

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

IVAN OLSZANSKI PIGOZZO

RESTAURAÇÃO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM
EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA

FLORIANÓPOLIS

2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

IVAN OLSZANSKI PIGOZZO

RESTAURAÇÃO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM
EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA

**Trabalho de Graduação apresentado ao
Curso de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.**

Orientador: Raul Gohr Jr. Dr. Eng.
Co-orientador: Régis Henrique Gonçalves e Silva

FLORIANÓPOLIS

2011

IVAN OLSZANSKI PIGOZZO

RESTAURAÇÃO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM
EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA

Este Trabalho de Graduação foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Mecânico e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Professor Lauro Cesar Nicolazzi
Coordenador do Curso

Dylton do Vale Pereira Filho, M. Sc.
Professor disciplina

Comissão Examinadora:

Raul Gohr Junior, Dr. Eng.
Orientador

Jair Carlos Dutra, Prof. Dr. Eng.
Membro

Dylton do Vale Pereira Filho, M. Sc.
Membro

Ficha Catalográfica

Pigozzo, Ivan Olszanski, 1989 –
Restauração e validação experimental de um equipamento de soldagem a ponto por resistência, Ivan Olszanski Pigozzo - 2011.
85 f. : il. color.; 30cm.

Orientador: Raul Gorh Junior, Dr. Eng.

Co-Orientador: Regis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Engenharia Mecânica, 2011.

1. Solda a ponto 2. Soldagem por resistência 3. Lente de Solda
I. Raul Gorh Jr. II. Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Engenharia Mecânica, III. Restauração e validação experimental de um equipamento de soldagem a ponto por resistência

Ao meu irmão Victor, que durante toda a graduação esteve sempre presente. Mais que um irmão, amigo e companheiro. Valeu Vital!

Agradecimentos

Ao Labsolda, pela experiência de aprendizado durante a graduação, além de oportunidade de desenvolver este trabalho.

Ao orientador Raul Gorh Junior, e ao co-orientador Regis Henrique Gonçalves e Silva, pelo apoio e orientação no desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Dr. Eng. Jair Carlos Dutra, pelo apoio, críticas, ensinamentos e além de tudo, insistência nos trabalhos realizados.

À Marcia Paula Thiel, secretária e companheira de trabalho do Labsolda, por sua dedicação e paciência.

A toda equipe do Labsolda, pela convivência e favores trocados durante os trabalhos realizados no laboratório, além das divertidas horas de churrascos e futebol.

Aos meu pai e mãe Victor e Sonia, pelo carinho e incentivo em todas as etapas de minha vida.

Ao meu irmão Hugo, pela parceria e companheirismo nas viagens, pedaladas e experiências vividas juntos.

A Juliana Okawati, pelo carinho, compreensão e incentivo durante o trabalho e graduação.

Aos amigos e colegas de curso, em especial Nilo Lopes, Murilo Boseli, Cristian Zwirtes, Guilherme Lopes, Afonso Rauh, Luis Alexandre Calado (Bisteca) e Mariano Villafañe, pessoas ao qual sem elas não teria chegado até aqui.

Muito obrigado a todos.

Resumo

O processo de soldagem por resistência, em especial soldagem a ponto, é um processo bastante presente em diversos setores da indústria. Em setores tais como automotivo e utensílios culinários, este processo é fundamental, por exemplo, um carro pode apresentar até 5000 (cinco mil) pontos de solda. Em cima desta tecnologia, muitas pesquisas são realizadas, principalmente na área de simulação e desenvolvimento de eletrodos. Assim sendo, este trabalho apresenta uma oportunidade ao Labsolda, bem como ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC (EMC), em iniciar uma nova linha de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento), uma vez que, atualmente, nenhuma pesquisa é desenvolvida nesta área. Foi feita a restauração de um equipamento de soldagem por resistência que se encontrava em inatividade desde meados dos anos noventa. Serão apresentadas as modificações feitas no equipamento, tanto de manutenção quanto melhorias, além de uma validação experimental do mesmo. Os experimentos têm como objetivo efetivar a aplicação do equipamento para pesquisas futuras. Este trabalho engloba diversas áreas de engenharia, tais como usinagem, pneumática, elétrica, projetos, refrigeração e soldagem, uma vez que novos eletrodos foram projetados e usinados; o sistema pneumático passou por manutenção e aprimoramento; uma nova fonte de potência foi instalada; um sistema de refrigeração foi integrado a máquina, além de outras atividades.

Palavras chave: 1. Soldagem a ponto; 2. Soldagem por resistência elétrica; 3. Equipamento de solda a ponto.

Abstract

The resistance welding process, specially the spot welding, is a process which has been used in many sectors of industries. Sector as automotive and culinary, this process is primordial, for example, a car can show almost five thousand spot welds. Many developments and researches are made over this process, principally at simulations such as electrode geometry developments. At this way, this study shows an opportunity to Labsolda, such as to the Mechanical Engineer Department of UFSC (EMC), to provide a new R&D (Research and Development), once currently, none researched is done at this area. It was made a restoration over a resistance welding equipment, which was in inactivity since mid-nineties. It will be shown modifications made over the equipment such as optimization, besides an experimental validation. The experimentation has as objective to effect the application of this equipment in future researches. This study involves many sectors of engineering such as milling, pneumatic, electric, refrigeration, projects and welding, once new electrodes were developed; the pneumatic system were restored; a new power source was installed, the refrigeration system was integrated to the equipment, besides other activities.

Keywords: 1. Spot Welding; 2. Resistance Welding; 3. Resistance spot welding equipment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema tempo de um ciclo simples de soldagem a ponto.	20
Figura 2 - Gráficos de resistência e temperatura de acordo com a localização no circuito diagramado [Welding Handbook, 1991 modificado].	21
Figura 3 - Circuito típico de máquinas monofásicas [Welding Handbook, 1991, modificado].	25
Figura 4 – Esquema de uma máquina de solda a ponto por resistência [Heureux & Belotte, 1968, modificado].	26
Figura 5 - Típicas geometria de eletrodo para solda ponto - RWMA.	28
Figura 6 – Vista de corte de um eletrodo genérico - Geometria.	29
Figura 7 - Gráficos Densidade de Corrente x Distância do centro da face e Razão de Corrente x Ângulo de cone [Bowers <i>et al.</i> 1990]	30
Figura 8 – Geometria <i>Pimple</i> (___) e <i>Pimple</i> Modificado (___).	30
Figura 9 – Esquema de refrigeração do eletrodo [Aures, 2006].	33
Figura 10 – Geometria do ponto de solda: (h) indentação, (t) penetração da lente, (d) diâmetro da lente, (Dhaz) ZTA, (x) <i>gap</i> entre as peças. [Manual Ruukki, 2009].	34
Figura 11 – Gráficos Resistência de contato x Força e Relação entre Força de soldagem (F), espessura de chapa e diâmetro do eletrodo (D) para chapas de aço baixo carbono. [Machado, 1996].	37
Figura 12 – Ciclos de soldagem a ponto por resistência [ASM, 1971].	38
Figura 13 - Curva de Soldabilidade genérica para: A - Material não revenido; B - Material Zincado com revestimento leve; C - Material zincado com revestimento pesado.	41
Figura 14 - Curva de soldabilidade otimizada. [Ruukki Manual, 2009].	42
Figura 15 - Representação do Efeito <i>Shunt</i> [Vargas, 2006, modificado]	43
Figura 16 - Controlador SCR para máquinas monofásicas [AWS, 1991].	46
Figura 17 - Relação entre corrente rms e angulo de atraso [AWS, 1991].	47
Figura 18 - Antigo controle eletrônico (Ignitrons).	48
Figura 19 - Máquina de Solda Ponto da <i>ARO Spot Welding</i>	49
Figura 20 - Desenho esquemático do Cilindro.	50
Figura 21 – Válvula direcional	51
Figura 22 - Diafragma.	51
Figura 23 - Válvula montada com peça em nylon nova.	52

Figura 24 - Filtro Regulador de ar [Morbach.com.br modificado]	52
Figura 25 - Gráfico pressão x Força do pistão.....	53
Figura 26 - Esquema braço de alavanca do sistema	54
Figura 27 - Gráfico Força dos eletrodos x Pressão do sistema.....	55
Figura 28 - Circuito Pneumático do equipamento.....	55
Figura 29 – Fonte e Interface de controle.....	57
Figura 30 - Aquisição da corrente com diferentes razões de corte e tempos de soldagem.	57
Figura 31 – Dispositivo de Disparo.....	59
Figura 32 - Eletrodos usinados em liga de CuCrZr.....	61
Figura 33 - Bancada de ensaios.....	61
Figura 34 - Gráfico Corrente eficaz (I_e) x Razão de corte (A_i).	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos Materiais - RWMA.....	32
Tabela 2 - Propriedades da Liga RWMA classe 2 - CuCrZr.....	60
Tabela 3 - Propriedades da liga ASTM A36.	62
Tabela 4 - Parametrização dos ensaios.....	63
Tabela 5 - Parâmetros dos ensaios A.....	64
Tabela 6 - Parâmetros dos ensaios B.....	64
Tabela 7 - Parâmetros dos ensaios C.....	65

LISTA DE SIMBOLOS E NOTAÇÕES

A	Ampere
Ae	Área dos êmbolos (mm ²)
Ai	<i>i-ésima</i> razão de corte (%)
a	Coefficiente média de variação da resistividade
D	Densidade de Corrente (A/mm ²)
d	Diâmetro da lente de solda (mm)
d _f	Diâmetro de face do eletrodo (mm)
Dh	Diâmetro da haste (mm)
Dc	Diâmetro do cilindro (mm)
D _{haz}	diâmetro da zona termicamente afetada (mm)
e	Espessura de chapa (mm)
E	Rugosidade média
F _e	Força dos eletrodos (força de soldagem) (N)
F _p	Força do pistão (N)
GPa	Gigapascal
H ₀	Dureza Brinell
h	Indentação (%)
Hz	hertz
I	Corrente (A)
I _e	Corrente eficaz (A)
J	Joule
kN	Quilonewton
l	Litro
m	Metro
min	Minuto

mm	Milímetros
MPa	Megapascal
Q	Energia calorífica (J)
R	Resistência (Ω)
R _C	Resistência de Contato (Ω)
s	Segundo
T ₀	Temperatura ambiente (K)
t	Penetração da lente (mm)
t	tempo
t _i	<i>i-ésimo</i> tempo de soldagem
T _s	Temperatura de amolecimento (K)
x	<i>Gap</i> entre chapas (mm)
Ω	Ohm
ρ	Resistividade elétrica
ρ_0	Resistividade elétrica a temperatura ambiente
°C	Grau Célsius
θ	ângulo do eletrodo

Sumário

1. Introdução.....	16
1.1. Objetivos.....	17
1.2. Justificativa.....	17
2. Revisão Bibliográfica.....	18
2.1. Soldagem por resistência elétrica - Histórico.....	18
2.2. Processo de soldagem a ponto por Resistência.....	19
2.3. Resistências Elétricas e Geração de Calor.....	21
2.4. Equipamento de solda a ponto por resistência.....	24
2.4.1. Circuito elétrico.....	24
2.4.2. Controle.....	25
2.4.3. Sistema mecânico.....	25
2.5. Eletrodos.....	26
2.5.1. Geometria dos eletrodos.....	27
2.5.2. Materiais dos eletrodos.....	31
2.5.3. Refrigeração dos Eletrodos.....	32
2.6. Lente de solda.....	33
2.7. Parâmetros do processo.....	35
2.7.1. Corrente de Soldagem.....	35
2.7.2. Força dos Eletrodos.....	36
2.7.3. Tempo de Soldagem.....	37
2.7.3.1. Tempo de compressão.....	38
2.7.3.2. Tempo de soldagem.....	39
2.7.3.3. Tempo de subida (<i>upslope</i>).....	39
2.7.3.4. Tempo de descida (<i>downslope</i>).....	39
2.7.3.6. Tempos Adicionais.....	40
2.7.4. Soldabilidade e relações entre os parâmetros.....	40
2.8. Possíveis problemas de operação do processo.....	42
2.8.1. Efeito <i>Shunt</i>	42
2.8.2. Desalinhamento dos Eletrodos.....	43
2.8.3. Indentação.....	44
2.8.4. Outros problemas encontrados.....	44
2.9. Controle de qualidade em processos de solda a ponto por resistência.....	44

3. Sistemas Pneumáticos	45
4. Controladores SCR – Tiristores.....	46
5. Metodologia, Materiais e Validação	47
5.1. Equipamento de solda a ponto	47
5.1.1. Sistema Pneumático.....	49
5.1.2. Fonte de soldagem.....	56
5.1.3. Disparo	58
5.1.4. Eletrodos e refrigeração.....	59
5.2. Validação do equipamento.....	61
5.2.1. Corpos de Prova	62
5.2.2. Ensaios experimentais	62
5.2.3. Resultados e discussões	65
5.2.3.1. Ensaios	65
5.2.3.2. Dificuldades encontradas	67
6. Considerações finais.....	69
7. Propostas e recomendações para trabalhos futuros	71
REFERÊNCIAS	72
APÊNDICES.....	74
APÊNDICE A – Desenho técnico do eletrodo de geometria <i>Pimple</i>	74
APÊNDICE B – Desenho técnico do eletrodo de geometria cônica.	76
APÊNDICE C – Resultados dos ensaios (Planilha <i>Microsoft Excel</i>).....	78
APÊNDICE D – Macrografias das amostras embutidas	80
APÊNDICE E– Oscilogramas dos ensaios apresentados	83

1. Introdução

O processo de soldagem a ponto por resistência (*RSW – Resistance Spot Welding*), ou simplesmente solda a ponto, embora tenha sido um dos primeiros processos de soldagem a existir, atualmente ainda se mantém entre os processos mais utilizados na indústria. Não se pode imaginar alguns segmentos tais como automotivo e utensílios culinários sem esta tecnologia.

Embora muitas tecnologias de união são desenvolvidas, por exemplo, união por adesivos, solda laser entre outras, a soldagem por resistência ainda é predominante nestes ramos. O que torna essa tecnologia largamente utilizada é sua simplicidade e eficácia. Não exige aparatos complexos nem gases para proteção, além de não haver necessidade de material de adição.

Este procedimento também não apresenta limitação quanto ao material a ser soldado. Podem ser soldados quase todos os tipos de metais, incluindo metais revestidos. Vale ressaltar que chapas de diferentes espessuras podem ser unidas com diferentes arranjos de eletrodos.

O ramo de pesquisa em soldagem por resistência, embora apresente uma literatura antiga, ainda tem grande desenvolvimento, principalmente na área de simulação térmica, análise de formação da lente de solda, além da análise de deformações e desgastes nos eletrodos.

Neste contexto em que a solda a ponto é inserida, principalmente na indústria automobilística, a qual aplica milhares de pontos por chassi de carro, o trabalho apresentado foi desenvolvido com intuito de propiciar ao EMC, Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina), uma nova linha de P&D, uma vez que não são desenvolvidas pesquisa no ramo de soldagem por resistência.

Inicialmente será apresentada a tecnologia de soldagem por resistência, comentado sobre equipamentos, parâmetros, eletrodos, aplicações, materiais soldados, entre outras características do processo. Na segunda parte do trabalho será descrito o desenvolvimento do trabalho seguido de ensaios experimentais. Ao final será concluído o trabalho e recomendadas futuras pesquisas que complementarão este trabalho.

1.1. Objetivos

O trabalho presente, tem como objetivo principal, fazer a restauração de um equipamento de solda a ponto, modelo “ARO T83” (1972) que se encontra no Labsolda (Laboratório de soldagem do Departamento de Eng. Mecânica – UFSC).

Para isso, serão feitas mudanças tanto na parte mecânica do equipamento (sistema pneumático, eletrodos, refrigeração, etc) quanto na parte eletrônica, que está sendo desenvolvida em projeto conjunto a este. Esta restauração tem o propósito de possibilitar projetos de P&D no departamento, uma vez que, neste ramo da soldagem, nenhuma pesquisa está sendo desenvolvida.

Objetivos secundários serão ensaios experimentais do processo de solda a ponto que validarão o uso do equipamento.

1.2. Justificativa

Fazer com que o Laboratório de soldagem, bem como o departamento, tenham à disposição de um equipamento de soldagem a ponto, pode facilitar atividades, como por exemplo, preparação de corpos de prova, atividade muito comum em laboratórios de pesquisa como o Labsolda, ou até mesmo manutenção de equipamentos, reparos entre outras atividades.

Além disso, iniciar linhas de P&D neste ramo da soldagem poderia abrir novos conceitos de pesquisas no Labsolda. Atualmente não são realizadas simulações numéricas dos processos de soldagem que o laboratório desenvolve. O processo de refrigeração dos eletrodos, por exemplo, apresenta uma grande oportunidade de simulação de transferência de calor e deformação mecânica, bem como um contexto para pesquisas futuras.

Outro ponto importante é colocar a disposição dos alunos este tipo de tecnologia. O processo de soldagem a ponto, embora seja uma tecnologia que vem dos primórdios da soldagem, é extremamente importante para a indústria atual. Tornar possível que o aluno tenha contato com este processo é crucial para o conhecimento e desenvolvimento do aprendizado em tecnologia da soldagem.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Soldagem por resistência elétrica - Histórico

Desde que se entende o processo de união de peças metálicas por fusão como soldagem, pode se comentar sobre o processo de soldagem por resistência, pois este foi um dos primeiros métodos a existir.

O processo de soldagem por resistência foi inventado casualmente pelo engenheiro e inventor inglês Elihu Thomson, em 1877. A Descoberta se deu quando Thomson realizava um de seus experimentos com carregamento de condensadores através de bobinas alimentadas por bateria, conectando-se o condensador nos bornes do secundário com fios finos, e a baterias nos bornes do primário. Quando Thomson resolveu realizar a experiência ao contrário, ele alimentou pelo secundário e manteve os extremos do primário unidos por contato. A descarga de corrente elétrica foi o suficiente para que as pontas ficassem unidas por fusão. [Heureux, *et al.* 1968].

Desse modo foi descoberto um novo método de união por fusão, isto é, através de resistência ôhmica.

A passagem de corrente por uma resistência acarreta no efeito joule, fenômeno que tem como consequência a geração de calor. Este calor gerado muitas vezes é indesejado, porém, não para a soldagem por resistência, que leva este fator como o princípio do processo.

Posteriormente, Thomson dedicou seus estudos para a soldagem a resistência. Patentou o processo, e em 1888 criou a empresa Thomson Electric Welding, em Lynn, Massachusetts.

Uma das primeiras aplicações em escala industrial para o processo de solda por resistência a ponto foi na indústria de utensílios de cozinha em 1898. Já em 1915 o processo já era bastante utilizado para união de chapas de aço na fabricação de carrocerias automotivas. [Woodward, 1945 *apud* Damasco, 1995 pag. 19].

Com o decorrer dos tempos, a expansão do processo fez com que as soldas por resistência apresentassem segurança devido aos grandes desenvolvimentos aplicados as máquinas alimentadas por corrente alternada e também pela regulamentação e monitoramento do processo.

Atualmente o processo de solda por resistência tem uma grande aplicação nos diversos ramos da indústria. Um setor industrial no qual o processo é largamente utilizado, e talvez onde seja mais utilizado, é na indústria automobilística, onde, por exemplo, em um veículo chega-se a realizar de 3 a 5 mil pontos de solda, em linhas que podem apresentar mais de 250 robôs. [Papkala, 1992 *apud* Yang, 1995].

O que faz este processo ser muito aplicado é sua versatilidade, facilidade e simplicidade de aplicação, além de se apresentar bastante econômico e rápido para uma aplicação industrial, pois não requer material de adição bem como gases de proteção, etc.

2.2. Processo de soldagem a ponto por Resistência

O processo de solda a ponto por resistência elétrica é um processo onde as peças de trabalho são unidas por geração de calor devido à passagem de corrente pela resistência de contato estabelecida entre duas chapas (Efeito Joule), sob pressão dos eletrodos, que são acionados, normalmente, por sistemas hidráulicos ou pneumáticos. O calor é gerado e controlado por pulsos de elevada corrente elétrica a uma baixa tensão, que por sua vez causa a fusão da região sob os eletrodos, denominada Lente de Solda, em inglês *nugget*. [ASM, 1971].

O ciclo de soldagem a ponto se inicia quando o contato entre as peças, sob pressão dos eletrodos, é estabelecido. O ciclo de corrente se dá de acordo com o volume de material a ser fundido, mas basicamente deve apresentar uma rampa de subida, *upslope*; um período de soldagem, e uma rampa de descida, *downslope*, todos sob pressão dos eletrodos. Vale ressaltar que os eletrodos têm papel fundamental na solidificação da lente de solda, portanto mesmo após o corte da corrente eles são mantidos pressionados por um determinado tempo. A Figura 1 representa esquematicamente um ciclo do processo de solda a ponto por resistência.

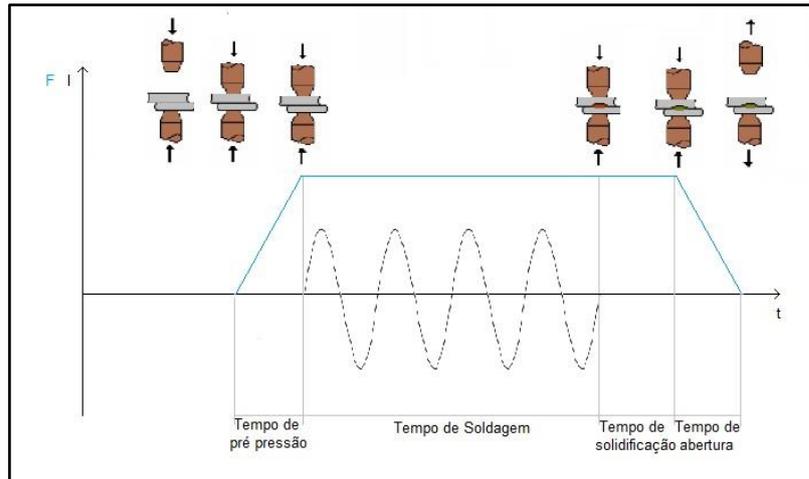


Figura 1 – Esquema tempo de um ciclo simples de soldagem a ponto.

Vale notar que na figura acima, o ciclo da corrente não apresenta as rampas de subida nem descida, apenas representa um ciclo bastante simples e como é feito o sincronismo das forças com os períodos de corrente. Primeiramente os eletrodos são fechados e a pressão sobre as peças aumenta até determinado valor pré-estabelecido. Em seguida inicia-se a passagem de corrente a ponto de ocorrer a fusão das peças. A corrente é então cessada, porém os eletrodos ainda são mantidos fechados para que ocorra a solidificação da lente de solda, em seguida são liberados. Ciclos mais completos e complexos serão mostrados em seções seguintes.

O tempo de duração das fases do processo é, normalmente, controlado por ciclos de corrente ao invés de tempo, e não devem ser confundidos com ciclo de soldagem. Um ciclo de corrente apresenta um período igual à $1/60$ s uma vez que a frequência da rede elétrica no Brasil é 60Hz, logo o período é igual a 0,0167s.

A densidade de corrente e as forças devem ser altas o suficiente de modo a obter total fusão das peças, porém não tão elevadas fazendo com que material seja expelido da lente de solda.

O processo de solda ponto por resistência pode ser utilizado para união de diferentes materiais, sejam revestidos ou não, e chapas de espessuras de até 3,5 mm. Em alguns casos pode se soldar chapas com espessuras de até 6 mm, porém é um processo economicamente inviável. [Machado, 1996].

Uma característica bastante influente do processo é que podem ser realizados vários pontos de solda ao mesmo tempo de acordo com arranjo dos eletrodos e dos transformadores da máquina, aumentando então a produtividade do processo.

Algumas considerações devem ser feitas para a aplicação deste processo, entre elas podemos destacar principalmente as características dos materiais, tanto das peças de trabalho bem como dos eletrodos, tais como condutividade térmica e elétrica, revestimento, temperatura de fusão, expansibilidade térmica, bem como sua soldabilidade. [Machado, 1996].

2.3. Resistências Elétricas e Geração de Calor

Um fator muito importante na soldagem por resistência é a maneira com que o calor pode ser gerado. O circuito secundário de um equipamento de solda por resistência é constituído por uma serie de resistências. Este conjunto de resistências influi no valor da corrente, que será igual em todo o circuito, porém o calor gerado será diferente e proporcional para cada resistência envolvida.

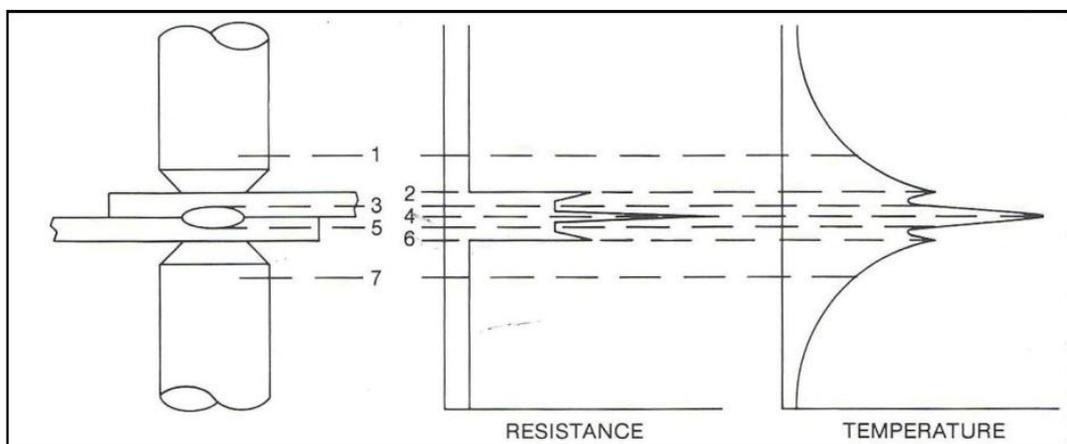


Figura 2 - Gráficos de resistência e temperatura de acordo com a localização no circuito diagramado [Welding Handbook, 1991 modificado].

Na Figura 2 pode se notar que são sete as resistências que compõe o circuito secundário do processo, sendo 1 e 7 as resistências dos eletrodos; 2 e 6 as resistências de contato eletrodo/peça, que dependem das condições da superfície, do tamanho da área de contato e da força de contato; 3 e 5 as resistências totais do material de base, proporcionais a espessura da chapa; e por ultimo é a resistência de contato entre as peças, 4, que por sua vez

deve ser a maior resistência do circuito de modo que a maior geração de calor seja exatamente na região que formará a lente de solda. [AWS, 1991].

O gráfico de temperatura mostrado na Figura 2 mostra que a maior temperatura de fato ocorre no ponto de contato entre as peças, mas vale notar que na região 2 e 6 a temperatura também é elevada, mas não o suficiente para que ocorra a fusão do material. Tal fusão deve ser evitada de modo a preservar as características do eletrodo, bem como garantir que material não seja expelido da zona de solda, como já foi dito anteriormente.

A função que rege a geração de calor em um condutor é dada pela seguinte expressão:

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

Onde:

Q = Calor Gerado (J);

I = Corrente elétrica (A);

R = Resistência (Ω);

t = tempo (s).

Note que o calor gerado é proporcional ao quadrado da corrente e diretamente proporcional as outras duas variáveis. Porém nem todo calor gerado é usado para fundir as chapas. Parte do calor se perde por condução, convecção e radiação para os eletrodos, atmosfera e peça de trabalho. [ASM, 1971]. A quantidade de calor que é perdido não pode ser mensurada exatamente.

Vale ressaltar que o calor gerado deve ser calculado para resistência de contato entre as peças, que é a região que efetivamente ocorrerá a união, porém o calor pode ser calculado para cada região, como é mostrado no gráfico de temperatura da Figura 2.

Embora muitos autores afirmem que a resistência de contato entre as peças ser dependente de muitos fatores, inclusive dos parâmetros regulados para o processo, uma

expressão que aproxima a resistência de contato apresentada por DAMASCO, 1995, citando MARRA, 1992, é dada por:

$$R_c = \frac{\rho}{2} \cdot \{[E \cdot H_0 \cdot \pi \cdot (T_s - T_0)]/[F_s \cdot (T_s - T_0)]^{\frac{1}{2}}\} \quad (2)$$

Onde:

ρ = resistividade elétrica do material ($\Omega \cdot m$);

E = Rugosidade média das superfícies em contato;

H_0 = Dureza Brinell;

T_s = Temperatura de amolecimento do material, aprox. 2/3 da temperatura de fusão (K);

T_0 = temperatura ambiente (K)

F_s = Força de pressão dos eletrodos (kN)

Para uma melhor aproximação de ρ , uma vez que esta propriedade varia em função da temperatura, pode se usar a seguinte expressão:

$$\rho = \rho_0 \cdot [1 + a \cdot (T - T_0)] \quad (3)$$

Onde

ρ = resistividade à temperatura genérica T ;

ρ_0 = resistividade à temperatura ambiente T_0 ;

a = coeficiente médio de variação da resistividade com a temperatura.

O motivo para elevados valores da resistência de contato é a existência de uma camada de óxidos, não condutora, na superfície de contato tanto da superfície entre as peças quanto as entre peças e eletrodos. Isso tem como consequência que apenas uma pequena área condutora estará em contato, o que acarreta elevadas intensidades de corrente. [Weiner, 1980].

Os efeitos dos parâmetros sobre a geração de calor e sobre o processo serão discutidos posteriormente.

2.4. Equipamento de solda a ponto por resistência

Os equipamentos de solda a ponto por resistência, bem como para outras variantes do processo de soldagem por resistência, apresentam basicamente três elementos: o circuito elétrico, o controle e o sistema mecânico de acionamento dos eletrodos.

2.4.1. Circuito elétrico

O circuito elétrico consiste em um transformador onde o primário é ligado na rede de alimentação e o secundário que inclui os braços, eletrodos e peças.

As instalações elétricas podem ser alimentadas tanto em CA (corrente alternada) quanto em CC (corrente contínua), com transformadores monofásicos ou trifásicos. No caso de CA, a frequência pode ser igual ou não a frequência fornecida pela rede. [Machado, 1996].

Os transformadores de máquinas de corrente contínua convertem a corrente alternada de baixa corrente e alta tensão do primário, em corrente contínua de alta corrente e baixa tensão no secundário. Já as máquinas de corrente alternada produzem corrente a mesma frequência da rede, normalmente a 60Hz. Da mesma maneira a corrente é convertida de baixa amperagem e alta tensão, para alta amperagem e baixa tensão. Em alguns casos de materiais com resistência baixa, por exemplo, o alumínio, a corrente pode atingir valores de até 100kA. [AWS, 1991]. A Figura 3 representa esquematicamente um circuito monofásico de máquinas de soldagem por resistência.

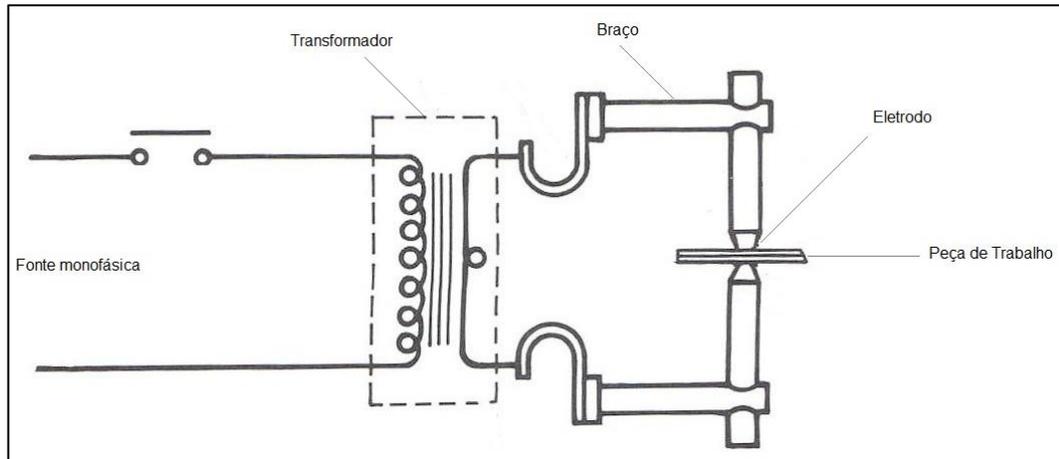


Figura 3 - Circuito típico de máquinas monofásicas [Welding Handbook, 1991, modificado].

2.4.2. Controle

Os sistemas de controle das máquinas deve executar as funções de acionar e liberar o sistema mecânico; iniciar e interromper a passagem de corrente bem como controlar a magnitude desta, lembrando que todas estas funções devem ser sincronizadas para que o ciclo de soldagem ocorra com êxito. Os componentes são contatos elétricos, temporizadores e sequenciadores, entre outros reguladores. Exemplos de processos de soldagem a ponto, onde se pode observar as variáveis que devem ser controladas são mostradas durante o trabalho.

2.4.3. Sistema mecânico

As máquinas de solda ponto apresentam um sistema mecânico que tem como função operar o movimento de fechamento e abertura dos braços e eletrodos bem como propiciar a força necessária para o procedimento. Normalmente estes sistemas são hidráulicos ou pneumáticos, porém existem máquinas que apresentam sistemas magnéticos.

A força e a velocidade de sistemas hidráulicos e pneumáticos são função da pressão e vazão da rede de fluido, óleo ou ar, mas também dependem da geometria e tipo de cilindro/pistão empregado. Podem ser aplicados diretamente na linha de avanço do eletrodo ou então por meio de braços de alavanca. Na Figura 4 pode-se notar que o cilindro se encontra quase na linha de avanço do eletrodo, e o braço de alavanca neste caso é pequeno.

Outro fator que implica na seleção dos sistemas mecânicos é a mobilidade da máquina. Existem máquinas fixas, que costumam ser rígidas porém grandes e pesadas, mas também

máquinas portáteis, mais leves e que em alguns casos o acionamento e controle da força é manual, na forma de alicates.

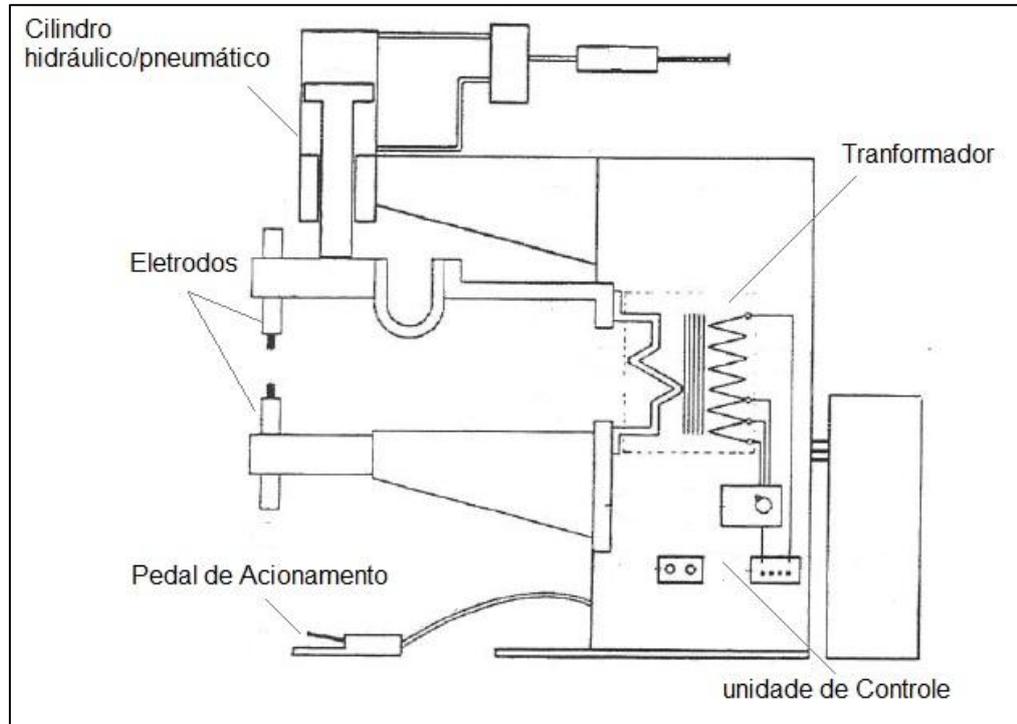


Figura 4 – Esquema de uma máquina de solda a ponto por resistência [Heureux & Belotte, 1968, modificado].

2.5. Eletrodos

Um dos principais elementos do processo de solda por resistência é o eletrodo. Propriedades do material com que é feito e sua geometria são características que definirão o desempenho do processo. As propriedades estão ligadas ao circuito elétrico, já sua geometria está ligada a densidade de corrente, refrigeração, bem como a geometria do ponto de solda.

As funções que os eletrodos devem desempenhar são:

- Conduzir corrente e garantir uma determinada densidade de corrente na região de solda;
- Transmitir a força para as peças;
- Dissipar parte do calor da lente de solda;
- Manter um alinhamento relativo entre as peças de trabalho.

Para que as características acima sejam cumpridas, as propriedades fundamentais que um eletrodo deve ter são alta condutividade elétrica e térmica, baixa resistência de contato, elevada resistência a compressão e ao desgaste nas temperaturas de trabalho. Outra propriedade que influi bastante no processo é a dureza do material. Quando maior for a dureza menor será a condutividade elétrica e térmicas. [AWS, 1991].

As características geométricas dos eletrodos são determinadas pelas geometrias das peças, tais como espessura das chapas e tamanho do ponto. Já as propriedades são determinadas pelas propriedades e características da peça tais como revestimento e liga metálica.

Para o processo de solda por resistência, é necessário um par de eletrodos. Para processos múltiplos, isto é, mais pontos em um único ciclo, são necessários uma série de pares de eletrodos.

Uma consequência das elevadas temperaturas de trabalho (aproximadamente 1100K), e das forças compressivas nos eletrodos, são constantes desgastes, que por fim acarretam na vida útil dos eletrodos. Um problema bastante comum, principalmente na indústria automobilística, é devido ao revestimento sobre as peças de trabalho. O revestimento das peças, após certa quantidade de pontos realizada pelos eletrodos, acaba aderindo, diluindo, sobre a face do eletrodo. Isto influi nas propriedades do material, uma vez que uma nova liga é formada na camada superficial da face do eletrodo. Problemas como menor condutividade elétrica, menor resistências mecânicas e trincas sobre o eletrodo passam a ocorrer. [Kusano, 2011].

A manutenção dos eletrodos para este tipo de problema é feita pelo processo de dressamento, processo de usinagem na face do eletrodo de modo a retirar a camada danificada pela diluição do revestimento da peça. Segundo Kusano (2011), uma constante manutenção dos eletrodos, isto é, a cada 200 pontos, um único eletrodo pode chegar a realizar 8000 pontos de solda, enquanto sem a manutenção a vida útil se limita em 1800 pontos.

2.5.1. Geometria dos eletrodos

A geometria dos eletrodos tem inúmeras funções para o seu desempenho. Além da densidade de corrente determinada pela área e geometria dos eletrodos, existem também outros fatores que influirão no processo, tais como o diâmetro da face, espessura da face,

diâmetro e profundidade do furo de refrigeração e também a maneira com que é feita a fixação com o suporte de eletrodo, que normalmente é ajuste por interferência.

A *Resistance Welding Manufacturing Alliance* (RWMA) padronizou o tamanho e os tipos de faces dos eletrodos. Essa padronização foi feita de acordo com as aplicações existentes, por isso são apresentados eletrodos de distintas formas e diâmetros.

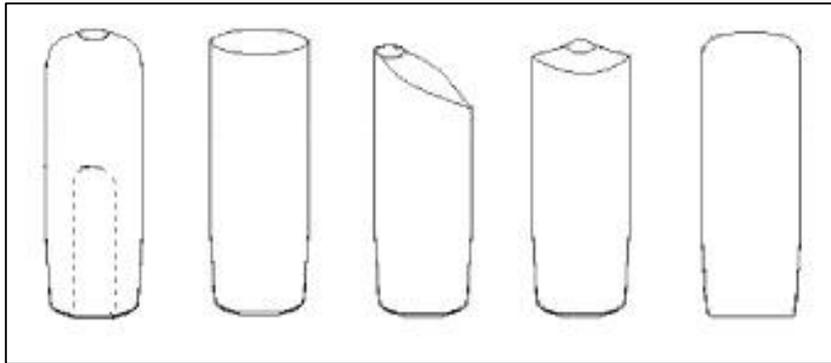


Figura 5 - Típicas geometria de eletrodo para solda ponto - RWMA.

Embora as geometrias sejam padronizadas, muitos fabricantes buscam otimizar os eletrodos visando melhorar algumas propriedades térmicas, elétricas e mecânicas, apresentando novas geometrias no mercado.

Na Figura 6 pode-se notar que uma característica do eletrodo é a espessura da face. Esta é a distância da face do eletrodo ao furo de refrigeração. Para uma melhor refrigeração do eletrodo bem como da lente de solda, existe uma espessura de face ideal, de modo que a temperatura do eletrodo seja minimizada, mas também garantindo um bom ponto de solda. [Machado, 1996].

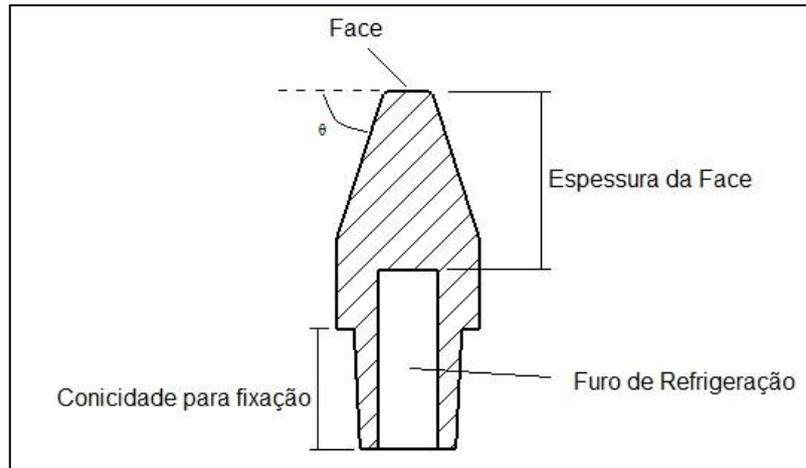


Figura 6 – Vista de corte de um eletrodo genérico - Geometria.

Um ponto importante que vale ressaltar é quanto a densidade de corrente, que é a quantidade de corrente que passa por determinada área (A/mm^2). Para um diâmetro de face pequeno a densidade é alta, para diâmetros grandes a densidade é baixa. Em um artigo publicado por Bower *et al* (1990), se mostra que variações no ângulo de cone (θ) do eletrodo influem diretamente na distribuição da corrente sobre a face. Segundo Bower *et al.*, existe uma maior concentração de corrente nas bordas da face, em virtude de que as correntes se constroem nas extremidades.

Por intermédio de modelagem matemática, Bowers *et al.* simulou para diversos ângulos de cone, a distribuição da corrente na face dos eletrodos. Observou-se que para ângulos maiores a distribuição da corrente era mais uniforme na face do eletrodo. A Figura 7 mostra o gráfico da distribuição da densidade de corrente na face dos eletrodos para dois ângulos de cone (θ), 15° e 50° . Na mesma figura, no gráfico da direita, é mostrado que a densidade de corrente é uniforme em toda a face do eletrodo para ângulos de cone iguais a 90° , ou seja, quando o eletrodo for um cilindro e não mais um cone.

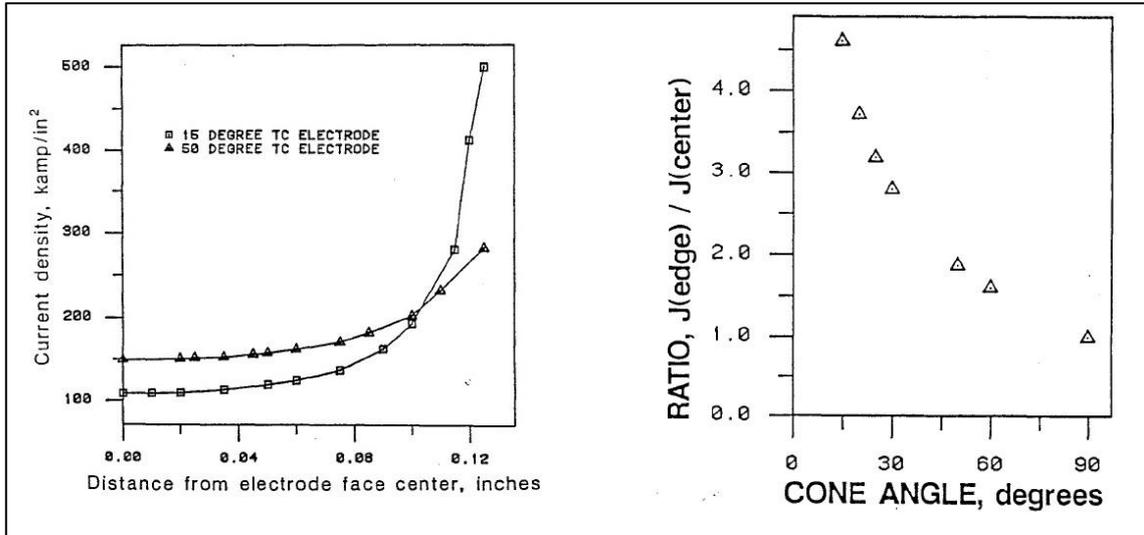


Figura 7 - Gráficos Densidade de Corrente x Distância do centro da face e Razão de Corrente x Ângulo de cone [Bowers *et al.* 1990]

A distribuição desuniforme da densidade de corrente na face do eletrodo faz com que menos corrente seja efetivamente destinada à formação da lente de solda, uma vez que se tem corrente concentrada na extremidade da face dos eletrodos. [Bowers *et al.* 1990].

Os estudos feitos pelos autores mostraram também a influência da variação da densidade de corrente na vida útil do eletrodo. Eletrodos com uma distribuição mais uniforme da corrente mostraram uma maior vida útil. Por exemplo, para um mesmo material, eletrodos com ângulos de 15° e 60°, mostraram vida de 2400 e 3200 pontos de solda respectivamente.

Segundo Bowers *et al.*, uma distribuição uniforme de corrente requer menos potência da máquina para um mesmo diâmetro de ponto de solda, uma vez que menor será a perda de corrente para circuitos periféricos. Para isso, propuseram uma geometria para os eletrodos de modo a conciliar melhor a distribuição da corrente com as resistências mecânicas (Figura 8).

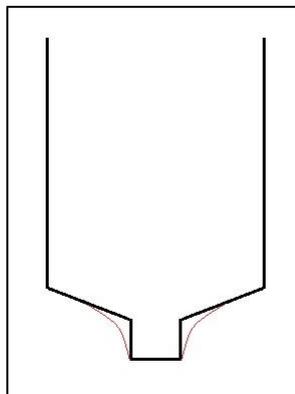


Figura 8 – Geometria *Pimple* (___) e *Pimple Modificado* (___).

O diâmetro do eletrodo também tem papel fundamental na característica do ponto. Para uma dada espessura de chapa deve-se ter um determinado diâmetro do ponto de solda, de modo a propiciar uma junta com resistência garantida. Pode-se encontrar na literatura a expressão que determina o diâmetro apropriado para cada espessura de chapa. [Damasco, 1995]. Esta expressão é dada por:

$$d_f = 5 \cdot \sqrt{e} \quad (4)$$

Onde:

d_f = Diâmetro da Face;

e = espessura da chapa.

A geometria do eletrodo é, portanto, uma característica bastante importante para o desempenho do eletrodo. Influi diretamente na densidade de corrente, bem como na distribuição de calor e resistências mecânicas. Atualmente muitos estudos são desenvolvidos em simulação e modelagem matemática do comportamento térmico e elétrico dos eletrodos para procedimentos de solda a ponto por resistência.

Influências da geometria na refrigeração do eletrodo serão descritas mais adiante.

2.5.2. Materiais dos eletrodos

O material utilizado mais comum para eletrodos são as ligas de cobre. Isso porque o cobre apresenta elevada condutividade térmica e elétrica, porém baixa resistência mecânica, o que acarreta numa redução da vida útil do eletrodo.

As especificações mais utilizadas para eletrodos são as padronizadas pela RWMA. Os eletrodos foram divididos em dois grupos: Grupo A, ligas a base de cobre, e grupo B, que abrangem ligas de metais refratários. Os grupos são subdivididos em classes. A Tabela 1 mostra a composição de cada classe de materiais.

Tabela 1 - Classificação dos Materiais - RWMA

RWMA - Grupo A	Composição (%)	Dureza Rockwell min.	Condutividade Elétrica min. (%IACS)	Limite de Resistencia a tração min – Mpa
Classe 1	99,0Cu + 1,0Cd	B 70	92	414
Classe 2	99,2Cu + 0,8Cr	B 71	82	428
Classe 3	97,0Cu + 2,5Co + 0,5Be	B 99	52	724
RWMA – Grupo B	-	-	-	-
Classe 10	Cu – W	B 72	45	930
Classe 11	Cu – W	B 94	40	1103
Classe 12	Cu – W	B 98	35	1172
Classe 13	W	A 69	30	1380
Classe 14	Mo	B 85	30	-

Atualmente são utilizadas ligas diferentes das classificadas pela RWMA. Ligas como Cu-Cr-Zr (cobre – cromo – zircônio) e Cu-Al203 vem sendo utilizadas em aplicações mais severas ao eletrodo, principalmente em casos de revestimentos zincados. A diminuição das propriedades mecânicas dessas ligas é menor com o aumento da temperatura, portanto suportam mais carga em temperaturas elevadas. [Damasco, 1995].

2.5.3. Refrigeração dos Eletrodos

Devido a elevada corrente que passa através dos eletrodos, estes sofrem um aumento de temperatura bastante grande. Embora o período de soldagem seja relativamente curto, a potencia implícita no processo é elevada. Desse modo a refrigeração dos eletrodos tem papel fundamental na conservação dos eletrodos, como também influi diretamente no processo de soldagem por resistência.

A refrigeração dos eletrodos em solda a ponto por resistência se dá pelo fluxo de água contínuo internamente ao eletrodo. A geometria do eletrodo, principalmente diâmetro do corpo, diâmetro do furo de refrigeração e espessura da face são os dimensões que mais influem na refrigeração.

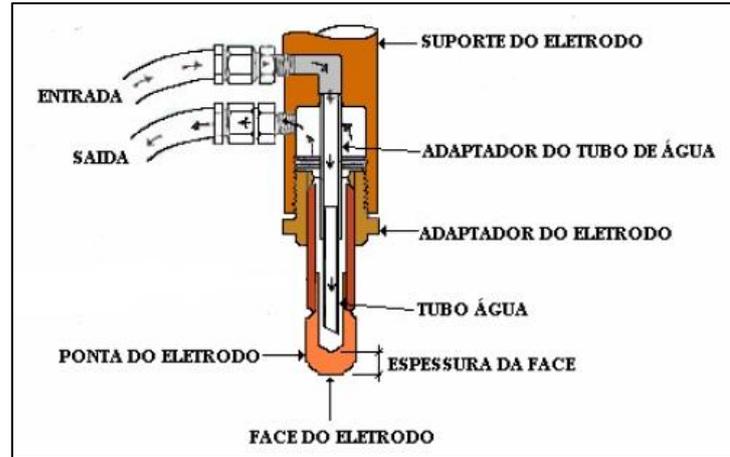


Figura 9 – Esquema de refrigeração do eletrodo [Aures, 2006].

Na Figura 9 note que a água circula pelo eletrodo através do tubo d'água e o suporte do eletrodo, determinando um gradiente de calor pela espessura da face.

A taxa de resfriamento do eletrodo será função da vazão do líquido refrigerante, diâmetro do furo de refrigeração, área de contato, espessura da face e do coeficiente de transferência de calor. [Machado, 1996].

Uma recomendação para o fluxo de água é na faixa de 4l/min para chapas finas e sem revestimentos, podendo ser maior para chapas mais espessas e com revestimento, atingindo valores de 7l/min. A temperatura de entrada de água de 20 °C e saída de 30 °C proporcionam uma boa refrigeração às vazões recomendadas. [Powell *et al.* 1996]. Já a distância entre tubo d'água e a parte interna da face do eletrodo deve ser fixa, na faixa de 5mm. [Tsai, *et al.* 1992].

Uma grande área de desenvolvimento em solda ponto é na simulação dos gradientes de temperaturas no eletrodo durante o processo. Melhores condições de refrigeração prolongam a vida útil do eletrodo.

2.6. Lente de solda

A formação da lente de solda, isto é, o ponto de solda resultante do processo, é uma função dependente de praticamente todos os parâmetros envolvidos no processo. Além dos parâmetros como corrente, força e geometria dos eletrodos, fatores como desgaste da face dos eletrodos, óxidos na superfície das peças, refrigeração, também influenciam para a formação da lente de solda. [Aravinthan *et al.*, 2011].

O estudo da formação da lente de solda vem sendo muito desenvolvido nos últimos anos. Ensaios metalográficos, ultra-som, entre outros processos são bastante utilizados para essa análise. Atualmente, filmagens em alta velocidade já foram feitas para analisar a formação da lente de solda.

A lente de solda inicia sua formação quando a passagem de corrente pela peça acaba por fundir a região de solda. A primeira etapa se caracteriza pela remoção de óxidos das superfícies em contato, e posteriormente o início da fusão dos materiais, onde um núcleo de metal fundido apresenta seção elíptica. Quanto maior for o aporte térmico maior será o diâmetro da lente de solda. Após o corte da corrente, esse metal fundido inicia o processo de solidificação. O gradiente de calor é determinado pela diferença de temperatura do núcleo fundido e a temperatura dos eletrodos e do resto da peça. [Damasco, 1995]. Em um estudo de simulação térmica, Hou *et al.* (2006) mostrou que a temperatura máxima atingida foi na ordem de 2100 °C no centro do núcleo para aços de baixo teor de carbono.

O estudo das temperaturas envolvidas no processo é muito importante para uma análise microestrutural do ponto de solda. Os fenômenos de solidificação e tratamentos térmicos são muito considerados para mensurar as propriedades mecânicas do ponto de solda bem com da ZTA, zona termicamente afetada.

Além das propriedades mecânicas do ponto de solda, a geometria deste também é muito influente pelos parâmetros e geometria dos eletrodos. A Figura 10 mostra as dimensões que normalmente são medidas em um ponto de solda resultante do processo. Existem normas que definem diâmetros mínimos, indentações máximas, entre outros, que garantem a segurança e a resistência do ponto de solda.

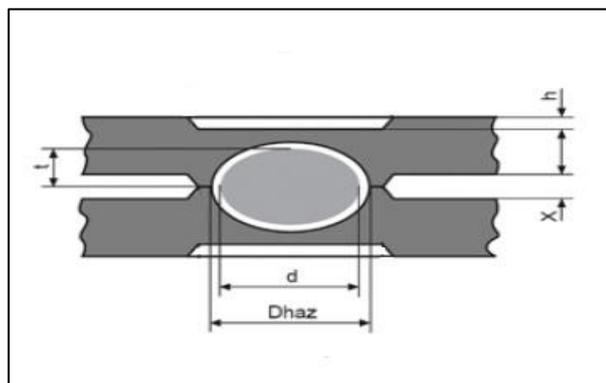


Figura 10 – Geometria do ponto de solda: (h) indentação, (t) penetração da lente, (d) diâmetro da lente, (Dhaz) ZTA, (x) gap entre as peças. [Manual Ruukki, 2009].

Diâmetros abaixo de $3,5.e^{1/2}$, onde “e” é a espessura da chapa, não são aceitos segundo a norma AWS SAED8-9M. A recomendação é que o diâmetro da lente de solda seja aproximadamente $4.e^{1/2}$, pois estes garantem uma boa resistência mecânica. [Ruukki manual, 2009].

2.7. Parâmetros do processo

No processo de solda a ponto por resistência os parâmetros ajustáveis são a corrente de soldagem, força dos eletrodos e tempo de solda. É fato que devido à grande variação de ciclos de soldagem existente, cada fase apresenta um controle separado de ciclos de corrente, ou tempo, bem como as forças aplicadas. As variáveis como energia para fusão, resistência de contato, preparação da superfície, não podem ser considerado parâmetros ajustáveis, mas parâmetros consequentes e controláveis, uma vez que estes dependem da geometria dos eletrodos, das propriedades dos materiais, etc.

Cada um dos parâmetros tem sua influência na geração de calor no processo, isto é, todos eles formam um conjunto para que o ponto de solda seja feito com qualidade.

2.7.1. Corrente de Soldagem

A corrente de soldagem no processo de solda a ponto não é um valor exato. É dependente de vários fatores tais como as resistências de contato, condições das superfícies, propriedades dos materiais, etc.

Existem limites para a corrente de soldagem. Esta deve ser mínima o suficiente para que ocorra a fusão do material, mas não tão elevada a ponto de expelir material da zona de solda. [ASM, 1971].

O termo corrente de soldagem é normalmente utilizado junto com o conceito de densidade de corrente, logo a geometria do eletrodo e a corrente de soldagem são fatores fortemente ligados entre si.

A densidade de corrente é dada em A/mm^2 , e assim como a corrente existem limites. Para que processos sejam realizados mais rapidamente e que a resistência da solda seja máxima, é comum determinar a máxima densidade de corrente aplicável, que é dada pela fórmula deduzida empiricamente [Machado, 1996]:

$$D = 192 + 480 \cdot EXP^{-e} \quad (5)$$

Onde:

D = densidade de corrente (A/mm²);

e = espessura da chapa (mm).

Valores acima do calculado provocarão a expulsão do material fundido da zona de solda.

Pela equação de calor gerado, pode-se observar que o calor é diretamente proporcional à corrente de soldagem. Para pequenas variações na corrente podem ser obtidos resultados bastante diferentes, uma vez que esta é elevada a segunda potência.

A corrente de soldagem também pode ser controlada de modo a apresentar rampas de subida e descida, *upslope* e *downslope*, no ciclo de soldagem. A Figura 12 mostra algumas formas em que essas rampas podem ser aplicadas.

Mais adiante será mostrado o controle da corrente e tempo de soldagem.

2.7.2. Força dos Eletrodos

Um segundo parâmetro existente é a força dos eletrodos. A força de soldagem, assim também denominada, é a força aplicada pelos eletrodos sobre as peças de trabalho durante o ciclo de soldagem. [ASM, 1971].

Este parâmetro influi diretamente nos valores da resistência de contato, conseqüentemente na corrente que flui pelas faces dos eletrodos. Devido a rugosidade das superfícies, que sobre diferentes valores de força, a quantidade de vales e picos da superfície que estão em contato muda, conseqüentemente a resistência de contato. [Machado, 1996].

Na Figura 11 pode se observar que a resistência de contato decresce com o aumento da força dos eletrodos. Já no gráfico da direita da mesma figura nota-se que para maiores espessuras, valores mais altos de força de soldagem e diâmetro dos eletrodos são exigidos.

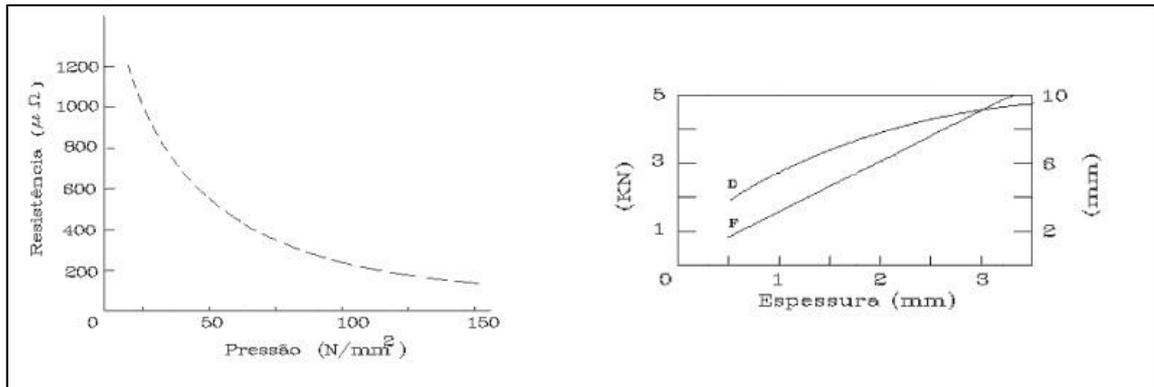


Figura 11 – Gráficos Resistência de contato x Força e Relação entre Força de soldagem (F), espessura de chapa e diâmetro do eletrodo (D) para chapas de aço baixo carbono. [Machado, 1996].

Vale ressaltar que a força dos eletrodos está ligada aos sistemas mecânicos das máquinas. O que determina estas forças são a área do cilindro hidráulico ou pneumático bem como os braços de alavanca envolvidos. É fato também que a força deve ser conciliada com a corrente de soldagem de modo que o material não seja expulso da zona de solda.

Dependendo do ciclo de soldagem aplicado, as forças de soldagem podem ser alteradas. Em procedimentos mais completos, onde etapas de forjamento e tempera são incluídos no processo, a variação da força dos eletrodos é comum.

2.7.3. Tempo de Soldagem

O tempo de soldagem nos processos de solda a ponto é dividido em algumas etapas. Normalmente, em ciclos simples de soldagem, são quatro os tempos de soldagem regulados: tempo de compressão, tempo de soldagem, tempo de retenção e tempo de pausa.

O tempo de pré-pressão é o período de fechamento dos eletrodos para criar o contato entre as peças até que se atinja a força estipulada e inicie a passagem de corrente. O tempo de soldagem é o tempo em que a corrente flui pelo sistema até que ocorra a fusão dos materiais. O tempo de retenção é dado pelo período em que após o corte da corrente, os eletrodos são mantidos fechados até que o material se solidifique. Por ultimo, o tempo de pausa, engloba o tempo em que a máquina não opera, isto é, abertura para retiradas das peças até que se inicie um novo ciclo de soldagem. [ASM, 1971]. A Figura 12 mostra alguns ciclos de soldagem a ponto por resistência.

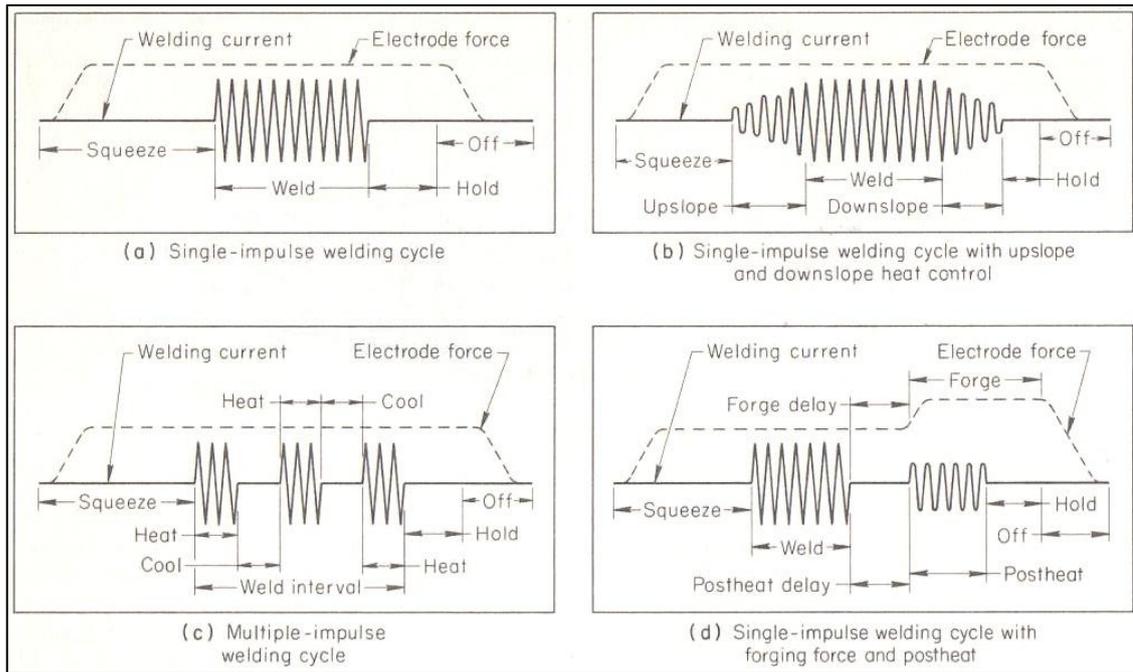


Figura 12 – Ciclos de soldagem a ponto por resistência [ASM, 1971].

Um ponto importante é que estes tempos regulados normalmente são expressos em ciclos de corrente. Para uma frequência de rede de 60Hz, o ciclo de corrente apresenta $1/60$ s, aproximadamente 0,0167s, portanto nas máquinas de solda a ponto são regulados valores inteiros de ciclos de corrente ao invés de valores quebrados em segundos.

2.7.3.1. Tempo de compressão

O tempo de compressão, alguns autores optam por dividi-lo em dois períodos: tempo de aproximação, que consiste no intervalo em que os eletrodos, afastados, se aproximam das peças até que seja estabelecido o contato; e tempo de pré-pressão, que consiste no aumento da força até que se atinja o valor pré-determinado. [Rivet, 1984].

Este tempo tem como objetivo retardar o início de passagem de corrente. Se a corrente foi iniciada assim que é estabelecido o contato dos eletrodos com as peças, ocorrerá uma forte expulsão do material devido a alta resistência de contato, podendo causar danos nos eletrodos, equipamento bem como o operador. Segundo Rivet (1984), muitos defeitos nos pontos de solda são atribuídos a uma falta de compressão adequada antes que se inicie a passagem de corrente, por isso deve ser muito bem sincronizados e controlados estes intervalos de tempo.

2.7.3.2. Tempo de soldagem

O tempo de soldagem é determinado pelo período em que ocorre a passagem de corrente pelas peças. Alguns autores afirmam que o tempo de soldagem é apenas o tempo em que a corrente máxima é estabelecida, enquanto outros definem o tempo de soldagem o intervalo em que corrente flui pelo sistema, incluindo tempos de subida, *upslope*, tempos de descida, *downslope*, entre outros intervalos de pulsos que podem ser sincronizados dentro deste período, tais como tempo de pré e pós-aquecimento.

2.7.3.3. Tempo de subida (*upslope*)

O tempo de subida permite que a corrente máxima de soldagem seja atingida gradativamente, isto é, por uma rampa de subida (*upslope*), evitando que o metal seja expelido drasticamente da zona de solda. Normalmente é implementado em procedimentos onde uma elevada corrente é exigida, como pro exemplo, em soldagem de alumínio. [ASM, 1971]. A Figura 12b apresenta o esquema de uma rampa de subida.

Em aplicação industrial, este intervalo normalmente é evitado para aumentar a produtividade, porém, vale ressaltar que a rampa de subida ajuda a prolongar a vida útil do eletrodo.

2.7.3.4. Tempo de descida (*downslope*)

O tempo de descida é a redução gradativa da corrente até que esta seja totalmente cessada através de uma rampa de descida (*dowslope*). Este intervalo ajuda na solidificação de alguns tipos de metais, diminuindo o gradiente de temperatura. É bastante implementada na soldagem de aços de baixo carbono. [ASM, 1971].

Esta redução gradativa ajuda também na prevenção de trincas à quente em metais endurecidos por têmpera. [AWS, 1991].

2.7.3.5. Tempo de retenção

O tempo de retenção consiste no intervalo em que os eletrodos são mantidos fechados após o corte de corrente. Seu principal objetivo é fazer com que o material solidifique através da condução de calor pelos eletrodos, que por sua vez, são refrigerados.

A rápida abertura dos eletrodos logo após o corte de corrente pode ocasionar o empenamento das chapas ou até mesmo uma desunião das peças, uma vez que a lente de solda não estará sólida. [AWS, 1991].

Uma recomendação é que os eletrodos fiquem sob pressão por um período relativamente grande, comparado com os tempos de soldagem, de modo que a solidificação da lente de solda seja garantida.

2.7.3.6. Tempos Adicionais

Além dos tempos descritos anteriormente, existem alguns períodos que podem ser incluídos no ciclo de soldagem, tais como tempo de forja e tempo de pós-aquecimento. O objetivo destes intervalos é ocasionar o refinamento do grão de aços endurecíveis. Estes períodos não são utilizados em ligas de baixo carbono. [ASM, 1971]. Estes intervalos podem ser observados na Figura 12d.

2.7.4. Soldabilidade e relações entre os parâmetros

A inter-relação entre os parâmetros de soldagem (corrente, tempo e força), para um determinado material, define a curva de soldabilidade deste, isto é, a faixa de parâmetros que garante pontos de solda aceitáveis.

A curva de soldabilidade, em inglês, *Lobe Curve*, é apresentada pelo gráfico Tempo x corrente de soldagem a uma determinada força. Na Figura 13, duas curvas são geradas de acordo com limites aceitáveis de diâmetros dos pontos. A curva a esquerda é dada por diâmetro do ponto iguais a 80% do diâmetro do eletrodo, ou $4.e^{1/2}$, onde e é a espessura da chapa. Já a curva da direita é dada por diâmetros de 1,25% diâmetro do eletrodo, ou quando ocorre a expulsão de material da zona de solda. [Gould *et al.*, 1988].

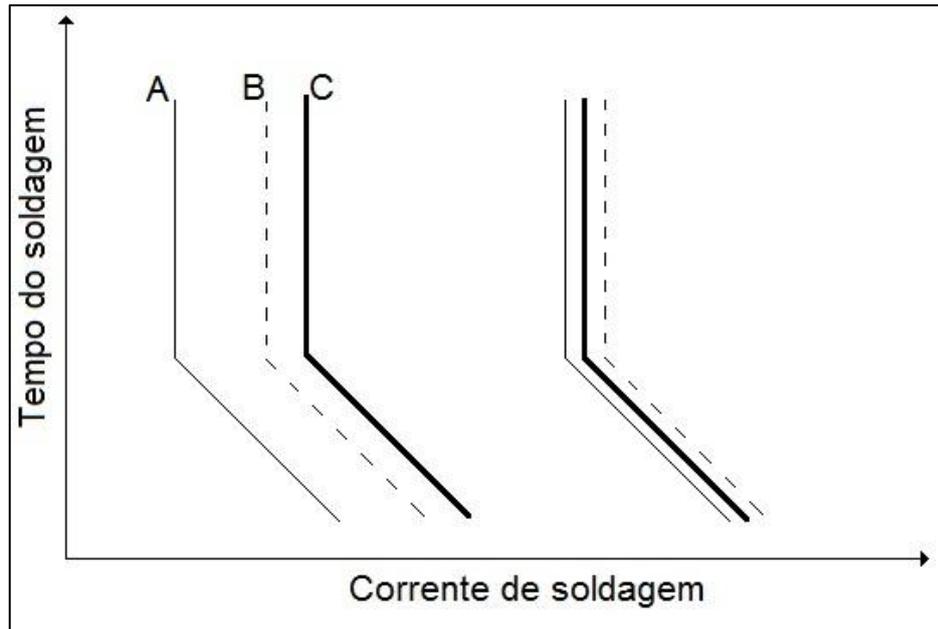


Figura 13 - Curva de Soldabilidade genérica para: A - Material não revenido; B - Material Zincado com revestimento leve; C - Material zincado com revestimento pesado.

A figura mostra a relação entre tempo e corrente de soldagem para determinados fatores, tais como, força dos eletrodos, resistência de contato, vazão de água para refrigeração, etc. com a variação destes parâmetros as curvas são deslocadas, por exemplo, com o aumento da força dos eletrodos, as curvas deslocam-se para a esquerda, uma vez que quanto maior a força menor são as resistências de contato, portanto maior deve ser a corrente para que a fusão ocorra.

Para uma variação nas resistências, quanto maior for a resistividade elétrica do material as curvas são deslocadas para a esquerda, pois menor valor de corrente é exigidas.

As curvas são limitadas também, além do diâmetro do ponto, por possíveis expulsões de material que podem ocorrer. A curva da direita se baseia na expulsão devido ao amolecimento do material próximo a zona de solda, que devido a força dos eletrodos, acaba sendo expelido. Este tipo de expulsão recebe o nome de “expulsão violenta” Já a curva da esquerda pode ocasionar um fenômeno denominado *Flash*, que consistem em expelir material devido a elevada corrente em período muito curto de tempo, não permitindo a dissipação de calor. [PAES *et al.* 1989].

Alguns autores propuseram uma otimização para esta curva. Levando em conta fatores como resistência a tração axial mínima especificada, indentação, não ocorrência de expulsão,

etc. [Damasco, 1995]. Os gráficos resultantes apresentam características como mostra a Figura 14.

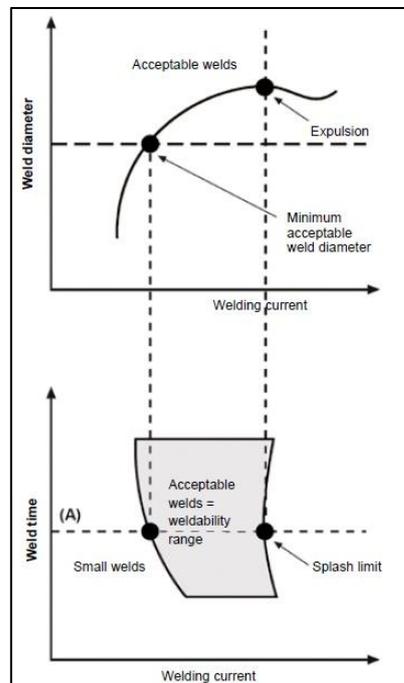


Figura 14 - Curva de soldabilidade otimizada. [Ruukki Manual, 2009].

2.8. Possíveis problemas de operação do processo

No processo de soldagem a ponto, assim como os demais processos de soldagem, pode apresentar diversos problemas durante o procedimento. Podemos citar alguns fatores que influenciarão na solda tais como desalinhamento dos eletrodos, efeito *Shunt*, indentação, entre outros.

2.8.1. Efeito *Shunt*

Quando vários pontos de solda são feitos em uma única peça, como por exemplo, nos chassis de carros, onde inúmeros pontos são feitos em seqüência com espessamentos determinados, o que ocorre é que parte da corrente é desviada para os pontos adjacentes. Isso faz com que menos corrente seja efetivamente destinada a fusão dos materiais. Este fenômeno recebe o nome de Efeito *Shunt* (Figura 15). Este efeito é considerado um dos mais influentes pela variação da qualidade das soldas no processo de solda a ponto. [Chang *et al.* 1990].

Segundo Blair, 1947, o efeito shunt ocorre devido a inúmeros fatores tais como a impedância da máquina de solda, espaçamento entre os pontos, temperatura das chapas,

espessura das chapas, etc. Muitos autores realizam estudos para a análise do efeito shunt, de modo a minimizar os efeitos para garantir um ponto de solda de qualidade.

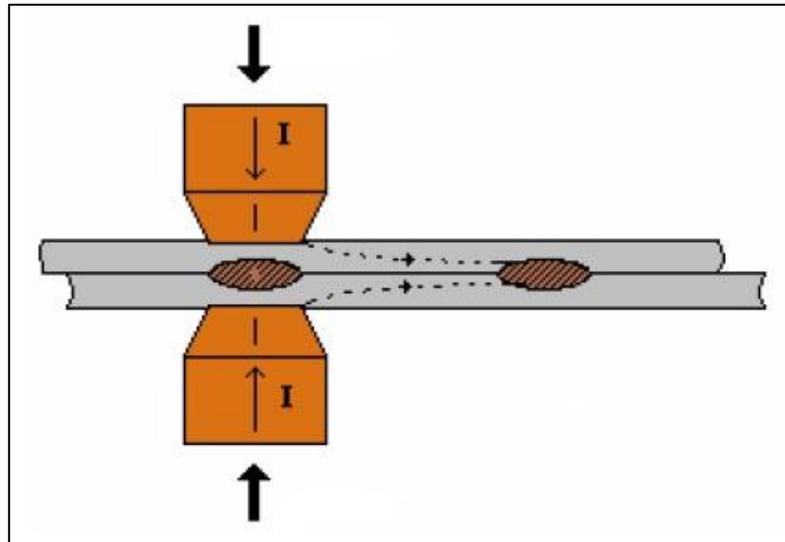


Figura 15 - Representação do Efeito *Shunt* [Vargas, 2006, modificado]

Chang, *et al.* mostra em seus estudos que para uma distância entre os pontos, *shunt distance*, de 8mm, aproximadamente 32% da corrente de soldagem é desviada para o ponto adjacente, enquanto que para uma distância entre pontos de 20mm, esse valor cai para 16%. Os estudos foram feitos em aços de baixo carbono.

Para uma distância entre pontos bastante grande, isto é, acima de 40mm, o efeito shunt pode ser desprezado, e o procedimento é idêntico a um único ponto de solda. [Chang *et al.* 1990].

2.8.2. Desalinhamento dos Eletrodos

Eletrodos desalinhados acarretam em alteração na geometria do ponto de solda, uma vez que fatores como densidade de corrente e força de soldagem são alterados devido ao desalinhamento.

O desalinhamento dos eletrodos pode ser tanto axial quanto angular. Karagoulis, 1994, mostrou que para um desalinhamento axial de 40%, isto é, $m/d_f = 0,4$, onde m é a distância entre eixos e d_f é o diâmetro de faces do eletrodos; a face dos eletrodos perdem 50% do

contato, alterando drasticamente a densidade de corrente. Estes estudos foram feitos para levantar a curva de soldabilidade, *lobe curve*, para determinado material incluindo fatores como o desalinhamento dos eletrodos.

2.8.3. Indentação

A indentação ocorre quando a resistência a compressão do material cai sobre elevadas temperaturas e a peça acaba por se deformar com o avanço axial dos eletrodos. A indentação esta fortemente ligada com a força dos eletrodos bem como sua geometria. Eletrodos com pequeno diâmetro causam elevada pressão sobre o ponto de solda, favorecendo a indentação.

Além de prejudicar o desempenho dos eletrodos, o fenômeno influencia na resistência final do ponto de solda. [Aures, 2006].

Existem limites de aceitação para a indentação. Estes limites são alguns dos fatores que definem as curvas de soldabilidade dos materiais. A Figura 10 mostra a geometria do ponto de solda onde h é a indentação. Segundo algumas normas como as dadas pela RWMA aceitam limites entre 10 e 20% da espessura da chapa para indentações.

2.8.4. Outros problemas encontrados

Além dos problemas descritos anteriormente, outros defeitos que podem ser detectados em pontos de solda são assimetria, trincas e vazios, falta de penetração ou penetração excessiva, etc. estes problemas são regulamentados pelas normas que definem limites de aceitação para cada tipo de problema. Isto é comentado na subseção seguinte.

2.9. Controle de qualidade em processos de solda a ponto por resistência

O controle de qualidade dos pontos de solda é feito por métodos estatísticos determinados pelas normas existentes. Dentre essas normas duas que são bastante empregadas principalmente na indústria automobilística são as normas definidas pela RWMA e pela *American Welding Society* (AWS). A RWMA apresenta as seguintes normas:

- “*Evaluation os Weld Consistency*” a qual aplica métodos descritos pela *American Society for Testing Metals* (ASTM);

- “*Control of Weld Quality by Statistical Methods*”; [Damasco, 1995].

Todas as normas, tanto da ASTM quanto da RWMA são baseadas em análise estatísticas que englobas análise micro-estrutural, ensaios mecânicos e geometria do ponto de solda.

A análise externa do ponto de solda é feita através de medições da geometria do ponto de solda. Fatores como indentação, diâmetro da lente, distorção, separação entre chapas e expulsão de material são o que são levados em conta para avaliação do ponto de solda. [Damasco, 1995].

A análise interna dos pontos de solda, isto é, análise da micro-estrutura e das propriedades mecânicas do ponto são feitas por ensaios destrutivos, porém pode ser feita por END`s, ensaios não destrutivos, tais como radiografia e e LP, líquido penetrante para valias trincas e vazios.

Dentre os ensaios destrutivos os mais comuns são análise metalográfica e ensaios mecânicos de tração, torção e impacto, que levantam os limites de resistências do ponto de solda.

Inúmeros estudos são feitos para analisar e mensurar a qualidade dos pontos de solda. Atualmente são utilizados ensaios durante o processo de solda ponto para obter uma análise instantânea da qualidade do ponto, por exemplo, métodos de ultrasonografia.

3. Sistemas Pneumáticos

Nesta seção será feita uma breve apresentação e comentários sobre sistemas pneumáticos, uma vez que esta é uma das ferramentas utilizadas em máquinas de soldagem por resistência e também de ser o tipo de sistema implementado no equipamento em questão.

Pneumática é a parte da física que estuda dinâmica e fenômenos relacionados com gases e/ou vácuo. Embora seja uma ciência bastante antiga, apenas no século XX que a pneumática passou a ser estudada e aplicada em larga escala nas indústrias. Hoje, a utilização de ar comprimido em linhas automáticas é indispensável para certos ramos de indústria, por exemplo, indústrias farmacêuticas e alimentícias. [Santos, 2005].

Dentre as vantagens da pneumática podemos destacar robustez, alta velocidade de resposta, baixa ou quase isenta de insalubridade, fácil operação e implementação, etc.

Algumas limitações ou exigências são necessidade de tratamento de ar, pressões muito inferiores a sistemas hidráulicos e dificuldade de propiciar velocidades baixas devido a compressibilidade do ar. [Santos, 2005]

A implementação de sistemas pneumáticos exige um compressor de ar, responsável pelo abastecimento de ar, linhas de condução e tratamento de ar, válvulas de controle e um cilindro dotado de câmaras, êmbolos e hastes, que pode ser de diferentes tipos devido à aplicação.

No caso de equipamentos de soldagem por resistência, o sistema pneumático empregado tem como função propiciar os movimentos de abertura e fechamento dos braços bem como garantir a força necessária para que a soldagem ocorra. Assim sendo, a velocidade de movimento depende da vazão de ar, enquanto a força depende da pressão da linha. É fato que a geometria do cilindro e dos braços também influirá na força gerada.

4. Controladores SCR – Tiristores

Os controladores mais utilizados para fontes de soldagem a resistência são os tiristores SCR (Retificador Controlado de Silício). Este dispositivo é formado por quatro camadas semicondutoras, alternando p-n-p-n, e três terminais, o ânodo e o cátodo, por onde são conduzidas correntes, e a porta (*gate*).

Nas máquinas monofásicas, são utilizados apenas um par de SCR's, onde cada um atua em determinada polaridade da corrente durante o ciclo de soldagem.

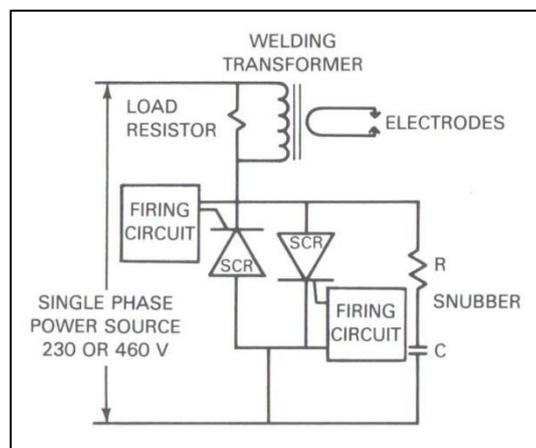


Figura 16 - Controlador SCR para máquinas monofásicas [AWS, 1991]

A geração de calor neste tipo de controladores é feita de acordo com o atraso, ou ângulo, que o tiristor é disparado a cada ciclo.

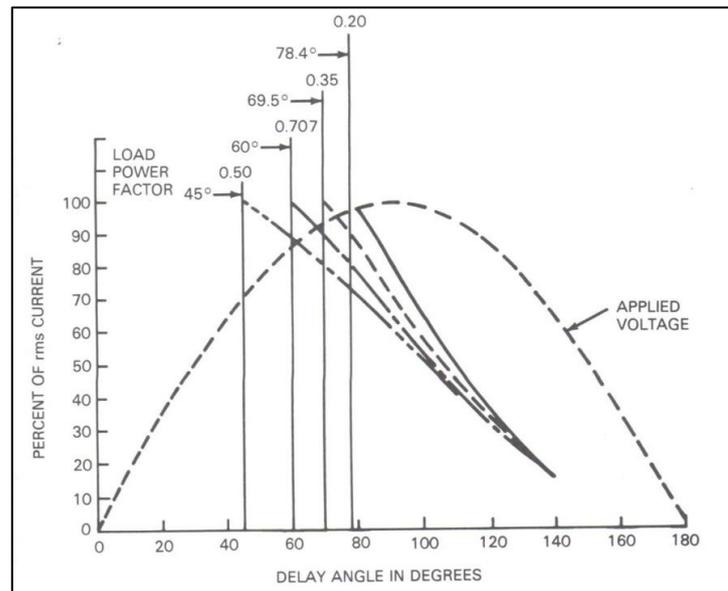


Figura 17 - Relação entre corrente rms e ângulo de atraso [AWS, 1991].

Note que pela Figura 17, podem-se variar ângulos de 0 a 180°, sendo que para 180° não ocorre condução e nenhum calor será gerado. Um fator importante é que o calor gerado pode ser controlado de acordo com a porcentagem da potência que pode ser aproveitada o ciclo, podendo então variar parâmetros de 0 a 100%, desse modo, para 100% tem-se um ângulo de 180° e para 50% um ângulo de 90°. Como o calor é proporcional ao quadrado da corrente, se variar de 100 para 20%, a geração de calor variará de 100 para 4%. [AWS, 1991].

Vale ressaltar que estes controladores controlam a tensão, sendo a corrente dependente das resistências envolvidas (resistência de contato, etc.). Além disso, para valores abaixo de 50%, a corrente de pico não será atingida, uma vez que o corte será antes que está seja alcançada.

5. Metodologia, Materiais e Validação

5.1. Equipamento de solda a ponto

A máquina sobre a qual o trabalho foi feito, é um equipamento da *ARO Spot Welding*, modelo “ARO T83”. Este equipamento foi doado ao Labsolda no ano de 1972, vindo da Alemanha.

A máquina contava com um sistema pneumático danificado. Este apresentava alguns componentes ressecados e trincados.

O sistema eletrônico (Figura 18) era comandado por *Ignitrons* com sinais analógicos. Este tipo de controle é bastante antigo, e a manutenção deste foi inviável por dificuldade de encontrar peças no mercado. Para resolver estes problemas um novo controle foi desenvolvido. Mais adiante será descrito sobre este.



Figura 18 - Antigo controle eletrônico (Ignitrons).

O transformador que a máquina apresenta fica instalado juntamente com o sistema mecânico (Figura 19). Este foi mantido, pois ainda podia operar e realizar com êxito sua função.

Além disso, o equipamento é composto por um cilindro e válvulas pneumáticas; braços condutores e eletrodos de cobre; mangueiras para refrigeração e condução de ar.

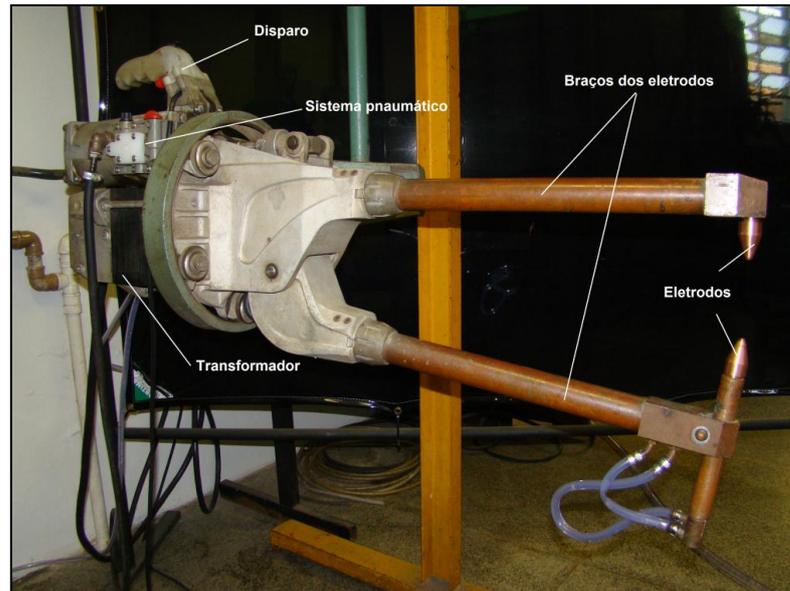


Figura 19 - Máquina de Solda Ponto da ARO Spot Welding.

Todas as mudanças e manutenções feitas serão descritas nas próximas seções.

5.1.1. Sistema Pneumático

O sistema pneumático do equipamento apresentava diversos problemas tais como mangueiras ressecadas e componentes trincados. Todos os componentes passaram por uma avaliação seguida de manutenção, limpeza algumas mudanças para que a máquina pudesse voltar a operar.

O sistema pneumático era composto por:

- Um cilindro pneumático do tipo Duplex de simples ação;
- Uma válvula de direção pilotada por diafragma;
- Uma válvula solenóide;
- Mangueiras que conduzem o ar pelo sistema.

O cilindro de simples ação (força é aplicada em apenas uma direção) que a máquina apresenta é do tipo Duplex. Este tipo de cilindro tem como característica dois êmbolos unidos por uma haste em comum, separados por um cabeçote intermediário. Ao serem pressurizados, as forças proporcionadas por cada êmbolo se somam, o que garante, para uma mesma pressão, uma força maior que a fornecida por cilindros de um único embolo.

No caso em questão, o cilindro apresenta duas câmaras, sendo que uma é dividida em duas. Note na Figura 20 que as câmaras 1a e 1b são ligadas pela camisa, a qual proporciona o movimento do embolo esquerdo. A câmara 2 é responsável por limitar o retorno total do pistão, conseqüentemente a abertura total dos braços. A vantagem disso é que numa escala de alta produtividade o tempo gasto com o processo diminui.

Ainda na mesma figura, uma válvula de retenção (R2 da Figura 28) permite a passagem de ar da câmara 1a para a 2, mas impede o retorno. Isso possibilita que a câmara 2 fique sob pressão durante a operação da máquina, limitando o retorno do pistão. Desse modo o controle de avanço pode ser feito apenas pela câmara 1.

Por uma questão de segurança, uma válvula manual de escape (A2 da Figura 28) possibilita que todo ar seja retirado do interior do cilindro.

Vale ressaltar que industrialmente, não são recomendados cilindros de simples ação, pois o retorno pode ser mais lento que o avanço. No caso do equipamento em questão, o fechamento dos eletrodos ocorre rapidamente, enquanto a abertura total se dá em um período pouco maior que o de fechamento, pois a mola tem de vencer a resistência do ar que flui pelos canais de condução. Além disso, as válvulas solenóides instaladas são de pequeno diâmetro, o que diminui a vazão do sistema. Foi recomendado para futuras instalações do equipamento que as válvulas fossem trocadas por válvulas de diâmetros maiores.

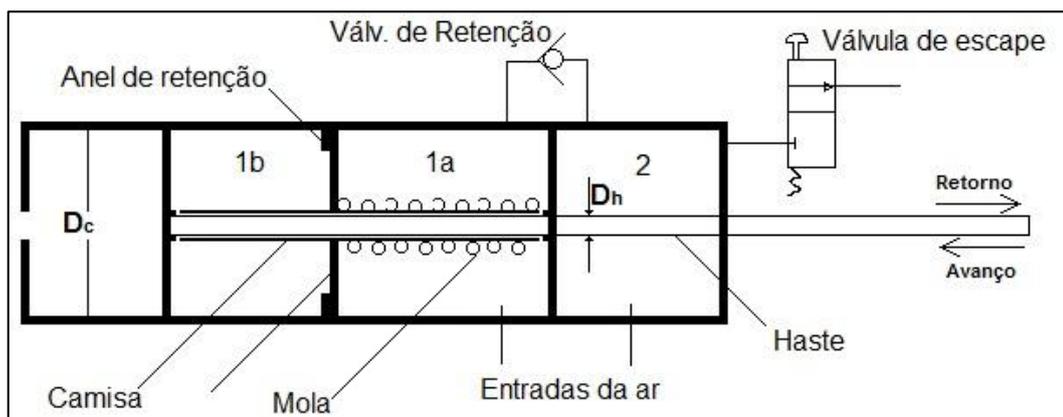


Figura 20 - Desenho esquemático do Cilindro.

O controle de entrada e saída de ar das câmaras é feito pelo conjunto de uma válvula direcional, apresentada na Figura 21, com duas válvulas solenóides (S1 e S2 da Figura 28) instaladas na fonte eletrônica. Estas duas válvulas fazem parte do novo conceito do

equipamento. Uma delas é responsável por permitir que o ar da rede seja direcionado para o cilindro, e a outra que o ar seja liberado. Estas são acionadas eletronicamente pela fonte.

A válvula direcional apresenta um controle de vazão feito pela chave preta (V1 da Figura 28), a qual, alimenta a câmara 1. A chave vermelha (R1 da Figura 28) funciona como uma válvula de retenção a qual impede que o ar saia da câmara 2. Essa retenção propicia um retorno parcial da haste, assim sendo, os braços abrem totalmente.

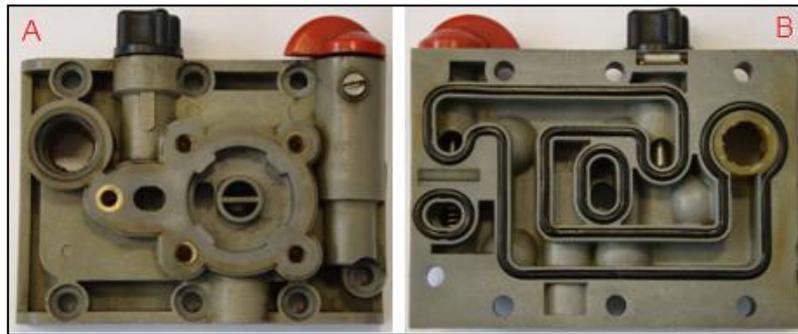


Figura 21 – Válvula direcional

A válvula direcional mostrada acima é pilotada por um diafragma (Figura 22) que vai conectado no lado externo. O diafragma (A1 da Figura 28) tem a função de permitir a saída de ar da câmara 1 para o ambiente. Este se fecha quando o sentido é de avanço.



Figura 22 - Diafragma.

O corpo do diafragma original (componente cinza da Figura 22) encontrava-se trincado, o que gerava vazamentos. Assim sendo, foi usinado uma peça similar em nylon para resolver o problema de perda de carga (Figura 23).

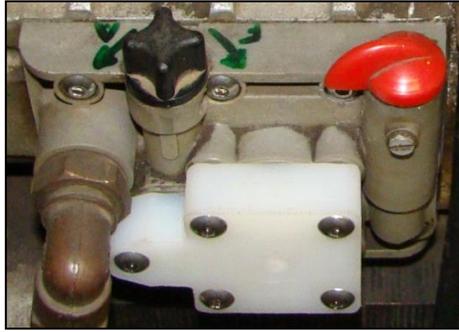


Figura 23 - Válvula montada com peça em nylon nova.

Para o controle da pressão do sistema, foi instalada uma unidade de tratamento filtro reguladora (F1 da Figura 28), isto é, além de regular a pressão, apresenta a função de filtrar o ar, retirando impurezas e umidade (Figura 24). Esta é regulada manualmente e a pressão ajustada é mostrada no manômetro incluso.

A pressão de entrada que a rede do bloco B do departamento de Engenharia Mecânica da UFSC (EMC) fornece, oscila entre aproximadamente 7 e 9bar. A pressão de saída que o regulador proporciona pode ser ajustada na faixa de 0,2 a 10bar, o que torna possível a variação da força de soldagem.

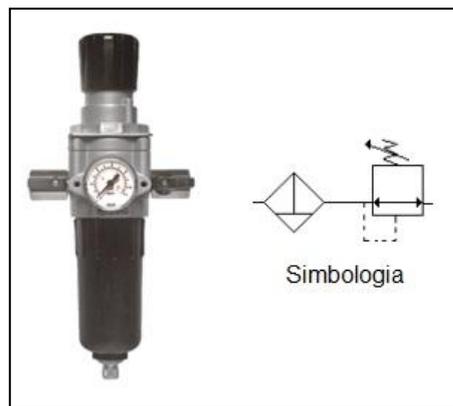


Figura 24 - Filtro Regulador de ar [Morbach.com.br modificado]

Para encontrar os valores de força que o pistão pode proporcionar, foi calculada a área total dos êmbolos do cilindro (Figura 20).

$$Ae = 2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (Dc^2 - Dh^2) \quad (6)$$

Onde

$D_c = 97,5\text{mm}$;

$D_h = 17,0\text{mm}$.

A área calculada para a determinação das forças é de $0,0145\text{m}^2$.

Com o valor da área, a força do pistão pode ser encontrada pela seguinte expressão:

$$F_p = P \cdot 100 \cdot A_e \quad (7)$$

Onde:

F_p = Força do pistão (kN);

P = Pressão ajustada (bar);

A_e = Área dos êmbolos (m^2).

O gráfico da Figura 25 mostra os valores de força em função da pressão ajustada.

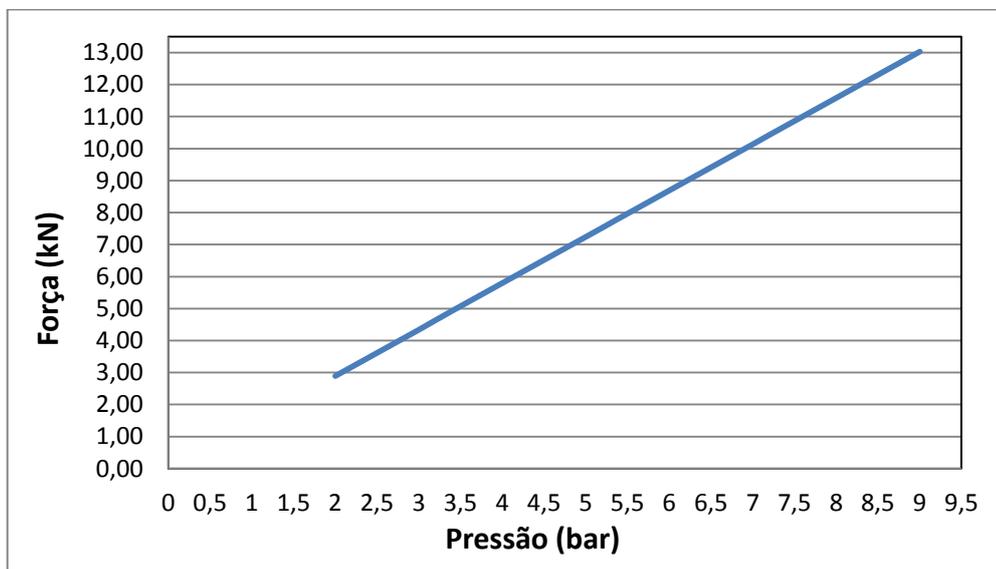


Figura 25 - Gráfico pressão x Força do pistão.

Mas esta não é a força efetiva de soldagem que será aplicada sobre as chapas. Devido à geometria dos braços dos eletrodos, o sistema apresenta um conjunto mecânico conhecido como braço de alavanca. Os braços da máquina são dois, sendo o superior fixo, e o inferior, que ligado ao pistão pneumático, proporciona valores diferentes para a força de soldagem. A

Figura 26 mostra esquematicamente a composição do sistema móvel dos braços do equipamento.

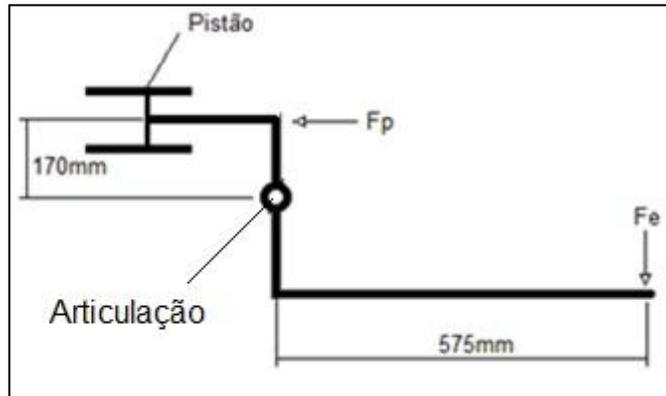


Figura 26 - Esquema braço de alavanca do sistema

Note que a força dos eletrodos (F_e) está aplicada sobre o maior braço, o que lhe fornece valores menores que a força do pistão (F_p).

A equação para o cálculo da força dos eletrodos é:

$$F_e = F_p \cdot \frac{0,170}{0,575} \quad (8)$$

F_e = Força dos eletrodos (kN);

F_p = Força do pistão (kN);

Os valores de F_e para cada pressão regulada no sistema são mostrados no gráfico a seguir.

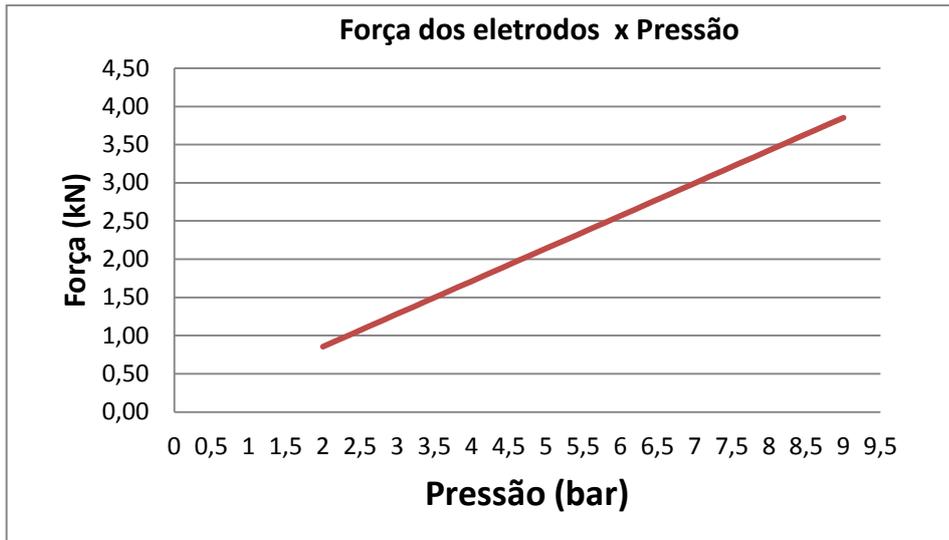


Figura 27 - Gráfico Força dos eletrodos x Pressão do sistema

No gráfico são mostrados valores para pressões de até 9bar, que foi a maior pressão medida. Desse modo, a força de soldagem máxima que o equipamento poderá fornecer é de aproximadamente 3,8kN. Segundo alguns parâmetros apresentado na literatura, esta força possibilita soldagem de chapas com espessura de até 2mm.

O circuito pneumático final é mostrado na Figura 28.

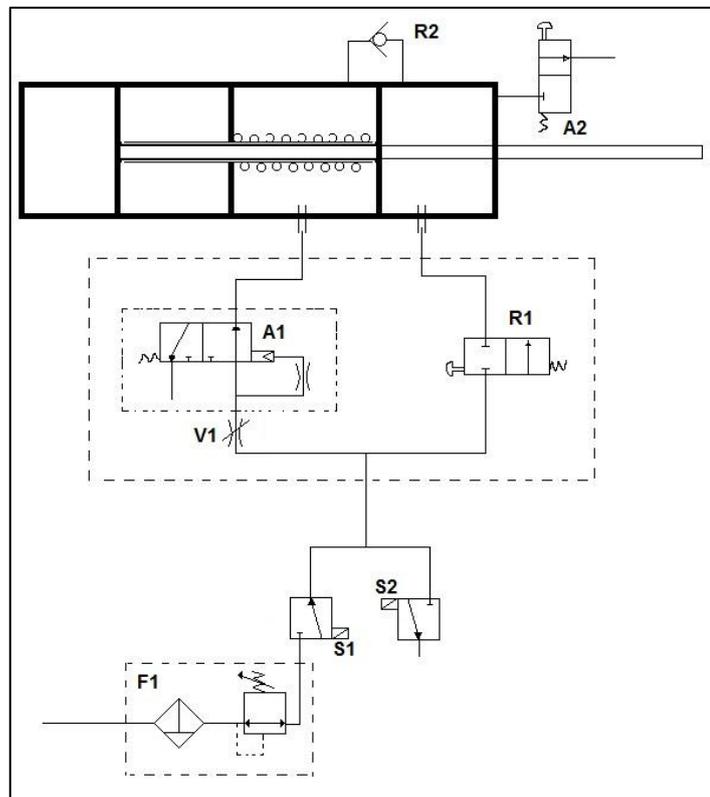


Figura 28 - Circuito Pneumático do equipamento.

5.1.2. Fonte de soldagem

A fonte de potência disponibilizada para o trabalho é controlada por tiristores SCR, descritos no capítulo 4. Os controladores SCR permitem que sejam regulados valores de 0 a 100%. Este ajuste, também chamado de razão de corte, delimita o quanto será utilizado do ciclo de corrente.

Este tipo de controle, não impõe corrente. Esta fica em função da resistência imposta pelas chapas no secundário. Assim sendo, todo processo deve ser validado empiricamente.

Um fator importante desta fonte em relação ao controle anterior, comandado por *ingnitrons*, é que os tiristores viabilizam certa variedade e facilidade de controles possíveis de ser feitos no processo de solda ponto, uma vez que sinais digitais apresentam esta característica.

O *software* programado disponibiliza o controle de ciclos de soldagem de acordo com a razão de corte e o tempo de cada fase do processo.

O parâmetro tempo, embora os equipamentos de solda ponto apresentem a regulagem em números ciclo de corrente, a fonte de potência disponível, ainda em fase de testes, controla os tempos em segundos. Para se ter o número de ciclos, o valor regulado na fonte deve ser multiplicado por 60. Este ponto foi discutido no decorrer do trabalho, e futuros programas já terão este controle em ciclos.

O controle que o *software* instalado, o qual foi utilizado para realizar os ensaios, divide o ciclo de soldagem em três intervalos, podendo cada um apresentar um tempo de soldagem (t_i) e razão de corte (A_i) independente do outro. Algumas aquisições serão mostradas adiante, onde será possível verificar melhor o controle imposto. A interface de controle da fonte de soldagem é mostrada na Figura 29.



Figura 29 – Fonte e Interface de controle.

Embora a imposição de rampas de subida e descida não tenha sido possível, o controle disponível pode ser considerado como um degrau, uma vez que se pode regular razões de corte menores para o início e o fim do ciclo de solda. Analogamente à rampa de subida, estes degraus impedem que uma elevada corrente seja atingida rapidamente, evitando salpicos oriundos da expulsão de material da zona de solda.

A Figura 30 mostra a aquisição do sinal, já tiristorizado, com diferentes razões de corte e tempos de soldagem. Note que a ordem dos valores de corrente está bastante baixa, uma vez que este sinal foi aquiritado no primário do transformador devido as dificuldades de se medir correntes na ordem de 10kA com os equipamentos disponíveis no laboratório. Uma maneira de aproximar é multiplicar os valores por 48, que é razão do transformador. Mais adiante será explicado como esta razão foi encontrada. Assim sendo, a corrente atingiu picos próximos à 9,5kA para um razão de corte igual a 50%, em chapas de aço baixo carbono com espessuras de 2mm.

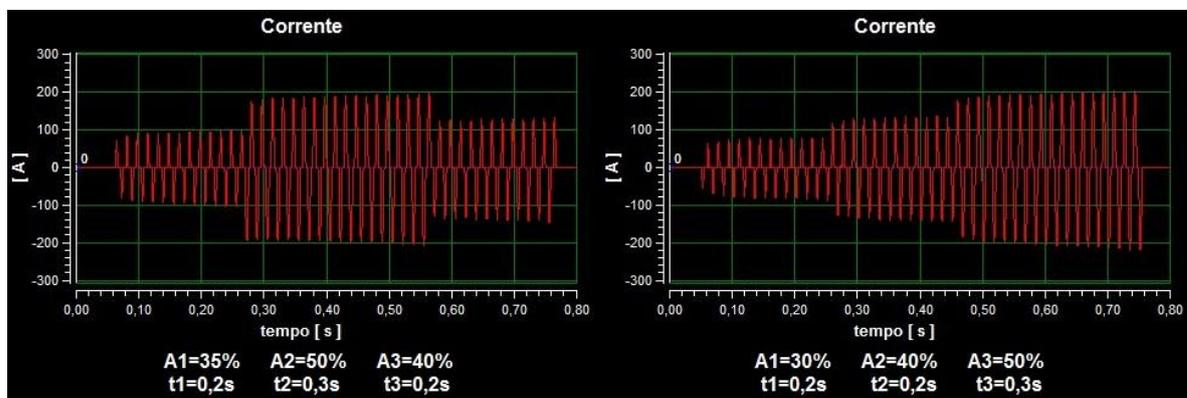


Figura 30 - Aquisição da corrente com diferentes razões de corte e tempos de soldagem.

Foi recomendado, mas não implementado devido ao curto prazo para conclusão do trabalho, um controle de rampa de subida, o qual varia gradativamente a razão de corte até que se atinja a razão desejada, e posteriormente uma rampa de descida, a qual diminui a razão de corte até cessar a passagem de corrente.

Os ciclos de soldagem mostrados na Figura 12 foram sugeridos como futuros programas para a fonte. Desse modo será possível analisar influências dos diferentes tempos e formas de onda sobre o processo de solda ponto.

Quanto ao transformador, foram feitos alguns ensaios com um divisor de corrente para mensurar a razão de transformação. O divisor, elaborado no laboratório, tinha uma razão igual a 10, medida através aquisição de sinal a partir de uma fonte de potencia na qual as correntes impostas eram sabidas. Posteriormente foram feitas aquisições no equipamento de solda ponto, medindo-se as correntes no primário e no secundário (eletrodos). Uma média de vários pontos tomados mostrou um razão do transformador igual a 1:48. Pode-se estabelecer uma incerteza de aproximadamente 2% na calibração do divisor, através do sistema de aquisição de sinais e o alicate padrão utilizado como referência.

5.1.3. Disparo

O disparo do equipamento pode ser dado tanto em um único estágio, isto é, uma vez que se aciona o gatilho, todo o ciclo de soldagem é realizado, incluindo fechamento e abertura dos eletrodos; mas também pode ser dado em etapas, ou seja, pode se ter o controle de fechamento e abertura dos eletrodos independente do disparo da corrente.

Na Figura 31 pode ser visto que no total são dois os gatilhos (vermelho e preto superior) para acionamento da máquina. O gatilho preto inferior é o acionamento da válvula de escape. O gatilho preto superior é responsável por permitir o contato elétrico entre a fonte e os eletrodos. Este pode estar tanto ligado quanto desligado. O gatilho vermelho é responsável pelo acionamento das válvulas solenóides, portanto aciona apenas o sistema pneumático.

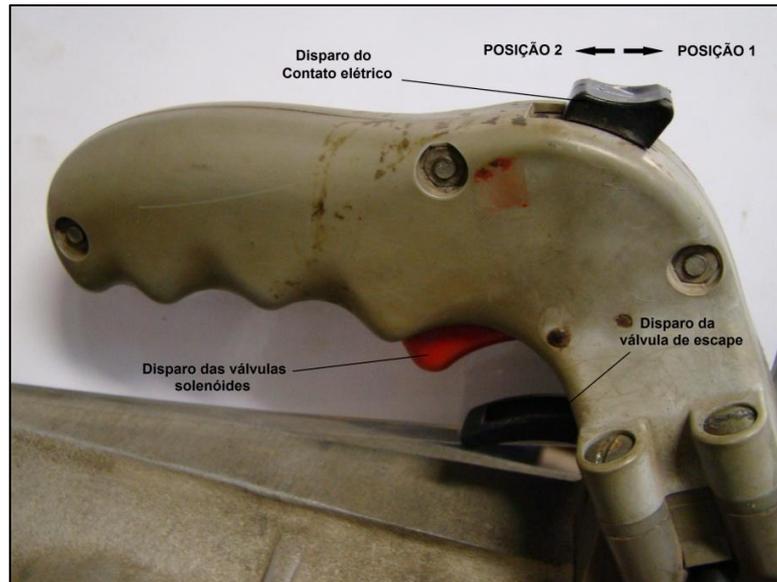


Figura 31 – Dispositivo de Disparo.

Para o disparo do único estágio, é necessário que o gatilho preto superior esteja acionado (Posição 2). Assim sendo, quando o gatilho vermelho for disparado, no momento de contato dos eletrodos com a peça já ocorrerá a passagem de corrente. Quando o ciclo de soldagem termina os eletrodos são abertos automaticamente.

Para o disparo em etapas, o gatilho do contato elétrico deve estar na posição 1, ou seja, sem contato. Desse modo, quando os eletrodos fecharem não ocorrerá a passagem de corrente. Esta só vai ser liberada com o contato elétrico na posição 2. Após o ciclo, a abertura dos eletrodos é dada pelo gatilho vermelho, portanto é um disparo para fechar e outro para abrir.

Estes acionamentos independentes são favoráveis para pesquisa, uma vez que se pode ter o controle independente das etapas. Já o disparo de único estágio é mais produtivo, melhor para aplicações práticas.

5.1.4. Eletrodos e refrigeração

Para o desenvolvimento do trabalho tiveram que ser usinados novos eletrodos, uma vez que os eletrodos antigos apresentavam a face danificada. Estes eram feitos da liga de cobre eletrolítico, não recomendada devido a baixa dureza e baixa resistência mecânica.

Os novos eletrodos foram fabricados por usinagem a partir uma barra de 25,4mm (1”) da liga RWMA classe 2 – CuCrZr. Esta liga pertence a classe 2 dos materiais apresentados na seção 2.5.2. Suas propriedades são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades da Liga RWMA classe 2 - CuCrZr.

Liga RWMA Classe 2 – CuCrZr	
Composição	Cr: 0,50 – 1,50%
	Zr: 0,05 – 0,25%
	Cu + Cr + Zr: Mínimo de 99,70%
Dureza Brinell	70 – 75
Resistência a tração (MPa)	500
Condutibilidade elétrica (%IACS)	80
Densidade (kg/m³)	8900
Normas equivalentes	UNS C18.150
	SAE CA 181

O projeto seguiu os estudos apresentados por Bowers *et al.* (1990), citados na seção 2.5.1. Estes estudos sugerem geometrias que melhoram a distribuição da densidade de corrente sobre a face dos eletrodos bem como a resistência mecânica destes. Para isso, foram feitos, em princípio, dois tipos de eletrodos, sendo um com corpo cônico e ângulo de cone elevado para propiciar melhor distribuição de corrente; e outro do tipo *pimple*, geometria sugerida por Bowers *et al.* a qual concilia uniformidade da distribuição de corrente sobre a face com resistência mecânica. Além disso, para chapas de 2mm, foi respeitada a equação (4), que determina o diâmetro da face do eletrodo. Nos apêndices A e B, ao final do trabalho, encontram-se os desenhos técnicos dos eletrodos.

No sistema de refrigeração dos eletrodos foram trocadas mangueiras danificadas por novas além de ser instalado um filtro para a água que circula dentro da máquina.

A água fornecida pela rede de água do departamento, a qual apresenta uma temperatura de aproximadamente 22 °C, antes de circular pela máquina, passa por um filtro para evitar que partículas ocasionem possíveis entupimentos dos canais de refrigeração. Após passar pelos eletrodos, a água volta para a rede de abastecimento sem reaproveitamento. Vale ressaltar que não foi utilizada nenhuma uma unidade de refrigeração e recirculação do mesmo fluido, isto pode ser facilmente adaptado em futuras instalações do equipamento.

O sistema de refrigeração embora bastante simples mostrou-se eficiente. A vazão medida, aproximadamente 4l/min, se encontra fora da faixa recomendada por Powell *et al.* (1996) que varia de 4l/min para chapas finas (até 1,5mm) e 7l/min para chapas mais grossas (1,5mm –

3,5mm). Porém como não serão realizados pontos de solda em escala industrial, isto é, grande quantidade de pontos por minuto, e sim para fins de pesquisas, esta vazão se mostrou eficaz.



Figura 32 - Eletrodos usinados em liga de CuCrZr.

5.2. Validação do equipamento

Feitas as mudanças, manutenções e instalações necessárias em todo o equipamento, a etapa de ensaios pode ser iniciada. O objetivo dos experimentos era verificar se o equipamento restaurado apresenta-se capaz de possibilitar desenvolvimento de projetos de P&D.

A bancada de ensaios utilizada é mostrada na figura 33.

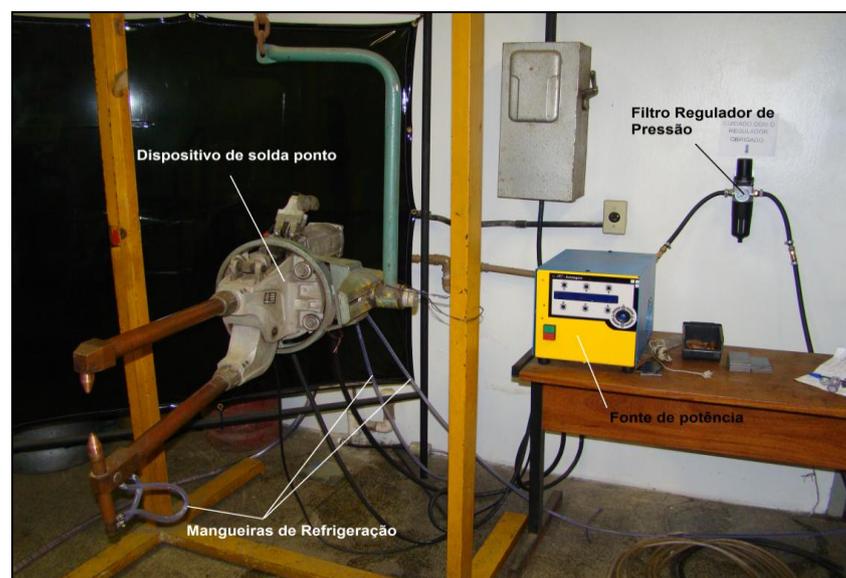


Figura 33 - Bancada de ensaios.

5.2.1. Corpos de Prova

Os corpos de provas utilizados para realização dos ensaios foram chapas de aço baixo carbono, ASTM A36, cujas propriedades são informadas na Tabela 3. As chapas possuem uma camada de oxido de ferro resultante do processo de laminação. Para todos os corpos de prova, foram feitos procedimentos de escovação, para remoção desta camada de oxido, e limpeza.

Tabela 3 - Propriedades da liga ASTM A36.

Propriedades ASTM A36	
Composição	Fe: 98%, C: 0,25 – 0,29%, Cu: 0,2% Mn: 1,03%, P + Si + S: 0,5
Dureza Brinell	150 – 180
Resistência a tração (MPa)	550
Módulo de Elasticidade (GPa)	200
Densidade (kg/m³)	7850

As dimensões dos corpos de prova são 80x50x2mm. Estas dimensões foram preferidas de modo a realizar dois pontos de solda num mesmo corpo de prova, podendo então ser analisadas possíveis variações do efeito *shunt*, discutido na seção 2.8.1, entre outras influências de pontos próximos entre si. Além disso, 2mm está próximo a espessura limite para os níveis de força que a máquina oferece.

5.2.2. Ensaio experimentais

Em princípio, foram feitos ensaios cuja qualidade do ponto de solda não importava, e sim o funcionamento do equipamento como um todo, isto é, verificar refrigeração, controle, alinhamento dos eletrodos, detectar possíveis vazamentos na rede de ar comprimido, funcionamento do cilindro pneumático, sistema de aquisição de sinais, entre outros fatores que eram cruciais para os ensaios posteriores.

A validação do equipamento foi feita de acordo com praticidade de manuseio e execução do processo, bem como resultados de ensaios a partir da geometria do ponto de solda.

Para o início dos ensaios, alguns fatores foram definidos pelos cálculos e recomendações dadas pelos estudos apresentados na revisão bibliográfica. Estes definem diâmetros mínimos da lente de solda, máxima densidade de corrente, diâmetro da face dos eletrodos, tempo de solda, força dos eletrodos, entre outros fatores, informados na tabela 4.

Tabela 4 – Parametrização dos ensaios

Parâmetro / Propriedade	Equação	Valor
Diâmetro da face do eletrodo	$Df = 5 \cdot \sqrt{e}$	7,1 mm
Densidade de corrente máx.	$Dc = 192 + 480 \cdot EXP^{-e}$	256,9 A/mm ²
Corrente eficaz máx.	$Dc \cdot Af$	10,1 kA
Tempo de soldagem	----	0,5s
Diâmetro da lente mín.	$3,5 \cdot \sqrt{e}$	4,95 mm
Força dos eletrodos	----	3,4 N

Como para equipamentos controlados por tiristores SCR não são definidos valores de corrente e tensão, foram realizados ensaios variando-se as razões de corte e os tempos de cada fase, para verificar, além da possibilidade de análise das influências de cada fase, uma parametrização que garantisse um ponto de solda adequado pela norma AWS SAE D8.9.

O diâmetro mínimo aceitável pela norma AWS SAE D8.9, de acordo com a equação apresentada na Tabela 4, ficou definido em 4,95mm. Vale ressaltar que não foram realizados ensaios mecânicos para analisar resistência dos pontos de solda. A validação do equipamento foi feita por análises macrográficas das amostras embutidas.

O controle utilizado para os ensaios permitia uma divisão do ciclo de soldagem em três fases, isto é, pode-se regular razões de corte e tempos distintos para cada fase. Os tempos de fechamento e abertura dos eletrodos foram realizados de acordo com o operador, ou seja, ao fechar os eletrodos, ficava a mercê do operador iniciar a passagem de corrente e abrir os eletrodos a hora que lhe conviesse. Este controle de disparo e *software* foi descrito nas seções 5.1.3 e 5.1.2 respectivamente.

Foram realizadas três series de experimentos com parâmetros diferentes. Uma delas, a série A consistia em um degrau gradativo, isto é, da primeira para segunda e da segunda para

a terceira fase, a razão de corte era aumentada, conseqüentemente a corrente eficaz de cada fase. A fase de maior razão de corte e tempo foi a terceira.

A segunda serie de ensaios, Serie B, foi feita com um degrau de subida da primeira para a segunda fase, e um degrau de descida da segunda para a terceira fase. Nesta, de maior razão de corte e o maior tempo ficou na segunda fase do ciclo.

Na terceira serie de experimentos, Serie C, foi mantida uma razão de corte e tempo iguais na primeira e segunda fase, aumentado tempo e razão de corte apenas na terceira fase.

Os parâmetros utilizados em cada serie são mostrados nas tabelas seguintes. Os termos A e t são referentes à razão de corte e tempo. Os índices são referentes a cada fase.

Tabela 5- Parâmetros dos ensaios A.

Corpo de prova	A1	A2	A3
	t1	t2	t3
CP.A1	30	40	50
	0,1	0,1	0,3
CP.A2	35	45	55
	0,1	0,1	0,3
CP.A3	38	48	58
	0,1	0,1	0,3
CPA4	40	50	60
	0,1	0,1	0,3

Tabela 6 - Parâmetros dos ensaios B.

Corpo de prova	A1	A2	A3
	t1	t2	t3
CP.B1	50	50	50
	0,1	0,3	0,1
CP.B2	50	55	50
	0,1	0,3	0,1
CP.B3	50	60	50
	0,1	0,3	0,1

CPB4	50	65	50
	0,1	0,3	0,1

Tabela 7 - Parâmetros dos ensaios C.

Corpo de prova	A1	A2	A3
	t1	t2	t3
CP.C1	50	50	55
	0,1	0,1	0,3
CP.C2	50	50	60
	0,1	0,1	0,3
CP.C3	50	50	63
	0,1	0,1	0,3
CPC4	50	50	65
	0,1	0,1	0,3

Todos os ensaios foi utilizado um sistema de aquisição de sinais. Neste *software* foi possível verificar as correntes eficazes e o número de ciclos de cada fase do processo.

Os resultados dos ensaios e oscilogramas serão discutidos na seção seguinte.

5.2.3. Resultados e discussões

5.2.3.1. Ensaio

Após a realização dos ensaios, os corpos de prova foram cortados no centro da lente de solda. As amostras foram embutidas, lixadas e polidas para uma análise macrográfica. A partir desta análise foi possível verificar o diâmetro das lentes de solda e a penetração das mesmas.

Além das macrografias, a partir da análise dos oscilogramas foi possível verificar as correntes eficazes do processo, tanto de todo o ciclo quanto de cada fase separadamente. Esta análise é interessante, pois se pode verificar se a corrente atingiu valores acima da densidade máxima calculada anteriormente.

Todos os dados foram analisados através do programa *Microsoft Excel*, onde foi possível plotar gráficos e fazer uma análise dos parâmetros e resultados finais dos pontos. Estas tabelas podem ser vistas nos apêndices ao final do texto.

Tomando todos os valores de razão de corte regulados nas três series realizadas e os valores de corrente eficaz resultante, foi plotado o gráfico apresentado na Figura 34.

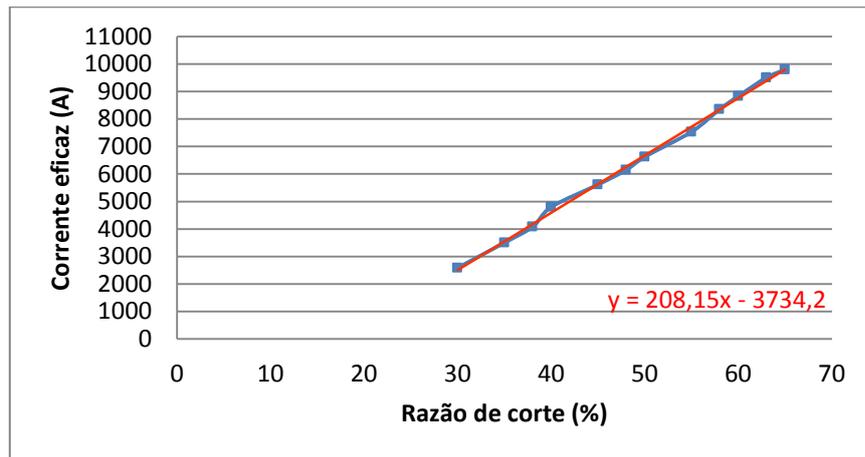


Figura 34 - Gráfico Corrente eficaz (I_e) x Razão de corte (A_i).

Note que uma razão praticamente linear foi estabelecida. A linha de tendência tomada mostrada na equação poderia muito bem ser utilizada para regular a corrente desejada de acordo com as razões de corte. Lembrando que estes resultados são específicos para os corpos de prova ensaiados, ou seja, chapas de 2mm da liga ASTM A36.

A corrente eficaz máxima estabelecida na seção anterior foi de 10,1 kA. Embora a corrente máxima atingida na maioria dos ensaios tenha passado esse limite, as correntes eficazes de todos os ensaios ficaram abaixo deste limite. A maior registrada foi no ensaio CP.C4, onde I_e atingiu 9,79 kA, e a menor no ensaio CP.A1, com valor de 5,76 kA. (Vide APÊNDICE C).

Quanto aos diâmetros das lentes de solda resultantes, apenas a Série A apresentou diâmetros menores do que o especificado pela norma AWS SAE D8.9. Os menores diâmetros encontrados foram de 4,7 mm para os ensaios CP.A1 e CP.A2, e 4,8 mm para o CP.A4. As lentes de solda resultantes dos ensaios da Série B e C ficaram todos acima do 4,95 mm, valor calculado na seção anterior.

O valor recomendado, segundo o Manual Rukki (2006) é de $4.e^{1/2}$, onde e é a espessura da chapa. Este valor, para o caso em questão é de 5,65mm. Os corpos de prova que melhor se aproximaram deste valor foram o CP.B1, com 5,6 mm; CP.B2 com 5,7 mm; e o CP.C1 com 5,4 mm. os outros ensaios das series B e C apresentaram diâmetros entre 6,4 e 6,7 mm.

Uma breve comparação dos resultados das Séries B e C, mostra que a razão de corte e tempo maiores regulados na fase dois (Série B), ou na fase 3 (Série C), não alteraram o tamanho da lente. Para o pares de ensaios CP.B2 e CP.C1; CP.B3 e CP.C2; e CP.B4 e CP.C4, os valores das correntes eficazes e diâmetros das lentes não tiveram uma diferença significativa, porém os pontos resultando na Série C apresentaram poros. (Vide APÊNDICE D)

Pode-se concluir por meio desses pares acima citados que, a rampa de descida, no caso um degrau (Série B), realmente interfere na solidificação de aços de baixo carbono como dito na seção 2.7.3.4 uma vez que os ensaios da Série C não apresentavam este degrau.

Nos oscilogramas (APÊNDICE E) podem ser vistos os picos de corrente, bem como o número de ciclos de cada fase e de todo o processo. Os degraus, comentados acima, também podem ser vistos.

Um ponto importante de ser comentado é que em todos as lentes de solda é possível verificar que realmente ocorreu fusão de ambas as peças, uma vez que a amostra apresentam características da solidificação, como por exemplos a formação dendrítica no sentido do gradiente de temperatura.

5.2.3.2. Dificuldades encontradas

Durante a realização dos ensaios, algumas dificuldades foram encontradas em relação à operacionalidade do equipamento. Dentre elas, a que mais dificultou os ensaios foi o alinhamento dos eletrodos.

No equipamento, para o alinhamento dos eletrodos, podem ser regulados três componentes: cada braço pode girar sobre o próprio eixo e o suporte do eletrodo inferior pode ser ajustado de modo que o eletrodo inferior aproxime ou afaste-se do eletrodo superior.

O ajuste dos eixos dos braços deve garantir que os eixos dos eletrodos fiquem colineares quando fechados. Desse modo os braços devem ser girados até que esta relação de colinearidade seja estabelecida. Quando esta relação não é atingida, esforços resultantes tendem a girar os braços dos eletrodos, podendo ocasionar um escorregamento destes sobre o ponto de solda.

A aproximação ou afastamentos dos eletrodos pelo suporte inferior deve ser ajustado para cada espessura de chapa a ser soldada. Isso porque esta variação de distância interfere no paralelismo das faces dos eletrodos. Uma vez que os braços formam um ângulo enquanto aberto, estes devem estar paralelos enquanto fechado, logo as faces também ficam em paralelo. Esta relação de paralelismo é crucial para que a densidade de corrente seja distribuída por toda a face do eletrodo de maneira uniforme, evitando regiões de maior densidade sobre o ponto soldado. Se isto não for observado, a consequência é uma lente assimétrica com indentações elevadas.

Além do alinhamento dos eletrodos, as limitações quanto a força disponível não possibilitam que o equipamento opere sobre chapas de espessuras maiores que 2 mm. Como foi descrito na seção 5.1.1., esta limitação é oriunda da baixa pressão que a rede de ar comprimido do departamento de engenharia mecânica da UFSC (EMC) oferece. A máxima pressão registrada, 9bar, pode gerar uma força de soldagem de 3,85 kN. Por exemplo, segundo a literatura, para chapas de 3,5 mm a força recomendada é de 5,7 a 8 kN dependendo do material.

Além das limitações operacionais da parte mecânica do equipamento, a fonte de soldagem não apresentava diferentes controles que possibilitassem ciclos de soldagem mais completos, que incluíssem intervalos variados de corrente, bem como fases adicionais, por exemplo, uma fase de forja.

6. Considerações finais

A restauração do equipamento realizada, objetivo principal do trabalho, foi feita visando colocar o equipamento de soldagem a ponto em operação. Isto possibilitaria o uso deste em projetos de P&D e outras atividades relacionadas no departamento.

Embora o equipamento tenha apresentado algumas limitações quanto à força mecânica, refrigeração, este se mostrou apto a operar. Os resultados dos ensaios, bem como a realização destes, mostraram que o equipamento possibilita pesquisas em áreas como formação da lente de solda, propriedades mecânicas dos pontos, rigidez e eficiência de equipamentos, fenômeno da fusão e solidificação no processo de soldagem a ponto, além de outros ramos da pesquisa em tecnologia da soldagem por resistência, como por exemplo, simulação numérica e eletrodos.

Vale ressaltar que neste processo, a otimização dos eletrodos bem como sua refrigeração é crucial para o desenvolvimento desta tecnologia. Isto abre um leque de oportunidades para que o laboratório inicie pesquisas em simulação numérica de processos de soldagem, neste caso, estudos em transferência de calor e deformação dos eletrodos. Este tipo de pesquisa pode ser muito bem realizada com programas de simulação disponíveis no mercado, como por exemplo, ANSYS e EES.

Uma curiosidade encontrada nos resultados que vale chamar atenção foi a formação de poros nas lentes de solda na serie de ensaios C. Para mesmos parâmetros regulados entre a serie B e serie C, invertendo-se apenas a fase de maior razão e tempo, embora as lentes tenham apresentado diâmetros relativamente iguais, as lentes de solda da Série C apresentaram poros. Isto desperta uma curiosidade sobre o processo, abrindo uma oportunidade de pesquisa em cima destes parâmetros. Um estudo neste contexto pode levantar dados tanto para análise do processo, bem como para o desenvolvimento do guia prático de soldagem do equipamento, deixado como recomendação para futuros trabalhos.

Outro foco que o trabalho apresentou foi a fabricação de eletrodos. O texto apresentou estudos baseados em simulações que otimizam a geometria do eletrodo favorecendo refrigeração e resistência mecânica. Isto serve de premissa para desenvolvimento de pesquisas futuras. Nas industria que fazem o uso deste processo em larga escala, a manutenção dos eletrodos e melhorias para aumentar a vida útil deste tem extrema importância econômica,

sendo um dos focos principais dos investimentos das empresas que fazem o uso de soldagem a ponto.

Comparando-se então, o equipamento atual com o estado que este se encontrava antes da manutenção podemos ressaltar alguns pontos:

- Nova fonte tiristorizada possibilita melhor controle do processo. Estes controladores apresentam uma tecnologia mais avançada que os antigos *ignitrons*, os quais a máquina dispunha. O controle do processo se tornou mais simples e a interface de controle através de *displays* digitais facilitou a regulagem de parâmetros. A antiga interface era toda analógica e se encontrava completamente degradada (oxidação, indicações escritas desgastadas, etc.).

- Regulador de pressão possibilita que a força dos eletrodos possa ser alterada de acordo com a espessura e material da chapa a ser soldada. O antigo sistema não apresentava este tipo de controle, sendo assim a força dos eletrodos era igual para todos os procedimentos. Embora a regulagem da pressão seja manual e uma vez ajustada não se pode variar durante o procedimento, esta adaptação já possibilita uma grande variação no processo que o equipamento antigo não possibilitava. Para melhores controles de pressão é recomendado que se utilize válvulas proporcionais.

- Os eletrodos antigos foram trocados por novos. Uma liga mais dura e com melhores propriedades mecânicas, térmicas e elétricas foi utilizada para usinagem dos novos eletrodos. Além disso, como foi citado antes, a geometria dos eletrodos seguiu os estudos de Bowers *et al.*, apresentados na revisão bibliográfica, que melhoram o desempenho dos eletrodos. Os eletrodos antigos estavam com a face danificada e apresentava sinais de material diluído sobre a face.

- Diafragma da válvula direcional trocado por nova peça usinada em nylon. O diafragma apresentava trincas, portanto a vedação não era eficiente e, conseqüentemente, havia perda de carga no sistema pneumático. Além disso, o cilindro passou por um processo de limpeza e lubrificação, embora estivesse em boas condições.

- Pequenos detalhes como mangueiras ressecadas, vazamentos de ar nas juntas, sujeira sobre a máquina, desalinhamento de eletrodos, filtro do sistema de refrigeração, entre outros foram todos arrumados e trocados evitando estes problemas durante o procedimento de soldagem. Estes tipos de componentes devem ser constantemente verificados evitando futuros problemas com a máquina.

7. Propostas e recomendações para trabalhos futuros

Para que futuras pesquisas possam ser realizadas em diferentes aspectos da soldagem a ponto por resistência ôhmica, visado aperfeiçoar o equipamento e melhorar condições de controle, são propostas algumas alterações:

- Instalação de unidade refrigeradora para evitar desperdício de água e possibilitar estudos referentes à refrigeração dos eletrodos;

- Adaptação de um compressor que forneça ar comprimido a pressões acima da disponível pelo departamento, possibilitando soldagem de chapas com espessuras maiores que 2mm;

- Trabalhar com pneumática proporcional, possibilitando controle de pressão por válvula de comando eletrônico, podendo então variar a força de soldagem durante um processo de maneira mais eficiente e rápida;

- Programar controles adicionais que possibilitem ciclos de soldagem mais complexos. Uma proposta bastante simples é o controle de rampa de subida e descida para aços de baixo carbono.

Em relação a possíveis pesquisas, algumas sugestões são:

- Analisar a influência de diferentes geometrias de eletrodos, isto é, cônica, *pimple*, esférico, cilíndrico, entre outros, na vida útil do mesmo e na formação da lente de solda;

- Levantar curvas que relacionem razão de corte com corrente eficaz para diferentes espessuras de chapas, podendo então posteriormente, levantar um guia prático de parametrização da máquina. Isso facilitaria a preparação de corpos de prova para outros projetos do laboratório por exemplo;

- Realizar filmagem em alta velocidade para análise da formação da lente de solda.

REFERÊNCIAS

ARAVINTHAN, A.; NACHIMANI, C. “**Analysins os spot weld growth on mild and stainless steel**”. Artigo, Welding Journal, Agosto, 2011.

AURES, J.E.V. “**Estudo da formação, geometria e resistência do ponto na soldagem por resistência: uma abordagem estatística**”. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) – Universidade de Brasília, 2006.

BLAIR, R.H. “**Shunt circuit impedance in spot welding 1/8-, 1/4- e 1/2`` mild steel**”. Welding Journal, outubro, 1947.

BOWERS, R.J; SORENSEN, C.D; EAGAR T.W. “**Electrode geometry in resistance spot welding**”. Artigo, Welding Journal, fevereiro, 1990.

CHANG, H.S.; CHO, H.S. “**A study of the shunt effect in resistance spot welding**”. Welding journal, Agosto, 1990, pp. 308-s – 317-s.

DAMASCO, A. “**Soldagem a ponto por resistência elétrica de juntas de chapa/chapa e chapa/tubo de aço de baixo carbono com diferentes composições químicas, espessuras e revestimentos**”. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, 1995.

GOULD, J.E.; PETERSON, W.A. “**Resistance welding reach evaluations of coated steels – part two**”. Dynamic Resistance Studies, Edison Welding Institute, Março, 1988.

HEUREUX, G.E; BELOTTE, E.J. “**Soldadura Por Resistência**”. Primeira Edição, Editora Hispano Europea, Barcelona, 1968.

HOU, Z.; WANG, Y.; LI, C.; CHEN, C. “**An analysis of resistance spot welding**”. Artigo, Welding Journal, Março, 2006.

KUSANO, H; “**Electrode dressing makes a better spot welding**”. Artigo, Welding Journal, Maio, 2011.

KARAGOULIS, M.J. “**A nuts-and-bolts approach to the control of resistance spot welding**”. Welding Journal, Julho, 1994, pp. 27 – 31.

MACHADO, I.G; “**Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**”. Porto Alegre, 1996.

METALS HANDBOOK, Vol. 6 – **“Welding and Brazing”**. Eighth Edition, ASM – American Society for Metals, Metals Park, Ohio 44073, E.U.A, 1971.

PAES, M.T.P.; GUIMARÃES, A.S.; REBELO, J.M.A.; NATAL, Y.D, AZAMBUJA, S. **“Soldagem a ponro de chapas finas galvanizadas, Parte II – Aplicação em chapas com 0,8mm de espessura e alta resistência”**. XV ENTS, Novembro, 1989.

POWELL, H.J; WESTGATE, S.A; WIEMER, K; **“Practical guide to process and quality control for resistance spot welding”**. The Welding Institute, Report 569, Agosto, 1996.

SANTOS, R.A. **“Apostila de pneumática”**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Santa Catarina.

TSAI, C.L; DICKINSON, D.W; **“Modeling of resistance spot welding nippet growth”**. Artigo, Welding Journal, Fevereiro, 1992.

WELDING HANDBOOK, Vol. 2 – **“Welding Processes”**. Eighth Edition, AWS - American Welding Society, Miami, Florida 33135, E.U.A, 1991.

WEINER, E; **“Soldagem”**. ABM – Associação Brasileira de Soldagem, 15a edição ampliada, São Paulo, 1980.

YANG, Y.S; LEE, S.H. **“A Study on the joining strength os laser spot welding for automotive applications”**. Journal of Materials Processing Technology 94. P. 151, 1999.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Desenho técnico do eletrodo de geometria *Pimple*

1

2

3

4

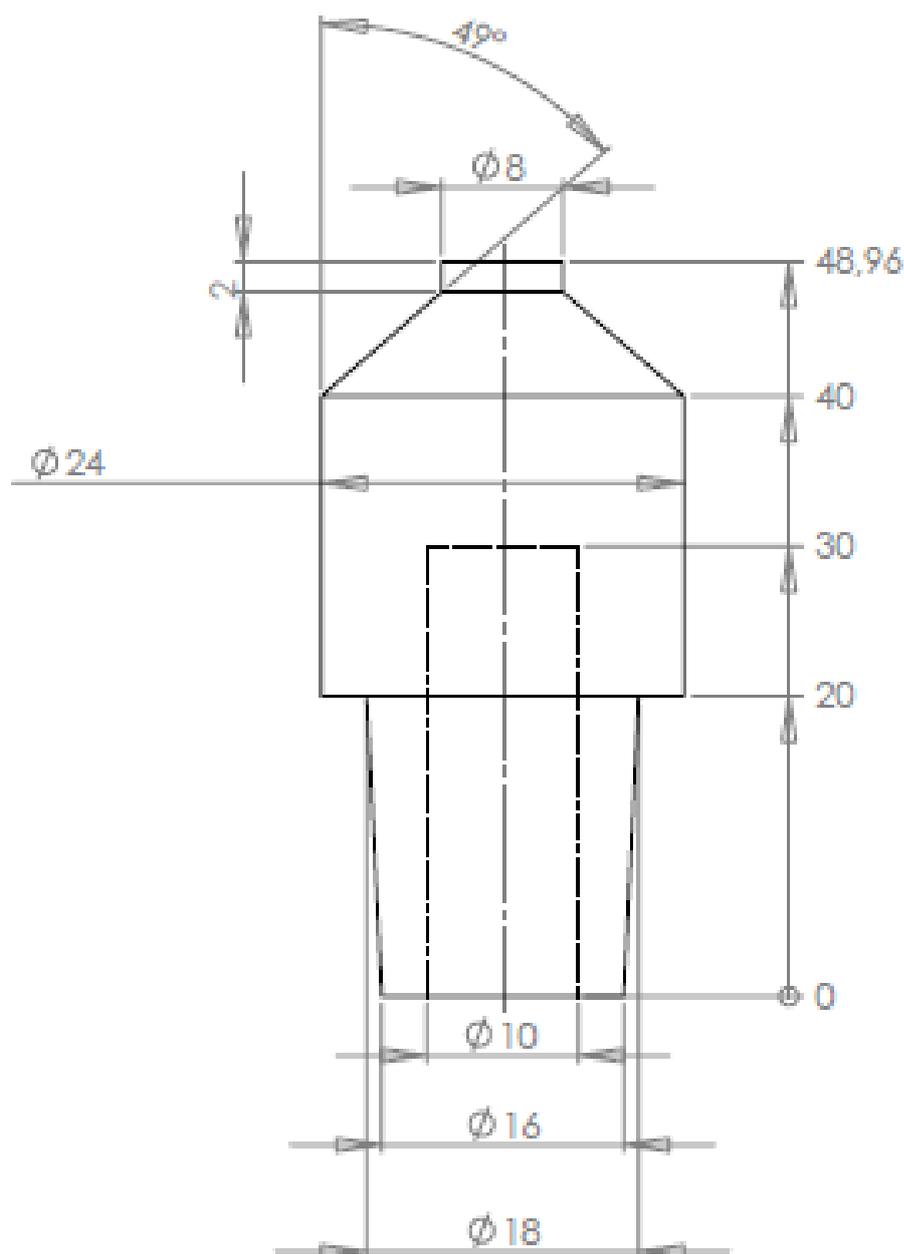
A

B

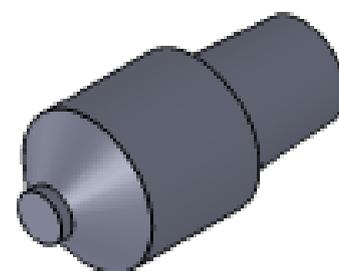
C

D

E



Qntd: 2pcs.



1:1



LABSOLDA

PROJETO
Ivan Figozzo

DESENHO

APROVAÇÃO

MATERIAL

cobre Eletrolítico

ACABAMENTO

ESTE DESENHO É PROPRIEDADE DA
LABSOLDA. É PROIBIDA A SUA REPRODUÇÃO
OU DIVULGAÇÃO TOTAL, OU PARCIAL,
SEM A AUTORIZAÇÃO PRÉVIA DA MESMA.

DATA

DATA

DATA



DIMENSÕES

A4

ESCALA

2:1

DESCRIÇÃO

Eletrodo solda-ponto

SUB-COMPRIMENTO

COMPRIMENTO

ARQUIVO

eletrodo_misto_8mm

DESENHO Nº./PART. Nº.

D:\C:\Users\Ivan\Documents

FOLHA

1 DE 1

REVISÃO

APÊNDICE B – Desenho técnico do eletrodo de geometria cônica.

1

2

3

4

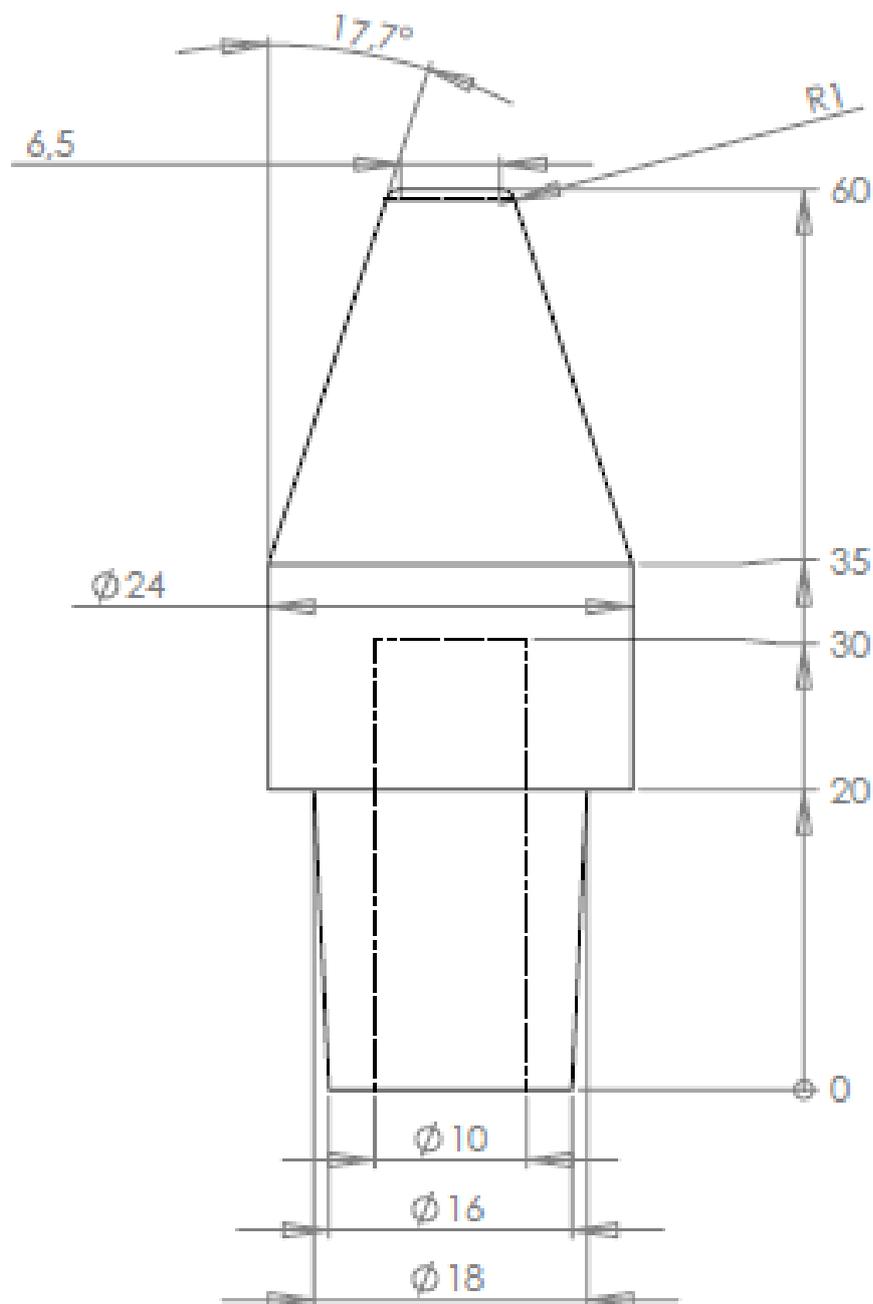
A

B

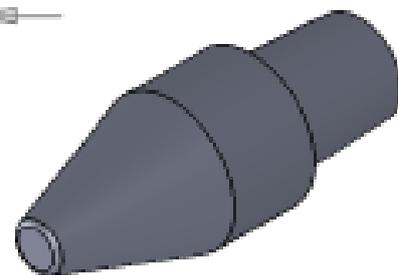
C

D

E



Qntd: 2pçs.



1:1



LABSOLDA

PROJETO
Ivan FigozzoDATA
20/09/2011

DESENHO

DATA

APROVAÇÃO

DATA

MATERIAL

cobre Eletrolítico

ACABAMENTO

ESTE DESENHO É PROPRIEDADE DA
LABSOLDA. É PROIBIDA A SUA REPRODUÇÃO
OU DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL
SEM A AUTORIZAÇÃO PRÉVIA DA MESMA.

1º ANJO

ORIENTAÇÃO

A4

FIBRO

9

ESCALA

2:1

DESCRIÇÃO

Eletrodo solda-ponto

SUB-CONTEÚDO

CONTEÚDO

ARQUIVO DATA/CONT. REVISÃO/REVISOR

Eletrodo_TC_6,5mm

DESENHO Nº./PART. Nº.

FOLHA

1 DE 1

REVISÃO

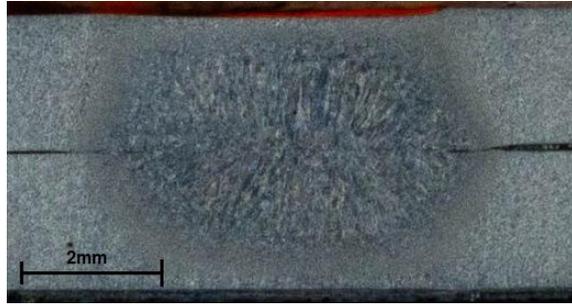
APÊNDICE C – Resultados dos ensaios (Planilha Microsoft Excel)

Degrau Gradativo				
Série A	A1	A2	A3	DL (mm)
	t1	t2	t3	t (mm)
A1	30	40	50	4,7
	0,1	0,1	0,3	1,3
le (A)	2592	4800	6624	5664
Imax (A)	5760	9168	13344	***
A2	35	45	55	4,7
	0,1	0,1	0,3	1,6
le (A)	3504	5616	7536	6528
Imax (A)	5808	9168	13344	***
A3	40	50	60	6
	0,1	0,1	0,3	1,4
le (A)	4560	6480	8832	7680
Imax (A)	8736	11328	14544	***
A4	38	48	58	4,8
	0,1	0,1	0,3	1,4
le (A)	4080	6144	8352	7200
Imax (A)	8784	11472	14400	***

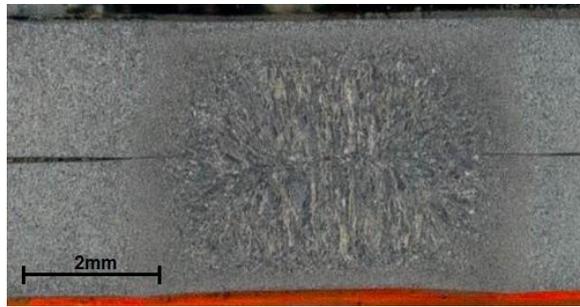
Degrau de subida e descida				
Série B	A1	A2	A3	DL (mm)
	t1	t2	t3	t (mm)
B1	50	50	50	5,6
	0,1	0,3	0,1	1,5
le (A)	6192	6240	6576	6336
Imax (A)	11376			***
B2	50	55	50	5,7
	0,1	0,3	0,1	1,6
le (A)	6864	7584	6864	7296
Imax (A)	11952	12960	12000	***
B3	50	60	50	6,4
	0,1	0,3	0,1	1,7
le (A)	7056	8592	7296	8064
Imax (A)	12240	14016	12672	***
B4	50	65	50	6,5
	0,1	0,3	0,1	1,8
le (A)	7440	9504	7872	8784
Imax (A)	12720	15360	13200	***

Degraus de subida apenas				
Série C	A1	A2	A3	DL (mm)
	t1	t2	t3	t (mm)
C1	50	50	55	5,4
	0,1	0,1	0,3	1,6
le (A)	6960		7824	7488
lmax (A)	12288		13440	***
C2	50	50	60	6,5
	0,1	0,1	0,3	1,5
le (A)	6624		8880	8064
lmax (A)	11760		14736	***
C3	50	50	63	6,6
	0,1	0,1	0,3	1,6
le (A)	7248		9504	8688
lmax (A)	12480		15408	***
C4	50	50	65	6,7
	0,1	0,1	0,3	1,6
le (A)	6864		9792	8736
lmax (A)	11952		15744	***

APÊNDICE D – Macrografias das amostras embutidas



CP.A1



CP.A2



CP.A3



CP.A4



CP.B1



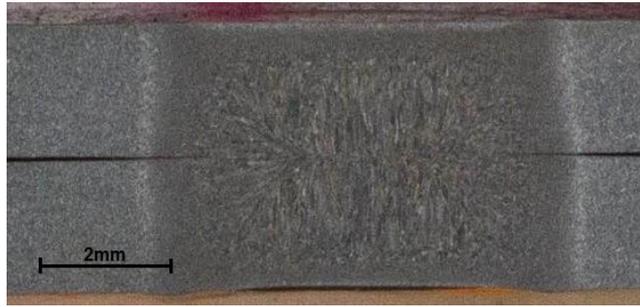
CP.B2



CP.B3



CP.B4



CP.C1



CP.C2



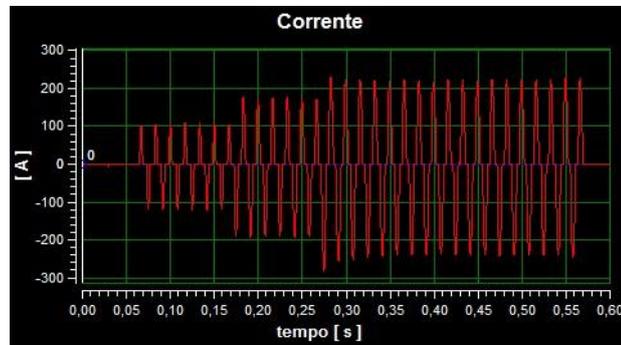
CP.C3



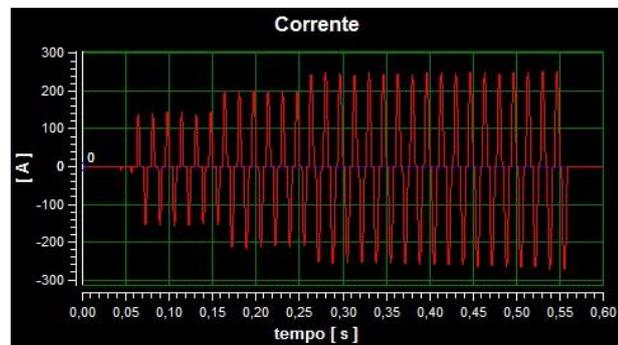
CP.C4

APÊNDICE E– Oscilogramas dos ensaios apresentados

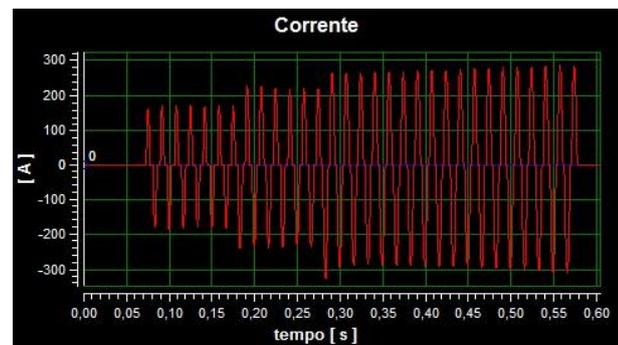
Os valores de corrente mostrados nos oscilogramas abaixo devem ser multiplicados pela razão do transformador, 1:48, uma vez que este sinal foi adquirido no primário.



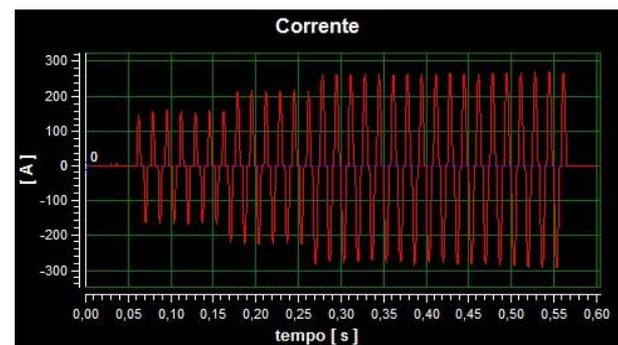
CP.A1



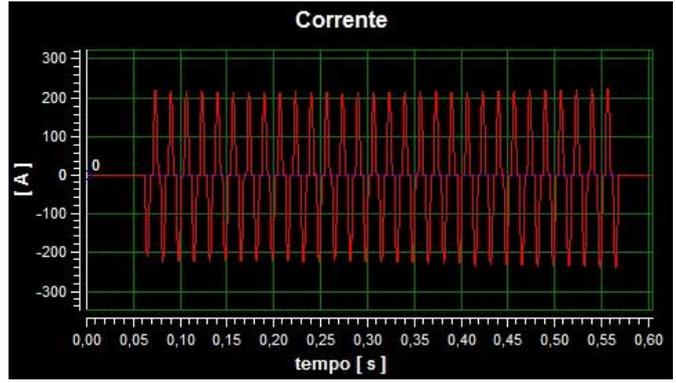
CP.A2



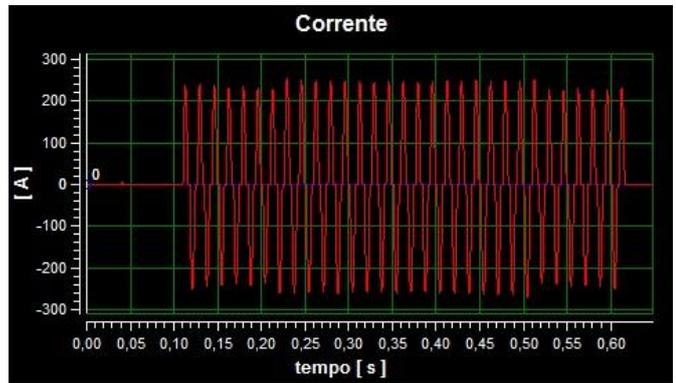
CP.A3



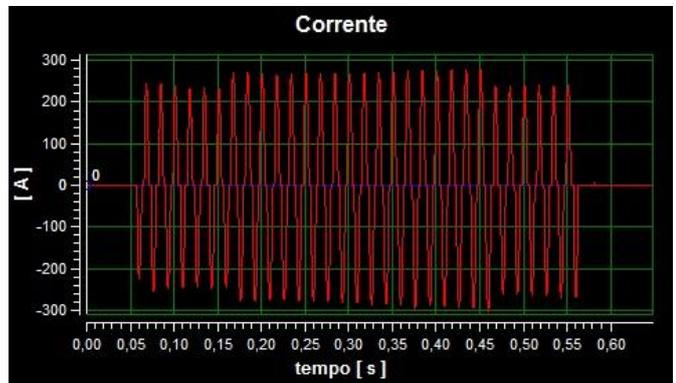
CP.A4



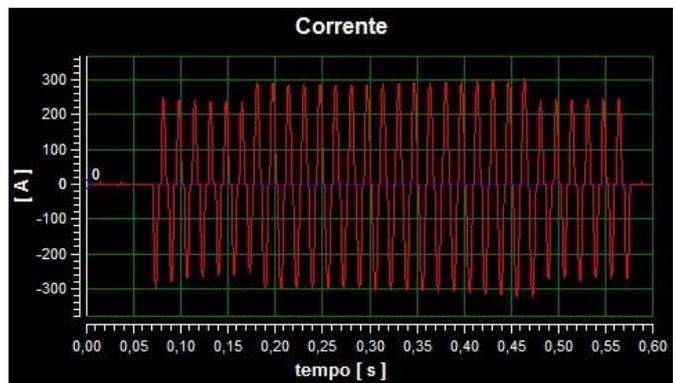
CP.B1



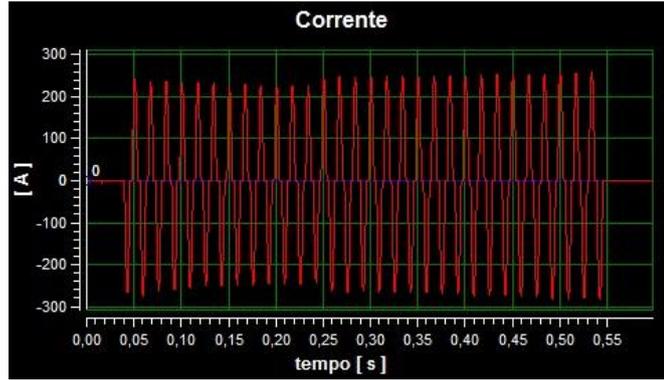
CP.B2



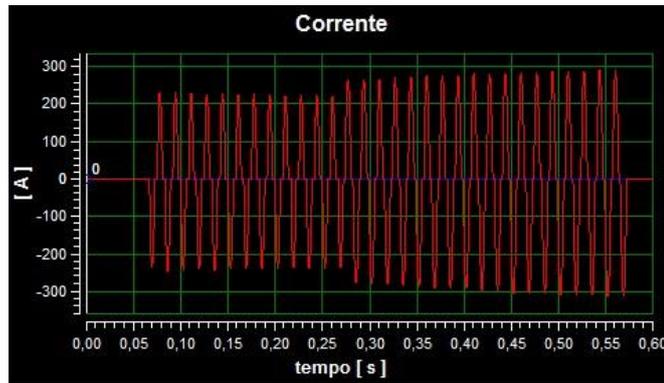
CP.B3



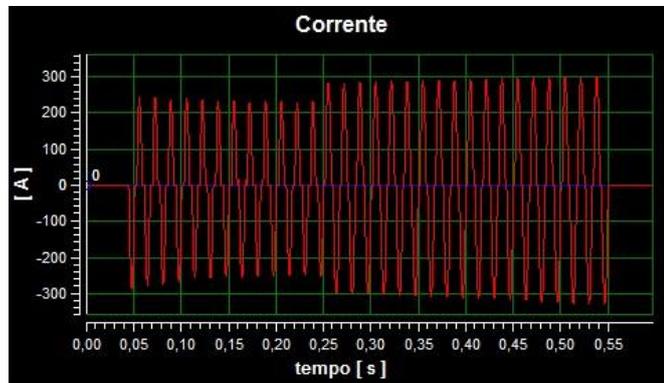
CP.B4



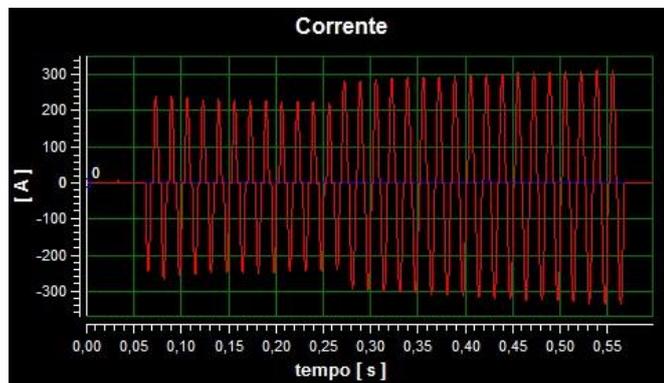
CP.C1



CP.C2



CP.C3



CP.C4