazer esta filmagem tem o intuito de fazer um estudo da formação da lentilha, conferir o fusão do revestimento de zinco (Burn Zinc) e monitorar o crescimento ou desenvolvimento da lentilha em sincronismo com os sinais de corrente e tensão nas 3 diferentes configurações de chapas.

As características do equipamento para a realização da solda foram descritas no item 3.1.1 e para a visualização da poça foi utilizada uma câmera digital de alta velocidade

(fabricante Nac, modelo Memrecam CI V-145-J) com lentes F-mount (Nikon 90 mm, f#2,5 e 55 mm de aumento ou zoom de diâmetro em lentes UV). A iluminação foi feita por uma fonte de luz (modelo Arrilite 1000 W, 60 Hz, 45° - 250° C) no modo ponto ou centralizado. Uma taxa de 1000 fotos por segundo e um tempo de apresentação de 1/6000 segundos forma utilizados. A montagem do equipamento é mostrada na figura 3.23 e deve ser ressaltado que as imagens foram sincronizadas com os sinais elétricas utilizando o procedimento descrito por Bálsamo et al. (2000).

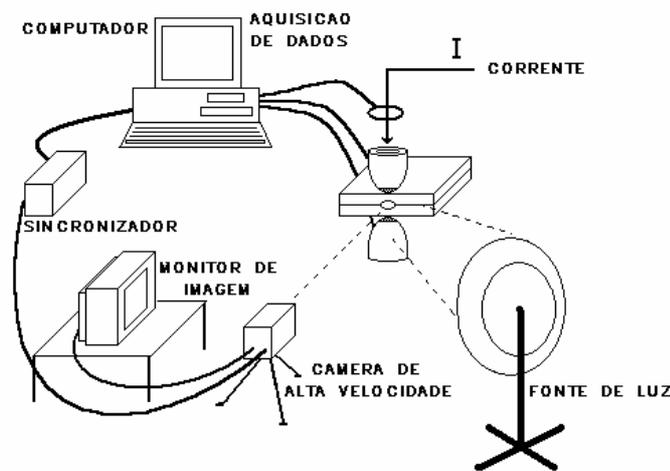


Figura 3.23 – Equipamento experimental para filmagem de alta velocidade.

As capas dos eletrodos utilizados têm um diâmetro externo de 16 mm, tipo esféricos, Classe A, grupo 2, dureza de 75 HRb e 75% IACS. As pontas dos eletrodos foram cortadas de um lado em uma longitude de 3 mm de comprimento. Os eletrodos foram colocados em forma paralela às chapas como mostrado na figura 3.24a. O corte do eletrodo é feito para evitar uma maior pressão no ponto devido à disposição da realização da soldagem além de servir para uma melhor visualização para a filmagem da formação da lentilha como aparecem na figura 3.25.

Toda vez que aqui o ponto final não será soldado sob situações reais, dever ser feito uma comparação entre a situação real (Caso 1) e o enfoque para a visualização da lente (Caso 2) o qual é representado pela figura 3.24b.

Esta comparação deve ser executada sob dois critérios: mesmos níveis de energia e pressão. Considerando que a área no Caso 2 é a metade do Caso 1 ($A_2 = A_1/2$) e pela

aplicação da fórmula 1 encontra-se que a corrente a aplicar no caso da visualização será: ($I_2 = I_1 / \sqrt{2}$). No caso da força do eletrodo (F_{el}), considerá-se que a pressão sobre as chapas deve ser a mesma e como a área diminuiu a metade então a força será a metade do caso real ($F_2 = F_1/2$).

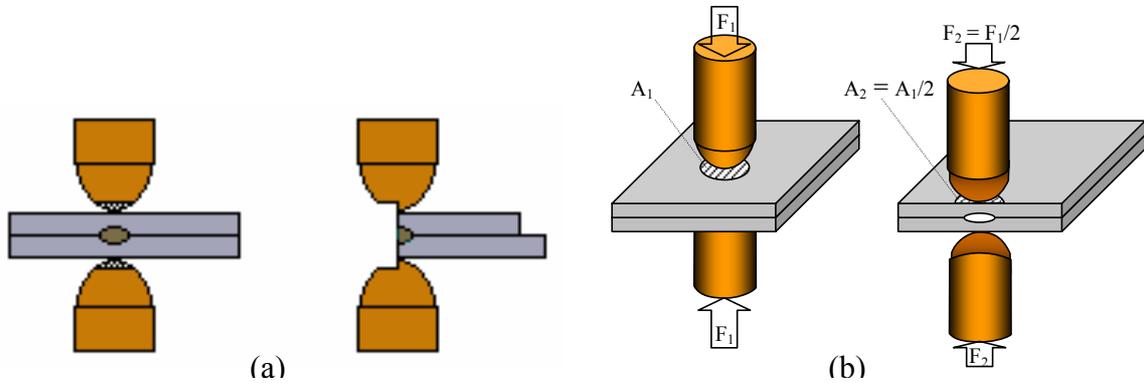


Figura 3.24 – a) Localização das chapas e eletrodos para o procedimento de solda e b) Aspectos geométricos da comparação entre uma situação real e o da visualização.



Figura 3.25 – Capas de eletrodos cortadas.

Dos envelopes operacionais, 5 condições de solda foram escolhidas para serem caracterizadas. Como os envelopes não têm uma figura homogênea, foi considerado como ponto ideal para a soldagem o centróide de cada figura. As corridas 4735, 4736 e 4737 representam a posição dos centróides em cada configuração de chapa nos envelopes de trabalho. Isto foi achado com um programa CAD sendo esses valores: 5 kA, 4,5 kN e 30 ciclos como mostrado no figura 3.26.

Como explicado anteriormente, por ser uma situação diferente estes valores não podem ser exatamente utilizados e devem ser reduzidos para: 3,5 kA, 2,2 kN e 30 ciclos. As corridas 4739 e 4740 foram feitas para fazer uma comparação com a corrida 4735 na análise e visualização dos efeitos da I_{rms} na formação da lentilha.

Os 5 resultados das filmagens aparecem nas figuras 3.27, 3.28, 3.29, 3.30 e 3.31 onde pequenos quadros são apresentados para uma melhor visualização do que acontece em determinados momentos no ciclo da soldagem.

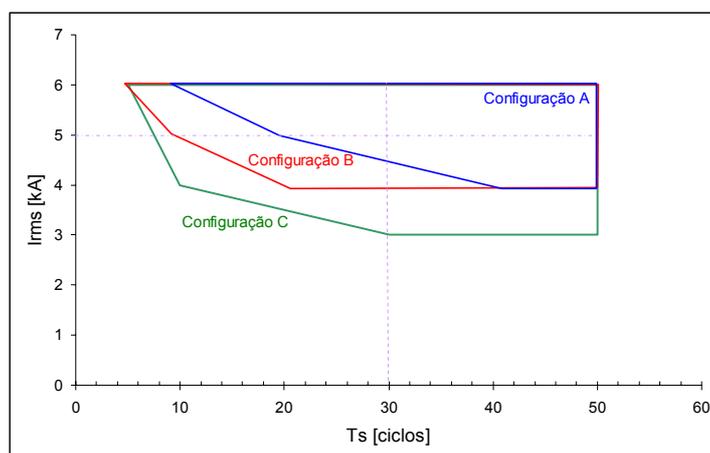


Figura 3.26 – Ponto comum dos envelopes operacionais encontrados.

Tabela 3.5 – Valores das 5 condições selecionadas dos envelopes operacionais. O valor V_{rms} foi medido pelo sistema de aquisição ($T_s = 30$ ciclos e 4,5 kN).

Corrida	I_{rms} (A)	V_{rms} (V)	Config. Chapa
4735	3504	1,06	A
4736	3534	0,90	B
4737	3561	0,81	C
4739	2060	0,73	A
4740	3027	1,01	A

Na corrida 4735 (figura 3.27), a primeira imagem mostra a chapa galvanizada sob a força do eletrodo sem aplicação de corrente. Na segunda imagem após do primeiro ciclo de soldagem, pode-se observar uma gota de zinco formando-se na superfície da chapa superior o que indica o início da queima do revestimento de zinco. Na terceira imagem (10º ciclo de soldagem), o número de gotas é maior na área entre as duas chapas (maior revestimento de zinco) e começam a ser expulsas. Também, o calor pelo efeito Joule começa a deixar a chapa de uma cor vermelha e a formar a lentilha. Na quarta imagem (12º ciclo) esses aspectos são mais pronunciados. No quinto quadro (16º ciclo), pequena quantidade de revestimento existe nas superfícies das chapas em contato e o material começa a fundir. A transferência de calor entre dois ciclos de solda é caracterizada pelos quadros 6 e 7 no 21º ciclo. Embora pequenas, as áreas aquecidas (área vermelha) nessas

duas imagens não são as mesmas (por processamento de imagens esta imagem pode ser aumentada para melhorar a visualização). No 6º quadro, depois do pulso de corrente, a área é maior do que depois do tempo não ativo da corrente no 7º quadro. Isto indica que os pulsos da poça de fusão estão sincronizados com o ciclo dos pulsos. Uma pequena indentação pode ser vista no quadro 6 e 7. No final dos 30 ciclos (8º quadro), a lentilha alcança seu máximo diâmetro e solidifica no 10º quadro, depois de 207 ms da corrente ter-se desligado. O 9º quadro é apresentado para facilitar a comparação com a corrida 4740. Neste tempo (134 ms após dos ciclos cessarem), a lentilha está ainda quente e se a força dos eletrodos fosse retirada, defeitos na lentilha poderiam aparecer.

Na corrida 4736 (figura 3.27), os quadros 1 e 2 são similares aos da corrida 4735. No terceiro quadro (10º ciclo), a lentilha começa a se formar na chapa grossa (maior resistência elétrica). Neste ponto o revestimento já foi queimado, por que há menos material a ser aquecido do que na corrida 4735. Um afundamento na chapa fina é também observado. Esses fatos são também observados no quarto quadro (12º ciclo). No quinto quadro (16º ciclo) a união entre as duas chapas da início e a formação da lentilha é observada. Similarmente para a corrida 4735, nos quadros 6 e 7 a variação da medida da lentilha é observada também. No oitavo quadro (final do tempo de soldagem), a lentilha alcança a sua máxima medida, enquanto que no quadro 9 (após 123 ms do ciclo cessar) a lente se solidifica e a força do eletrodo pode ser retirada.

Na corrida 4737 (figura 3.28), os quadros 1 e 2 podem ser comparados com os das corridas 4735 e 4736, já explicados. No terceiro e quarto quadro (6º ciclo), a explosão e expulsão da gota do revestimento formado é observado entre as duas chapas. Desde o quinto quadro (10º ciclo) ao sétimo quadro (16º ciclo) a lentilha é formada. Similarmente como discutido para as corridas 4735 e 4736, a variação da medida da lente é verificada nas imagens 8 e 9 (21º ciclo). A máxima medida da lentilha é mostrada no quadro 10 (após do 30º ciclo) e a solidificação é obtido após 93 ms da corrente de soldagem ter cessado.

Na corrida 4739 (figura 3.28), usou-se uma corrente mais baixa que na corrida 4735. Na segunda imagem uma pequena queima do revestimento é observada se comparada com a da corrida 4735. No terceiro quadro, mudança de cor pode ser observada, mas sem formação da lentilha. Isto é também observado nos quadros 4, 5 e 6. O ciclo de soldagem finaliza sem a fusão do material no quadro 7. No quadro 8 (após 16 ms do ciclo cessar) e 9

(após 256 ms do ciclo cessar), o calor é espalhado através das chapas e no quadro 10 podem-se ver as chapas separadas após o fim da soldagem e do retiro da força dos eletrodos, isso devido à não realização do ponto de solda para a união entre elas.

Na corrida 4740 (figura 3.29), uma corrente intermediária é usada para comparar com a corrida 4735 e 4739. Os mesmos eventos da corrida 4735 podem ser observadas, mas em uma menor escala. Uma importante observação é o tempo de solidificação. Como anotado durante a análise da corrida 4735, a lentilha é completamente resfriada em 207 ms após o ciclo finalizar, enquanto que na corrida 4740 acontece em 134 ms após o fim de aplicação da corrente, por causa de menor nível de corrente. Como um futuro trabalho, este tempo de solidificação pode ser modelado (analiticamente ou numericamente) e os resultados podem ser checados usando este trabalho experimental.

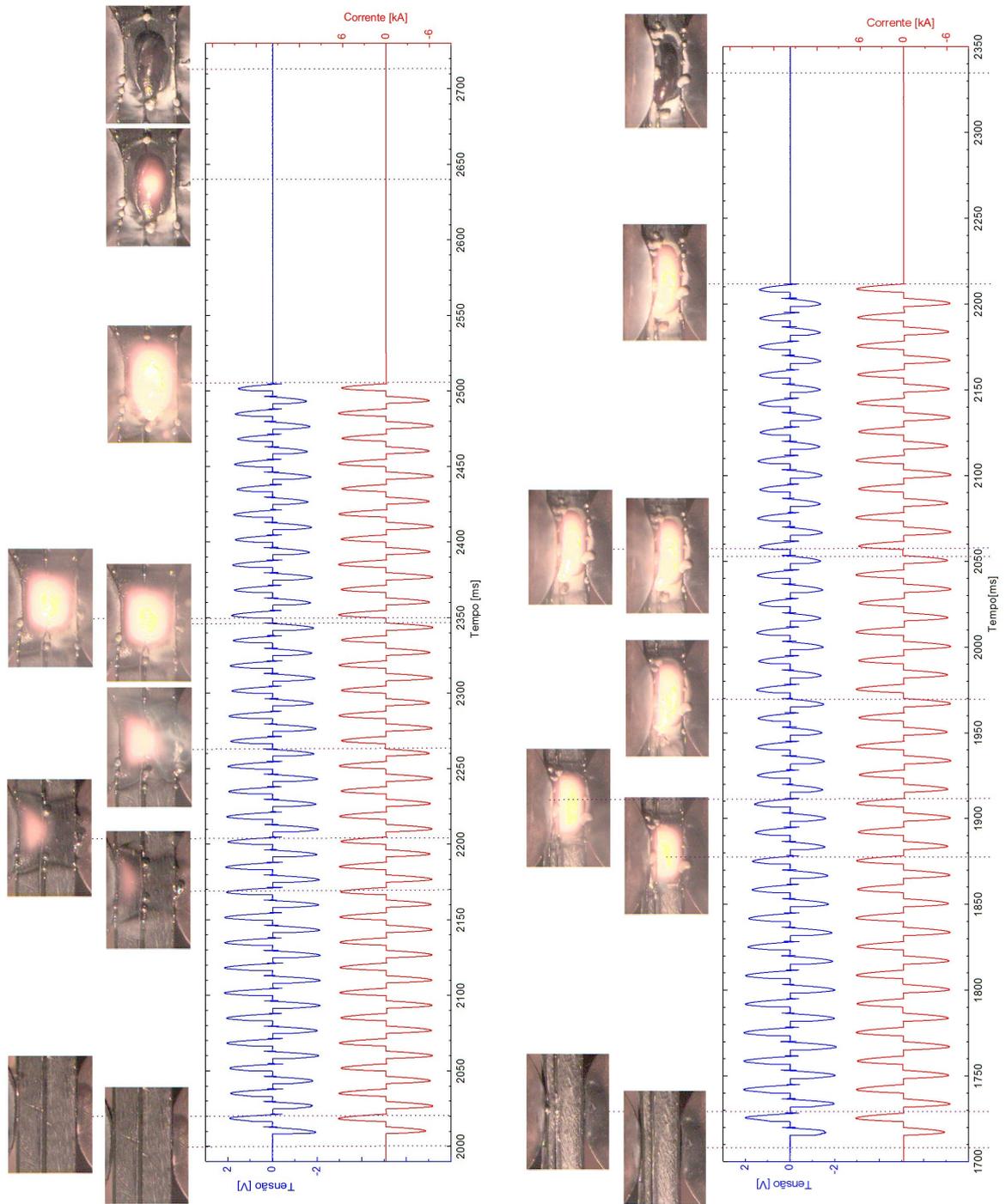


Figura 3.27 - Imagens de alta velocidade sincronizadas com sinais elétricos para a corrida 4735 (esquerda) e 4736 (direita).

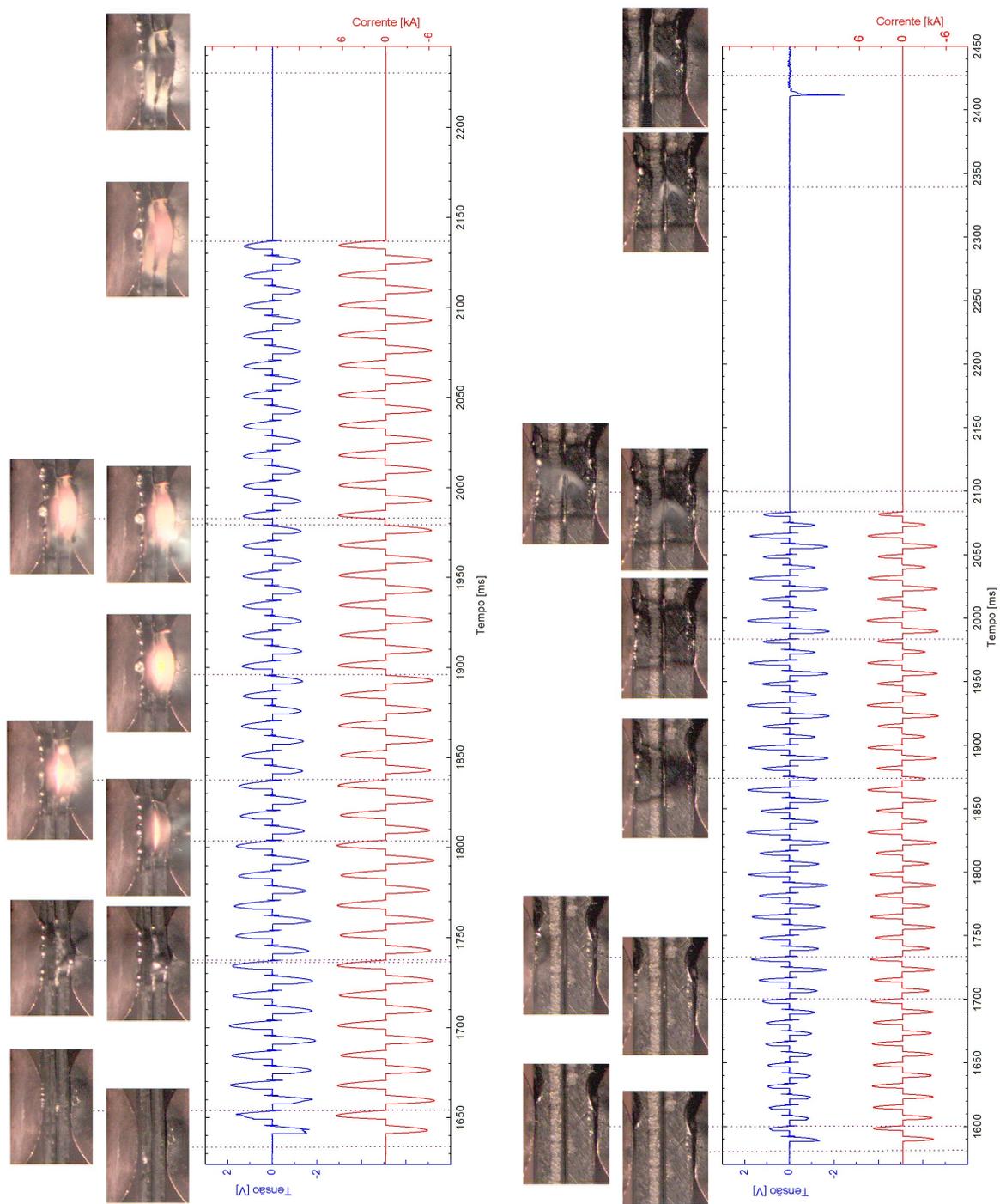


Figura 3.28 - Imagens de alta velocidade sincronizada com sinais elétricos para a corrida 4737 (esquerda) e 4739 (direita)

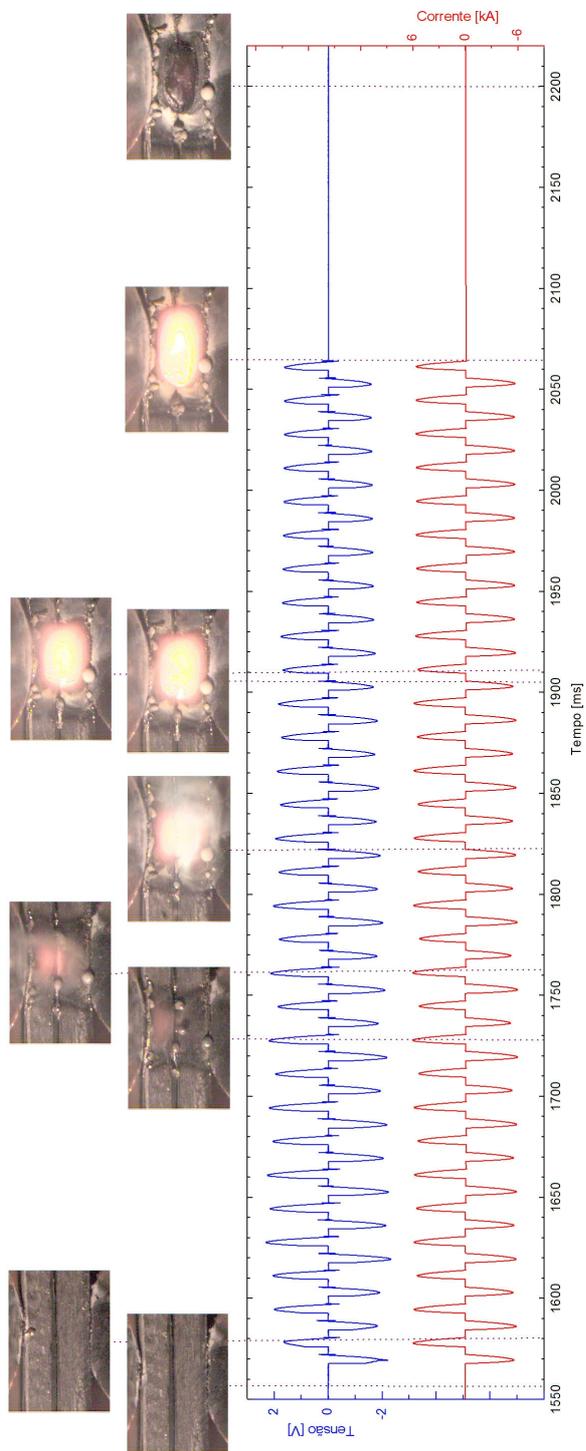


Figura 3.29 - Imagens de alta velocidade sincronizada com sinais elétricos para a corrida 4740.

3.3 – PROPOSIÇÃO DO MÉTODO DA ENERGIA ESPECÍFICA

3.3.1 - O que é Energia Específica (em função da espessura da chapa).

Na realização de um ponto de solda uma determinada energia calorífica é consumida. Como visto na equação 1 (Capítulo 2), a energia é função de I_s , R e T_s . O controle do valor da energia pode ser realizado por mudanças de valores de I_s e T_s . Já o valor R está determinado pelas características do material, composição química, espessura total do material utilizado, revestimentos, etc.

Na realização deste trabalho de uma forma diferente ao enfoque de outros pesquisadores ao estudar e monitorar os parâmetros de soldagem para atingir uma melhor qualidade do processo e do ponto de solda, será utilizado o denominado “Método da Energia Específica”.

A idéia aqui foi de fixar o valor da energia no ponto ideal nos envelopes de trabalho (centróide) em cada configuração de chapa, para depois determinar os valores de corrente a aplicar em cada corrida.

Segundo Weber (1994), a resistência na peça de trabalho em um processo de solda, pode ser calculada somente ponto por ponto de solda pelos parâmetros tensão de eletrodo e corrente dinâmica, em um instante de tempo devido a que é um processo dinâmico. Para de alguma forma facilitar a análise pelo complicado da medição da resistência, utilizaremos a energia em função da resistência R , como mostrado nas equações 2 e 3. Este enfoque apresenta um erro intrínseco, já que a resistividade do material é uma função da variação da temperatura (equação 2), logo R será variável no tempo. A energia em função da resistência será uma simplificação adotada neste trabalho. Como trabalho futuro pode-se averiguar este efeito via simulação numérica ou ainda levantar um estudo sobre os valores de resistência dinâmica, calculados pela lei de Ohm para o valor de rms de cada ciclo (o programa de aquisição já contempla este aspecto), como foi mostrado na figura 3.17.

$$R = \frac{\rho(T_e).L}{A} \dots\dots\dots(2)$$

$$E_{esp} = \frac{E}{R} = I_{rms}^2 \times T_s \dots\dots\dots(3)$$

Onde: R = Resistência do material base [Ω];

$\rho(T_e)$ = Resistividade do material em função da temperatura [$\Omega\text{-mm}^2/\text{m}$];

L = Espessura das chapas (entre eletrodos) [m];

A = Área da passagem da corrente (diâmetro da face do eletrodo) [mm^2];

E_{esp} = Energia específica [J/ohm];

E = Energia total [J];

I_{rms} = Corrente eficaz [A];

T_s = Tempo de soldagem[ciclos].

3.3.2 – Modelamento matemático (demonstração da Energia)

O cálculo da equação 3 para a Energia Específica na RSW traz uma complicação que é o formato da onda da corrente, onde serão usados tempos de subida, corrente e descida. Desta forma surge uma questão: como calcular um valor rms global? Seria através da medição do valor rms da corrente para todo o ciclo de solda ou seria a soma das energias em cada ciclo (subida, corrente e descida)?

O ideal seria o cálculo de somente um valor de corrente rms a ser ajustado, pois simplificaria os cálculos para manutenção da mesma energia específica. Entretanto, é plausível que a energia específica total do sistema seja a soma das energias em cada ciclo. Felizmente, não é necessário optar por uma ou outra abordagem, haja vista que elas são iguais, como demonstrado a seguir.

No primeiro caso (valor rms global de corrente), a energia específica tem a forma dada pela equação 4. Já para representar a energia do sistema como sendo a soma das energias de cada ciclo, tem-se a equação 5. Esta equação pode ser re-escrita na forma da equação 6. Retornando à equação 4, por definição de valor rms, é possível escrever a equação 7, que pode ser desmembrada na forma da equação 8.

$$E_1 = I_{rms_global}^2 \cdot \Delta T \dots\dots\dots(4)$$

$$E_2 = E_{SUB} + E_{COR} + E_{DESC} \dots\dots\dots(5)$$

$$E_2 = (I_{rms_SUB}^2 \cdot T_{SUB}) + (I_{rms_COR}^2 \cdot T_{COR}) + (I_{rms_DESC}^2 \cdot T_{DESC}) \dots\dots\dots(6)$$

$$I_{rms_global}^2 = \frac{\int_0^{\Delta T} I^2 dt}{\Delta T} \dots\dots\dots(7)$$

$$I_{rms_global}^2 = \frac{\int_0^{T_{SUB}} I^2 dt + \int_{T_{SUB}}^{T_{SUB}+T_{COR}} I^2 dt + \int_{T_{SUB}+T_{COR}}^{\Delta T} I^2 dt}{\Delta T} \dots\dots\dots(8)$$

Entretanto, com base na equação 7 é possível escrever para cada ciclo:

$$I_{rms_SUB}^2 = \frac{\int_0^{T_{SUB}} I^2 dt}{T_{SUB}} ; I_{rms_COR}^2 = \frac{\int_{T_{SUB}}^{T_{SUB}+T_{COR}} I^2 dt}{T_{COR}} \text{ e } I_{rms_DESC}^2 = \frac{\int_{T_{SUB}+T_{COR}}^{\Delta T} I^2 dt}{T_{DESC}} \dots\dots(9)$$

Assim, a equação 8 pode ser escrita na forma da equação 10 ou 11 (que é igual a equação 6), ou seja, $E_1 = E_2$.

$$I_{rms_global}^2 = \frac{(I_{rms_SUB}^2 \cdot T_{SUB}) + (I_{rms_COR}^2 \cdot T_{COR}) + (I_{rms_DESC}^2 \cdot T_{DESC})}{\Delta T} \dots\dots\dots(10)$$

$$I_{rms_global}^2 \cdot \Delta T = (I_{rms_SUB}^2 \cdot T_{SUB}) + (I_{rms_COR}^2 \cdot T_{COR}) + (I_{rms_DESC}^2 \cdot T_{DESC}) \dots\dots(11)$$

Desta forma, estimar-se-á I_{rms_global} no planejamento experimental através da equação 12, já definida pela equação 3.

$$I_{rms_global} = \sqrt{\frac{E}{\Delta T}} \dots\dots\dots(12)$$

Resta ainda uma dúvida: Como ajustar este I_{rms_global} ? Será que o controlador ajusta este valor, ou o valor do Tempo de corrente? Ensaio mostraram que o valor ajustado no controlador (I_{ajust}) corresponde ao patamar quando a corrente é constante, ou seja, fora dos tempos de subida e descida. Assim, é necessário correlacionar o valor do I_{rms_global} desejado (calculado no planejamento experimental) com o valor prático a ser ajustado no controlador (I_{ajust}).

3.3.3 – Valor I_{rms} no processo e no terminal de programação

No decorrer do projeto, teve-se a necessidade de verificar se a corrente que o terminal de programação do controlador de solda mostrava era o valor verdadeiro da I_{rms} do ciclo de solda. As figuras 3.30 e 3.31 mostram as formas dos testes feitos para a verificação. No primeiro teste, figura 3.30, resultou que $I_{rms} = I_{max}$ ($T_{sub} = T_{des} = 0$). No segundo teste, figura 3.31, resultou $I_{rms} < I_{max}$.

Como dito em 3.3.2.1 para correlacionar o I_{rms_global} com o I_{ajus} , tem-se que fazer um fator de correção (F_{corr}) que faça $I_{rms} = I_{ajust}$ como mostrado na figura 3.31. Deve-se ressaltar que os valores adquiridos pelo sistema de aquisição são valores I_{rms} (foi verificado achando-se a média dos valores adquiridos pelo sistema cujo valor deve ser igual ao valor I_{rms} que aparece no terminal de programação).

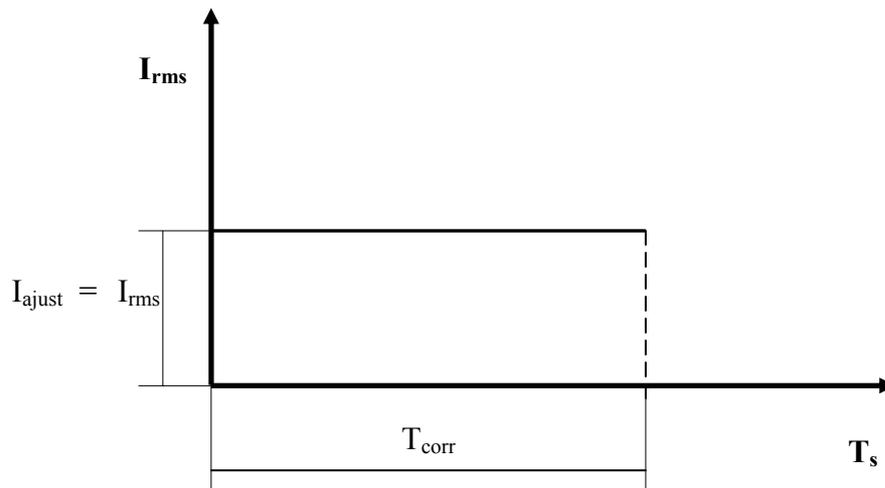


Figura 3.30 – Ensaio com $T_{sub} = T_{des} = 0$.

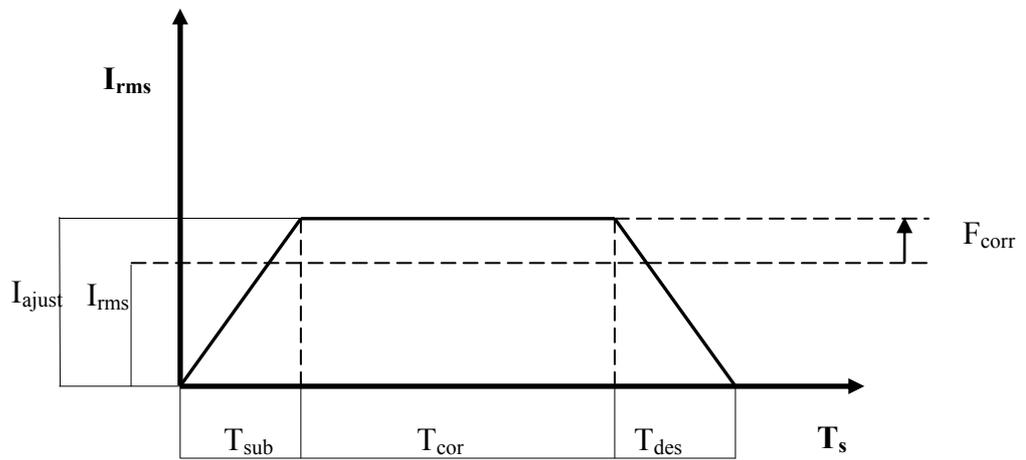


Figura 3.31 – Ensaio para valores diferentes de T_{sub} , T_{des} e T_{cor} .

3.3.4 – Cálculo do F_{corr}

Para o cálculo do fator de correção a ser usado em um valor de corrente a ser ajustado (I_{ajust}) de forma que ao final do ciclo seja medido o valor de corrente I_{rms} real e desejado. Para tanto, deve-se fazer uso das relações expressas na figura 3.32.

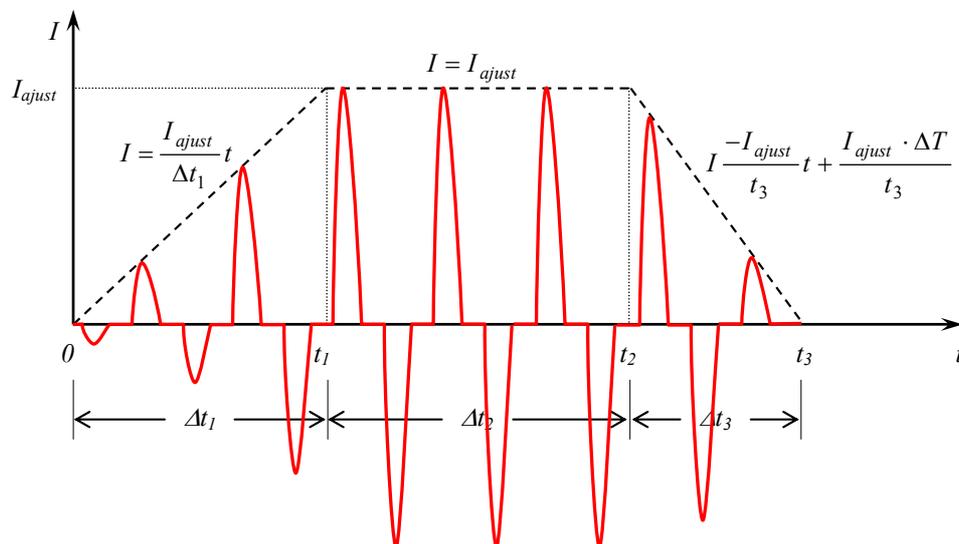


Figura 3.32 – Relação entre os tempos de subida, corrente e descida.

Semelhantemente ao já descrito no Item 3.3.2, pela equação 8, é possível calcular o valor da corrente rms global (I_{rms_global}) pela equação 13. Efetuando-se as passagens matemáticas mostradas nas equações 14 a 16, é possível chegar à equação 17, que traz a correlação final

entre a corrente a ser ajustada em função da corrente rms desejada, ou seja, o fator de correção é dado pela equação 18.

$$I_{rms_global}^2 \cdot \Delta T = \frac{\int_0^{t_1} I^2 dt}{\Delta t_1} \cdot \Delta t_1 + \frac{\int_{t_1}^{t_2} I^2 dt}{\Delta t_2} \cdot \Delta t_2 + \frac{\int_{t_2}^{t_3} I^2 dt}{\Delta t_3} \cdot \Delta t_3 \dots\dots\dots(13)$$

$$I_{rms_global}^2 \cdot \Delta T = \int_0^{t_1} I^2 dt + \int_{t_1}^{t_2} I^2 dt + \int_{t_2}^{t_3} I^2 dt \dots\dots\dots(14)$$

$$I_{rms_global}^2 \cdot \Delta T = \int_0^{t_1} \left(\frac{I_{ajust}}{\Delta t_1} t \right)^2 dt + I_{ajust}^2 \int_{t_1}^{t_2} dt + \int_{t_2}^{t_3} \left(\frac{-I_{ajust}}{t_3} t + \frac{I_{ajust} \cdot \Delta T}{t_3} \right)^2 dt \dots\dots(15)$$

$$I_{rms_global}^2 \cdot \Delta T = \frac{I_{ajust}^2 \cdot \Delta t_1}{3} + I_{ajust}^2 \cdot \Delta t_2 + \frac{I_{ajust}^2 \cdot \Delta t_3}{3} \dots\dots\dots(16)$$

$$I_{ajust} = I_{rms_global} \sqrt{\frac{\Delta T}{\frac{\Delta t_1}{3} + \Delta t_2 + \frac{\Delta t_3}{3}}} \dots\dots\dots(17)$$

$$F_{corr} = \sqrt{\frac{T_{sub} + T_{cor} + T_{des}}{\frac{T_{sub}}{3} + T_{cor} + \frac{T_{des}}{3}}} \dots\dots\dots(18)$$

3.3.5 Testes I_{rms} utilizando o F_{corr} .

Com o valor de F_{corr} foram feitos testes para verificar o seu funcionamento. Tomou-se como base as figuras 3.30 e 3.31 e se testou com diferentes valores de T_{sub} , T_{des} e T_{cor} . Pôde-se verificar ao final que para valores muito altos de T_{sub} e T_{des} o F_{corr} não funciona muito bem, existindo uma diferença entre os valores, como mostrado na tabela 3.6. Destes ensaios pode ser visto que para valores muito grandes de T_{sub} e T_{des} os valores de I_{aj} e I_{rms} resultam diferentes. Isto diz da concordância com a literatura onde Tempos de aplicação de corrente devem ser mínimos.

Tabela 3.6 – Resultado dos testes da I_{rms} .

T_{sub} (ciclos)	T_{cor} (ciclos)	T_{des} (ciclos)	I_{ajust} (kA)	$I_{rms_desejado}$ (kA)	I_{rms_medido} (kA)
20	10	20	5,84	4,0	4,3
0	50	6	3,84	3,67	3,63
3	35	3	4,5	4,3	4,3
6	20	6	5,66	4,86	4,85
20	10	20	5,8	4	4,1
20	20	20	5,36	4,0	4,07

Uma vez verificados e corrigidos todos os sistemas que envolvem o equipamento da máquina de solda a ponto, procedeu-se ao planeamento estatístico a ser utilizado no trabalho.

3.4 – PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO

A segunda etapa deste trabalho foi analisar os resultados sob dois conceitos: achar o conjunto de parâmetros que para uma dada resposta (indentação, diâmetro do ponto e resistência mecânica) que representem: um o ponto ótimo e outro o ponto mais robusto de solda, e posteriormente fazer uma comparação dos dois e definir qual é o mais conveniente resultado a considerar: o ótimo ou o robusto.

Para obter estes dois tipos de análise, foram necessários dois planeamentos:

- 1 – Planeamento pelo método Taguchi (Planeamento Robusto). Este método fornecerá o ponto de solda mais robusto e;
- 2 – Planeamento Central Composto (PCC) mais algoritmo de otimização. Esta abordagem fornecerá o ponto ótimo de solda, através da otimização do modelo de regressão gerado pelo PCC.

Para a elaboração dos planeamentos foi utilizado um programa comercial (Statistica®), este programa fornece o total de corridas segundo os fatores que vão ser utilizados. A seguir são definidos os fatores e os seus respectivos níveis a serem usados no planeamento estatístico.

3.4.1 – Definição de Parâmetros

Para a realização dos ensaios foi considerado um tempo de soldagem total com 2 impulsos: o primeiro pulso de Burn Zinc com a intenção de fundir o revestimento e um segundo pulso com os valores reais de soldagem. Uma forma do sinal com dois pulsos similar ao utilizado aparece na figura 3.14. Os parâmetros e seus níveis são os seguintes:

Pulso de Burn Zinc:

Força eletrodo no Burn Zinc (F_{BZ}) = 4 kN;

Corrente rms no Burn Zinc (I_{BZ}) = 5 kA;

Tempo de Burn Zinc (T_{BZ}) = 4 ciclos;

Tempo de intervalo (Int) = 3 ciclos.

Pulso de soldagem

$T_{sub} = (0, 3, 6)$ ciclos;
 $T_{cor} = (20, 35, 50)$ ciclos;
 $T_{des} = (0, 3, 6)$ ciclos;

} T_s

Força do eletrodo (F_{el}) = (2, 4, 6) kN;

Vazão de água (V_{az}) = (0.03, 0.043, 0.06) l/s.

Os valores I_{BZ} e T_{BZ} foram considerados da tabela da Daimler-Chrysler do Brasil (2004). Os valores de T_{sub} e T_{des} foram considerados de uma maneira prática tendo em conta que deveriam ser mínimos para que o valor da I_{rms} não varie, como explicado no item 3.3.5. Já os valores de F_{el} e T_s foram tomados dos envelopes de trabalho (item 3.2.3) e a Vazão de água foi definida na calibração do sistema de refrigeração (Item 3.2.11). Os outros valores foram mantidos constantes como mostrado no Item 3.2.3.

3.4.2 – Planejamento Robusto (Taguchi)

A partir dos conceitos detalhados no Item 2.11.1 da Revisão Bibliográfica, optou-se pelo planejamento $L'16$, ou seja, 16 ensaios com um número máximo de fatores igual a 5 e um número de níveis igual 4. Como descrito no item anterior (Definição de Parâmetros) os nível dos parâmetros neste projeto são 3 e como os que se precisavam pelo planejamento do Taguchi eram 4 utilizou-se a técnica de “dummy level” (Phadke, 1989) a qual permite

aumentar mais um nível, dos parâmetros, repetindo-o de onde se deseja mais informações. Neste caso, utilizou-se o seguinte critério: Nos T_{sub} , T_{cor} , T_{des} e F_{el} repetiu-se o nível médio e na V_{az} considerou-se repetir o valor de máxima refrigeração, ou seja:

$$\begin{aligned}
 T_{sub} &= (1, 2, 3) \rightarrow (1, 2, 3, 2); & \text{logo: } T_{sub} &= (0, 3, 6, 3) \text{ ciclos.} \\
 T_{cor} &= (1, 2, 3) \rightarrow (1, 2, 3, 2); & \text{logo: } T_{cor} &= (20, 35, 50, 35) \text{ ciclos.} \\
 T_{des} &= (1, 2, 3) \rightarrow (1, 2, 3, 2); & \text{logo: } T_{des} &= (0, 3, 6, 3) \text{ ciclos.} \\
 F_{el} &= (1, 2, 3) \rightarrow (1, 2, 3, 2); & \text{logo: } F_{el} &= (2, 4, 6, 4) \text{ kN.} \\
 V_{az} &= (1, 2, 3) \rightarrow (1, 2, 3, 3); & \text{logo: } V_{az} &= (0.03, 0.043, 0.06, 0.06) \text{ l/s}
 \end{aligned}$$

Esta metodologia gerou a Tabela 3.7, onde são mostrados os ensaios para este planejamento. Ressalta-se que esta é a ordem padrão do planejamento. Para reduzir erros sistemáticos, adotou-se uma ordem aleatória dos experimentos. Além disto, os fatores estão com seus valores reais para facilitar a análise e entendimento do leitor. As tabelas com as variáveis codificadas são mostradas no Apêndice A. Como existem 3 níveis, sua codificação para o Taguchi são os níveis 1, 2 e 3.

Tabela 3.7 – Planejamento robusto (Taguchi) L'16 utilizado.

Fatores Ensaio	T_{sub} (ciclos)	T_{cor} (ciclos)	T_{des} (ciclos)	F_{el} (kN)	V_{az} (l/seg)
1	0	20	0	2	0,03
2	0	35	3	4	0,043
3	0	50	6	6	0,06
4	0	35	3	4	0,06
5	3	20	3	6	0,06
6	3	35	0	4	0,06
7	3	50	3	2	0,043
8	3	35	6	4	0,03
9	6	20	6	4	0,043
10	6	35	3	6	0,03
11	6	50	0	4	0,06
12	6	35	3	2	0,06
13	3	20	3	4	0,06
14	3	35	6	2	0,06
15	3	50	3	4	0,03
16	3	35	0	6	0,043

3.4.3 – Planejamento Composto Central (PCC)

Uma vez que existem 5 fatores a serem estudados (T_{sub} , T_{cor} , T_{des} , F_{el} e V_{az}), o planejamento escolhido foi 5/1/27, ou seja, 5 fatores, 1 bloco e 27 ensaios (16 pontos centrais, 10 pontos na face e 1 ponto na origem). Como descrito no Item 2.11.2 da Revisão Bibliográfica, é possível escolher o valor de α de acordo com a necessidade: rotabilidade, rotacionalidade ou planejamento de face centrada. Neste caso, $\alpha_{rotabilidade} = 2,0$; $\alpha_{rotacionalidade} = 1,5467$ e $\alpha_{facecentrada} = 1,0$. Devido aos limites operacionais estabelecidos é mandatório neste trabalho que se use $\alpha = 1,0$, resultando no planejamento mostrado na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Planejamento PCC $2^{(5-1)}$ usado.

Fatores Ensaio	T_{sub} (ciclos)	T_{cor} (ciclos)	T_{des} (ciclos)	F_{el} (kN)	V_{az} (l/seg)
1	0	20	0	2	0,06
2	0	20	0	6	0,03
3	0	20	6	2	0,03
4	0	20	6	6	0,06
5	0	50	0	2	0,03
6	0	50	0	6	0,06
7	0	50	6	2	0,06
8	0	50	6	6	0,03
9	6	20	0	2	0,03
10	6	20	0	6	0,06
11	6	20	6	2	0,06
12	6	20	6	6	0,03
13	6	50	0	2	0,06
14	6	50	0	6	0,03
15	6	50	6	2	0,03
16	6	50	6	6	0,06
17	0	35	3	4	0,043
18	6	35	3	4	0,043
19	3	20	3	4	0,043
20	3	50	3	4	0,043
21	3	35	0	4	0,043
22	3	35	6	4	0,043
23	3	35	3	2	0,043
24	3	35	3	6	0,043
25	3	35	3	4	0,03
26	3	35	3	4	0,06
27 (C)	3	35	3	4	0,043

Semelhantemente ao Taguchi, os ensaios são mostrados em uma ordem padrão do planejamento. Para reduzir erros sistemáticos, adotou-se uma ordem aleatória dos experimentos. Deve-se lembrar que para utilizar o planejamento estas variáveis são codificadas de forma a apresentarem o mesmo peso estatístico no modelo de regressão a ser obtido. Como existem 3 níveis, sua codificação para o PCC são os níveis -1, 0 e 1.

Ressalta-se que este planejamento possibilita a construção de modelos empíricos a partir de regressão múltipla. Neste caso, estes modelos serão otimizados com técnicas de otimização como será descrito no Item 3.4.3.

Nesta segunda parte do trabalho com os dois planejamentos experimentais já definidos, o número de ensaios com 3 repetições cada (o número mínimo de repetições foi definido a partir de amostragem estatística considerando erro do Tipo I) ficou da seguinte forma, totalizando 258 ensaios:

- TAGUCHI: 16 ensaios x 3 repetições x 3 configurações de chapas = 96 ensaios.
- PCC: 27 ensaios x 3 repetições x 3 configurações de chapas = 162 ensaios.

Com o objetivo de organizar os experimentos e facilitar o entendimento do leitor, é necessário marcar ou codificar as chapas, com as mesmas dimensões da primeira parte, segundo a configuração, número de ensaios (com parâmetros definidos) e número de repetição. A figura 3.33 mostra as chapas a utilizar e os detalhes.

Exemplo: **C27 – 1P**

C = Chapa de configuração C (1,2 – 1,2)mm;

27 = Número de ensaio 27 (Parâmetros definidos: Corrente, Pressão, Tempos e Vazão);

1 = Repetição nº 1 (total 3 repetições);

P = Planejamento Central Composto (PCC).



Figura 3.33 – Chapas codificadas segundo características das corridas.

3.4.4 – Valores das Energias a utilizar em cada configuração de chapa

Os valores das energias para cada configuração de chapas são encontrado dos envelopes de trabalho ($I_s - T_s$) da figura 3.22. Pela forma destes envelopes, considerou-se o ponto de trabalho como sendo o centróide de cada um. Assim, cada ponto terá dois valores: I_s e T_s , com estes valores na equação 3 obtêm-se a energia para cada configuração de chapa (E_A , E_B , E_C) como mostrados nas tabelas 3.10 e 3.11.

Com os valores de energia definidos, calculou-se a corrente a ser ajustada (equação 17) para as 3 configurações de chapas. Nos cálculos iniciais, encontrou-se que o valor da corrente poderia alcançar 6,9 kA, sendo que a corrente máxima possível é de 6 kA. Desta forma, adotou-se o valor de 80% da energia encontrada pelos valores dos centróides dos envelopes de trabalho da figura 3.22.

A partir desta metodologia, pode-se chegar aos valores de corrente a serem ajustadas em cada ensaio para ambos os planejamentos, como mostrado nas Tabelas 3.9 e 3.10, para o Taguchi e PCC, respectivamente.

Tabela 3.9 – Tabela com os valores das correntes a serem ajustadas para o Taguchi.

Ensaio	Ea (A ² .s)	Eb (A ² .s)	Ec (A ² .s)	Ia (kA)	Ib (kA)	Ic (kA)	F _{corr}	Ia_ajust (kA)	Ib_ajust (kA)	Ic_ajust (kA)
1	7,57E+08	6,24E+08	5,08E+08	6,15	5,59	5,04	1,00	6,15	5,59	5,04
2	7,57E+08	6,24E+08	5,08E+08	4,46	4,05	3,66	1,03	4,59	4,16	3,76
3	7,57E+08	6,24E+08	5,08E+08	3,68	3,34	3,01	1,04	3,82	3,46	3,13
4	7,57E+08	6,24E+08	5,08E+08	4,46	4,05	3,66	1,03	4,59	4,16	3,76
5	7,57E+08	6,24E+08	5,08E+08	5,40	4,90	4,42	1,09	5,87	5,33	4,80
6	7,57E+08	6,24E+08	5,08E+08	4,46	4,05	3,66	1,03	4,59	4,16	3,76
7	7,57E+08	6,24E+08	5,08E+08	3,68	3,34	3,01	1,04	3,82	3,46	3,13
8	7,57E+08	6,24E+08	5,08E+08	4,15	3,77	3,40	1,08	4,46	4,05	3,66
9	7,57E+08	6,24E+08	5,08E+08	4,86	4,42	3,98	1,15	5,62	5,10	4,60
10	7,57E+08	6,24E+08	5,08E+08	4,15	3,77	3,40	1,08	4,46	4,05	3,66
11	7,57E+08	6,24E+08	5,08E+08	3,68	3,34	3,01	1,04	3,82	3,46	3,13
12	7,57E+08	6,24E+08	5,08E+08	4,15	3,77	3,40	1,08	4,46	4,05	3,66
13	7,57E+08	6,24E+08	5,08E+08	5,40	4,90	4,42	1,09	5,87	5,33	4,80
14	7,57E+08	6,24E+08	5,08E+08	4,15	3,77	3,40	1,08	4,46	4,05	3,66
15	7,57E+08	6,24E+08	5,08E+08	3,68	3,34	3,01	1,04	3,82	3,46	3,13
16	7,57E+08	6,24E+08	5,08E+08	4,46	4,05	3,66	1,03	4,59	4,16	3,76

Tabela 3.10 – Tabela com os valores das correntes a serem ajustadas para o PCC.

Ensaio	Ea (A ² .s)	Eb (A ² .s)	Ec (A ² .s)	Ia (kA)	Ib (kA)	Ic (kA)	F _{corr}	Ia_ajust (kA)	Ib_ajust (kA)	Ic_ajust (kA)
1	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	6.15	5.59	5.04	1.00	6.15	5.59	5.04
2	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	6.15	5.59	5.04	1.00	6.15	5.59	5.04
3	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	5.40	4.90	4.42	1.09	5.87	5.33	4.80
4	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	5.40	4.90	4.42	1.09	5.87	5.33	4.80
5	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	3.89	3.53	3.19	1.00	3.89	3.53	3.19
6	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	3.89	3.53	3.19	1.00	3.89	3.53	3.19
7	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	3.68	3.34	3.01	1.04	3.82	3.46	3.13
8	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	3.68	3.34	3.01	1.04	3.82	3.46	3.13
9	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	5.40	4.90	4.42	1.09	5.87	5.33	4.80
10	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	5.40	4.90	4.42	1.09	5.87	5.33	4.80
11	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	4.86	4.42	3.98	1.15	5.62	5.10	4.60
12	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	4.86	4.42	3.98	1.15	5.62	5.10	4.60
13	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	3.68	3.34	3.01	1.04	3.82	3.46	3.13
14	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	3.68	3.34	3.01	1.04	3.82	3.46	3.13
15	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	3.49	3.17	2.86	1.07	3.74	3.40	3.07
16	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	3.49	3.17	2.86	1.07	3.74	3.40	3.07
17	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	4.46	4.05	3.66	1.03	4.59	4.16	3.76
18	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	4.15	3.77	3.40	1.08	4.46	4.05	3.66
19	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	5.40	4.90	4.42	1.09	5.87	5.33	4.80
20	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	3.68	3.34	3.01	1.04	3.82	3.46	3.13
21	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	4.46	4.05	3.66	1.03	4.59	4.16	3.76
22	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	4.15	3.77	3.40	1.08	4.46	4.05	3.66
23	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	4.30	3.90	3.52	1.05	4.52	4.11	3.70
24	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	4.30	3.90	3.52	1.05	4.52	4.11	3.70
25	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	4.30	3.90	3.52	1.05	4.52	4.11	3.70
26	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	4.30	3.90	3.52	1.05	4.52	4.11	3.70
27	7.57E+08	6.24E+08	5.08E+08	4.30	3.90	3.52	1.05	4.52	4.11	3.70

3.4.5 – Otimização do modelo de regressão (empírico) do PCC

Como descrito no Item 2.11.3, existem diferentes métodos e algoritmos de otimização. Uma vez que o modelo de regressão (modelo empírico) obtido pelo PCC é representado por uma equação polinomial, é possível utilizar métodos clássicos de otimização, haja visto que tais equações polinomiais normalmente não apresentam problemas de mínimos/máximos locais. Desta forma, será adotado um algoritmo comercial já implementado na toolbox de otimização do Matlab. Este algoritmo é o BFGS (Broydon-Fletcher-Goldfarg-Shanno), de boa convergência e fácil programação.

Neste sentido, foram construídos o programa “otimiza.m” (figura 3.36), que procura minimizar a função denominada de “funcaominimizar.m” (figura 3.37). Tendo como restrições os valores (-1, 1) em poucos segundos, ocorre a convergência do programa, que mostra as iterações utilizadas, o critério de convergência atingido, os valores do conjunto de parâmetros (fatores) onde ocorreu o ponto de máximo/mínimo e o valor ótimo encontrado.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Data: 30/09/2005
% Programa de Pós-graduação em Eng. Mecanica
% Universidade Federal de Uberlandia
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Programa principal para otimizar um problema multiobjetivo e
%multivariavel
% A(s) funcao(oes) a ser minimizada deve estar na funcao
'funcaominimizar'

clc
close all
clear all

%x = fminimax(fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,options)

x0=[0 0 0 0 0];

options = optimset('MaxIter',1e5,'TolX',1e-6,'MaxFunEvals',
1e5,'MinAbsMax',3,'Display','iter');
[x,fval] = fminimax(@funcaominimizar,x0,[],[],[],[],[-1 -1 -1 -1 -1],[1 1
1 1 1],[],options)

1/fval
```

Figura 3.34 - Listagem do programa otimiza.m

FUNÇÃO FUNCAOMINIMIZAR.M

```
function f = funcaominimizar(x)

coef=[ 0.89105
-0.01676
0.02156
-1.00194
0.31560
-0.04525
0.21321
-0.06378
-0.16370
-0.00792
-0.30135
0.03563
-0.01907
-0.08602
-0.02096
-0.00714
-0.02354
0.08699
0.02096
0.08602
0.01907 ];

denominador=coef(1) + ...
    coef(2)*x(1) + ...
    coef(3)*x(1)*x(1) + ...
    coef(4)*x(2) + ...
    coef(5)*x(2)*x(2) + ...
    coef(6)*x(3) + ...
    coef(7)*x(3)*x(3) + ...
    coef(8)*x(4) + ...
    coef(9)*x(4)*x(4) + ...
    coef(10)*x(5) + ...
    coef(11)*x(5)*x(5) + ...
    coef(12)*x(1)*x(2) + ...
    coef(13)*x(1)*x(3) + ...
    coef(14)*x(1)*x(4) + ...
    coef(15)*x(1)*x(5) + ...
    coef(16)*x(2)*x(3) + ...
    coef(17)*x(2)*x(4) + ...
    coef(18)*x(2)*x(5) + ...
    coef(19)*x(3)*x(4) + ...
    coef(20)*x(3)*x(5) + ...
    coef(21)*x(4)*x(5) ;

f=1./denominador;
```

Figura 3.35 – Listagem da função funcaominimizar.m

3.5 – METODOLOGIA E CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS.

Neste trabalho serão considerados como resultados a analisar: diâmetro de indentação, profundidade de indentação e resistência mecânica.

Para a realização dos pontos de solda as chapas foram sobrepostas e soldadas como mostrado na figura 3.36.

Após a medição da indentação, as chapas serão dobradas como mostradas na figura 3.37. Do lado superior da figura se mostra como a dobra foi feita para realizar o ensaio de cisalhamento/rasgamento e no lado inferior para realizar ensaio de tração/rasgamento. A forma da dobra das chapas é similar á utilizada por Guedes (2004). Esta forma de dobra foi encontrada e é proposta em Powell (1999) assim que foi aceita para fazer os ensaios.

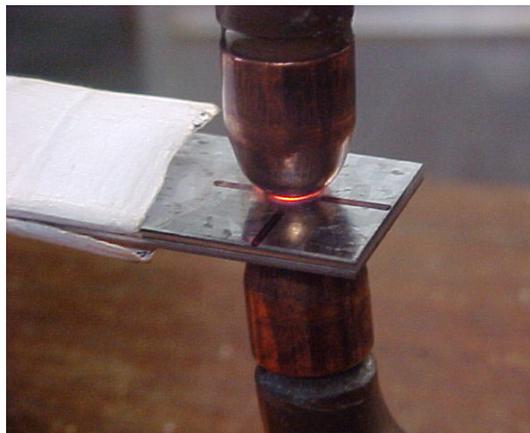


Figura 3.36 – Posição e solda das chapas.



3.37 – Corpos de prova para os testes de tração/rasgamento e cisalhamento/rasgamento.

3.5.1 – Profundidade de indentação

Para medir a indentação foi utilizado um relógio comparador com faixa de medição de 10 mm e resolução de 0,01 mm.

A montagem foi feita como mostrado na figura 3.38. Foi colocada a haste do relógio no centro da indentação, no ponto mais baixo possível, e nessa posição o relógio foi zerado.

Duas medições foram feitas uma para o lado direito e a outra para o lado esquerdo em 3 repetições cada. A média foi achada e tomada como o valor da profundidade de indentação. A figura 3.38 mostra a seqüência.

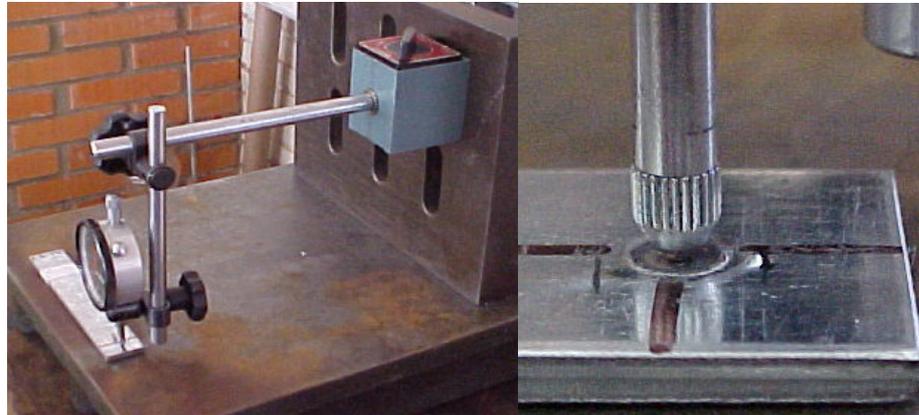


Figura 3.38 – Medição da profundidade da indentação 1.

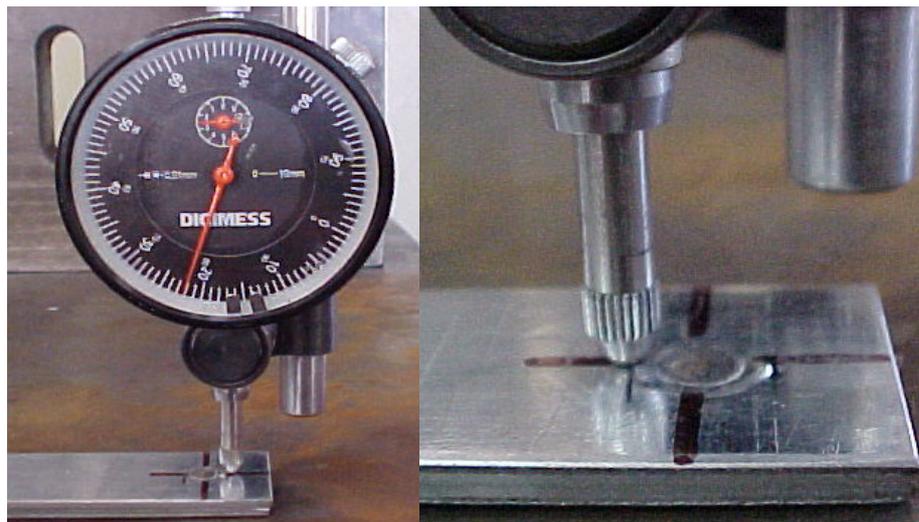


Figura 3.39 – Medição da profundidade da indentação 2.

3.5.2 – Diâmetro da indentação.

Para medir o diâmetro da indentação foi necessário utilizar uma câmera CCD e um sistema de aquisição e tratamento de imagem. O equipamento está mostrado na figura 3.42. A imagem do ponto de solda foi adquirida por um programa GLOBAL.LAB Adquire, mostrada no computador pelo GLOBAL LAB Image V3.0. Com a imagem e uma escala adequada foram feitas as medições, como mostrado na figura 3.43.

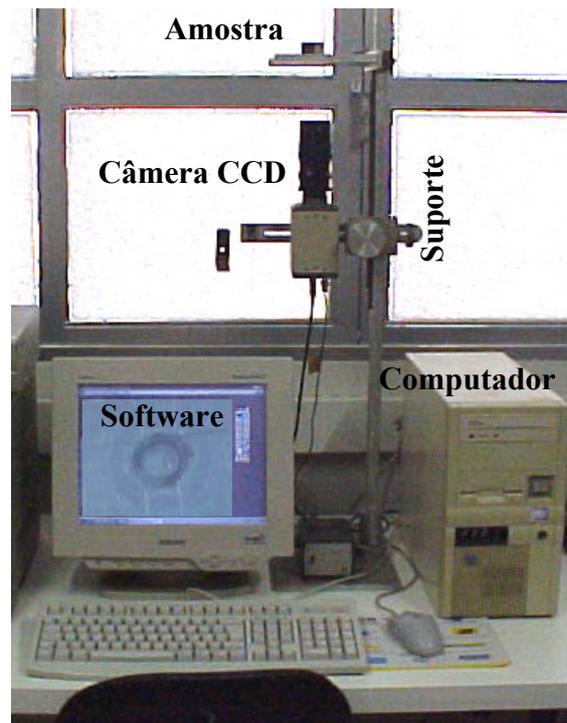


Figura 3.40 – Equipamento para medição do diâmetro do ponto de solda.

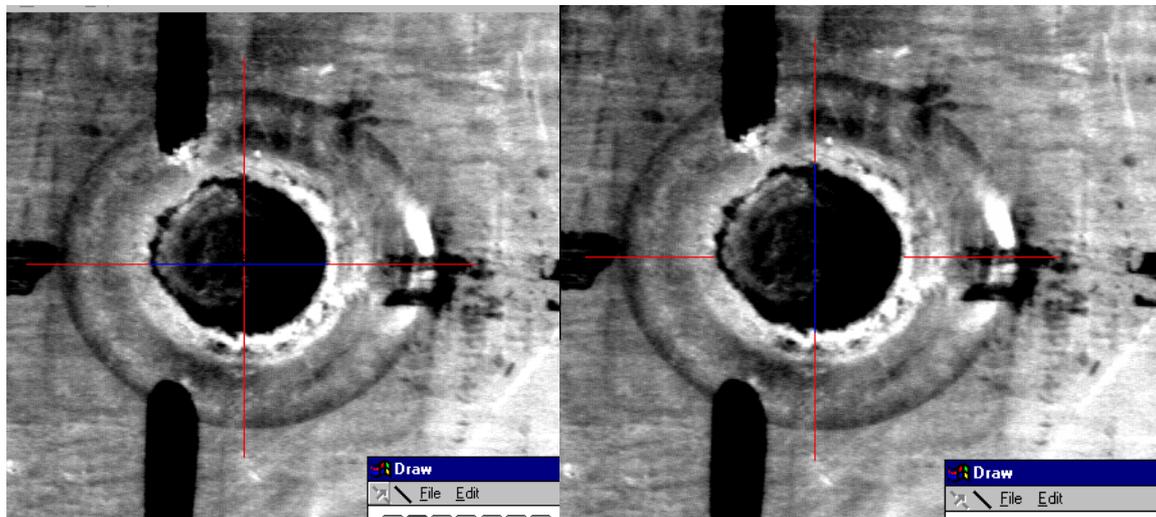


Figura 3.41– Medição do diâmetro de indentação.

3.5.3 – Testes de resistência.

Os testes para verificar a resistência dos ponto de solda são resistência por cisalhamento/rasgamento e por tração/rasgamento e foram feitos no Laboratório de Resistência de materiais da UnB. A máquina é uma MTS (Material Test System) com uma

força máxima de tração de 100 kN. A máquina é vista na figura 3.42, e o programa STATION MANAGER é utilizado para o funcionamento e programação da mesma.



Figura 3.42 – Equipamento utilizado nos testes de resistência.

3.5.4 – Testes de Cizalhamento/Rasgamento.

A idéia deste ensaio é ocasionar uma força cisalhante no ponto de solda e analisar e medir a força de resistência do ponto para este tipo de solicitação.

A realização deste ensaio foi muito complicada pela forma da dobra da chapa. Foram desenvolvidos mordentes e colocados segundo a figura 3.43. A figura é um esquema que mostra os problemas que aconteciam na hora de aplicar a força. No caso (A) a chapa desvirava por falta de algum obstáculo ao deslocamento no lado esquerdo. No caso (B), solucionado o problema anterior, a chapa vira para a direita por falta do obstáculo no lado direito, isso também está mostrado na figura 3.44. Aqui se encontrou um outro problema por limitação de máquina, a garra que segura os corpos de prova tem um máximo de abertura de 14 mm, logo se colocava uma outra chapa no lado direito, caso (B), ia-se ultrapassar o limite de espaço. Teve-se então que deixar de lado esse ensaio.

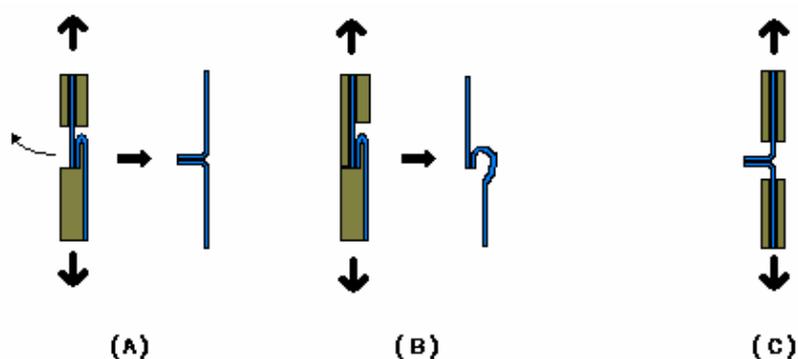


Figura 3.43 – Esquemas dos problemas ocorridos nos ensaios Cizalhamento/Rasgamento (A) e (B) e o ensaio de Tração/Rasgamento (C)



Figura 3.44 – Problemas no ensaio Cizalhamento/Rasgamento.

3.5.5 – Testes de Tração/Rasgamento.

Este ensaio é feito com o intuito de saber a força de resistência do ponto de solda ou da estrutura e analisar as influências dos parâmetros neste resultado. Não se teve problemas na realização do ensaio. As figuras da realização do ensaio, fim do ensaio com rasgamento da chapa e o gráfico onde mostra o momento de tensão máxima são mostrado nas figuras 3.45 a 3.47 respectivamente.

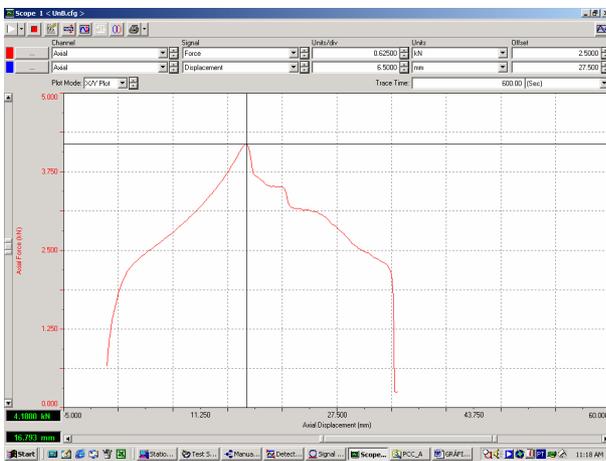


Figura 3.45 – Realização do ensaio de Tração/Rasgamento.

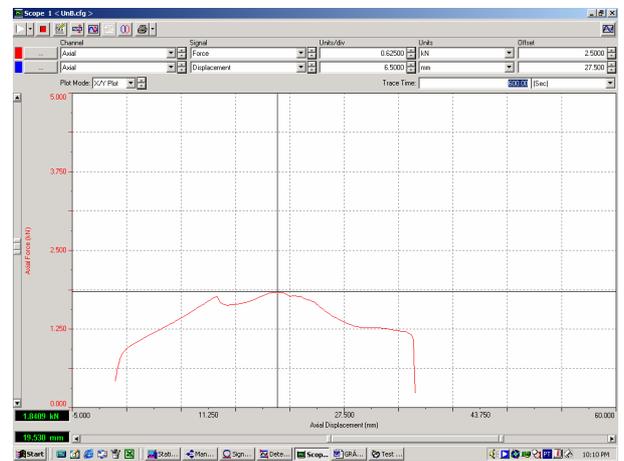


Figura 3.46 – Fim do ensaio com rasgamento da chapa, no caso de ponto de solda resistente.

Ensaio A19-2P



Ensaio B23-2P



Ensaio C3-2P

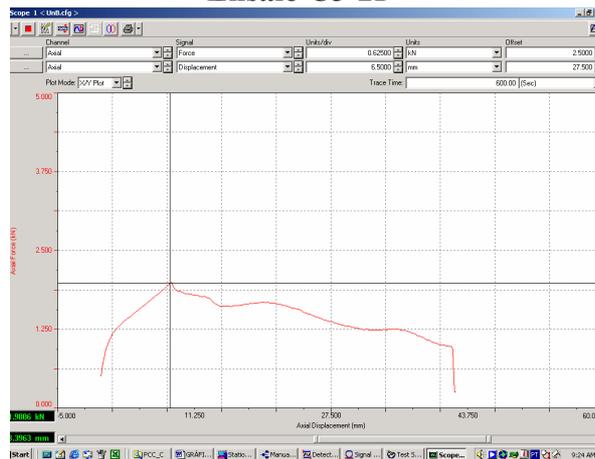


Figura 3.47 – Gráficos mostrando 3 pontos de máxima força de resistência nas 3 configurações das chapas.

3.5.6 – Medição dos pontos de solda após testes de arrancamento

Após o teste de arrancamento duas situações podem acontecer: rasgamento da chapa ao lado do ponto de solda (figura 3.48) evidenciando uma solda resistente ou quebra do ponto de solda sem rasgamento da chapa o que evidencia uma solda fraca.

Os pontos de solda após o fim do ensaio ficam em diferentes formatos, logo para medir o diâmetro do ponto sob esses formatos a norma AWS/SAE D8.9M (2002) fornece gráficos mostrando como devem ser medidos esses pontos. A norma indica que as medidas através do diâmetro mínimo (D_{min}) e o diâmetro máximo (D_{max}) deverão ser registradas e a média desses valores será considerada como a medida do ponto de solda.

No caso A e B da figura 3.50 onde o ponto de solda não foi fraturado a medição pode ser feita como já falado, mas no caso do ponto C da figura 3.48 onde fratura da solda tivesse acontecido (fratura devido à quebra de parte do ponto onde fusão e união entre chapas aconteceu) os DF mínimo e máximo devem ser medidos segundo o gráfico. (DF = Diâmetro de Fusão).

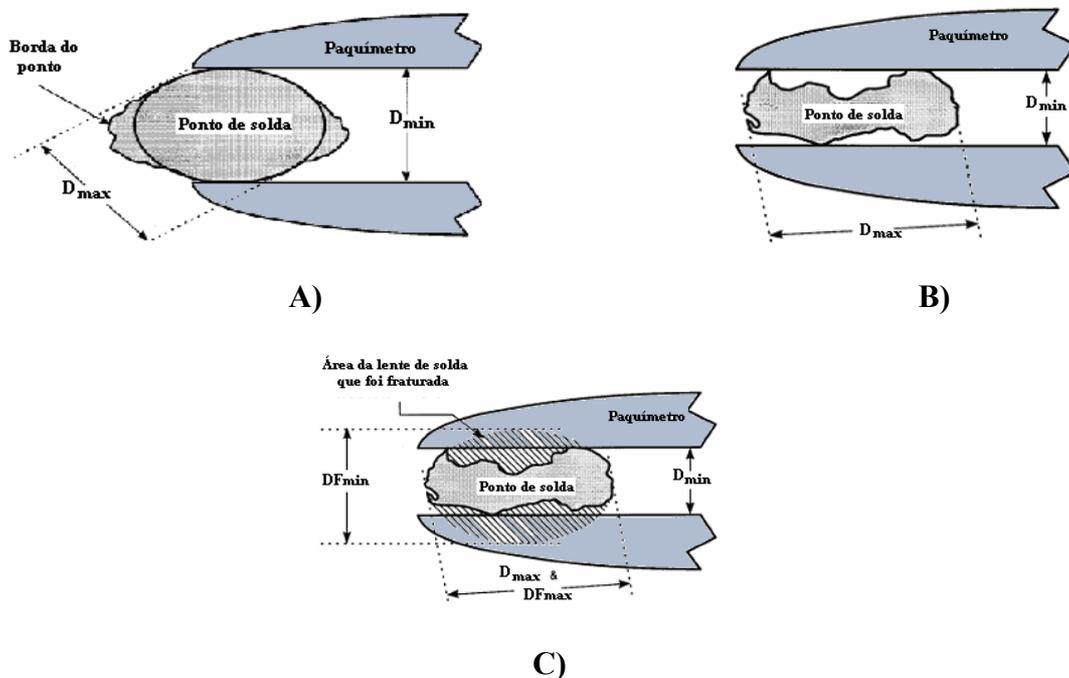


Figura 3.48 – Medições dos pontos de solda: sem fratura A e B e com fratura C (AWS/SAE D8.9M:2002, modificado).

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base na metodologia apresentada no Capítulo III, serão apresentados e discutidos os resultados provenientes dos dois planejamentos experimentais utilizados: Taguchi e PCC para as três respostas em questão: indentação, diâmetro do ponto e resistência mecânica e para as três configurações de chapas utilizadas (A, B e C). São também confrontados os resultados robustos do Taguchi com os pontos ótimos do procedimento PCC + algoritmo de otimização.

Os resultados estão dispostos em função da resposta, onde cada resposta está subdividida em função da configuração da chapa, que por sua vez traz os resultados para cada um dos dois planejamentos. Esta sistemática de apresentação é mostrada na figura 4.1.

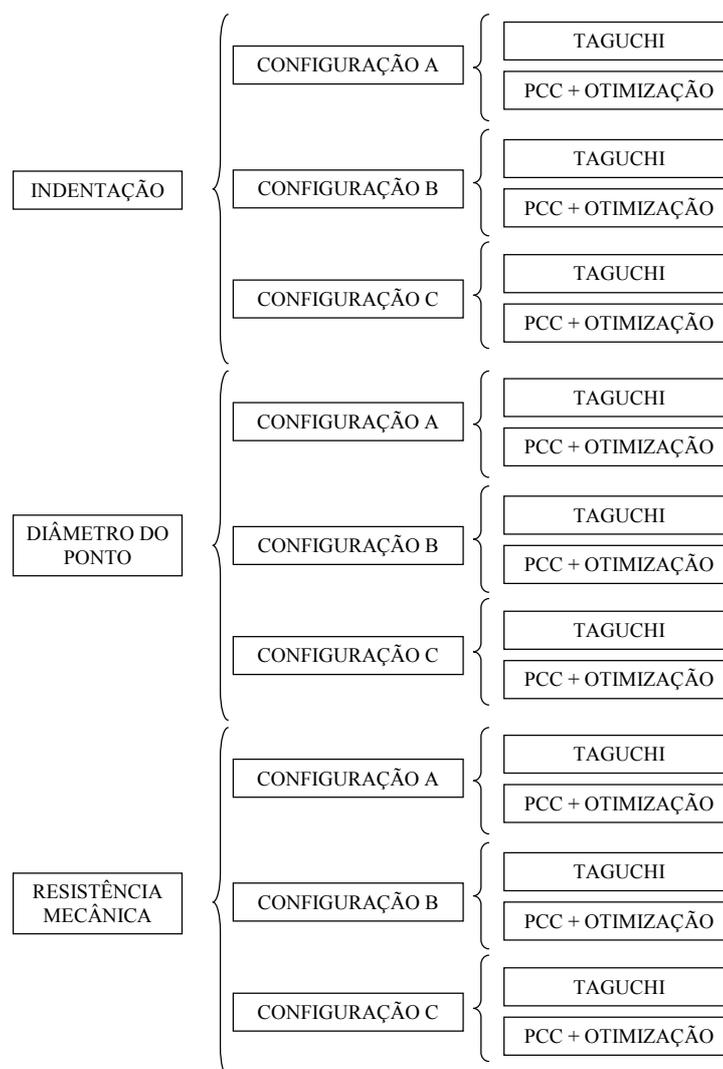


Figura 4.1 – Sistemática de apresentação dos resultados.

4.1 – INDENTAÇÃO

Os resultados para esta resposta são mostrados na Tabela 4.1 para o Taguchi e na Tabela 4.2 para o PCC. A seguir são feitas as análises estatísticas para cada planejamento e a sua comparação.

Tabela 4.1 – Resultados das medições da profundidade de indentação para o Planejamento Robusto (Taguchi) para as três configurações de chapas.

Ensaio	Tsub (ciclos)	Tcor (ciclos)	Tdes (ciclos)	Fel (kN)	Vaz (l/s)	Indentação (10^{-2} mm)		
						A	B	C
1	0	20	0	2	0,03	23,46	27,25	26,29
2	0	35	3	4	0,043	12,41	20,66	19,25
3	0	50	6	6	0,06	8,22	13,25	8,54
4	0	35	3	4	0,06	13,38	20,71	18,84
5	3	20	3	6	0,06	20,63	31,88	29,88
6	3	35	0	4	0,06	15,66	22,09	18,75
7	3	50	3	2	0,043	8,29	12,38	6,79
8	3	35	6	4	0,03	13,59	21,41	15,88
9	6	20	6	4	0,043	15,55	22,58	27,79
10	6	35	3	6	0,03	15,04	20,63	18,66
11	6	50	0	4	0,06	12,75	13,50	8,75
12	6	35	3	2	0,06	13,04	17,63	12,25
13	3	20	3	4	0,06	16,91	26,00	29,16
14	3	35	6	2	0,06	10,09	18,16	14,80
15	3	50	3	4	0,03	11,63	12,00	8,21
16	3	35	0	6	0,043	16,59	24,04	18,67

Tabela 4.2 – Resultados das medições da profundidade de indentação para o PCC para as três configurações de chapa.

Ensaio	Tsub (ciclos)	Tcor (ciclos)	Tdes (ciclos)	Fel (kN)	Vaz (l/s)	Indentação (10 ⁻² mm)		
						A	B	C
1	0	20	0	2	0,06	28,00	21,59	23,00
2	0	20	0	6	0,03	27,66	30,83	31,25
3	0	20	6	2	0,03	31,00	20,00	23,04
4	0	20	6	6	0,06	24,66	29,07	28,96
5	0	50	0	2	0,03	11,96	9,91	6,75
6	0	50	0	6	0,06	14,09	11,55	8,63
7	0	50	6	2	0,06	12,13	11,55	5,96
8	0	50	6	6	0,03	18,50	14,46	9,84
9	6	20	0	2	0,03	32,66	22,17	28,50
10	6	20	0	6	0,06	25,96	27,41	28,67
11	6	20	6	2	0,06	28,63	19,13	21,96
12	6	20	6	6	0,03	21,59	26,92	26,30
13	6	50	0	2	0,06	12,13	11,00	6,29
14	6	50	0	6	0,03	17,84	12,25	7,67
15	6	50	6	2	0,03	11,91	9,13	5,92
16	6	50	6	6	0,06	15,58	12,16	8,46
17	0	35	3	4	0,043	12,41	20,25	19,25
18	6	35	3	4	0,043	15,38	17,67	14,54
19	3	20	3	4	0,043	23,75	25,88	28,29
20	3	50	3	4	0,043	15,96	15,50	7,00
21	3	35	0	4	0,043	20,79	22,79	18,25
22	3	35	6	4	0,043	16,70	21,75	15,21
23	3	35	3	2	0,043	15,29	17,13	13,75
24	3	35	3	6	0,043	15,88	18,91	13,00
25	3	35	3	4	0,03	19,95	20,16	16,29
26	3	35	3	4	0,06	17,20	20,25	16,29
27	3	35	3	4	0,043	18,13	20,38	15,38

4.1.1 - Configuração A (TAGUCHI x PCC)

Como descrito no Procedimento Experimental, utilizou-se o programa comercial Statistica® que executa os cálculos necessários para cada planejamento experimental. No caso do Taguchi, é possível obter, dentre outras informações, a análise de variância (ANOVA) e o gráfico de médias, como mostrado na figura 4.2 para a configuração A. Ressalta-se que devido à interação entre os fatores, não houve graus de liberdade suficiente para executar uma ANOVA (já era previsto este efeito devido à idéia de utilizar energia específica, que por si só já é uma correlação-interação entre os fatores de corrente e tempo:

$I^2 \cdot \Delta t$). Desta forma, para o Taguchi serão apresentados os gráficos de médias, que fornecem importantes informações sobre o efeito de cada fator e sua significância estatística. Para as análises foi usado o modelo Maior-Melhor (Larger-the-Better), justamente para confrontar com o ponto ótimo do PCC.

Pela figura 4.2, é possível afirmar que somente o Tempo de corrente (Tcor) foi significativo e teve uma tendência negativa (quanto maior, menor a resposta). A idéia de significância ou não, será adotada com base nas linhas tracejadas do gráfico que representam duas vezes o desvio-padrão dos resultados (este é um procedimento comum no Taguchi – Phadke, 1989).

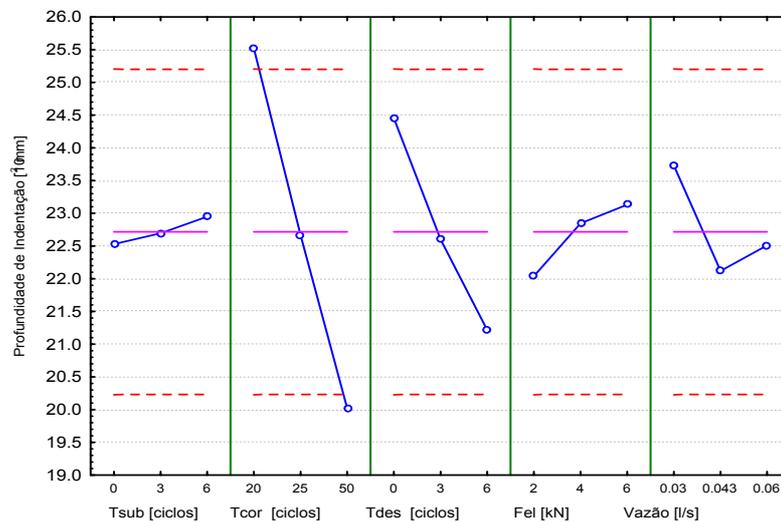


Figura 4.2 – Efeito dos fatores sobre a indentação da configuração A para o Taguchi.

Já para o PCC, é possível mostrar o efeito de cada fator separado (efeito linear), mais seu efeito quadrático e interações lineares entre os fatores como mostra a Tabela 4.3. Esta tabela refere-se ao modelo de regressão encontrado, que se traduz num modelo empírico que correlaciona a resposta (indentação com os demais fatores), como mostrado na equação 1.

$$\begin{aligned}
 \text{Indentação} = & \mathbf{16.67416} + 0.06972 \cdot T_{\text{sub}} - 2.59780 \cdot T_{\text{sub}}^2 - \mathbf{6.32417} \cdot T_{\text{cor}} + \\
 & \mathbf{3.36220} \cdot T_{\text{cor}}^2 - 0.57667 \cdot T_{\text{des}} + 2.25470 \cdot T_{\text{des}}^2 - 0.10833 \cdot F_{\text{el}} - 0.91030 \cdot F_{\text{el}}^2 - \\
 & 0.81694 \cdot V_{\text{az}} + 2.08720 \cdot V_{\text{az}}^2 + 0.20531 \cdot T_{\text{sub}} \cdot T_{\text{cor}} - 0.96656 \cdot T_{\text{sub}} \cdot T_{\text{des}} - \\
 & 0.38781 \cdot T_{\text{sub}} \cdot F_{\text{el}} + 0.53344 \cdot T_{\text{sub}} \cdot V_{\text{az}} + 0.65844 \cdot T_{\text{cor}} \cdot T_{\text{des}} + \mathbf{2.39344} \cdot T_{\text{cor}} \cdot F_{\text{el}} - \\
 & 0.03906 \cdot T_{\text{cor}} \cdot V_{\text{az}} - 0.25844 \cdot T_{\text{des}} \cdot F_{\text{el}} + 0.49656 \cdot T_{\text{des}} \cdot V_{\text{az}} + 0.08531 \cdot F_{\text{el}} \cdot V_{\text{az}} \dots(1)
 \end{aligned}$$

Esta equação é montada com base nos coeficientes encontrados no modelo de regressão e apresentados na Tabela 4.3. Esta tabela também traz o nível de significância p para cada fator, os quais foram grifados em negrito para facilitar a visualização. A partir dos coeficientes para os efeitos lineares (L) e efeitos quadráticos (Q) de cada variável, mais os efeitos lineares entre as variáveis (1L by 2L, por exemplo), constrói-se o modelo de regressão para o qual foi considerado o modelo cheio, ou seja, se considerou todos os fatores. Neste caso, o valor de R^2 foi de 0,97436.

Ressalta-se que somente neste caso é mostrado o modelo de regressão de forma didática para facilitar o entendimento do leitor. Uma vez apresentada a forma de se construir o modelo, nas próximas análises serão apresentadas somente as tabelas de coeficientes.

Tabela 4.3 – Modelo de regressão encontrado pelo PCC para a indentação na chapa A.

Fator	P	Coefficiente
Mean/Interc,	0,000001	16,67416
(1)Tsub (L)	0,891839	0,06972
Tsub (Q)	0,099371	-2,59780
(2)Tcor (L)	0,000014	-6,32417
Tcor (Q)	0,045235	3,36220
(3)Tdes (L)	0,285154	-0,57667
Tdes (Q)	0,141891	2,25470
(4)Fel (L)	0,832860	-0,10833
Fel (Q)	0,520382	-0,91030
(5)Vaz (L)	0,147552	-0,81694
Vaz (Q)	0,168643	2,08720
1L by 2L	0,707322	0,20531
1L by 3L	0,113152	-0,96656
1L by 4L	0,485038	-0,38781
1L by 5L	0,345667	0,53344
2L by 3L	0,253446	0,65844
2L by 4L	0,003727	2,39344
2L by 5L	0,942707	-0,03906
3L by 4L	0,637714	-0,25844
3L by 5L	0,377620	0,49656
4L by 5L	0,875383	0,08531

Pela Tabela 4.3 é possível afirmar que o Tempo de corrente (T_{cor}) foi significativo tanto linear quando quadraticamente. Houve também uma interação entre T_{cor} e a força do eletrodo (F_{el}).

Além dos coeficientes e do nível de significância mostrados na Tabela 4.3, é possível ainda obter os gráficos de probabilidade normal (reforçam e mostram com nitidez o quanto um fator se afasta de uma distribuição normal, ou seja, é significativo estatisticamente), os valores preditos versus observados (representam graficamente o ajuste do modelo de regressão obtido) e o gráfico de resíduos (embora seja necessária uma análise de resíduos, o gráfico serve para indicar se há ou não alguma tendência – bias – nos resultados). Estes gráficos estão mostrados, respectivamente, nas figuras 4.3, 4.4 e 4.5.

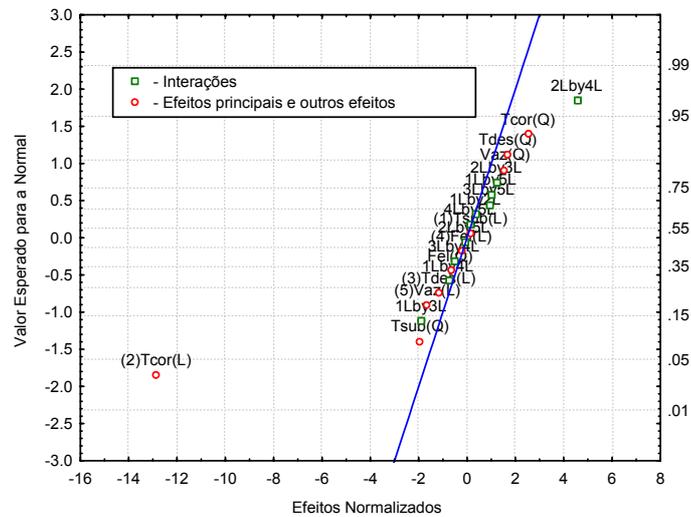


Figura 4.3 – Gráfico de probabilidade normal para a indentação na chapa A.

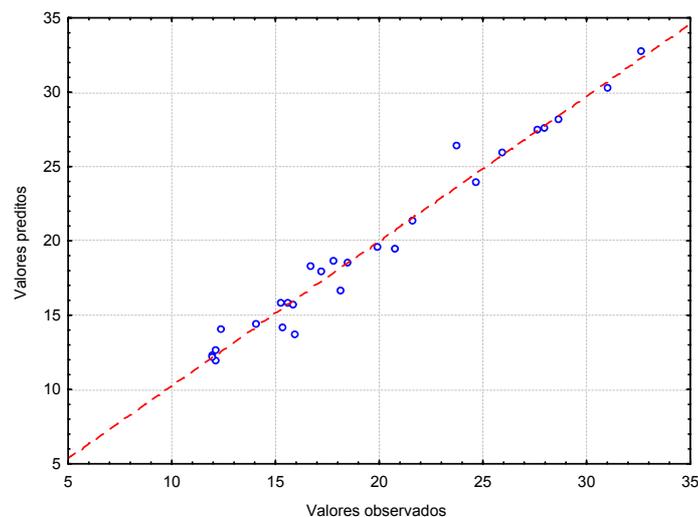


Figura 4.4 – Valores observados versus preditos para a indentação na chapa A.

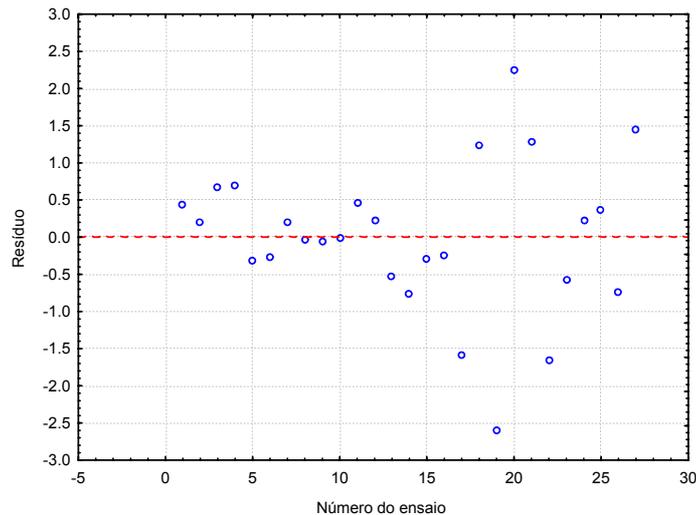


Figura 4.5 – Gráfico de resíduos para a indentação na chapa A.

Com o modelo de regressão já pronto (equação 1), utiliza-se o algoritmo de otimização. Inicialmente, procurou-se definir o critério de convergência a ser adotado: variação nos fatores da ordem de 10^{-3} ou 10^{-6} ? Pelos resultados mostrados na Tabela 4.4 não há variação significativa (dentro da resolução de ajuste dos parâmetros na máquina) entre estes dois critérios. Como o tempo computacional não é uma limitação aqui, será utilizado o critério de convergência de 10^{-6} .

Além do critério de convergência, é sempre importante, em otimização, partir de diferentes estimativas iniciais (“chute inicial”) para garantir que não se encontrou um mínimo/máximo local ao invés do global. Neste sentido, duas estimativas iniciais foram adotadas, como mostra a Tabela 4.4. A primeira com a estimativa na origem (0, 0, 0, 0, 0) e outra com a estimativa sendo o conjunto de fatores que proporcionaram a máxima resposta encontrada durante a execução do planejamento. Ressalta-se que, como explicado no Item 3.4.3, todas as análises são conduzidas com as variáveis codificadas (no caso do PCC, -1, 0 e 1). Os resultados também são obtidos em níveis codificados e só então, para melhor entendimento, são mostrados aqui nos níveis reais de trabalho.

Desta forma, é possível compilar os resultados até aqui obtidos (Taguchi e PCC + Otimização) na forma da Tabela 4.4. Para a indentação está claro que o principal fator é o Tempo de corrente (Tcor) que possui uma influência negativa. Isto reforça os livros-texto e manuais de solda a ponto (Intermachinery, 2002 p.ex.) que direcionam o usuário a utilizar a maior corrente possível no menor tempo. Como se considerou energia constante, esta

afirmação é verdadeira e levou a uma maior indentação (lembrar que existem normas que governam a indentação máxima, normalmente 20% da soma das espessuras – Item 2.10 da Revisão Bibliográfica). Este resultado parece advir do fato de que o efeito de difusão e condução de calor demanda tempo para se estabelecer. Assim, em períodos curtos de tempo, o calor é concentrado e aumenta-se a indentação para uma mesma energia imposta.

Outro fator importante, que apareceu na forma de interação com Tcor, foi a força do eletrodo (Fel). Existem dois efeitos contrários na força do eletrodo: o primeiro denota do fato de que quanto maior a força, maior será o esmagamento de chapa e maior a indentação. O segundo resulta do fato de que quanto maior a força diminui-se as asperezas superficiais da chapa (amassamento) e conseqüentemente menor será a resistência de contato eletrodo-chapa, gerando menos calor e menor indentação. Este dois efeitos são concorrentes e por isso a Fel não apareceu como fator significativo, mas sim como efeito interativo com o Tcor.

Tabela 4.4 – Compilação dos resultados para a indentação na chapa A.

Planejamento	Estimativa inicial	Critério de convergência	Ponto robusto/ótimo	Indentação (10 ⁻² mm)
Taguchi	—	—	Tsub = 6 Tcor = 20 Tdes = 0 Fel = 6 Vaz = 0,03	28,91853
PCC + Otimização	Xo = 0	10 ⁻³	Tsub = 2,9301 Tcor = 20 Tdes = 0 Fel = 2 Vaz = 0,03	34,6129
PCC + Otimização	Xo = 0	10 ⁻⁶	Tsub = 3,3957 Tcor = 20 Tdes = 0 Fel = 2 Vaz = 0,03	34,6755
PCC + Otimização	Xo = max (32,66) Tsub = 6 Tcor = 20 Tdes = 0 Fel = 2 Vaz = 0,03	—	Tsub = 3,3960 Tcor = 20 Tdes = 0 Fel = 2 Vaz = 0,03	34,6755

Com relação às respostas alcançadas, observa-se que o ponto ótimo de trabalho (obtido pelo PCC + Otimização) ficou acima (0,347 mm) do ponto robusto encontrado (0,289 mm).

4.1.2 - Configuração B (TAGUCHI x PCC)

Partindo-se agora para a configuração de chapas B, nota-se pela figura 4.6, resultado semelhante à configuração de chapa A, ou seja, somente o Tcor foi significativo com influência negativa sobre a indentação.

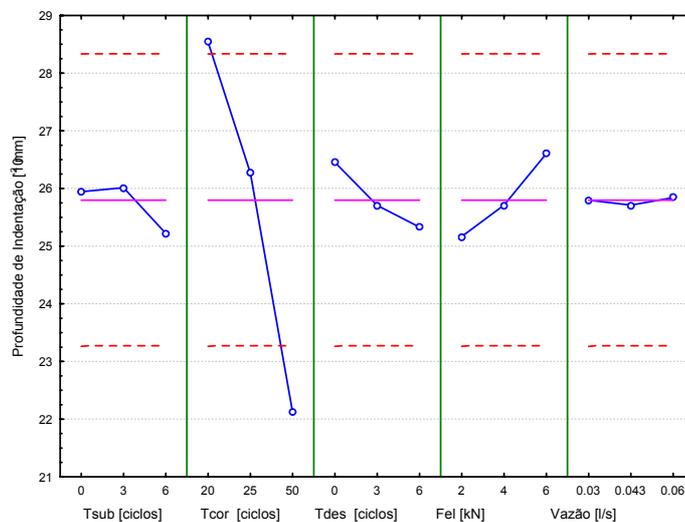


Figura 4.6 – Efeito dos fatores sobre a indentação da configuração B para o Taguchi.

Para o PCC, o modelo de regressão obtido (Tabela 4.5) apresenta $R^2 = 0,99034$, sendo que os fatores significativos foram o Tcor e a Força do eletrodo de forma linear e quadrática. Além da interação entre estes dois fatores. Aqui ficou claro que a Força do eletrodo Fel tem dois efeitos. O primeiro é o de esmagar a chapa, onde o efeito é positivo, ou seja, quanto maior Fel, maior a indentação. Isto aparece na parcela linear Fel(L) do modelo de regressão. O segundo efeito é o de reduzir a resistência de contato eletrodo-chapa, e conseqüentemente diminuir a geração de calor. Neste caso, é um efeito negativo e aparece no termo quadrático Fel(Q) do modelo.

Embora os resultados sejam um pouco diferentes da indentação da chapa A, as mesmas tendências permanecem. É ressaltado na literatura científica e em normas que a espessura

dominante é a menor, e esta pode ser a razão das pequenas diferenças entre os resultados da chapas A e B.

Semelhantemente ao caso anterior são apresentados os gráficos de probabilidade normal, valores preditos versus observados e resíduos nas figuras 4.7 a 4.9.

Tabela 4.5 – Modelo de regressão encontrado pelo PCC para a indentação na chapa B.

Fator	P	Coefficiente
Mean/Interc,	0,000000	20,49891
(1)Tsub (L)	0,073930	-0,63111
Tsub (Q)	0,097453	-1,55439
(2)Tcor (L)	0,000001	-6,41583
Tcor (Q)	0,834300	0,17311
(3)Tdes (L)	0,348822	-0,29667
Tdes (Q)	0,068599	1,75561
(4)Fel (L)	0,000205	2,33222
Fel (Q)	0,019861	-2,49439
(5)Vaz (L)	0,698671	-0,11861
Vaz (Q)	0,711880	-0,30689
1L by 2L	0,575902	0,18313
1L by 3L	0,225076	-0,41875
1L by 4L	0,307110	-0,34563
1L by 5L	0,892283	0,04375
2L by 3L	0,104544	0,59187
2L by 4L	0,003914	-1,40750
2L by 5L	0,538655	0,20187
3L by 4L	0,313553	0,34063
3L by 5L	0,350118	0,31375
4L by 5L	0,249978	-0,39438

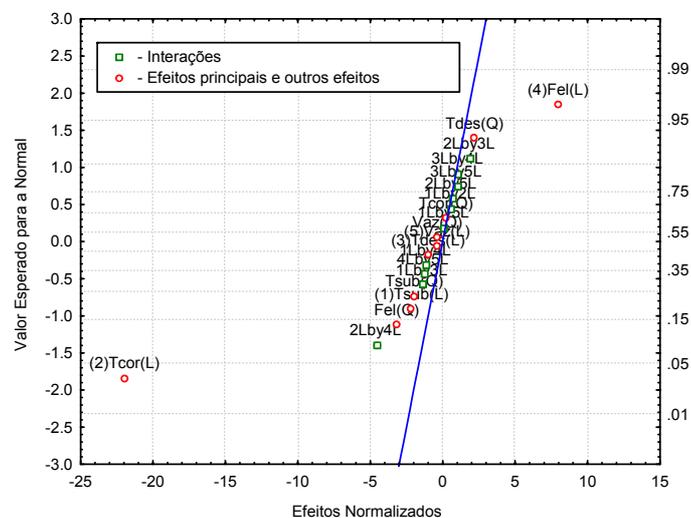


Figura 4.7 - Gráfico de probabilidade normal para a indentação na chapa B.

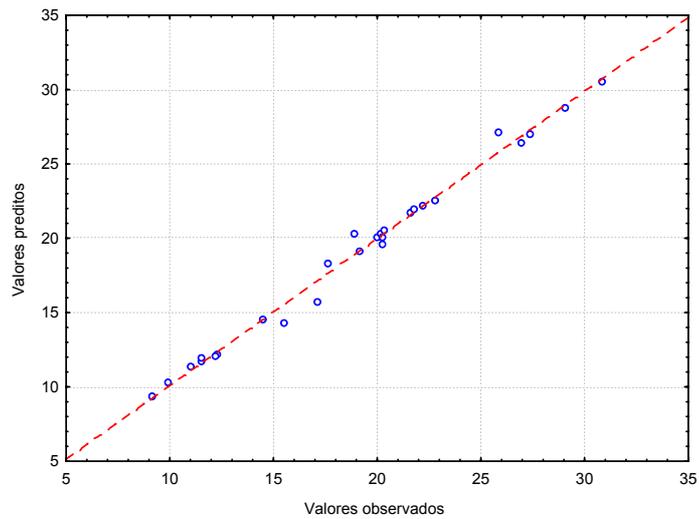


Figura 4.8 - Valores observados versus preditos para a indentação na chapa B.

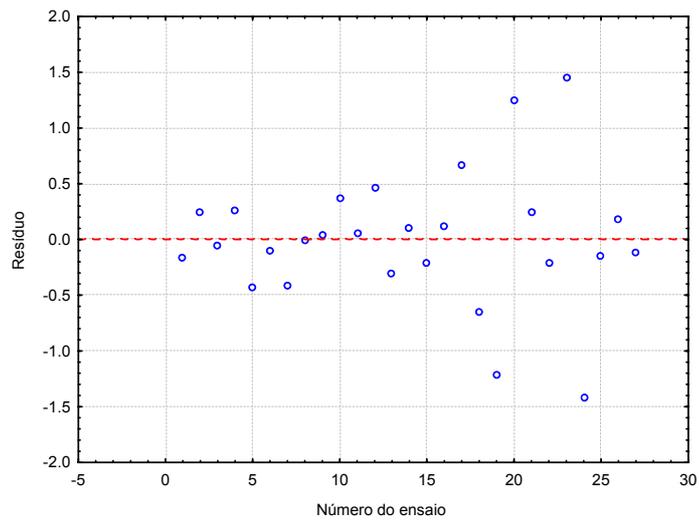


Figura 4.9 - Gráfico de resíduos para a indentação na chapa B.

Resultados semelhantes ao caso anterior também são obtidos ao se confrontar os planejamentos executados como mostra a Tabela 4.6. Neste caso a diferença entre as respostas do ponto robusto e ponto ótimo ficou menor.

Tabela 4.6 – Compilação dos resultados para a indentação na chapa B.

Planejamento	Estimativa inicial	Ponto robusto/ótimo	Indentação (10^{-2} mm)
Taguchi	—	Tsub = 3 Tcor = 20 Tdes = 0 Fel = 6 Vaz = 0,06	30,25701
PCC + Otimização	Xo = 0	Tsub = 2,7768 Tcor = 20 Tdes = 0 Fel = 5,5438 Vaz = 0,0308	31,5231
PCC + Otimização	Xo = max (30,83) Tsub = 0 Tcor = 20 Tdes = 0 Fel = 6 Vaz = 0,03	Tsub = 2,2563 Tcor = 20 Tdes = 0 Fel = 5,4530 Vaz = 0,03	31,5744

4.1.3 – Configuração C (TAGUCHI x PCC)

Para a configuração C de chapas, resultado semelhante foi encontrado para o Taguchi (figura 4.10), ou seja, o Tcor é o fator mais significativo e possui um efeito negativo na indentação.

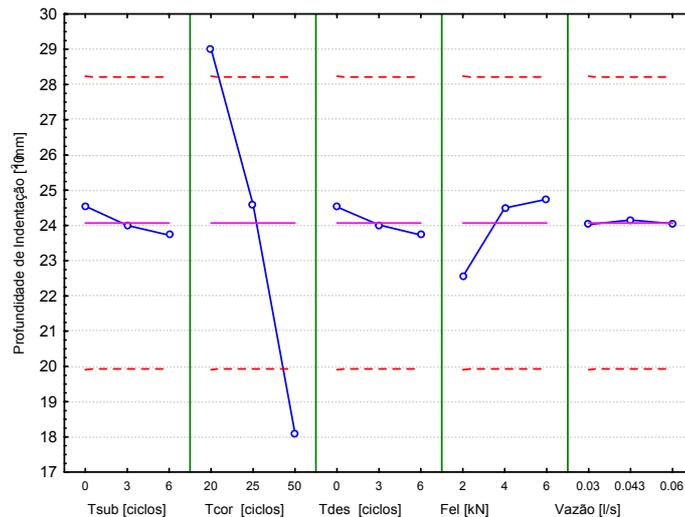


Figura 4.10 – Efeito dos fatores sobre a indentação da configuração C para o Taguchi.

O modelo de regressão do PCC é mostrado na Tabela 4.7 e possui $R^2 = 0,98865$. Uma vez que a espessura mínima aqui é igual ao da configuração B (1,2 mm), espera-se que os resultados sejam mais próximos do que ao da configuração A (2,0 mm). Isto foi observado, uma vez que ambos Tcor e Fel foram significativos com os efeitos na mesma direção (negativa e positiva, respectivamente). Os gráficos adicionais são mostrados a seguir.

Tabela 4.7 – Modelo de regressão encontrado pelo PCC para a indentação na chapa C.

Fator	P	Coefficiente
Mean/Interc,	0,000000	15,91082
(1)Tsub (L)	0,327470	-0,46528
Tsub (Q)	0,468146	0,91720
(2)Tcor (L)	0,000001	-9,63694
Tcor (Q)	0,208920	1,66720
(3)Tdes (L)	0,139850	-0,74250
Tdes (Q)	0,548849	0,75220
(4)Fel (L)	0,012640	1,53306
Fel (Q)	0,070359	-2,60280
(5)Vaz (L)	0,387177	-0,40694
Vaz (Q)	0,800934	0,31220
1L by 2L	0,794733	-0,12594
1L by 3L	0,402933	-0,41656
1L by 4L	0,171711	-0,71844
1L by 5L	0,862917	0,08344
2L by 3L	0,156235	0,75031
2L by 4L	0,269792	-0,56281
2L by 5L	0,473427	0,35406
3L by 4L	0,524444	0,31281
3L by 5L	0,330922	0,48969
4L by 5L	0,402933	0,41656

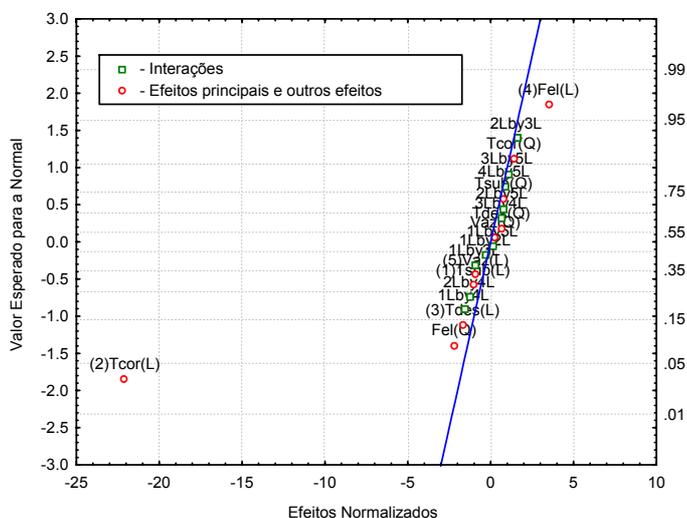


Figura 4.11 - Gráfico de probabilidade normal para a indentação na chapa C.

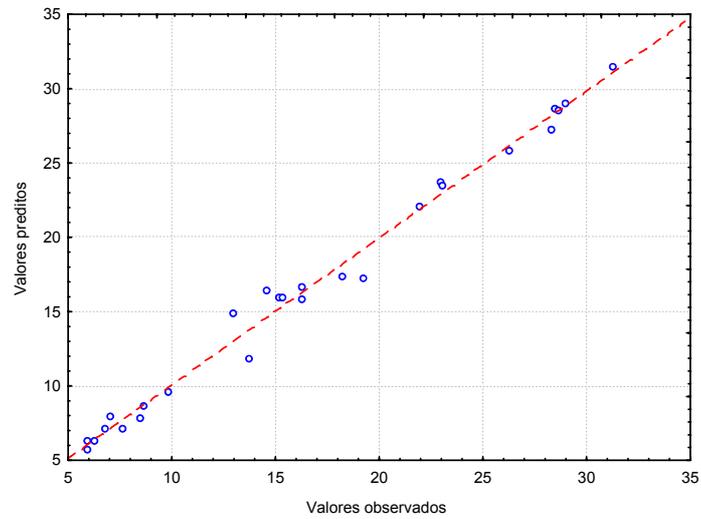


Figura 4.12 - Valores observados versus preditos para a indentação na chapa C.

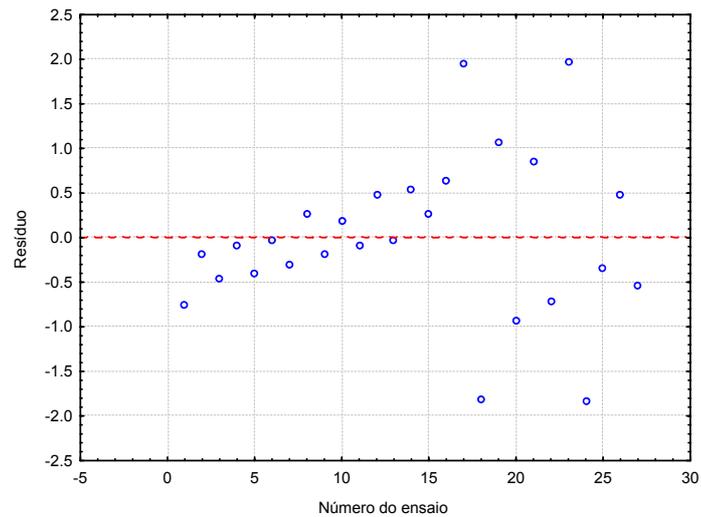


Figura 4.13 - Gráfico de resíduos para a indentação na chapa C.

A compilação dos resultados (Taguchi e PCC + Otimização) é mostrada na Tabela 4.8 e possui características semelhantes ao caso discutido anteriormente.

Tabela 4.8 - Compilação dos resultados para a indentação na chapa C.

Planejamento	Estimativa inicial	Ponto robusto/ótimo	Indentação (10 ⁻² mm)
Taguchi	—	Tsub = 0 Tcor = 20 Tdes = 0 Fel = 6 Vaz = 0,043	30,71824
PCC + Otimização	Xo = 0	Tsub = 0 Tcor = 20 Tdes = 0 Fel = 4,8012 Vaz = 0,03	32,3638
PCC + Otimização	Xo = max (31,25) Tsub = 0 Tcor = 20 Tdes = 0 Fel = 6 Vaz = 0,03	Tsub = 0 Tcor = 20 Tdes = 0 Fel = 4,8010 Vaz = 0,03	32,3638

4.2 – DIÂMETRO DO PONTO

As mesmas considerações tratadas para a indentação também são válidas para a análise dos pontos, onde os resultados para esta resposta são mostrados na Tabela 4.9 para o Taguchi e na Tabela 4.10 para o PCC.

Tabela 4.9 – Resultados das medições do diâmetro do ponto para o Planejamento Robusto (Taguchi) para as três configurações de chapa.

Ensaio	Tsub (ciclos)	Tcor (ciclos)	Tdes (ciclos)	Fel (kN)	Vaz (l/s)	Diâmetro (mm)		
						A	B	C
1	0	20	0	2	0,03	5,411	4,8865	4,492
2	0	35	3	4	0,043	4,1815	4,0855	3,9165
3	0	50	6	6	0,06	3,6435	3,399	3,0615
4	0	35	3	4	0,06	4,2995	4,119	3,751
5	3	20	3	6	0,06	4,8205	4,609	4,3235
6	3	35	0	4	0,06	4,3375	4,168	3,8325
7	3	50	3	2	0,043	3,773	3,577	3,348
8	3	35	6	4	0,03	4,2745	4,1065	3,559
9	6	20	6	4	0,043	4,6885	4,5205	4,304
10	6	35	3	6	0,03	4,418	4,266	3,6275
11	6	50	0	4	0,06	4,045	3,4475	3,097
12	6	35	3	2	0,06	4,256	3,9725	3,5055
13	3	20	3	4	0,06	4,879	4,6075	4,3335
14	3	35	6	2	0,06	4,2855	3,9685	3,715
15	3	50	3	4	0,03	3,914	3,2245	3,158
16	3	35	0	6	0,043	4,454	4,2745	3,692

Tabela 4.10 – Resultados das medições do diâmetro do ponto para o PCC para as três configurações de chapa.

Ensaio	Tsub (ciclos)	Tcor (ciclos)	Tdes (ciclos)	Fel (kN)	Vaz (l/s)	Diâmetro (mm)		
						A	B	C
1	0	20	0	2	0,06	4,79	4,69	4,34
2	0	20	0	6	0,03	4,88	4,74	4,55
3	0	20	6	2	0,03	5,13	4,48	4,30
4	0	20	6	6	0,06	4,71	4,64	4,47
5	0	50	0	2	0,03	3,85	3,48	3,39
6	0	50	0	6	0,06	4,02	3,15	3,00
7	0	50	6	2	0,06	3,74	3,41	3,20
8	0	50	6	6	0,03	3,99	3,33	3,19
9	6	20	0	2	0,03	4,88	4,43	4,38
10	6	20	0	6	0,06	4,81	4,59	4,44
11	6	20	6	2	0,06	4,71	4,42	4,12
12	6	20	6	6	0,03	4,73	4,57	4,39
13	6	50	0	2	0,06	3,63	3,30	3,23
14	6	50	0	6	0,03	3,68	3,02	3,01
15	6	50	6	2	0,03	3,74	3,43	3,32
16	6	50	6	6	0,06	3,67	3,08	3,01
17	0	35	3	4	0,043	4,18	4,18	3,92
18	6	35	3	4	0,043	4,15	4,06	3,71
19	3	20	3	4	0,043	4,72	4,48	4,37
20	3	50	3	4	0,043	3,91	3,52	3,00
21	3	35	0	4	0,043	4,26	4,10	3,73
22	3	35	6	4	0,043	4,29	4,20	3,67
23	3	35	3	2	0,043	4,16	3,91	3,62
24	3	35	3	6	0,043	4,31	4,09	3,52
25	3	35	3	4	0,03	4,15	3,93	3,59
26	3	35	3	4	0,06	4,36	4,20	3,73
27	3	35	3	4	0,043	4,25	4,13	3,65

4.2.1 – Configuração A (TAGUCHI x PCC)

Pela análise do gráfico de médias da figura 4.14 é possível afirmar que o único fator que afeta significativamente o diâmetro do ponto de solda é o Tempo de corrente (Tcor), possuindo um efeito negativo. Isto pode ser explicado de forma similar ao que já foi colocado para a indentação, ou seja, um menor tempo implica numa aplicação de calor mais bem direcionada para uma mesma energia de soldagem. Mais uma vez, os resultados refletem aquilo que se encontra escrito em catálogos: usar o menor tempo possível e a maior corrente de soldagem.

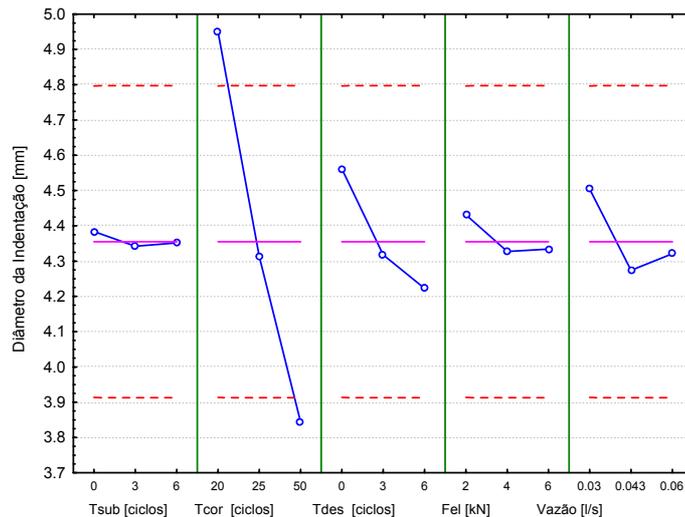


Figura 4.14 - Efeito dos fatores sobre o diâmetro do ponto para a chapa A para o Taguchi.

A Tabela 4.11 traz o modelo de regressão obtido pelo PCC com $R^2 = 0,98301$. Além do Tempo de corrente (Tcor), o Tempo de subida (Tsub) também apresentou significância estatística. Especula-se aqui que isto se deve a uma queima não uniforme ou suficiente do zinco durante o Tempo de “Burn Zinc”. Assim, o Tsub atuou no sentido de fundir e vaporizar o resto de zinco existente, retirando os seus efeitos prejudiciais (discutidos no Item 2.8 da Revisão Bibliográfica) e aumentando o diâmetro do ponto. Como o efeito é negativo, o valor de Tsub deve ser pequeno e somente suficiente para atuar numa pequena quantidade de zinco. Pela análise de otimização (Tabela 4.12) este valor gira em torno de 1 ou 2 ciclos (1,5384 ciclos).

Em seqüência são apresentados os demais gráficos do PCC.

Tabela 4.11 – Modelo de regressão encontrado pelo PCC para o diâmetro do ponto na chapa A.

Fator	P	Coefficiente
Mean/Interc,	0,000000	4,235076
(1)Tsub (L)	0,043189	-0,071833
Tsub (Q)	0,418388	-0,066273
(2)Tcor (L)	0,000002	-0,507139
Tcor (Q)	0,351901	0,076977
(3)Tdes (L)	0,834383	-0,006139
Tdes (Q)	0,606247	0,041477
(4)Fel (L)	0,763287	0,008861
Fel (Q)	0,965123	0,003477
(5)Vaz (L)	0,274828	-0,033778
Vaz (Q)	0,819113	0,018227
1L by 2L	0,342645	-0,030719
1L by 3L	0,745011	-0,010156
1L by 4L	0,731558	-0,010719
1L by 5L	0,451040	0,024031
2L by 3L	0,882616	0,004594
2L by 4L	0,153852	0,048656
2L by 5L	0,437747	0,024781
3L by 4L	0,387455	-0,027781
3L by 5L	0,182782	-0,044906
4L by 5L	0,217963	0,041031

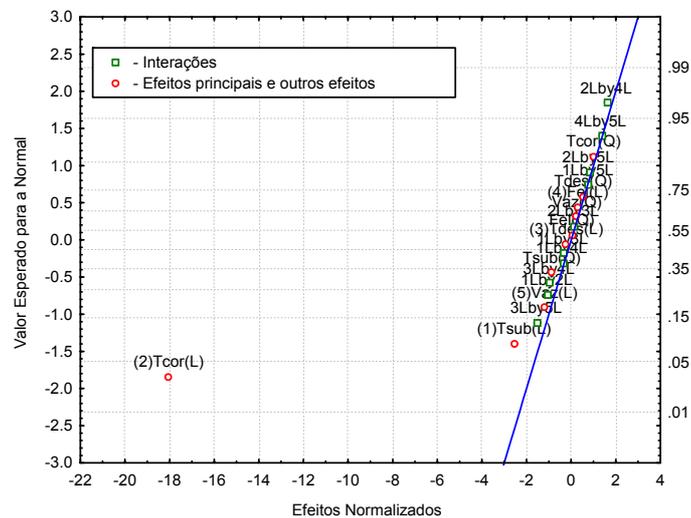


Figura 4.15 – Gráfico de probabilidade normal para o diâmetro do ponto na chapa A.

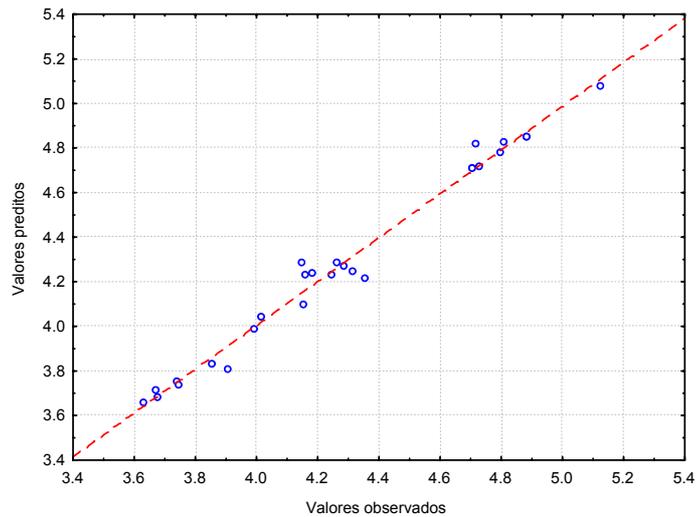


Figura 4.16 – Valores observados versus preditos para o diâmetro do ponto na chapa A.

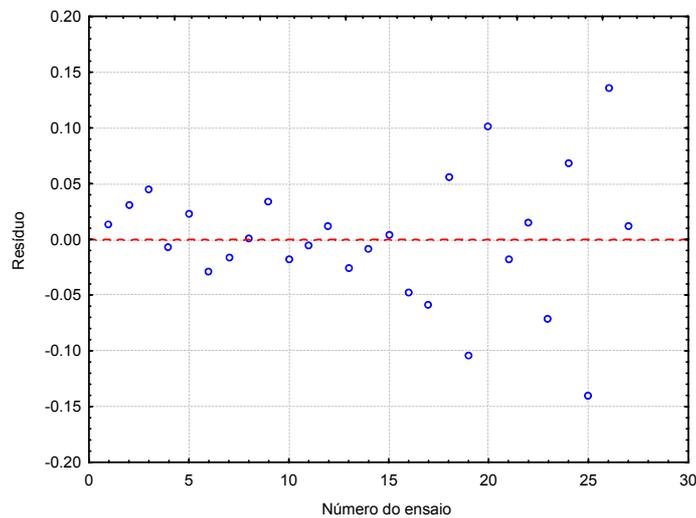


Figura 4.17 – Gráfico de resíduos para o diâmetro do ponto na chapa A.

Agrupando os resultados de ambos os planejamentos, tem-se a Tabela 4.12. Neste caso, o Taguchi conseguiu prever um diâmetro robusto maior que o diâmetro ótimo do PCC + algoritmo de otimização. Isto se deve ao fato de que algumas interações não serem consideradas no Taguchi, o que acaba extrapolando o modelo. De toda forma, a diferença entre eles é da ordem de 10% e os resultados apontam na mesma direção de conjunto de parâmetros. Lembrando, que no caso do PCC, o Tsub foi estatisticamente significativo.

Tabela 4.12 - Compilação dos resultados para o diâmetro do ponto na chapa A.

Planejamento	Estimativa inicial	Ponto robusto/ótimo	Diâmetro (mm)
Taguchi	—	Tsub=0 Tcor=20 Tdes=0 Fel=2 Vaz=0,03	5,4192
PCC + Otimização	Xo = 0	Tsub = 1,5384 Tcor = 20 Tdes = 6 Fel = 2 Vaz = 0,03	5,0994
PCC + Otimização	Xo = max (5,13) Tsub = 0 Tcor = 20 Tdes = 6 Fel = 2 Vaz = 0,03	Tsub = 1,5381 Tcor = 20 Tdes = 6 Fel = 2 Vaz = 0,03	5,0994

4.2.2 - Configuração B (TAGUCHI x PCC)

Semelhantemente aos resultados obtidos pelo Taguchi na configuração A de chapas, somente o Tcor foi estatisticamente significativo como mostra a Figura 4.18, possuindo um efeito negativo sobre o diâmetro do ponto, pelos motivos já apresentados.

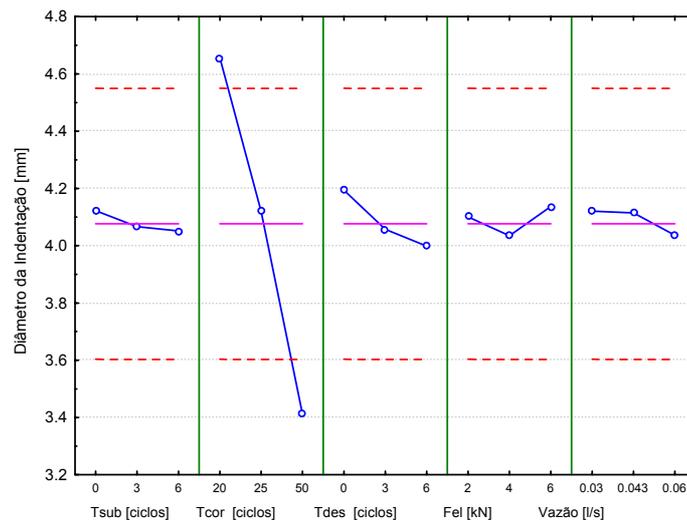


Figura 4.18 – Efeito dos fatores sobre o diâmetro do ponto para a configuração B para o Taguchi.

O modelo de regressão do PCC (Tabela 4.13) apresentou $R^2 = 0,98449$, onde o Tcor também foi significativo e sua interação com a Força do eletrodo (Fel). Esta interação já foi comentada no Item 4.1.1. Os demais gráficos do PCC são mostrados a seguir.

Tabela 4.13 – Modelo de regressão encontrado pelo PCC para o diâmetro do ponto na chapa B.

Fator	P	Coefficiente
Mean/Interc,	0,000000	4,105875
(1)Tsub (L)	0,092203	-0,066667
Tsub (Q)	0,869336	0,015515
(2)Tcor (L)	0,000001	-0,628917
Tcor (Q)	0,301136	-0,102235
(3)Tdes (L)	0,933699	0,002889
Tdes (Q)	0,628818	0,046015
(4)Fel (L)	0,590645	-0,018917
Fel (Q)	0,290533	-0,104735
(5)Vaz (L)	0,893780	0,004639
Vaz (Q)	0,679367	-0,039235
1L by 2L	0,995937	-0,000188
1L by 3L	0,542305	0,022812
1L by 4L	0,842850	-0,007313
1L by 5L	0,861397	0,006438
2L by 3L	0,304848	0,039625
2L by 4L	0,034264	-0,096375
2L by 5L	0,467797	-0,027375
3L by 4L	0,635580	0,017625
3L by 5L	0,587298	-0,020250
4L by 5L	0,745653	-0,012000

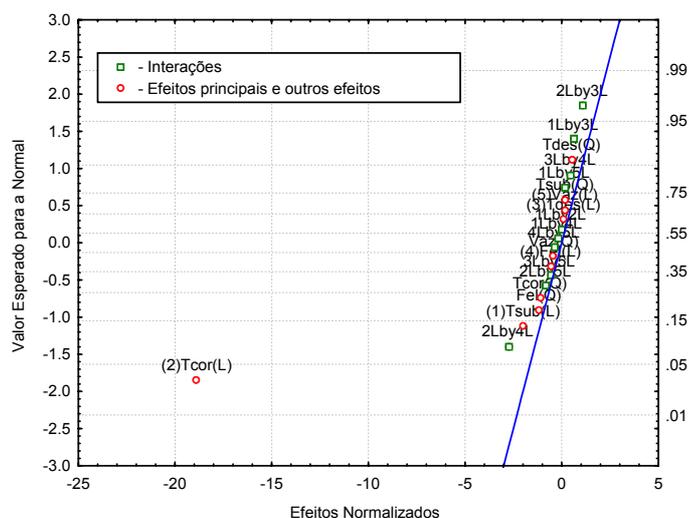


Figura 4.19 – Gráfico de probabilidade normal para o diâmetro do ponto na chapa B.

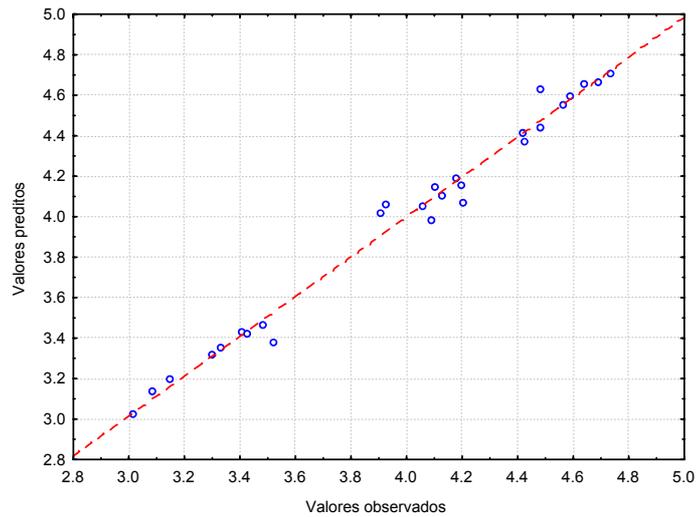


Figura 4.20 – Valores observados versus preditos para o diâmetro do ponto na chapa B.

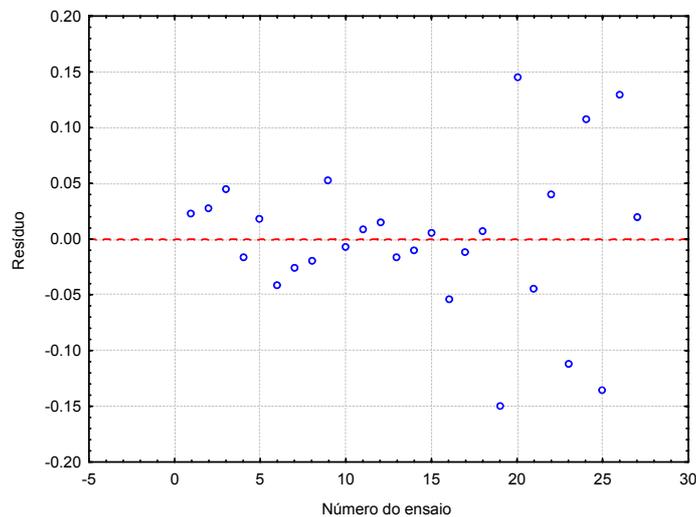


Figura 4.21 – Gráfico de resíduos para o diâmetro do ponto na chapa B.

Pelo exposto até aqui neste Item, ambos os planejamentos indicaram o mesmo ponto robusto/ótimo de trabalho como mostrado na Tabela 4.14, sendo o Tcor a variável mais significativa. Neste caso o Tsub não foi significativa. Uma hipótese para tal, é o fato de existir uma chapa de menor espessura, que já garante a formação do ponto mesmo existindo uma pequena quantidade de zinco.

Tabela 4.14 - Compilação dos resultados para o diâmetro do ponto na chapa B.

Planejamento	Estimativa inicial	Ponto robusto/ótimo	Diâmetro (mm)
Taguchi	—	Tsub=0 Tcor=20 Tdes=0 Fel=6 Vaz=0,03	4,9589
PCC + Otimização	Xo = 0	Tsub = 0 Tcor = 20 Tdes = 0 Fel = 4,5792 Vaz = 0,0522	4,8422
PCC + Otimização	Xo = max (4,74) Tsub = 0 Tcor = 20 Tdes = 0 Fel = 6 Vaz = 0,03	Tsub = 0 Tcor = 20 Tdes = 0 Fel = 4,5796 Vaz = 0,0522	4,8422

4.2.3 - Configuração C (TAGUCHI x PCC)

Da mesma forma que as configurações A e B, para a configuração C somente o Tcor foi estatisticamente significativo e com efeito negativo.

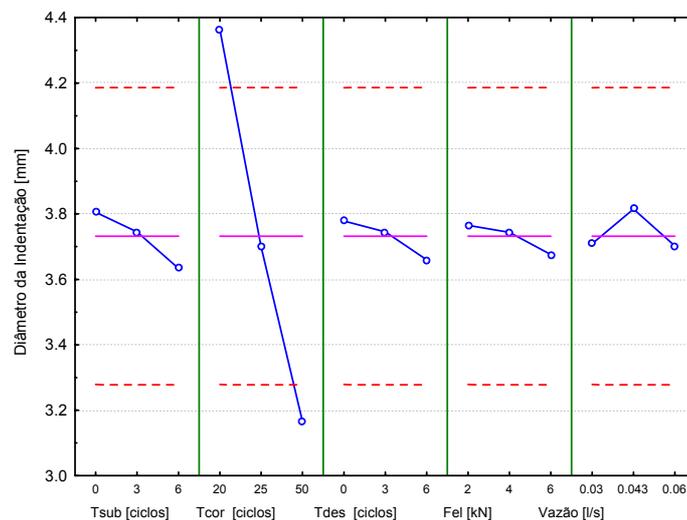


Figura 4.22 – Efeito sobre o diâmetro do ponto para a configuração C no Taguchi.

O modelo de regressão do PCC (Tabela 4.15), com $R^2 = 0,99362$, apresenta o mesmo Tcor como significativo e volta a apresentar Tsub, só que agora o termo quadrático, como

significante. A interação Tcor*Fel também se apresenta como significativa. Desta forma, este resultado corrobora e reafirma os outros dois resultados. Os demais gráficos do PCC são mostrados a seguir.

Tabela 4.15 – Modelo de regressão encontrado pelo PCC para o diâmetro do ponto na chapa C.

Fator	P	Coefficiente
Mean/Interc,	0,000000	3,661822
(1)Tsub (L)	0,092263	-0,041139
Tsub (Q)	0,035819	0,150326
(2)Tcor (L)	0,000000	-0,611139
Tcor (Q)	0,728072	0,020326
(3)Tdes (L)	0,331890	-0,021694
Tdes (Q)	0,533650	0,036826
(4)Fel (L)	0,408152	-0,018278
Fel (Q)	0,137991	-0,095424
(5)Vaz (L)	0,178281	-0,031333
Vaz (Q)	0,973601	-0,001924
1L by 2L	0,729322	0,007906
1L by 3L	0,758026	-0,007031
1L by 4L	0,648128	-0,010469
1L by 5L	0,762163	0,006906
2L by 3L	0,184843	0,032656
2L by 4L	0,003418	-0,101906
2L by 5L	0,586355	-0,012531
3L by 4L	0,240394	0,028406
3L by 5L	0,806093	-0,005594
4L by 5L	0,423566	0,018719

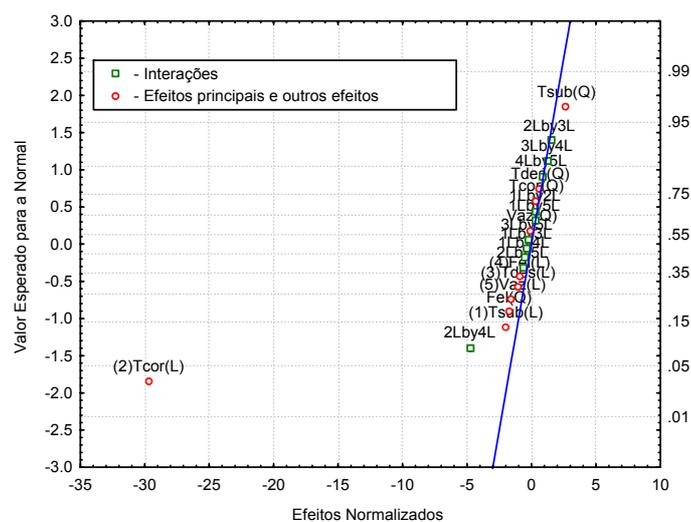


Figura 4.23 – Gráfico de probabilidade normal para o diâmetro do ponto na chapa C.

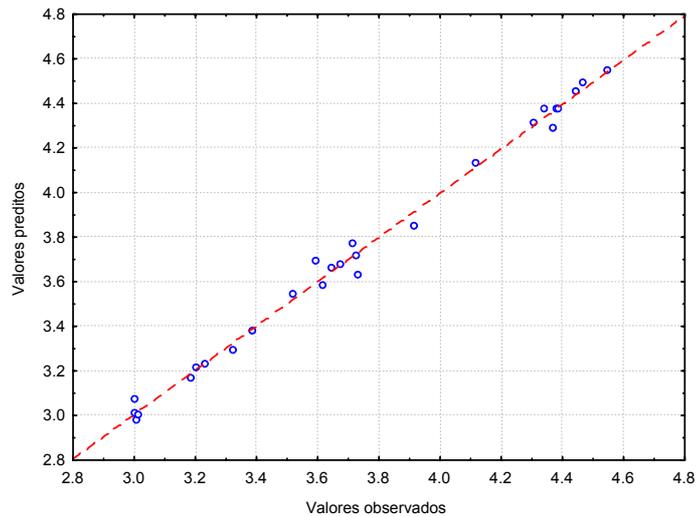


Figura 4.24 – Valores observados versus preditos para o diâmetro do ponto na chapa C.

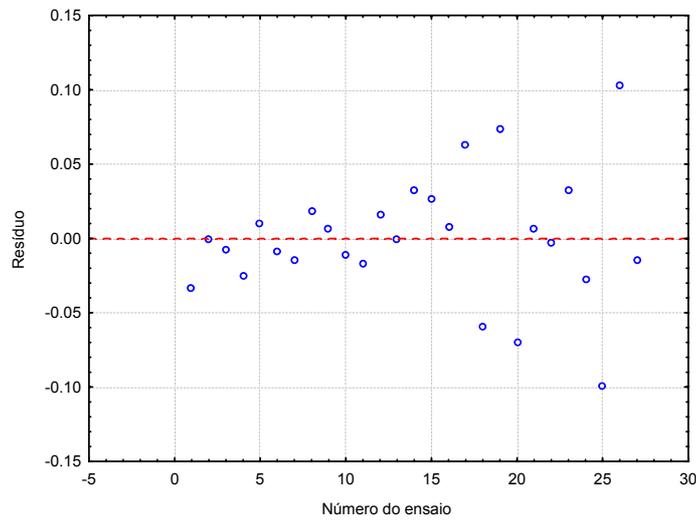


Figura 4.25 – Gráfico de resíduos para o diâmetro do ponto na chapa C.

A Tabela 4.16 traz o comparativo entre os dois planejamentos e resultados similares são obtidos. Vale ressaltar que ao final da análise dos resultados para o diâmetro do ponto, três fatores se mostraram importantes: T_{cor} , T_{sub} e F_{el} , sendo que este último está interagindo com o T_{cor} .

Tabela 4.16 - Compilação dos resultados para o diâmetro do ponto na chapa C.

Planejamento	Estimativa inicial	Ponto robusto/ótimo	Diâmetro (mm)
Taguchi	—	Tsub=0 Tcor=20 Tdes=0 Fel=2 Vaz=0,043	4,6392
PCC + Otimização	Xo = 0	Tsub = 0 Tcor = 20 Tdes = 0 Fel = 4,4922 Vaz = 0,03	4,6008
PCC + Otimização	Xo = max (4,55) Tsub = 0 Tcor = 20 Tdes = 0 Fel = 6 Vaz = 0,03	Tsub = 0 Tcor = 20 Tdes = 0 Fel = 4,4706 Vaz = 0,03	4,6008

4.3 – RESISTÊNCIA MECÂNICA

As Tabelas 4.17 e 4.18 trazem os resultados para o Taguchi e o PCC, respectivamente.

Tabela 4.17 – Resultados das medições de resistência mecânica para o Planejamento Robusto (Taguchi) para as três configurações de chapa.

Ensaio	Tsub (ciclos)	Tcor (ciclos)	Tdes (ciclos)	Fel (kN)	Vaz (l/s)	Resistência mecânica (kN)		
						A	B	C
1	0	20	0	2	0,03	3,0436	1,9470	2,5332
2	0	35	3	4	0,043	1,0817	1,8247	0,8134
3	0	50	6	6	0,06	0,0000	0,0000	0,0000
4	0	35	3	4	0,06	1,5761	1,9898	0,6046
5	3	20	3	6	0,06	2,1634	1,8278	1,5953
6	3	35	0	4	0,06	1,8829	2,0660	0,5823
7	3	50	3	2	0,043	0,4214	1,0131	0,0000
8	3	35	6	4	0,03	1,3889	1,7048	0,0000
9	6	20	6	4	0,043	2,6265	2,0621	2,1967
10	6	35	3	6	0,03	0,7712	1,5088	0,0000
11	6	50	0	4	0,06	0,9543	0,0000	0,0000
12	6	35	3	2	0,06	2,2971	1,7831	0,0000
13	3	20	3	4	0,06	3,1675	1,8681	2,2714
14	3	35	6	2	0,06	2,6417	1,7708	1,7730
15	3	50	3	4	0,03	0,5841	0,0000	0,0000
16	3	35	0	6	0,043	0,0000	0,7664	0,0000

Tabela 4.18 – Resultados das medições de resistência mecânica para o PCC para as três configurações de chapa.

Ensaio	Tsub (ciclos)	Tcor (ciclos)	Tdes (ciclos)	Fel (kN)	Vaz (l/s)	Resistência mecânica (kN)		
						A	B	C
1	0	20	0	2	0,06	4,2736	1,8371	1,6116
2	0	20	0	6	0,03	3,6188	1,8533	2,3140
3	0	20	6	2	0,03	3,4644	1,8511	1,9806
4	0	20	6	6	0,06	3,5590	1,9164	2,1547
5	0	50	0	2	0,03	2,0082	0,5578	0,0000
6	0	50	0	6	0,06	0,0000	0,0000	0,0000
7	0	50	6	2	0,06	1,7529	1,0382	0,0000
8	0	50	6	6	0,03	0,5017	0,0000	0,0000
9	6	20	0	2	0,03	3,5746	0,5578	2,2374
10	6	20	0	6	0,06	2,7462	1,8503	1,5557
11	6	20	6	2	0,06	4,1093	1,7650	1,7579
12	6	20	6	6	0,03	3,0615	1,9003	1,9398
13	6	50	0	2	0,06	1,7132	0,9269	0,0000
14	6	50	0	6	0,03	0,0000	0,0000	0,0000
15	6	50	6	2	0,03	0,6236	0,0000	0,0000
16	6	50	6	6	0,06	0,0000	0,0000	0,0000
17	0	35	3	4	0,043	1,0817	1,7650	0,8134
18	6	35	3	4	0,043	1,4149	1,6118	1,0818
19	3	20	3	4	0,043	4,1880	1,8583	2,4833
20	3	50	3	4	0,043	0,0000	0,5587	0,0000
21	3	35	0	4	0,043	2,5271	1,8434	1,6037
22	3	35	6	4	0,043	1,7710	1,6822	0,6748
23	3	35	3	2	0,043	4,9571	1,8409	1,5247
24	3	35	3	6	0,043	0,0000	1,3362	0,0000
25	3	35	3	4	0,03	2,1218	1,6162	0,0000
26	3	35	3	4	0,06	2,1310	1,3362	1,2494
27	3	35	3	4	0,043	2,3029	1,7243	0,6110

Nestas tabela os valores 0,000 representam os corpos de prova onde a solda quebrou com um mínimo valor de força.

4.3.1 - Configuração A (TAGUCHI x PCC)

Pela figura 4.26 (gráfico de médias do Taguchi), somente o Tempo de corrente foi significativo e com efeito negativo sobre a resistência mecânica. Semelhantemente aos casos estudados para a indentação e diâmetro do ponto, o fluxo de calor tem papel importante aqui, agindo no tamanho da lente. Neste sentido, quanto menor o tempo de corrente menor será este efeito, proporcionando, assim, soldas mais resistentes.

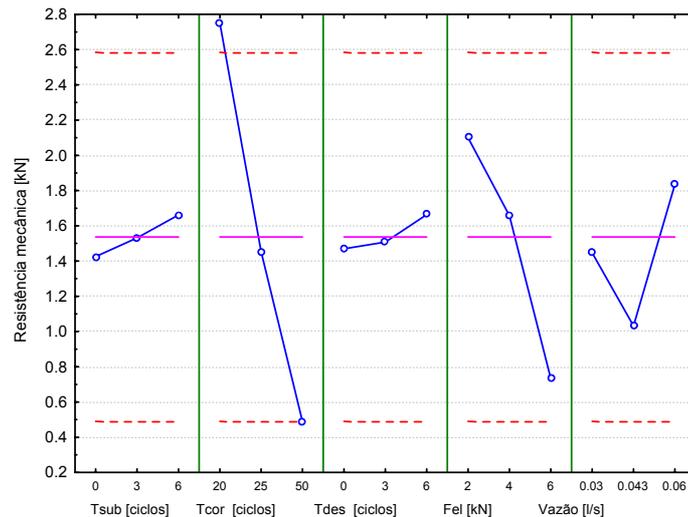


Figura 4.26 - Efeito sobre a resistência mecânica para a configuração A do Taguchi.

O modelo de regressão do PCC apresentado na Tabela 4.19 possui $R^2 = 0,85936$, que foi a menor correlação encontrada até agora. Isto se deve em grande parte ao tipo de dados, onde o valor considerado para soldas com colagem (sem a solda ter sido realizada) foi zero. Uma matriz com muitos zeros torna-se um problema para interpolar e executar análises estatísticas. De toda forma, os resultados do PCC apontam na mesma direção do Taguchi para o Tcor, adicionando mais um fator significativo que é a Fel, cujos efeitos no processo já foram abordados no Item 4.1.1. Neste caso, a Fel possui um efeito negativo, ou seja, quanto menor o seu valor, maior será a resistência mecânica. Isto se deve ao fato de que o efeito de aumentar a geração de calor na interface é menor do que aquele provocado pelo amassamento do ponto, o que passa a agir como um concentrador de tensão.

Os demais gráficos advindos da análise do PCC são mostrados nas figuras 4.27 a 4.29.

Tabela 4.19 – Modelo de regressão encontrado pelo PCC para a resistência mecânica na chapa A.

Fator	P	Coefficiente
Mean/Interc,	0,003731	2,02207
(1)Tsub (L)	0,570619	-0,16761
Tsub (Q)	0,367666	-0,73866
(2)Tcor (L)	0,002079	-1,44421
Tcor (Q)	0,892378	0,10704
(3)Tdes (L)	0,758598	-0,08990
Tdes (Q)	0,837835	0,16209
(4)Fel (L)	0,041645	-0,72165
Fel (Q)	0,540843	0,49159
(5)Vaz (L)	0,803169	0,07281
Vaz (Q)	0,860177	0,13944
1L by 2L	0,919193	-0,03136
1L by 3L	0,938257	0,02394
1L by 4L	0,936585	-0,02459
1L by 5L	0,790641	0,08228
2L by 3L	0,867759	-0,05151
2L by 4L	0,530023	-0,19749
2L by 5L	0,897671	-0,03977
3L by 4L	0,634155	0,14854
3L by 5L	0,653607	0,13991
4L by 5L	0,543314	-0,19093

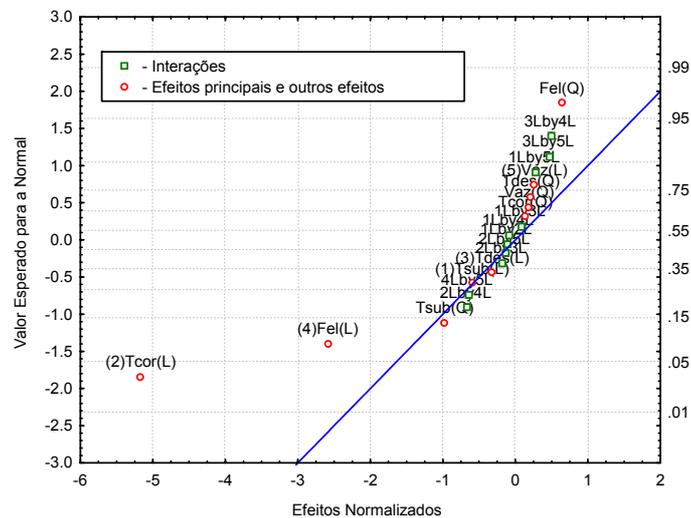


Figura 4.27 - Gráfico de probabilidade normal para a resistência mecânica do ponto na chapa A.

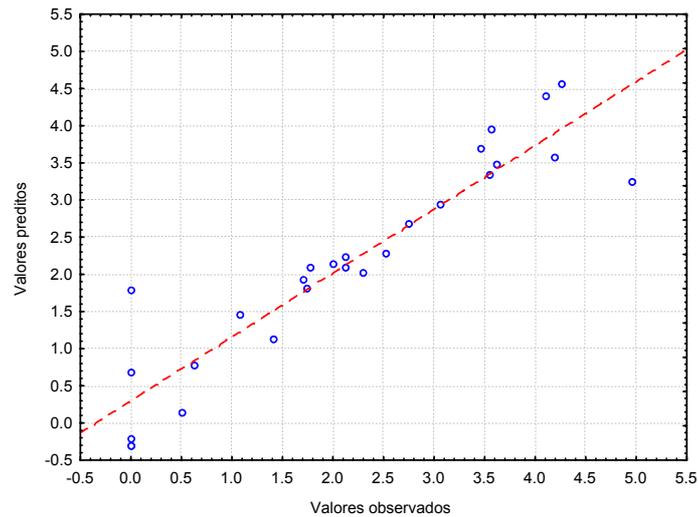


Figura 4.28 - Valores observados versus preditos para a resistência mecânica do ponto na chapa A.

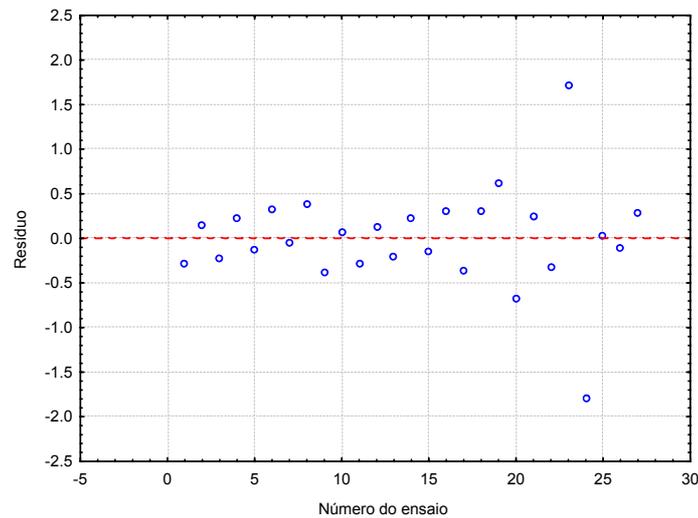


Figura 4.29 - Gráfico de resíduos para a resistência mecânica do ponto na chapa A.

Com relação à comparação dos resultados advindo do Taguchi e PCC + Otimização, isto é feito na Tabela 4.20, onde o ponto robusto calculado pelo Taguchi ficou bem aquém do ponto ótimo obtido pelo PCC + Otimização. Isto se deve o Taguchi ser mais sensível a valores nulos (colagem das chapas) existentes na matriz de planejamento, uma vez que possui um menor número de experimentos. De toda forma, ambos os planejamentos apontaram na mesma direção de busca.

Tabela 4.20 - Compilação dos resultados para a resistência mecânica do ponto na chapa A.

Planejamento	Estimativa inicial	Ponto robusto/ótimo	Resistência mecânica (kN)
Taguchi	-	Tsub=6 Tcor=20 Tdes=6 Fel=2 Vaz=0,06	3,86302
PCC + Otimização	Xo = 0	Tsub = 2,8917 Tcor= 20 Tdes = 0 Fel = 2 Vaz = 0,06	5,2421
PCC + Otimização	Xo = max (4,9571) Tsub = 3 Tcor = 35 Tdes = 3 Fel = 2 Vaz = 0,043	Tsub = 2,8917 Tcor = 20 Tdes = 0 Fel = 2 Vaz = 0,06	5,2421

4.3.2 Configuração B (TAGUCHI x PCC)

Semelhantemente ao caso anterior, para a configuração B, o Tcor foi o mais significativo obtido pelo Taguchi (figura 4.30), possuindo um efeito negativo sobre a resistência mecânica.

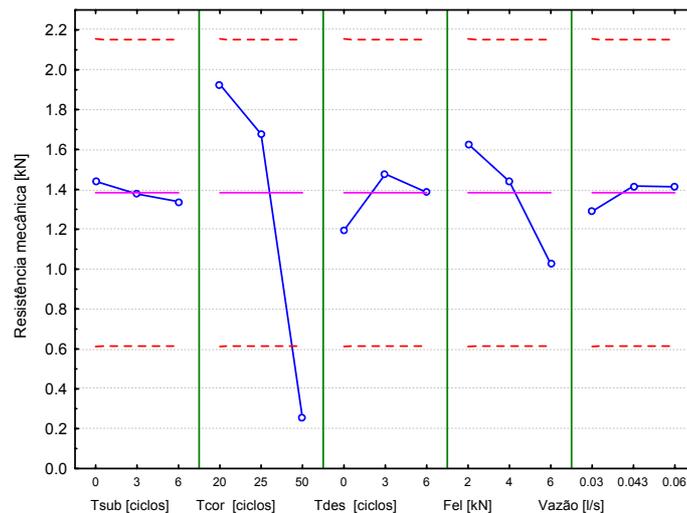


Figura 4.30 - – Efeito dos fatores sobre a resistência mecânica para a configuração B para o Taguchi.

Para o PCC, obteve um modelo de regressão com $R^2 = 0,98075$, mostrado na Tabela 4.21. Neste caso, além do Tcor, foram também significantes Tsub e Vaz, além das interações

Tcor*Fel, Fel*Vaz. Neste caso foi admitida também como significativa, a interação Tsub*Fel, com $p = 0,054817$.

Por estes resultados, admitem-se os efeitos já bem caracterizados e discutidos de Tcor, Fel e Tsub (queima do zinco). A diferença aqui é o efeito da Vazão de água (Vaz) na resistência mecânica. Como será confirmado quando da análise dos resultados para a configuração C, dentre todos os planejamentos, somente neste caso a Vazão de água foi significativa.

Tabela 4.21 – Modelo de regressão encontrado pelo PCC para a resistência mecânica na chapa B.

Fator	P	Coefficiente
Mean/Interc,	0,000001	1,686344
(1)Tsub (L)	0,049366	-0,122598
Tsub (Q)	0,961585	0,006800
(2)Tcor (L)	0,000009	-0,683775
Tcor (Q)	0,012935	-0,473095
(3)Tdes (L)	0,449580	0,040361
Tdes (Q)	0,570748	0,081200
(4)Fel (L)	0,141964	-0,084356
Fel (Q)	0,517728	-0,093050
(5)Vaz (L)	0,040800	0,129643
Vaz (Q)	0,180170	-0,205400
1L by 2L	0,430727	0,044711
1L by 3L	0,797468	-0,014203
1L by 4L	0,054817	0,125960
1L by 5L	0,116113	0,097165
2L by 3L	0,080203	-0,111303
2L by 4L	0,003125	-0,252015
2L by 5L	0,820283	0,012565
3L by 4L	0,464508	-0,041344
3L by 5L	0,454488	-0,042324
4L by 5L	0,022377	-0,161711

Estudos do Laprosolda (Wolff, 2005) têm mostrado que a temperatura da água pouco varia em função do processo de solda a ponto. Desta forma, era de se esperar que o efeito da Vazão de água fosse pouco significativo na geometria e resistência do ponto, mas não talvez na vida do eletrodo.

Devido às particularidades deste caso (chapas de diferentes espessuras), não é possível afirmar se os resultados encontrados são realmente um efeito da Vazão de água

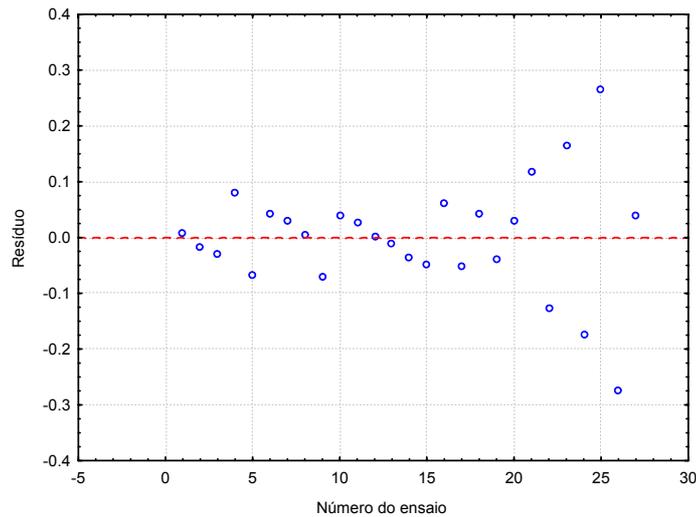


Figura 4.33 - Gráfico de resíduos para a resistência mecânica do ponto na chapa B.

Os resultados compilados são mostrados na Tabela 4.22, onde os valores encontrados pelas duas metodologias ficaram bem próximos.

Tabela 4.22 - Compilação dos resultados para a resistência mecânica do ponto na chapa B.

Planejamento	Estimativa inicial	Ponto robusto/ótimo	Resistência mecânica (kN)
Taguchi	—	Tsub=0 Tcor=20 Tdes=3 Fel=2 Vaz=0,043	2,355500
PCC + Otimização	Xo = 0	Tsub = 0 Tcor = 23,1890 Tdes = 6 Fel = 3,2578 Vaz = 0,0447	2,3283
PCC + Otimização	Xo = max (1,9164) Tsub = 0 Tcor = 20 Tdes = 6 Fel = 6 Vaz = 0,06	Tsub = 0 Tcor = 23,1875 Tdes = 6 Fel = 3,2582 Vaz = 0,0447	2,3283

4.3.3 - Configuração C (TAGUCHI x PCC)

O último caso a ser analisado trata dos efeitos dos fatores em estudo sobre a resistência mecânica da junta para a configuração C. No caso do Taguchi, tem-se a figura 4.34, onde observa-se que somente Tcor é estatisticamente significativo e possui um efeito negativo sobre a resposta.

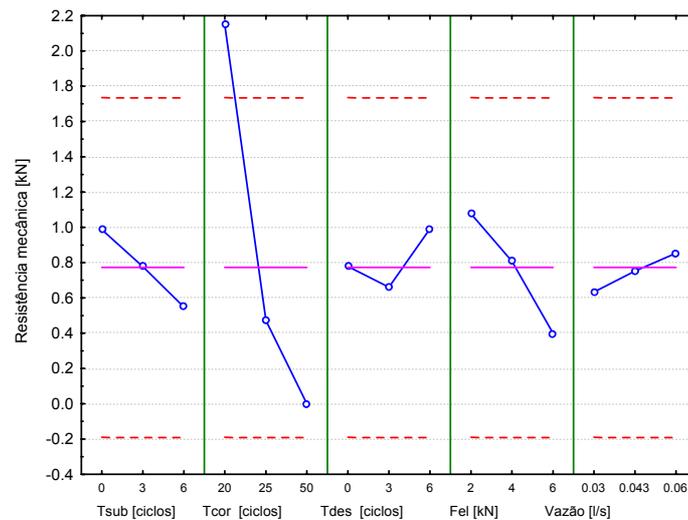


Figura 4.34 - Efeito dos fatores sobre a resistência mecânica para a configuração C para o Taguchi.

No caso do PCC, o modelo de regressão (Tabela 4.23) apresenta $R^2 = 0,87785$, que embora não seja um bom ajuste (o que pode ser visualizado pela figura 4.36), concorda com os resultados advindos do Taguchi, ou seja, somente Tcor é estatisticamente significativo e possui um efeito negativo sobre a resistência mecânica (resposta).

Os demais gráficos do PCC são mostrados a seguir.

Tabela 4.23 – Modelo de regressão encontrado pelo PCC para a resistência mecânica na chapa C.

Fator	P	Coefficiente
Mean/Interc,	0,011391	0,89105
(1)Tsub (L)	0,918505	-0,01676
Tsub (Q)	0,961311	0,02156
(2)Tcor (L)	0,000698	-1,00194
Tcor (Q)	0,487051	0,31560
(3)Tdes (L)	0,782986	-0,04525
Tdes (Q)	0,634788	0,21321
(4)Fel (L)	0,698840	-0,06378
Fel (Q)	0,714210	-0,16370
(5)Vaz (L)	0,961444	-0,00792
Vaz (Q)	0,506136	-0,30135
1L by 2L	0,837753	0,03563
1L by 3L	0,912622	-0,01907
1L by 4L	0,624153	-0,08602
1L by 5L	0,904024	-0,02096
2L by 3L	0,967194	-0,00714
2L by 4L	0,892260	-0,02354
2L by 5L	0,620313	0,08699
3L by 4L	0,904024	0,02096
3L by 5L	0,624153	0,08602
4L by 5L	0,912622	0,01907

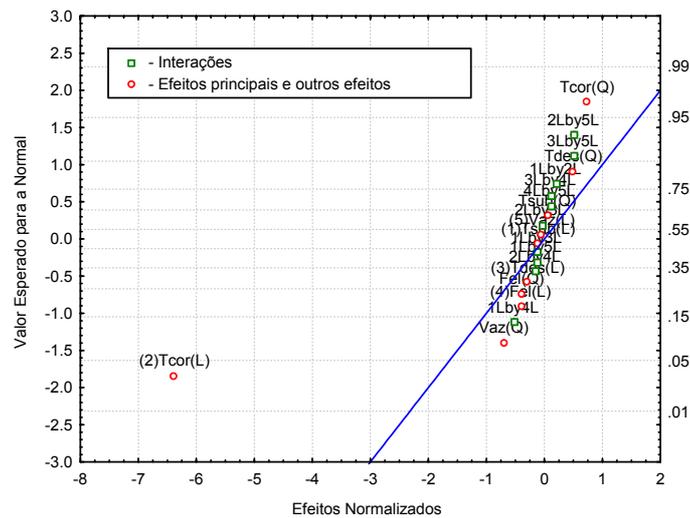


Figura 4.35 - Gráfico de probabilidade normal para a resistência mecânica do ponto na chapa C.

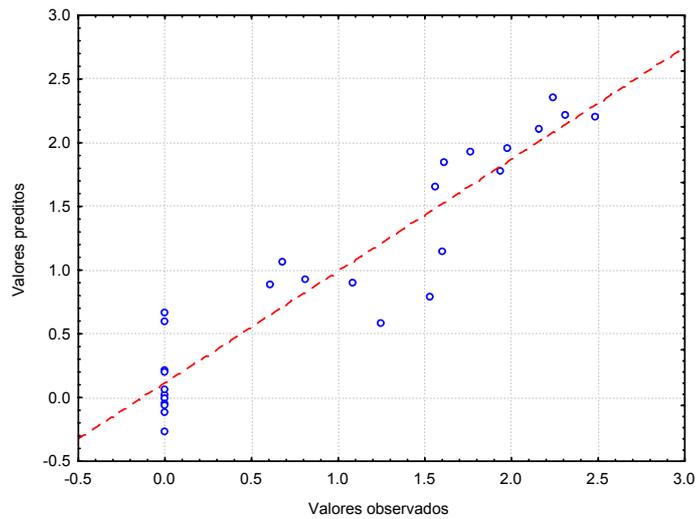


Figura 4.36 - Valores observados versus preditos para a resistência mecânica do ponto na chapa C.

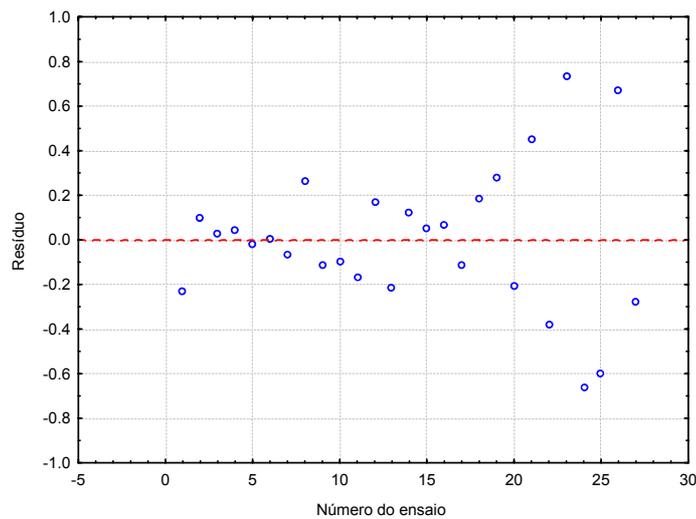


Figura 4.37 - Gráfico de resíduos para a resistência mecânica do ponto na chapa C.

Na compilação final dos resultados (Tabela 4.24), há uma concordância, já mencionada, entre os resultados obtidos, o que ressalta o papel do Tempo de corrente (Tcor), como principal fator no processo.

Tabela 4.24 - Compilação dos resultados para a resistência mecânica do ponto na chapa C.

Planejamento	Estimativa inicial	Ponto robusto/ótimo	Resistência mecânica (kN)
Taguchi	—	Tsub=0 Tcor=20 Tdes=6 Fel=2 Vaz=0,06	2,966775
PCC + Otimização	Xo = 0	Tsub = 0 Tcor = 20 Tdes = 0 Fel = 4,1210 Vaz = 0,0396	2,5366
PCC + Otimização	Xo = max (2,4833) Tsub = 3 Tcor = 20 Tdes = 3 Fel = 4 Vaz = 0,043	Tsub = 0 Tcor = 20 Tdes = 0 Fel = 4,1214 Vaz = 0,0396	2,5366

4.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido ao grande número de dados, resultados e informações, é importante sumarizar os principais resultados e discussões realizadas. Isto é feito pela Tabela 4.25, que contempla os fatores e interações estatisticamente significativos apresentados ao longo deste capítulo. Esta distribuição segue a sistemática apresentada na figura 4.1.

Como pode ser visto por esta tabela, o principal fator encontrado foi o Tempo de corrente (Tcor) e em menor escala a Força do eletrodo. O Tempo de subida (Tsub) também se mostrou significativo para a formação do ponto.

Tabela 4.25 – Compilação final dos resultados com os fatores e interações estatisticamente significativos.

Resposta	Chapas	Planejamento	Fatores	p	Coefficiente
Indentação	A	PCC	Tcor	0,000014	-6,32417
			Tcor ²	0,045235	3,36220
	Tcor*Fel		0,003727	2,39344	
		Taguchi	Tcor	—	Negativo
	B	PCC	Tcor	0,000001	-6,41583
			Fel	0,000205	2,33222
			Fel ²	0,019861	-2,49439
	Tcor*Fel		0,003914	-1,40750	
		Taguchi	Tcor	—	Negativo
C	PCC	Tcor	0,000001	-9,63694	
		Fel	0,012640	1,53306	
		Taguchi	Tcor	—	Negativo
Diâmetro	A	PCC	Tsub	0,043189	-0,071833
			Tcor	0,000002	-0,507139
			Taguchi	Tcor	—
	B	PCC	Tcor	0,000001	-0,628917
			Tcor*Fel	0,034264	-0,096375
			Taguchi	Tcor	—
	C	PCC	Tsub ²	0,035819	0,150326
			Tcor	0,000000	-0,611139
			Tcor*Fel	0,003418	-0,101906
	Taguchi	Tcor	—	Negativo	
Resistência	A	PCC	Tcor	0,002079	-1,44421
			Fel	0,041645	-0,72165
			Taguchi	Tcor	—
	B	PCC	Tsub	0,049366	-0,122598
			Tcor	0,000009	-0,683775
			Tcor ²	0,012935	-0,473095
			Vaz	0,040800	0,129643
			Tsub*Fel	0,054817	0,125960
	Tcor*Fel		0,003125	-0,252015	
Fel*Vaz	0,022377		-0,161711		
	Taguchi	Tcor	—	Negativo	
C	PCC	Tcor	0,000698	-1,00194	
			Taguchi	Tcor	—

5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos na faixa operacional empregada neste trabalho, é possível concluir acerca dos seguintes aspectos:

a) Filmagens sincronizadas em alta velocidade

- O tamanho da lentilha oscila de acordo com a oscilação da corrente (neste caso 60 Hz);
- Quanto maior o valor rms da corrente, mais tempo leva para a lentilha se solidificar;
- O revestimento de zinco inicia sua queima já no primeiro ciclo para correntes acima de 3 kA;
- O revestimento de zinco está completamente queimado até o décimo sexto ciclo para correntes acima de 3 kA;
- A lentilha começa se forma (chapa tornar-se vermelha) a partir do décimo ciclo para correntes acima de 3 kA;
- Para correntes abaixo de 2 kA, não foi verificado a formação de lentilha.

b) Indentação

- O Planejamento Robusto (Taguchi) determinou que somente o Tempo de corrente (Tcor) foi estatisticamente significativo e que teve um efeito negativo, ou seja, quanto maior o valor de Tcor, menor será a resposta (indentação). Isto foi verificado para as três configurações de chapas;
- O Planejamento Composto Central (PCC) identificou o Tcor também como sendo o de maior significância estatística para a indentação. Em adição, foi verificado que a Força do eletrodo (Fel) e sua interação com o Tcor também foram estatisticamente significante;
- Pode-se dizer que uma vez que os resultados de ambos os planejamentos indicarem que Tcor é significativo e possui um efeito negativo, verifica-se como na literatura prática de aplicação deste processo, que altas correntes e tempos curtos devem ser utilizados na soldagem a ponto.

c) Diâmetro do ponto

- O método Taguchi mostra T_{cor} como o único fator que influencia no diâmetro do ponto de solda, possuindo efeito negativo, semelhantemente à análise da indentação. Esta tendência é observada nas 3 configurações de chapas;
- O PCC determinou que o T_{cor} é significativo, com tendência negativa, também nas três configurações de chapas;
- Na configuração A, além de T_{cor} , o Tempo de subida (T_{sub}) se mostra como significativo e com efeito negativo, provavelmente devido à queima adicional do revestimento. Já na configuração B, não se verifica a influência de T_{sub} , mas sim a interação $T_{cor} * Fel$. Para a configuração C, apresentam-se como significantes T_{cor} , T_{sub} e a interação $T_{cor} * Fel$;
- Neste sentido, com um maior tempo de soldagem ($T_{cor} + T_{sub}$), menor é a resposta (diâmetro do ponto), logo o T_{sub} deverá ser escolhido com um valor menor.

c) Resistência mecânica

- Nas três configurações, ambos os planejamentos indicaram T_{cor} como o fator de maior significância e com efeito negativo. O PCC também mostra a Fel como parâmetro significativo na configuração A e com interações na configuração B.

d) Comparação entre metodologias

- Pela comparação entre os resultados obtidos pelo Taguchi (definição do ponto robusto de trabalho) e o PCC mais o algoritmo de otimização (definição do ponto ótimo de trabalho), os valores encontrados por ambas metodologias foram próximos, o que significa que o ponto ótimo de trabalho é também um ponto robusto, o que para a aplicação na indústria é extremamente interessante;
- De uma forma geral pode-se dizer que menor tempo de solda e maior corrente é a melhor combinação de parâmetros (ponto de trabalho) para se obter melhores juntas para uma mesma energia imposta.

6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a realização deste trabalho surgiram algumas dúvidas e inquietudes, principalmente pelo desejo de relacionar ou comparar alguns fenômenos com os efeitos já conhecidos por este trabalho. Algumas sugestões são dadas a seguir:

- Execução de filmagens em um processo de corrente contínua (média frequência, por exemplo) e comparação dos resultados com aqueles obtidos no presente trabalho;
- Avaliação da formação da lentilha, via filmagem em alta velocidade, em outros materiais (alumínio e aço inoxidável) ou mesmo materiais dissimilares;
- Filmagem do efeito shunt, considerando distâncias diferentes entre pontos de solda e também em diferentes tipos de chapas;
- Modelamento numérico da formação da lentilha e comparação com os resultados experimentais da filmagem;
- Executar um estudo sobre o efeito dos parâmetros de soldagem aqui avaliados sobre o tempo de vida do eletrodo;
- Verificação do efeito do desalinhamento das pinças sobre a qualidade da junta;
- Avaliação da resistência dinâmica (curva e valores absolutos) do processo na qualidade da junta formada;
- Efeitos de condições de chão de fábrica (óleo, fixação, efeito shunt, tipo de junta, etc) sobre a qualidade da junta;
- Avaliação de diferentes tipos de revestimento (galvanização a quente, eletrolítica e Galvanil®) sobre a formação e qualidade do ponto e vida do eletrodo;
- Avaliação da geometria e tipo de eletrodo na formação e qualidade do ponto;
- Executar um estudo semelhante ao apresentado para este trabalho em níveis de corrente maiores que aqueles utilizados neste trabalho.
- Avaliar a resistência da solda analisando a ZAC (Zona Afetada pelo Calor).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrews, D. R. e Broomhead, J. (1975). “Quality Assurance for Resistance Spot Welding.” *Welding Journal*, June, Vol. 54, Nº 6, pp. 431 – 435.

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

AWS (1999). *Safety in Welding, Cutting, and Allied Processes*. International Standard Book Number: 0-87171-564-3. American Welding Society. 550 N. W. LeJeune Road, Miami, Florida 33126. Printed in the U.S.A.

AWS/SAE D8.9M (2002). *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. American Welding Society. 550 N. W. LeJeune Road, Miami, Florida 33126. Printed in the U.S.A.

Bálsamo, P. S. S. ; Vilarinho, L. O. ; M. Vilela ; Scotti, A. . (2000) “Development of an experimental technique for studying metal transfer in welding: synchronized shadowgraphy”. *The Int. Journal for the Joining of Materials*, v. 12, n. 2, p. 48-59.

Barros Neto, B., Scarminio, I. S. e Bruns, R. E. (2002) *Como Fazer Experimentos*. 2º edição, Unicamp, 412 p.

Branco, H. L. O. (2004). *Avaliação de chapas de eletrodos utilizadas na soldagem por resistência de chapas galvanizadas automotivas*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 113p.

Chang, H. S. e Cho, H. S. (1990). “A Study on the Shunt Effect in Resistance Spot Welding.” *Welding Journal*, August, Vol. 69, Nº 8, pp. 308-s – 317-s.

Cho, Y. e Rhee, S. (2000) “New technology for measuring dynamic resistance and estimating strength in resistance spot welding”. *Meas. Sci. Technol.*, 11, pp. 1173–1178.

Cho, Y. e Rhee, S. (2002). “Primary Circuit Dynamic Resistance Monitoring and its Application to Quality Estimation during Resistance Spot Welding.” *Welding Journal*, June, pp. 104-s – 111-s.

Cho, Y. e Rhee, S. (2003). “Experimental Study of Nugget Formation in Resistance Spot Welding.” *Welding Journal*, August, pp. 195-s – 201-s.

- Czoara, C. A. e Kilmer, T. H. (1976). “Advancing the State of the Art in Resistance Welding.” *Welding Journal*, April, Vol. 55, Nº 4, pp. 259 – 263.
- Daimler-Chrysler do Brasil (2004) Comunicação eletrônica privada.
- EWI (2002). *Magnesium Joining for Automotive Applications*. EWI CRP Report no.217, July 30, 50p.
- Ferrasse, S. Verrier, P. e Meesemaeker. (1998). “Resistance spot weldability of strength steels for use in car industry.” *Welding in the World*, Vol. 41, pp. 177 – 195.
- Gedeon, S. A., Schrock, D., LaPointe, J. e Eagar, T. W. (1984b). “Metallurgical and Process Variables Affecting the Resistance Spot Weldability of Galvanized Sheet Steels.” *Society of Automotive Engineers, Inc.*, pp. 1 – 9.
- Gedeon, S. A., Sorensen, C. D., Ulrich, K. T. e Eagar, T. W. (1987). “Measurement of Dynamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welds.” *Welding Journal*. December, pp. 378-s – 385-s.
- Guedes, J. B. P., (2004). *Uma Contribuição ao Estudo da Soldabilidade de Aços Galvanizados pelo Processo Solda a Ponto por Resistência*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG.
- Han, Z., Indacochea, J. E., Chen, C. H. e Bhat, S. (1993). “Weld Nugget Development and Integrity in Resistance Spot Welding of High-Strength Cold-Rolled Sheet Steels.” *Welding Journal*, May, pp. 209-s – 216-s.
- Hardin, Winn (2003). “Spot Welding: Still in the Driver’s Seat”. *Welding Journal*, November, pp. 46 – 49.
- Hirsch, Roger B. (1993). “Tip Force Control Equals Spot Weld Quality.” *Welding Journal*, March, pp. 57 – 60.
- Holliday, R., Parker, J. D. e Williams, N. T. (1995). “Electrode deformation when spot welding coated steels.” *Welding in the World*. Vol. 15, Nº 3, pp. 160-164.
- Holliday, R., Parker, J. D. e Williams, N. T. (1996). “Relative contribution of electrode tip growth mechanisms in spot welding zinc coated steels”. *Welding in the World*. Vol. 37, Nº 4, pp. 186-193.
- Houcroft, P. T. (1979). *Welding process technology*. (ed) Cambridge University Press, New York, E.U.A., 313 p.
- Ikeda, Rinsei., Yasuda, Koichi e Hasiguchi, Koichi. (1998). “Resistance spot weldability and electrode wear characteristics of aluminum alloy sheets.” *Welding in the World*, Vol. 41, pp. 492 – 498.
- Intermachinery (2002). Manual de Soldagem por Resistência a Ponto, 41 p.

- Kaiser, J. G., Dunn, G. J. e Eagar, T. W. (1982). “The Effect of Electrical Resistance on Nugget Formation During Spot Welding.” *Welding Journal*, June, pp. 167-s – 174-s.
- Karagoulis, M. J. (1994). “A Nuts-and-Bolts Approach to the Control of Resistance Spot Welding.” *Welding Journal*, July, pp. 27 – 31.
- Key, J. F. e Courtney, T. H. (1974). “Refractory metal Composite Tips for Resistance-Spot Welding of Galvanized Steel,” *Welding Journal*, June, Vol. 53, N° 6, pp. 261-s – 265-s.
- Machado, I. G. (1996). *Soldagem & Técnicas conexas: Processos*. Porto Alegre, 477p.
- Marques, P. V. (1991). *Tecnologia da soldagem*. Belo Horizonte/MG, (ed) ESAB, 352p.
- Metals Handbook (1983). *Vol. 6: Welding, Brazing and Soldering*. Ninth Edition. AMS: American Society for Metal. Metal Park, Ohio 44073, U.S.A.
- Mineração e Metalurgia (2000). “*Agregando Qualidade: Aços Galvanizados*”. Setembro, N°38, Área de Operações Industriais 2, Gerência Setorial 3, Editoração: GESIS/AO2.
- Montgomery, D. C. (2001) *Design and Analysis of Experiments* 5th edition, John Wiley & Sons, 684p.
- Needham, J. C. (1983). “Measurement of True Resistance at High Alternating Current (for resistance spot and seam welding, and for cables).” The Welding Institute (TWI), Report n° 210/1983, April, 22p.
- Parma, R. S. (1995). *Welding Processes and Technology*. (ed) Khanna Publishers. Reprinter, pp. 322-358.
- Phadke, M. S. (1989). *Quality Engineering Using Robust Design*. Prentice Hall, USA, 334p.
- Powell, H. J., Westgate, S. A. e Wiemer, K. (1996). “A practical guide to process and quality control for resistance spot welding”. The Welding Institute, Report n° 569/1996, August.
- RWMA (1989). *Resistance Welding Manual*, Resistance Welder Manufacturing Association. U.S.A., 4th Ed., Nov., 443 p.
- Rivet, R. M. (1984). “*Simple monitoring devices for resistance welding*.” The Welding Institute Research Bulletin, March, pp. 74 – 78.
- Roswell, S. L. (1976). “*Resistance Spot Welded Galvanized Steel Sheet, Electrode Life and Corrosion Tests*.” The Welding Institute, Report n° 17/1976/P, September. 44p.
- Satonaka, S. e Matsuyama, K. (2000). “Review on Inspection Techniques for Spot Welds.” *Welding in the World*, Vol. 44, N° 3, pp. 29 – 36.

- Tan, W.; Zhou, Y; Kerr, H. W. e Lawson, S. (2004) “A study of dynamic resistance during small scale resistance spot welding of thin Ni sheets”. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 37, pp. 1998–2008.
- Tang, H., Hou, W., Hu, S. J., Zhang, H. Y., Feng, Z. e Kimchi, M. (2003). “Influence of Welding Machine Mechanical Characteristics on the Resistance Spot Welding Process and Weld Quality.” *Welding Journal*, May, pp. 116-s – 124-s.
- TWI (2005) *Resistance Welding* (www.twi.org). Texto acessado: 23/10/2005.
- Vanderplaats, G. N., 1984, “*Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications*”, McGraw Hill, 333p.
- Vilarinho, L. O., Saramago, S. F. P., Bálamo, P. S. S., Scotti, A. Otimização do Cálculo de Variáveis no Processo MIG Pulsado In: *CONEM 2000*, 2000, Natal.
- Villafuerte, J. (2003). “Stronger Cooper for Longer lasting Contact Tips and Eletrodes.” *Welding Journal*, November, pp. 50 – 52.
- Weber, G., Preß, H. (1994). “Description of the electrical processes in the secondary circuit of resistance welding equipment.” *Welding in the World*. Vol. 33, Nº 1, pp. 8-13.
- Wainer, E., Brandi, S. D., de Mello, F. D. H., (1992). *SOLDAGEM, processos e metalurgia*. (ed) Editora Edgard Blucher Ltda. pp 217 – 242.
- Westgate, S. A. (2002) A general review of recent developments in resistance welding. In: *2nd International Seminar on Advances in Resistance Welding*, 6-7 November 2002, Aachen, Germany.
- Wolff, M. A. (2005) *Medidas da Variação de Temperatura Durante a Soldagem com Máquina de Soldagem a Pontos*. Relatório Interno LAPROSOLDA/UFU 07/2005, Abril, 11 p.
- Wu, K. C. (1968). “Eletrode Indentation Criterion for Resistance Spot Welding”. *Welding Journal*. Vol. 47, Nº 10, pp. 472-s – 478-s.
- Yeung, K. S. e Thornton, P. H. (1999). “Transient Thermal Analysis of Spot Welding Eletrodes.” *Welding Journal*, January, pp. 1-s – 6-s.
- Zhou, M., Zhang, H. e Hu, J. (2003). “Relationships between Quality and Attributes of Spot Welds.” *Welding Journal*, April, pp. 72-s – 77-s.

APÊNDICES

A – TABELAS COM OS FATORES CODIFICADOS DOS PLANEJAMENTOS: MÉTODO TAGUCHI E PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL (PCC)

Tabela A1 – Valores codificados dos fatores para o método Taguchi

Fatores Ensaio	T_{sub} (ciclos)	T_{cor} (ciclos)	T_{des} (ciclos)	F_{el} (kN)	V_{az} (l/seg)
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	2	2	2	3
5	2	1	2	3	3
6	2	2	1	2	3
7	2	3	2	1	2
8	2	2	3	2	1
9	3	3	3	2	2
10	3	2	2	3	1
11	3	3	1	2	3
12	3	2	2	1	3
13	2	1	2	2	3
14	2	2	3	1	3
15	2	3	2	2	1
16	2	2	1	3	2

Tabela A2– Valores codificados das variáveis para o PCC

Fatores Ensaio	T_{sub} (ciclos)	T_{cor} (ciclos)	T_{des} (ciclos)	F_{el} (kN)	V_{az} (l/seg)
1	-1	-1	-1	-1	1
2	-1	-1	-1	1	-1
3	-1	-1	1	-1	-1
4	-1	-1	1	1	1
5	-1	1	-1	-1	-1
6	-1	1	-1	1	1
7	-1	1	1	-1	1
8	-1	1	1	1	-1
9	1	-1	-1	-1	-1
10	1	-1	-1	1	1
11	1	-1	1	-1	1
12	1	-1	1	1	-1
13	1	1	-1	-1	1
14	1	1	-1	1	-1
15	1	1	1	-1	-1
16	1	1	1	1	1
17	-1	0	0	0	0
18	1	0	0	0	0
19	0	-1	0	0	0
20	0	1	0	0	0
21	0	0	-1	0	0
22	0	0	1	0	0
23	0	0	0	-1	0
24	0	0	0	1	0
25	0	0	0	0	-1
26	0	0	0	0	1
27 (C)	0	0	0	0	0