

LUCAS PLADEVALL MOREIRA

**MONITORAÇÃO DO DESGASTE DO ELETRODO PARA PROCESSOS DE SOLDAGEM
A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA EM CONDIÇÕES INDUSTRIAIS**

São Paulo
2009

LUCAS PLADEVALL MOREIRA

**MONITORAÇÃO DO DESGASTE DO ELETRODO PARA PROCESSOS DE SOLDAGEM
A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA EM CONDIÇÕES INDUSTRIAIS**

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Engenheiro Mecânico - Habilitação:
Engenharia Mecatrônica.

São Paulo
2009

LUCAS PLADEVALL MOREIRA

**MONITORAÇÃO DO DESGASTE DO ELETRODO PARA PROCESSOS DE SOLDAGEM
A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA EM CONDIÇÕES INDUSTRIAIS**

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Engenheiro Mecânico - Habilitação:
Engenharia Mecatrônica.

Área de concentração:
Engenharia Mecânica – Habilitação:
Engenharia Mecatrônica.

Orientador:
Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

São Paulo
2009

FICHA CATALOGRÁFICA

Moreira, Lucas Pladevall

Monitoração do desgaste do eletrodo para processos de soldagem a ponto por resistência elétrica em condições industriais / L.P. Moreira. -- São Paulo, 2010.

66 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1. Soldagem 2. Soldagem por resistência 3. Soldagem por ponto 4. Digitalização 5. Qualidade do processo I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II. t.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais pelo apoio, amor, carinho, compreensão e todos os conselhos que me proporcionaram durante toda minha vida e principalmente durante minha fase acadêmica.

Aos meus colegas de universidade, pois sem a amizade, a presença e companheirismo de todos não teria chegado até aqui.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador e tutor quando fora do Brasil, Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha, por todo o ensinamento e apoio no desenvolvimento deste trabalho. Por boas conversas esclarecedoras, pela indicação de valiosos artigos e teses por sua disposição em ajudar no que fosse necessário sempre.

Ao Doutorando Valdir Furlanetto pela orientação e disponibilidade de compartilhar seu conhecimento vasto do campo de soldagem, juntamente com Sanderson Leite, pois sem, esse estudo não existiria.

A ROBTEC e ao Dr. Vicente Massaroti, com seu apoio em metrologia óptica, disponibilizando a ferramenta ATOS® para que fossem realizadas as digitalizações 3D.

Ao Alisson Sarmento e a todos que me proporcionaram a visita à GMB, planta de São Caetano, ao sr. Mizioka e Emerson, meus sinceros agradecimentos pela aula e acompanhamento durante toda a visita.

A minha namorada Mariana pelo apoio e ajuda fundamental na parte final do meu trabalho.

E a todos que acompanharam e acreditaram que chegaria onde estou.

RESUMO

Esse estudo visa monitorar o desgaste do eletrodo de um processo de solda ponto em condições industriais, utilizando a metrologia óptica de digitalização 3D com a ferramenta ATOS®, para mapear a geometria do desgaste do eletrodo por completo e avaliar a área de contato com melhor precisão. Parte deste trabalho consiste em realizar soldagens com qualidade utilizando dois tipos de eletrodos em um ambiente industrial, a fim de obter os corpos de prova. As soldagens serão feitas para a união de duas chapas de mesma espessura de 0,8mm de aço 1020. Outra parte consiste na digitalização dos corpos de prova, capturando completamente a superfície e gerando uma malha poligonal de alta resolução, posteriormente convertida para CAD para que sejam feitas as medições necessárias da geometria. Busca-se com esse estudo obter um protocolo de medição que auxilie a obtenção de uma curva do desgaste do eletrodo, colaborando para elaboração de um modelo de correção de densidade de corrente elétrica em função do desgaste do eletrodo para qualificação de ponto de solda sob norma industrial em um estudo futuro.

Palavras chave: Soldagem. SPR (Soldagem a ponto por resistência). Qualidade de ponto de solda. Metrologia Óptica. Digitalização 3D.

ABSTRACT

MONITORING ELECTRODE WEAR ON ELECTRIC RESISTANCE SPOT WELDING PROCESS UNDER INDUSTRIAL CONDITIONS

This study aims to monitor the electrode wear under industrial condition of an ERSW (Electric resistance spot welding) using optical metrology for High-End 3D digitization, through the equipment ATOS®, we will map completely the wear geometry of the electrode, to evaluate the contact area with better precision. A section of this study regards to perform spot welding tests, with weld quality using two types of electrodes in a similar industrial atmosphere in order to obtain the specimens for digitalization. The weld is performed uniting two steel sheet metals of same 0,8mm thickness. Another section is about specimens digitalization, completely capturing the electrode surface and generating a high resolution polygonal mesh, later converted for CAD software, so the geometry can be measured. Obtain a measurement protocol to aid built an electrode wear curve is the goal for this study, further collaborating for an elaboration of a model for electric current density correction, function of the electrode wear. In order to qualify a spot under industrial norm in a future study.

Key words: Welding. ERSW (Electric Resistance Spot Welding). Spot weld quality. Optical metrology. High-End 3D digitalization.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e limitações do uso de solda ponto por resistência elétrica	12
Tabela 2 - Parâmetros orientativos para parametrização para aços SAE1010/1030.....	18
Tabela 3 - Relação causa – efeito para as falhas na solda ponto por resistência elétrica para chapas	20
Tabela 4 - Característica dos eletrodos segundo RWMA	23
Tabela 5 - Ensaio caso A	38
Tabela 6 - Ensaio caso A – Digitalização IGS	39
Tabela 7 - Ensaio caso B	42
Tabela 8 - Ensaio caso B – Digitalização IGS	43
Tabela 9 - exemplo de organização de experimentos qualitativa para 5 arranjos possíveis de chapas (1, 2, 3, 4 e 7), com 3 espessuras diferentes e 4 revestimentos diferentes	49
Tabela 10 - Limiar de diâmetro mínimo de botão e valor de densidade de corrente	56
Tabela 11 - Limiar de fagulhas de solda e valor de densidade de corrente	56
Tabela 12 – Parâmetro de solda ideal e valor de densidade de corrente ideal.....	57
Tabela 13 – Valores ideais de Ciclo e valor de densidade de corrente ideal de soldagem, para a vida útil do eletrodo	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama simplificado dos processos básicos de solda por resistência.....	4
Figura 2 – Ciclo de solda.....	4
Figura 3 - Ponto de solda	5
Figura 4 - Formação do ponto de solda no entre chapas num processo de Solda a Ponto	6
Figura 5 - Seqüência de um processo de soldagem incorreta onde ocorre expulsão de material.....	7
Figura 6 - Expulsão de material na superfície (esq.) e interfacial (dir.)	7
Figura 7 - Representação esquemática das resistências no secundário de uma máquina de soldagem por resistência.....	7
Figura 8 - Componentes da resistência dinâmica.....	8
Figura 9 - Típica curva de resistência dinâmica.....	9
Figura 10 - Gradiente de temperatura de uma solda a ponto.....	11
Figura 11 - Máquina de solda ponto a ponto estática	13
Figura 12 - Circuito elétrico típico de solda	15
Figura 13 – Estrutura de juncões e símbolo de um tristor SCR	15
Figura 14 - Curva característica do tristor SCR	16
Figura 15 - Diagrama orientativo da Tabela 2.....	18
Figura 16 - Rotina de testes para arranque: a) Com chave tipo pé de cabra, b) Teste mecânico e c) Teste tipo descascamento	21
Figura 17 - Medições dos pontos de solda: sem fratura A e B e com fratura C	21
Figura 18 - Capa de eletrodo tipo plano cone truncado (esq.) e esférico (dir.)	24
Figura 19 - Formas de alinhamento e desalinhamento	24
Figura 20 - Não paralelismo dos centros de contato das capas de eletrodo com a chapa	25
Figura 21 - Curva de corrente e programação progressiva de corrente de soldagem	26
Figura 22 - Fresagem lateral (esq.) e fresagem de topo e lateral (dir.)	27
Figura 23 - Tipos de fresadoras. A) Fresagem com fresador manual mecânico B) Fresa elétrica para pinça de solda de robô C) Fresador off-line	27
Figura 24 - Efeito da incorreta fresagem do eletrodo	28
Figura 25 – Objeto a ser digitalizado	30
Figura 26 – Franjas emitidas na superfície do objeto	31
Figura 27 – Franjas emitidas na superfície do objeto captadas pela câmera esquerda	31
Figura 28 – Franjas emitidas na superfície do objeto captadas pela câmera direita	31
Figura 29 – Objeto digitalizado em formato de nuvem de pontos	32
Figura 30 – Comparação entre nuvem de pontos e malha poligonal	32
Figura 31 - Chapa de desgaste.....	34
Figura 32 - Corpo de prova para ensaio de arranque.....	34
Figura 33 - Eletrodos utilizados nos ensaios	35
Figura 34 - Máquina de solda a ponto utilizada	35

Figura 35 - Medidor de corrente(esq.) e medidor de pressão(dir.)	36
Figura 36 - Ensaio caso A – Gráfico Área vs. Número de pontos	40
Figura 37 - Ensaio caso A – Gráfico Área vs. Corrente elétrica.....	40
Figura 38 - Ensaio caso A – Gráfico Corrente elétrica vs. Número de pontos	41
Figura 39 - Ensaio caso A – Gráfico Densidade de corrente elétrica vs. Número de pontos.....	41
Figura 40 - Ensaio caso A – Gráfico Área vs. Número de pontos	44
Figura 41 - Ensaio caso A – Gráfico Área vs. Corrente elétrica.....	44
Figura 42 - Ensaio caso A – Gráfico Corrente elétrica vs. Número de pontos	45
Figura 43 - Ensaio caso A – Gráfico Densidade de corrente elétrica vs. Número de pontos.....	45
Figura 44 - Numeração dos n_{Ap} arranjos possíveis comumente utilizados em indústria automobilística.....	50
Figura 45 - Curva de crescimento da solda típica para um tempo fixo de solda.....	53
Figura 46 - Lóbulo de soldabilidade à uma força de eletrodo constante.....	54
Figura 47 - Determinação de Lóbulo de soldabilidade e parâmetro de soldagem ideal para uma condição de eletrodo e arranjo de chapas definida	54
Figura 48 - Lóbulo de soldabilidade e parâmetro de soldagem ideal para uma condição de eletrodo e arranjo de chapas definida.....	57
Figura 49 - Curva de desgaste (ou vida útil) do eletrodo à densidade de corrente constante	59
Figura 50. Programação progressiva de corrente de soldagem à densidade de corrente constante, indicando os pontos de fresagem de eletrodos e sua troca com n número de pontos efetuados, variando de eletrodo para eletrodo conforme seu desgaste e fresagens	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ZTA	Zona Termicamente Afetada
SPR	Solda a ponto por resistência
IACS	International Annealing Copper Standard
RWMA	Resistance Welder Manufacturers Association
Al ₂ O ₃	Alumina
AWS	American Welding Society
GMB	General Motors do Brasil
ISO	International Organization for Standardization
SAE	Society of Automotive Engineers
DOE	Design of Experiments
SPR	Soldagem a ponto por resistência
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
STL	Stereolithography file format
3D	Três dimensões
n	Posição genérica no espaço
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Zr	Zircônio
Zn	Zinco
CuZr	Cobre-Zircônio
CuCr	Cobre-Cromo
CuCrZr	Cobre Cromo Zircônio
CuAl ₂ O ₃	Cobre Resistente por Dispersão
°C	Grau Celsius
HB	Hardness Brinell
A	Ampère
kA	Kilo ampère
N	Newton
ms	Milisegundos
m	Metro

m^2	Metro quadrado
mm	Milímetro
mm^2	Milímetro quadrado
N	Newton
s	Segundos
min	Minutos
J	Joule
°	Graus
Ω	Ohm
$\Omega \text{ m}$	Ohm-metro
l	Litros
kgf	Kilo grama força
Hz	Hertz

LISTA DE SÍMBOLOS

Q	Energia do ponto de solda	[J]
R	Resistência elétrica	[\(\Omega\)]
I	Corrente elétrica	[A]
t	Tempo	[s]
\(\rho\)	Resistividade elétrica	[\(\Omega\cdot m\)]
\(\ell\)	Comprimento do corpo de prova	[m]
A	Área da seção do corpo de prova	[m\(^2\)]
ts	Tempo de ciclo	[ms]
P	Força de pressão do eletrodo na chapa	[N]
\(\phi\)	Diâmetro	[mm]
\(\alpha\)	Valor de vale de resistência elétrica	[\(\Omega\)]
\(\beta\)	Valor de pico de resistência elétrica	[\(\Omega\)]
d	Diâmetro do ponto de solda	[mm]
e _G	Espessura governante	[mm]
D _{médio}	Diâmetro médio do ponto de solda	[mm]
D _{máx}	Diâmetro máximo do ponto de solda	[mm]
D _{min}	Diâmetro mínimo do ponto de solda	[mm]
I _s	Corrente de soldagem	[kA]
b	Espassamento entre pontos de solda	[mm]
s	Espessura da chapa a ser soldada	[mm]
L	Distância mínima dos pontos de solda da borda da chapa a ser soldada	[mm]
D _e	Diâmetro externo do eletrodo	[mm]
R _a	Raio de arredondamento do eletrodo esférico	[\"{\iota}]
d _e	Diâmetro da superfície de contato do eletrodo superior	[mm]
d _{e`}	Diâmetro da superfície de contato do eletrodo inferior	[mm]
n _E	Eletrodos a serem utilizados na planta	
n _e	Espessuras das chapas utilizadas na planta	[mm]
n _R	Revestimentos das chapas utilizadas na planta	
n _{Ap}	Arranjos de chapas possíveis utilizados na planta	
n _{Ar}	Arranjos reais de chapas utilizados na planta	

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Colocação do problema.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo geral.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Escopo do trabalho.....	2
2. SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA.....	3
2.1 Descrição do processo de solda ponto por resistência elétrica	4
2.2 Definição dos parâmetros de solda.....	7
2.3 Resistência dinâmica.....	8
2.4 Distribuição da força entre os eletrodos de solda	10
2.5 Formação do ponto de solda por resistência elétrica	11
2.6 Vantagens e limitações.....	12
3. A MÁQUINA DE SOLDA PONTO	13
3.1 Introdução.....	13
3.2 Subsistema Mecânico.....	14
3.2.1 Acionamento Pneumático	14
3.3 Subsistema elétrico	14
3.3.1 Tristores	15
3.3.2 Acionamento disparo do SCR	16
3.4 Subsistema de controle.....	17
3.4.1 Parametrização de Máquinas de Solda a Resistência	17
3.4.1.1 Procedimento de parametrização	17
3.4.1.2 Programas de soldagem.....	18
4. QUALIFICAÇÃO DO PONTO DE SOLDA	19
4.1 Normas.....	19
4.2 Procedimento de verificação)	21
4.2.1 Teste de arrancamento)	21
5. O ELETRODO.....	22
5.1 Materiais e classificação do eletrodo de solda ponto.....	22

5.2 Desenho do eletrodo.....	23
5.3 Alinhamento do eletrodo	24
5.4 Desgaste dos Eletrodos	25
5.5 Curvas de corrente	26
5.6 Fresagem dos eletrodos.....	26
5.6.1 Vantagens de se fresar o eletrodo.....	27
5.6.2 Defeitos provenientes do processo de fresagem.....	28
6. DIGITALIZAÇÃO 3D	29
6.1 Conceito geral	29
6.2 Analogia ao funcionamento do olho humano	29
6.3 ATOS®	30
7. METODOLOGIA DO ENSAIO REALIZADO	33
7.1 Planejamento do ensaio	33
7.2 Chapas dos corpos de prova	33
7.3 eletrodos utilizados	34
7.4 Máquina de solda utilizada.....	35
7.5 instrumentos de medição e calibração	36
7.6 Parametrização.....	36
7.7 Critério de qualidade	37
8. RESULTADOS DO ENSAIO E DIGITALIZAÇÕES.....	38
9. METODOLOGIA DE TRATAMENTO DE DADOS	46
9.1 Planejamento estatístico	46
9.2 Definição de Parâmetros	46
10. PROTOCOLO DE MEDIÇÃO E MONITORAMENTO	47
10.1 Procedimento 1 – Organização do experimento	47
10.1.1 Numeração dos eletrodos	49
10.1.2 Numeração de espessuras de chapas	49
10.1.3 Numeração dos revestimentos das chapas	50
10.1.4 Numeração dos arranjos de chapas possíveis	50
10.2 Procedimento 2 – Configuração do digitalizador 3D	51
10.3 Procedimento 3 – Configuração da máquina ou robô de solda para realizar a primeira soldagem.....	52
10.4 Procedimento 4 – Elaboração do Lóbulo de soldabilidade.....	53

10.4.1 Determinação das linhas de diâmetro mínimo e de limiar de fagulhas de solda	54
10.5 Procedimento 5 – Elaboração da curva de desgaste do eletrodo à densidade de corrente constante	58
10.6 Procedimento 6 – Programação progressiva de corrente de soldagem à densidade de corrente constante	60
11. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	61
12. CONCLUSÕES	62
13. TRABALHOS FUTUROS.....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
ANEXOS	67

1. INTRODUÇÃO

1.1 Colocação do problema

O principal aspecto deste trabalho é a monitoração do desgaste do eletrodo num processo de solda ponto em condições industriais. O desgaste é um processo inevitável e afeta a qualidade do ponto de solda no decorrer do processo durante sua vida útil. O processo de solda ponto por resistência elétrica vem se tornando um dos mais comumente usados métodos de soldagem para chapas metálicas (KALPAKJIAN, 2001). Apesar dos avanços crescentes em métodos de controle e automação em solda ponto, os métodos empíricos ainda são muito empregados para garantir a qualidade do ponto de solda e o tempo correto de troca do eletrodo. Mais modelos de controle devem então ser elaborados, a fim de evitar trocas desnecessárias e defeitos na peça provocados por um ponto de solda de má qualidade, que resulta em prejuízos futuros para a indústria (RUIZ, 2005). No caso de indústrias automobilísticas onde o emprego de solda ponto é amplamente utilizado, normalmente são realizadas perto de 7 milhões de pontos de solda por dia em uma linha de montagem. Um controle de qualidade suficientemente bom deve garantir que 99,7% desses pontos de solda atinjam os requisitos mínimos estabelecidos por normas internacionais industriais de qualidade (FURLANETTO & STOCCO & MOTOMURA & BATALHA , 2009). O principal ponto do desgaste analisado é a variação da área de contato do eletrodo com a chapa ao longo dos pontos de solda efetuados. Existem vários métodos para se medir a geometria, consequentemente a variação da área de contato. Nesse estudo utiliza-se uma técnica de medição de geometria recente e promissora, a digitalização 3D de alta resolução, que gera partir de imagens do corpo de prova, uma malha poligonal de alta resolução, podendo ser transformada em formato CAD onde são feitas medições. Com essa técnica, vem a grande vantagem de não haver contato entre corpo de prova e método de medição, obtendo uma representação digital fiel com alta resolução da superfície do corpo de prova, com repetibilidade para todas as amostras e com razoável economia de tempo nas medições (pode ser automatizado).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Monitorar a área de contato de um eletrodo de solda ponto e elaborar um protocolo de medição que auxilie na obtenção da sua curva de desgaste em função do número de pontos e controle de densidade de corrente.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Estudar o comportamento do desgaste dos eletrodos de solda ponto.
2. Através de ensaios realizados em condições industriais reais serão gerados os corpos de prova de eletrodos e chapas.
3. Através da digitalização 3D dos corpos de prova, serão geradas as superfícies matemáticas para serem trabalhadas em software CAD.
4. Uma metodologia para tratamento de dados será proposta.
5. Um Protocolo de medição será elaborado.

1.3 Escopo do trabalho

O capítulo 2 apresenta o processo de solda a ponto por resistência elétrica, o capítulo 3 se refere a máquina de solda ponto, o capítulo 4 mostra a qualificação do ponto de solda sob norma industrial. O capítulo 5 mostra o eletrodo de solda ponto e o capítulo 6 a digitalização 3D. No capítulo 7 temos a metodologia do ensaio realizado nesse estudo, o capítulo 8 os resultados do ensaio e digitalizações obtidos, o capítulo 9 a metodologia de tratamento de dados e o capítulo 10 o protocolo de medição elaborado. Por fim temos no capítulo 11 a discussão dos resultados, o capítulo 12 as conclusões e o capítulo 13 trás as sugestões para trabalhos futuros.

2. SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Solda, segundo a RWMA, consiste na junção de duas ou mais peças de metal através da aplicação de calor e às vezes de pressão. Solda por resistência indica o campo da solda onde o calor de solda nas peças a serem soldadas é gerado pela resistência oferecida por essas peças à passagem de uma corrente elétrica. A solda por resistência difere dos processos de solda por fusão pela aplicação de força mecânica para garantir a união das peças aquecidas. O efeito dessa força é o refino dos grãos da estrutura e uma solda com propriedades físicas iguais ou superiores aos metais que a deram origem (RWMA, 1989; RUIZ, 2005).

Na soldagem por resistência, as peças a serem soldadas são pressionadas uma contra a outra, por meio de eletrodos não consumíveis, fazendo passar por estes uma alta corrente elétrica que ocasiona, segundo a Lei de Joule (equação 2.1), uma quantidade de calor proporcional ao tempo, resistência elétrica e intensidade de corrente, o que deverá ser suficiente para permitir que a região de contato entre as peças a serem soldadas atinja o ponto de fusão (BRACARENSE, 2000).

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

Ao atingir o ponto de fusão, à região fundida dá-se o nome de lentilha de solda. O que caracteriza o nome do processo é proveniente da propriedade elétrica de resistividade elétrica, que é uma forma de medir a oposição ao fluxo de corrente elétrica de um material. Quanto mais baixa for a resistividade elétrica de um material, mais facilmente o material permite a passagem de uma carga elétrica (condutividade elétrica). A resistência elétrica de um material é associada com sua resistividade ρ por meio da relação mostrada da equação 2.2:

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad (2.2)$$

Esta resistência ao fluxo de corrente é a fonte geradora de calor na soldagem por resistência (NAVE, 2005; BRANCO, 2004).

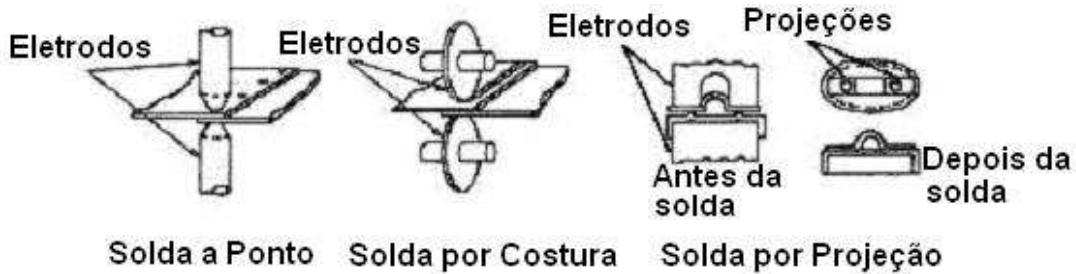


Figura 1 - Diagrama simplificado dos processos básicos de solda por resistência (AWS, 1995; RUIZ, 2005)

2.1 Descrição do processo de solda ponto por resistência elétrica

Nesse estudo, será tratado apenas a solda por resistência elétrica do tipo solda a ponto. Segundo a definição da norma DIN 1910 (1997), parte 2, a soldagem por resistência elétrica é uma classificação do processo de soldagem, e, na parte 5, essa mesma norma classifica o processo de soldagem de pontos por resistência elétrica como uma subdivisão do processo de soldagem por resistência. A solda ponto, portanto é uma subclassificação de soldagem por resistência elétrica, em que duas ou mais chapas colocadas sobrepostas são pressionadas por eletrodos a fim de garantir o bom contato elétrico entre elas e impedir a expulsão de material (SCHARFF, 1990; AWS, 1997; INTERMACHINERY, 2003; BRANCO, 2004; MAINIER & SANTOS, 2006).

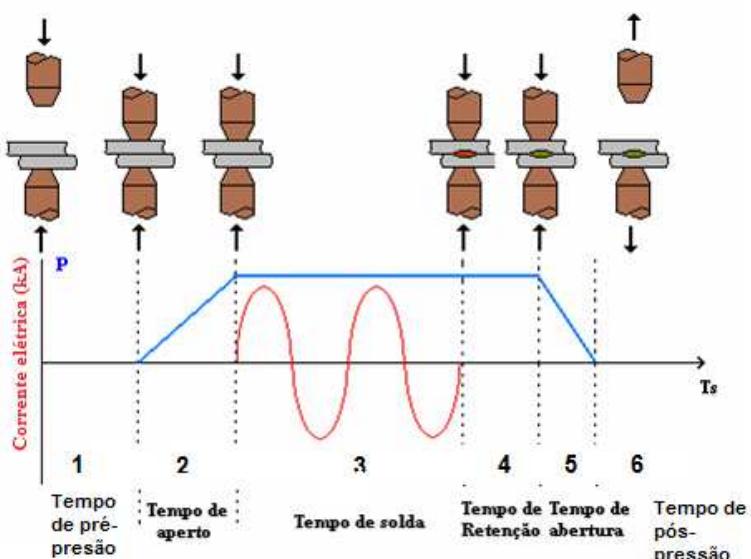


Figura 2 – Ciclo de solda (BRANCO, 2004; VARGAS, 2006, modificado)

O tempo compreendido entre as fases 1 e 6 chama-se ciclo de soldagem. Na etapa 1, os eletrodos iniciam o processo de descida, a fim de pressionar as chapas, que, na etapa 2, devem ser pressionadas de tal forma a garantir o bom contato entre as mesmas e evitar uma possível expulsão de material durante o processo. Na etapa 3, os eletrodo são mantidos sobre pressão e então há a liberação da corrente de soldagem, iniciando o processo de formação da lenticela de solda. Na etapa 4, a lenticela de solda já está formada. Desliga-se a corrente de soldagem mas se mantêm os eletrodos pressionando as chapas, para que a lenticela se solidifique mantida sob pressão. Após a solidificação da lenticela de solda, acontece na etapa 5 o desligamento da força de soldagem aplicada sobre as placas pelos eletrodos, finalizando com a abertura total dos eletrodos e liberação da chapa na etapa 6 (VARGAS, 2006).

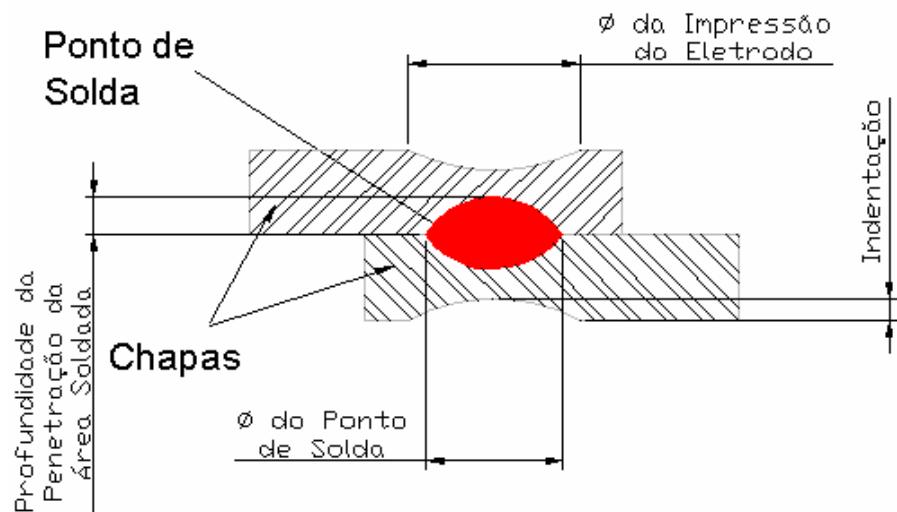


Figura 3 - Ponto de solda (BRANCO, 2004)



Figura 4 - Formação do ponto de solda no entre chapas num processo de Solda a Ponto (MAREK & PÖLL, 2008, modificado)

Após a conclusão do ciclo de soldagem, tem-se o ponto de solda formado como indicado na Figura 4, uma união metálica sólida entre as duas chapas. Deve apresentar, tanto o ponto como a região afetada, algumas propriedades tais como diâmetro mínimo especificado por norma, profundidade de penetração e indentação, impressão deixada na chapa ao ser pressionada pelos eletrodos, devendo ser a mínima possível. Como visto, a solda a ponto, por ser um subconjunto de solda por resistência elétrica e seguir a lei de Joule, envolve uma aplicação coordenada de duração e magnitude da corrente elétrica de soldagem e da força de soldagem. A corrente de soldagem flui através dos eletrodos e chapas, aquecendo-as, definindo a zona termicamente ativada (ZTA) (AWS, 1997; AGASHE 2003; ZHOU, 2003; BRANCO, 2004).

O processo segue essa seqüência de operações com o intuito de desenvolver calor suficiente para passar para o estado líquido um volume confinado de metal, resfriá-lo sob pressão dos eletrodos até atingir resistência suficiente que mantenha as chapas unidas. Definimos a densidade de corrente elétrica como sendo a quantidade de corrente de soldagem passante pela área de contato do eletrodo. O controle da força se faz necessário para que não se tenha expulsão de material (força mínima de soldagem) e não deve ser exagerada, pois uma indentação alta não é desejável. O controle do tempo de aplicação de soldagem deve ser balanceado. Um tempo muito longo ocasiona o aquecimento excessivo da superfície do eletrodo, e a fusão do material base nela, assim acelerando seu desgaste. Por outro lado, um tempo muito curto provoca um aquecimento insuficiente da ZTA, prejudicando a qualidade do ponto de solda (AWS, 1997; BRANCO, 2004).



Figura 5 - Seqüência de um processo de soldagem incorreta onde ocorre expulsão de material

A expulsão do material é caracterizado por uma forte projeção do material fundido no interior ZTA, que ocorre de dois modos: ou na superfície de contato eletrodo-chapa ou por entre as chapas em algum local da superfície de contato chapa-chapa, mostradas na Figura 6. A expulsão é causada pela falha na retenção do material fundido se expandindo entre as superfícies de contato (BRANCO, 2004).



Figura 6 - Expulsão de material na superfície (esq.) e interfacial (dir.) (BRANCO, 2004)

2.2 Definição dos parâmetros de solda

O princípio físico que rege o fenômeno de geração de calor como vista no item 2.1, é a Lei de Joule, eq. 2.1. Os parâmetros de solda são provenientes dessa lei, sendo eles a corrente de solda e o tempo de solda. O terceiro parâmetro é a resistência do circuito secundário (soma de todas as resistências parciais em série, figura 7).

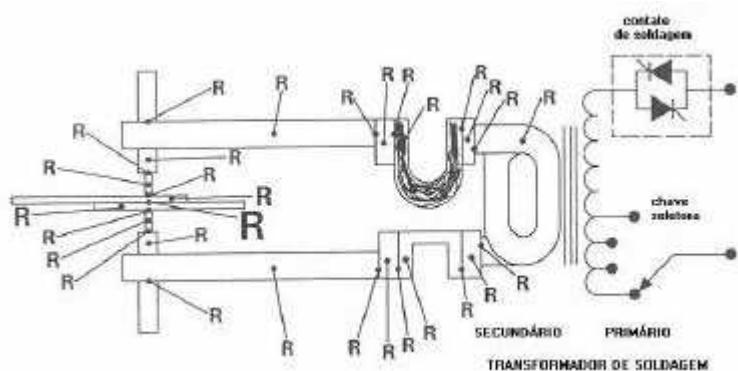


Figura 7 - Representação esquemática das resistências no secundário de uma máquina de soldagem por resistência (BRANCO, 2004, modificado)

O tempo de solda é relativamente flexível para qualquer processo de soldagem. Na solda a ponto o ciclo de solda dura alguns milissegundos por solda efetuada, que em um processo industrial é fator limitante na velocidade de soldagem (soldas efetuadas por determinado tempo). É ditado pelo ritmo produtivo ou pelo tempo necessário para o transporte dos subcomponentes a serem unidos nas estações automatizadas, daí sua flexibilidade.

A resistência no circuito secundário, como visto na figura 7, depende de vários fatores: tipo de máquina e ferramenta empregada, tipo e dimensão dos eletrodos, força aplicada pelos eletrodos e material a ser soldado.

2.3 Resistência dinâmica

Basicamente é composta pela série de resistências em série mostradas na figura 8, sendo elas: eletrodo superior, contato eletrodo/chapa superior, chapa superior, contato chapa/chapa, chapa inferior, contato eletrodo/chapa inferior e eletrodo inferior.

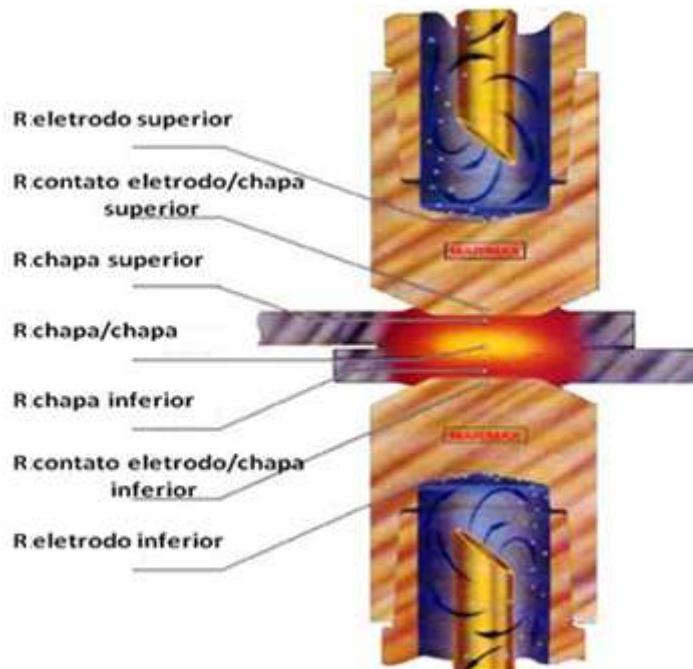


Figura 8 - Componentes da resistência dinâmica (IMPORTSOLDA, 2004; MOTOMURA, 2007, modificado)

Dividimos as resistências de contato em duas, estática e dinâmica, sendo a estática composta pelas resistências citadas antes da passagem de corrente elétrica. Seu papel é fundamental no desencadeamento de dois fenômenos. O primeiro deles se refere a possibilidade de passagem de corrente elétrica pelos eletrodos. Se a resistência de contato é elevada, há a inibição da passagem de corrente agindo como um isolamento elétrico. O segundo determina o valor necessário de corrente elétrica para formação e crescimento da lentilha de solda. Cada resistência individual influencia na geração de calor nas várias interfaces. Há dependência da temperatura, no caso dos metais ela aumenta à medida que aumenta a temperatura, e que, por ser variante no tempo, a resistência de contato recebe o nome de resistência dinâmica. A resistência dinâmica é um dos fatores chave para o desenvolvimento de um sistema de controle realimentado para o processo de solda a ponto por resistência elétrica, uma vez que a formação e o crescimento da lentilha de solda está intimamente ligada a essa resistência de contato. No processo de solda ponto por resistência elétrica, a resistência de contato inicial tem uma grande influência sobre a magnitude da corrente de solda requerida. No entanto, a resistência dinâmica é mais importante na determinação dos fenômenos que acontecem durante o processo de soldagem. A relação entre a formação da solda e o formato da curva de resistência dinâmica é bem documentada para aços não revestidos (NAVE, 2005; MOTOMURA 2007).

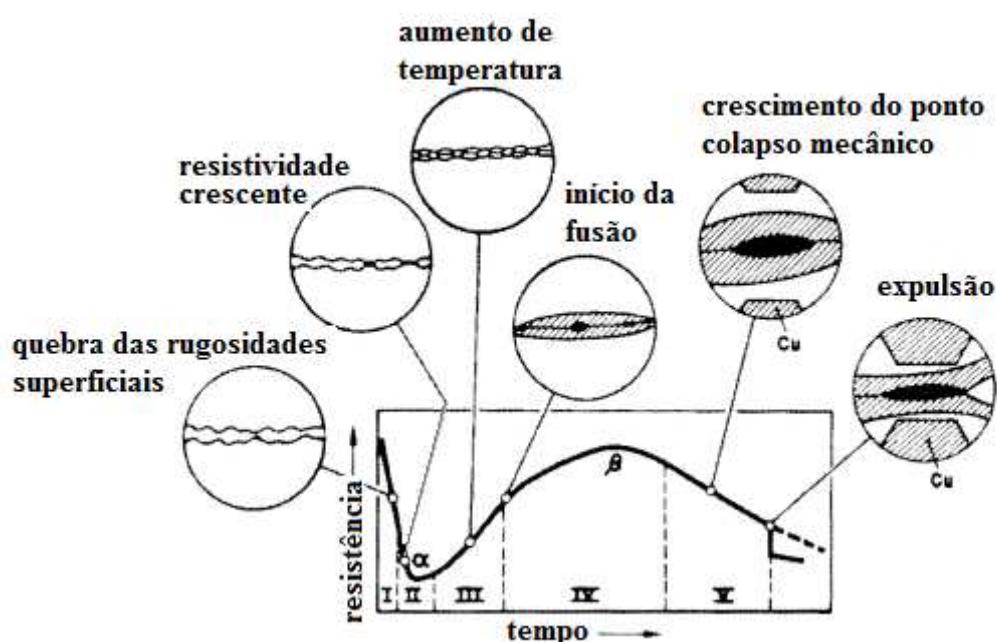


Figura 9 - Típica curva de resistência dinâmica (CULLEN, 2007; MOTOMURA, 2007, modificado)

Os estágios ilustrados na figura 9 são descritos abaixo:

- Estágio I: colapso das rugosidades superficiais provocando uma rápida queda da resistência até atingir um mínimo;
- Estágio II: fase final de colapso das rugosidades juntamente ao aquecimento do material devido à crescente resistividade do metal base quando o fenômeno provocado pela alta resistividade supera o colapso das rugosidades e a resistência total entre os eletrodos aumenta;
- Estágio III: resistência crescente – o aquecimento do metal base predomina até que o valor de pico da resistência (pico β) seja alcançado;
- Estágio IV: o aquecimento do metal base resulta na fusão do mesmo na interface chapa/chapa, a zona de fusão cresce rapidamente, a taxa de crescimento apresentando um compromisso entre a crescente resistência devido ao aquecimento do material e a decrescente resistência devido ao aumento da zona de fusão;
- Estágio V: uma redução da resistência devido a uma queda da corrente ocasionada pela indentação da chapa.

Todos os cinco estágios têm um papel importante no processo de formação e crescimento da lentalha de solda (MOTOMURA, 2007).

2.4 Distribuição da força entre os eletrodos de solda

Segundo a AWS, a força de soldagem deve ser sempre aplicada antes, durante e após a passagem da corrente elétrica para garantir boa área de contato entre as superfícies e o contato entre as chapas durante o resfriamento. A força aplicada pelos eletrodos tem um efeito significante na formação da solda e por isso deve ser considerada como um fator crítico influenciando diretamente na magnitude da resistência estática de contato, consequentemente afetando o grau de aquecimento inicial tanto na interface chapa-chapa quanto na eletrodo-chapa. Deve haver um balanço da distribuição de pressão gerada pela força aplicada nos eletrodos contra as chapas, equalizando a área de contato da ponta do eletrodo e a força neles aplicada (AWS, 1995; RUIZ, 2005; MOTOMURA, 2007).

2.5 Formação do ponto de solda por resistência elétrica

De acordo com a teoria atualmente aceita, para a realização de uma solda satisfatória em condições normais, a resistência na interface chapa/chapa tem que ser a maior para facilitar a formação da lenticela de solda. O calor gerado na interface eletrodo/chapa será parcialmente removido pelo sistema de resfriamento por líquido presente nos eletrodos ou por condução para o restante da chapa. Todos esses fatores devem ser levados em consideração e o tamanho final da lenticela de solda resultará do balanço entre os efeitos de aquecimento e de resfriamento presentes no processo (MOTOMURA, 2007).

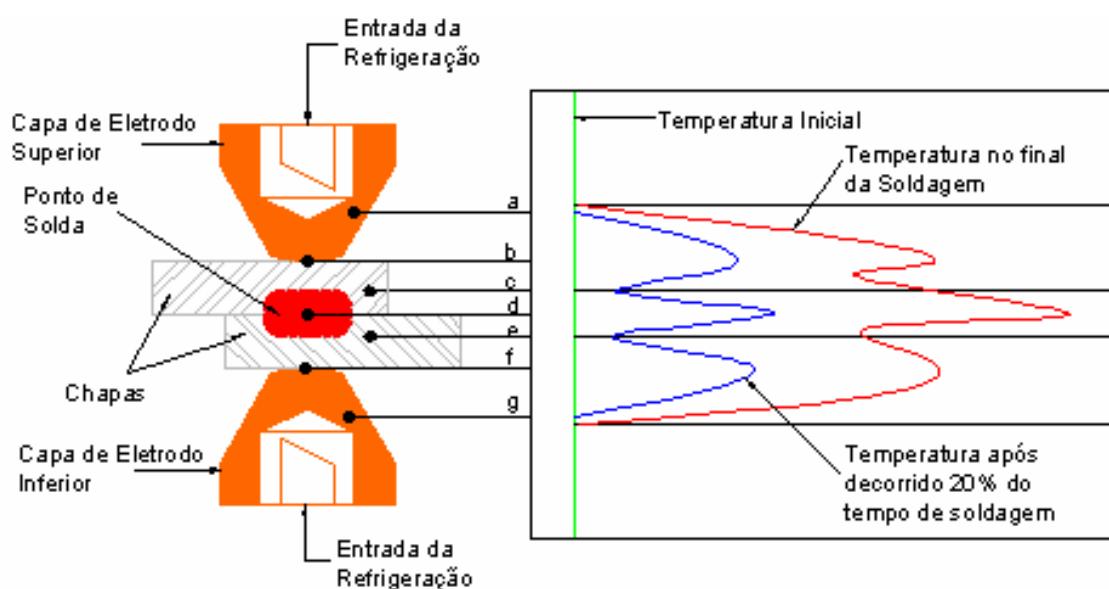


Figura 10 - Gradiente de temperatura de uma solda a ponto (BRANCO, 2004)

2.6 Vantagens e limitações

Pode-se citar como principais vantagens com a utilização da solda ponto por resistência elétrica:

Tabela 1 - Vantagens e limitações do uso de solda ponto por resistência elétrica

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> Maior resistência a vibrações mecânicas. 	<ul style="list-style-type: none"> 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.
<ul style="list-style-type: none"> 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. 	<ul style="list-style-type: none"> Desmontagem das peças soldadas para manutenção ou reparo é muito difícil;
<ul style="list-style-type: none"> Alta velocidade, alta adaptabilidade para automatização em produção. 	<ul style="list-style-type: none"> Os custos de equipamento são geralmente mais altos do que os custos da maioria dos equipamentos de soldagem a arco;
<ul style="list-style-type: none"> Menor habilidade para ser executada. 	<ul style="list-style-type: none"> Soldas a ponto têm baixos limites de resistência à tração e à fadiga por causa do entalhe entre as chapas.
<ul style="list-style-type: none"> 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. 	

(VARGAS, 2005, modificado)

3. A MÁQUINA DE SOLDA PONTO

3.1 Introdução

Podemos analisar o funcionamento da máquina de solda ponto, vamos decompô-la em três subsistemas: mecânico, elétrico e de controle. O subsistema mecânico tem como principal componente o pistão pneumático responsável pela movimentação dos eletrodos e pela força que os eletrodos exercem nas chapas sendo soldadas. O subsistema elétrico é composto basicamente por um transformador redutor de tensão, e circuito de acionamento. O subsistema de controle tem como finalidade a parametrização do processo e a união dos outros dois subsistemas, e devido às não linearidades presentes no sistema assim como a existência de parâmetros que podem variar no decorrer do processo de soldagem, é de extrema importância a implementação de um sistema de controle capaz de adaptar-se a diversas condições de operação (WAINER, 1992; VARGAS, 2006; MOTOMURA, 2007).

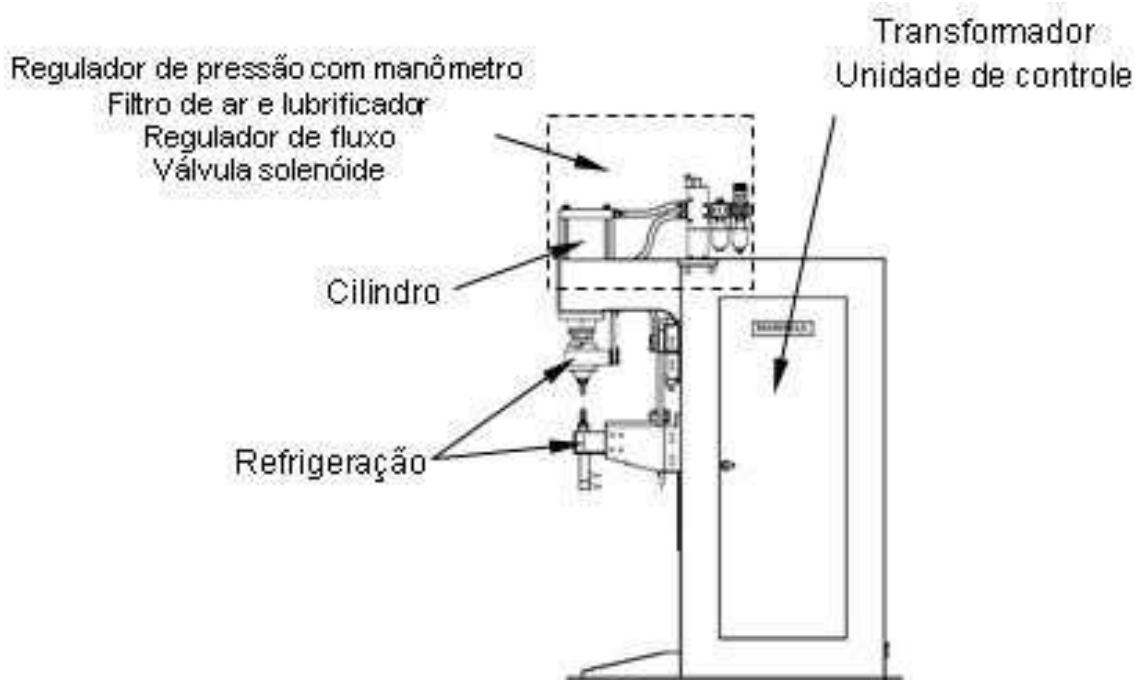


Figura 11 - Máquina de solda ponto a ponto estática (MOTOMURA, 2007)

3.2 Subsistema Mecânico

É composto de sistemas hidráulicos, pneumáticos e/ou mecânicos responsáveis pela aplicação da força do eletrodo para segurar a peça. Este subsistema deve controlar a velocidade de aproximação do eletrodo, a qual deve ser controladamente rápida a fim de evitar que as faces do eletrodo não sejam deformadas com batidas repetitivas (efeito “*bouncing*”). Rigidez, atrito e movimento de massa são características mecânicas de máquinas de soldagem a ponto que possuem influência complexa sobre o processo de soldagem e na qualidade de solda (VARGAS, 2006).

3.2.1 Acionamento Pneumático

O circuito pneumático é composto por:

- Um cilindro;
- Um filtro de ar utilizado para eliminar as impurezas e a umidade do ar;
- Um regulador de pressão empregado para controlar a pressão do ar na entrada do cilindro (freqüentemente é montado junto a um manômetro);
- Uma válvula proporcional capaz de regular eletronicamente a pressão de entrada através de um sinal elétrico analógico ou digital;
- Um regulador de fluxo que controla a velocidade de deslocamento do cilindro;
- Uma válvula solenóide responsável pela alimentação do cilindro;
- Um pressostato (VARGAS, 2006; MOTOMURA, 2007).

3.3 Subsistema elétrico

Este circuito, encarregado de fornecer a corrente aos eletrodos, é composto de um circuito primário que abrange a linha de alimentação incluindo um bobinado primário no transformador de soldagem, 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 (VARGAS, 2006; MOTOMURA, 2007).

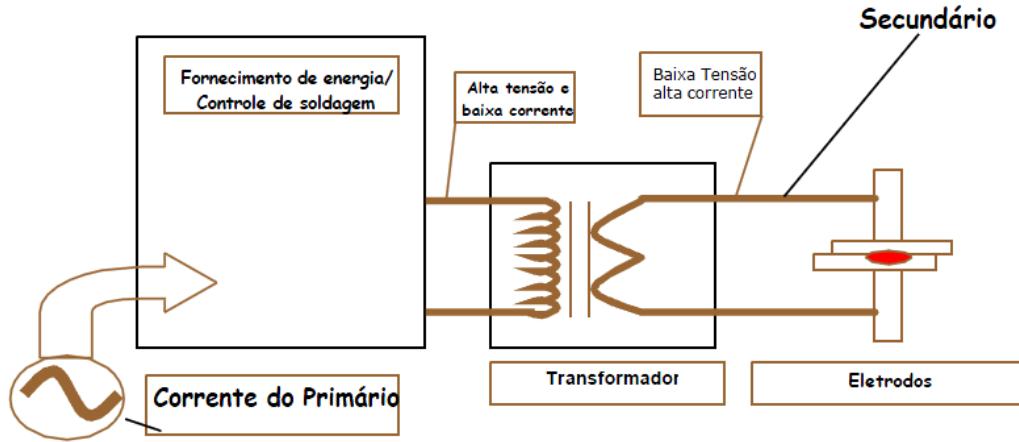


Figura 12 - Circuito elétrico típico de solda ponto (BRANCO, 2004)

3.3.1 Tristores

O tristor faz parte da família de dispositivos semicondutores de multicamadas. Seu modo de operação é o de regime de chaveamento. Os tristores permitem o chaveamento por meio do terminal de controle através da adequada ativação do terminal, o chaveamento se dá do estado de corte para estado de condução, sendo que alguns tristores permitem também o chaveamento inverso. Como exemplo de tristores, podemos citar o SCR e o TRIAC. Sua estrutura multicamada tem no mínimo quatro camadas semicondutoras numa seqüência P-N-P-N (três junções semicondutoras), apresentando um comportamento funcional biestável (RASHID, 1993).

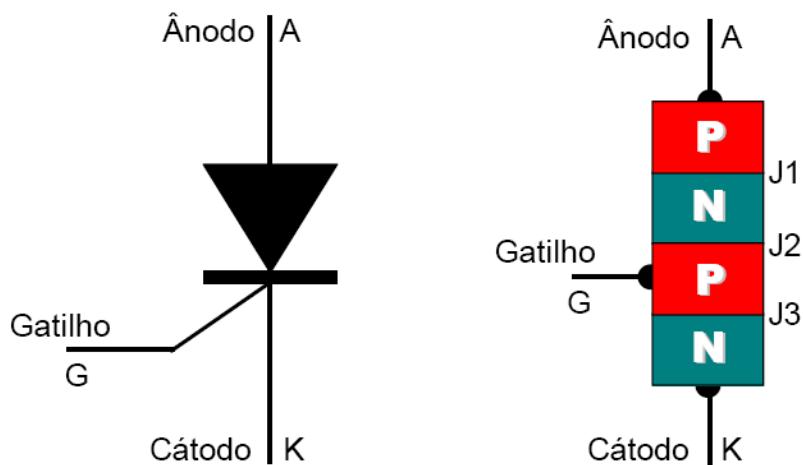


Figura 13 – Estrutura de junções e símbolo de um tristor SCR (MOTOMURA, 2007)

3.3.2 Acionamento disparo do SCR

No circuito equivalente, a base do transistor NPN é alimentada pelo coletor do PNP, e vice-versa. Inicialmente não há corrente de coletor alimentando o outro transistor, e ambos estão em corte. Mas se aplicarmos um pulso positivo na base do NPN, ou negativo na do PNP, o transistor será ativado, fornecendo uma corrente amplificada na base do outro, que amplificará esta corrente fornecendo uma corrente ainda maior à base do transistor que recebeu o pulso. O processo leva rapidamente os transistores à saturação, fornecendo corrente somente limitada pela carga (RASHID, 1993).

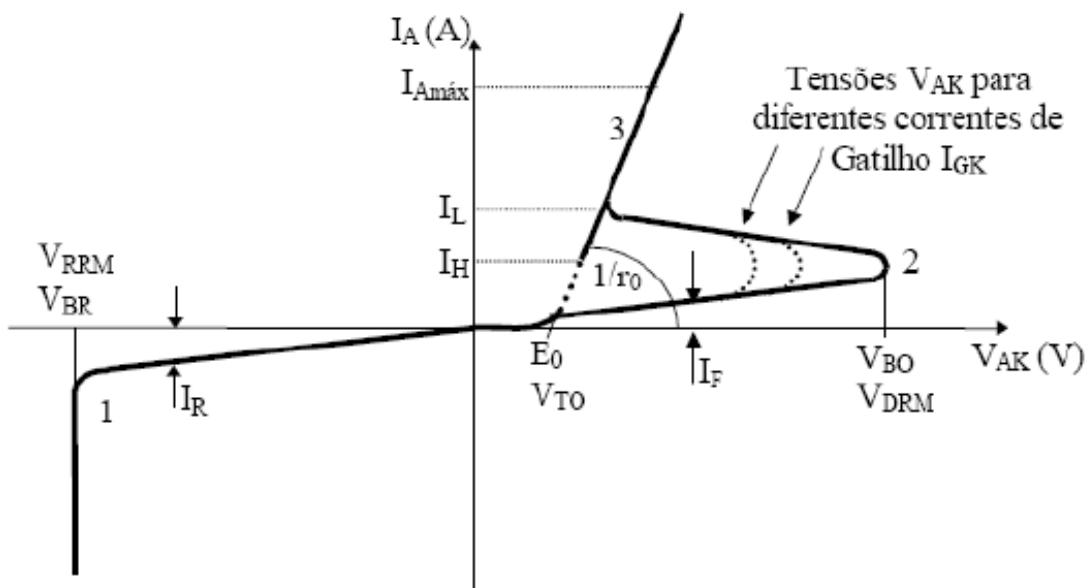


Figura 14 - Curva característica do tristor SCR (MOTOMURA, 2007)

As curvas representadas na figura 14 são descritas como:

- Corte em Polarização Reversa – curva 1
- Corte em Polarização Direta – curva 2
- Condução em Polarização Direta – curva 3

3.4 Subsistema 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 (VARGAS, 2006; MOTOMURA, 2007).

3.4.1 Parametrização de Máquinas de Solda a Resistência

3.4.1.1 Procedimento de parametrização

O procedimento de parametrização de máquinas de solda consiste em introduzir no comando do controle de solda os parâmetros de soldagem necessários para realizar soldas dentro das especificações de qualidade por norma estabelecida. Além disso, no procedimento de parametrização de máquinas há também a verificação de alguns itens da máquina que podem gerar problemas durante o processo de soldagem. Nesta verificação se faz a medição da vazão da água de refrigeração, o correto alinhamento dos eletrodos e a monitoração de existência de fugas de corrente para quando for realizar os pontos de solda. Procede-se então a execução de alguns pontos de solda em corpos de prova com as mesmas espessuras das chapas que serão soldadas, e através do testes de inspeção (o mais simples, porém destrutivo, o teste de arrancamento) verifica-se o diâmetro do ponto de solda e também o aspecto visual da solda, para então prosseguir com o processo de soldagem (BRANCO, 2004).

Tabela 2 - Parâmetros orientativos para parametrização para aços SAE1010/1030

e_G mm	Força entre eletrodos K_{af}	Corrente de solda kA	Tempo de solda ciclos/60hz	Eletrodos			Diâmetro do ponto de solda d' mm
				D min.	d mm	R mm	
0,5	60	4	10	10	4	50	3,5
1,0	100	5	20	12	6	75	4,5
1,5	150	6	40	16	6	75	5,5
2,0	200	7	50	16	7	75	6,5
2,5	250	8	75	19	8	75	7,5
3,0	300	9	100	19	9	100	8,5
4,0	380	10	160	25	11	100	10,5
5,0	450	12	225	25	13	150	12,5
6,0	550	14	325	30	15	150	14,0

ALTA QUALIDADE DE SOLDA (TEMPO DE SOLDA CURTO)						
e_G	Força entre eletrodos K_{af}	Corrente de solda kA	Tempo de solda ciclos/60hz	Eletrodos	Diâmetro do ponto de solda d' mm	
0,5	150	6,5	3	10	4	50
1,0	250	9	6	12	6	75
1,25	300	10	8	12	6	75
1,5	350	11	10	16	6	75
2,0	500	14	15	16	7	75
2,5	700	16	25	19	8	75
3,0	800	18	30	19	9	100
4,0	1250	22	45	25	11	100
5,0	1700	25	70	25	13	150
6,0	2250	29	100	30	15	150

(IMPORTSOLDA, 2004, modificado).

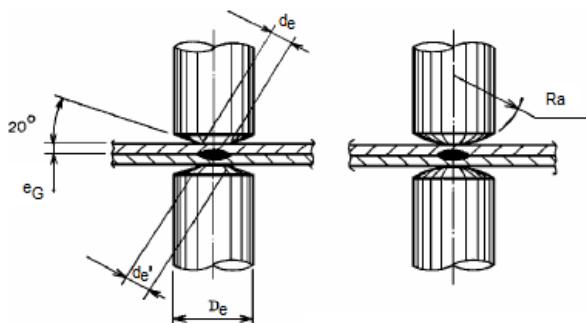


Figura 15 - Diagrama orientativo da Tabela 2 (IMPORTSOLDA, 2004, modificado).

3.4.1.2 Programas de soldagem

Os programas de soldagem são considerados guias ou ponto de partida para a soldagem a ponto e podem ser modificados dependendo da aplicação a qual se destina. Os programas de soldagem devem evitar que a corrente de soldagem seja liberada antes da força dos eletrodos ser suficiente para pressionar as chapas. O sistema de pressão da máquina tem que apresentar tal dinamismo que oscilações de pressão pelo deslocamento de eletrodos possam ser interceptadas. O tempo de solda deve ser o mais curto possível para evitar um super aquecimento dos eletrodos e consequentemente o seu desgaste prematuro (REU, 1997; TECNOWELDING, 2004; BRANCO, 2004).

4. QUALIFICAÇÃO DO PONTO DE SOLDA

4.1 Normas

Os procedimentos padrões para análise de qualidade baseiam-se na avaliação de algumas características físicas da solda. Mais comumente, o diâmetro do ponto de solda é utilizado como parâmetro de qualidade (CEN Standard pr-EN/ISO, 2002; MOTOMURA, 2007).

Para aços baixo carbono, as variáveis de processo são escolhidas baseadas na espessura do material e não na sua composição. Na maioria dos casos, o diâmetro mínimo de solda desejado pode ser obtido pela equação:

$$d = 5 \cdot e_G^{0,5} \quad (4.1)$$

Onde d é o diâmetro do ponto de solda e e_G é a espessura da chapa menos (espessura governante). Esta equação é baseada na premissa que o diâmetro ótimo deve ser igual ao diâmetro do eletrodo (MOTOMURA, 2007).

O diâmetro médio do ponto de solda é determinado pela equação:

$$D_{\text{médio}} = (D_{\text{máx}} + D_{\text{min}})/2 \quad (4.2)$$

No caso da soldagem de chapas de diferentes espessuras, normas industriais [VW 01105-1] estabelecem que o ponto de solda deve possuir um diâmetro mínimo calculado pela seguinte expressão:

$$d = 4,2 \cdot e_G^{0,5} \quad (4.3)$$

Esta equação é baseada na premissa que o diâmetro ótimo deve ser igual ao diâmetro do eletrodo (BRANCO, 2004).

Ainda assim, o diâmetro do ponto formado (largura da zona de fusão) deve atender a uma determinada especificação ou critério de projeto. Comumente, pontos de solda feitos em condições normais seguem tendo um mínimo de 3,5 a 4,0 vezes a espessura da chapa mais fina. Há um limite máximo do tamanho do ponto baseado nas limitações econômicas e nas leis da geração e dissipação de calor, mas seu tamanho máximo é de difícil especificação. Profundidade de fusão é a distância na qual o botão de solda penetra nas peças que estão em contato com os eletrodos. A profundidade mínima de fusão é aceita em geral como 20 % da espessura da chapa mais fina. Possuindo um valor menor que os 20 %, a solda é chamada “solda fria”, pois o calor gerado foi baixo. Em casos extremos de variações normais na corrente, tempo e força dos eletrodos, não há a formação do botão de solda. A profundidade de fusão não deve exceder 80 % da espessura da chapa mais fina, o que resultaria em indentação excessiva e possível expulsão do material (RUIZ & BATALHA, 2006).

Tabela 3 - Relação causa – efeito para as falhas na solda ponto por resistência elétrica para chapas

Tipo de Falha		Causas	Efeitos
1	Indentação profunda do eletrodo	Montagem incorreta dos eletrodos e falta de controle da força, geração excessiva de calor (alta resistência de contato ou baixa força no eletrodo);	Perda de resistência da solda devida à redução de espessura do metal na periferia da área de solda, má aparência;
2	Fusão Superficial (seguida de indentação)	Sujeira no metal, baixa força nos eletrodos, alta corrente de solda, montagem incorreta dos eletrodos, seqüência imprópria de corrente e pressão;	Soldas pequenas devido à expulsão do metal fundido, grande cavidade na zona de solda, aumento do custo de remoção das rebarbas, baixa vida do eletrodo, perda de produção (troca dos eletrodos);
3	Solda com formato irregular	Desalinhamento do trabalho, montagem incorreta dos eletrodos, mau contato entre as chapas;	Rsistência reduzida da solda devido às mudanças na área de contato e expulsão de material;
4	Depósito de eletrodos na peça	Sujeira no material, baixa força no eletrodo ou alta corrente de solda, manutenção imprópria do eletrodo, material impróprio do eletrodo;	Má aparência, redução da resistência à corrosão, redução da resistência da solda (expulsão do material), redução da vida do eletrodo;
5	Trincas e cavidades profundas	Remoção da força dos eletrodos antes do resfriamento da solda, geração excessiva de calor resultando na expulsão de metal fundido;	Redução da resistência à fadiga (caso exista tensão na solda ou imperfeições na periferia da área soldada, aumento da corrosão);

(RUIZ & BATALHA, 2006)

4.2 Procedimento de verificação

4.2.1 Teste de arrancamento

Para a determinação do diâmetro do ponto de solda, comumente se utiliza o teste destrutivo de arrancamento, a figura 16. e 17. mostram o teste de arrancamento, corpos de prova e a determinação do diâmetro médio.

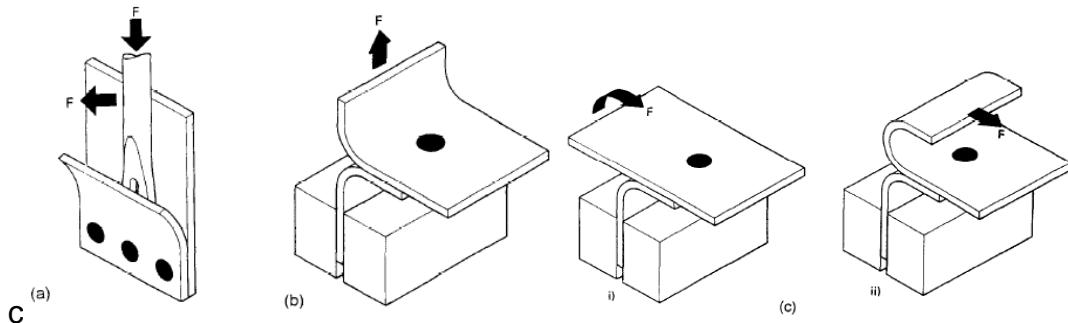


Figura 16 - Rotina de testes para arrancamento: a) Com chave tipo pé de cabra, b) Teste mecânico e c) Teste tipo descascamento (POWELL, 1996, modificado; VARGAS, 2006).

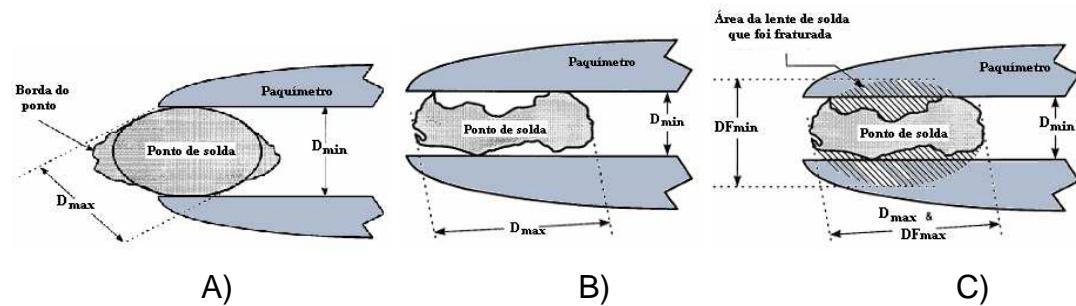


Figura 17 - Medições dos pontos de solda: sem fratura A e B e com fratura C (VARGAS, 2006)

5. O ELETRODO

5.1 Materiais e classificação do eletrodo de solda ponto

O eletrodo é um dos componentes mais importantes nos processos de solda a ponto. A qualidade final do ponto de solda é diretamente dependente do estado do eletrodo durante o processo de soldagem. Os materiais dos eletrodos utilizados em solda a ponto devem ter condutividades elétricas e térmicas suficientemente altas e resistência de contato suficientemente baixa para prevenir o aquecimento excessivo da superfície das chapas, a fim de diminuir a velocidade de formação de liga de cobre entre o material do eletrodo com o revestimento da chapa. Devem possuir ainda, resistência mecânica suficientemente alta para resistir à deformação em elevadas pressões e temperaturas de operação, transmitir a força de soldagem às chapas, dissipar rapidamente o calor da zona de solda e não aderir à peça (INTERMACHINERY, 2002; VARGAS, 2006).

Os eletrodos à base de cobre estão classificados segundo a “*Resistance Welder Manufacturers Association*” (RWMA) em 3 classes (RWMA, 2002; VARGAS, 2006):

- 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 20: É composta por materiais com capacidade de resistir a altas taxas de calor e pressão quando comparado com os materiais das classes 1 e 2. São fabricados utilizando cobre e material refratário. A Tabela 4 mostra as características dos materiais de fabricação dos eletrodos conforme a classificação da RWMA (CRAGGS, 2002; RWMA, 2002; VARGAS, 2006).

Tabela 4 - Característica dos eletrodos segundo RWMA

Classe RWMA	Descrição	Condutividade (I.A.C.S.) (%)	Dureza (HB)	Mecanismo Endurecimento
RWMA 1 (classe 1)	Cobre-Zircônio CuZr (0,15 % Zr)	90	70	Precipitação
RWMA 2 (classe 2)	Cobre-Cromo CuCr (1 % Cr)	85	83	Precipitação
RWMA 2 (classe 2)	Cobre Cromo Zircônio CuCrZr (1 % Cr 0,25 % Zr)	85	83	Precipitação
RWMA 20 (classe 20)	Cobre Resistente por Dispersão CuAl ₂ O ₃ (1,1 % Al ₂ O ₃) AI-60	85	75	Dispersão

(VARGAS, 2006)

Os eletrodos de Cu/Cr (1% Cr), Cu/Cr/Zr (1% Cr; 0,25% Zr) e CuZr (0,15% Zr) são formados por ligas endurecidas por precipitação. Estas ligas adquirem tais propriedades através da adição de elementos de liga em solução que é envelhecida em certas condições de tempo e temperatura, promovendo a formação de finos precipitados. A exposição a altas temperaturas por períodos maiores de tempo permite que os precipitados cresçam, reduzindo a resistência devido ao super envelhecimento. As temperaturas atingidas durante a soldagem por resistência são suficientes para destruir a estrutura dos precipitados. A condutibilidade elétrica destes tipos de eletrodo está na faixa de 80% a 90% IACS (International Annealing Copper Standard) (INTERMACHINERY, 2002; VARGAS, 2006).

5.2 Desenho do eletrodo

A forma da face de contato do eletrodo é muito importante, mas o diâmetro do corpo do eletrodo deve permitir livre circulação da água, garantindo, desta forma, um resfriamento adequado da face do eletrodo. Faces com forma esférica não são consideradas satisfatórias já que a absorção do zinco (Zn) altera a área de contato de forma significativa, decrescendo a densidade de corrente na zona de solda até um nível onde a fusão não pode ser mais obtida com os ajustes iniciais de soldagem. Problemas de alinhamento de eletrodo são mais facilmente resolvidos quando utilizado um eletrodo de forma esférica. Um perfil de eletrodo do tipo plano cone truncado é mais recomendado, sendo que o ângulo de inclinação do cone deve ser de 20º a aproximadamente 30º para um bom desempenho (Intermachinery, 2003; RWMA, 2002; Tecnowelding, 2004; Branco, 2004).

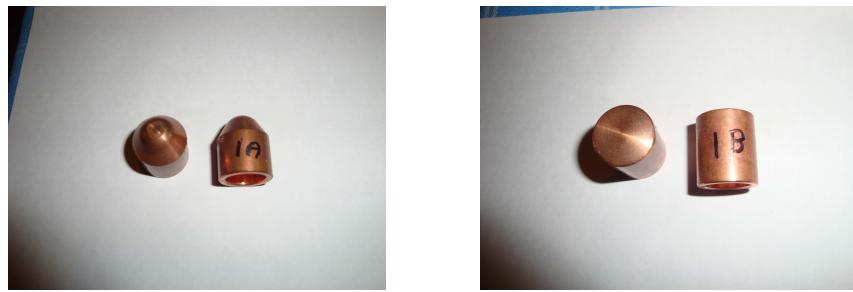


Figura 18 - Eletrodo tipo plano cone truncado (esq.) e esférico (dir.)

5.3 Alinhamento do eletrodo

Os eletrodos devem ser alinhados durante o processo de parametrização das máquinas de solda a ponto, pois um desalinhamento produz características desfavoráveis no processo e na qualidade da solda. Os desalinhamentos axiais ou angulares podem causar irregularidades na forma e redução do tamanho do ponto de solda, devido a uma distribuição assimétrica de força e corrente de soldagem. Os desalinhamentos ocorrem quando as faces de contato superior e inferior não são paralelas ou quando os centros de contatos superiores e inferiores não são coincidentes (BRANCO, 2004).

Os exemplos de desalinhamentos são mostrados na figura 19. e figura 20.

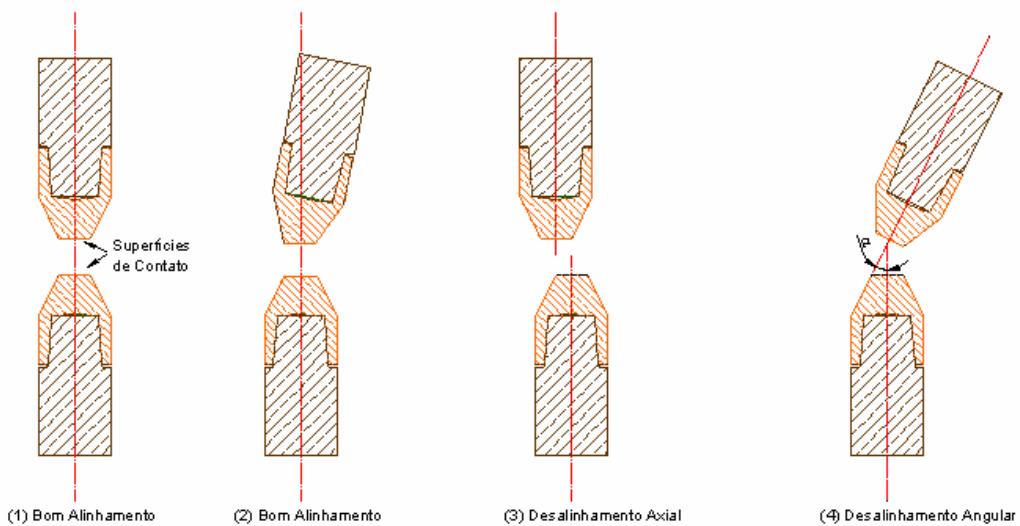


Figura 19 - Formas de alinhamento e desalinhamento (BRANCO, 2004)

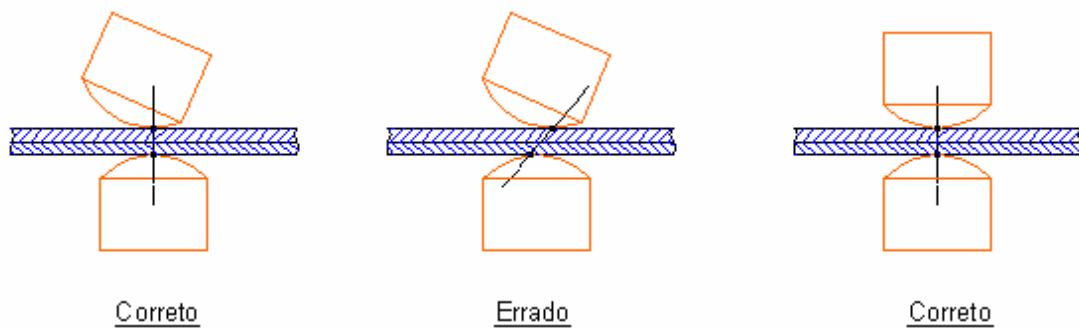


Figura 20 - Não paralelismo dos centros de contato das capas de eletrodo com a chapa (BRANCO, 2004)

5.4 Desgaste dos Eletrodos

O processo de soldagem por resistência envolve complicadas interações entre as propriedades físicas e metalúrgicas da chapa metálica, revestimento da chapa, materiais do eletrodo e os parâmetros de soldagem. Devido à exposição do eletrodo a altas temperaturas e altas pressões, o eletrodo sofre alterações nas suas características originais, formando crateras na face de contato, acumulo de material na face de contato do eletrodo (formação de latão entre elas) e aumento do diâmetro da face de contato do eletrodo. A estas mudanças nas características originais do eletrodo chama-se de desgaste do eletrodo. O cobre com dureza menor se deforma numa taxa maior, fazendo com que o diâmetro do eletrodo aumente, reduzindo, assim, a densidade de corrente atuante para formar o ponto de solda. Deve-se então ajustar a corrente a fim de manter a mesma densidade desejada, o que provoca mais deformação na face do eletrodo devido ao aumento de calor e este ciclo se segue até que o eletrodo esteja completamente desgastado e chegue ao seu fim de vida, tendo que ser descartado ou sofrer retrabalho, no caso, o mais comum é o da retificação do eletrodo (JOINING, 1997; REU, 1997; INTERMACHINERY, 2003; BRANCO, 2004).

5.5 Curvas de corrente

As curvas de corrente ou de programação progressiva de corrente de soldagem (“steps”) são utilizadas nos processos de soldagem a ponto, para determinar o decurso da subida de corrente de soldagem, compensando o aumento da área de contato da face do eletrodo, ajustando a densidade de corrente.

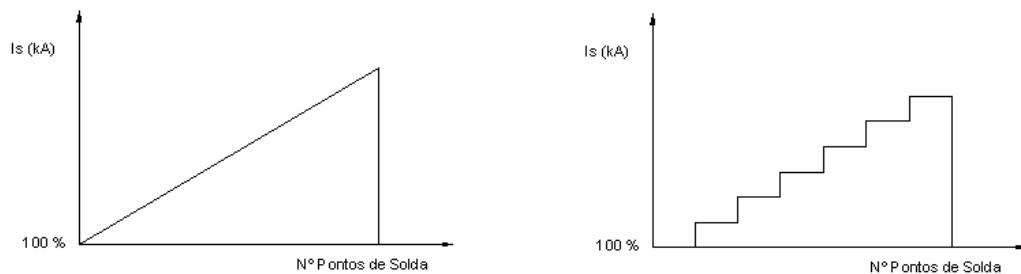


Figura 21 - Curva de corrente e programação progressiva de corrente de soldagem (BRANCO, 2004)

Existem 3 fatores que influenciam na programação das curvas de corrente (ROBERT 1998; BRANCO, 2004):

- O número de pontos por degrau, ou seja, a quantidade de pontos que a máquina irá executar antes que a corrente seja aumentada;
- Qual o valor de subida de corrente (corrente em % em relação ao valor inicial) por degrau;
- Os valores de corrente são absolutos e em kilo Ampéres (kA) por degrau.

5.6 Fresagem dos eletrodos

A fresagem de eletrodos é a prática mais recomendada e usada pelas empresas. A fresagem é um processo de usinagem rápido e eficiente utilizado para recuperar o perfil original do eletrodo após alguns pontos de solda. A fresagem dos eletrodos é uma necessidade, provocada basicamente por dois fatores:

- Formação de latão na face de soldagem do eletrodo;
- Aumento da área da face do eletrodo.

Para realizar a fresagem dos eletrodos é necessária a utilização de uma ferramenta chamada fresador de eletrodos. Com ela é possível fresar a face do eletrodo e com isso manter o perfil original, podendo-se ainda ajustar os parâmetros de soldagem (BRANCO, 2004).

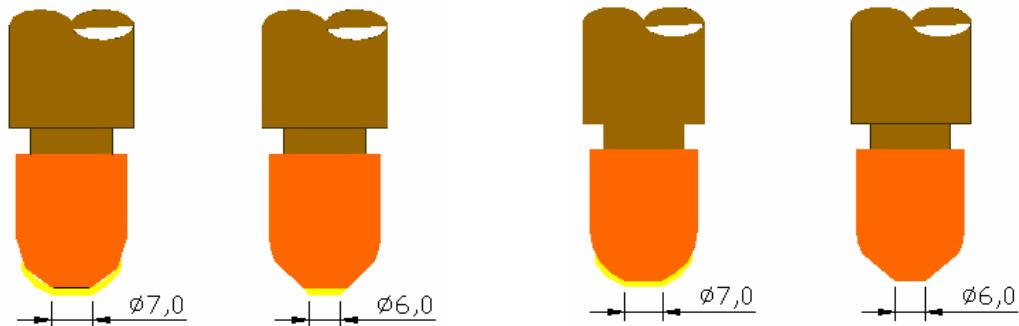


Figura 22 - Fresagem lateral (esq.) e fresagem de topo e lateral (dir.) (BRANCO, 2004)

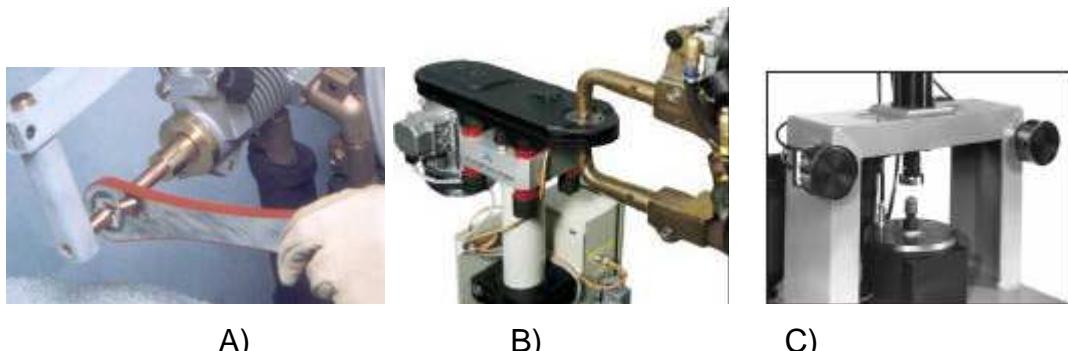


Figura 23 - Tipos de fresadoras. A) Fresagem com fresador manual mecânico B) Fresa elétrica para pinça de solda de robô e C) Fresador off-line (BRANCO, 2004)

5.6.1 Vantagens de se fresar o eletrodo

A fresagem dos eletrodos em solda a ponto por resistência elétrica apresenta as seguintes vantagens (REU, 1997; BRANCO, 2004; TECNOWELDING, 2004):

- Reduz o desperdício de eletrodos;
- Reduz o tempo de troca dos eletrodos;
- Aumenta a produtividade;
- Os parâmetros de soldagem serão mais constantes (Força, Corrente, Tempo e os parâmetros do circuito de refrigeração);
- Transformadores menores;
- Economia de energia;
- Aumento do número dos pontos de solda, comparados com os pares de eletrodos sem fresagem;
- Redução da parada de máquina para troca de eletrodos;
- Menos consumo de eletrodo.

5.6.2 Defeitos provenientes do processo de fresagem

Cuidados especiais na fresagem manual devem ser tomados, pois a incorreta fresagem pode resultar em um número de condições defeituosas, tais como (Branco, 2004):

- Não paralelismo entre as faces.
- Diâmetro errado da face do eletrodo.
- Limpeza insuficiente do material.

A Figura 24 mostra estas condições.

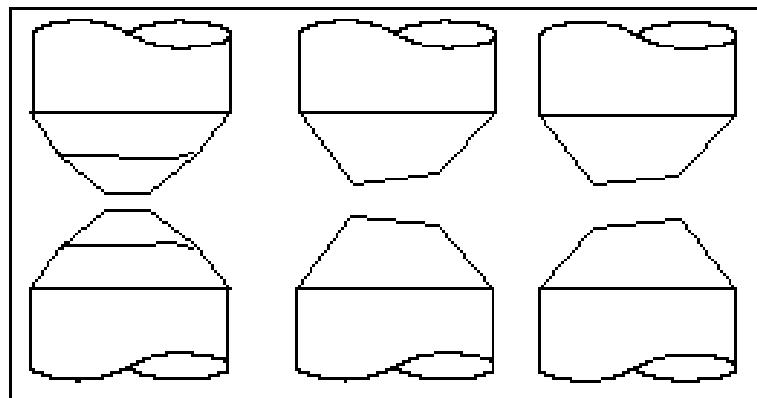


Figura 24 - Efeito da incorreta fresagem do eletrodo (BRANCO, 2004)

6. DIGITALIZAÇÃO 3D

6.1 Conceito geral

Digitalização 3D é a utilização de um sistema de aquisição de dados de 3 dimensões, capaz de aquisitar multicoordenadas x,y,z da superfície de um objeto físico. Cada coordenada discreta x,y,z é referenciado como um ponto. A conglomeração desses pontos é chamada de nuvem de pontos. Possui formato de arquivo típico que registra os dados de uma nuvem de pontos, é um arquivo de texto ASCII contendo os valores x,y,z de cada ponto. Também pode conter, mais comumente, a representação da malha poligonal da nuvem de pontos, arquivos com extensão STL (Capture3d, 2009).

6.2 Analogia ao funcionamento do olho humano

Nós enxergamos em 3D, graças ao sistema de percepção espacial que nosso sistema visual nos dá, através do olho humano. Sabe-se que, por geometria analítica, conhecidos dois pontos e a distância entre eles, e um terceiro ponto qualquer conhecendo o ângulo formado pelas retas que passam por esse ponto e pelos outros dois pontos, consegue-se determinar a distância entre esse terceiro ponto e qualquer um dos dois primeiros pontos. Nosso cérebro é o responsável por fazer os cálculos trigonométricos que determinam a distância entre os dois primeiros pontos, olho esquerdo e olho direito, com distância conhecida, a outro ponto qualquer no espaço, nos dando a noção 3D de percepção de distância, a consciência espacial. Para poder saber os ângulos formados pelas retas que passam pelo ponto e por nossos olhos, fazemos uma focalização individual de cada olho para o ponto (objeto) observado, para tal é alterado o grau de desvio de nossas lentes, o cristalino, que faz um ajuste de foco e, dependendo do quanto convergimos nossos olhos, temos a noção de longe e perto. Esse ajuste, com o passar dos anos e acúmulo de experiência por parte de nosso cérebro, se torna um ajuste automático de perto e longe e distâncias intermediárias. Basicamente temos que o par de olhos frontais nos dão a visão 3D (CASTLEMAN, 1995).

6.3 ATOS®

Os digitalizadores 3D seguem o mesmo princípio de funcionamento e geração de imagem 3D do olho humano. Fazendo a analogia, temos que o software de processamento de imagem faz o papel dos cálculos trigonométricos realizados pelo nosso cérebro, cada câmera faz o papel de nossos olhos, com suas respectivas lentes. Sendo então baseado no princípio de triangularização usando um conjunto de câmeras (estéreo). Composta pelo conjunto de câmera e um projetor sensor de franjas integrado. O projetor sensor, projeta sobre a superfície da peça uma máscara de franjas (analogia na figura 26), que são gravadas pelo conjunto de duas câmeras, formando uma imagem com diferença de fase (Figuras 27 e 28) baseada na distribuição de intensidade senoidal no chip CCD das câmeras. Utiliza múltipla diferença de fase (“*heterodyne principle*”) para conseguir a maior acurácia em sub-pixel e também, baseada em equações de transformação ópticas, as coordenadas independentes 3D calculadas automaticamente para cada pixel da câmera. Dependendo da resolução da câmera, a nuvem de pontos pode chegar a 4 milhões de pontos por medida (DAMOULIS & GOMES & BATALHA, 2009).



Figura 25 – Objeto a ser digitalizado

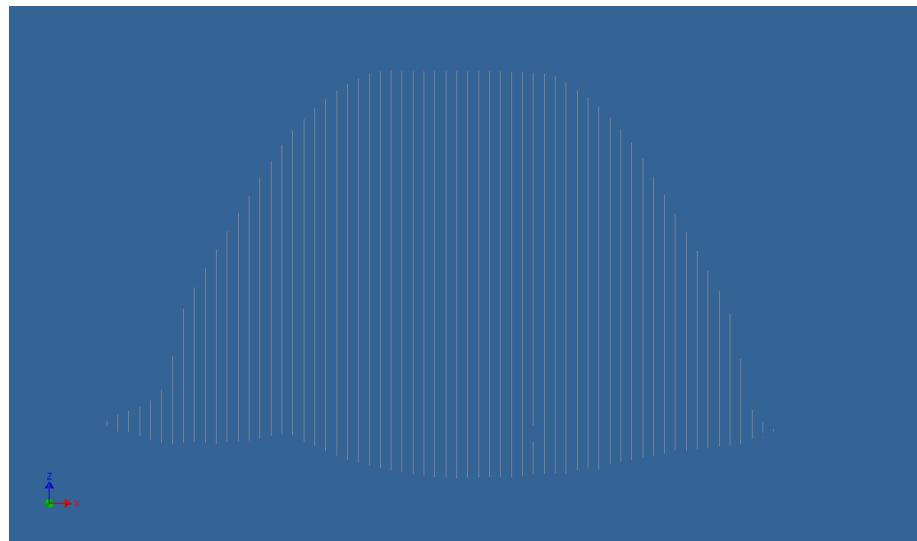


Figura 26 – Franjas emitidas na superfície do objeto

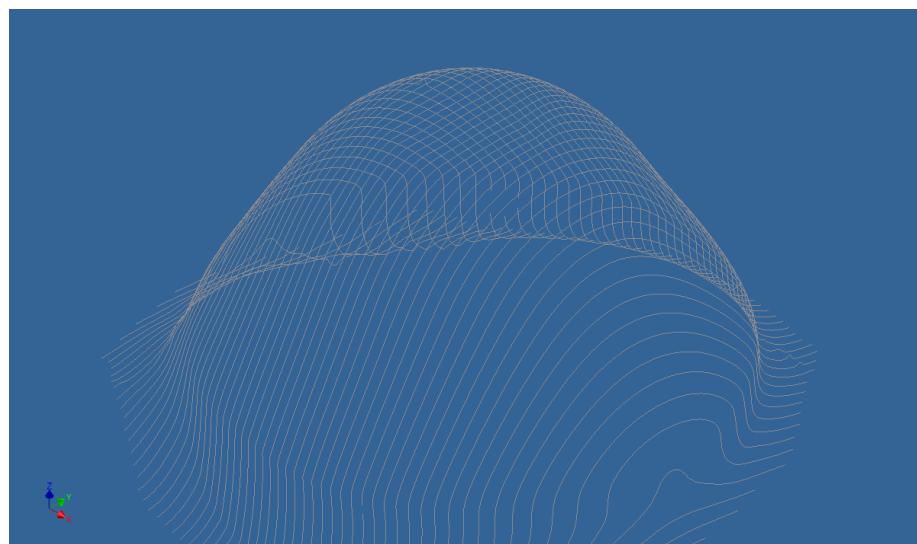


Figura 27 – Franjas emitidas na superfície do objeto captadas pela câmera esquerda

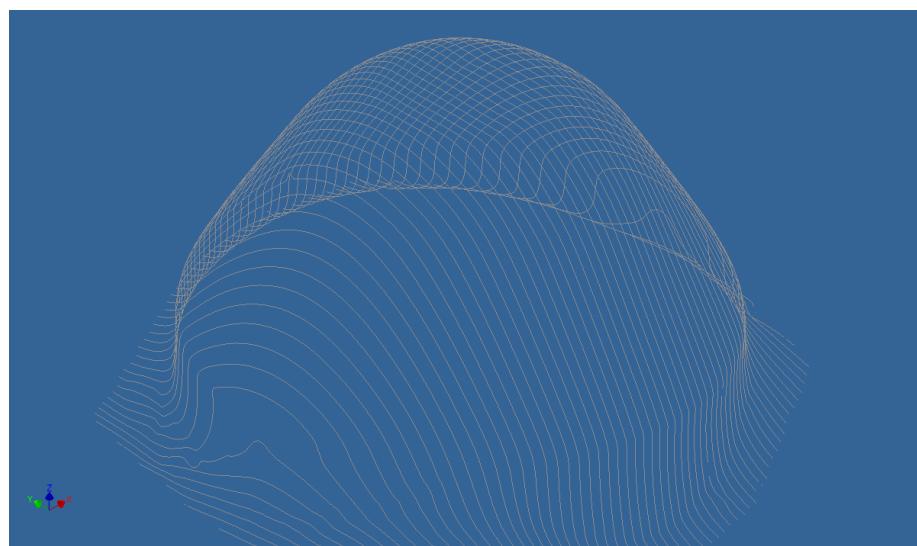


Figura 28 – Franjas emitidas na superfície do objeto captadas pela câmera direita

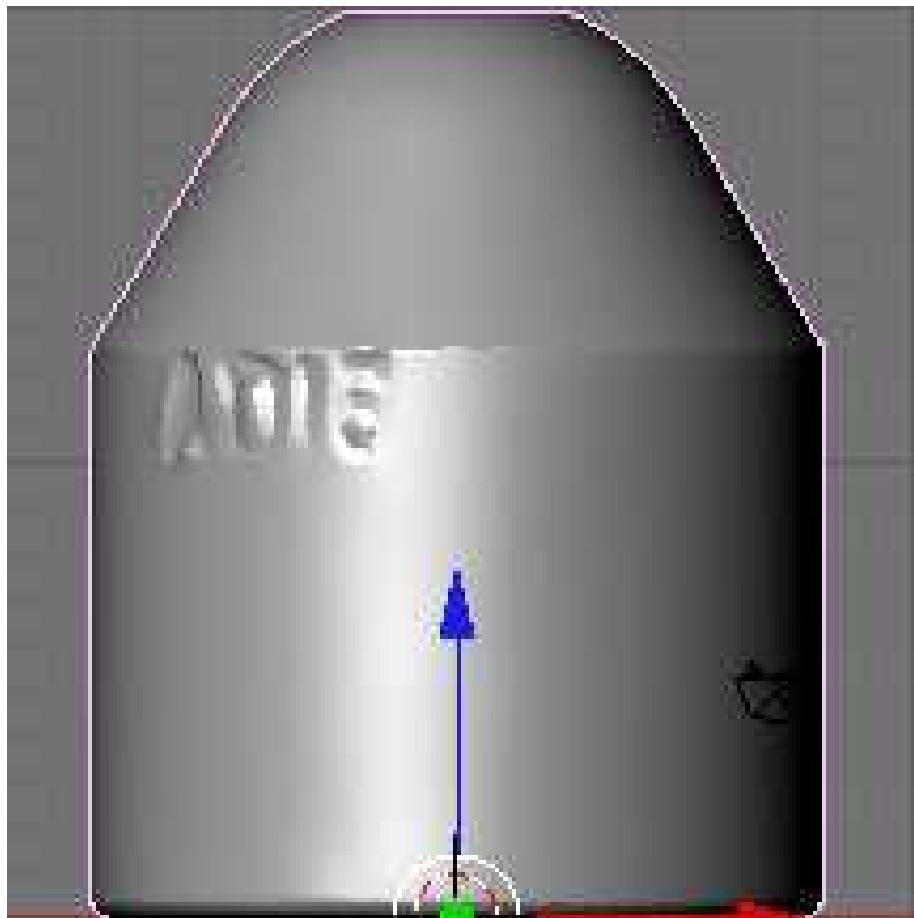


Figura 29 – Objeto digitalizado em formato de nuvem de pontos

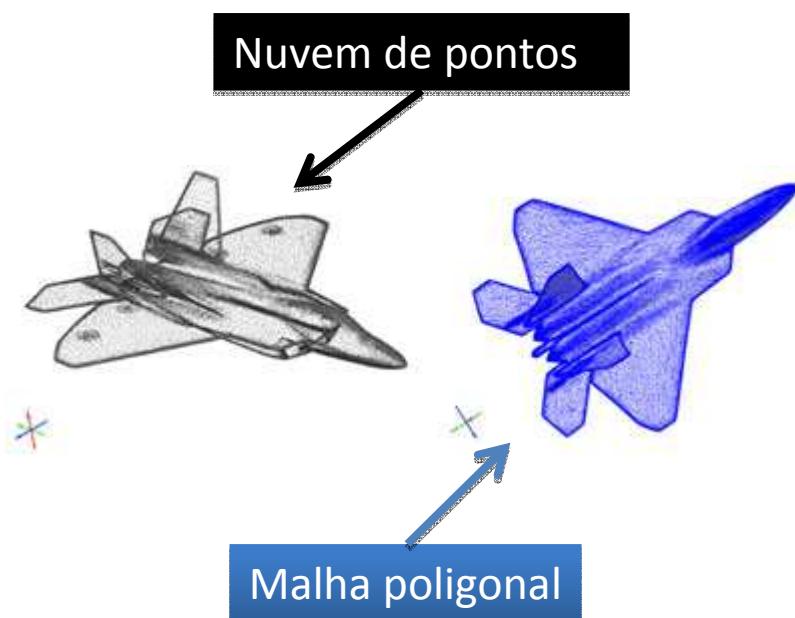


Figura 30 – Comparação entre nuvem de pontos e malha poligonal (Capture3d, 2009 modificado)

7. METODOLOGIA DO ENSAIO REALIZADO

7.1 Planejamento do ensaio

Para esse estudo, foi realizado um ensaio ilustrativo de utilização da monitoração do desgaste por técnicas de digitalização 3D. Nos testes de soldagem, foram realizados testes de arrancamento a cada 80 pontos de solda para o primeiro intervalo, 130 para o segundo intervalo e a cada 100 pontos de solda para os últimos intervalos até o fim de vida do eletrodo. Para monitorar como os eletrodos eram degradados ao longo das soldagens realizadas, foram feitos moldes das faces dos eletrodos em Durepox®, que registraram seu estado sem a necessidade de retirada do eletrodo da máquina, no mesmo intervalo de pontos a que foram feitos os testes de arrancamento. Foi medido o diâmetro médio do ponto de solda conforme procedimento descrito no item 4.2.1, até que fosse atingido um valor mínimo de diâmetro de 4,47mm (critério de qualidade eq. 4.1).

7.2 Chapas dos corpos de prova

Os pontos de solda foram realizados utilizando duas chapas de aço SAE 1020 com dimensões de 400 x 400 mm para a fase de desgaste. Para gerar as chapas dos corpos de prova para teste de arrancamento, foram utilizadas duas chapas de mesmo material com dimensões de 104 x 45 mm, conforme mostra na Figura 31. Ambas as chapas tem a especificação (consultando especificação e normas junto a montadora), com espessura da chapa 0,8 mm. O espaçamento “b” entre os pontos de solda para chapas com espessuras iguais é dado pela fórmula:

$$b = ((14 \cdot s_2) + 3) \cdot (s_1 + s_2)^{1/3} \quad (7.1)$$

Onde “b” é a distância mínima entre os pontos de solda e “s” a espessura das chapas a serem soldadas. A distância mínima que os pontos de solda devem ficar da borda da chapa a ser soldada, tanto para espessuras iguais quanto para

espessuras diferentes ($s_1 = s_2$ ou $s_1 > s_2$), é dada pela expressão 7.2. (MACHADO, 1996; BRANCO, 2004).

$$L = [13.(s_2)^{1/2} \cdot (s_1/s_2)^{1/3}] \cdot (1/2) \quad (7.2)$$

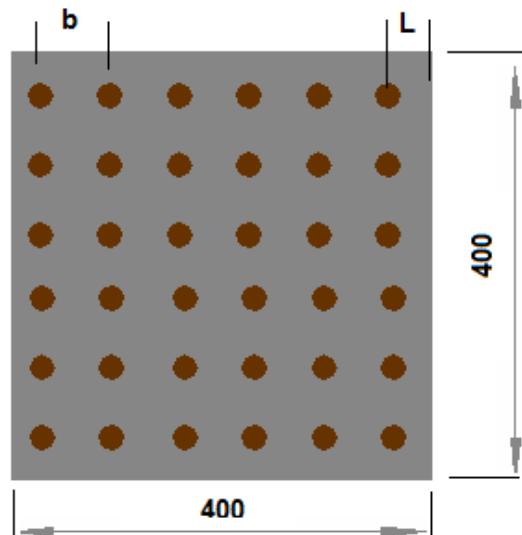


Figura 31 - Chapa de desgaste (BRANCO, 2004, modificada).

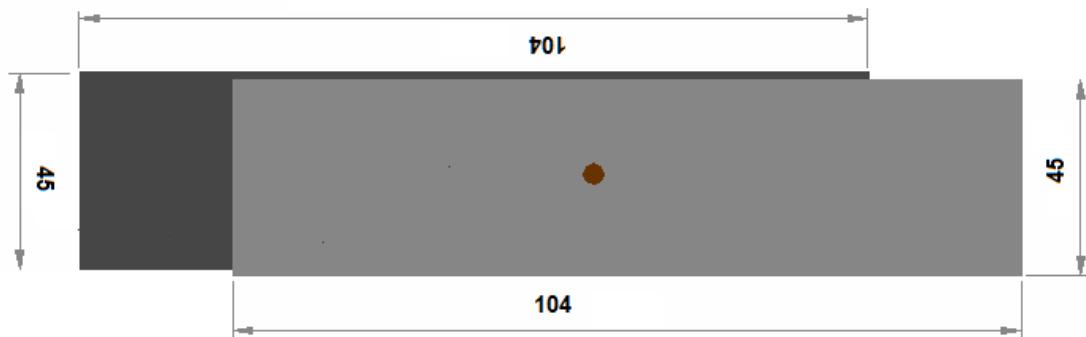


Figura 32 - Corpo de prova para ensaio de arrancamento (BRANCO, 2004, modificada).

7.3 eletrodos utilizados

Foram utilizados dois tipos de eletrodos, ambos de liga CuZr (0,15% Zr) mostrado no item 5.1, sendo um deles eletrodo plano truncado cônico 5 mm de diâmetro da superfície de contato, definido como caso “A”, e o segundo um eletrodo esférico de raio 75 mm, definido como caso “B”.

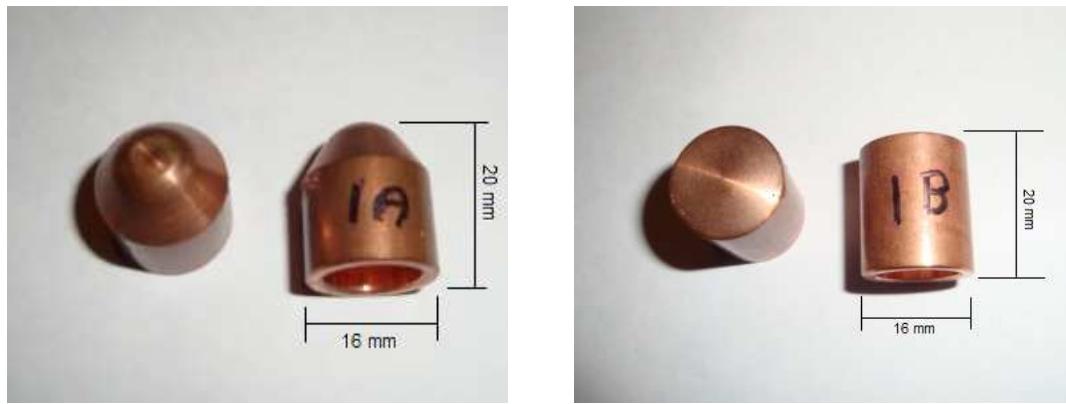


Figura 33 - Eletrodos utilizados nos ensaios

7.4 Máquina de solda utilizada

Para realizar os pontos de solda, foi utilizada uma máquina de solda a ponto estacionária marca ARO de 20 KVA, refrigerada a água, corrente alternada, com acionamento pneumático gatilho manual, conforme mostrado na Figura 34. Foram inspecionados os cabos e mangueiras de ar e água da máquina, constatando que não havia nem dobras nem vazamentos. Os braços e porta eletrodos foram bem alinhados e apertados para garantir uma boa resistência às pressões exercidas pelo cilindro de ar e para também não apresentarem alta resistência à passagem da corrente elétrica.



Figura 34 - Máquina de solda a ponto utilizada

7.5 instrumentos de medição e calibração

A máquina de solda a ponto passou por um processo de calibração dos parâmetros de soldagem (Tempo, Corrente e Pressão). A medição do tempo e corrente de soldagem foi feita utilizando um medidor de corrente com toróide, de marca Miyachi MM-315A, e faixa de corrente de 1,00 – 49,9 kA. Para realizar a medição de pressão foi utilizado um dinamômetro digital Miyachi MM- 601 A, com célula de carga e faixa de 20 – 950 kg. O processo de calibração consistiu na regulagem da máquina dos valores de tempo, corrente e pressão de soldagem. Para verificar se os parâmetros estavam corretos, foi soldado um corpo de prova realizando as medições de corrente e tempo, tendo a medição de força sido realizada antes da solda. Foi constatado que não havia necessidade do reajuste dos parâmetros.



Figura 35 - Medidor de corrente(esq.) e medidor de pressão(dir.) (BRANCO, 2004)

7.6 Parametrização

Os parâmetros de solda foram escolhidos de forma a atender o critério de qualidade estabelecido no item 4.1, eq. (4.1). Foi seguido com alterações a parametrização orientativa descrita no item 3.4.1.1. Tabela 2.

- Corrente de soldagem inicial: 6,30 kA (caso A) 5,40 kA (caso B).
- Tempo de soldagem: 10 ciclos/60Hz
- Força entre as capas de eletrodos: 210 kgf.

- Vazão total de água para refrigeração: 6 l/min.
- Velocidade de soldagem: 50 pontos de solda por minuto (no modo de desgaste de eletrodo).

7.7 Critério de qualidade

O critério de qualidade utilizado nesse ensaio foi o descrito no item 4.1, eq. (4.1).

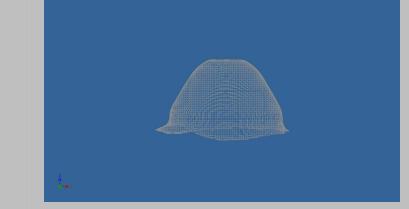
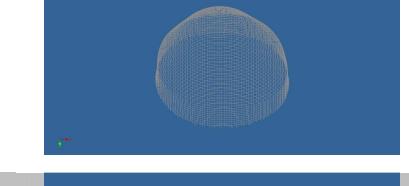
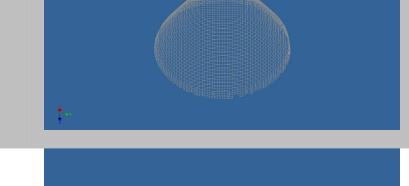
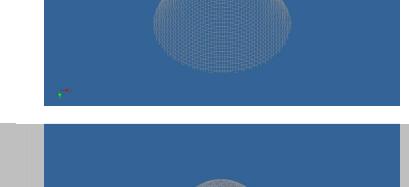
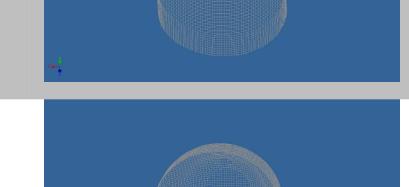
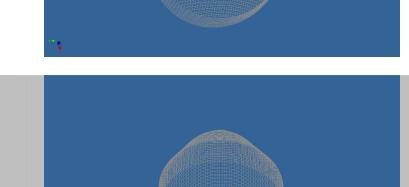
8. RESULTADOS DO ENSAIO E DIGITALIZAÇÕES

Foram divididos em dois casos, A e B, com parametrização idêntica, diferenciando-se apenas no tipo de eletrodo utilizado.

Tabela 5 - Ensaio caso A

Caso A	Medida	Corrente elétrica (kA)	Número de pontos	Diâmetro do ponto (mm)	Área de contato do eletrodo (mm ²)
	1	6,20	3	5,0	20,03
	2	6,42	80	5,3	21,31
	3	6,68	210	5,5	23,07
	4	6,80	310	5,6	24,02
	5	7,00	410	5,6	25,43
	6	7,10	510	5,6	26,79
	7	7,12	600	5,5	28,65

Tabela 6 - Ensaio caso A – Digitalização IGS do molde do eletrodo

Medida	Digitalização IGS
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	

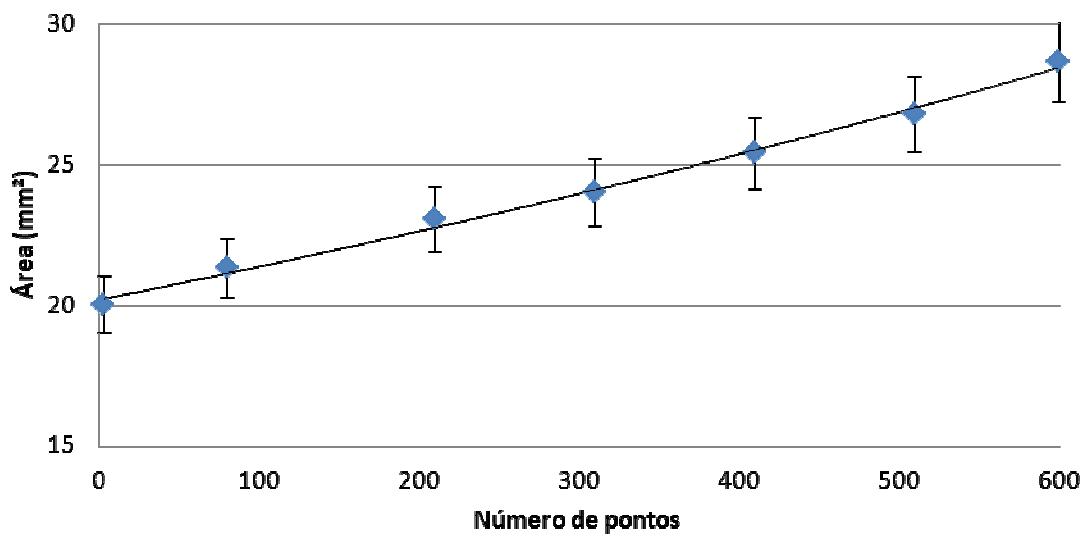


Figura 36 - Ensaio caso A – Gráfico Área vs. Número de pontos.

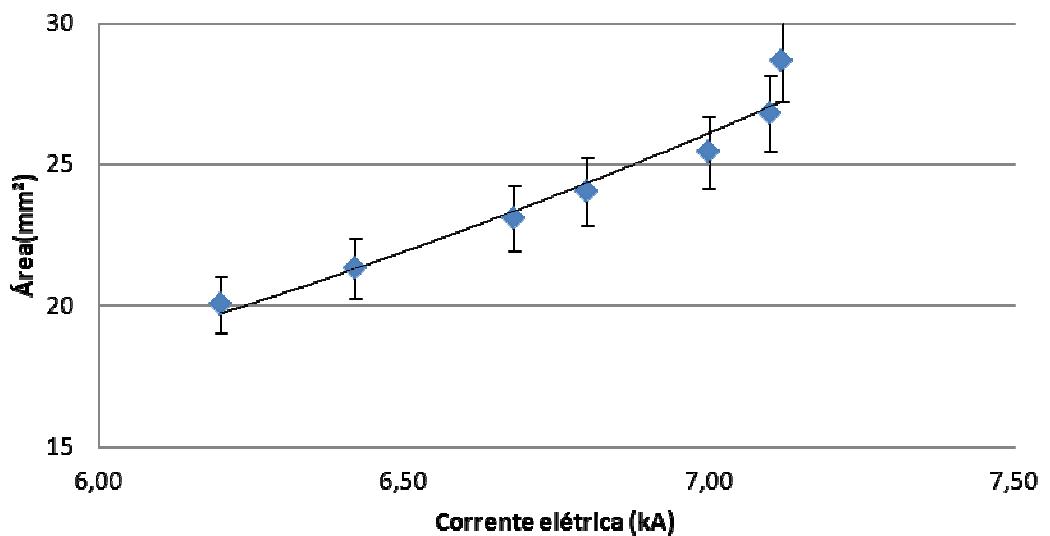


Figura 37 - Ensaio caso A – Gráfico Área vs. Corrente elétrica.

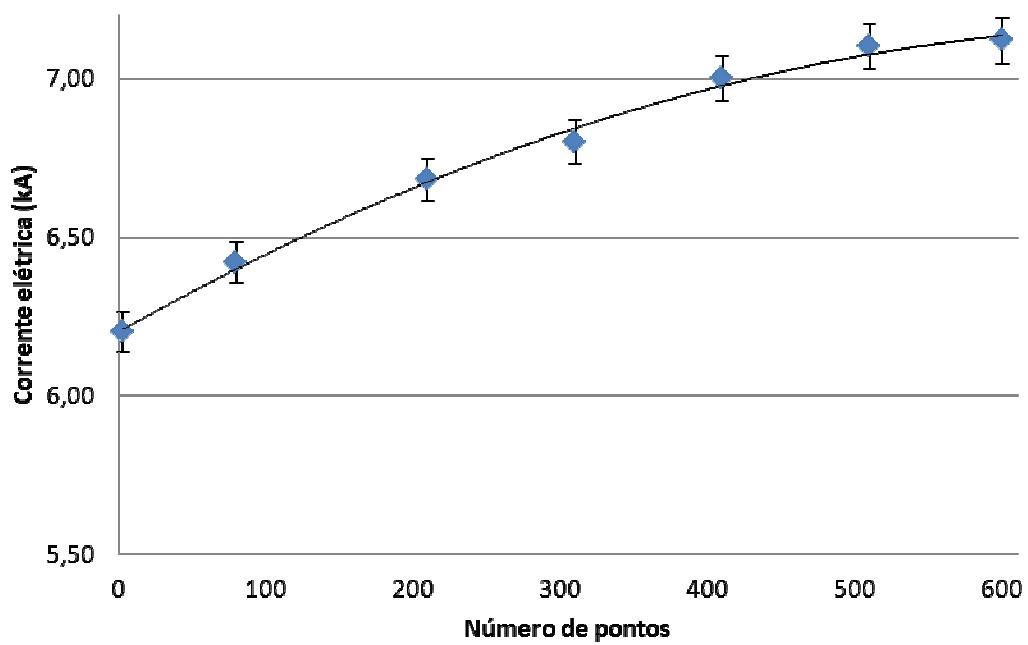


Figura 38 - Ensaio caso A – Gráfico Corrente elétrica vs. Número de pontos.

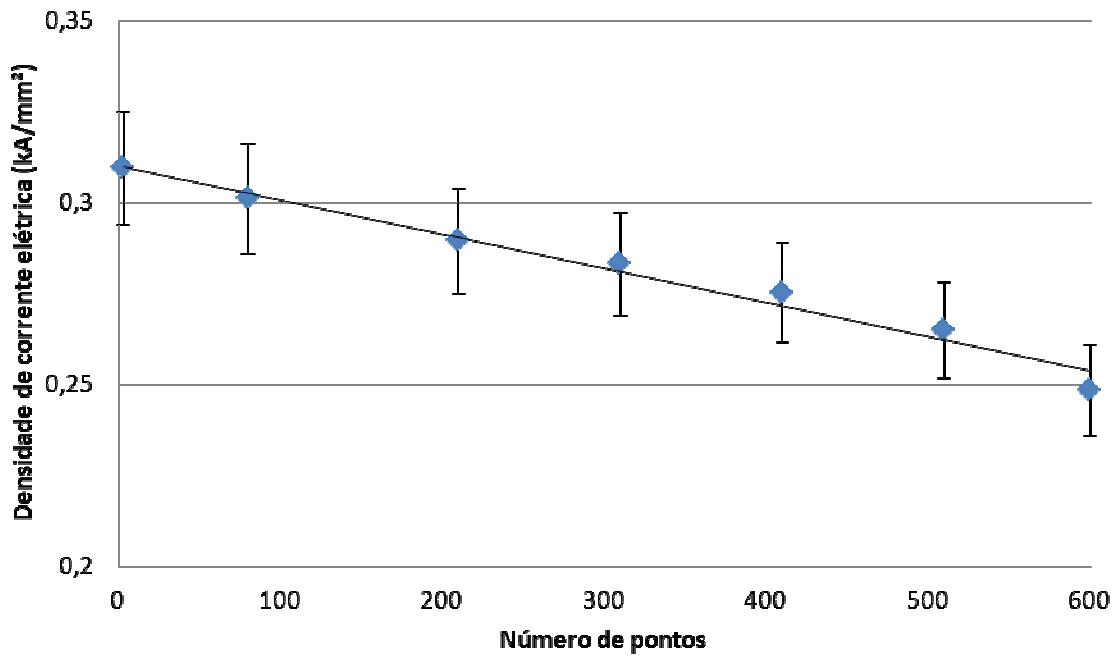
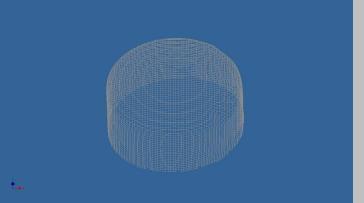
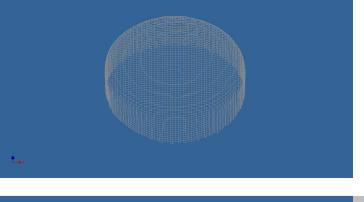
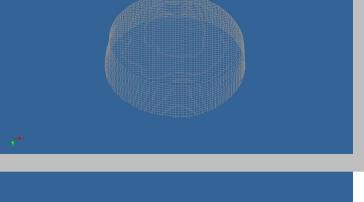
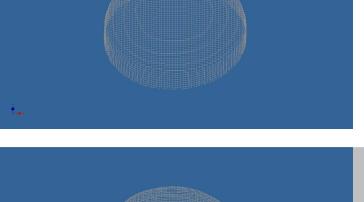
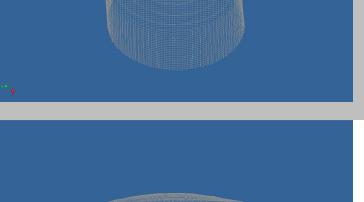
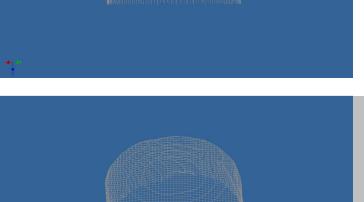
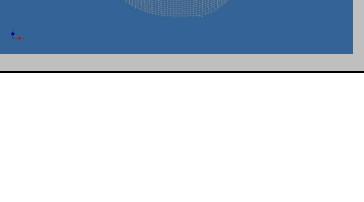


Figura 39 - Ensaio caso A – Gráfico Densidade de corrente elétrica vs. Número de pontos.

Tabela 7 - Ensaio caso B

Caso B	Medida elétrica (kA)	Número de pontos	Diâmetro do ponto (mm)	Área de contato do eletrodo (mm ²)
1	5,60	1	5,0	20,51
2	5,65	80	5,0	20,99
3	5,90	210	5,0	23,33
4	6,10	310	5,0	24,81
5	6,20	410	5,5	25,78
6	6,30	510	5,5	26,37
7	6,35	600	5,5	29,04

Tabela 8 - Ensaio caso B – Digitalização IGS do molde do eletrodo

Medida	Digitalização IGS
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	

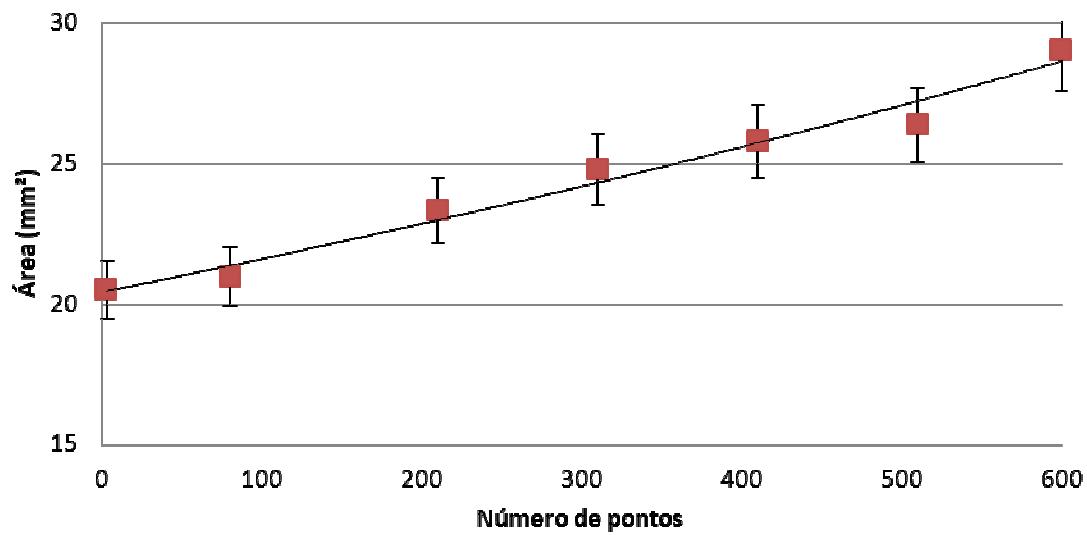


Figura 40 - Ensaio caso A – Gráfico Área vs. Número de pontos.

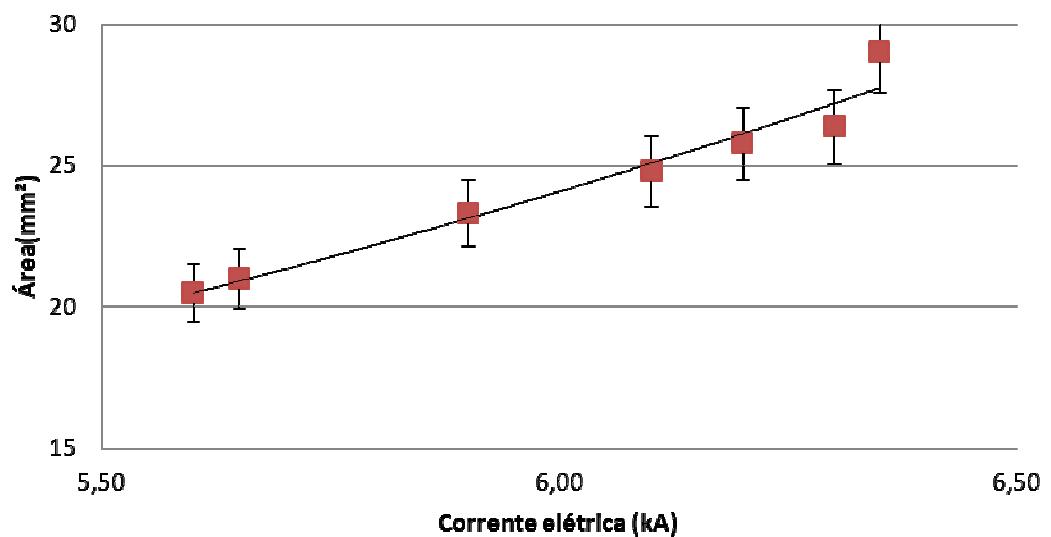


Figura 41 - Ensaio caso A – Gráfico Área vs. Corrente elétrica.

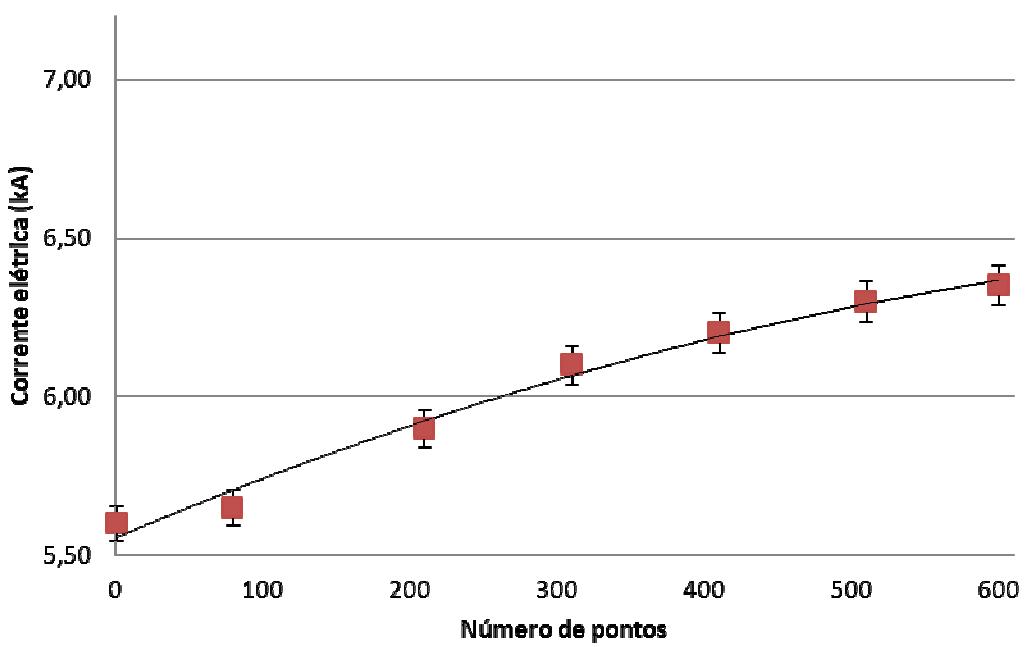


Figura 42 - Ensaio caso A – Gráfico Corrente elétrica vs. Número de pontos.

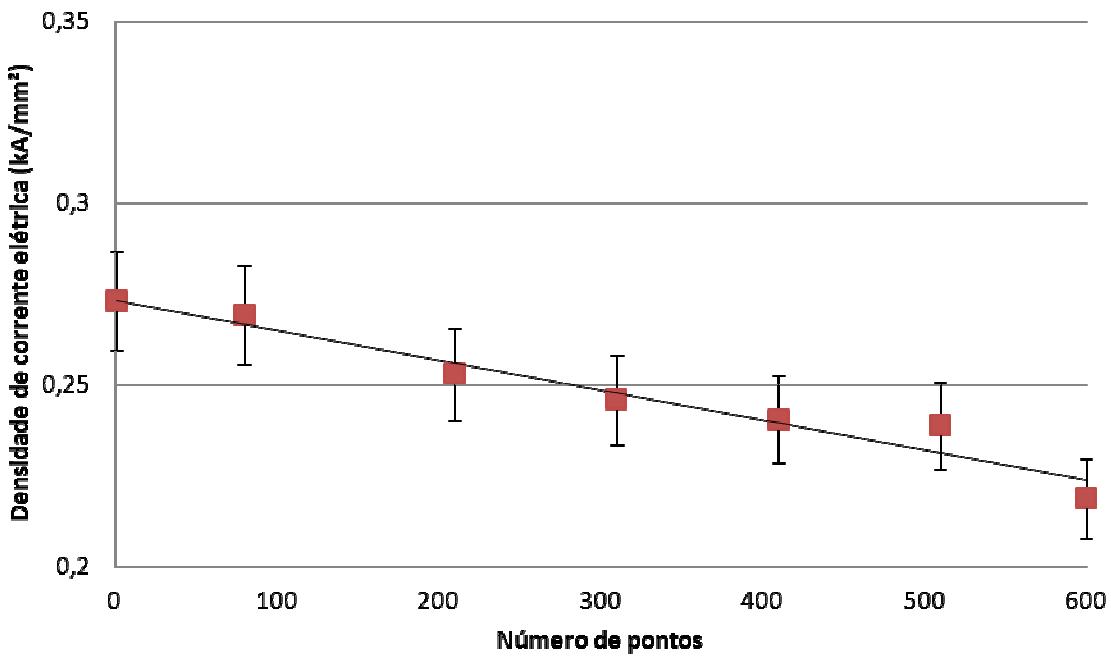


Figura 43 - Ensaio caso A – Gráfico Densidade de corrente elétrica vs. Número de pontos.

9. METODOLOGIA DE TRATAMENTO DE DADOS

9.1 Planejamento estatístico

Um dos principais objetivos do planejamento estatístico é garantir que nos testes propostos nesse trabalho tanto o processo quanto as curvas obtidas, tenham todos que respeitar o indicador denominado noventa e cinco por cento (95%) de intervalo de confiança das suas dimensões, atendendo aos padrões da indústria automobilística. (SANCHES JUNIOR, 2007)

9.2 Definição de Parâmetros

Os parâmetros definidos para medição que necessitam de correção estatística são a corrente elétrica e a área de contato do eletrodo para elaboração das curvas.

As áreas de contato da superfície do eletrodo serão medidas através do software que acompanha o digitalizador 3D, no caso específico aqui tratado, o software que acompanha o ATOS®. A corrente elétrica será medida pelo controlador de solda e/ou pelo medidor de corrente com toróide, de marca Miyachi MM-315A e faixa de corrente de 1,00 – 49,9 kA.

Os valores médios calculados das medidas, considerando tratar-se de ensaios em indústria automobilística e alto volume de diferentes ensaios, não conta com grandes amostras de corpos de prova, sendo assim devem ser corrigidos pelo fator “t” de Student, sendo o valor desse fator para uma confiabilidade de 95% igual a 2,015. Esse fator então corrige o erro dos resultados, sendo considerada em 5 repetições a amostra pequena para todos os ensaios. (Ruiz, 2005)

10. PROTOCOLO DE MEDIÇÃO E MONITORAMENTO

Este protocolo de medição tem como produto a elaboração de um lóbulo de soldabilidade para uma dada condição de chapas, uma curva de desgaste de eletrodo à densidade de corrente constante e uma curva de Programação progressiva de corrente de soldagem à densidade de corrente constante. É montado de modo genérico qualitativo, podendo ser aplicado às condições de qualquer planta automobilística.

10.1 Procedimento 1 – Organização do experimento

- a) Definir os eletrodos “ n_E ” a serem utilizados na planta. Cada eletrodo possui as características : Forma, composição química, diâmetro do eletrodo, raio de arredondamento (para eletrodos esféricos) e diâmetro da ponta (para eletrodos de plano truncado);
- b) Definir espessuras “ n_e ” de chapas utilizadas na planta em mm;
- c) Definir revestimentos “ n_R ” das chapas utilizadas na planta;
- d) Elaborar os arranjos de chapas possíveis “ n_{Ap} ” utilizados na planta;
- e) Elaborar corpos de prova para testes de verificação de qualidade de ponto;
- f) Elaborar corpos de prova para desgaste de eletrodo, entre testes de verificação de qualidade de ponto.

O conjunto de e) e f), são definidos no capítulo 7.2. O conjunto de a) e d) formam a condição de soldagem. Como o procedimento é voltado para condições reais de uma planta, o método fatorial para determinar a quantidade de experimentos, $n_E \times n_e \times n_R \times n_{Ap} = n_{Experimentos}$, não se vê aplicável desta forma, pois há condições que não existem na planta, sendo seu ensaio desnecessário. Ao utilizar a técnica de DOE, método robusto de Taguchi (Woolf, 2007) para determinar quantos experimentos serão feitos, também encontra-se dificuldade na elaboração das matrizes ortogonais (“orthogonal arrays”) e também devido ao grande número de condições inexistentes que, dependendo do parâmetro, leva a um elevado número de leveis, o que

acarretaria em um elevado número de experimentos. Sendo assim optou-se pelo Design do tipo emergente, também chamados de “*Bottom-up*” (de baixo para cima).

Pelo design, definiremos a quantidade de experimentos, sendo ela: $n_{Experimentos} = (n_E \times n_{Ar})$, onde n_{Ar} é a quantidade de arranjos reais de chapa na planta.

Os experimentos então são organizados segundo o exemplo da tabela 9, seqüencial, onde os “ n_E ” eletrodos, as “ n_e ” espessuras de chapas e “ n_R ” revestimentos de chapas, agrupados por configuração de chapa utilizada (chapa de espessura e revestimento definida), e os “ n_{Ap} ” arranjos de chapas possíveis são numerados de 1 a n. O número de experimentos “ $n_{Experimentos}$ ” é definido pelos “ n_{Ar} ” arranjos de chapas reais, excluindo-se as condições não possíveis, numerando a condição próxima com o número de experimento da condição excluída. Contém três agrupamentos para 3 chapas. Quando o arranjo de chapas for do tipo 1 ou 2 (duas chapas envolvidas), segue que o agrupamento 3 recebe valor 0 para n_e e 0 para n_R .

Tabela 9 - exemplo de organização de experimentos qualitativa para 5 arranjos possíveis de chapas (1, 2, 3, 4 e 7), com 3 espessuras diferentes e 4 revestimentos diferentes

Experimento	n_E	n_{e1}	n_{R1}	n_{e2}	n_{R2}	n_{e3}	n_{R3}	n_{Ap}
1	1	1	1	1	1	0	0	1
2	1	1	1	1	2	0	0	1
3	1	1	1	1	3	0	0	1
4	1	1	2	1	3	0	0	1
5	1	1	3	1	3	0	0	1
6	1	1	3	2	3	0	0	2
7	1	1	4	2	1	3	1	4
8	2	1	1	1	1	0	0	1
9	2	1	2	1	4	0	0	1
10	2	2	1	2	1	0	0	1
11	2	2	2	3	2	0	0	2
12	2	2	2	3	3	0	0	2
13	2	2	3	2	3	2	4	3
14	2	1	3	2	3	3	3	4
15	2	2	3	2	3	3	4	7
16	3	1	4	1	1	0	0	1
17	3	2	4	2	2	0	0	1
18	3	3	4	3	3	0	0	1
19	3	2	1	3	2	0	0	2
20	3	2	2	3	3	0	0	2
21	3	1	1	1	1	1	1	3
22	3	3	1	3	2	3	2	3
23	3	3	2	3	2	3	3	3
24	3	1	1	2	1	3	2	4
25	3	1	4	2	1	3	2	4

10.1.1 Numeração dos eletrodos

Não há regra específica para a numeração do eletrodo.

10.1.2 Numeração de espessuras de chapas

Numera-se as chapas de 1 a n, da chapa de menor espessura para a chapa de maior espessura.

10.1.3 Numeração dos revestimentos das chapas

Numera-se os revestimentos de 1 a n, por ordem alfabética do tipo de revestimento.

10.1.4 Numeração dos arranjos de chapas possíveis

Os arranjos de chapas possíveis, utilizados em indústria automobilística seguem identificados na figura 44, bem como as espessuras governantes “ e_G ” utilizadas no critério de qualidade descrito no item 4.2.

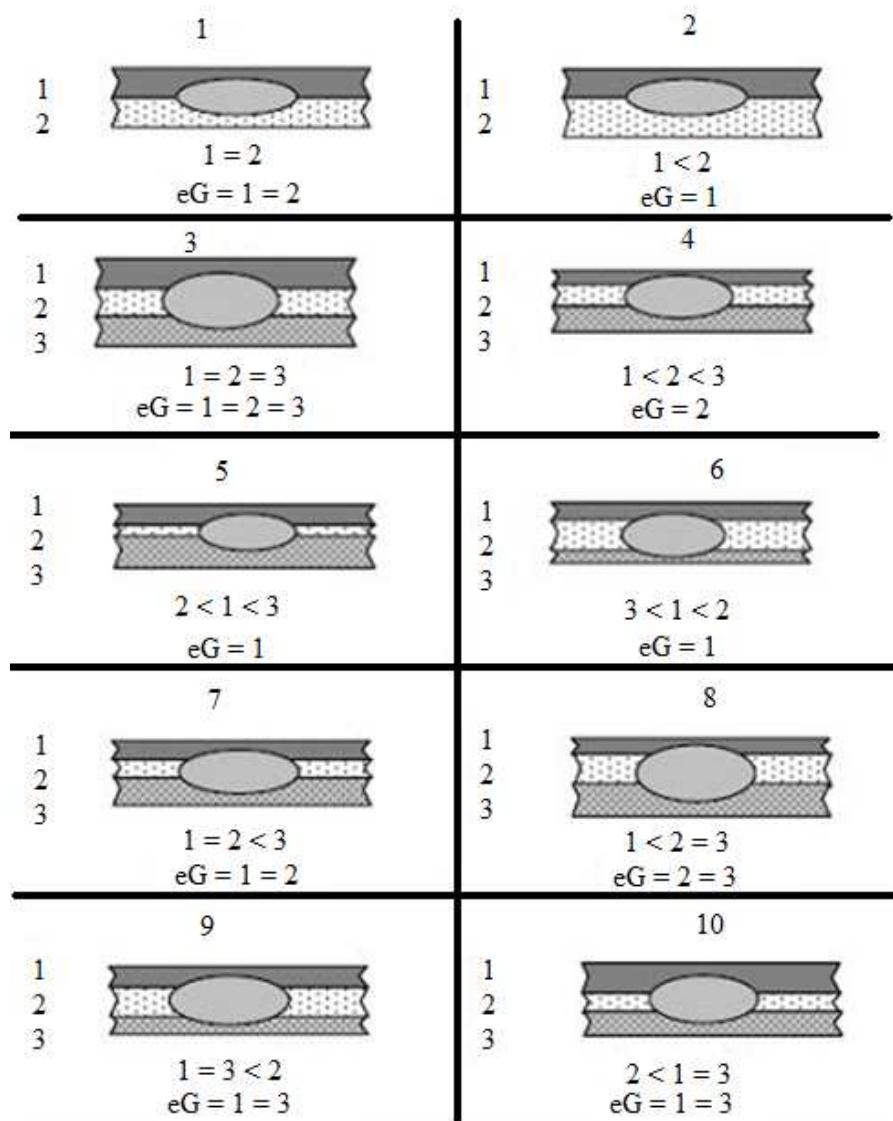


Figura 44 - Numeração dos “ n_{Ap} ” arranjos possíveis comumente utilizados em indústria automobilística (Mizioka, 2009, modificado)

10.2 Procedimento 2 – Configuração do digitalizador 3D

Como visto em 6.3, para a digitalização ser feita, deve-se posicionar o digitalizador em um local onde esteja protegido da operação da máquina de solda, evitando seu comprometimento físico devido a fagulhas de solda e minimizando acidentes. Os pontos ópticos colocados para marcar a peça não devem ser fixados sobre o eletrodo, pois devido ao aquecimento do eletrodo, esses pontos podem ficar comprometidos, a menos que seja feito em material resistente a tal processo. Deve-se posicionar de forma conveniente sobre locais o mais próximos possíveis do eletrodo, de forma aleatória, porém dentro da área de cobertura da câmera para uma resolução pré-definida, com um mínimo de 4 pontos não colineares e não coplanares.

O software do digitalizador oferece a possibilidade de comparação entre um modelo CAD como referência e modelo digitalizado. Fazendo mão do uso desta ferramenta, deve-se introduzir o modelo CAD do eletrodo novo que servirá de referência, digitalizar o eletrodo em início de vida útil, fazer a comparação com o real e receber o valor da primeira área de contato real deste eletrodo.

Para o ensaio em máquinas de solda manuais, é conveniente que se mantenha a máquina fixa quando em posição fora de operação. Na operação manual, após colocada nessa posição, deve-se aproximar o digitalizador do eletrodo superior à distância estabelecida para resolução desejada e então realizar a operação de digitalização. O mínimo de fotos tiradas para uma digitalização é estabelecida pelo fabricante para estar de acordo com a precisão indicada. As fotos são tiradas em posições diferentes, e a movimentação do digitalizador deve ser feita pelo operador. Após o processo de fotos, afasta-se o digitalizador e então a máquina de solda está liberada para continuar o processo.

Para o ensaio em robôs de solda o procedimento é o mesmo de uma máquina de solda manual. Há a possibilidade de automatização do processo de digitalização, sendo preferível que se posicione o digitalizador fora da baia de operação do robô, mas em posição que permita ao robô aproximar o eletrodo quando executar a instrução: parar soldagem, aproximar eletrodo do digitalizador, movimentar o braço proporcionando “n” posições diferentes em relação ao digitalizador para registrar uma foto para cada “n” posição.

10.3 Procedimento 3 – Configuração da máquina ou robô de solda para realizar a primeira soldagem

A configuração da máquina de solda deve ser feito para garantir o bom funcionamento e operação normal. Qualquer alteração verificada deve ser corrigida. Segue a ordem de verificações e regulagem da máquina:

- a) Verificar cabos de alimentação;
- b) Verificar mangueiras do sistema hidráulico invertidas, entupidas ou com baixa vazão, essas devem ser trocadas;
- c) Verificar sistema pneumático;
- d) Verificar pinça de solda, procurar por defeitos e deformações no prolongador e se os prolongadores sem os eletrodos encostam no outro com a pinça fechada;
- e) Verificar sistema de refrigeração, certificar que o tubo de refrigeração dentro do prolongador está no tamanho correto e firme;
- f) Verificar alinhamento dos eletrodos na pinça;
- g) Ajustar a força de pressão dos eletrodos;
- h) Verificar o controlador de solda. A leitura da saída da corrente elétrica deve ser a mesma que a aplicada pelo controlador. Caso verifique que há disparidade de valores, um escalonamento de corrente se vê necessário;
- i) Parametrização do controlador de solda, seguindo as tabelas de parametrização de acordo com a “ e_G ” e tipo de contato mais crítico da superfície de contato entre chapas. Seguir procedimento visto no capítulo 3.4.1.1, juntamente com a tabela correspondente. Em anexo seguem as tabelas para os seguintes revestimentos: Eletrogalvanizada, Galvaneal, Nua. (Mizioka, 2009).

10.4 Procedimento 4 – Elaboração do Lóbulo de soldabilidade

O conceito de lóbulo de solda tem sido usado por mais de 20 anos (Sanches Júnior, 2007). O lóbulo de solda é o que define as tolerâncias disponíveis para a produção de soldas de qualidade definida, sendo o limite superior definido geralmente em termos de expulsão do botão de solda. Para tanto, ele pode ser a curva de um gráfico bi ou tridimensional, indicando uma relação entre o tempo de solda, a corrente de solda e a força do eletrodo. São construídos a partir das curvas do crescimento da solda (semelhante à de desgaste do eletrodo) determinadas em diversos tempos de solda, conforme mostrado na Figura 45.

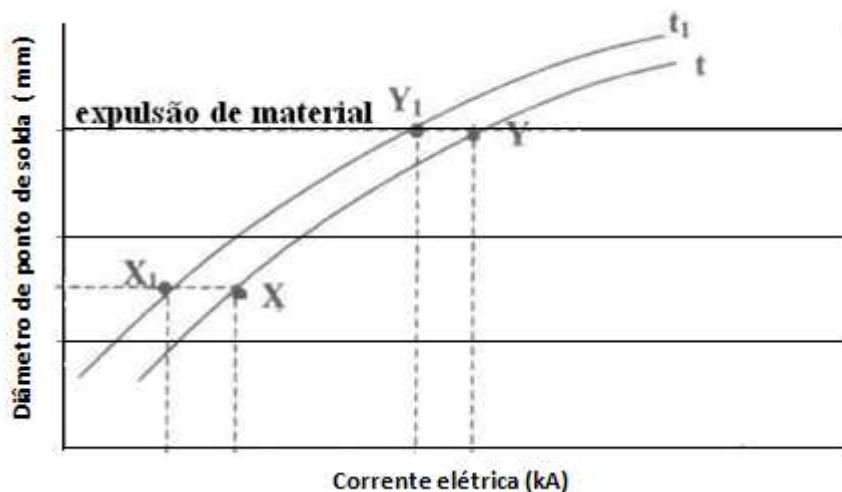


Figura 45 – Curva de crescimento da solda típica para um tempo fixo de solda (Williams & Parker, 2004; SANCHES JUNIOR, 2007, modificado)

Já o lóbulo de soldabilidade, à uma força de eletrodo constante, é normatizado. Para a determinação de lóbulos de soldabilidade bidimensionais, utilizou-se a norma ISO14273 (2001).

O lóbulo de soldabilidade é traçado determinando a região de solda aceitável, mais ampla que o lóbulo de solda, pois corresponde a uma região definida onde todas as soldas efetuadas sob parâmetros compreendidos nesse região são aceitáveis. É construída sob corrente de solda e tempo de solda variando à uma força de eletrodo constante como mostrado na Figura 46.

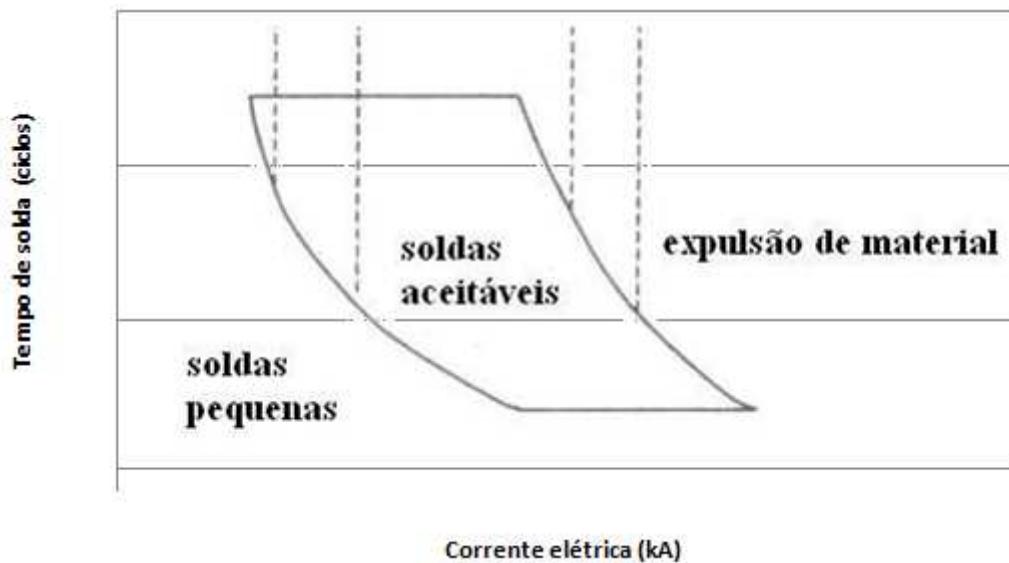


Figura 46 – Lóbulo de soldabilidade à uma força de eletrodo constante (ISO 14327, 2004; SANCHES JUNIOR, 2007, modificado)

O Lóbulo de soldabilidade é o primeiro passo para elaborar a curva de desgaste, pois define as condições para um determinado ciclo (tempo) de soldagem para um determinado conjunto de chapas.

10.4.1 Determinação das linhas de diâmetro mínimo e de limiar de fagulhas de solda

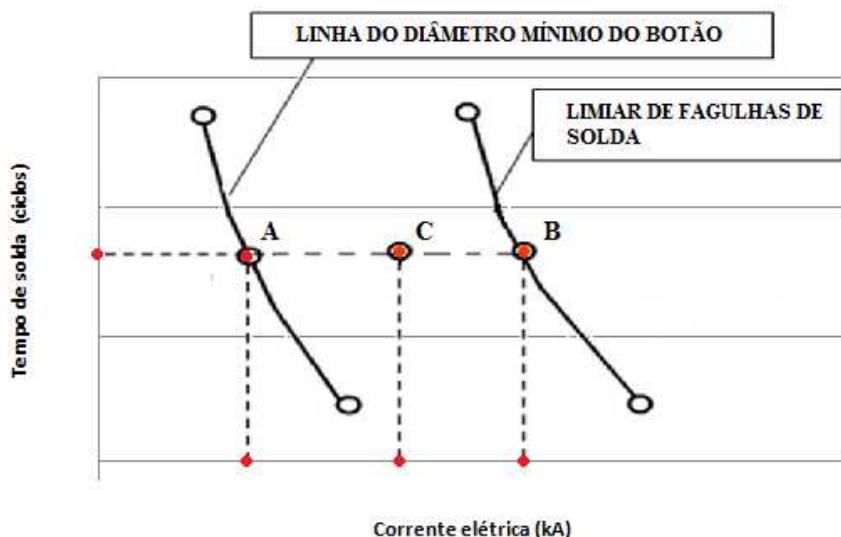


Figura 47 - Determinação de Lóbulo de soldabilidade e parâmetro de soldagem ideal para uma condição de eletrodo e arranjo de chapas definida (Mizioka, 2009, modificado)

Cada experimento terá seu próprio lóbulo de soldabilidade. Segue-se a orientação da tabela de parametrização referente a “ e_G ” e severidade da superfície de contato para a parametrização do primeiro ponto. Ele é a base para o início das modificações dos parâmetros, apenas alterando o tempo do ciclo para inferior ao valor indicado na tabela de parametrização até um certo valor que define o limite inferior.

Utiliza-se um eletrodo novo, efetua-se um ponto de solda no corpo de prova de verificação de qualidade e verifica-se a ocorrência de fagulhas de solda. Em caso negativo, mede-se o ponto de solda através do teste descrito em 4.2.1 e verifica-se se esse está dentro da especificação de qualidade descrita em 4.1. Se não estiver de acordo, temos um botão de solda pequeno, chamado de solda fria, caso contrário, temos uma solda aceitável. Mantendo-se fixo o ciclo, ajusta-se a corrente elétrica a fim de encontrar o valor limiar de diâmetro mínimo de botão (figura 47, ponto A) e valor limiar de fagulhas de solda (figura 47, ponto B). A eles da-se o nome de A1 e B1. Coleta-se, pelo método de digitalização 3D, o valor da área de contato do eletrodo antes de realizar a solda e transcreve-se os dados para a tabela 10. O valor de XX corresponde ao número de experimento “n_{Experimento}” e o valor do dígito X corresponde a repetição do experimento em um total de 5 experimentos. Com o valor da área de contato e da corrente elétrica utilizada em A1 e B1 e calculase o valor da Densidade de corrente elétrica. A densidade de corrente elétrica é definida como a quantidade de corrente elétrica passante pela área de contato dos eletrodos perpendicular às chapas dada em kVA/mm². Esse valor deve permanecer constante para os limiares de diâmetro mínimo de botão e de fagulhas de solda ao longo das medidas. Assim, defini-se A1 e B1.

A partir dos valores A1 e B1, calcula-se a média corrigida e encontra-se o valor de corrente elétrica de C1 e sua respectiva densidade de corrente. Após levantados os pontos A1, B1 e C1, deve-se alterar o valor do ciclo para mais e em intervalos constantes pré-definidos de acordo com os limites do programador de solda. Para cada valor aumentado de ciclo, realiza-se o mesmo procedimento de obtenção de A1, B1 e C1, mantendo o valor de densidade de corrente constante para os próximos pontos sendo repetido até que se tenha completado as tabelas com os valores de A10, B10 e C10.

Tabela 10 - Limiar de diâmetro mínimo de botão e valor de densidade de corrente

nExperimento XX-X		
Área do eletrodo antes da soldagem A1 (mm²)		
Densidade de corrente limiar A (kVA/mm²)		
Medida	Ciclos	I (kVA)
A1		
A2		
A3		
A4		
A5		
A6		
A7		
A8		
A9		
A10		

Tabela 11 - Limiar de fagulhas de solda e valor de densidade de corrente

nExperimento XX-X		
Área do eletrodo antes da soldagem B1 (mm²)		
Densidade de corrente limiar B (kVA/mm²)		
Medida	Ciclos	I (kVA)
B1		
B2		
B3		
B4		
B5		
B6		
B7		
B8		
B9		
B10		

Tabela 12 – Parâmetro de solda ideal e valor de densidade de corrente ideal

nExperimento XX-X		
Área do eletrodo antes da soldagem C1 (mm²)		
Densidade de corrente ideal C (kVA/mm²)		
Medida	Ciclos	I (kVA)
C1		
C2		
C3		
C4		
C5		
C6		
C7		
C8		
C9		
C10		

Por fim traçamos o Lóbulo de soldabilidade, com os valores das médias corrigidas de A, B e C, mostrado na figura 48. Os valores Ai, Bi e Ci, são os valores de operação ideal da máquina de solda.

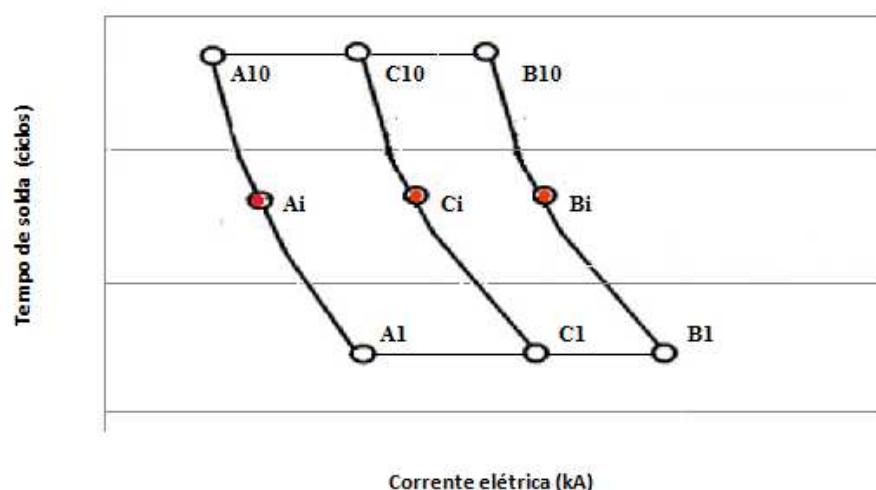


Figura 48 - Lóbulo de soldabilidade e parâmetro de soldagem ideal para uma condição de eletrodo e arranjo de chapas definida (Mizioka, 2009, modificado)

10.5 Procedimento 5 – Elaboração da curva de desgaste do eletrodo à densidade de corrente constante

Do valor de densidade de corrente C e utilizando o valor de ciclo ideal Ci, parte-se para a elaboração da curva de desgaste de eletrodo à densidade de corrente constante. O valor de corrente elétrica ideal de Ci é o valor inicial do ensaio de desgaste de eletrodo X1. Aqui a fase de desgaste do eletrodo é iniciada, onde esse é desgastado em intervalos de 50 pontos utilizando o corpo de prova de desgaste. Ao chegar em 50 pontos de solda efetuados, troca-se o para o corpo de prova de verificação de qualidade, mede-se a área de contato do eletrodo através do digitalizador 3D e com esse valor, calculam-se os valores de corrente de X2 para que se mantenha constante o valor de densidade de corrente de C. Esse procedimento é repetido até que se tenha completado as tabelas com o valor de corrente de C11, como mostrado na tabela 13, onde o valor de XX corresponde ao número de experimento “nExperimento” e o valor do dígito X corresponde a repetição do experimento, em um total de 5.

Tabela 13 – Valores ideais de Ciclo e valor de densidade de corrente ideal de soldagem, para a vida útil do eletrodo

nExperimento XX-X			
Área do eletrodo antes da soldagem X1 (mm²)			
Densidade de corrente ideal Ci (kVA/mm²)			
Ciclos			
Medida	I (kVA)	Número de pontos	D do ponto
X1		1	
X2		50	
X3		100	
X4		150	
X5		200	
X6		250	
X7		300	
X8		350	
X9		400	
X10		450	
X11		500	

Por fim traçamos a curva de desgaste do eletrodo (ou vida útil) à densidade de corrente constante, com os valores das médias corrigidas de X1 à X11, mostrado na figura 49.

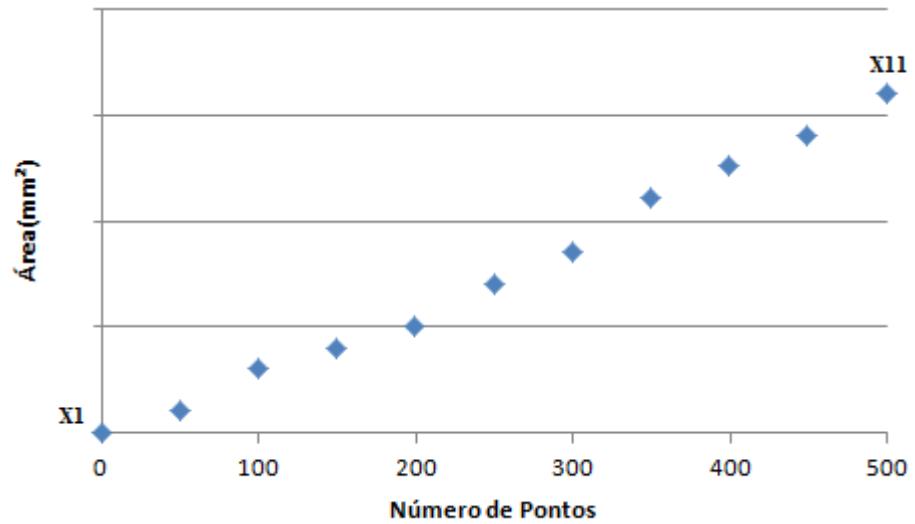


Figura 49 - Curva de desgaste (ou vida útil) do eletrodo à densidade de corrente constante

10.6 Procedimento 6 – Programação progressiva de corrente de soldagem à densidade de corrente constante

Dos valores encontrados na tabela 13 pode-se traçar a curva de corrente elétrica por número de pontos, para os pontos X1 à X11, que corresponde a programação progressiva de corrente de soldagem à densidade de corrente constante até o ponto X11, onde ocorre o fresamento do eletrodo (figura 50).

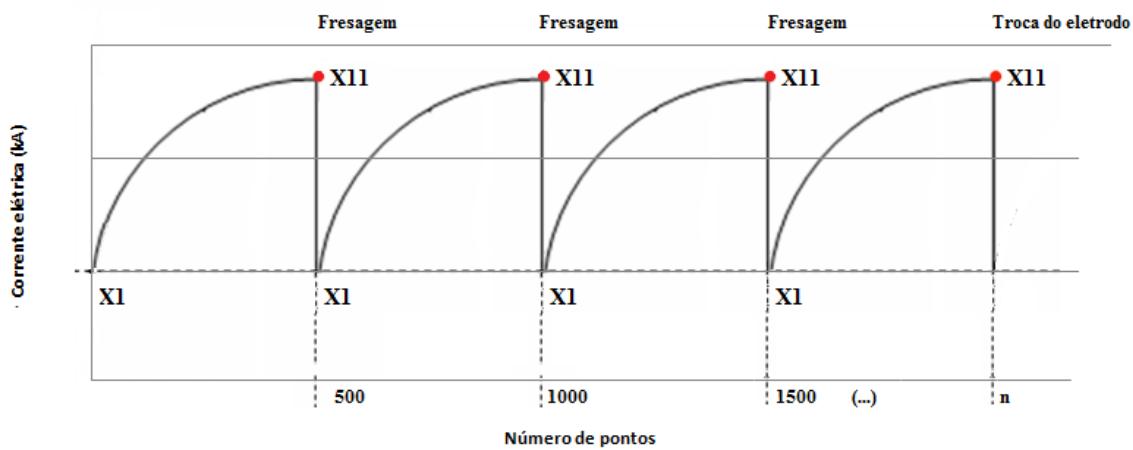


Figura 50. Programação progressiva de corrente de soldagem à densidade de corrente constante, indicando os pontos de fresagem de eletrodos e sua troca com n número de pontos efetuados, variando de eletrodo para eletrodo conforme seu desgaste e fresagens (Mizioka, 2009, modificado)

11. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Ao término do desenvolvimento deste trabalho, observa-se que os resultados obtidos, possuem características condizentes com o que consta em literatura. A partir da figura 39 e figura 43, foi confirmada a condição de diminuição de densidade de corrente, no decorrer do processo de soldagem, devido ao desgaste natural do eletrodo. Há um aumento de área de contato entre o eletrodo e a chapa em decorrência disso. As curvas de programação progressiva de corrente de soldagem para controladores de solda corrigem este tipo de problema, variando a corrente elétrica. Numa situação sem controle de controle progressivo de corrente de soldagem, há um decaimento mais acentuado da densidade de corrente ao longo do processo. Em ambas situações, aumenta-se a corrente a fim de manter-se constante a densidade de corrente ao longo do processo.

Com a introdução dessa ferramenta, buscou-se aprimorar um processo já existente e amplamente difundido, o de elaboração de lóbulo de soldabilidade e programação progressiva de corrente de soldagem, para processos de solda ponto por resistência elétrica, sob outro foco.

12. CONCLUSÕES

Com a ferramenta de digitalização 3D, torna-se possível medir a área de contato do eletrodo com a chapa, sem a necessidade de contato físico com o eletrodo com rapidez e precisão já comprovadas pela indústria automobilística.

Com o processo mais estável, uniforme e com parametrizações aprimoradas o aumento da média mensal de pontos de solda feitos por eletrodo gasto, e uma redução do consumo de eletrodo por unidade de veículo produzido, é esperado.

Esse protocolo elaborado fornece mais dados para aprimoramento de curvas de compensação de corrente e vida útil de eletrodos de solda ponto por resistência elétrica.

Essa aplicação visa refinar as curvas de programação progressiva de corrente de soldagem para realização de soldas à uma densidade de corrente constante durante todo o processo.

Neste trabalho foi apresentada uma visão não convencional para a utilização de um digitalizador 3D. Amplia-se a visão atual sobre o uso de digitalizadores 3D, sua aplicação dentro e fora da indústria automobilística, bem como em outros processos produtivos.

13. TRABALHOS FUTUROS

Não foi possível proceder com os experimentos indicados no protocolo de medição e monitoramento aqui elaborado. Em decorrência dele, assegura-se que este pode ser utilizado em trabalhos futuros em uma situação real de planta automobilística, mas sua viabilidade deve ser estudada.

A esse trabalho futuro, sugere-se calcular a média mensal de pontos efetuados por eletrodo gasto e o consumo de eletrodos por unidade de veículo produzido, por meio do protocolo desenvolvido nesse trabalho. Devendo compará-los com os valores do processo convencional, para então comprovar o ganho da utilização deste protocolo. Pode-se estudar a utilização do digitalizador 3D na monitoração de conformidade de dimensões no pós-fresamento do eletrodo, com intuído de evitar problemas como descritos no capítulo 5.6.2.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGASHE, S. & ZHANG, H. Selection of Schedules Based on Heat Balance in Resistance Spot Welding. *Welding Journal*, p. 179 S – 183S, Jul., 2003.

ARGUEDAS, J. P. The development of a methodology for optimal joining techniques selection in the automotive body in white development process, School of Industrial and Manufacturing Science, Msc Thesis, Cranfield University, UK, 2006.

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

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

BRACARENSE, A. Q. Processo de soldagem por resistência – Apostila Pós-Graduação Engenharia Mecânica Universidade Federal de Minas Gerais Escola de Engenharia 2000.

BRANCO, H. L. O. avaliação de capas de eletrodos utilizadas na soldagem por resistência de chapas galvanizadas automotivas, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

<http://capture3d.com/knowledge-column.html>. 3D industrial measurement solutions, acessada em 11/2009.

CASTLEMAN, R. Digital Image Processing, Prentice Hall, 1995.

CEN Standard pr-EN/ISO. Resistance welding: Part I: Assesment of the weldability for spot, seam and projection welding of metallic material; Part II: Alternative procedures for the assesment of steel sheet for spot welding, 18278(E): 2002, Brussels, 2002.

CRAGGS, J. Nippert Presentation, 2002 (CD-ROM).

CULLEN, J.D. Multisensor fusion for on line monitoring of the quality, doi:10.1016/j.measurement.2007.01.006, Measurement, 2007.

DAMOULIS, G. L. & GOMES, E. & BATALHA, G. F. New trends in sheet metal forming analysis and optimization through the use of optical measurement technology to control springback. *International Journal of Material Forming*, p. 1-10, 2009.

DIN 1910-2, Welding; Welding of Metals, Processes, Beuth Verlag GmbH, 1997.

DIN 1910-5, Welding; welding of metals; resistance welding; classification of processes, Beuth Verlag GmbH, 1997.

FURLANETTO V. & STOCCO D. & MOTOMURA G. M. & BATALHA G. F.
 Modelling and control of ersw processes by neuronal network, The Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 34, Number 1C, 2009.

HOU W. & HU S. J. & TANG H. Forging force in resistance spot welding – Proc Instn Mech Engrs Vol 216 Part B: J Engineering Manufacture (B10101 © IMechE 2002)

IMPORTSOLDA. Solda por resistência, apostila da empresa, (2004).

ISO 14327. Resistance welding - Procedures for determining the weldability lobe for resistance spot, projection and seam welding, 2004.

INTERMACHINERY. Comércio Ltda. I Seminário de Solda a Ponto. São Paulo (2003) CD-ROM.

JOINING T. Resistance Spot Welding Electrode Wear on Galvannealed Steels. Sept., 1997.

KALPAKJIAN, S. Manufacturing Engineering and Technology, 4th edition, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA. 2001.

KAVAMURA, H. A. Aplicação de solda laser em carrocerias automotivas: estudo comparativo entre a solda laser e a solda ponto por resistência, TFC do Mestrado profissionalizante em engenharia automotiva Escola Politécnica da USP, 2007.

MAINIER, F. B. & SANTOS, F. B. Variáveis Relevantes para a Qualidade do Processo de Soldagem de Pontos por Resistência Elétrica Utilizado na Indústria Automobilística, III SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, Rezende, 2006.

MAREK, U. & PÖLL, K. Resistance Spot Welding of High Strength Steels With Servo Guns and Adaptive Weld Process Control - Fügen im Automobilbau, Alemanha, (24./25. April, Bad Nauheim), 2008.

MIZIOKA, C. Validação de solda a ponto por resistência, Atividades na GMB planta de São Caetano do Sul, outubro, 2009.

MOTOMURA, G. M. Emprego de Técnicas de Inteligência Artificial na Modelagem e Controle do Processo Solda a Ponto por Resistência, Trabalho de Formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

NAVE, C. R. HyperPhysics, Georgia State University, EUA, 2005.

POWELL, H. J. & WESTGATE, S. A. & WIEMER, K. A practical guide to process and quality control for resistance spot welding. The Welding Institute, Report nº 569/1996, August, 1996.

RASHID, M. H. Power Electronics Circuits, Devices, and Applications, Prentice-Hall, Inc, 1993

REU, Grundlagen der Widerstandsschweißtechnik ,Recycling Entwicklungs Unternehmen, Schweißtechnik GmbH, 1997.

ROBERT BOSCH GmbH. Bos-5010 Instruções de Operação e Programação, 1998.

RUIZ, D. C. Contribuição ao desenvolvimento de processos de montagem e soldagem de carrocerias automotivas – Mestrado profissionalizante em engenharia automotiva Escola Politécnica da USP, 2005.

RUIZ, D. C. & BATALHA, G. F. Estudo de um critério de modo de falha para solda a ponto por resistência. In: Corte e Conformação, v.2, n. 13, 124-136. (2006).

RWMA. Resistance Welders Manufacturers. Association, 1989, 4th ed.

RYPL, D. & BITTNAR, Z. Triangulation of 3D Surfaces Described by Stereolithography Files, Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague, Czech Republic, 2005.

SANCHES JUNIOR, L. M. Estabilidade dimensional de carrocerias automotivas através de pré-controle aplicado no processo de junção de subconjuntos, Mestrado profissionalizante em engenharia automotiva Escola Politécnica da USP, 2007.

SERWAY, R. A. Principles of Physics. 2nd ed., ed. Fort Worth, Texas; London, 1998.

SCHARFF, R. & CARUSO, D. Complete Automotive Welding Metals and Plastic, Delmar Publishers Inc., 1990.

TECNOWELDING. Comércio Ltda. Fundamentos do Processo de Soldagem a Resistência, 2004.

VARGAS, J. E. A. Estudo da formação, geometria e resistência do ponto na soldagem por resistência: uma abordagem estatística, Dissertação de mestrado em sistemas Mecatrônicos departamento de Engenharia mecânica da faculdade de Tecnologia Da universidade de Brasília, 2006.

WAINER, E. & BRANDI, S. D. & de MELLO, F. D. H. Soldagem, processos e metalurgia. (ed) Editora Edgard Blucher Ltda., 1992.

WOOLF, P. Design of Experiments: Taguchi Methods, Open Textbook Michigan Chemical Process Dynamics and Controls, University of Michigan, EUA, 2007.

ZHOU, M. & ZHANG, H. & HU, S. J. Relationships between quality and attributes of spot welds. welding journal, p. 72s – 77s, april, 2003.

ANEXOS

Anexo A – Tabela de nível de severidade da superfície de contato.

FSC	Descrição	Nível de severidade
BB	Nua x Nua	1
BN	Nua x Galvaneal	2
BG	Nua x Eletrogalvanizada	3
NN	Galvaneal x Galvaneal	4
NG	Galvaneal x Eletrogalvanizada	5
GG	Eletrogalvanizada x Eletrogalvanizada	6

(Mizioka, 2009, Traduzida)

Anexo B – Tabela de superfície de contato BB (Nua x Nua).

GMT Range (mm)	Weld Force (lbs.)		Total Weld Time (cycles)	Pulse 1 Weld Time (cycles)	Cool Time (cycles)	Number of Pulses	Weld Current (kA)		Hold Time (cycles)
	Mild Steel	HSLA Steel					Mild Steel	HSLA Steel	
0.65 - 0.77	480	480	9	9	-	1	8.0	8.0	2
0.78 - 1.02	480	670	9	9	-	1	8.0	8.5	2
1.03 - 1.23	670	670	10	10	-	1	8.5	8.5	2
1.24 - 1.44	670	950	10	10	-	1	8.5	9.0	2
1.45 - 1.64	950	950	12	12	-	1	9.0	9.0	2
1.65 - 1.84	950	1200	14	7	1	2	10.0	10.5	5
1.85 - 2.09	1200	1200	18	6	1	3	10.5	10.5	5
2.10 - 2.45	1200	1660	21	7	1	3	11.0	11.5	5
2.46 - 2.69	1660	1660	24	8	2	3	11.5	11.5	10
2.70 - 3.07	1660	1900	24	8	2	3	12.0	12.5	10
3.08 - 3.50	1900	1900	28	7	2	4	12.5	12.5	10

(Mizioka, 2009)

Anexo C – Tabela de superfície de contato BN (Nua x Galvaneal).

GMT Range (mm)	Weld Force (lbs.)		Total Weld Time (cycles)	Pulse 1 Weld Time (cycles)	Cool Time (cycles)	Number of Pulses	Weld Current (kA)		Hold Time (cycles)
	Mild Steel	HSLA Steel					Mild Steel	HSLA Steel	
0.65 - 0.77	480	480	10	10	-	1	8.5	8.5	2
0.78 - 1.02	480	670	10	10	-	1	8.5	9.0	2
1.03 - 1.23	670	670	12	12	-	1	9.0	9.0	2
1.24 - 1.44	670	950	12	12	-	1	9.0	9.5	2
1.45 - 1.64	950	950	14	7	1	2	9.5	9.5	2
1.65 - 1.84	950	1200	18	6	1	3	10.0	10.5	5
1.85 - 2.09	1200	1200	21	7	1	3	10.5	10.5	5
2.10 - 2.45	1200	1660	24	6	1	4	11.0	11.5	5
2.46 - 2.69	1660	1660	28	7	2	4	11.5	11.5	10
2.70 - 3.07	1660	1900	28	7	2	4	12.0	12.5	10
3.08 - 3.50	1900	1900	32	8	2	4	12.5	12.5	10

(Mizioka, 2009)

Anexo D – Tabela de superfície de contato BG (Nua x Eletrogalvanizada).

GMT Range (mm)	Weld Force (lbs.)		Total Weld Time (cycles)	Pulse 1 Weld Time (cycles)	Cool Time (cycles)	Number of Pulses	Weld Current (kA)		Hold Time (cycles)
	Mild Steel	HSLA Steel					Mild Steel	HSLA Steel	
0.65 - 0.77	480	480	10	10	-	1	9.0	9.0	2
0.78 - 1.02	480	670	10	10	-	1	9.0	9.5	2
1.03 - 1.23	670	670	12	12	-	1	9.5	9.5	2
1.24 - 1.44	670	950	12	12	-	1	9.5	10.0	2
1.45 - 1.64	950	950	14	7	1	2	10.0	10.0	2
1.65 - 1.84	950	1200	18	6	1	3	10.5	11.0	5
1.85 - 2.09	1200	1200	21	7	1	3	11.0	11.0	5
2.10 - 2.45	1200	1660	24	6	1	4	11.5	12.0	5
2.46 - 2.69	1660	1660	28	7	2	4	12.0	12.0	10
2.70 - 3.07	1660	1900	28	7	2	4	12.5	13.0	10
3.08 - 3.50	1900	1900	32	8	2	4	13.0	13.0	10

(Mizioka, 2009)

Anexo E – Tabela de superfície de contato NN (Galvaneal x Galvaneal).

GMT Range (mm)	Weld Force (lbs.)		Total Weld Time (cycles)	Pulse 1 Weld Time (cycles)	Cool Time (cycles)	Number of Pulses	Weld Current (kA)		Hold Time (cycles)
	Mild Steel	HSLA Steel					Mild Steel	HSLA Steel	
0.70 - 0.77	480	480	14	14	-	1	9.0	9.0	2
0.78 - 1.02	480	670	14	14	-	1	9.0	9.5	2
1.03 - 1.23	670	670	16	16	-	1	9.5	9.5	2
1.24 - 1.44	670	950	16	16	-	1	9.5	10.0	2
1.45 - 1.64	950	950	21	7	1	3	10.0	10.0	5
1.65 - 1.84	950	1200	24	8	2	3	10.5	11.0	5
1.85 - 2.09	1200	1200	28	7	2	4	11.0	11.0	5
2.10 - 2.45	1200	1660	32	8	2	4	11.5	12.0	5
2.46 - 2.69	1660	1660	35	7	2	5	12.0	12.0	10
2.70 - 3.07	1660	1900	35	7	2	5	12.5	13.0	10
3.08 - 3.50	1900	1900	40	8	2	5	13.0	13.0	10

(Mizioka, 2009)

Anexo F – Tabela de superfície de contato NG (Galvaneal x Eletrogalvanizada).

GMT Range (mm)	Weld Force (lbs.)		Total Weld Time (cycles)	Pulse 1 Weld Time (cycles)	Cool Time (cycles)	Number of Pulses	Weld Current (kA)		Hold Time (cycles)
	Mild Steel	HSLA Steel					Mild Steel	HSLA Steel	
0.70 - 0.77	480	480	14	14	-	1	9.5	9.5	2
0.78 - 1.02	480	670	14	14	-	1	9.5	10.0	2
1.03 - 1.23	670	670	16	16	-	1	10.0	10.0	2
1.24 - 1.44	670	950	16	16	-	1	10.0	10.5	2
1.45 - 1.64	950	950	21	7	1	3	10.5	10.5	5
1.65 - 1.84	950	1200	24	8	2	3	11.0	11.5	5
1.85 - 2.09	1200	1200	28	7	2	4	11.5	11.5	5
2.10 - 2.45	1200	1660	32	8	2	4	12.0	12.5	5
2.46 - 2.69	1660	1660	35	7	2	5	12.5	12.5	10
2.70 - 3.07	1660	1900	35	7	2	5	13.0	13.5	10
3.08 - 3.50	1900	1900	40	8	2	5	13.5	13.5	10

(Mizioka, 2009)

Anexo G – Tabela de superfície de contato GG (Eletrogalvanizada x Eletrogalvanizada).

GMT Range (mm)	Weld Force (lbs.)		Total Weld Time (cycles)	Pulse 1 Weld Time (cycles)	Cool Time (cycles)	Number of Pulses	Weld Current (kA)		Hold Time (cycles)
	Mild Steel	HSLA Steel					Mild Steel	HSLA Steel	
0.70 – 0.77	480	480	14	14	-	1	10.0	10.0	2
0.78 – 1.02	480	670	14	14	-	1	10.0	10.5	2
1.03 – 1.23	670	670	16	16	-	1	10.5	10.5	2
1.24 – 1.44	670	950	16	16	-	1	10.5	11.0	2
1.45 – 1.64	950	950	21	7	1	3	11.0	11.0	5
1.65 – 1.84	950	1200	24	8	2	3	11.5	12.0	5
1.85 – 2.09	1200	1200	28	7	2	4	12.0	12.0	5
2.10 – 2.45	1200	1660	32	8	2	4	12.5	13.0	5
2.46 – 2.69	1660	1660	35	7	2	5	13.0	13.0	10
2.70 – 3.07	1660	1900	35	7	2	5	13.5	14.0	10
3.08 – 3.50	1900	1900	40	8	2	5	14.0	14.0	10

(Mizioka, 2009)