

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Caracterização das falhas e a influência da corrente, força e tempo,
no processo de solda a ponto por resistência**

Marcus Felipe Carlos Bianchini Neves

São Paulo
2017

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Caracterização das falhas e a influência da corrente,
força e tempo, no processo de solda a ponto por resistência**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Engenheiro Mecânico.

Marcus Felipe Carlos Bianchini Neves

Orientador: Prof. Dr. Alberto Hernandez Neto

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo

2017

Catálogo-na-publicação

Neves, Marcius Felipe Carlos Bianchini

Caracterização das falhas e a influência da corrente, força e tempo, no processo de solda a ponto por resistência / M. F. C. B. Neves -- São Paulo, 2017.

72 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Solda a ponto por resistência 2.Janela Operacional 3.Qualidade do ponto de solda 4.Ponto de solda I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

A tortura deu lugar às descobertas mecânicas mais engenhosas, cuja produção dá trabalho a uma imensidade de honestos artesãos.

Karl Marx

Dedico este trabalho de pesquisa aos meus pais, Carlos e Marcia que me ensinaram valores e conceitos como família, amor, confiança, cuidado e carinho. A eles, o meu reconhecimento e gratidão.

Aos meus avós que me ensinaram a sonhar sem tirar os pés do chão, buscando sempre um caminho digno e honrado para todos os objetivos.

À minha noiva Adriely pela especial compreensão e apoio nesta jornada.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Alberto Hernandez Neto por seu empenho em todo o processo de elaboração deste trabalho e sua especial atenção a todos os detalhes envolvidos.

Ao Dr. Valdir Furlanetto por sua compreensão, motivação e por ser o agente na fomentação do espírito empreendedor e na obtenção do meu objetivo.

A todo o Corpo Docente da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo por seu apoio e incentivo.

Aos meus colegas com os quais formei uma segunda família através da troca de experiências, conhecimentos e amizade, e pelo dia a dia de descobertas e lembranças em todos estes anos de Escola Politécnica.

RESUMO

Este trabalho trata do processo de solda a ponto por resistência, propondo uma metodologia para definir-se a janela operacional para uma dada junta metálica, e ainda relaciona os três principais parâmetros controláveis (força entre os eletrodos, tempo de solda e corrente) com os efeitos observados no ponto, sugerindo ao leitor um direcionamento simples e conciso sobre que ações devem ser tomadas para, a partir de parâmetros aleatórios que possivelmente não geram pontos de solda dentro das normas especificadas, ele possa variar de forma dirigida os parâmetros a fim de obter pontos de solda com maior qualidade.

Palavras-chave: Solda a ponto por resistência; Janela Operacional; Qualidade do ponto de solda; Ponto de solda.

ABSTRACT

This report deals with the resistance spot welding process, proposing a methodology to define the operating window for a given metal joint, and also shows the relation of the three main controllable parameters (force between electrodes, welding time and current) with the spot welding observed effects, suggesting to the reader a simple and concise guidance on what actions to take to, from random parameters that possibly do not generate spot welds within the specified standards, in order to vary the parameters in order to obtain higher quality welding points.

Keywords: Resistance spot welding; Operating window; Spot welding quality; Spot weld.

Lista de Figuras

FIGURA 1 -DISPOSITIVO DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA, PATENTEADO POR THOMSON (THOMSON, 1891 APUD METALURGICA MARIMAX, 2016).....	18
FIGURA 2 - ESQUEMA DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR PROJEÇÃO – FONTE: METALURGICA MARIMAX, 2016	20
FIGURA 3 - ESQUEMA DO PROCESSO DE SOLDAGEM A TOPO - FONTE: METALURGICA MARIMAX, 2016	21
FIGURA 4 - ESQUEMA DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR COSTURA - FONTE: METALURGICA MARIMAX, 2016	22
FIGURA 5 - FORMAÇÃO DO PONTO DE SOLDA - FONTE: FURLANETTO, 2005).....	23
FIGURA 6 - FORMAÇÃO DO PONTO DE SOLDA - FONTE: BRANDI & BATISTA, 2010.....	27
FIGURA 7 - DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA NA SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA – FONTE: WELDING PROCESS, 1998.....	29
FIGURA 8 - ÁREA QUE DEFINE A RESISTÊNCIA DE CONTATO – FONTE: WELDING, 2009	30
FIGURA 9 - REPRESENTAÇÃO DA SUPERFÍCIE METÁLICA – FONTE: MARQUES ET AL. 2001.....	30
FIGURA 10 – CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA DE CONTATO E PRESSÃO DO ELETRODO - FONTE HOULDCROFT, 1979	31
FIGURA 11 - PRINCIPAIS ESTÁGIOS DA RESISTÊNCIA DINÂMICA DURANTE A FORMAÇÃO DE UM PONTO DE SOLDA - FONTE: DICKINSON ET AL., 1980	32
FIGURA 12 - (A) CURVA DE RESISTÊNCIA DINÂMICA ESQUEMÁTICA COM OS PARÂMETROS DE SOLDAGEM; (B) EFEITO DO AUMENTO DA CORRENTE; (C) EFEITO DA RESISTIVIDADE DO MATERIAL. - FONTE: DICKINSON ET AL., 1980.....	34
FIGURA 13 - FORÇAS ATUANTES NO PONTO DE SOLDA - FONTE ZHANG &SENKARA, 2006	35
FIGURA 14 - FORÇAS ATUANTES NO PONTO DE SOLDA - FONTE: ZHANG & SENKARA, 2006.....	35
FIGURA 15 - ETAPAS DO CICLO DE SOLDAGEM -FONTE: WELDING, 2009.	36
FIGURA 16 - DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA DURANTE A SOLDAGEM - FONTE: YEUNG & HORNTON, 1999.....	39
FIGURA 17 - FORMATOS PADRONIZADOS DE ELETRODOS – (WELDING2009).	39
FIGURA 18 - DISTÂNCIA DO TUBO DE RESFRIAMENTO ATÉ A FACE DO ELETRODO – (FONTE: FURLANETTO, 2005).....	41
FIGURA 19 - TEMPOS DE PRÉ-PRESSÃO E PRESSÃO - FONTE: WELDING, 2009.....	42
FIGURA 20 - TEMPOS DE RESFRIAMENTO - FONTE (WELDING, 2009)	43
FIGURA 21 - TEMPOS DE PRESSÃO DE 20 E 50 CICLOS – FONTE: WELDING, 2009.	45
FIGURA 22 - TEMPOS DE CORRENTE DE 8 E 16 CICLOS - FONTE: WELDING, 2009.....	46
FIGURA 23 - VARIAÇÃO DA FORÇA DE 2000N A 3200N - FONTE: WELDING, 2009	47
FIGURA 24 - ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS RAIOS X (A); PARTÍCULAS MAGNÉTICAS (B); ULTRASSOM (C); LÍQUIDOS PENETRANTES (D)(FONTE GARCIA ET AL 1999)	50
FIGURA 25 - ILUSTRAÇÃO DO MÉTODO DE REFLEXÃO (FONTE: GARCIA ET AL 1999)	51
FIGURA 26 - ENSAIO POR ARRANCAMENTO (A) TRAÇÃO (B) E TORÇÃO (C) - FONTE: WELDING SCIENCE, 2009	52
FIGURA 27 - CINZEL PARA ENSAIO DE ARRANCHAMENTO – FOTO TIRADA POR MIM	52
FIGURA 28 - PROFUNDIDADE DECORRENTE DA FORÇA EXERCIDA PELO ELETRODO DURANTE O PROCESSO DE SOLDA A PONTO POR RESISTÊNCIA.....	53
FIGURA 29 - MODELO DA JANELA OPERACIONAL. (ELABORAÇÃO PRÓPRIA)	55
FIGURA 30 - DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA. ELABORAÇÃO PRÓPRIA	60
FIGURA 31 - JANELA OPERACIONAL - ELABORAÇÃO PRÓPRIA	62
FIGURA 32 - VARIAÇÃO DO DIÂMETRO X FORÇA - ELABORAÇÃO PRÓPRIA.....	64
FIGURA 33 - VARIAÇÃO DA INDENTAÇÃO X FORÇA - ELABORAÇÃO PRÓPRIA	64
FIGURA 34 - VARIAÇÃO DO DIÂMETRO X CORRENTE - ELABORAÇÃO PRÓPRIA	65
FIGURA 35 - VARIAÇÃO DA INDENTAÇÃO X CORRENTE - ELABORAÇÃO PRÓPRIA.....	66
FIGURA 36 - VARIAÇÃO DO DIÂMETRO X TEMPO - ELABORAÇÃO PRÓPRIA	67
FIGURA 37 - VARIAÇÃO DA INDENTAÇÃO X TEMPO - ELABORAÇÃO PRÓPRIA	67

Lista de Tabelas

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS DE MATERIAIS PARA ELETRODOS.....	38
TABELA 2 - FORMATO DO ELETRODO E SUAS UTILIZAÇÕES MAIS COMUNS	40
TABELA 3 - ITENS A SEREM OBSERVADOS NA INSPEÇÃO VISUAL DE PONTOS DE SOLDA.....	49
TABELA 4 - PARÂMETROS DE SOLDA DE REFERÊNCIA	57
TABELA 5 - MAPEAMENTO DA JANELA OPERACIONAL – (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).....	61
TABELA 6 - VARIAÇÃO DA FORÇA ENTRE OS ELETRODOS – (ELABORAÇÃO PRÓPRIA)	63
TABELA 7 - VARIAÇÃO DA CORRENTE – (ELABORAÇÃO PRÓPRIA)	65
TABELA 8 - VARIAÇÃO DO TEMPO DE SOLDA – (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).....	66

Abreviaturas e Siglas

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
Cp	Percentagem da área condutora em contato
F	Força
I	Corrente
L	Comprimento
MDP	Mínimo diâmetro do ponto
n	Número de pontos por unidade de área
Q	Calor gerado
s	Secção transversal
R	Resistência à uma dada temperatura
R(Eletrodo-Peça A)	Resistência de contato entre o eletrodo e a peça A
R(Eletrodo-Peça B)	Resistência de contato entre o eletrodo e a peça B
RSolda	Resistência de contato entre a peça A e a peça B
RA	Resistência da peça A
RB	Resistência da peça B
R0	Resistência à temperatura ambiente
t	Intervalo de tempo de passagem da corrente elétrica
T	Menor espessura de chapa
Y	Limite de escoamento

Lista de Símbolos

Ω	Ohms
ρ	Resistividade do material a uma dada temperatura
ρ_0	Resistividade a temperatura ambiente
α	Constante do material
θ	Temperatura de trabalho
θ_0	Temperatura ambiente

Sumário

RESUMO	7
ABSTRACT	8
Lista de Figuras	9
Lista de Tabelas	10
Abreviaturas e Siglas	11
Lista de Símbolos	12
1. INTRODUÇÃO	14
2. Objetivo geral	16
2.1. Objetivo específico	16
3. ASPECTOS DO PROCESSO DE SOLDAGEM	17
3.1. Soldagem por resistência elétrica – breve histórico	17
3.2. Soldagem por resistência elétrica	19
3.3. Principais tipos de soldagem por resistência elétrica	19
3.3.1. Soldagem por projeção	20
3.3.2. Soldagem de topo	21
3.3.3. Soldagem por costura	22
3.3.4. Soldagem a ponto por resistência elétrica	23
3.3.4.1. Resistência de contato	30
3.3.4.2. Resistência dinâmica de contato	32
3.3.4.3. Expansão térmica	35
3.3.4.4. Etapas do ciclo de soldagem a ponto por resistência	36
3.3.4.5. Eletrodos	37
3.3.4.5.1. Formato do eletrodo	39
3.3.4.5.2. Fresagem dos eletrodos:	41
3.3.4.5.3. Resfriamento dos eletrodos	41
3.3.4.6. Principais parâmetros para soldagem a ponto	42
3.3.4.6.1. Caracterização dos tempos de soldagem	42
• Tempo de pré-pressão e pressão	42
• Tempo de soldagem	43
• Tempo de resfriamento	43
3.3.4.6.2. Força dos eletrodos	43
3.3.4.7. Influência dos parâmetros principais no processo	44
3.3.4.7.1. Influência do tempo	44
○ Tempo de pré-pressão e pressão	44

○ Tempo de soldagem	45
○ Tempo de resfriamento.....	46
3.3.4.7.2. Influência da força dos eletrodos	46
3.4. Controle da qualidade de solda.....	47
3.4.1. Ensaio não destrutivos	50
3.4.2. Ensaio por ultrassom:	51
3.4.3. Ensaio Destrutivos.....	52
3.5. Principais problemas encontrados no emprego do processo de solda a ponto por resistência.....	53
3.5.1. Indentação:.....	53
3.5.2. Expulsão de material ou Splash.....	54
4. DEFINIÇÃO DA JANELA OPERACIONAL	54
4.1. Critérios para a aceitação de um ponto de solda.....	56
4.2. Parâmetros de referência - General Motors.....	57
4.3. Equipamentos requeridos	58
4.3.1. Equipamento de soldagem	58
4.3.1.1. Fluxo de água.....	58
4.3.2. Equipamento de inspeção, medição e teste	58
4.3.3. Ferramentas	58
4.3.4. Eletrodos.....	59
4.4. Geração da janela operacional	59
5. Estudo da influência da corrente, força e tempo	62
6. CONCLUSÃO	68

1. INTRODUÇÃO

Existem meios para se obter uma soldagem com mais qualidade proporcionando aumento de produtividade, redução de custos e diminuição de retrabalhos e tempos de parametrização no processo de solda a ponto por resistência.

Denomina-se soldagem ao processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. A solda é o resultado deste processo. (BRANDI, 1992a)

Quando se fala no processo de soldagem por resistência a ponto é preciso lembrar que um veículo possui cerca de 4.000 pontos de solda (BROWN & SCHWABER, 2000).

Sendo assim, levando-se em conta a produção de veículos no Brasil em 2013 que foi de 3,3 milhões de veículos, pode-se estimar que são executados mais de 50 milhões de pontos de solda todos os dias, totalizando mais de 13 bilhões de pontos por ano. Para tanto, estima-se que o número de equipamentos instalados no Brasil é superior a 12.000 unidades (ANFAVEA, 2013).

Trata-se de um processo produtivo presente na indústria automobilística desde o seu início, que ainda apresenta excelente custo-benefício, apresentando grandes possibilidades para estudos, permitindo assim, cada vez mais, a incorporação de novas tecnologias e o desenvolvimento de novos equipamentos.

Dada à ampla e crescente demanda de produção de pontos de solda, o conteúdo deste trabalho tem como um dos seus objetivos a parametrização do processo buscando direcionar as ações ou variações de parâmetros na busca de pontos de solda que atendam as especificações das normas relacionadas. Normalmente existe apenas uma sugestão dos parâmetros feita pelas grandes montadoras para alguns tipos específicos de chapas, o que serve de ponto inicial, mas que nem sempre produz um ponto de solda com a qualidade necessária.

O equipamento básico é composto por um circuito elétrico, um equipamento de controle e um sistema para aplicação da força.

O circuito elétrico é composto por uma fonte e pelos eletrodos. As fontes empregadas podem fornecer corrente contínua ou alternada. No caso das máquinas de corrente alternada (CA) são alimentadas diretamente da rede monofásica; já as

máquinas inversoras de média frequência de corrente contínua (CC), são alimentadas pela rede trifásica de CA, produzindo corrente contínua para a soldagem (MARQUES et al, 2001).

Diversos fatores influenciam a formação do ponto de solda, bem como seu comportamento. Como os principais fatores destacam-se: o sistema de soldagem, os eletrodos, a geometria da junta e as condições de soldagem. Seguindo esta linha de raciocínio, os revestimentos das superfícies metálicas a serem soldadas apresentam diferentes propriedades físicas e elétricas, alterando o comportamento e o resultado da solda.

A correta calibragem de parâmetros como o tempo de pré-pressão, tempo de resfriamento, tempo de solda, corrente e pressão dos eletrodos é igualmente decisiva para obtenção de pontos de solda que atendam às especificações de projeto e também as exigidas pelas normas.

Este estudo apresenta como resultado um guia que relaciona os principais problemas ou defeitos que podem ser encontrados no ponto de solda com suas causas, e mais do que isto, sugere ao leitor medidas que deverão, de maneira geral, diminuir ou extinguir tais defeitos.

2. Objetivo geral

O objetivo geral é sugerir uma metodologia para a definição dos principais parâmetros que afetam processo de parametrização inicial em processo de solda a ponto por resistência, evidenciando a influência destes parâmetros controláveis do processo com comportamento observado do ponto produzido.

Adicionalmente, serão dadas ao leitor orientações para mitigar os principais problemas encontrados no processo de solda a ponto por resistência, seguindo uma metodologia simples e direta que pode ser aplicada a partir de parâmetros iniciais encontrados em tabelas de referência. Tais orientações poderão ser aplicadas para diferentes conjuntos de chapas, uma vez que o comportamento físico não se altera variando-se a espessura ou tipo do material.

2.1. Objetivo específico

Como objetivo específico pretende-se exibir uma correlação entre a força aplicada pelos eletrodos na chapa, a corrente induzida na junta e o tempo de descarga da corrente de solda, que facilite a obtenção de pontos de solda que respeitem as normas exigidas, ou seja, indentação entre 5% e 20%, bem como diâmetro mínimo do ponto.

Serão evidenciadas as relações entre os parâmetros já mencionados com o comportamento do ponto de solda, servindo de guia ao leitor para a obtenção dos resultados adequados para a obtenção do ponto de solda.

3. ASPECTOS DO PROCESSO DE SOLDAGEM

3.1. Soldagem por resistência elétrica – breve histórico

James Prescott Joule (1818–1889), físico inglês, filho de um rico cervejeiro foi enviado à Sociedade Literária e Filosófica de Manchester onde foi educado por John Dalton e seus associados William Henry, Manchester Peter e Eaton Hodgkinson. Desde pequeno, fascinado por eletricidade, fazia experiências dando choques em si próprio, nos empregados e na família (THOMSON, 1891 apud Metalurgica Marimax, 2016).

Joule tornou-se gerente da fábrica do pai até 1854, mantendo como hobby a ciência. Começou a investigar a viabilidade da troca do motor a vapor da cervejaria, pelo “moderno” motor elétrico recém-inventado. Em 1838 publicou seus primeiros artigos científicos sobre eletricidade. Em 1840, Joule publica a lei que relaciona a corrente elétrica e a resistência do condutor ao calor transmitido, lei mundialmente conhecida como Lei de Joule (Thomson, 1891 apud Metalurgica Marimax, 2016). Em 1856, acidentalmente, Joule realiza um processo de soldagem por resistência elétrica em fios de aço.

Em 1877, Elihu Thomson (1853–1937), um dos fundadores das maiores empresas de eletricidade dos Estados Unidos, Reino Unido e França, estuda e sistematiza o processo de soldagem por resistência elétrica com o auxílio de pressão mecânica. Por suas contribuições, Thomson é considerado pai da soldagem por resistência, com a primeira patente registrada em março de 1886, seguida por 150 outras, principalmente no campo de soldagem de fios metálicos, como menciona BRANDI, S.D. (1992b).

Pode-se ver na Figura 1, segundo Thomson (1891 apud Metalurgica Marimax, 2016), o desenho de uma das primeiras patentes de soldagem por resistência utilizando pressão mecânica de Thomson de 1891.

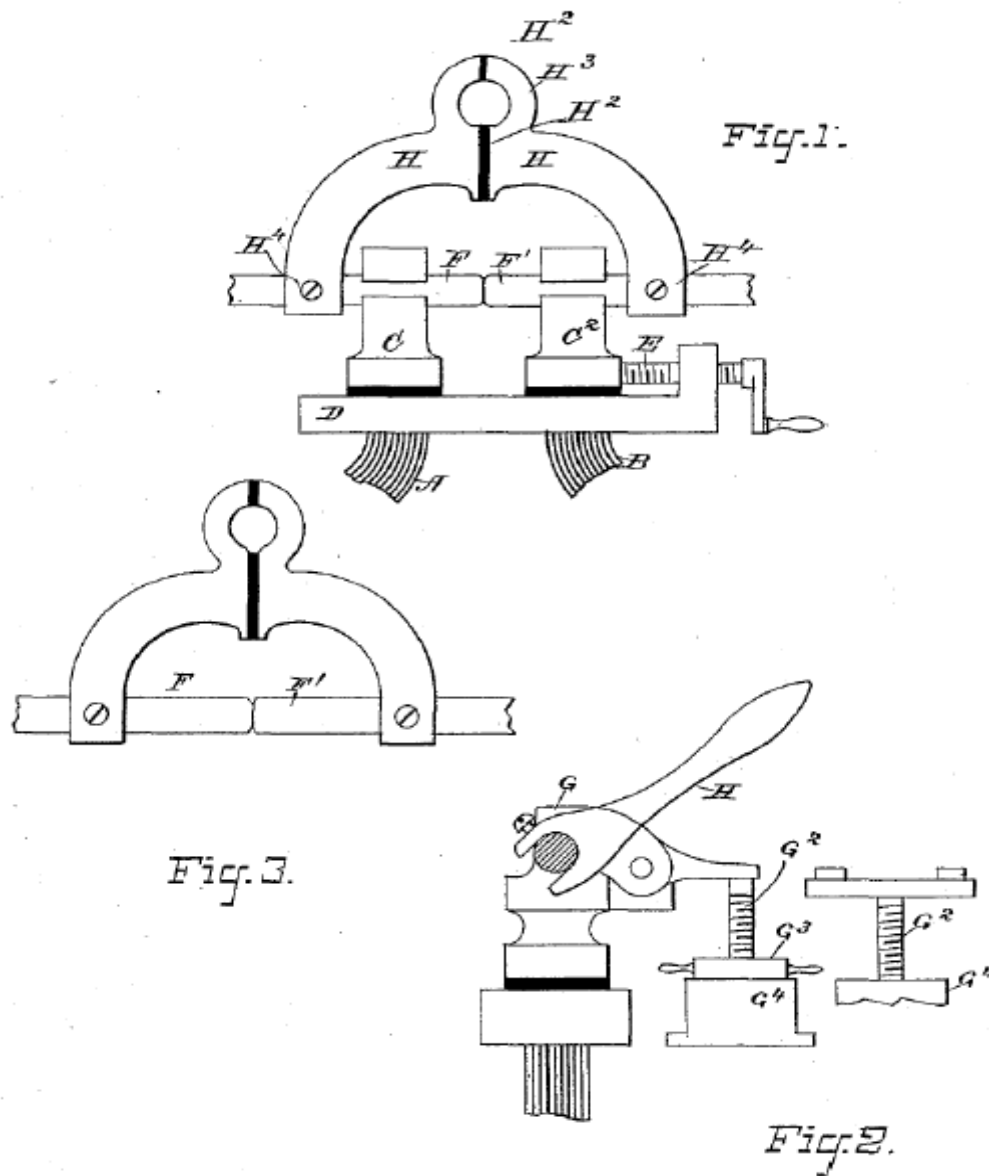
(No Model.)

4 Sheets—Sheet 1.

E. THOMSON.
METHOD OF ELECTRIC WELDING.

No. 451,345.

Patented Apr. 28, 1891.



ATTEST:

J. Hurdle
Wm. H. Bepel

INVENTOR:

Elihu Thomson

By H. C. Townsend

Attorney

Figura 1 -Dispositivo de soldagem por resistência elétrica, patenteado por Thomson (Thomson, 1891 apud Metalurgica Marimax, 2016)

3.2. Soldagem por resistência elétrica

A soldagem por resistência elétrica, detalhada por Marques et al. (2001) compreende um grupo de processos no qual a união de peças metálicas em superfícies sobrepostas ou em contato topo a topo é realizada por meio da aplicação de calor gerado na junta por meio da resistência à passagem da energia elétrica (efeito Joule) e pela aplicação de pressão. Por exemplo, para a união de duas chapas de aço de 1,6mm de espessura pode-se utilizar aproximadamente 12KA (corrente alternada) e 4V, com estes parâmetros o tempo de solda é de 15 ciclos, ou 0,25s, conforme sugerido por Jenney (2001).

A junção das peças na soldagem por resistência elétrica é feita através da geração de calor por meio da passagem de corrente elétrica e aplicação de pressão. Durante o processo as peças se aquecem e se fundem no local do ponto de contato conforme exemplifica BRANDI. (1992a).

Como se observa em outros autores, um dos métodos mais utilizados para unir metais, a soldagem por resistência pode ser aplicada para diversas espessuras, formas e materiais, por equipamentos que facilmente podem ser modificados e adaptados para a soldagem de diversas peças diferentes (ZIEDAS&TATINI, 1997).

Ao mesmo tempo, a soldagem por resistência é aplicada largamente nas indústrias automobilísticas eletroeletrônicas, na fabricação de eletrodomésticos, tubulações, equipamentos ferroviários, esportivos, entre outras (ZIEDAS&TATINI (1997)).

3.3. Principais tipos de soldagem por resistência elétrica

De acordo com Houldcroft(1979), os processos mais utilizados para soldagem de materiais com até 5 mm de espessura são:

- Soldagem a ponto
- Soldagem por projeção
- Soldagem por costura
- Soldagem de topo

3.3.1. Soldagem por projeção

Nessa modalidade, é feita a soldagem de peças com protuberâncias ou entalhes em chapas. É empregado quando as espessuras dos materiais são muito diferentes, quando uma das partes possui forma específica ou pela necessidade de precisão no posicionamento relativo entre as peças. Uma das peças possui uma saliência que determina a quantidade de massa a ser fundida. Essa saliência pode ser formada por estampagem ou qualquer outro processo que imprima aumento de material em determinada região. A fusão ocorrerá na saliência, independentemente da posição dos eletrodos, contudo, o alinhamento e distância entre o contato e o local da saliência são muito importantes para o funcionamento do processo (METALURGICA MARIMAX, 2016).

Na figura 2 abaixo, pode-se ver um esquema deste tipo de soldagem:

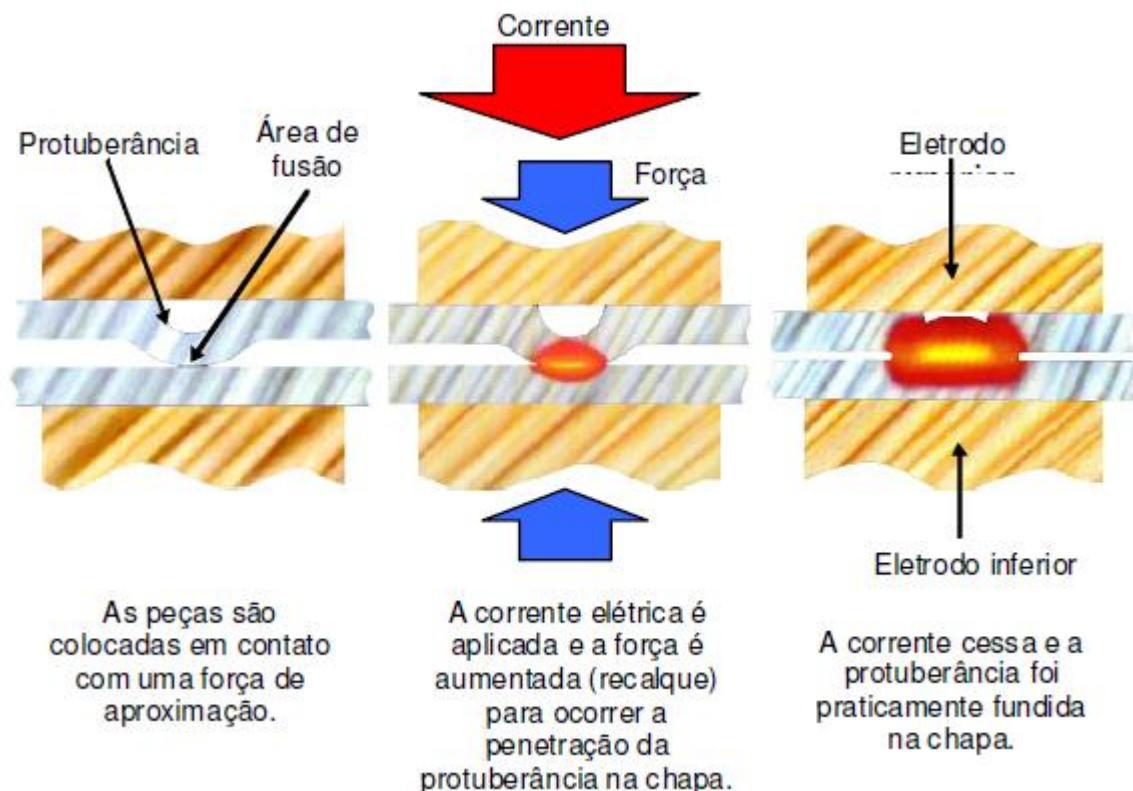


Figura 2 - Esquema do processo de soldagem por projeção – Fonte: Metalurgica Marimax, 2016

3.3.2. Soldagem de topo

A corrente elétrica é aplicada por meio das peças sobre pressão, ocorrendo um aquecimento na área de contato até a fusão. As peças são presas nos mordentes que, por sua vez, estão ligados ao terminal do secundário do transformador. Normalmente um dos mordentes é fixo no corpo da máquina e o outro é móvel, este responsável pela aplicação da força de contato entre as peças. A força deve ser suficiente para assegurar a passagem da corrente elétrica e impedir o deslizamento (METALURGICA MARIMAX, 2016).

A figura 3 ilustra esta variação do processo.

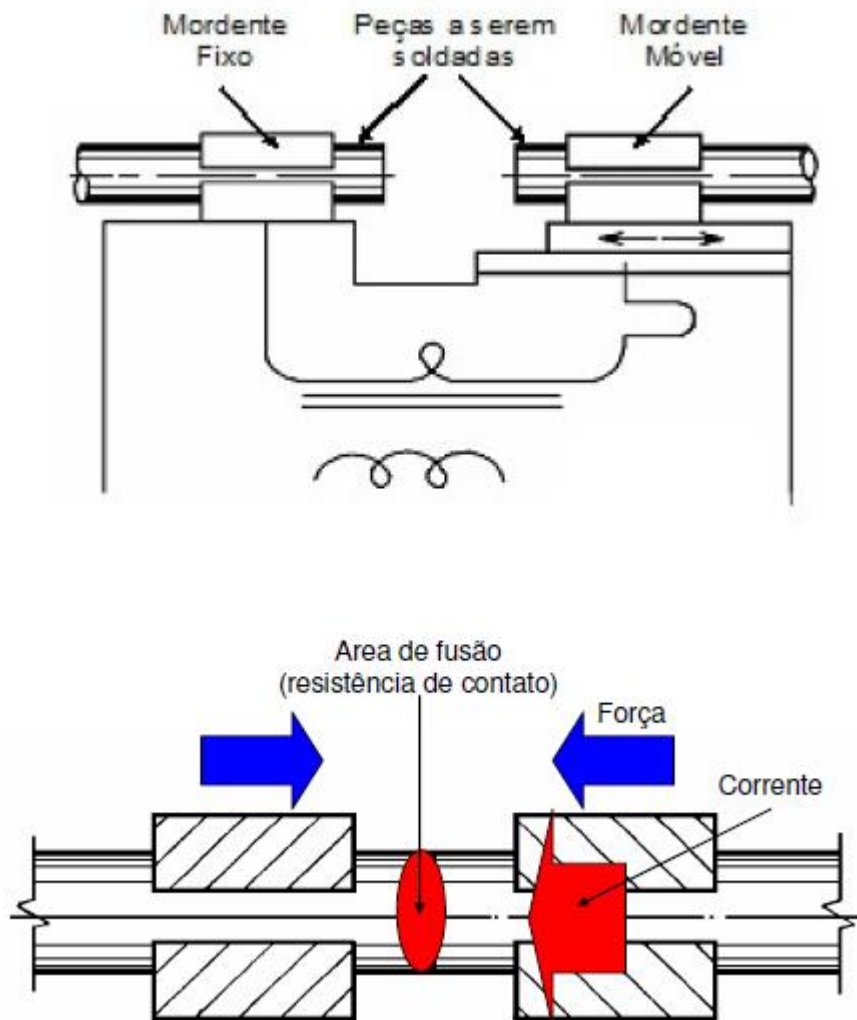


Figura 3 - Esquema do processo de soldagem a topo - Fonte: Metalurgica Marimax, 2016

3.3.3. Soldagem por costura

A solda por costura é aquela com pontos em sequência, na qual os eletrodos são substituídos por discos. Este tipo de soldagem é aplicado a produtos que necessitam união contínua. Durante o processo os discos giram e são percorridos pela corrente elétrica. Além disso, o contato com a peça deve ser mantido durante todo o processo e ainda deve-se manter a aplicação de uma força entre os eletrodos. A figura 4 esquematiza este tipo de soldagem, uma vez que cada ponto de solda representa um caminho alternativo para a passagem da corrente elétrica, é recomendável um incremento gradual da corrente até que a resistência paralela se estabilize (METALÚRGICA MARIMAX, 2016).

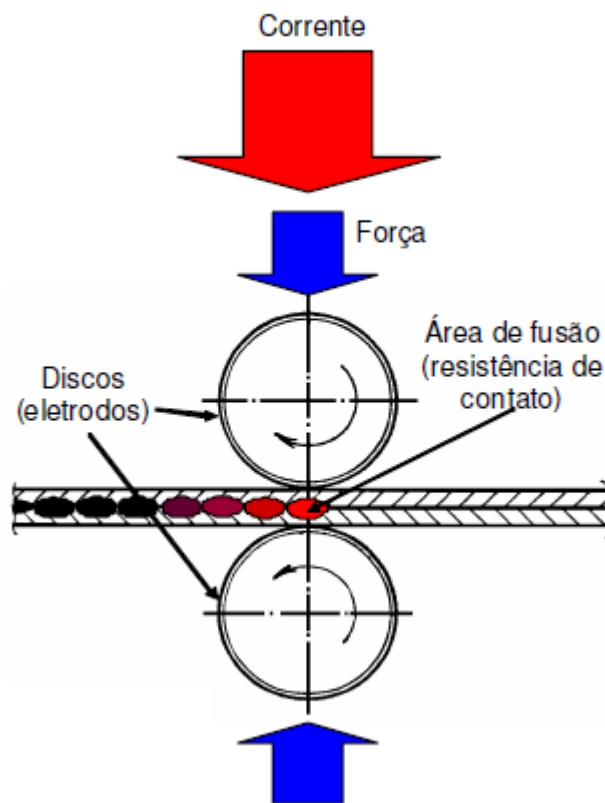


Figura 4 - Esquema do processo de soldagem por costura - Fonte: Metalurgica Marimax, 2016

3.3.4. Soldagem a ponto por resistência elétrica

Devido à circulação de corrente elétrica entre os eletrodos em contato com as peças, é gerado, por efeito Joule, calor na resistência de contato entre as superfícies, provocando elevação da temperatura, e iniciando a fusão do metal (KEARNS, 1984). Desta forma, e como se pode ver na figura 5, os eletrodos aplicam uma força entre as peças, e a massa metálica se funde sob esta pressão, evitando sua expulsão pela superfície de contato (ZHANG&SENKARA, 2006).

Este tipo de solda pode ser executado manualmente, por robô ou por máquinas estacionárias. Pontos de solda similares com as mesmas propriedades podem ser conseguidos com intervalos de tempo pequenos, garantindo grande velocidade de produção. A baixa tensão e alta corrente são obtidos pelos transformadores, já a pressão entre os eletrodos é obtida por dispositivos mecânicos, pneumáticos ou hidráulicos. (ASLANLAR, 2007)

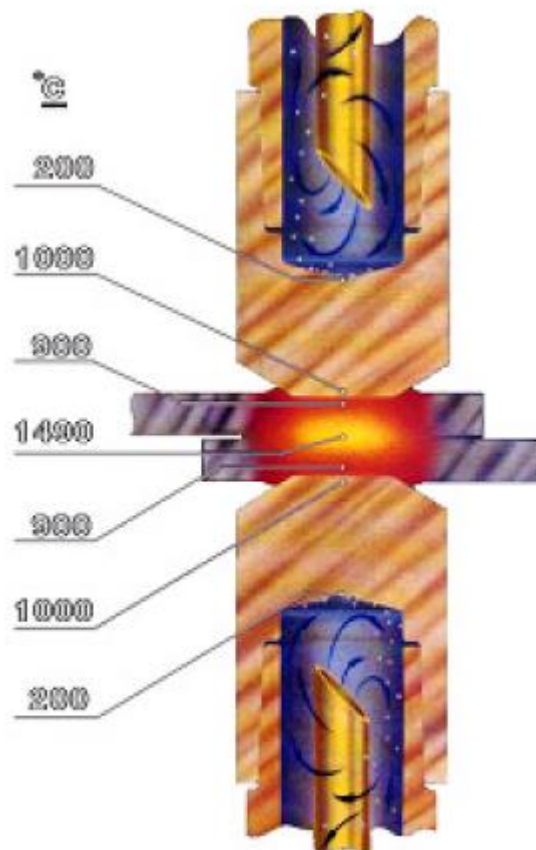


Figura 5 - Formação do ponto de solda - Fonte: Furlanetto, 2005)

Outro ponto de relevância são as vantagens que podem ser obtidas empregando-se este processo.

Podem-se citar as principais vantagens da soldagem a ponto por resistência elétrica como: a alta velocidade de sua execução e a facilidade de automação com altas taxas de produção são as principais vantagens deste processo de soldagem, quando comparado aos processos com arco elétrico ou maçarico. Ainda pode-se ressaltar que requer menor habilidade por parte do operador para sua execução. (ZIEDAS&TATINI, 1997)

Na soldagem por pontos em aços são utilizadas correntes de 5.000 a 20.000 A e tensões de 3 a 20V. Para materiais com alta condutividade térmica como ligas de alumínio e cobre, estes valores podem ser ainda maiores. Sendo assim, o mais comum é a união entre duas chapas de mesma composição química e espessura, porém, o mesmo processo pode ser utilizado para unir mais chapas e para unir chapas com composições e espessuras diferentes (ZIEDAS & TATINI, 1997).

Porém, a soldagem a ponto por resistência elétrica apresenta também as seguintes desvantagens: uma vez que este processo exige a sobreposição do material, existe sempre um aumento do peso do conjunto, e o consequente aumento no custo do material. O equipamento necessário para este processo de soldagem normalmente tem maiores custos dos que os de soldagem por arco elétrico, e o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica apresenta menor resistência à tração e à fadiga (ZIEDAS&TATINI, 1997).

Para uma melhor compreensão do processo de solda a ponto por resistência, cabe evidenciar alguns fenômenos e conceitos envolvidos neste processo.

No caso do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, dois eletrodos são ligados a uma fonte de tensão elétrica e posicionados ortogonalmente na área onde se quer produzir o ponto de união entre as duas chapas. O contato entre as duas chapas produzirá uma resistência elétrica, que ao serem atravessadas pela corrente elétrica se aquece levando os materiais à fusão (WELDING, 2009).

A dificuldade ou oposição à passagem de cargas elétricas é denominada resistência elétrica. Esta dificuldade é gerada pelo choque entre os elétrons em deslocamento e os átomos do condutor. Para vencer estas colisões é necessário que exista uma diferença de potencial entre as extremidades do condutor.

De acordo com Welding (2009), a resistência é comumente medida em Ohms (Ω), homenageando o matemático alemão George Simon Ohm (1787–1854) e pode ser obtida pela seguinte razão:

$$1\Omega = \frac{1\text{Volt}}{1\text{Ampère}} \quad (1)$$

Alguns materiais permitem o fluxo de elétrons ordenados, pois possuem ligações fracas de seus elétrons ao núcleo dos átomos, a estes materiais são chamados de condutores. Em contrapartida, os materiais que possuem fortes ligações entre os elétrons e os núcleos são chamados isolantes (WELDING, 2009).

Verifica-se que a resistência imposta à corrente elétrica depende do material, do comprimento, da secção transversal e da temperatura do condutor. Esta relação é representada pela seguinte equação:

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (2)$$

Onde:

R – Resistência do condutor [Ohms]

L – Comprimento [m]

ρ – Resistividade do material [Ohms . m]

s – Secção transversal [m²]

Como se pode observar a resistividade sofre alterações de acordo com a temperatura devido ao aumento da agitação das moléculas no condutor, provocando mais colisões entre os elétrons, dificultando o fluxo ordenado.

A seguir, demonstra-se que a variação da resistividade em função da temperatura pode ser expressa segundo a seguinte equação:

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(\theta - \theta_0)] \quad (3)$$

Onde:

ρ – Resistividade a uma dada temperatura [Ohms . m]

ρ_0 – Resistividade a temperatura ambiente [Ohms . m]

α – Constante do material [$1/^\circ\text{C}$]

θ – Temperatura de trabalho [$^\circ\text{C}$]

θ_0 – Temperatura ambiente [$^\circ\text{C}$]

Já para um condutor com comprimento e seção transversal definidos pode-se escrever:

$$R = R_0[1 + \alpha(\theta - \theta_0)] \quad (4)$$

R – Resistência à uma dada temperatura [Ohms]

R_0 – Resistência à temperatura ambiente [Ohms]

Pode-se, então, representar o circuito secundário de uma máquina de soldagem a ponto e as chapas sobrepostas por resistências como mostra a figura 6:

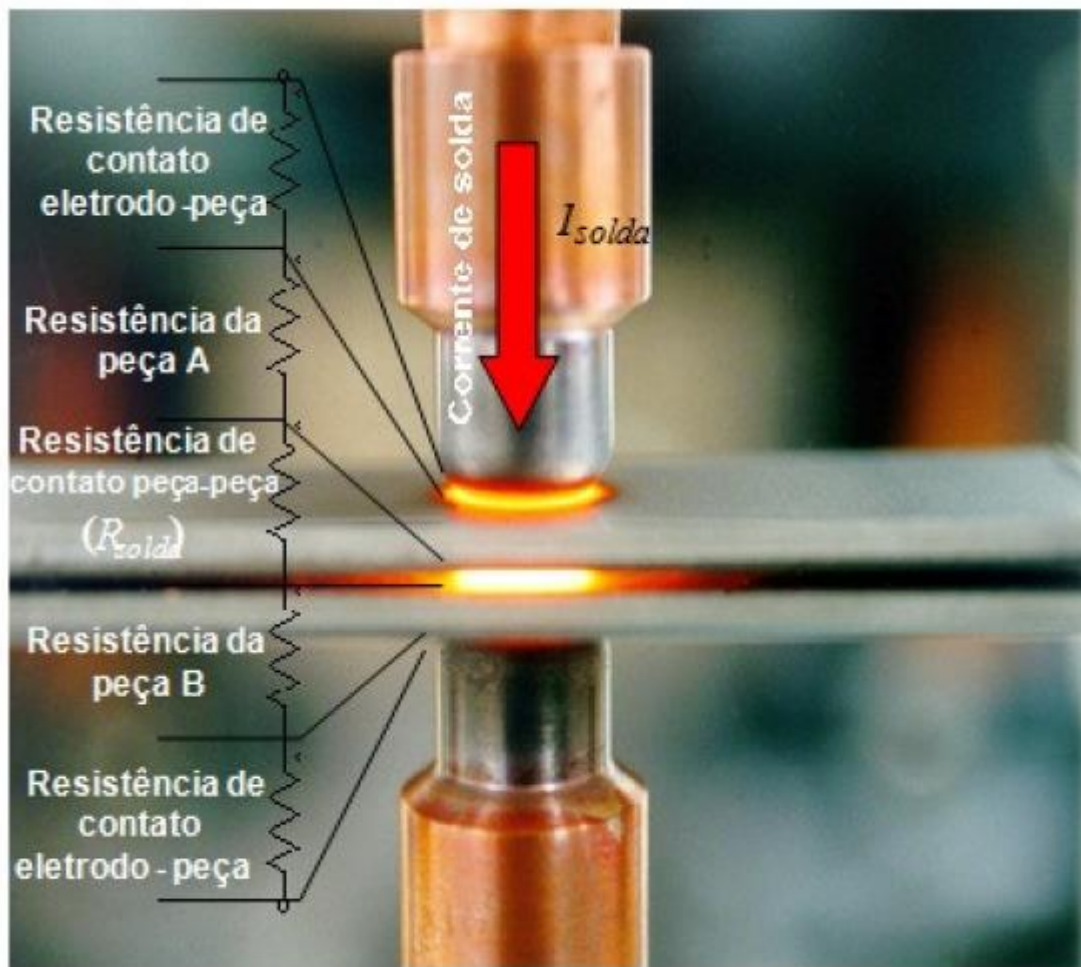


Figura 6 - Formação do ponto de solda - Fonte: Brandi & Batista, 2010

É possível afirmar que a somatória das resistências no percurso da corrente elétrica altera a sua magnitude. São pelo menos 5 resistências conectadas em série, o que produz o aquecimento da junta, como mostra a Eq. 5.

$$R = R_{\text{Eletrodo-Peça A}} + R_A + R_{\text{Solda}} + R_B + R_{\text{Eletrodo-Peça B}} \quad (5)$$

Para a formação do ponto de solda, a resistência mais relevante é a localizada na interface das chapas R_{Solda} . A magnitude desta resistência depende das condições da superfície do metal base, do tamanho, força e perfil do eletrodo. As superfícies de contato dos eletrodos não alcançam a temperatura de fusão devido à alta condutividade térmica dos mesmos, e pelo fato de que na maioria das situações os eletrodos são refrigerados (ASLANLAR, 2006).

Na equação (5), a resistência R é influenciada pela pressão entre os eletrodos e pela resistência de contato. As peças devem ser firmemente fixadas, facilitando, assim, a passagem da corrente elétrica. (ASLANLAR, 2006)

De acordo com Edwards (1998), pode-se normalmente desconsiderar as resistências das peças perante as resistências de contato.

Dando continuidade, o calor no processo de soldagem é produzido pela resistência de contato entre as peças a serem soldadas. Uma vez que os valores da resistência de contato são baixos, são exigidas altas correntes para que se atinja o calor desejado (NEVILLE, 1998).

Contudo, a magnitude do calor gerado depende dos seguintes fatores:

- Corrente de soldagem (Amperes).
- Resistências elétricas (Ohms).
- Intervalo de tempo de passagem da corrente (segundos).

Segundo Edwards (1998), pode-se calcular a energia térmica total desprendida neste processo pela lei de Joule como descrito abaixo:

$$Q = k \int_0^t R(t) I^2 dt \quad (6)$$

Onde:

Q – Calor gerado, [cal]

R – Resistências elétricas, [Ohms]

t – Intervalo de tempo de passagem da corrente elétrica (segundos)

I – Corrente (Amperes)

$k = 1/4,185$

O calor é necessário apenas na interface das chapas a serem soldadas, sendo assim o calor gerado nas outras partes deve ser minimizado. Uma vez que a resistência de contato é maior, do que as demais, o calor é rapidamente desenvolvido neste local (JENNEY, 2001).

Num processo bem controlado, a temperatura de soldagem é alcançada primeiramente na interface entre as chapas. Durante o período de aquecimento, notamos um aumento da região fundida, que se torna contínua, formando o ponto de solda (Jenney, 2001).

A figura 7 ilustra a evolução da temperatura em diversos pontos do equipamento.

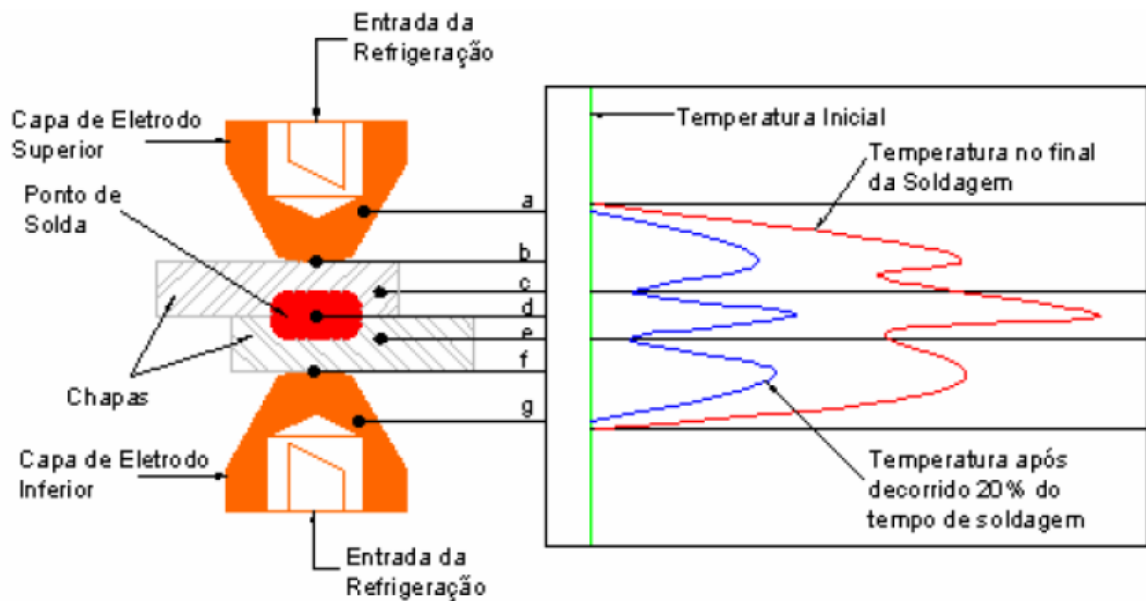


Figura 7 - Distribuição da temperatura na soldagem a ponto por resistência – Fonte: Welding Process, 1998

3.3.4.1. Resistência de contato

Pode-se dizer que a irregularidade da superfície dos condutores provoca micro contatos, o que diminui a seção transversal por onde circula a corrente elétrica. Como se pode observar na figura 8, a força entre os eletrodos e a área da seção transversal definem o valor da resistência de contato (WELDING, 2009).

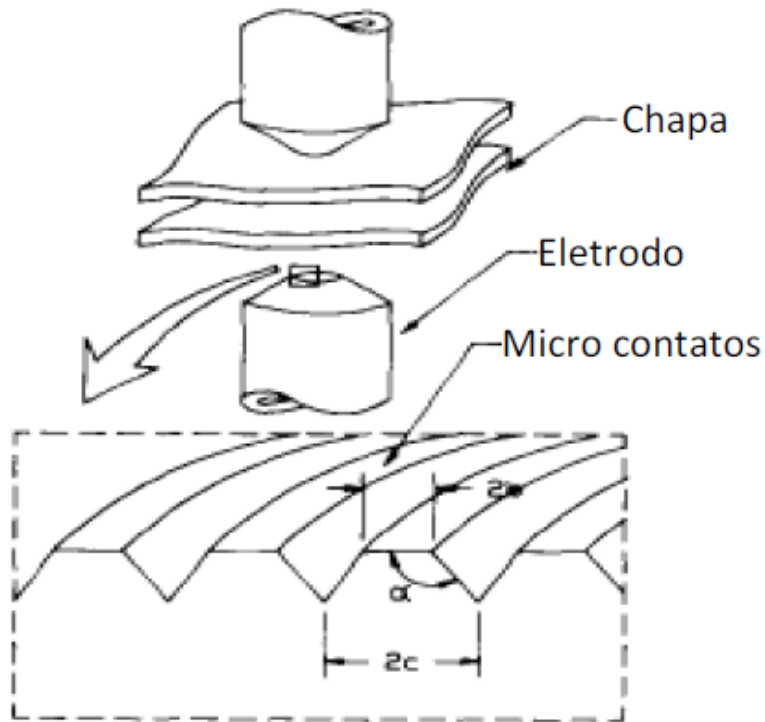
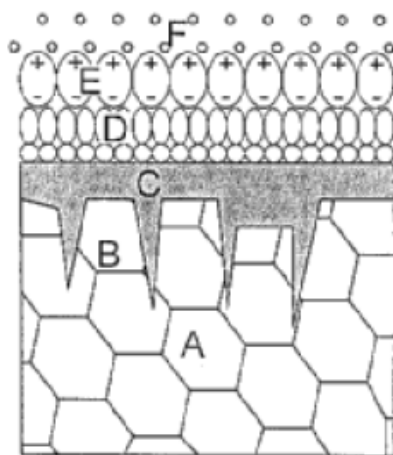


Figura 8 - Área que define a resistência de contato – Fonte: Welding, 2009

É relevante ilustrar que as grandes resistências elétricas nas superfícies são causadas pelo filme óxido e pelas impurezas como mostrado na figura 9.



- A-Metal não afetado.
- B-Metal afetado
- C-Camada de óxido
- D-Água e oxigênio adsorvidos.
- E-Gordura
- F-Partículas de poeira

Figura 9 - Representação da superfície metálica – Fonte: Marques et al. 2001.

Entretanto, a magnitude das resistências de contato gira em torno de 50Ω a 100Ω . Tal resistência varia com a pressão de contato, em função do estado superficial (Houldcroft, 1979), tal fenômeno é ilustrado na figura 10 abaixo:

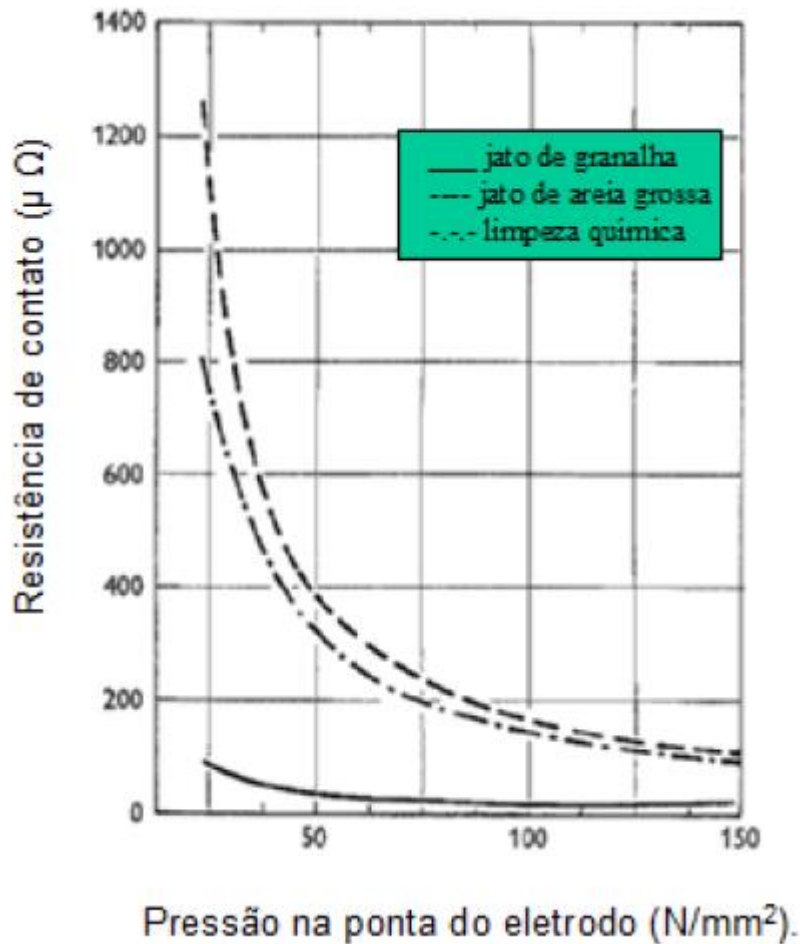


Figura 10 – Correlação entre resistência de contato e pressão do eletrodo - Fonte Houldcroft, 1979

Com base nas análises realizadas, Houldcroft (1979) propõe a equação 7, a saber:

$$R = \frac{0,85\rho\sqrt{Y}}{\sqrt{\pi n C_p}} \quad (7)$$

Onde:

R – Resistência de contato ($\mu\Omega$)

Y – Limite de escoamento (Kgf/m^2)

C_p – Percentagem da área condutora em contato

ρ – Resistividade do material (Ωm)

n – Número de pontos por unidade de área

A equação 7 pode ser aplicada para pressões da ordem de 30 a 80% do limite de escoamento. Para pressões maiores, a condutividade aumenta de maneira praticamente linear (BRANDI, 1992a).

3.3.4.2. Resistência dinâmica de contato

A resistência elétrica de contato varia durante o processo de soldagem, portanto é de natureza dinâmica. A análise dinâmica da resistência tem sido mais aprofundada com a evolução do processo, e em tempos recentes tem sido utilizada como parâmetro de qualidade (SHOME, 2008).

Os efeitos da pressão e da temperatura na resistência dinâmica de contato são cruciais para descrever o início e o crescimento do ponto de solda (SHOME, 2008). Desse modo, na figura 11 são ilustrados os principais estágios da resistência dinâmica enquanto é formado o ponto de solda.

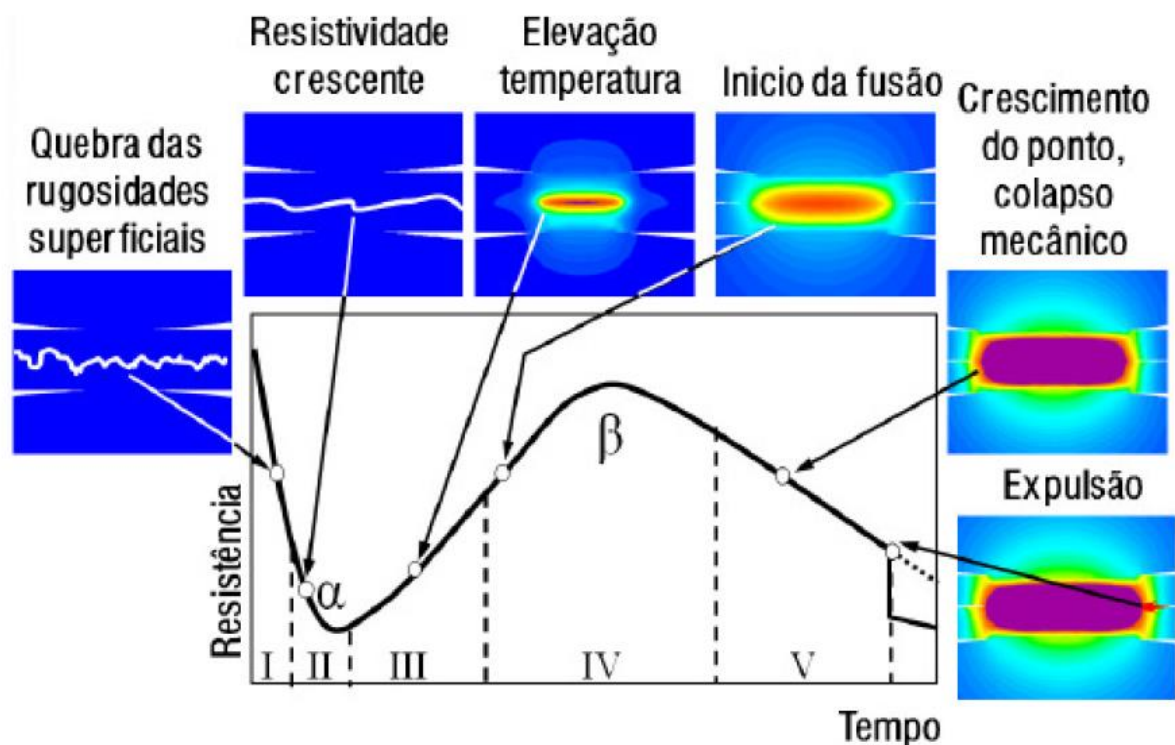


Figura 11 - Principais estágios da resistência dinâmica durante a formação de um ponto de solda - Fonte: Dickinson et al., 1980

Com base na figura e nos argumentos de Dickinson et al (1980), tem-se:

- Estágio 1: Fragmentação de óxidos ou contaminações superficiais e colapso da rugosidade na interface das superfícies.
- Estágio 2: Aquecimento concentrado na interface, a resistência elétrica diminui com o aumento da área de contato e aumenta com a temperatura, este comportamento define o ponto α .
- Estágio 3: A resistividade aumenta com a temperatura, início da fusão.
- Estágio 4: Fusão por:
 - Aumento da temperatura do material, e consequente aumento da resistividade.
 - Diminuição da resistência mecânica (o colapso mecânico diminui a resistência) o ponto β indica o início do crescimento do ponto
- Estágio 5: Crescimento do ponto, podendo ocorrer colapso mecânico e expulsão

Uma vez que a resistência dinâmica é função do tempo de soldagem, da força do eletrodo, da corrente de soldagem e das propriedades físicas do material, segundo Dickinson et al. (1980), a figura 12 a seguir demonstra a influência destes fatores:

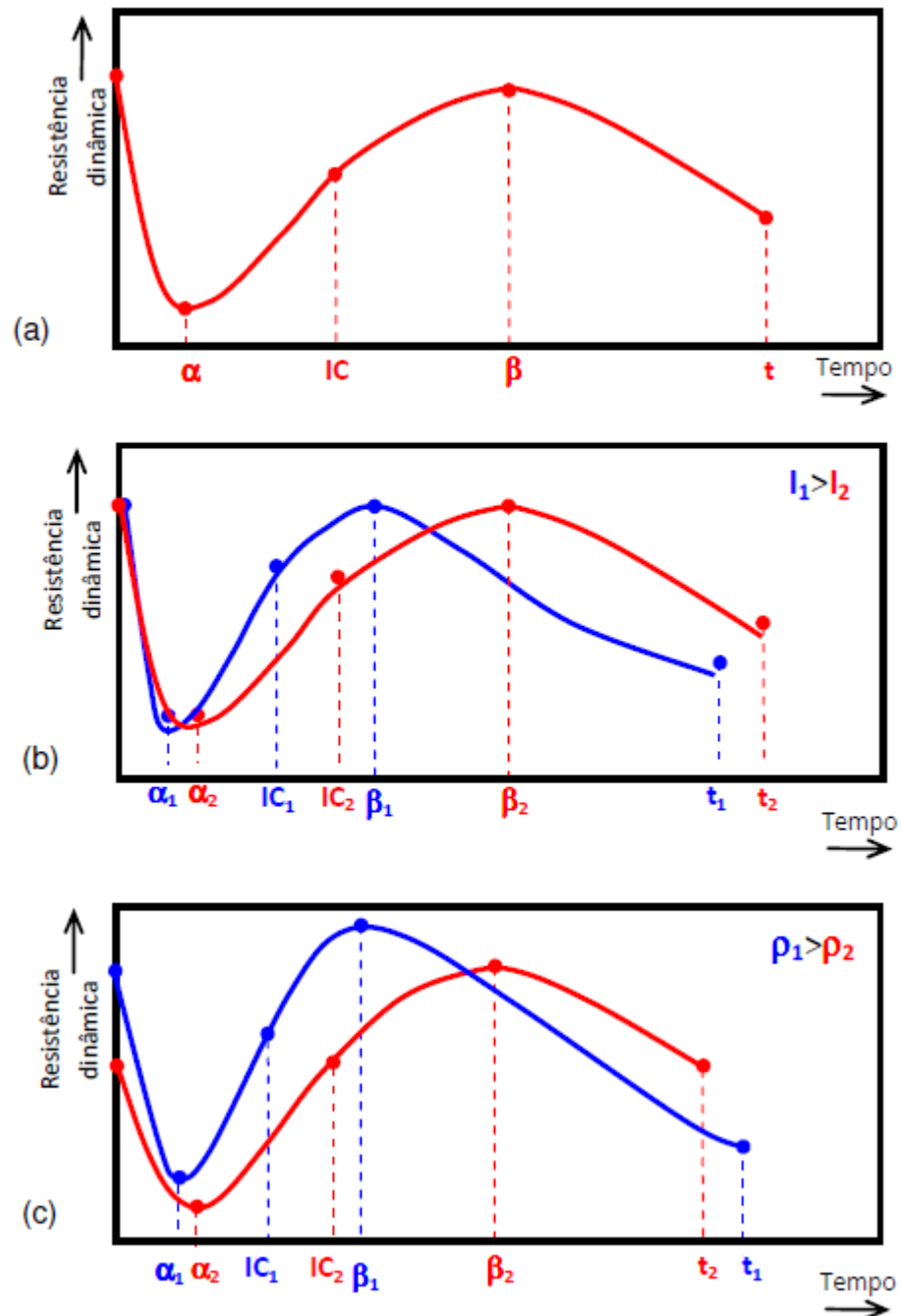


Figura 12 - (a) Curva de resistência dinâmica esquemática com os parâmetros de soldagem; (b) Efeito do aumento da corrente; (c) Efeito da resistividade do material. - Fonte: Dickinson et al., 1980.

3.3.4.3. Expansão térmica

Em conformidade com Zhang & Senkara (2006), a fase sólida e líquida do material expande com o calor e que a expansão da fase líquida produz maior volume do que a expansão da fase sólida. Entre as superfícies a serem soldadas e os eletrodos, a expansão térmica não é livre devido à força aplicada pelos eletrodos sendo que na figura 13 são demonstradas as forças envolvidas durante a soldagem.

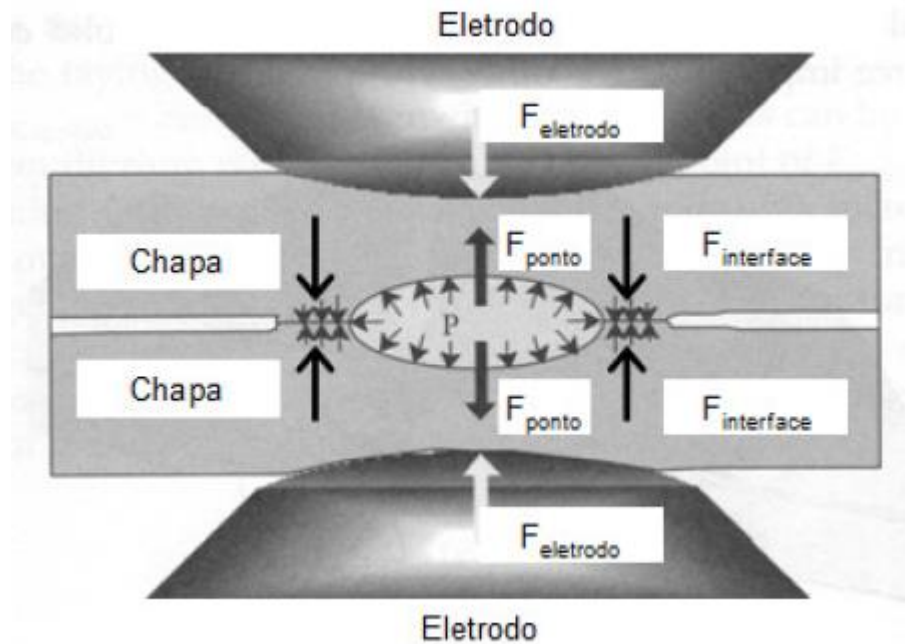


Figura 13 - Forças atuantes no ponto de solda - Fonte Zhang & Senkara, 2006

Na figura 14, pode-se ver o deslocamento do eletrodo:

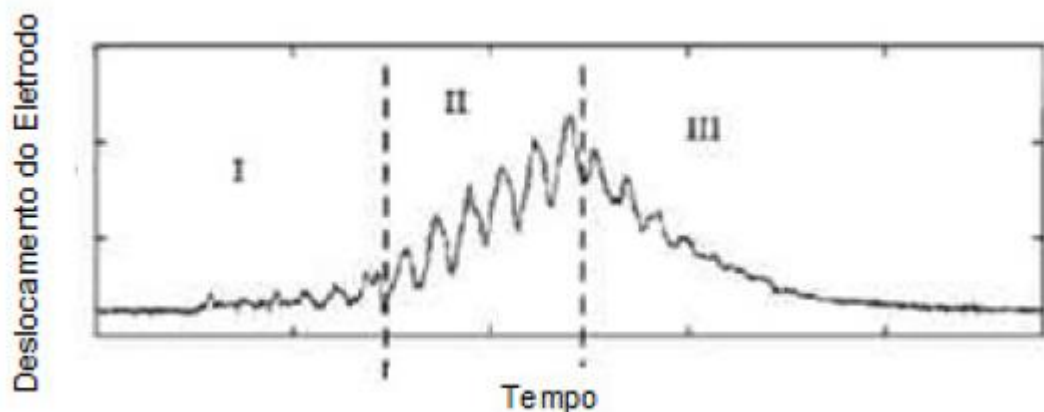


Figura 14 - Forças atuantes no ponto de solda - Fonte: Zhang & Senkara, 2006.

As regiões mostradas na figura 14 são:

- Região I: Aplicação da corrente e aquecimento do metal
- Região II: Após aproximadamente três ciclos de aquecimento os eletrodos sofrem um súbito deslocamento devido à fusão do material
- Região III: Resfriamento das chapas após a suspensão da corrente (ZHANG & SENKARA, 2006)

3.3.4.4. Etapas do ciclo de soldagem a ponto por resistência

Na figura 15 tem-se noção das diversas etapas de um ciclo de soldagem.

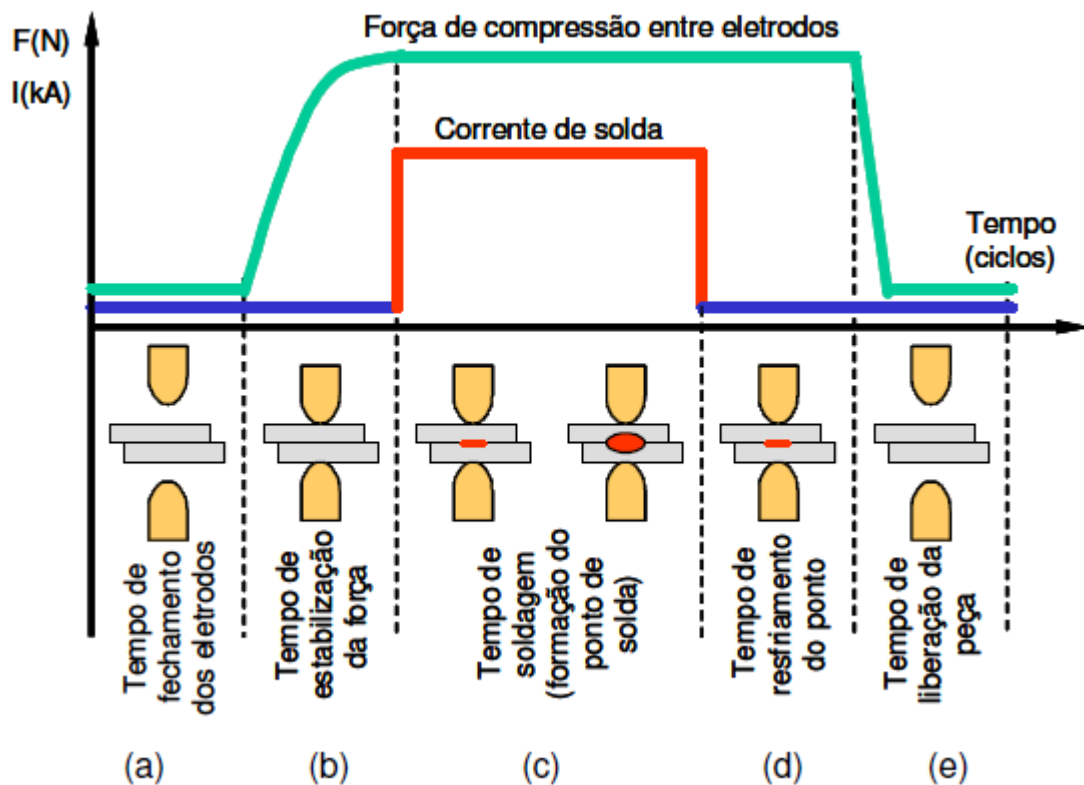


Figura 15 - Etapas do ciclo de soldagem -Fonte: Welding, 2009.

Na figura 15 estão evidenciados: (a) tempo de pré-pressão, necessário para o fechamento da pinça, (b) Tempo de pressão, para estabilização da força entre os eletrodos, (c) é quando ocorre a soldagem propriamente dita, (d) após a soldagem, os materiais precisam de um certo tempo para se resfriarem e voltarem a se solidificarem, e por fim (e) os eletrodos retornam à sua posição inicial.

3.3.4.5. Eletrodos

O eletrodo é o responsável pela transferência da corrente elétrica. Ele ainda define a área de contato, a densidade de corrente e auxilia no resfriamento da solda. É sem dúvida o componente mais importante da máquina de solda a ponto por resistência (WELDING, 2009).

Ocorre que também, é preciso ter cuidado com as condições de trabalho e o material a ser usado, pois as condições de trabalho são extremamente desfavoráveis quando se trata de eletrodos para solda a ponto por resistência (WELDING, 2009), uma vez que são submetidos a altas temperaturas e grandes esforços de compressão, porém deseja-se que os mesmos mantenham suas propriedades eletromecânicas e sua forma.

As principais características do material dos eletrodos recomendadas por Brandi (1992a) são:

- Alta condutividade elétrica: uma vez que elevadas correntes elétricas devem passar por ele, a fim de evitar perdas ou superaquecimento.
- Alta condutividade térmica: proporcionando melhor condução de calor nos pontos de contato eletrodo-peça.
- Dureza e resistência ao desgaste: o eletrodo deve manter seu formato original mesmo trabalhando em altas temperaturas.
- Alta resistência ao amolecimento: o amolecimento devido ao efeito da temperatura provoca a diminuição da vida do eletrodo se fazendo assim desejável um material que resista ao amolecimento, mesmo após longos períodos de exposição a altas temperaturas.
- Dificuldade de formação de liga como o material a ser soldado: esta propriedade evita que o material a ser soldado adira ao eletrodo

A *Resistance Welder Manufacturers Association* (RWMA, 2003) classifica os eletrodos à base de cobre em 3 classes a saber:

- Classe 1: Materiais termicamente não tratáveis, endurecidos a frio.
- Classe 2: Materiais com propriedades mecânicas mais altas, e condutividades elétricas e térmicas mais baixas, podendo sofrer tratamento térmico ou uma combinação de tratamento térmico e a frio, são os mais utilizados por sua facilidade de adaptação.

- Classe 3: Materiais resistentes a altas taxas de calor e pressão e são fabricados em ligas de cobre e material refratário.

Na tabela 1 estão algumas características dos materiais conforme a classificação mostrada anteriormente

Tabela 1 - Características de materiais para eletrodos

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

Fonte: Resistance Welder Manufacturers Association RWMA, 2003.

Ao se analisar termicamente as capas dos eletrodos durante a soldagem obtêm-se temperaturas na face do eletrodo da ordem de 700 C a 900°C. Na figura 16 vê-se a distribuição de temperatura de um eletrodo utilizando uma corrente de 21KA e tempo de soldagem igual a 165ms como sugerem YEUNG & HORNTON (1999).

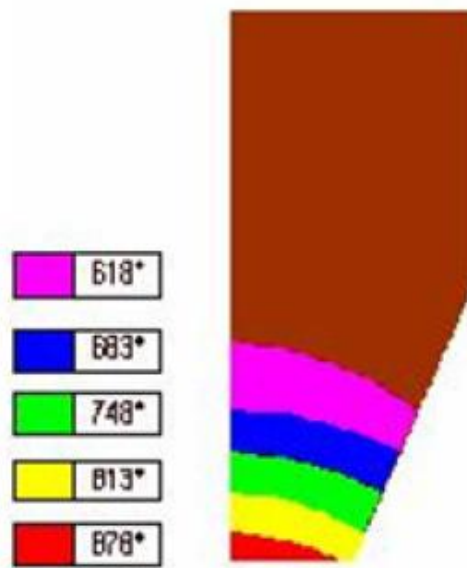


Figura 16 - Distribuição de temperatura durante a soldagem - Fonte: Yeung & Hornton, 1999.

3.3.4.5.1. Formato do eletrodo

A definição do formato do eletrodo está relacionada a diversas variáveis, tais como o tipo de pinça, posição do ponto, força e corrente de soldagem, entre outros.

Na figura 17 é possível ver alguns modelos padronizados de eletrodos comumente fornecidos pelos fabricantes:

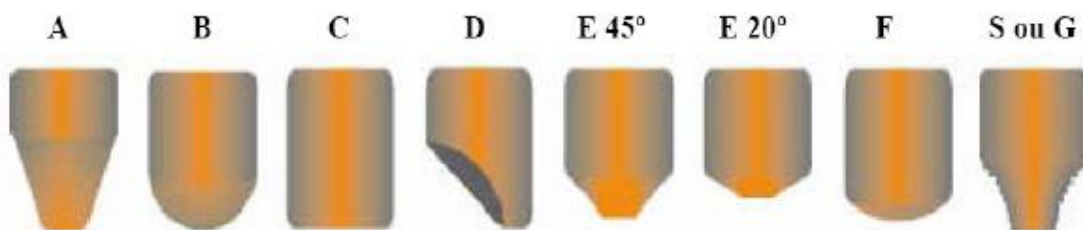


Figura 17 - Formatos padronizados de eletrodos – (WELDING2009).

Na tabela 2 relacionam-se ainda os principais formatos e suas utilizações mais comuns:

Tabela 2 - Formato do eletrodo e suas utilizações mais comuns

Formato	Utilização	Comentários
A	Eletrodo de uso geral. Excelente quando estão em perfeito alinhamento e usados em pinças de acionamento com força axial (tipo C), não bom para máquinas com força radial (tipo X).	O melhor formato para afiação e soldagem com eletrodos grandes tipo B ou F. Rápido tempo de troca e preparação. Não tolera erros de posicionamento, deve ter posicionamento bem preciso. Boa vida útil (amassamento demorado). Baixa indentação. Muito complicado para alinhar em máquinas tipo X, por causa do acionamento radial.
B	Uso geral quando chapas têm pouco ou nenhum de revestimento. Limitados na espessura do material, (2,5mm chapa mais espessa). Indicado para máquinas manuais.	Amassamento ligeiramente mais demorado que do formato A. Tende a acumular zinco mais facilmente. Facilmente afiado. Fácil posicionamento. Tolerar erros de posicionamento. Alta indentação inicial.
C	Uso específico. Usado como eletrodo de back. Em chapas de diferentes espessuras (uma espessa e outra fina) é usado na chapa de maior espessura. Indicado em máquinas automáticas ou robôs	Geralmente permanece frio. Longa vida útil (amassamento muito demorado). Não permite afiação.
D	Uso específico. Indicado em soldagem de bordas, pequenas áreas de acesso, ou perto de superfícies curvas.	O alinhamento deve ser muito preciso e cuidadoso. Troca demorada. Não permite afiação. Amassamento rápido.
E	Eletrodo de uso geral. Excelente quando estão em perfeito alinhamento e usados em pinças de acionamento com força axial (tipo C), não bom para máquinas com força radial (tipo X). Recomendado para máquinas automáticas, robô, algumas manuais, em conjunto com back de cobre.	Limitado para uso em alguns modelos e acessos de máquinas manuais. Rápido tempo de troca e preparação. Tolerar pequenos erros de posicionamento, deve ter posicionamento preciso. Média vida útil (amassamento normal). Baixa indentação. Muito complicado para alinhar em máquinas tipo X, por causa do acionamento radial.
F	Uso específico. Bom para uso em chapas de grande espessura (maior que 2,5mm). Indicado para máquinas manuais, ou automáticas. Usado em conjunto com outros formatos com bom assentamento.	Afiação deve ser precisa. Pode gerar erros de distribuição de calor (descentralização do ponto). Amassamento demorado, boa vida útil. Baixa indentação.
G	Uso geral.	Não permite afiação
S	Uso geral. Ajuda a reduzir aderência dos eletrodos em chapas galvanizadas.	Não permite afiação

Fonte: Manual de treinamento de soldagem por resistência. WELDING SCIENCE. 2009.

3.3.4.5.2. Fresagem dos eletrodos:

Com o objetivo de manter o formato pré-estabelecido do eletrodo, e de garantir que não haverá contaminação na área de contato, periodicamente os eletrodos devem ser fresados. Para tanto, existem diversas formas, automática, manual, semiautomática, entre outras.

Vale neste ponto uma ressalva, notando que a fresagem manual, com a utilização de uma lima deve ser evitada, uma vez que dificilmente se conseguirá produzir um formato uniforme após todas as operações de fresagem, além do fato de que este procedimento levará mais tempo, incorrendo em maiores paradas na produção.

3.3.4.5.3. Resfriamento dos eletrodos

O mais comum na indústria automobilística é que a resfriamento dos eletrodos seja feita com água, que é conduzida por um tubo até próximo à extremidade do eletrodo.

O resfriamento é o aspecto mais importante para longevidade do eletrodo, evitando até que o eletrodo tenha aderência com a peça soldado, devendo ser constantemente verificada. Na figura 18 abaixo, vemos um esquema que evidencia a posição correta do tubo de resfriamento.

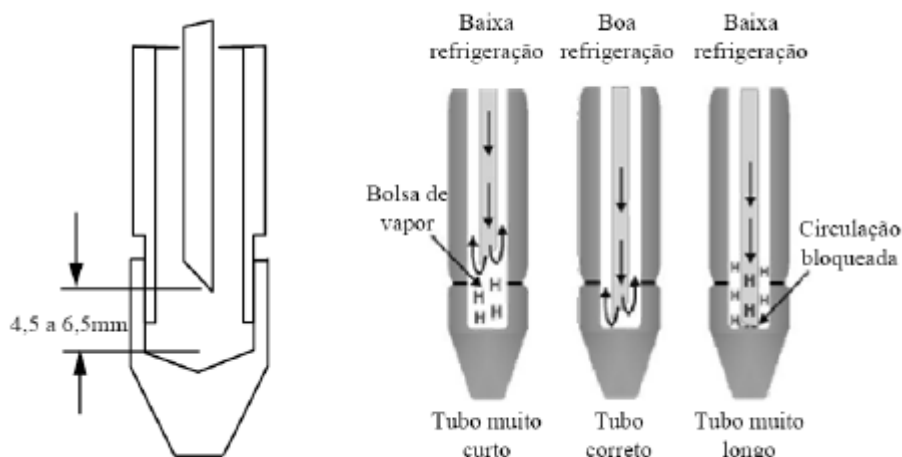


Figura 18 - Distância do tubo de resfriamento até a face do eletrodo – (Fonte: FURLANETTO, 2005)

3.3.4.6. Principais parâmetros para soldagem a ponto

É fundamental definir os parâmetros do processo a fim de controlar a quantidade de calor gerada. Com base na equação (6) da energia elétrica, pode-se dizer que as principais grandezas conforme Welding (2009), são:

- Força – força entre os eletrodos
- Tempo de Soldagem – tempo no qual a corrente circula entre as resistências de contato
- Corrente Elétrica – corrente que atravessa a resistência de contato

3.3.4.6.1. Caracterização dos tempos de soldagem

- Tempo de pré-pressão e pressão

O tempo de pré-pressão é determinado pelo tempo que o sistema leva para fechar o circuito secundário (tempo de fechamento da pinça). Após o fechamento da pinça ocorre o tempo de pressão, que é o tempo que a pinça leva para estabilizar a força de compressão entre as chapas (WELDING, 2009). Estes dois tempos são dependentes das velocidades de acionamento do cilindro, e representação destes tempos são ilustrados na figura 19:

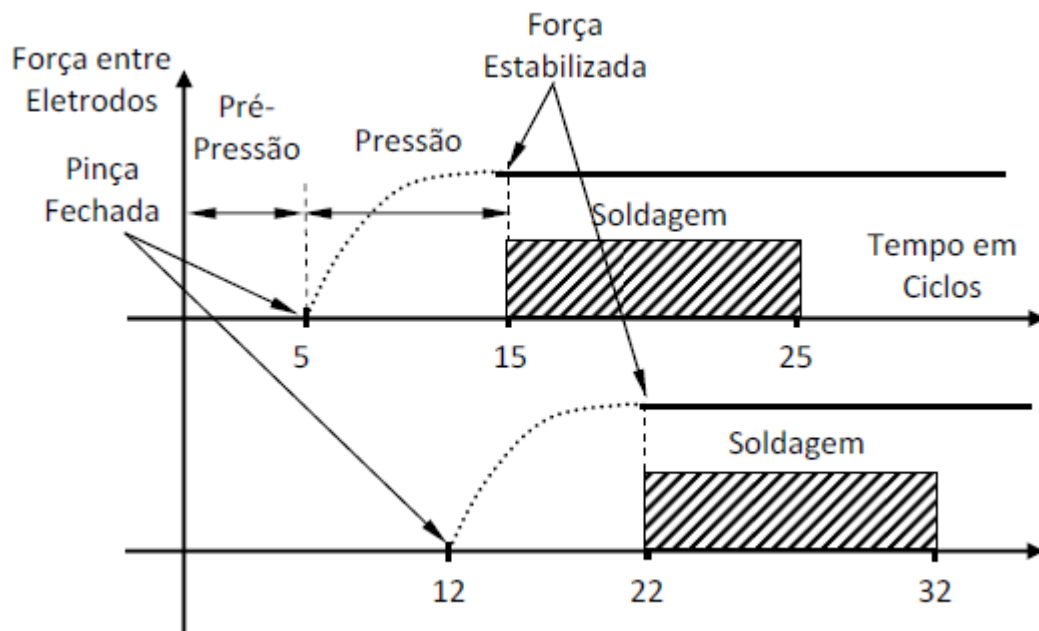


Figura 19 - Tempos de pré-pressão e pressão - Fonte: Welding, 2009.

Na figura 20 fica evidente ainda uma redução de 7 ciclos, ou seja, 117 segundos, por ponto de solda, otimizando apenas a velocidade de fechamento da pinça.

- Tempo de soldagem

Este tempo determina o calor total, quando os demais parâmetros se conservam. A taxa de aquecimento deve ser tal, que provoque a resistência esperada da junta soldada. Por sua vez, os eletrodos não devem ser excessivamente aquecidos, evitando seu desgaste. As perdas de calor não podem ser controladas durante o processo pelo equipamento de solda (ZIEDAS&TATINI, 1997).

- Tempo de resfriamento

Brandi (1992b), assinala que após a passagem da corrente, o eletrodo deve manter as peças pressionadas até que estas tenham se resfriado suficientemente.

O tempo de resfriamento garante que não ocorra o desprendimento após a abertura da pinça. Este tempo também pode ser controlado (programado) no equipamento, fazendo com que a pinça continue fechada mesmo depois da passagem da corrente (Welding, 2009), como mostrado na figura 20:

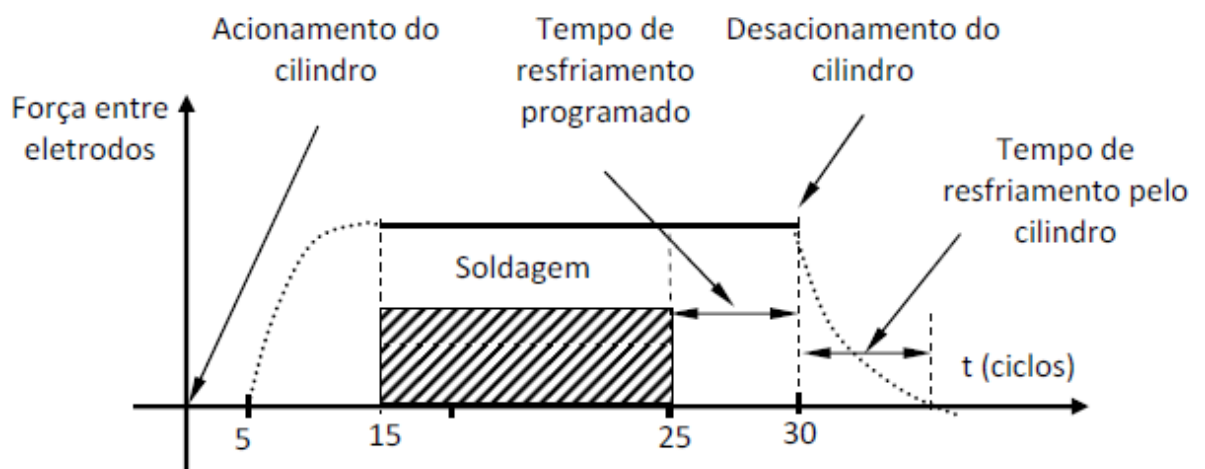


Figura 20 - Tempos de Resfriamento - Fonte (Welding, 2009)

3.3.4.6.2. Força dos eletrodos

A pressão é produzida pela aplicação de uma força externa dos eletrodos sobre as juntas. As peças que serão soldadas precisam ser fixadas na região da solda, o que garantirá a passagem da corrente elétrica. Aumentando a pressão, obtém-se uma diminuição da resistência, e conseqüentemente a diminuição do calor gerado. Nestes casos, a corrente ou o tempo devem ser aumentados para que compensem a diminuição da resistência. (ZIEDAS&TATINI, 1997).

3.3.4.6.3. Corrente Elétrica

Com relação à corrente aplicada no processo (que pode ser alternada ou contínua), Ziedas & Tatini (1997) observam que a corrente é fornecida pela rede, passa pelo circuito primário, pelo secundário, chegando finalmente à peça. Neste momento, é possível notar variações na densidade da corrente na interface da solda. Um aumento da área de contato do eletrodo diminui a densidade da corrente, e conseqüentemente o calor gerado, o que causa uma queda nas propriedades mecânicas da solda. Por sua vez, uma densidade de corrente excessiva pode causar expulsão, resultando em vazios internos e trincas, prejudicando também as propriedades mecânicas.

3.3.4.7. Influência dos parâmetros principais no processo

Os parâmetros do processo de solda influenciam diretamente na fusão dos materiais, e uma vez definidos, não devem ser alterados a fim de compensar problemas de processo ou da máquina e merecem ser analisados individualmente como menciona Welding (2009).

3.3.4.7.1. Influência do tempo

- Tempo de pré-pressão e pressão

Ao variar o tempo de fechamento dos eletrodos e de estabilização da força, teremos uma mudança na resistência de contato e da energia térmica do ponto. Quando a força de contato não está estabilizada, a resistência de contato é maior do que o esperado, provocando aumento da massa de metal fundido e até projeções do material, o que afeta a estabilidade do processo (WELDING, 2009). Foram encontrados os resultados ilustrados na figura 21 ao variar somente o tempo de fechamento dos eletrodos:

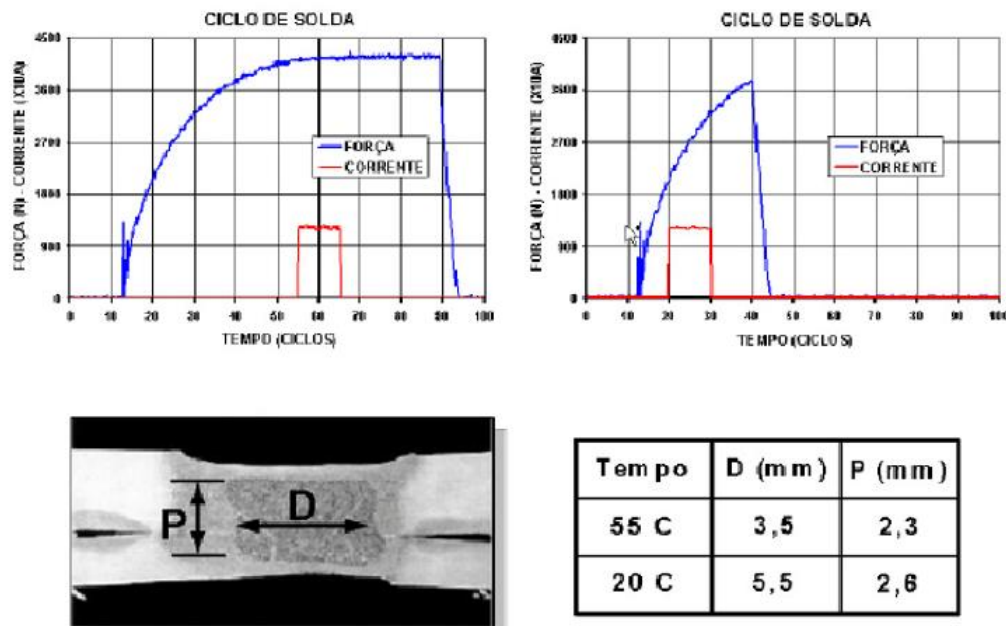


Figura 21 - Tempos de pressão de 20 e 50 ciclos – Fonte: Welding, 2009.

É possível notar na tabela uma sensível mudança no diâmetro do ponto produzido, o que pode significar em alguns casos a reprovação do ponto.

- Tempo de soldagem

Ao se aumentar o tempo de soldagem, a energia de soldagem aumenta, como se pode concluir a partir da equação 6. Outro efeito é o relacionado ao fluxo de calor por unidade de tempo. Quando se transfere calor às chapas em um tempo menor, pode-se provocar a expulsão de material, ao passo que se a transferência se der em um tempo muito maior do que o necessário, ter-se-á um ponto de solda com tamanho reduzido, e uma zona afetada pelo calor muito maior como sugerido em Welding (2009). Na figura 22 podem ser vistos 2 pontos de solda com variação do tempo de passagem de corrente.

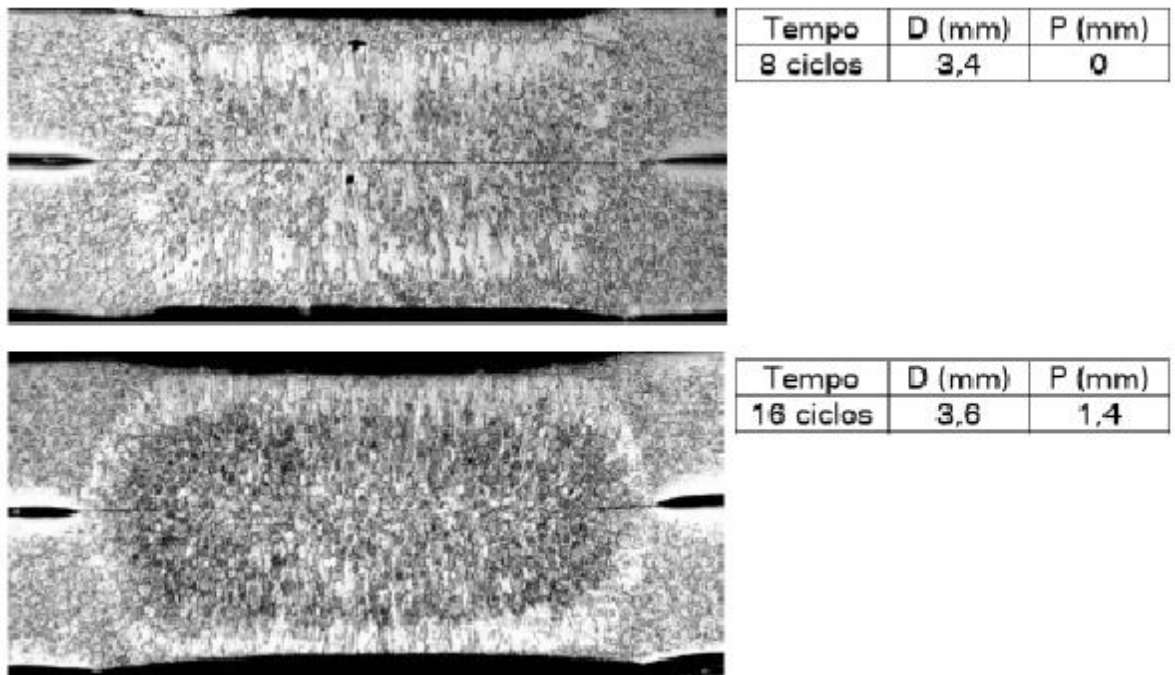


Figura 22 - Tempos de corrente de 8 e 16 ciclos - Fonte: Welding, 2009

Percebe-se facilmente que na primeira foto (8 ciclos), não houve fusão entre as duas chapas, mesmo havendo uma zona termicamente afetada, já na foto referente a 16 ciclos é possível notar claramente a fusão entre as duas chapas, bem como uma zona termicamente afetada com diâmetro ligeiramente maior do que a de 8 ciclos.

Por sua vez, se o tempo de soldagem for excessivamente extenso, será perceptível um aumento do metal fundido e consequentemente poderá haver expulsão do material e até microsoldagens do eletrodo na chapa.

- Tempo de resfriamento

O calor deve ser dissipado pelos eletrodos que permanecem fechados por um curto espaço de tempo. Este tempo permite a solidificação da solda, tempo este que não deve ser muito longo. Contudo, pode-se notar que em chapas de aço galvanizado, por exemplo, é recomendado um tempo mais longo como evidenciam ZHANG & SENKARA (2006).

3.3.4.7.2. Influência da força dos eletrodos

Em cada parte do ciclo, a força entre os eletrodos desempenha funções diferentes (BRANDI S.D., 1992b). Na fase de aquecimento, a força deve pressionar

as peças possibilitando a passagem de corrente, sem expulsão do material. Já na fase de soldagem, a força deve ser suficiente para provocar um escoamento plástico do material aquecido formando a ligação metálica. Finalmente durante o resfriamento, a pressão deve ser mantida, garantindo a integridade do ponto. A força de compressão, juntamente com a forma geométrica do eletrodo, define a resistência de contato entre as chapas, e a variação da força de compressão afeta esta resistência de forma inversamente proporcional (WELDING, 2009):

Ao variar somente a força de contato, os resultados ilustrados na figura 23 foram obtidos:

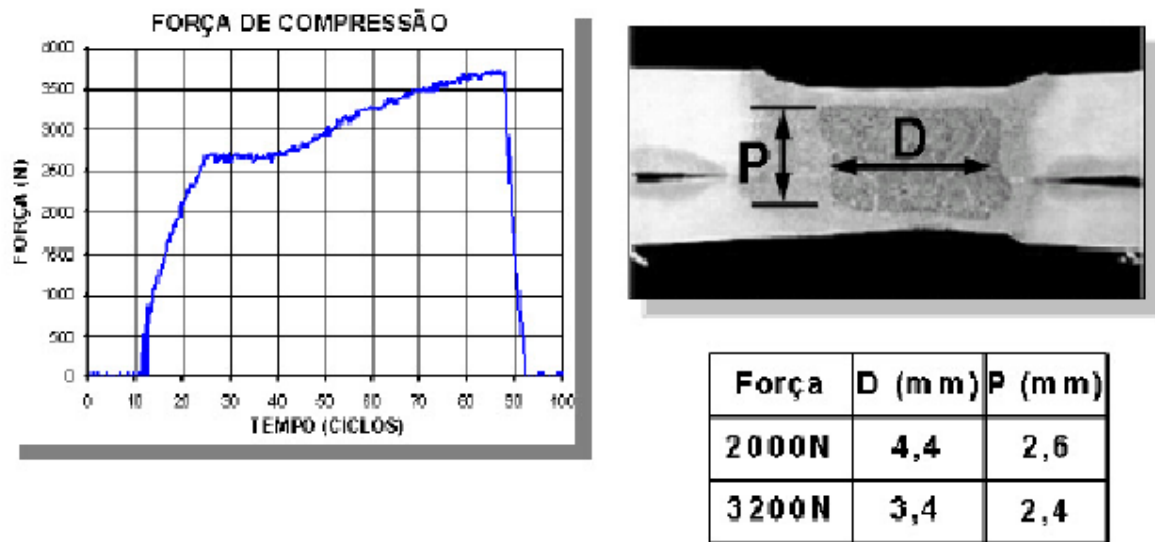


Figura 23 - Variação da força de 2000N a 3200N - Fonte: Welding, 2009

Ao utilizar-se uma força entre os eletrodos de 2000N foi obtido um ponto com maiores diâmetro e altura, isto ocorre, pois, a resistência de contato é mais elevada do que se ao se aplicar uma força de 3200N, então ao se aplicar a mesma corrente durante o mesmo tempo, a energia liberada é maior, situação que pode ser comprovada pela análise da equação 6.

3.4. Controle da qualidade de solda

Existem diversos procedimentos para avaliação da qualidade dos pontos de solda, cada empresa adota procedimentos distintos nesta atividade. De forma geral, os procedimentos de inspeção podem ser divididos em:

- Inspeção visual
- Ensaios não destrutivos

- Ensaios destrutivos

Comumente se relaciona a resistência do ponto de solda à suas características físicas, a saber, diâmetro do ponto e indentação, entre outras.

Inspeção Visual:

A inspeção visual pode ser feita pelo próprio operador continuamente, ou pelo departamento de qualidade a partir de lotes amostrais. Apesar de muito empregado, trata-se de um método pouco preciso, sua relevância está em ser um ponto inicial para um processo mais criterioso.

Na tabela 3 ficam evidentes alguns pontos básicos a serem observados nesta primeira fase:

Tabela 3 - Itens a serem observados na inspeção visual de pontos de solda

INSPECIONAR	POSSÍVEIS PROBLEMAS	POSSÍVEIS CAUSAS
Coloração da superfície da área fundida: ✓ Superfície sem alteração de cor (ponto claro) ou sem marca de aquecimento da superfície de contato com os eletrodos.	✓ Baixa temperatura ocasionando diminuição da área de fusão.	✓ Aumento da força entre eletrodos. ✓ Diminuição da corrente ou tempo de solda. ✓ Desgaste ou fim de vida útil dos eletrodos. ✓ Erro na curva do stepper. ✓ Produto fora da especificação dimensional ou físico química. ✓ Fuga de corrente na máquina. ✓ Controlador programado para sem solda. ✓ Eletrodo fora de especificação.
Coloração da superfície da área fundida e luz emitida: ✓ Superfície escura além da área de fusão dos materiais. Área em torno do ponto fica marcada pela alteração da temperatura do material. ✓ Grande quantidade de luz gerada na área de contato dos eletrodos com o produto ou na superfície de fusão.	✓ Alta temperatura de fusão, aumentando a zona afetada pelo calor (ZAC), ocasionando grande endentação e dependendo do material, fragiliza a ZAC, gera trincas, contamina a superfície com o material do eletrodo e outras implicações metalúrgicas.	✓ Elevação no tempo ou na corrente de soldagem. ✓ Falha na refrigeração dos eletrodos. ✓ Produto fora da especificação dimensional ou físico química.
Expulsão de material.	✓ Alta temperatura de fusão com retirada de material (respingo), ocasionando vazios na zona de fusão, rebarbas na superfície da área de contato, aumento da endentação, contamina a superfície com o material do eletrodo e outras implicações metalúrgicas.	✓ Elevação na corrente de solda. ✓ Diminuição da força de contato entre os eletrodos. ✓ Falha na refrigeração dos eletrodos. ✓ Produto fora da especificação dimensional ou físico química. ✓ Folgas no sistema de acionamento dos eletrodos. ✓ Desalinhamento dos eletrodos. ✓ Assentamento ruim das chapas. ✓ Material contaminado com impurezas. ✓ Eletrodo fora de especificação.
Geometria da área fundida: ✓ Área de fusão ovalada. ✓ Amassamento irregular do produto. As partes do produto fundem diferentemente.	✓ Alteração da área de contato ocasionando diminuição da área de fusão. ✓ Projeção de material. ✓ Aumento da indentação	✓ Alteração da força entre eletrodos. ✓ Desgaste ou fim de vida útil dos eletrodos. ✓ Produto fora da especificação dimensional ou físico química. ✓ Eletrodo fora de especificação. ✓ Folgas no sistema de acionamento dos eletrodos. ✓ Desalinhamento dos eletrodos.

3.4.1. Ensaios não destrutivos

Na categoria de ensaios não destrutivos são enquadrados os ensaios que envolvem raios X, partículas magnéticas, ultrassom e líquidos penetrantes.

Estes ensaios são realizados em peças semiacabadas, sem prejuízo à futura utilização das mesmas, uma vez que não deixam marcas nem alteram as propriedades mecânicas do produto. A figura 24 mostra esquematicamente os processos de inspeção já citados.

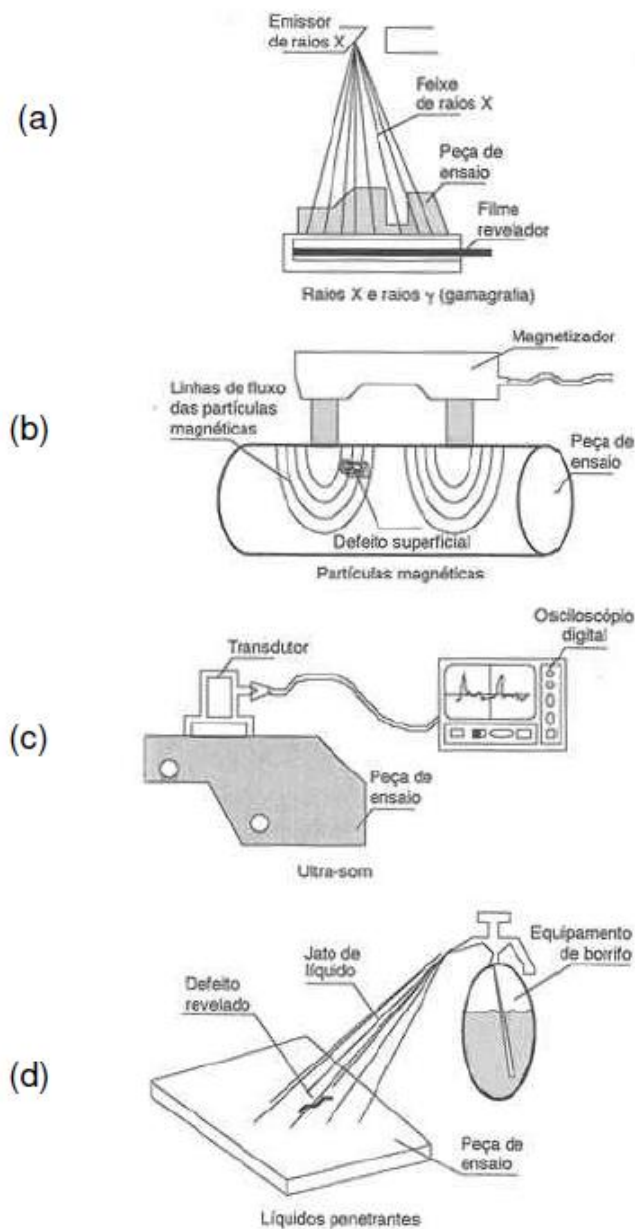


Figura 24 - Ensaios não destrutivos Raios X (a); Partículas Magnéticas (b); Ultrassom (c); Líquidos Penetrantes (d) (Fonte GARCIA et al 1999)

3.4.2. Ensaio por ultrassom:

Existem diversos tipos de ensaio envolvendo ultrassom como, por exemplo, o que utiliza o método da transparência e o que utiliza o método da reflexão.

No tocante ao processo de solda a ponto por resistência, o método mais utilizado na indústria automotiva é o de reflexão, na figura 25 é possível ter uma ideia do funcionamento deste método:

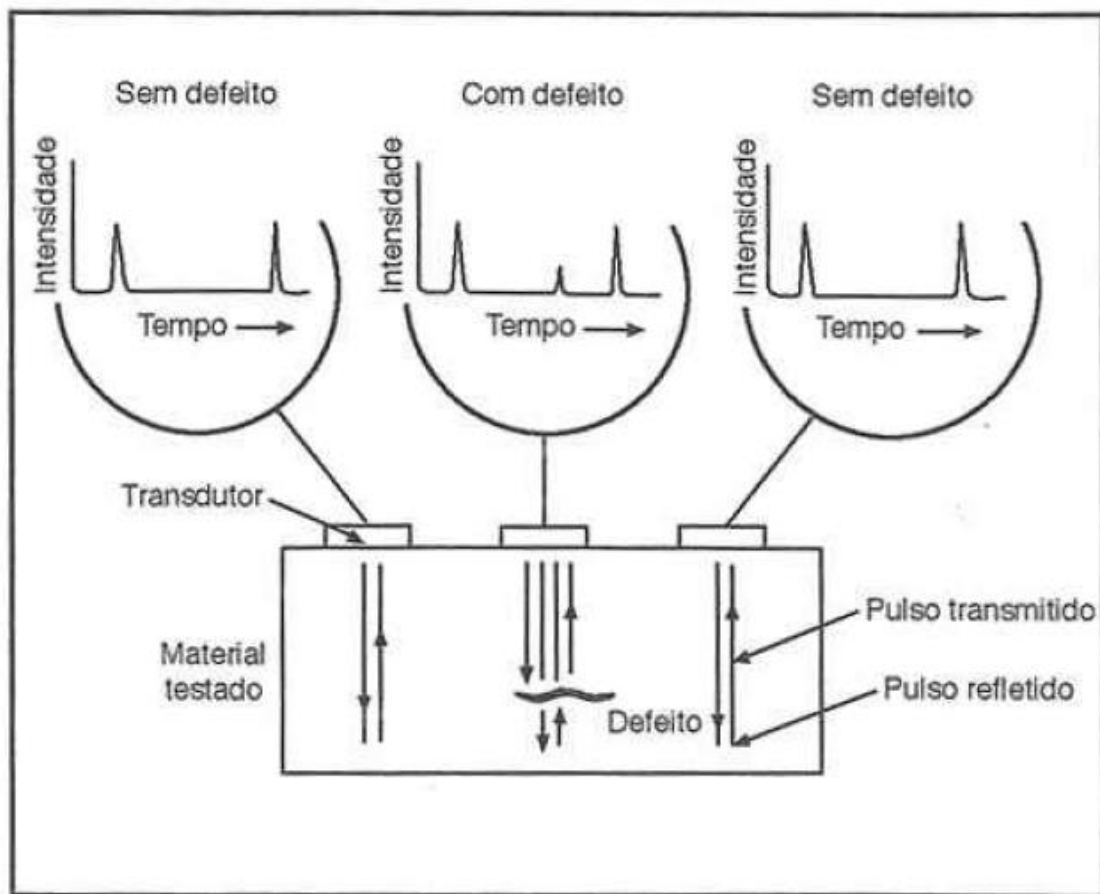


Figura 25 - Ilustração do método de reflexão (Fonte: GARCIA et al 1999)

Este ensaio será aplicado neste trabalho sempre que se desejar determinar a indentação de ponto produzido por um conjunto de parâmetros a ser avaliado.

3.4.3. Ensaios Destrutivos

Nesta categoria, são enquadrados os ensaios que ao serem aplicados impossibilitam a utilização da peça nas demais etapas do processo produtivo.

Os ensaios mais aplicados são os de tração por cisalhamento, o de arrancamento, e o de torção, ilustrados na figura 26.

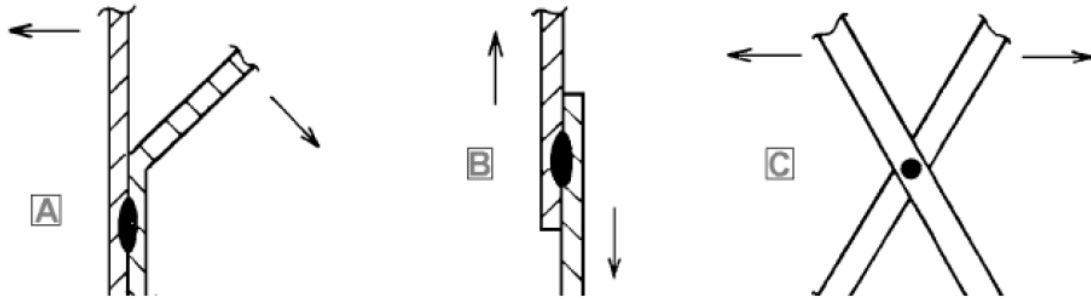


Figura 26 - Ensaio por arrancamento (A) Tração (B) e Torção (C) - Fonte: WELDING SCIENCE, 2009

O ensaio de arrancamento evidencia o diâmetro do ponto quando feito com o auxílio de um cinzel com o formato de acordo com a figura 27.



Figura 27 - Cinzel para ensaio de arrancamento – Foto tirada por mim

Este procedimento será utilizado neste trabalho sempre que se deseje saber o diâmetro do ponto produzido por um conjunto de parâmetros a ser avaliado.

3.5. Principais problemas encontrados no emprego do processo de solda a ponto por resistência

Uma série de problemas pode ocorrer ao se empregar o processo de solda a ponto por resistência como, por exemplo:

- Corrente de Desvio
- Indentação
- Distribuição de Corrente
- Desalinhamento do Eletrodo
- Expulsão do material ou *Splash*

Nesta seção serão descritos os principais problemas encontrados no decorrer deste trabalho, e que são considerados quando se avalia a qualidade de um ponto de solda, a saber:

3.5.1. Indentação:

Entende-se por indentação a profundidade que se nota na superfície da chapa soldada decorrente da força exercida pelo eletrodo durante o processo de solda a ponto por resistência como mostrado na figura 28.

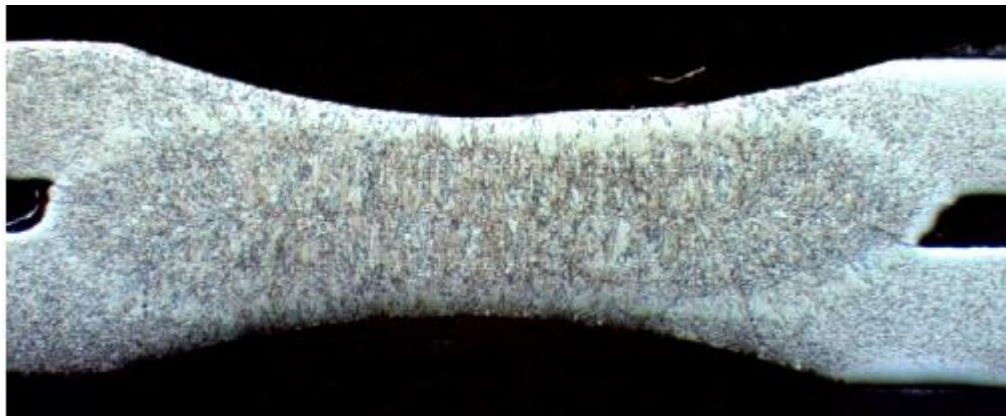


Figura 28 - Profundidade decorrente da força exercida pelo eletrodo durante o processo de solda a ponto por resistência

Praticamente impossível de ser eliminada, a indentação é aceita dentro de certos limites que não comprometem a estética do produto final, normalmente se aceita como valor máximo de indentação, 20% a 30% da menor espessura das chapas unidas, podendo variar de acordo com a norma e localização do ponto.

Vale evidenciar ainda que valores maiores de indentação favorecem a falha em fadiga, o que se deve ao fato de que a indentação age como um ponto de concentração de tensão.

3.5.2. Expulsão de material ou Splash

Uma vez que o processo de solda a ponto por resistência, por definição, é um processo de união sem adição de material, não é desejável que haja perda ou retirada de material. Por expulsão ou *Splash*, entende-se a perda de material líquido da região da solda.

Este fenômeno se deve ao excesso de calor gerado durante o processo de solda a ponto por resistência ou pela falta de força entre os eletrodos, tais fenômenos serão detalhados nos experimentos feitos no decorrer desta dissertação.

A ocorrência deste fenômeno, doravante será considerado um fator que reprovará o ponto obtido com a combinação de parâmetros.

4. DEFINIÇÃO DA JANELA OPERACIONAL

Janela operacional é um meio de expressar graficamente por meio de um volume a combinação entre os valores de corrente de solda, do tempo de solda e da força aplicada entre os eletrodos que devem gerar pontos de solda que atendam às características pré-determinadas pelas normas. Após definida a janela operacional, ela será o objeto principal deste estudo de solda por resistência, pois a partir dela serão extrapolados os valores dos parâmetros e será estudada a influência de cada um deles no ponto de solda.

Assumindo então que este volume será um paralelepípedo como apresentado na figura 23 abaixo:

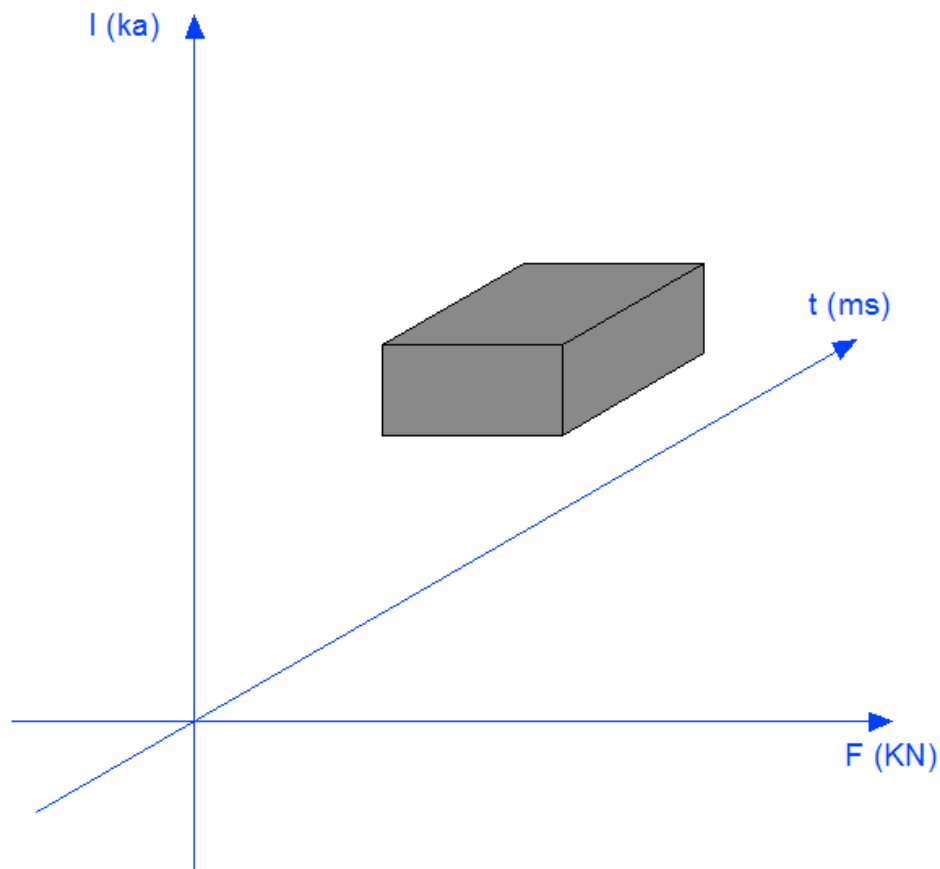


Figura 29 - Modelo da Janela Operacional. (Elaboração própria)

Portanto, as combinações de corrente de solda e tempo de solda e força entre os eletrodos na área compreendida dentro do sólido (isto é, Janela Operacional ou “Lobe”) produzem pontos de solda com diâmetros de botão e indentação aceitáveis e não apresentando Splash.

4.1. Critérios para a aceitação de um ponto de solda

Ao avaliar diversas normas, optou-se por considerar pontos aprovados, aqueles que atendem ao especificado na norma AWS- SAE D8-9M no item 6.7.1 que determina o mínimo diâmetro do ponto (MDP) como:

$$MDP = 4 * \sqrt{T} \quad (8)$$

Onde:

MDP – Mínimo diâmetro do ponto

T – Menor espessura de chapa

Adicionalmente a este critério será ainda considerado o requisito no item 2.2.1.1 da norma 9.50171 da Fiat que aceita para pontos em áreas críticas uma indentação menor do que 30% da menor espessura das chapas soldadas, sendo o ideal uma indentação menor do que 10% da menor espessura das chapas soldadas. A favor da segurança adotaremos como limite nos testes, um valor de 20%.

4.2. Parâmetros de referência - General Motors

Os parâmetros iniciais da solda (corrente, tempo de solda, força aplicada, etc) são definidos em função da espessura e revestimento das chapas a serem soldadas. A fim de se exemplificar a maneira de como tais parâmetros são sugeridos, temos, por exemplo, a norma General Motors (WS-1, 2003) explicitada na tabela 4 a seguir:

Tabela 4 - Parâmetros de Solda de Referência

	Espessura Governante EG	Força Requerida F		Corrente de Solda I	Tempo Total				Dist. min entre pontos	Diâmetro mínimo do botão	Flange mínima			Eletrodo	
					Compressão	Solda	Retenção	Pausa							
	mm	N	Lb	KA	Ciclo = 1/60 seg				mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Condição da Superfície de Colapso Galvanizada com Galvanizada SC = G x G	0,75 - 1,10	3640	800	13,5	16	14	2	14	19,0	6,4	16,0	6,5	18,0	8,0	16,0
	1,11 - 1,35	4550	1000	15,0	18	16	2	14	19,0	6,4	16,0	7,5	18,0	8,0	16,0
	1,36 - 1,60	5450	1200	18,0	20	21	2	18	26,0	7,8	16,0	8,8	18,0	9,4	16,0
	1,61 - 1,80	6360	1400	19,5	20	24	5	20	35,0	7,8	16,0	8,5	21,0	9,4	19,0
	1,81 - 2,10	7270	1600	21,5	25	28	5	25	38,0	9,7	18,0	9,0	21,0	11,3	19,0
	2,11 - 2,40	9090	2000	23,0	25	32	5	25	32,0	9,7	18,0	9,5	22,0	11,3	19,0
Condição da Superfície de Colapso Galvanneal com Galvanneal SC = Gn x Gn	0,75 - 1,10	2937	660	10,5	9	10	3	7	18	5,6	14,3	7,2	16,5	7,4	14,3
	1,11 - 1,35	2937	660	11,0	11	11	3	9	29	5,6	17,6	8,3	19,8	7,4	17,6
	1,36 - 1,60	3916	880	13,2	13	13	3	11	35	7,0	17,6	9,7	19,8	8,8	17,6
	1,61 - 1,80	4403	990	14,3	15	15	6	17	39	7,0	17,6	9,4	20,9	8,8	17,6
	1,81 - 2,10	5382	1210	16,0	20	20	6	17	42	8,6	17,6	9,9	22,0	10,3	17,6
	2,11 - 2,40	6360	1430	17,1	22	23	6	17	45	8,6	19,8	10,5	24,2	10,3	20,9
Condição da Superfície de Colapso Galvanizada com Nua SC = G x N	0,75 - 1,10	2670	600	11,4	12	10	2	8	16,0	5,1	13,0	6,5	15,0	6,7	13,0
	1,11 - 1,35	3560	800	12,0	14	12	2	8	26,0	5,1	16,0	7,5	18,0	6,7	16,0
	1,36 - 1,60	4448	1000	14,4	16	14	2	10	32,0	6,4	16,0	8,8	18,0	8,0	16,0
	1,61 - 1,80	4893	1100	15,6	18	18	5	15	35,0	6,4	16,0	8,5	19,0	8,0	16,0
	1,81 - 2,10	5782	1300	17,4	22	21	5	15	38,0	7,8	16,0	9,0	20,0	9,4	16,0
	2,11 - 2,40	7117	1600	18,6	24	24	5	15	41,0	7,8	18,0	9,5	22,0	9,4	19,0
Condição da Superfície de Colapso Nua com Nua SC = N x N	0,75 - 1,10	2670	600	9,5	8	9	2	6	16,0	4,0	13,0	6,5	15,0	5,6	13,0
	1,11 - 1,35	2670	600	10,0	10	10	2	6	19,0	4,5	16,0	7,5	18,0	6,1	16,0
	1,36 - 1,60	3560	800	12,0	12	12	2	8	26,0	5,0	16,0	8,8	18,0	6,6	16,0
	1,61 - 1,80	4003	900	13,0	14	14	5	10	29,0	5,3	16,0	8,5	19,0	6,9	16,0
	1,81 - 2,10	4893	1100	14,5	18	18	5	12	32,0	5,7	16,0	9,0	19,0	7,3	16,0
	2,11 - 2,40	5782	1300	15,5	20	21	5	14	35,0	6,0	16,0	9,5	20,0	7,6	16,0

Fonte: Fisher Body Division, 1967

Esta tabela deve ser utilizada apenas como referência, uma vez que sabemos ser possível alcançar bons resultados utilizando-se outras combinações de parâmetros.

4.3. Equipamentos requeridos

4.3.1. Equipamento de soldagem

O equipamento seguinte é necessário para gerar os dados usados para determinar a janela operacional.

- Equipamento de solda a ponto por resistência capaz de gerar força de solda de consistentemente
- Transformador-Retificador de solda
- Controle de solda
- Eletrodo

4.3.1.1. Fluxo de água

O fluxo de água no eletrodo deve ser de 2 l/min a 4 l/min.

Este fluxo é exigido para que se mantenha o eletrodo refrigerado evitando que as propriedades elétricas do material se alterem, e o amassamento.

4.3.2. Equipamento de inspeção, medição e teste

Devem ser utilizados os seguintes equipamentos calibrados:

- Analisador de corrente
- Medidor de força de leitura digital capaz de ler até 8,9 kN
- Paquímetro digital calibrado para medir o tamanho do ponto de solda
- Medidor de vazão para medir o fluxo de água
- Equipamento de ultrassom calibrado para medir a indentação do ponto de solda

4.3.3. Ferramentas

- Martelo
- Cinzel

4.3.4. Eletrodos

Tomando eletrodos esféricos da classe RWMA 2, deve-se garantir que os eletrodos superior e inferior sejam alinhados de acordo com o seguinte procedimento:

1. Configuração e verificação da força de solda de teste.
2. Estipular o programa de solda de teste.
3. Mudar o controle do soldador para o modo "Sem solda".
4. Inserir papel e papel carbono entre os eletrodos
5. Iniciar o controle do soldador.
6. Inspeccionar a impressão de carbono feita pelas tampas dos eletrodos no papel.

O alinhamento dos eletrodos é considerado aceitável quando a impressão de carbono de ambas as tampas superior e inferior apresentar:

- forma circular
- uniforme
- o diâmetro atende ao valor definido na fresagem do eletrodo.

4.4. Geração da janela operacional

Tomando por material base para aplicação do procedimento descrito acima, uma chapa de aço sem recobrimento (nua), com 1,5mm de espessura, foram feitos corpos de prova com dimensões de 150mm X 50mm e obedecendo uma sobreposição de 50mm, como mostrado na figura 30.

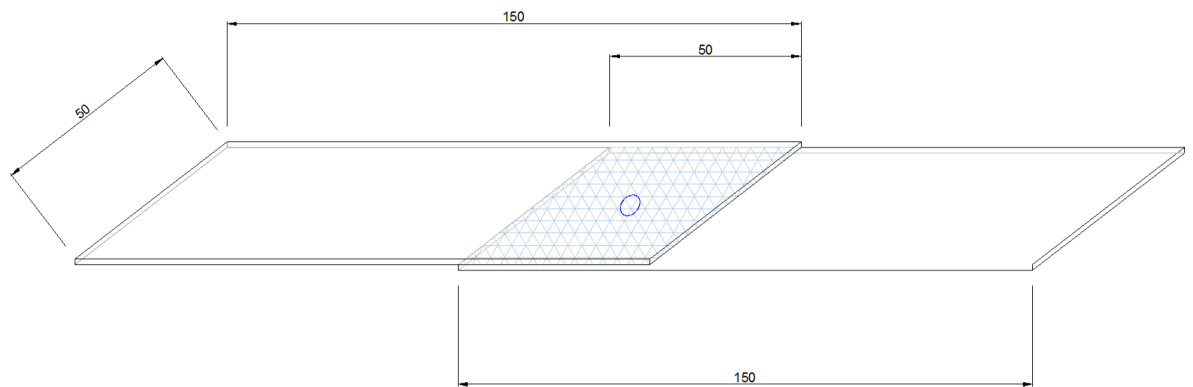


Figura 30 - Dimensões do corpo de prova. Elaboração própria

Em literatura, como por exemplo na norma da General Motors (WS-1, 2003) encontra-se como valores de indicados para este tipo e espessura de chapa os seguintes valores para os parâmetros:

Corrente – 7,5 kA

Força – 3,5 kN

Tempo de descarga da corrente – 300 ms

A partir destes parâmetros iniciais foram feitos diversos pontos, com o intuito de mapear a Janela Operacional, variando-se a força, corrente e tempo.

A todos os pontos foi aplicado o teste de arrancamento, sendo que os resultados obtidos estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Mapeamento da Janela Operacional – (Elaboração própria)

F (daN)	I (Ka)	t (ms)	Diâmetro(mm)	Indentação (%)	OBS
172	8	200	6	16	
182	9	400	6,5	30	Splash
188	6	200	3,8	7	
190	7	300	6,1	16	
190	7	400	6,1	11	
194	7	200	5,9	9	
195	6	300	5	7	
195	8	400	6,6	14	
196	6	400	4,7	10	
202	8	300	7	14	
209	9	200	6,2	15	Splash
215	9	300	6,9	20	Splash
310	7	400	3,9	11	
313	7	200	3,4	9	
319	9	400	5	30	Splash
323	9	200	5,7	20	Splash
326	7	300	4,8	10	
337	8	200	5,7	11	
348	8	400	5,2	20	
361	9	300	5,4	18	Splash
362	8	300	5,7	14	
411	8	200	5,1	11	
420	8	300	4,7	17	
436	8	400	5,1	24	
436	9	300	4,7	22	
441	7	400	3,5	13	
443	7	300	2,5	8	
447	9	400	4,9	26	Splash
453	7	200	2	8	
456	9	200	4,8	21	

Seguindo o procedimento descrito acima se encontra a janela operacional representada na figura 31 abaixo:

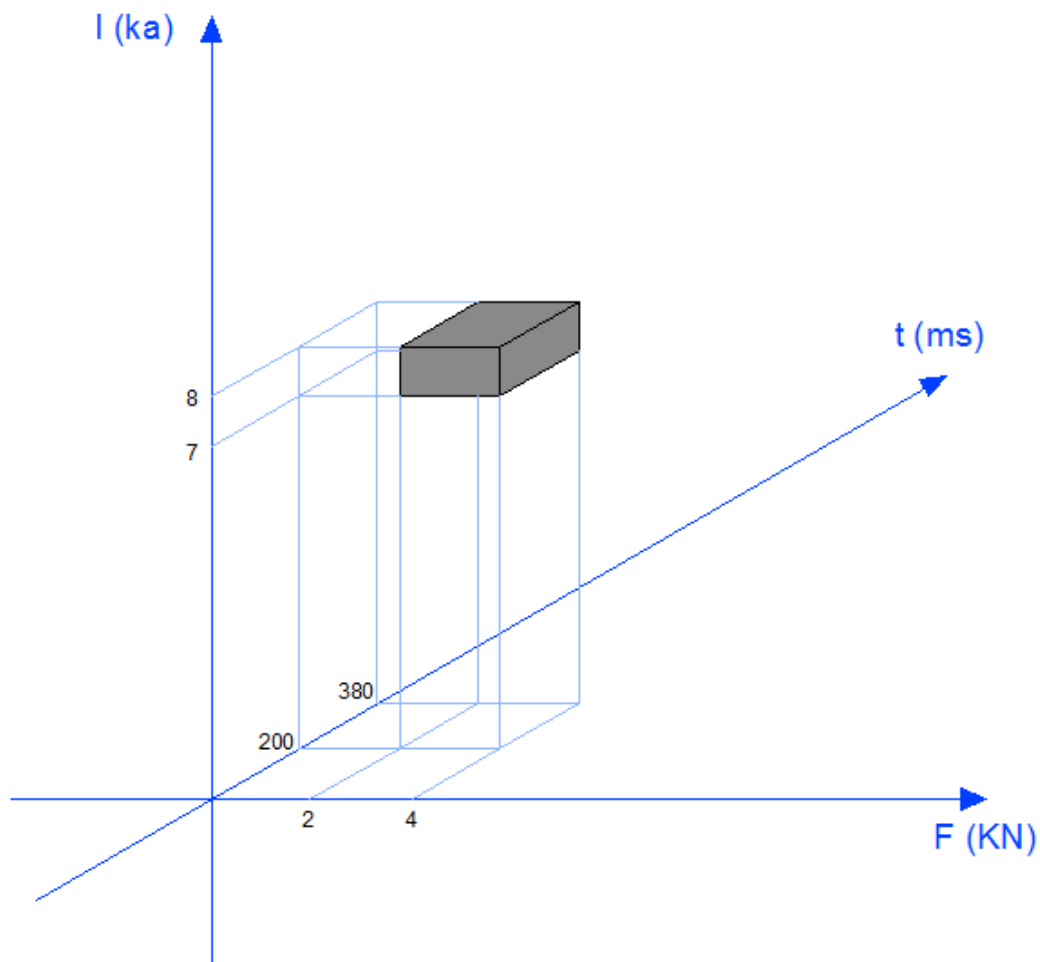


Figura 31 - Janela Operacional - Elaboração própria

5. Estudo da influência da corrente, força e tempo

Como visto no capítulo anterior, uma vez que se tenha a janela operacional definida, ou seja, ao se adotar valores de corrente entre 7kA e 8 kA, força entre 2 kN e 4 kN e tempo de solda de 200ms a 380ms, encontraremos como resultado pontos que atendem, para a junção de chapas de aço sem recobrimento de 1,5mm de espessura, aos critérios adotados, que são diâmetro mínimo de 4,9mm e indentação menor do que 20%.

A fim de se estudar a influência de cada um dos parâmetros no ponto obtido, foram fixados dois dos parâmetros no centro da área obtida anteriormente, variando-se o terceiro.

Como se pode observar na Tabela 6 abaixo, adotando o tempo de solda de 300ms e corrente de 7,5 kA, e variando-se a força desde o mínimo permitido pelo equipamento que é 75, 59 daN até 650 daN obteve-se os seguintes resultados:

Tabela 6 - Variação da força entre os eletrodos – (Elaboração própria)

T (ms)	I (Ka)	F (daN)	D (mm)	Ind (%)
300	7,5	75,59	6,3	21
300	7,5	92,1	6,2	23
300	7,5	90,06	6,2	13
300	7,5	161,1	6	17
300	7,5	186	5,8	16
300	7,5	185,1	5,7	16
300	7,5	194,3	5,6	17
300	7,5	227,7	5,5	16
300	7,5	246,1	5,4	14
300	7,5	252,8	5,4	15
300	7,5	257,8	5,4	18
300	7,5	264,7	5,4	17
300	7,5	282	5,3	17
300	7,5	318,2	5,1	17
300	7,5	364,3	5	20
300	7,5	520,8	4,2	22
300	7,5	651	3,9	24

Nos gráficos das figuras 32 e 33 são destacados o comportamento do diâmetro do ponto e da indentação, com a variação da força.

Nota-se que o diâmetro do ponto diminui com o aumento da força, isto se deve ao fato de a resistência de contato entre as chapas diminuir enquanto que o contato entre elas é aumentado, proporcionando menor geração de calor pelo efeito Joule.

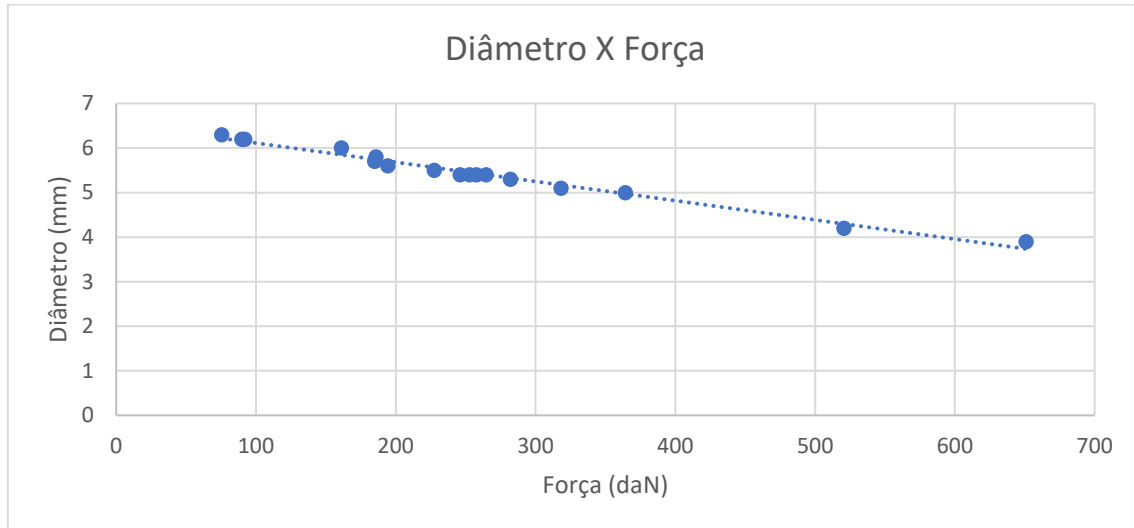


Figura 32 - Variação do Diâmetro x Força - Elaboração própria

Já no tocante à indentação, é possível perceber que esta inicia com um valor mais alto, acima de 20%, pois, a geração de calor na região ponto é maior, já que a resistência de contato é tanto maior quanto menor for a força aplicada pelos eletrodos. A indentação tende a diminuir, com o aumento da força, na região onde se encontram os pontos aprovados segundo os critérios adotados, porém quando se continua a elevar a força de compressão das chapas, os eletrodos impõem uma deformação mecânica cada vez maior, forçando o aumento da indentação para fora da faixa aceitável.

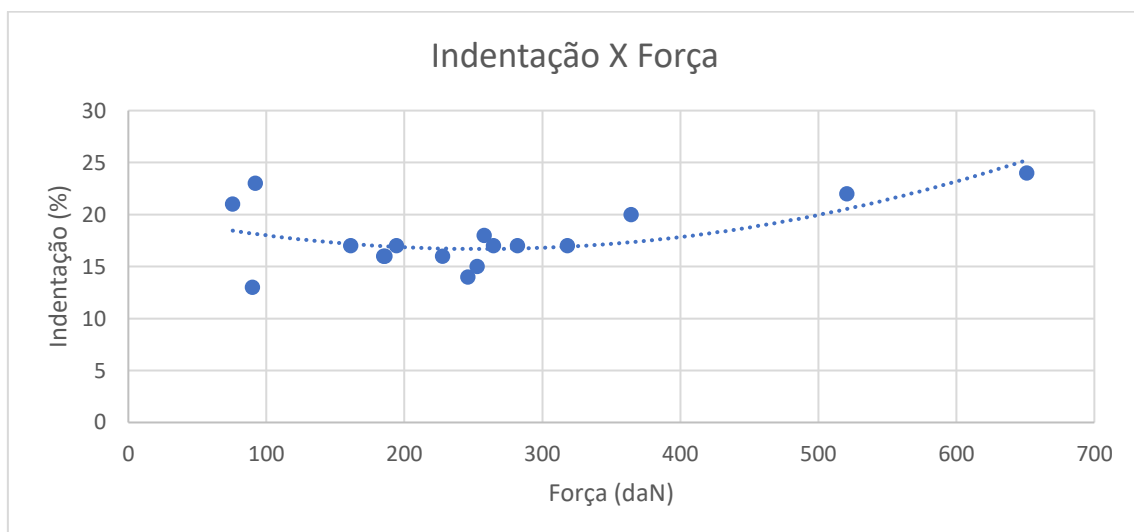


Figura 33 - Variação da Indentação x Força - Elaboração própria

Repetindo o procedimento, porém fixando o tempo em 300ms e a força em 300 daN, e variando-se a corrente de 6 kA até 9,5 kA obteve-se os resultados da tabela 7:

Tabela 7 - Variação da Corrente – (Elaboração própria)

T (ms)	I (Ka)	F (daN)	D (mm)	Ind (%)
300	6	300	4,6	10
300	6,5	300	4,6	10
300	7	297	4,6	14
300	7,5	309	5,1	15
300	8	269	4,9	17
300	8,5	286,9	6,7	23
300	9	289,6	7,6	32
300	9,5	311	7,1	26

Observando o gráfico da figura 34, a correlação entre o aumento do diâmetro do ponto e o aumento da corrente é bastante forte, uma vez que se fornece mais energia ao processo, gerando mais calor por efeito Joule, o que proporciona maior fusão do material.

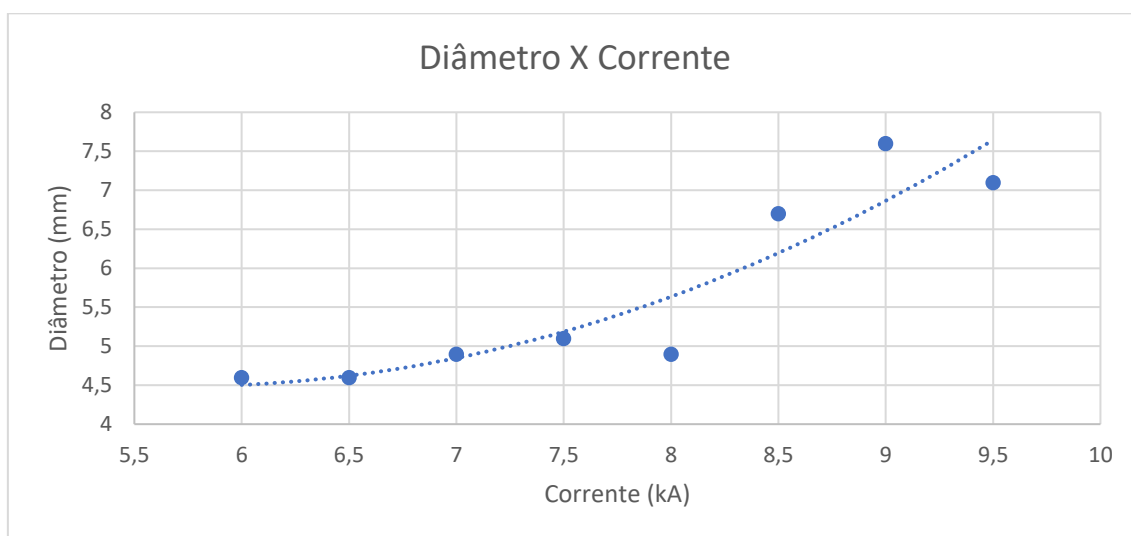


Figura 34 - Variação do Diâmetro x Corrente - Elaboração própria

Analisando a figura 35, pode-se observar que a indentação tem comportamento semelhante ao diâmetro do ponto de solda no que se refere a variação da corrente no processo. Quanto maior a corrente, maior será a indentação, superando os valores considerados admissíveis, uma vez que há um excesso de material fundido que escoou, permitindo assim uma maior penetração dos eletrodos.

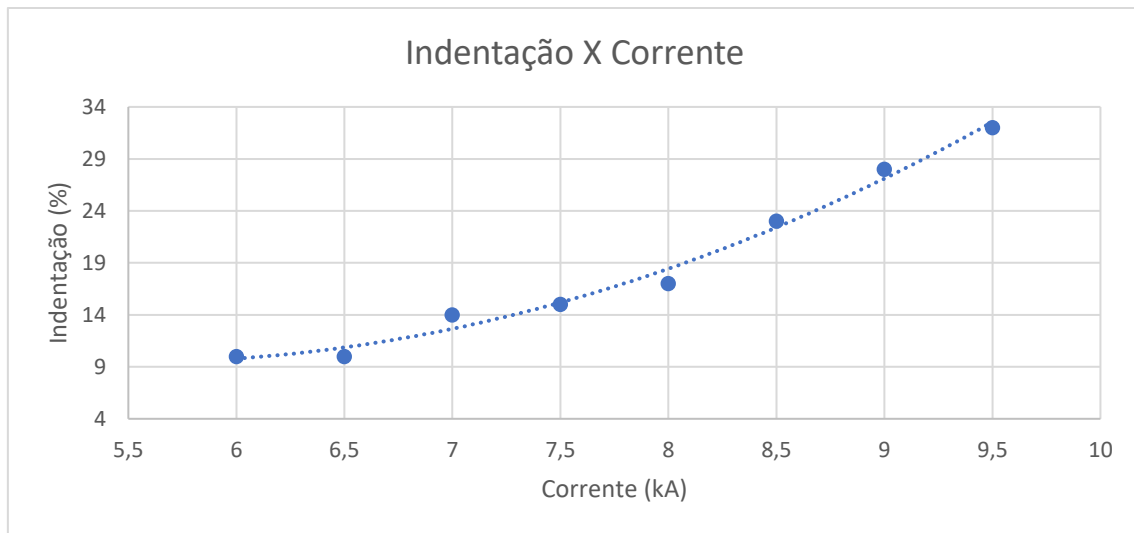


Figura 35 - Variação da Indentação x Corrente - Elaboração própria

Agora, fixando a corrente em 7,5 kA, e a força em 300 daN, variando-se o tempo de 100ms a 500ms, foram observados os seguintes resultados:

Tabela 8 - Variação do Tempo de Solda – (Elaboração própria)

T (ms)	I (Ka)	F (daN)	D (mm)	Ind (%)
100	7,5	282,2	2,3	10
150	7,5	298,1	2,8	12
200	7,5	286,3	4,3	11
200	7,5	311,7	3,5	14
250	7,5	317,4	4,4	16
300	7,5	316,8	4,7	16
350	7,5	315,6	5	19
400	7,5	305,3	5,2	21
450	7,5	310,3	5,3	23
500	7,5	312,9	5,4	19

Analogamente ao que ocorre com o aumento da corrente, ao aumentar-se o tempo de solda, é fornecida uma maior quantidade de energia ao processo gerando

assim, mais calor, como consequência se observa o aumento do tamanho do ponto formado como pode ser visto no gráfico da figura 36 abaixo.

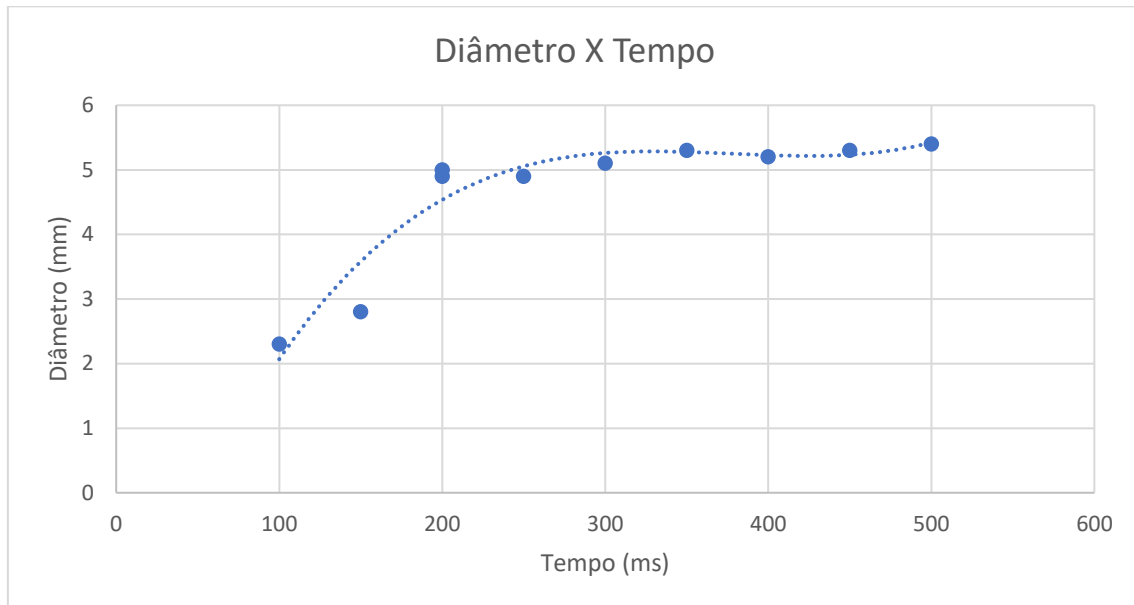


Figura 36 - Variação do Diâmetro x Tempo - Elaboração própria

Contudo, como a energia fornecida aumenta, observa-se o mesmo fenômeno na indentação observado ao variar-se a corrente, porém com uma taxa de aumento de indentação menor como visto no gráfico da figura 37.

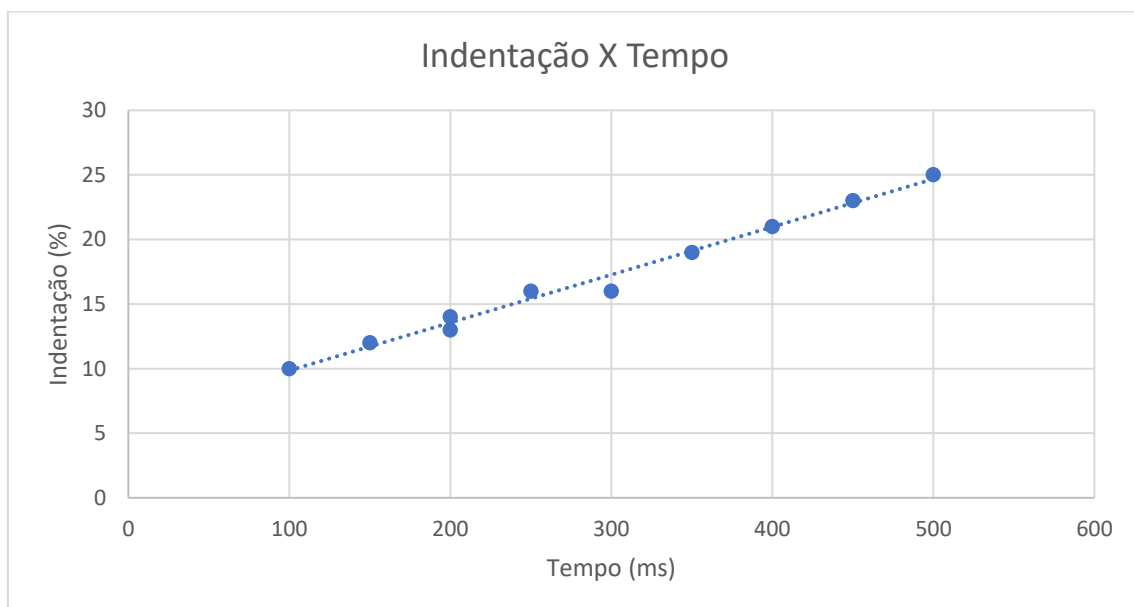


Figura 37 - Variação da Indentação x Tempo - Elaboração própria

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho primeiramente foram explicitados diversos aspectos do processo de soldagem a ponto por resistência fazendo-se uma breve comparação entre este processo e alguns outros processos correlatos.

Foram reladas ainda as principais leis físicas que regem os fenômenos envolvidos como por exemplo a lei de Joule que permite calcular a energia térmica total desprendida no processo de solda a ponto por resistência (equação 6), na qual se relacionam os três principais parâmetros passíveis de controle, que são, o tempo de solda, a corrente elétrica imposta à junta no momento da solda e a força entre os eletrodos que influencia diretamente a resistência de contato da junta soldada.

Outro ponto crucial evidenciado foi a influência do formato do eletrodo, sua refrigeração e material no resultado final da solda, foi então adotado um eletrodo esférico da classe RWMA 2.

Ainda, para que fosse possível avaliar a qualidade da solda obtida, foram descritos os principais métodos de controle de qualidade, destacando os principais defeitos que podem ocorrer no processo de solda a ponto por resistência.

De posse de todas estas informações e com o processo entendido, definiu-se experimentalmente uma janela operacional, ou seja, um meio de expressar graficamente por meio de um volume a combinação entre os valores de corrente de solda, do tempo de solda e da força aplicada entre os eletrodos que devem gerar pontos de solda que atendam às características pré-determinadas pelas normas. Consultando diversas literaturas, adotou-se a favor da segurança os seguintes critérios de rejeição: diâmetro mínimo do ponto maior ou igual a quatro vezes a raiz da espessura da menor chapa, e indentação menor do que 20%.

É sabido ainda que o material a ser soldado possui grande influência na determinação dos parâmetros, sendo assim foi escolhida uma chapa de aço sem recobrimento (nua), com 1,5mm de espessura, foram feitos corpos de prova com dimensões de 150mm X 50mm e obedecendo uma sobreposição de 50mm.

Foram adotados como valores iniciais para os parâmetros:

- Corrente – 7,5 kA
- Força – 3,5 kN

- Tempo de descarga da corrente – 300 ms

Variando estes parâmetros, conseguimos construir uma janela operacional em que a corrente vai de 7 a 8 kA, o tempo de solda vai de 200 a 380ms e a força entre os eletrodos vai de 2 a 4 KN. Ou seja, ao tomarmos qualquer combinação de valores dos parâmetros dentro destes, encontraremos pontos que atendem às especificações de qualidade adotadas.

A partir daí, foram fixados dois parâmetros no centro do intervalo e variou-se o terceiro com valores abaixo, dentro da faixa e a cima dela, a fim de evidenciar sua influência no ponto de solda.

Nota-se que o diâmetro do ponto diminui com o aumento da força, já a indentação aumenta à medida que nos afastamos do valor central de força (3KN), estes fenômenos estão evidenciados nas figuras 32 e 33.

Verificou-se também uma forte correlação entre o aumento do diâmetro do ponto e o aumento da indentação com o aumento da corrente, como se nota nas figuras 34 e 35.

Finalmente ao variar-se o tempo de solda, nota-se que o diâmetro do ponto tende a aumentar com o aumento do tempo, o mesmo ocorre com a indentação, este fenômeno pode ser visto nas figuras 36 e 37, embora apresente comportamento semelhante ao que ocorreu com a variação da corrente, vemos que a influência da variação do tempo é menos sensível no resultado final do ponto de solda.

REFERÊNCIAS

- Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA). Disponível em <http://www.anfavea.com.br/anuario.html> – Anuário 2013 Acesso em 13.03.2016.
- ASLANLAR, S. (2006). *The effect of nucleus size on mechanical proprieties is electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry. journal materials and design*, 27, PP. 125-131.
- ASLANLAR, S. (2007). *Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromed steel sheets in electrical resistance spot welding*. Turquia: Journal Material and Design.
- BRANDI, S.D. Classificação dos processos de soldagem. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1992a.
- BRANDI, S.D. Soldagem por Resistência. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1992b.
- BRANDI, S.D.; BATISTA, M. Comparação entre dois equipamentos de soldagem a ponto por resistência utilizados na indústria automotiva. Congresso Nacional de Soldagem Associação Brasileira de Soldagem. . Recife, Brasil, 2010.
- BROWN L.J. ; SCHWABER, J. S., "Identifying Operating Conditions from Pre-Weld Information for Resistance Spot Welding", Proceedings of the 2000 American Control Conference, 2000
- DICKINSON, D. W., Franklin, J. E., & Stanya, A. (1980). *Characterization of spot welding behavior by dynamic electrical parameter monitoring. Welding Research Council*, 170-176.
- EDWARDS, E.R. (1998). *Inspection of Welded*. Em A. S. Metals, Metals Handbook, Vol. 6, pp. 2602-2688.
- FURLANETTO, V.(2005). Proposta e validação experimental de um modelo para máquina de solda a ponto CA. 88 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- GARCIA, A.; SPIM, J.A; SANTOS, C, A. (1999) Ensaios dos Materiais. Campinas: LTC, 247 p.
- HOULDCROFT, P.T. (1979). *Welding Process Technology*. Cambridge University Press. England.
- JENNEY, C.L. (2001). *AWS Welding Handbook, Vol 1 - Welding Science and Technology*. EUA: 9th Ed. Americam Welding Society.
- KEARNS, W.H. (1984). *Welding Handbook: Resistance and Solid-State Welding and Other Joining Processes*. American Welding Society. Miami.

WELDING SCIENCE. Manual de treinamento de soldagem por resistência. Welding Science, São Paulo, 2009. 82 p.

MARQUES, P.V., Modenesi, J. Q., & Bracarense, A. Q. (2001). Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. Belo Horizonte: UFMG.

METALURGICA MARIMAX. Apostila de Soldagem. (2016). Metalúrgica Marimax disponível em www.marimax.com.br Acesso em 10.05.2016.

NEVILLE, T.W. (1998). *Resistance Spot Welding in Welding Brazing and Soldering. Metals Handbook* (pp. 693-729). American Socyety of Metals.

RWMA - Resistance Welder Manufactures Association (2003). *Resistance Welding Manual*. U.S.A., 4th ED. Nov, , 443 p. Disponível em <https://pubs.aws.org/p/323/rwma-resistance-welding-manual-revised-4th-ed>, Acesso em 18.05.2016

SHOME, M. (2008). *Effect of dynamic contact resistances on advanced high strength steels under medun frequency DC spot welding conditions*, *Science and Technology of Welding and Joining*, India, v. 14, n.6, p.533-541, Dec. 2008.

THOMSON, E.(1891) Patentes. Disponível em Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Elihu_Thomson, Acesso em 15.04.2016.

WELDING PROCESS. (1998). *Welding Handbook* (Vol. 6). American Welding Society. Miami, EUA.

YEUNG, K. S., & Hornton, P. H. (1999). Transient Thermal Analysis of Spot Welding Electrodes. *Welding Journal*, 1-6.

ZHANG, H.; SENKARA, J. (2006). *Resistance Welding: Fundamentals and Aplications*. Londres: Taylor & Francis.

ZIEDAS, S.; TATINI, I. (1997). *Coleção Tecnologia SENAI: Soldagem*. São Paulo: SENAI.