


**unesp**  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
**CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

**GEORGE LUCAS DOLCINOTTI**

**REDUÇÃO DE FAGULHAMENTO EM MÁQUINAS AUTOMÁTICAS DE SOLDA  
PONTO EM INDÚSTRIA AUTOMOTIVA.**

Guaratinguetá - SP  
2017

**George Lucas Dolcinotti**

**REDUÇÃO DE FAGULHAMENTO EM MÁQUINAS AUTOMÁTICAS DE SOLDA  
PONTO EM INDÚSTRIA AUTOMOTIVA.**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Professor Dr. Marcio Abud  
Marcelino

Guaratinguetá - SP  
2017

D662r Dolcinotti, George Lucas  
Redução de fagulhamento em máquinas automáticas de solda ponto em indústria automotiva / George Lucas Dolcinotti – Guaratinguetá, 2017.  
46 f : il.  
Bibliografia: f. 45-46

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.  
Orientador: Prof. Dr. Marcio Abud Marcelino

1. Soldagem elétrica. 2. Correntes elétricas. 3. Solda e soldagem.  
I. Título

CDU 621.791


**GEORGE LUCAS DOLCINOTTI**

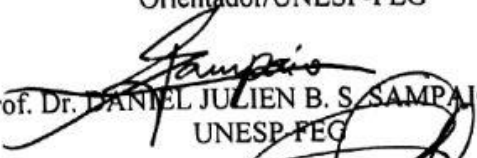
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. MARCIO ABUD MARCELINO  
Orientador/UNESP-FEG

  
Prof. Dr. DANIEL JULIEN B. S. SAMPAIO  
UNESP-FEG

  
Prof. Dr. FERNANDO RIBEIRO FILADELFO  
UNESP-FEG

Dezembro/2017

## **DADOS CURRICULARES**

### **GEORGE LUCAS DOLCINOTTI**

**NASCIMENTO** 03.01.1993 – Taubaté / SP

**FILIAÇÃO** Francisco Carlos Dolcinotti  
Rose Meire Nascimento Dolcinotti

**2012/2017** Curso de Graduação em Engenharia Elétrica  
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus de  
Guaratinguetá

Dedico este trabalho à minha mãe Rose,  
ao meu pai Francisco, ao meu irmão Léo  
e à minha namorada Monique.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, pelo dom da vida e sabedoria para realização desse trabalho,  
à minha mãe e ao meu pai que me acompanham por toda a minha trajetória e me dão apoio  
e motivação para alcançar meus sonhos e objetivos,  
ao meu irmão por ser meu melhor amigo e companheiro de sempre,  
à minha namorada por estar ao meu lado em momentos felizes e tristes,  
ao meu orientador, Marcio Abud, por todo conhecimento compartilhado ao longo desses  
dois anos de aula e orientação,  
aos meus amigos Pedro, Paulo, Danilo, Amanda, Kevin, Matheus, entre tantos outros que  
dividiram vários momentos em Guaratinguetá ao meu lado,  
aos meus colegas de trabalho, em especial ao meu supervisor Valdir e meu mentor Zamith,  
aos meus amigos de Taubaté, Eduardo, Jeferson, Tiago e Stanley,  
e por fim, à todos os funcionários da FEG-UNESP .

“Os dias prósperos não vêm por acaso; nascem de muita fadiga e persistência.”

Ford, H.



## RESUMO

Este trabalho apresenta um projeto para redução de fagulhamento em máquinas automáticas de solda ponto em uma indústria multinacional de veículos automotores. Muitos problemas têm sido causados pela grande quantidade de fagulhas provenientes da solda ponto. O principal é o acúmulo de sujeira nos equipamentos de solda, causando um tempo de inatividade nas máquinas, desvios dimensionais, problemas de qualidade, entre outros. Há um grande custo com equipe de limpeza especializada para os locais de solda e adjacências. Além disso, há um custo extra com mão de obra de manutenções corretivas e emergenciais, principalmente em grampos e pinças de solda de uma célula. A solda ponto é basicamente um tipo de soldagem por corrente elétrica. A junção de duas peças na soldagem por resistência elétrica é feita através da geração de calor, devido à passagem de corrente elétrica e da aplicação de pressão entre as peças. Durante o processo as peças aquecem e ocorre a fusão localizada no ponto de contato, na superfície de separação entre ambas. O processo de solda ponto por resistência é dividido em quatro estágios, com quatro diferentes tempos: tempo de compressão, onde a máquina fecha e pressiona as chapas (sem a passagem de corrente); tempo de solda, onde a corrente é disparada e ocorre a fusão; tempo de retenção, onde a solda é concluída e a pinça mantém fechada para o resfriamento da solda; e tempo de pausa, onde a máquina fica liberada, podendo passar para o ponto seguinte. Além desses fatores básicos, tempos específicos, corrente e força, tem-se outros que influenciam fortemente na qualidade de solda e conseqüentemente no grau de fagulhamento. Uma solda ponto deve ter seus eletrodos alinhados, com diâmetros iguais e bem refrigerados durante e após a solda. O tempo de compressão é necessário para permitir que a cabeça de solda se ajuste antes da aplicação da corrente de solda, para evitar o fagulhamento e pode variar de 150 ms a 400 ms de acordo com o deslocamento da máquina, tipo da solda, aplicação ou espessura das chapas. Neste trabalho verificou-se que, em uma empresa automobilística do Vale do Paraíba, SP, o excesso de fagulhamento era devido ao tempo de compressão inadequado para cada tipo de soldagem e, este trabalho estudou e identificou o tempo adequado, sendo ajustado no processo, especificamente para cada conjunto de pontos e tipo de chapas, evitando o disparo da corrente elétrica enquanto existir espaçamento entre as chapas. Foram feitos ajuste e revisões em todas as máquinas automáticas de solda ponto, a fim de ajustar principalmente o posicionamento e o ângulo das pinças, diminuindo significativamente o fagulhamento e evitando os pontos de solda nas bordas e no raio das chapas, pois poderiam ficar soltos e com rebarbas. A redução dessas fagulhas trouxe ganhos com as reduções de limpezas e manutenções, além de redução no consumo tanto de eletrodos como de energia elétrica, sem considerar os ganhos de produção e qualidade, verificados com o aumento na durabilidade dos botões de solda, na diminuição do tempo de inatividade nas linhas e menor desvio dimensional.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fagulhamento. Solda Ponto. Corrente Elétrica. Eletrodo.

## ABSTRACT

This dissertation presents a project to reduce splash in automatic spot welding machines in a multinational automotive vehicle industry. Many problems have been caused by the large amount of splash coming from the soldering point. The main one is the accumulation of dirt in the welding equipments, causing a time of inactivity in the machines, dimensional deviations, quality problems, among others. There is a great cost with specialized cleaning staff for the welding sites and surrounding areas. In addition, there is an extra labor cost of corrective and emergency maintenance, especially on staples and soldering tweezers of a cell. The spot weld is basically a type of electric current welding. The joining of two parts in the welding by electrical resistance is done through the generation of heat, due to the passage of electric current and the application of pressure between the parts. During the process the parts heat up and the melting occurs at the point of contact on the separation surface. The resistance-point soldering process is divided into four stages, with four different times: compression time, where the machine closes and presses the plates (without the passage of current); weld time, where the current is tripped and the melt occurs; retention time, where the solder is completed and the gripper keeps closed for solder cooling; and pause time, where the machine is released and can move to the next point. In addition to these basic factors (specific times, current and force), there are others that strongly influence the quality of welding and consequently the degree of sparking. A spot weld should have its electrodes aligned, with equal diameters and well cooled during and after welding. Another factor of great influence is the compression time. This is the time between the application of force and the passage of the current. It is necessary to allow the soldering head to adjust before the soldering current is applied, to avoid sparking. This time can vary from 150 ms to 400 ms according to the machine displacement, type of weld, application or thickness of the plates. In this work it was verified that the excess of sparking was due to the inadequate compression time for each type of welding, and it was adjusted in the process, specifically for each set of points and type of plates, avoiding the trip of the electric current while existing spacing between the plates. Adjustments and revisions were made to all automatic spot welding machines, in order to adjust the positioning and angle of the clamps, significantly reducing sparking and avoiding weld points at the edges and radius of the plates, as they could be loose and burrs. In short, the reduction of these sparks brought gains with the cleaning and maintenance reductions, as well as reduction in the consumption of both electrodes and electric energy, without considering the production and quality gains, verified with the increase in the durability of the welding buttons, in the decrease of the inactivity time in the lines and smaller dimensional deviation.

**KEYWORDS:** Splash. Spot Weld. Current. Electrode.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Fagulhamento em robôs de solda automática .....	14
Figura 1.2 – Carepas de solda em grampos dimensionais .....	15
Figura 1.3 – Porcentagem das principais paradas por sujeira em células automáticas .....	15
Figura 2.1 – Esquema do princípio de funcionamento da soldagem por resistência .....	17
Figura 2.2 – Esquema das resistências elétricas e distribuição das temperaturas .....	19
Figura 2.3 – Comportamento da Resistência Elétrica ao longo do tempo .....	19
Figura 2.4 – Esquemática do botão de solda.....	20
Figura 2.5 – Estágios no tempo de ciclo de solda .....	21
Figura 2.6 – Lóbulo de soldabilidade a uma força de eletrodo constante .....	22
Figura 2.7 – Corrente de solda em um ciclo completo .....	24
Figura 2.8 – Exemplo de ponto furado causado pela pressão muito baixa .....	24
Figura 2.9 – Problemas no tempo de compressão ( <i>squeeze time</i> ) .....	26
Figura 2.10 – Máquina de solda ponto automática manipulado por robô .....	28
Figura 2.11 – MSPA's tipo C e tipo X .....	29
Figura 2.12 – Tipos mais comuns de eletrodos de solda ponto.....	30
Figura 2.13 – Efeito do desgaste do eletrodo na superfície de contato .....	31
Figura 2.14 – Efeito do excesso de fresagem do eletrodo.....	32
Figura 2.15 – Problemas com a refrigeração dos eletrodos.....	33
Figura 3.1 – <i>Ranking</i> total das áreas em relação a problemas por sujeira e parada produtiva	34
Figura 3.2 – SIPOC detalhado do processo de solda ponto em estações automáticas .....	35
Figura 3.3 – Diagrama de Ishikawa.....	36
Figura 3.4 – Programação padrão de solda de uma MSPA.....	39
Figura 3.5 – Matriz de Causa e Efeito .....	37
Figura 3.6 – Programação com o tempo de compressão alterado e novo posicionamento .....	40
Figura 3.7 – Problemas de desalinhamento e falta de perpendicularidade dos eletrodos .....	41
Figura 4.1 – Comparação antes e depois das intervenções realizadas.....	42

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 4.1 – Resultado final dos ajustes nos eletrodos .....	42
--	----

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

<b>MB</b>	Metal Base
<b>MSPA</b>	Máquina de Solda Ponto Automática
<b>SIPOC</b>	Source, Input, Process, Output and Customer
<b>ZF</b>	Zona de Fusão
<b>ZTA</b>	Zona Termicamente Afetada

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS .....	16
1.2	JUSTIFICATIVA .....	16
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	16
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
2.1	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA SOLDA POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA .....	17
2.2	PARÂMETROS DE REGULAGEM PARA DETERMINAÇÃO DA QUALIDADE DA SOLDA .....	21
2.2.1	<b>Corrente de solda</b> .....	22
2.2.2	<b>Força aplicada</b> .....	24
2.2.3	<b>Tempos de solda</b> .....	25
2.2.4	<b>Tamanho do ponto de solda</b> .....	27
2.3	EQUIPAMENTOS .....	27
2.3.1	<b>Máquinas de solda ponto automáticas</b> .....	27
2.3.2	<b>Eletrodos</b> .....	29
2.3.2.1	Tipos de eletrodo .....	29
2.3.2.2	Diâmetro do eletrodo .....	29
2.3.2.3	Eletrodo para espessuras diferentes para um mesmo material .....	30
2.3.2.4	Efeito do desgaste do eletrodo .....	31
2.3.3	<b>Sistema de resfriamento</b> .....	32
<b>3</b>	<b>DETERMINAÇÃO DO FAGULHAMENTO INDESEJADO NAS MÁQUINAS AUTOMÁTICAS DE SOLDA PONTO</b> .....	<b>34</b>
3.1	MEDIÇÃO .....	34
3.2	ANÁLISE .....	35
3.2.1	<b>Mapeamento do processo de solda automático</b> .....	35
3.2.2	<b>Diagrama de ishikawa e matriz de causa e efeito</b> .....	36
3.3	IMPLEMENTAÇÃO .....	38
3.3.1	<b>Curto tempo de compressão</b> .....	38
3.3.2	<b>Falta de perpendicularidade e alinhamento entre os eletrodos</b> .....	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>42</b>

<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>43</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>45</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os veículos automotores são um bem extremamente importante para uma grande parte da sociedade. Hoje em dia o automóvel não só tem um significado de transporte, mas também de bem-estar, investimento ou muitas vezes *status*.

Por conta da alta demanda, notou-se um grande aumento na automação nas indústrias automobilísticas, no qual trabalhadores com funções repetitivas por exemplo, como carregar uma peça de um lado para outro ou aplicar solda manualmente, tendem a ser substituídos por máquinas e robôs, buscando sempre uma redução de custo, melhor qualidade e maior rapidez no processo (MAINIER, 1997).

O processo de solda ponto por resistência elétrica tem crescido enormemente desde da primeira chapa automotiva soldada a anos atrás, sendo altamente utilizado na indústria automobilística para união de diferentes tipos de chapas da carroceria do automóvel (BRANCO, 2005).

Em relação a esse processo de soldagem por resistência, as principais vantagens se devem ao fato de proporcionar um menor aquecimento às partes unidas, uma vez que a fusão é restrita apenas ao local de formação do ponto, não acrescentando peso extra ao produto, já que não utiliza materiais de adição, tendo conseqüentemente um custo mais baixo em relação a outros processos.

Mesmo assim o processo de soldagem por pontos também é alvo de problemas nos quais devem estar sempre em melhoria contínua. O principal problema é a grande quantidade de fagulha provenientes da solda que se dá quando o processo está desajustado ou com conceitos e tempos equivocados, conforme está apresentado na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Fagulhamento em robôs de solda automática



Fonte: GMB (2009)



O alto fagulhamento nas células têm causado diversos problemas em indústrias automotivas, como acúmulo de sujeira nos equipamentos de solda, alto tempo de inatividade nas máquinas, desvios dimensionais, problemas de qualidade, entre outros. Além disso, há um grande custo com equipes de limpeza especializada para os locais de solda e também um custo extra com mão de obra de manutenções corretivas e emergenciais, principalmente em grampos e pinças de solda de uma célula, conforme pode ser verificado na Figura 1.2.

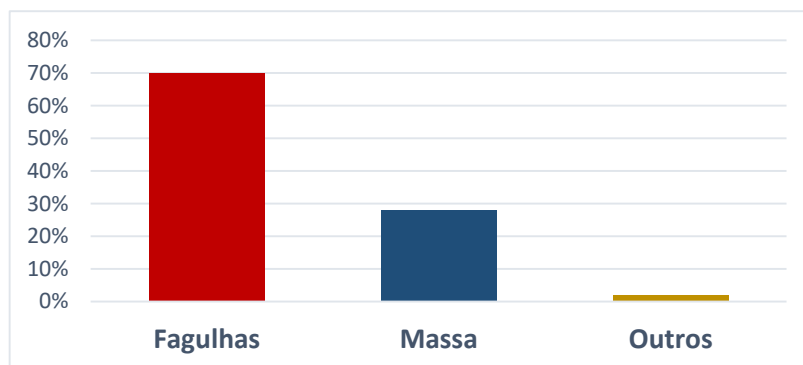
Figura 1.2 – Carepas de solda em grampos dimensionais



Fonte: Autor

Pode ser verificado através da Figura 1.3 as principais causas de parada por sujeira nas linhas de produção da montadora automotiva analisado durante o ano de 2017.

Figura 1.3 – Porcentagem das principais paradas por sujeira em células automáticas.



Fonte: Autor

## 1.1 OBJETIVOS

O trabalho teve como objetivo entender os efeitos de todas as variáveis que influenciam o controle da soldagem e conseqüentemente o aumento de fagulhas, a fim de demonstrar que todos os parâmetros considerados são fundamentais para uma solda ponto de qualidade. Além disso, atuou-se nas principais causas-raízes do problema de fagulhamento, com o intuito de elaborar soluções simples e funcionais.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Escolheu-se como projeto englobar o maior número de causas-raízes do problema de fagulhamento, visando a melhoria e qualidade no processo de solda ponto em empresas automobilísticas, tendo como justificativa o alto custo com equipes especializadas de limpeza e problemas de qualidade.

O dado trabalho foi realizado considerando apenas as células automáticas (robôs soldadores), uma vez que se torna praticamente impossível controlar todos os fatores de solda manual aplicado pelos operadores.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 1 e 2 estão orientados em uma breve teoria sobre o princípio de funcionamento da soldagem por resistência elétrica mostrando os principais fatores responsáveis pelo fagulhamento.

No capítulo 3 pode ser verificado a utilização do método de pesquisa, a experimentação, a qual se caracteriza por realizar mudanças nas variáveis relacionadas com o objeto de estudo. Foram feitos experimentos na própria linha de produção da indústria automotiva, sendo implementado os parâmetros de acordo com estudo pré-realizado.

Primeiramente houve uma revisão do posicionamento e alinhamento das pinças das máquinas de solda ponto automáticas e posteriormente uma revisão e implementação dos parâmetros de solda, feito ponto a ponto nas células automáticas.

No capítulo 4 mostrou-se o resultado dessa experimentação, discutindo e concluindo o assunto, deixando ao fim uma proposta para trabalhos futuros.

No capítulo 5 realizou-se a conclusão final do projeto e apresentou-se propostas para estudos futuros ao trabalho.

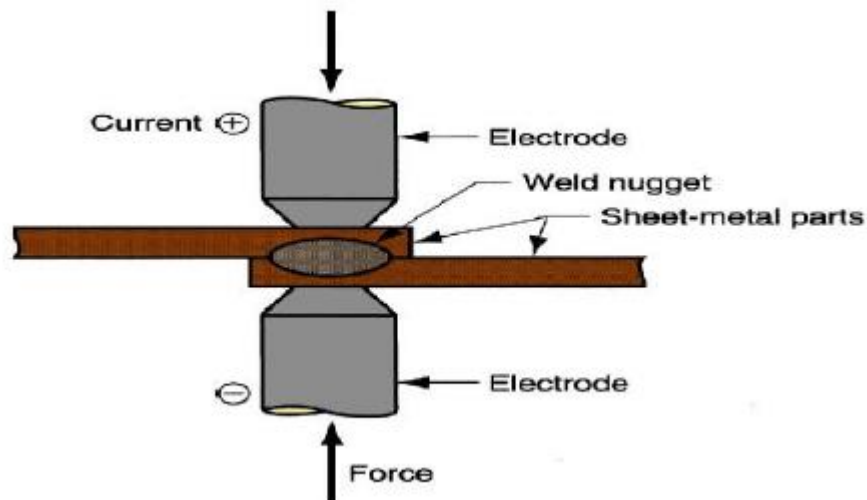
## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA SOLDA POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Um dos princípios da soldagem por resistência elétrica é gerar o calor de forma rápida no local de solda para que a quantidade mínima de calor seja dissipada através da condução para o material adjacente mais frio. Para que isto ocorra, é necessária um alto nível de geração de calor e isto é obtido através da passagem de alta corrente pela região de solda durante um curto intervalo de tempo, em conjunto com a aplicação da pressão entre as superfícies (BRANDI, 2011)

As peças são aquecidas durante o processo e ocorre a fusão localizada no ponto de contato na superfície de separação entre ambas, conforme apresentado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Esquema do princípio de funcionamento da soldagem por resistência



Fonte: Adaptado de GMB (2009)

Na ocorrência de fusão, há resistências de contatos peças-eletrodos e peça-peça. A energia térmica total ( $Q$ ) gerada durante o processo de solda pode ser calculada pela lei de Joule na equação (1).

$$Q = \frac{1}{K} \int_0^t I^2 R_T dt \quad (1)$$

Onde:  $K = 4,185$  (J)

$I$  = corrente na fusão (A)

$R_T$  = resistência elétrica equivalente ( $\Omega$ )

$dt$  = tempo que a corrente passa durante o ciclo (s)

Tem-se nesse caso pela equação (1) que se o tempo exigido for muito curto, a corrente demandada será muito alta, uma vez que o calor gerado é proporcional ao quadrado da corrente de soldagem e diretamente proporcional à resistência e ao tempo. Logo pode haver tanto uma fusão indesejada na superfície quanto uma rápida deterioração no eletrodo, caso haja uma combinação de altas correntes com curto espaço de tempo (KEARNS, 1980).

Entretanto, uma parte do calor gerado é perdida através de condução, convecção ou radiação para o eletrodo e o metal base, sendo auxiliados pela refrigeração à água, na qual geralmente a grandeza dessas perdas não é conhecida (VARGAS, 2006).

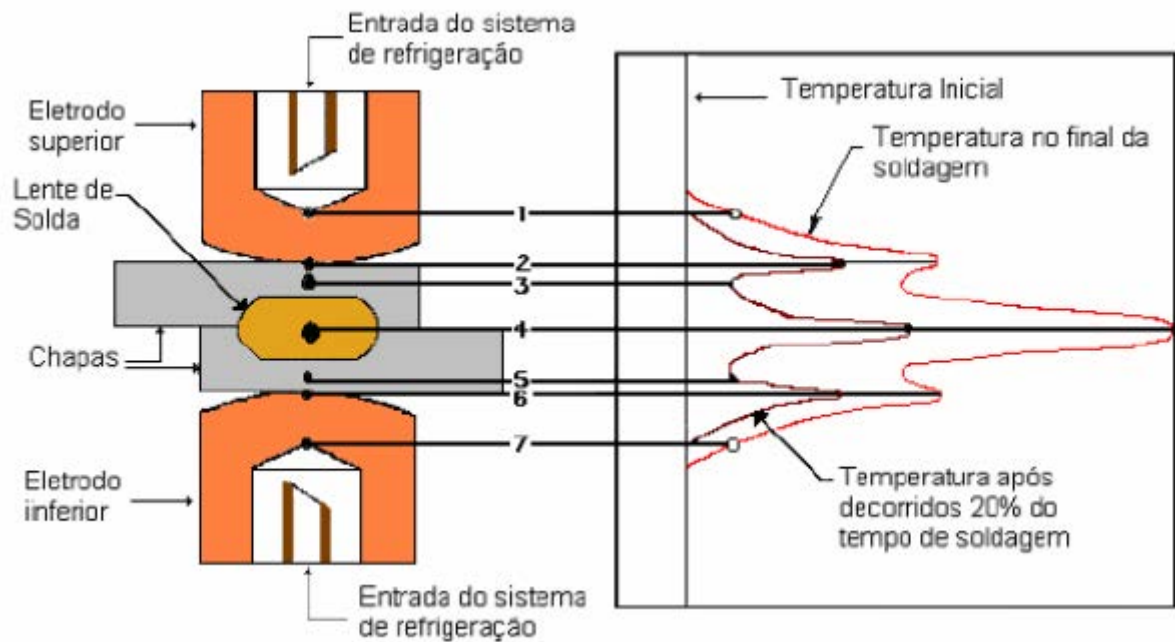
Considerando que a máquina de soldagem e os eletrodos de soldagem estão especificados corretamente, a resistência na interface entre as peças será normalmente superior à resistência de qualquer seção do circuito secundário e muito maior do que em qualquer outra superfície de contato existente. No circuito secundário da máquina estão em série todas as resistências envolvidas e como a mesma corrente passa em cada uma delas, o calor obtido em cada local é equivalente ao valor da resistência naquele ponto.

Portanto, todo o calor encontrado no contato da superfície das peças pode ser maior que em qualquer outro ponto localizado no circuito secundário e, durante a primeira parte do período de tempo da fusão, ele é responsável pela entrada de calor na região de solda (KEARNS, 1980).

Pode ser observado na Figura 2.2 esses impactos da formação do aquecimento no metal base e nos eletrodos. Há ao menos sete resistências em série na disposição das temperaturas da solda (KEARNS, 1980). As resistências 1 e 7 são as do próprio eletrodo. Já as resistências 2 e 6 são da junção do eletrodo e os metais, no qual se tornam muito importantes no caso de metais com baixa resistividade elétrica. Os valores devem ser mantidos o mais baixo possível, para evitar excessiva geração de calor na região de contato eletrodo/peça, bem como aumentar a vida útil do eletrodo (BRANDI, 2011). Enquanto isso, as resistências 3 e 5 não têm influência nos estágios iniciais da soldagem, porém são importantes nos estágios finais, no qual tais resistências são inversamente proporcionais à área por onde a corrente elétrica flui. E de todas as resistências, a 4 é a mais importante, porque é nesse local que se formará o ponto e, consequentemente, a geração de calor para ocorrer a fusão localizada.

Cerca de 20% depois do período de solda, pode-se verificar a taxa térmica pela curva a esquerda da Figura 2.2. A direita, observa-se a curva de temperatura no final da soldagem (KEARNS, 1980).

Figura 2.2 – Esquema das resistências elétricas e distribuição das temperaturas.



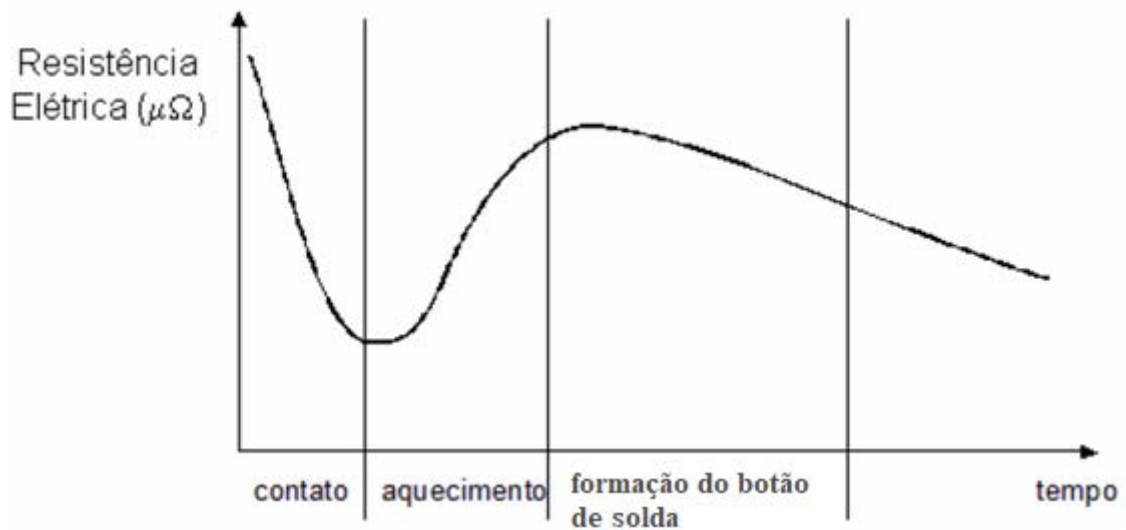
Fonte: Adaptado de Kearns (1980)

O comportamento da resistência elétrica total entre os metais base determinará se a propriedade do ponto de solda é boa, ou se o ponto ficará sem a fusão adequada. Para isso, segundo a norma DVS 2904-2, ela deve ter o comportamento semelhante ao visualizado na Figura 2.3.

Teoricamente, qualquer alteração de qualidade nos pontos soldados poderia ser evidenciada por meio de uma alteração no comportamento da sua respectiva curva característica de resistência elétrica de contato. Ainda assim, considerando que houvesse um elemento monitorador da resistência elétrica entre chapas no ciclo de solda, para cada ponto executado, seria possível avaliar as condições estruturais desses pontos e dizer em qual situação cada um deles se encontra.

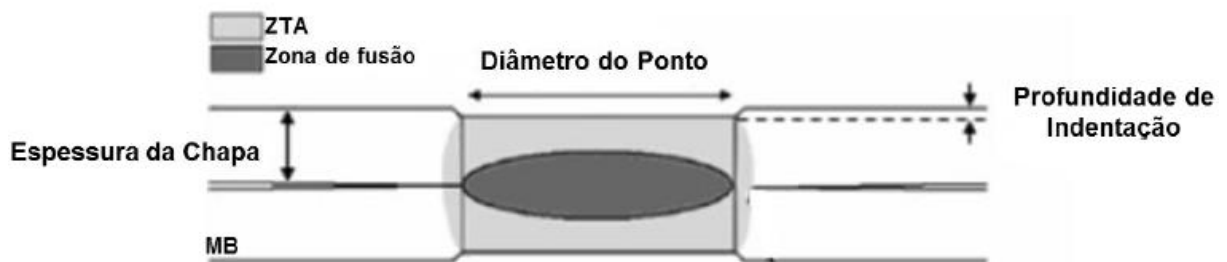
Uma mistura compósita é gerada na área de solda e ao redor dela por conta das mudanças de temperatura na soldagem. Tal estrutura pode ser verificada na Figura 2.4 no qual é dividida em duas zonas, além do metal base (MB) (POURANVARI et al., 2007): Zona de fusão (ZF), que corresponde à região soldada ou ponto de solda e a Zona termicamente afetada (ZTA), que corresponde ao local que não ocorreu fusão, mas teve modificações de estrutura devido ao aquecimento causado pela soldagem

Figura 2.3 – Comportamento da Resistência Elétrica ao longo do tempo.



Fonte: Norma DVS 2904-2

Figura 2.4 – Esquematização do botão de solda



Fonte: Adaptado de Pouranvari *et al.* (2007)

Toda essa metodologia de solda por resistência acontece ao longo de estágios desde do começo até a formação final do botão de soldagem. Essas sequências podem ser verificadas através da Figura 2.5 e descrita uma a uma a seguir (BRANCO, 2004):

Estágio 1: Os braços descem a fim iniciar o pressionamento das chapas com os eletrodos;

Estágio 2: A máquina fecha e as chapas são apertadas a fim de obter uma boa acomodação da chapa base antes de aplicar a corrente elétrica;

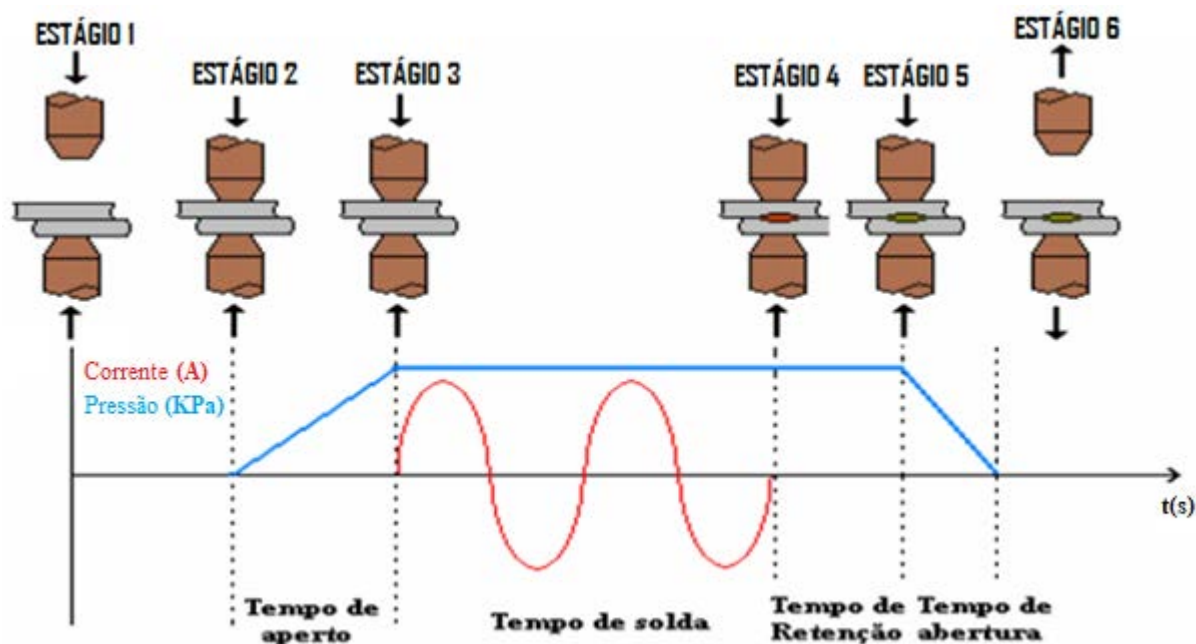
Estágio 3: Ocorre a liberação da corrente elétrica ao eletrodo, no qual se inicia a geração do botão de solda;

Estágio 4: O sistema de solda é finalizado e a corrente é cessada, mas a máquina mantém os eletrodos com pressão até que haja a total solidificação do ponto;

Estágio 5: O esforço nas chapas é descontinuado;

Estágio 6: A máquina abre, podendo passar para o ponto seguinte.

Figura 2.5 – Estágios no tempo de ciclo de solda.



Fonte: Adaptado de Branco (2004)

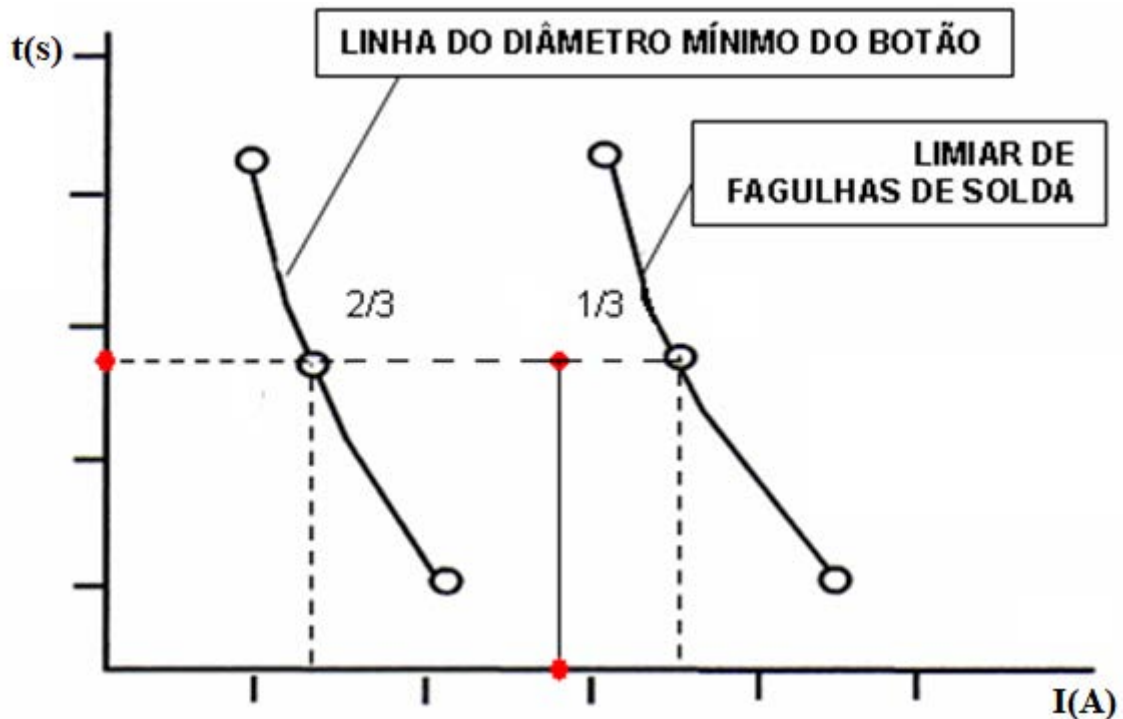
## 2.2 PARÂMETROS DE REGULAGEM PARA DETERMINAÇÃO DA QUALIDADE DE SOLDA

Os parâmetros de regulagem de solda são circunstâncias no qual valores específicos adequados combinados entre eles ocasionam na composição do botão de soldagem. As grandezas corretas desses parâmetros que definem se uma solda está com uma boa qualidade ou não.

A partir das considerações anteriores, é evidente a importância de controle desses parâmetros de solda dimensionados com as propriedades desejadas para a formação de uma solda consistente. O conjunto dos parâmetros relevantes e seus comportamentos, que podem ser controlados pela máquina de solda, são definidos como lóbulo de solda.

O lóbulo de solda define as tolerâncias disponíveis para a concepção de uma solda de qualidade. Os limites superiores são definidos geralmente em termos do limiar para a formação de fagulhas de solda. Para determinar um lóbulo de solda bidimensional, considerou-se a corrente e o tempo de solda a uma força de eletrodo constante, em que o limite inferior passa a ser a linha do diâmetro mínimo do botão, como mostrado na Figura 2.6 (WILLIAMS & PARKER, 2004).

Figura 2.6 – Lóbulo de soldabilidade a uma força de eletrodo constante.



Fonte: Adaptado da ISO 14327 (2001)

### 2.2.1 CORRENTE DE SOLDA

A corrente de solda é gerada pelo transformador da máquina de solda ponto. Tal transformador trabalha no primário de entrada com uma alta tensão (440V) e baixa corrente (100A - 2000A) e a transforma no secundário para uma baixa tensão (3 - 30 V) e alta corrente (6 kA - 100 kA).

Em algumas MSPA's tal corrente pode ser retificada para uma corrente contínua de soldagem, que pode ser aplicada em forma de pulso ou rampa para suavizar a execução (WILLIAMS & PARKER, 2004).

Sabe-se que a corrente elétrica parte do eletrodo de um lado da pinça de solda, no qual atravessa as chapas a serem soldadas e chega ao outro eletrodo que, por conta das resistências presentes nessa diretriz haverá a geração do calor da solda até chegar a temperatura de fusão dos materiais comprimidos pelo eletrodo. Por conta da energia térmica gerada ser proporcional ao quadrado da corrente elétrica, ela se transforma na condição mais importante no percentual com que a solda acontece, se tornando um parâmetro crucial, mas também muito sensível no processo como um todo. Podem ocorrer variações de corrente provenientes de oscilações da



tensão da rede e alterações na impedância no secundário do transformador, que podem desqualificar o botão de solda (MACHADO, 1996).

Podem haver diferentes resultados na solda de acordo com diferentes combinações da intensidade da corrente com outros fatores. Considera-se que além do intervalo de tempo da aplicação da corrente, deve-se levar em conta a quantidade de chapas a serem soldadas, o tipo de material que formam as chapas e ainda o tipo de tratamento externo no qual as chapas estão designadas. Obviamente, se a intensidade for insuficiente não haverá a fusão do material, independente do espaço de tempo (MACHADO, 1996). Todo o calor considerado deve ser suficiente para superar as potenciais perdas originárias dos metais base, dos próprios eletrodos e do meio ambiente (KEARNS, 1980). Na Figura 2.7 pode ser verificado o comportamento da corrente elétrica durante um ciclo completo de solda ponto.

Sabe-se que se a corrente de solda for muito mais alta do que o necessário para a fusão, o eletrodo pode penetrar de uma maneira mais profunda no metal base, provocando alto fagulhamento do material na parte fundida, o que diminui-se a vida útil dos eletrodos e a qualidade do ponto de solda (KEARNS, 1980).

Logo, com o objetivo de obter uma alta resistência mecânica da solda, a determinação da corrente é mais eficiente quando encontrada experimentalmente, ou seja, a mesma deve ser aumentada gradativamente até o surgimento de fagulhamento de solda entre as chapas, onde o valor máximo deve ser o anterior ao que provoca a fagulha do material (MACHADO, 1996).

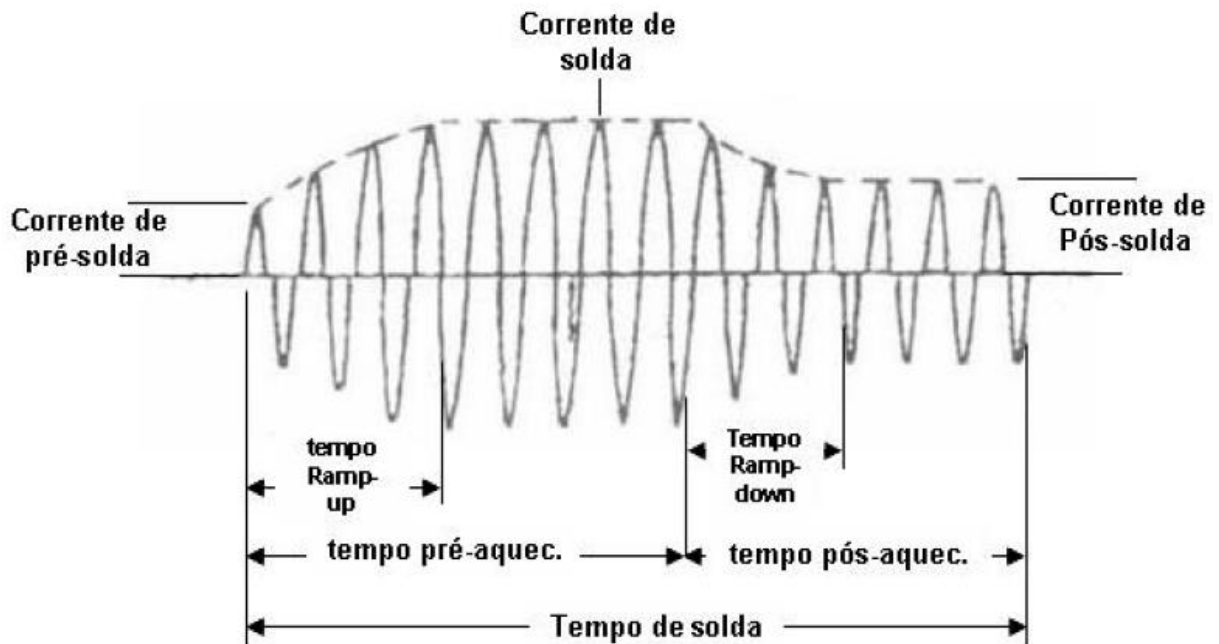
### 2.2.2 FORÇA APLICADA

O sistema de pressão do equipamento de solda, no qual gera-se a força, pode ser hidráulico ou pneumático, dependendo da aplicação.

Segundo Vargas (2006), essa força é a responsável por unir as chapas e forjá-las durante o estado plástico. Ou seja, há pressão sobre elas antes (pré-pressão para assentar as chapas), durante (pressão de soldagem) e depois (pós-pressão para manter o metal comprimido até a solidificação total do botão de solda).

Considera-se que o efeito de uma força imprópria na soldagem é relacionada com a resistência proveniente da equação (1). Assim tem-se que uma baixa força aumenta a resistência elétrica da equação (1).

Figura 2.7 – Corrente de solda em um ciclo completo.



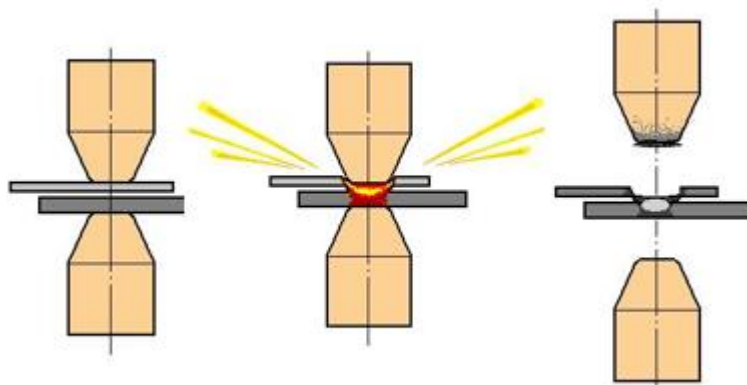
Fonte: AWS (1995)

Com essa alta resistência, haverá a geração de mais calor, podendo ocorrer fagulhamento de materiais e problemas de qualidade de solda, como ponto furado ou estourado, como pode ser verificado na Figura 2.8. Já quando a força for elevada demais, o calor gerado é pequeno por conta da baixa resistência entre as chapas, onde o fagulhamento pode diminuir, porém ocorre o enfraquecimento da solda, podendo causar pontos soltos. Logo, exige-se uma elevada corrente para ocorrer a fusão, que pode causar uma aglutinação do eletrodo na peça e consequentemente um aumento na frequência de quebra de prolongadores e braços das máquinas (ASLANLAR, 2006).

Para a soldagem de um ponto com qualidade, a pressão deve ser ajustada conforme as espessuras das chapas envolvidas no processo de cada máquina. Quanto maior a espessura, maior deverá ser a pressão, desde que não exceda a capacidade física da máquina.

Existe uma tolerância razoavelmente ampla para os valores recomendados de força de eletrodo sem que haja uma influência significativa na qualidade de solda e durabilidade dos eletrodos. Esta faixa deve ser especificada nas aplicações individuais (INTERMACHINERY, 2003, TECNOWELDING, 2004).

Figura 2.8 – Exemplo de ponto furado causado pela pressão muito baixa.



Fonte: Adaptado de GMB (2009)

A força com que os eletrodos atuam, apesar de ser especificada como estática é, na realidade, dinâmica e depende das características mecânicas do equipamento de soldagem (MACHADO, 1996).

Portanto, há uma relação entre corrente e pressão e, quando correta, têm-se pontos de solda consistentes, sem rebarbas, com fagulhas leves e sem eletrodos grudados nas chapas.

### 2.2.3 TEMPOS DE SOLDA

O tempo de solda compreende o intervalo entre o início e o final da passagem de corrente elétrica no ciclo de soldagem (SANTOS, 2006; VARGAS, 2006).

O calor total gerado é diretamente proporcional ao tempo de solda, segundo a equação (1). Além disso, o tempo e a corrente de solda podem complementar um ao outro, no qual o correto desenvolvimento do botão de solda requer um intervalo mínimo de tempo, independentemente da corrente.

Deve-se considerar uma taxa de calor no qual não haja aquecimento excessivo nos eletrodos e também compense a parte do calor que é desperdiçada através de perdas por radiação ou condução por exemplo. Estas perdas se expandem com o aumento do tempo de solda e da temperatura nas chapas, mas são incontroláveis (KEARNS, 1980).

O ciclo de solda, de acordo com Machado (1996), pode ser subdividido nos seguintes estágios:

1 - Tempo de Compressão ( $T_s$ ): também conhecido como *squeeze time*, determina o tempo que ocorre o fechamento da máquina e o pressionamento dos eletrodos nas chapas antes de liberar a corrente elétrica. Esta fase garante que os eletrodos estejam em contato total com as chapas, evitando problemas de fagulhamento de material (KEARNNS, 1980).

Segundo Aslanlar (2006) algumas diretrizes devem ser seguidas a fim de determinar o tempo de compressão das pistolas de solda e cilindros. Primeiramente, deve-se permitir 11 ciclos de tempo mínimo para o primeiro curso de 1 polegada (ou inferior a 1 polegada) do eletrodo de soldagem. Este período de tempo permitirá um tempo de separação inicial para que o cilindro comece o movimento. Para cursos adicionais de solda além de 1 polegada, devem ser fornecidos 7 ciclos de tempo para cada polegada de deslocamento, como pode ser verificado na equação (2).

$$\textit{Squeeze time} = T_s = [11 + (7 \times D_{ws})] \text{ ciclos} \quad (2)$$

Onde:  $D_{ws}$  = distância do curso de solda além da primeira polegada de curso (Polegada)

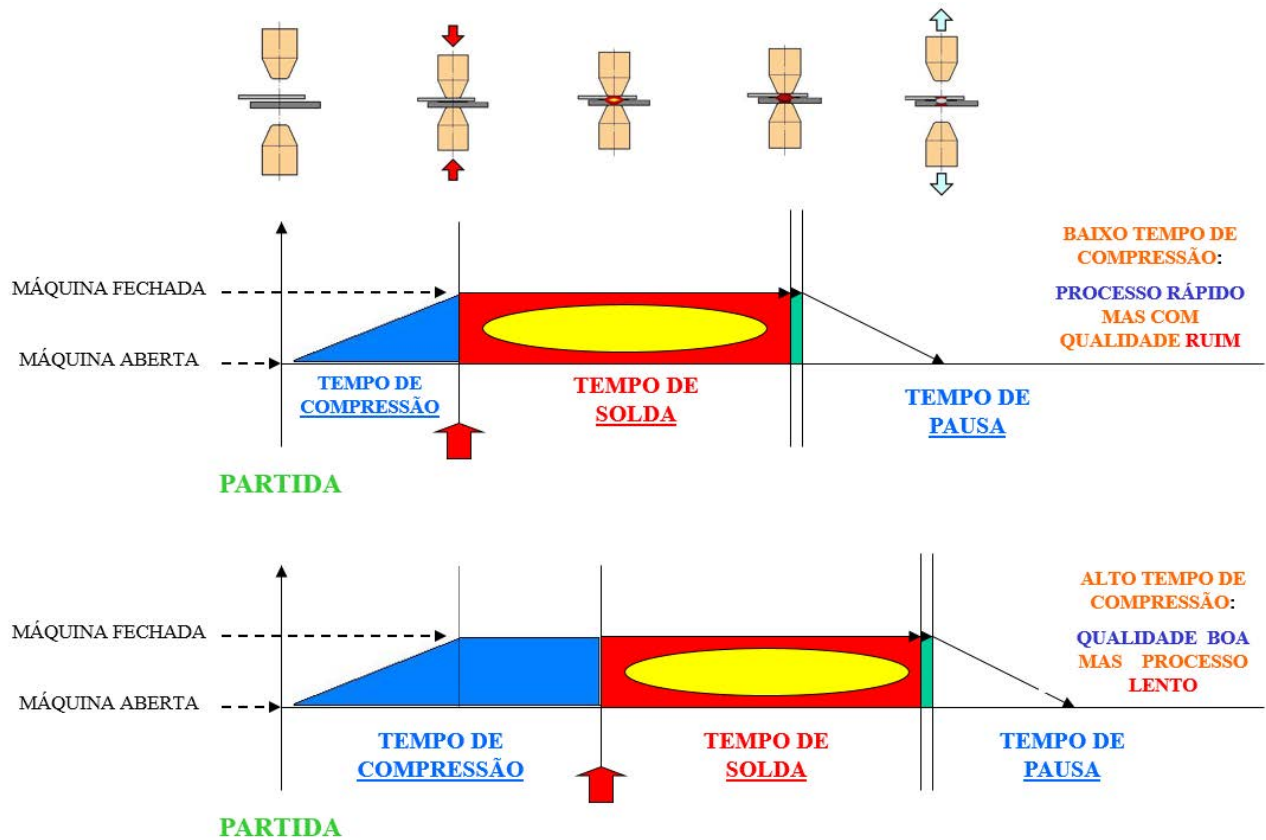
Um baixo tempo de compressão pode até deixar o processo rápido, mas a qualidade da solda será ruim. Já um alto tempo de compressão a qualidade da solda será boa mas o processo será lento, havendo um atraso no ciclo de produção. Esses dois casos podem ser verificados na Figura 2.9.

2 - Tempo de Soldagem: é o intervalo de tempo em que a solda é executada com a corrente elétrica ocorrendo a fusão entre as chapas (MACHADO, 1996). Segundo Santos (2006), dimensiona-se o tempo de solda em função do tratamento superficial e do tipo de material a ser soldado.

3 - Tempo de Retenção: conforme apresentado na Figura 2.5, também chamado de tempo de resfriamento, corresponde ao intervalo em que a solda é concluída, a corrente é cessada e a máquina mantém fechada até o resfriamento da solda (MACHADO, 1996). Este tempo não deve ser longo, pois o calor gerado pode se espalhar pelo eletrodo e aquecê-lo (ASLANLAR, 2006).

4 - Tempo de Pausa: corresponde ao intervalo de tempo em que a máquina abre, podendo assim passar para ponto seguinte (MACHADO, 1996).

Figura 2.9 – Problemas no tempo de compressão (*squeeze time*)



Fonte: Adaptado de GMB (2009)

## 2.2.4 TAMANHO DO PONTO DE SOLDA

O tamanho do ponto de solda é o parâmetro mais importante para determinar seu comportamento mecânico (POURANVARI et al., 2007). Muitas equações foram propostas visando prever o diâmetro do ponto ótimo ou mínimo garantindo o arrancamento do ponto de solda (PEREIRA et al., 2010). Na equação (3), o tamanho crítico do ponto de solda ( $d$ ) é simplesmente uma função da espessura da chapa ( $t$ ), ambos em mm (AWS/SAE D8.9, 1997).

$$d = 4\sqrt{t} \quad (3)$$

Contudo, de acordo com Pouranvari *et al.* (2007) este critério nem sempre apresenta o melhor resultado e para Pereira *et al.* (2010) as alterações que ocorrem nas propriedades mecânicas da solda deveriam ser levadas em consideração em estudos mais aprofundados.

## 2.3 EQUIPAMENTOS

### 2.3.1 MÁQUINAS DE SOLDA PONTO AUTOMÁTICAS

As máquinas de solda ponto automáticas, ou MSPA's, são os equipamentos responsáveis pela execução dos pontos de solda, cuja função operacional é fechar os braços e proporcionar a passagem da corrente de solda, sendo elas manipuladas por robôs, como pode ser verificado na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Máquina de solda ponto automática manipulado por robô.



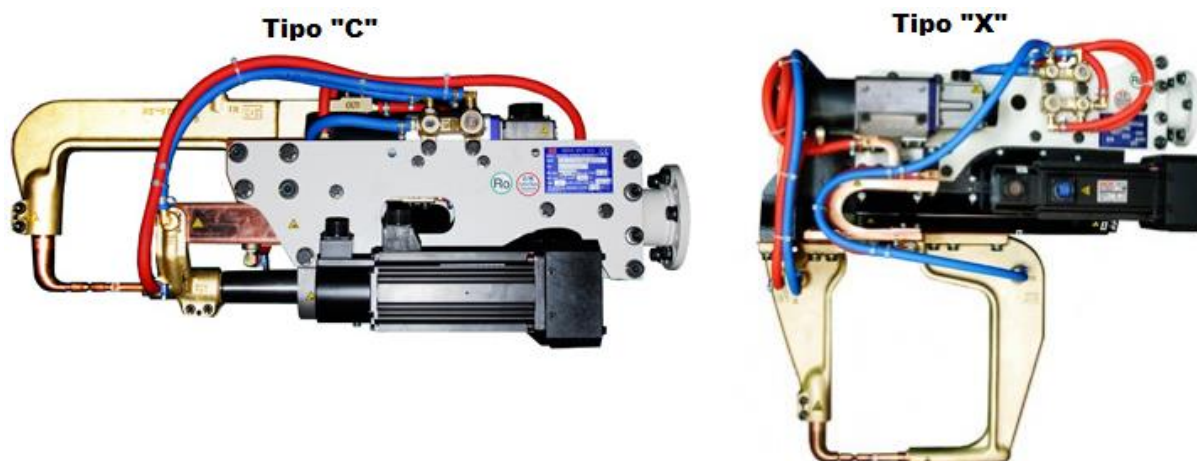
Fonte: Siff Servo Robotik (2017)

Todas as máquinas apresentam, basicamente, três componentes fundamentais: 1- sistema mecânico, que é aquele no qual a peça é fixada e a força do eletrodo é aplicada (no passado era acionado por cilindros pneumáticos; hoje em dia geralmente é acionado por servo motores); 2- circuito primário, que consiste de um transformador, cuja função é regular a corrente de soldagem; 3-sistema de controle, que pode atuar somente sobre o tempo de solda ou também sobre a ação mecânica da aplicação da força do eletrodo. Esses três componentes regulam as variáveis mais importantes na soldagem por resistência, isto é, a força do eletrodo, a intensidade da corrente e o tempo de passagem da corrente de soldagem (BRANDI, 2011).

As MSPA's ou pinças de solda podem ser de dois tipos: C ou X. A pinça do tipo C possui um único servo de ação direta em relação ao movimento de fechamento dos braços. As pinças do tipo X possuem servo motores que fecham os braços através de uma alavanca. A escolha de um determinado tipo de pinça depende de sua aplicação e devem ser levados em conta outros fatores, tais como o acesso das máquinas aos pontos de solda, o comprimento mínimo dos

braços e a força entre eletrodos necessário para soldagem. Pode ser verificado na Figura 2.11 esses dois tipos de pinça automáticas com o comando por servo motor.

Figura 2.11 – MSPA's tipo C e tipo X.



Fonte: Dengsha, C/X Servoguns (2017)

## 2.3.2 ELETRODOS

Na execução da solda ponto, os eletrodos ficam em contato direto com a peça a ser soldada, no qual conduzem a corrente elétrica, aplicam a força no local a ser soldado e dissipam parte do calor gerado durante a solda.

Logo, ele deve ser projetado para suportar densidade de correntes entre 800 a 10.000 A/cm<sup>2</sup> e pressões entre 70 a 400 MPa sem se deformar, possuindo então propriedades mecânicas elevadas, principalmente em altas temperaturas (BRANDI, 2011).

### 2.3.2.1 TIPOS DE ELETRODO

Para cada tipo de eletrodo há uma aplicação específica, tanto no que se refere ao metal a ser soldado como na posição em que será feita a solda. A Figura 2.12 apresenta os eletrodos mais comuns usados na solda ponto.

### 2.3.2.2 DIÂMETRO DO ELETRODO

Segundo Brandi (2011), considera-se que as faces de contato dos eletrodos com a chapa devam ser aproximadamente 1,6 mm maior do que o diâmetro do ponto de solda, o qual pode ser calculado pela equação (4).

$$d = 5\sqrt{S} \quad (4)$$

Onde:  $d$  = diâmetro da ponta do eletrodo (mm)

$S$  = espessura do conjunto das chapas (mm)

A equação (4) supõe que ambas as peças tenham a mesma espessura. Nesse caso, o calor gerado nas peças deve ser igual ao calor cedido para ambas. Essa suposição não é válida para o caso de espessuras diferentes ou materiais dissimilares. Nessas situações, usa-se eletrodos com diâmetros diferentes (BRANDI, 2011).

Figura 2.12 – Tipos mais comuns de eletrodos de solda ponto.



Fonte: Adaptado de GMB (2009)

### 2.3.2.3 ELETRODO PARA ESPESSURAS DIFERENTES PARA UM MESMO MATERIAL

No caso de espessuras diferentes, para um mesmo material, o eletrodo menor deve ser colocado em contato com a peça mais fina. Para peças com condutibilidades diferentes, porém com a mesma espessura, o eletrodo menor deve ficar em contato com a peça de maior condutibilidade (BRANDI, 2011). Para calcular as áreas de contato, utiliza-se a relação na equação (5).



$$\frac{G_1 A_1}{e_1} = \frac{G_2 A_2}{e_2} = \dots = \frac{G_n A_n}{e_n} \quad (5)$$

Onde:  $G_1, G_2, \dots$  = condutibilidade elétrica das chapas ( $\Omega\text{m}^{-1}$ )

$A_1, A_2, \dots$  = área de contato dos eletrodos (mm)

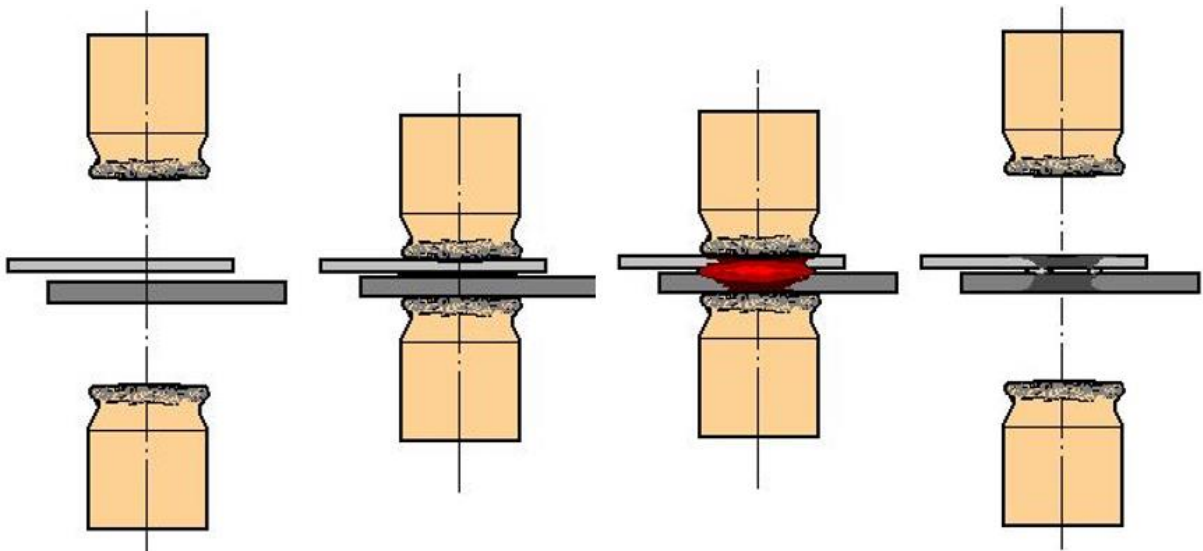
$e_1, e_2, \dots$  = espessura das peças (mm)

No caso de materiais dissimilares, deve-se ter e mente os problemas metalúrgicos resultantes dos dois materiais fundidos. Como exemplo, pode-se citar um aço inoxidável soldado com um aço-carbono. Nesse caso, deve-se evitar a fusão de um dos materiais (BRANDI, 2011).

#### 2.3.2.4 EFEITO DO DESGASTE DO ELETRODO

Com os ciclos de solda a ponta do eletrodo vai se desgastando, podendo diminuir a qualidade da solda. Logo, haverá um aumento na área de contato, podendo ter uma diminuição no rendimento do processo, pois o calor será dispersado, podendo assim não ocorrer a fusão total das chapas (BRANDI, 2011). Além disso podem ocorrer problemas de qualidade, como ponto soltos, como pode se verificar na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Efeito do desgaste do eletrodo na superfície de contato.

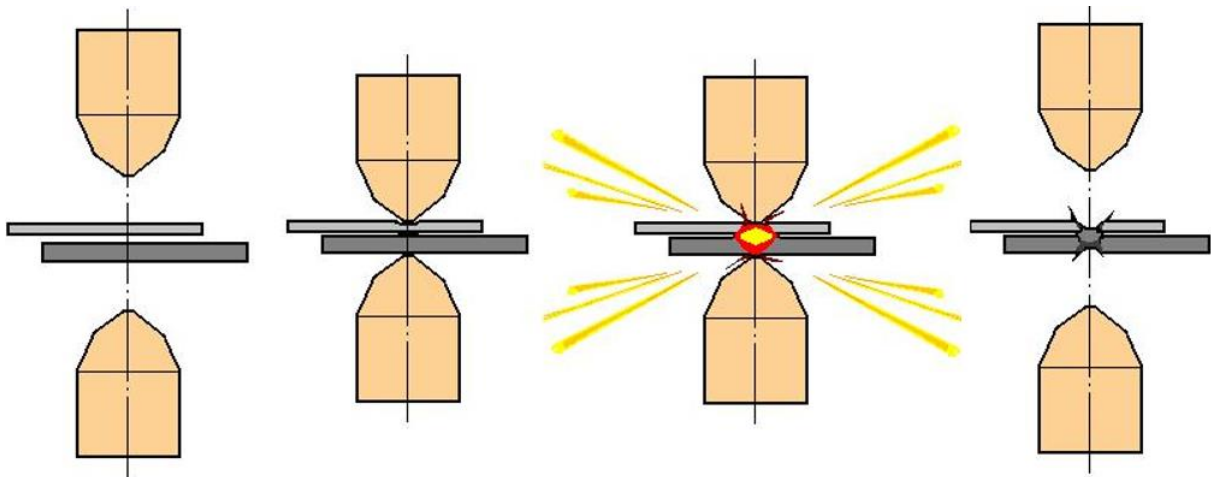


Fonte: Adaptado de GMB (2009)

Com esse desgaste, será necessário recuperar as pontas através de um processo de fresa periódica pré-determinada, que é feita de maneira autônoma nas MSPA's. Ou seja, o mesmo deve ser remodelado ou até mesmo substituído periodicamente para garantir que a quantidade de calor gerado seja suficiente na produção de soldas aceitáveis (KEARNS, 1980).

Entretanto, o eletrodo fresado em excesso pode ter uma área de contato menor que mínimo especificado, podendo ter um aumento na densidade superficial de corrente, acarretando sobreaquecimento do eletrodo e, conseqüentemente, aumentando o fagulhamento. Além disso poderá ocorrer problemas de qualidade, como ponto de solda com rebarbas, como pode ser verificado na Figura 2.14.

Figura 2.14 – Efeito do excesso de fresa do eletrodo.



Fonte: Adaptado de GMB (2009)

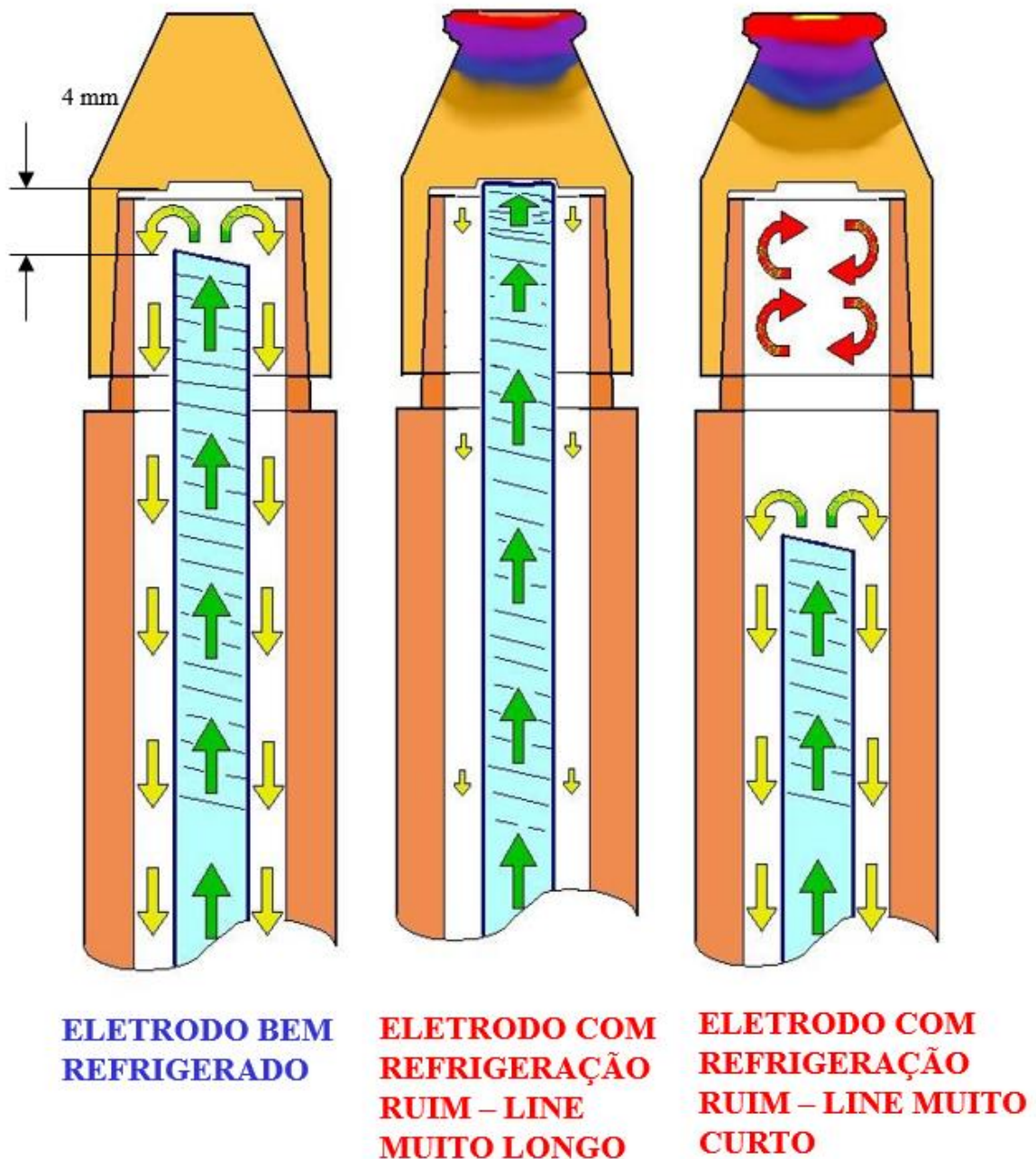
Atualmente, equipamentos modernos detectam estas anormalidades e possuem mecanismos que garantem uma compensação de corrente de soldagem de acordo com a mudança de resistência elétrica total dos em função do desgaste eletrodos (chamado nas empresas automobilísticas de *stepper*), garantindo assim uma maior produtividade e melhor qualidade.

### 2.3.3 SISTEMA DE RESFRIAMENTO

As temperaturas existentes no processo de solda são diretamente influenciadas pela condição de refrigeração dos eletrodos, no qual os valores variam desde 200 °C até 1.490 °C (temperatura média no botão de solda durante a fusão). A água para a refrigeração pode estar na temperatura ambiente ou na temperatura de 0 °C como vem sendo usado por diversas empresas (SCOTT, 2005).

Entretanto, podem existir problemas na tubulação de água que vai até a ponta do eletrodo. Se a linha for muito longa, a água pode não retornar, causando uma má refrigeração. Já se a linha for muito curta, a água retorna antes de chegar no eletrodo, causando também uma refrigeração ruim. Tais problemas podem ser verificados na Figura 2.15.

Figura 2.15 – Problemas com a refrigeração dos eletrodos.



Fonte: Adaptado de GMB (2009)

### 3 DETERMINAÇÃO DO FAGULHAMENTO INDESEJADO NAS MÁQUINAS AUTOMÁTICAS DE SOLDA PONTO

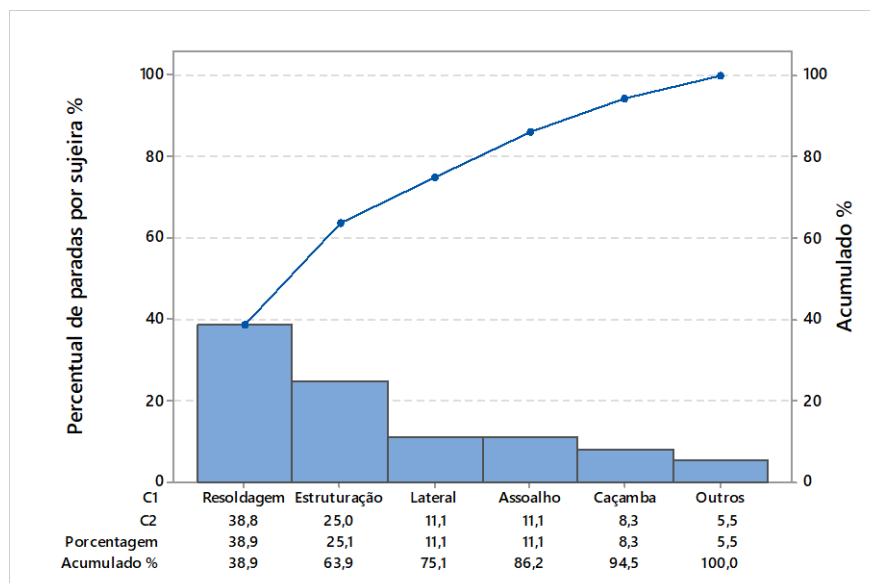
Com a finalidade de atuar nas principais causas-raízes para diminuir a fagulhamento nas MSPA's em uma determinada indústria automotiva do Vale do Paraíba - SP, dividiu-se o trabalho em três etapas: 1- Medição, no qual mediu-se as áreas críticas em relação a problemas provenientes do elevado índice de fagulhamento; 2- Análise, no qual analisou-se todas as potenciais causas-raízes do problema e separou-se quais seriam as principais; 3- Implementação, no qual designou-se planos de ações para as causas-raízes a fim de eliminar o problema.

#### 3.1 MEDIÇÃO

Utilizou-se duas métricas para analisar os locais mais críticos em relação ao fagulhamento. Primeiramente, analisou-se a métrica da qualidade, que determinou as principais áreas em relação a defeitos causados por sujeira de solda. Posteriormente, analisou-se a métrica da manutenção, que determinou as principais áreas em relação a paradas para manutenções corretivas por conta de sujeira nos equipamentos.

Pode-se relacionar as duas métricas e definir a classificação das áreas mais afetadas pelo problema de fagulhamento e, conseqüentemente, pelo acúmulo de sujeiras nos equipamentos de solda e MSPA's, como pode ser verificado no gráfico da Figura 3.1.

Figura 3.1 – *Ranking* total das áreas em relação a problemas por sujeira e parada produtiva.



Fonte: Autor

Verificou-se um percentual maior na área de resoldagem, no qual é a área com maior número de robôs de solda. Posteriormente tem-se a área de estruturação, lateral, assoalho, caçamba e outros.

### 3.2 ANÁLISE

Para análise foram considerados o mapeamento do processo de solda ponto automático, o uso do diagrama de Ishikawa e a matriz de causa de causa e efeito.

#### 3.2.1 MAPEAMENTO DO PROCESSO DE SOLDA PONTO AUTOMÁTICO

Com o intuito de entender e gerenciar melhor o processo de solda ponto dentro da indústria automotiva para posteriormente otimizá-lo, usou-se a ferramenta SIPOC, que é uma sigla formada pelas cinco partes dessa ferramenta: *supplier* (fornecedores), *input* (entradas), *process* (processo), *output* (saídas) e *customer* (clientes).

A ferramenta busca mapear todo o procedimento de solda ponto automática, a fim de definir as partes principais, como apresentado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – SIPOC detalhado do processo de solda ponto em estações automáticas.

SUPPLIER	INPUT	PROCESS	OUTPUT	CUSTOMER
Engenharia de Manufatura	Definição dos parâmetros de solda ponto para cada MSPA	Setup e programar os parâmetros	MSPA's configuradas	Manutenção
Estamparia Fornecedores	Suprimentos de peças para o ponto de uso na célula	Posicionar e localizar as peças nos equipamentos de solda	Peças prontas para receberem os pontos de solda	Manutenção
Manutenção	Comando na MSPA para acionar e aplicar os pontos de solda com o posicionamento e parâmetro correto.	Aplicar pontos de solda com o stepper	Peças soldadas e pré-montadas	Pintura e Montagem Final
MSPA	Eletrodos gastos com diâmetro maior que o especificado	Fresar os eletrodos após 500 pontos	Eletrodos com diâmetro correto	MSPA
Manutenção	Eletrodos saturados, com tamanho mínimo e sem opção de fresagem	Trocar eletrodo após 50 fresagens em média	Eletrodos novos, com diâmetros e tamanhos específicos	MSPA

Fonte: Autor

Uma vez definido o SIPOC, ficou mais visível o entendimento geral do processo e todas as suas variáveis o que, conseqüentemente, facilitou a análise das potenciais causas-raízes do problema.

### 3.2.2 DIAGRAMA DE ISHIKAWA E MATRIZ DE CAUSA E EFEITO

Com a definição e entendimento do processo de solda ponto, elaborou-se um mapeamento de todas as potenciais causas-raízes do problema de fagulhamento, no qual utilizou-se uma ferramenta chamada Diagrama de Ishikawa ou Diagrama de Causa e Efeito.

O propósito desse diagrama é documentar graficamente a análise de fatores (isto é, causas) que estão relacionadas a um único problema ou oportunidade (ou seja, o efeito). Assim sendo, as principais causas são dispersadas em sete categorias distintas, os 7Ms: Mão-de-obra, Máquinas, Meio ambiente, Métodos, Medições, Materiais e *Management* (gestão) (ISHIKAWA, 1990).

Através de estudos realizados, juntamente com a teoria da solda ponto apresentada anteriormente e um trabalho em conjunto com especialistas de solda, identificou-se e mapeou-se todas as potenciais causas-raízes do problema, como pode ser verificado na Figura 3.3.

## Diagrama de Ishikawa (Causa-Efeito)

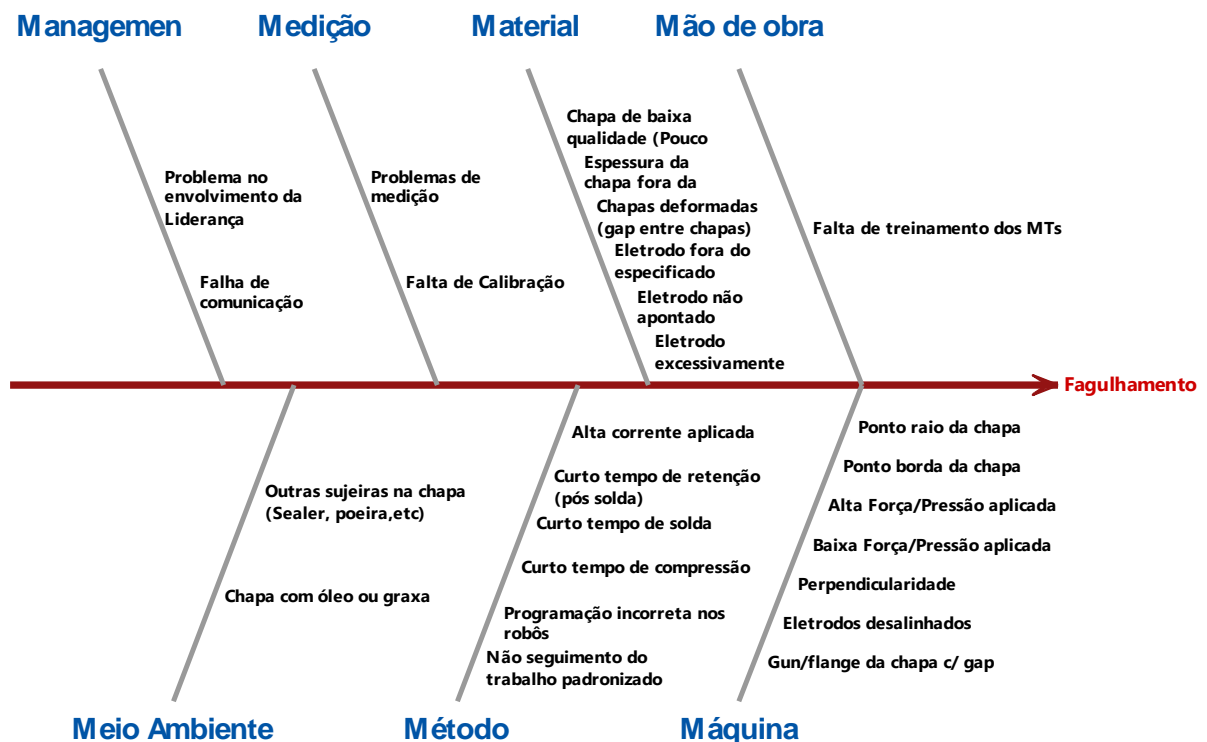


Figura 3.4 – Matriz de Causa e Efeito

<b>Matriz de Causa &amp; Efeito</b>				
Avaliação de importância para o cliente		<b>9</b>	<b>6</b>	<b>Ranking Total das Causas</b>
Saídas do Processo (O que deve ser melhorado)		Alto Fagulhamento	Problemas de qualidade	
Entradas do Processo (Iniciativas ou problemas)				
1	<b>Curto tempo de compressão</b>	10	9	144
2	<b>Corrente excessiva na aplicação da solda</b>	10	8	138
3	<b>Falta de perpendicularidade entre eletrodo</b>	9	9	135
4	<b>Falta de alinhamento entre eletrodos</b>	9	9	135
5	<b>Força/Pressão muito baixa</b>	8	9	126
6	<b>Gap entre as chapas</b>	8	9	126
7	<b>Eletrodo excessivamente apontado</b>	6	9	108
8	<b>Curto tempo de retenção</b>	6	9	108
9	Força/Pressão muito alta	4	9	90
10	Ponto no raio da chapa	4	8	84
11	Ponto na borda da chapa	4	8	84
12	Eletrodo não apontado	3	9	81
13	Curto tempo de solda	5	5	75
14	Chapa com óleo ou graxa	4	4	60
15	Eletrodo fora do especificado	4	3	54
16	Chapa de baixa qualidade	3	4	51
17	Programação incorreta nas servoguns	3	4	51
18	Falta de treinamento da manutenção	2	5	48
19	Espessura da chapa fora do especificado	3	3	45
20	Chapas deformadas (com gaps)	3	3	45
21	Não seguimento do trabalho padronizado	3	3	45
22	Chapa com sealer ou poeira	2	3	36
23	Problemas de medição	2	2	30
24	Falta de calibração	2	2	30
25	Problema no envolvimento da liderança	1	2	21
26	Falha de comunicação	1	2	21

Fonte: Autor

Como foi verificado uma grande quantidade de potenciais causas-raízes, utilizou-se outra ferramenta estatística a fim de classificar as causas com maiores potenciais de resolução do problema. A Matriz de Causa e Efeito possui a sua configuração conforme a Figura 3.4 (DALE, 2007).

Nessa matriz foram colocados os efeitos causados e que se desejavam eliminar nas colunas, como por exemplo o alto fagulhamento e os problemas de qualidade de solda. Em seguida, foram colocados acima em valores de 1 a 10 (onde 1 é pouco importante e 10 é muito importante) para cada um desses efeitos, caracterizando assim quais efeitos eram mais ou menos importantes.

Em seguida, listou-se todas as potenciais causas definidas no diagrama. Para cada uma das causas, atribui-se um valor de 0 a 10 (onde 0 significa que a causa não possui relação alguma com o efeito, e 10 significa que a causa possui 100% de relação com o efeito).

Por último, calculou-se a soma dos produtos, ou seja, foi feito uma soma do produto entre o valor do peso de cada efeito com o valor atribuído a determinada causa. Por exemplo, para a causa “Curto tempo de compressão”, o valor de 144 foi obtido através do cálculo de 9 multiplicado por 10 mais 9 multiplicado por 6.

Logo, classificou-se todas as potenciais causas-raízes e definiu-se as possíveis maiores causadores do problema, identificados pelo gradiente de cores (DALE, 2007).

### 3.3 IMPLEMENTAÇÃO

Estabeleceu-se que iriam ser investigados as potenciais causas pré-estabelecidas, tais como curto tempo de compressão, falta de perpendicularidade entre os eletrodos, falta de alinhamento entre os eletrodos e *gap* entre as chapas, no qual cada um está descrito a seguir.

#### 3.3.1 CURTO TEMPO DE COMPRESSÃO

Como já foi apresentado, o curto tempo de compressão entre as MSPA's pode disparar a corrente elétrica antes da total dispersão da força, podendo existir um espaçamento entre as chapas no momento da solda, gerando um grande fagulhamento.

Assim sendo, averiguou-se como estava sendo executado o tempo de compressão nas MSPA's das células da determinada indústria automotiva. Percebeu-se então um tempo de compressão (*squeeze time*) de 180 ms, como pode ser verificado na linha 2 da programação na



Figura 3.5. Além disso o tempo estava sendo disparado antes do que deveria, ou seja, estava no local errado na programação.

Deste modo, utilizou-se a equação (2) para verificar se o tempo de compressão estava com o valor correto.

Teve-se que a média de distância do deslocamento das MSPA's da posição de início até a posição do local de solda era cerca de 4 polegadas. Logo, a distância do curso de solda além da primeira polegada de curso ( $D_{ws}$ ) era de 3 polegadas. Portanto:

$$\text{Squeeze time} = T_s = [11 + (7 \times 3)] = 32 \text{ ciclos}$$

Pelo manual do fabricante da MSPA, soube-se que 1 ciclo no servo motor é de aproximadamente 10 ms. Desse modo, o tempo de compressão deveria ser alterado para 320 ms para todas as MSPA's, além de realocar para a linha 5 na programação, como verificado na Figura 3.6. Essas foram as principais causas de fagulhamento e a principal contribuição desse trabalho.

Depois de uma validação para a intervenção do processo, mudou-se todos tempos de compressão de todas as MSPA's em questão, e os resultados mostraram uma redução significativa no fagulhamento, porém ainda existiam ações a serem desenvolvidas.

Figura 3.5 – Programação padrão de solda de uma MSPA.

```

<< START OF SCHEDULE >>
1:TURN ON WELD IN PROGRESS
2:SQUEEZE 180 MSEC
3:TRANSFORMER TURNS RATIO 48:1
4:TURN ON ISOLATION CONTACTOR
5:LINEAR STEPPER #1 ASSIGNED (0=OFF)
6:WELD 80 MSEC 6000 AMPS
7:COOL 20 MSEC
8:WELD 150 MSEC 9000 AMPS
9:IMPULSE= 3 HEAT MS, 20 COOL MS
10:EXTEND WELD IF LOW CURRENT LIMIT FAULT
11:HOLD 100 MSEC
12:PROCESS WELD FAULTS
13:TURN ON WELD COMPLETE
14:TURN OFF WELD IN PROGRESS
15:EXTEND UNTIL NO INITIATE
16:TURN OFF WELD COMPLETE

```

Fonte: Adaptado de GMB (2009)

Figura 3.6 – Programação com o tempo de compressão alterado e novo posicionamento.

```
<< START OF SCHEDULE >>  
1:TURN ON WELD IN PROGRESS  
2:TRANSFORMER TURNS RATIO 48:1  
3:TURN ON ISOLATION CONTACTOR  
4:LINEAR STEPPER #1 ASSIGNED (0=OFF)  
5:SQUEEZE 320 MSEC  
6:WELD 80 MSEC 6000 AMPS  
7:COOL 20 MSEC  
8:WELD 150 MSEC 9000 AMPS  
9:IMPULSE= 3 HEAT MS, 20 COOL MS  
10:EXTEND WELD IF LOW CURRENT LIMIT FAULT  
11:HOLD 100 MSEC  
12:PROCESS WELD FAULTS  
13:TURN ON WELD COMPLETE  
14:TURN OFF WELD IN PROGRESS  
15:EXTEND UNTIL NO INITIATE  
16:TURN OFF WELD COMPLETE
```

Fonte: Adaptado de GMB (2009)

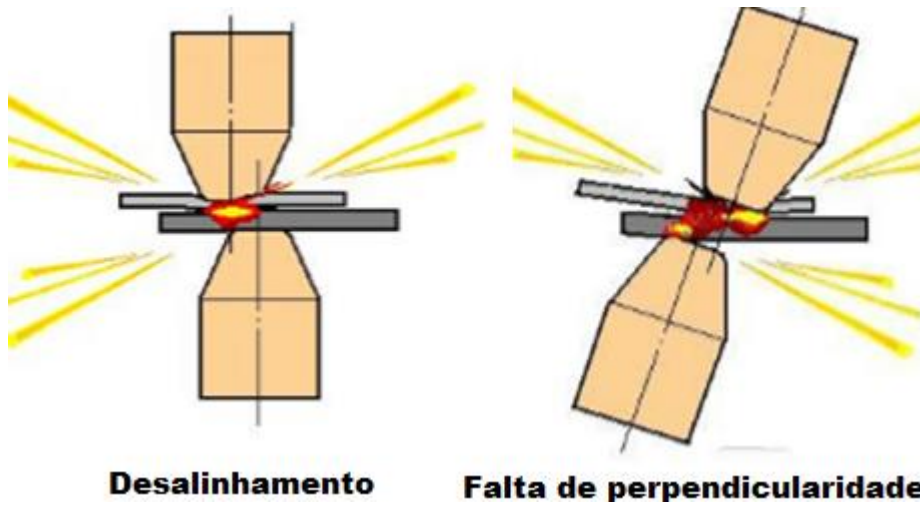
### 3.3.2 FALTAS DE PERPENDICULARIDADE E DE ALINHAMENTO ENTRE OS ELETRODOS

Sabe-se que os eletrodos desalinhados e sem perpendicularidade afetam a qualidade da solda, uma vez que o contato dos eletrodos nas chapas não será uniforme, o que fará com que a concentração da aplicação da força seja irregular entre as chapas, no qual a resistência aumentará e gerará o fagulhamento, como pode ser verificado na Figura 3.7.

Foi constatado que esses problemas não só causam um grande fagulhamento, mas também causam problemas de qualidade tais como pontos torcidos, pontos com rebarba, torção na chapa e desgaste irregular nos eletrodos

Foi designado à equipe de manutenção para fazer uma verificação ponto a ponto em todas as MSPA's (durante o terceiro turno, em que não tem produção) a fim de averiguar as faltas de perpendicularidade, de alinhamento entre os eletrodos e *gaps* entre o eletrodo e a chapa antes de aplicar a solda. Foi verificado o problema nos eletrodos e os mesmos foram posicionados da maneira correta, ou seja, alinhados, perpendiculares em relação a flange da peça e sem *gaps* entre as peças.

Figura 3.7 – Problemas de desalinhamento e falta de perpendicularidade dos eletrodos.



Fonte: Adaptado de GMB (2009)

Verificou-se que as demais potenciais causas-raízes da Figura 3.4, como corrente excessiva, força/pressão muito alta e curto tempo de retenção por exemplo, devem ser estudados em trabalhos futuros.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Realizou-se o ajuste do *squeeze time* em todas as programações das MSPA's, em um total de 5 células de robôs e 53 MSPA's.

Toda a implementação foi realizada num total de 1320 pontos de solda presentes no processo de estruturação do carro da determinada indústria. Desse total de pontos, foram 689 intervenções de paralelismo, 619 de perpendicularismo, 530 por *gap*, e ainda foram encontrados pontos aplicados erroneamente no raio e na borda da chapa. Tais resultados podem ser verificados resumidamente na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultado final dos ajustes nos eletrodos

Resultado final dos ajustes nos eletrodos						
Áreas trabalhadas	Número total de MSPA	Paralelismo	Perpendicularismo	Gap	Ponto no Raio	Ponto na Borda
5	53	689	619	530	58	36

Fonte: Autor

Todo o trabalho foi realizado com validações de intervenção de processo, tanto no teste não destrutivo (feito hora a hora) quanto no teste destrutivo (teste de cisalhamento do ponto de solda, realizado semanalmente), para confirmar que os novos tempos de compressão e ajustes de posicionamento do eletrodo não estavam alterando a qualidade do produto final e sim diminuindo o fagulhamento e mantendo a qualidade da solda. Pode-se verificar na Figura 4.1 a diferença do processo de solda ponto antes e depois das implementações realizadas.

Figura 4.1 – Comparação antes e depois das intervenções realizadas.



Fonte: Autor

## 5 CONCLUSÃO

A indústria automobilística vem exigindo cada vez mais o controle total dos parâmetros de solda por resistência elétrica, devido à grande aplicabilidade e alta quantidade de pontos de solda efetuados diariamente em empresas desse ramo. A indústria em estudo por exemplo, aplica cerca de 650.000 pontos de solda em seu processo por dia.

Isso faz com que a atenção e dedicação em busca do total controle deste processo seja intensa, aumentando assim a busca por equipamentos capazes de controlar e identificar problemas ou variações que ocorrem durante a soldagem, como o caso do alto fagulhamento apresentado nesse trabalho.

Este trabalho identificou-se um sério problema de fagulhamento, no qual se fez um estudo dos principais causadores da fagulha, e encontrou soluções pontuais para praticamente eliminar as fagulhas na solda ponto, mantendo a qualidade da solda.

Além disso, a redução dessas fagulhas trouxe ganhos com reduções de limpezas e manutenções, redução no consumo tanto de eletrodos como de energia elétrica e ganhos de produtividade, verificados com o aumento na durabilidade dos botões de solda e na diminuição do tempo de inatividade nas linhas, tais como melhoria nos desvios dimensionais e superfície do carro.

Devido à solda ponto ser um processo com muitas variáveis, foi extremamente importante efetuar um trabalho detalhado para a definição dos parâmetros e variáveis de regulagem corretamente, uma vez que facilmente podem aparecer problemas de qualidade e de fagulhamento.

Houve uma revisão e atualização do plano de manutenção preventiva da fábrica, a fim de que a equipe de manutenção possa controlar todas causa-raízes mostradas nesse trabalho.

Um resultado bastante importante desse projeto foi apresentar de forma simples e clara, como a utilização da técnica de projeto e análises estatísticas experimental é bastante eficiente para resolução de problemas críticos de processo de fabricação ou produto. Uma vez que a utilização desses experimentos (testes) e medições são realizados, procura-se reduzir o número de produtos com defeitos fabricados e, responder a uma série de questões relacionadas aos níveis e parâmetros que influenciam o desempenho do produto e processo final. Quando combinado com a técnica da metodologia, é possível determinar qual o ponto ótimo do processo de solda, ou seja, quais valores de entrada tem o melhor desempenho para a saída.

Como sugestão para futuros trabalhos, permite-se a continuação do projeto de redução de fagulhamento nas máquinas automáticas de solda ponto, uma vez que existem outras potenciais

causas-raízes para o problema a serem analisadas, buscando sempre uma melhoria contínua do processo de solda. Além da possibilidade de análise da influência da força nos eletrodos e do comportamento da solda ponto em diferentes tipos de materiais das chapas.

## REFERÊNCIAS

- ASLANLAR, S. The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry. **Materials and design**, v. 27, p.125-131, 2006.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **D8.9M**: recommended practices for test methods for evaluating the resistance spot welding behavior of automotive sheet steel materials: 550 N. Miami, 1997.
- BRANCO, H. L. O. **Avaliação de capas de eletrodos utilizadas na soldagem por resistência de chapas galvanizadas automotivas**. 2004. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2004.
- BRANDI, S. D. Soldagem por resistência. In: WAINER, E.; BRANDI S. D.; DE MELLO, F. B. H. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1992. p. 217-242.
- DALE, B. G. **Managing quality**. 5th ed; New York: Wiley India, 2007.
- DENGENSHA. **C/X Servoguns**, 2017. Disponível em: <<http://dengensha.com/weld-guns>>. Acesso em: 25 set. 2017.
- DVS – Deutsch Verband Schweisstechnik. **Normas alemãs de soldagem**, Série 29, Düsseldorf: DVS, 2004.
- GMB. **Treinamento de manutenção de eletrodos**, São José dos Campos: GMB, 2009.
- INTERMACHINERY COMÉRCIO LTDA. **Manual de treinamento do Z-Trode e nitrode**. São Paulo, 2003.
- ISHIKAWA, K. **Introduction to quality control**. New York: Chapman and Hall, 448 p., 1990.
- ISO 14327. **Norma técnica de solda por resistência**. European Committee for Standardization, 2001.
- KEARNS, W. H. **Welding handbook: Resistance and Solid-State Welding and Other Joining Processes**. Miami: American Welding Society, 1980.
- MACHADO, I. G. **Soldagem e técnica conexas: Processos**. Rio Grande do Sul: UFRGS, 1996.
- MAINIER, F. B. Reflexões: o computador, o desemprego e o processo educativo. In: JORNADA DE PESQUISADORES EM CIÊNCIAS HUMANAS, 4., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Centro de Filosofia e Ciências Humanas - UFRJ, 1997.
- PEREIRA, A. M.; FERREIRA, J. M.; LOUREIRO, A.; COSTA, J. D. M.; BÁRTOLO, P. J. Effect of process parameters on the strength of resistance spot welds in 6082-T6 aluminum alloy. **Materials and design**, v.31, p.2454-2463, 2010.

POURANVARI, M.; ASGARI, H. R.; MOSAVIZADCH, S. M.; MARASHI.P. H.; GOODARZI, M. Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds. **Science and technology of welding and joining**, v.12, p.217-225, 2007.

SANTOS, F. B. **Estudo da eficiência do processo de soldagem de pontos por resistência elétrica utilizado na indústria automobilística**. 2006. 104 p. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Gestão) – Gestão de Negócios e Meio Ambiente, Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2006.

SIFF SERVO ROBOTIK. **Servo robotics**, 2017. Disponível em: <<http://siff.com.tr/>>. Acesso em: 25 de Setembro de 2017.

TECNOWELDING COMÉRCIO LTDA. **Soluções pra soldagem por resistência**. Curitiba, 2004.

VARGAS, J. E. **Estudo da formação, geometria e resistência do ponto na soldagem pó resistências: uma abordagem estatística**. 2006. 143p. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília. 2006.

WILLIAMS, N. F.; PARKER, J. D. Review of resistance spot welding of steel sheets, part 1: modeling and control of weld nugget formation. **Int. Mat. Review**. v. 49, n. 2, p. 45-75, 2004,