



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Mestrado - Doutorado

**OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA PARA
REDUÇÃO DE RESPINGOS EM JUNTAS SOLDADAS NA INDÚSTRIA
AUTOMOTIVA**

Por

Rômulo Borba Vicente

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção
do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.*

JOÃO PESSOA - PB

2018

RÔMULO BORBA VICENTE

**OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA PARA
REDUÇÃO DE RESPINGOS EM JUNTAS SOLDADAS NA INDÚSTRIA
AUTOMOTIVA**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Professor Dr. José Hilton Ferreira da Silva

JOÃO PESSOA - PB

2018

V627o Vicente, Rômulo Borba.

OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA
PARA REDUÇÃO DE RESPINGOS EM JUNTAS SOLDADAS NA
INDÚSTRIA AUTOMOTIVA / Rômulo Borba Vicente. - João
Pessoa, 2018.

64 f.

Orientação: José Hilton Ferreira da Silva.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Soldagem por resistência. 2. Expulsão. 3. Adesivos
estruturais. 4. Parâmetros de soldagem. I. José Hilton
Ferreira da Silva. II. Título.

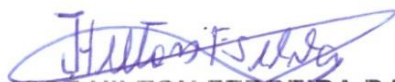
UFPB/BC

**OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM POR
RESISTÊNCIA PARA REDUÇÃO DE RESPINGOS EM JUNTAS
SOLDADAS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

por

RÔMULO BORBA VICENTE

Dissertação aprovada em 31 de julho de 2018



Prof. Dr. JOSÉ HILTON FERREIRA DA SILVA
Orientador – UFPB



Prof. Dr. JOSINALDO PEREIRA LEITE
Examinador Interno – UFPB



Prof. Dr. EDGARD DE MACEDO SILVA
Examinador Externo – IFPB

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado à meus pais, Geraldo e Mônica, a minha namorada, Rayssa e a todas aquelas pessoas que direta ou indiretamente estiveram presentes em todas as etapas deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Geraldo Vicente da Silva e Teresa Mônica Borba Vicente e a toda minha família que souberam me conduzir para o bem, sempre valorizando e priorizando a educação em todos os momentos.

A minha namorada Rayssa Queiroz de Albuquerque, que soube transformar momentos de angústia em parceria e incentivo, com amor e companheirismo.

Ao Prof. Dr. José Hilton Ferreira da Silva pela orientação, pelos valiosos ensinamentos técnicos, incentivo e por toda ajuda, na realização deste trabalho.

Ao grupo FCA, especialmente ao Eng. Thiago Domingos pelo suporte e contribuição neste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica pelos ensinamentos durante este programa.

A Universidade Federal da Paraíba pelo apoio e oportunidade de realização desta pós graduação.

OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA PARA REDUÇÃO DE RESPINGOS EM JUNTAS SOLDADAS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

RESUMO

A Soldagem por Resistência é um processo que permite uma grande produtividade, não utiliza material de adição e apresenta uma ótima qualidade nas uniões soldadas. Devido as suas características, é amplamente utilizado na indústria automobilística. Com a utilização de aços de alto desempenho e adesivos estruturais na união de chapas, surge um maior desafio na parametrização da solda para garantir a ausência de expulsão (respingo de solda) mantendo a qualidade da união soldada. Este trabalho tem como objetivo a caracterização de uniões soldadas por solda a ponto e otimizar a redução de respingos de solda, que afetam a segurança e qualidade do processo. A primeira etapa consiste na apresentação da formação do núcleo de solda, respingos e os parâmetros associados como: tempo, corrente, força, resistência e materiais. Como o tempo de solda é uma variável que afeta diretamente a produtividade na indústria e o material é uma imposição do projeto, este trabalho analisa as variáveis corrente e energia para avaliar os limites de formação das expulsões em uniões soldadas sem utilização de adesivos estruturais e com a utilização dos mesmos. A fim de avaliar os parâmetros, foram utilizados resultantes da energia de soldagem do processo e aspecto visual dos pontos de solda para determinar uma melhor configuração, mantendo o processo livre de expulsões e garantindo a resistência mecânica necessária para as uniões soldadas. Os resultados mostraram que existe uma parametrização capaz de reduzir a quantidade de respingos e que os adesivos estruturais influenciam diretamente na parametrização dos pontos a fim de evitar a formação de respingos.

Palavras chave - Soldagem por resistência, expulsão, adesivos estruturais, parâmetros de soldagem.

OPTIMIZATION OF RESISTANCE WELDING PARAMETERS TO REDUCE EXPULSIONS IN WELDED JOINTS AT THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

ABSTRACT

Resistance Welding is a process that allows a high productivity, does not use addition material and presents an excellent quality in welded joints. Due to its characteristics, it is widely used in the automobile industry. With the use of high performance steels and structural adhesives in the union of the plates, a greater challenge arises in the parameterization of the weld to guarantee the absence of expulsion (welding splash), maintaining the quality of the welded joint. This work aims for the characterization of brazed welds and to optimize the reduction of weld spatter, which affect the safety and quality of the process. On the first part is detailed the formation of welding nucleus, splashes and associated parameters such as: time, current, force, resistance and materials are presented. Since welding time is a variable that directly affects the productivity in the industry and the material is a project imposition, this work analyzes the variables current and energy to evaluate the limits of formation of the expulsions in welded joints without the use of structural adhesives and with their use. In order to evaluate the parameters, visual analysis and energy results of the process for the welded plates were used to determine a better configuration, keeping the process free of expulsions and guaranteeing the necessary mechanical resistance for welded joints. The results showed that there is a parameterization capable of reducing the amount of welding expulsion and that the structural adhesives influence directly the parameterization of the points in order to avoid the formation of welding splash.

Keywords - Resistance welding, Splashes, Structural adhesives, Welding parameters.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVOS GERAIS	2
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1. SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA	3
2.1.1. Soldagem por pontos	3
2.1.2. Soldagem topo a topo	4
2.1.3. Soldagem por ressalto	5
2.1.4. Soldagem por costura.....	6
2.2. PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA	7
2.3. MÁQUINA DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA.....	10
2.4. PARÂMETROS DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA	12
2.4.1. Corrente de soldagem.....	12
2.4.2. Tempo de soldagem	15
2.4.3. Força ou pressão de soldagem.....	16
2.5. FORMAÇÃO DE RESPINGOS (EXPULSÕES) EM SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA.....	17
2.5.1. Impactos gerados pelos respingos.....	21
2.6. ADESIVOS ESTRUTURAIS.....	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1. MATERIAL.....	25
3.2. EQUIPAMENTOS.....	26
3.3. VARIÁVEIS DE SOLDAGEM	28
3.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
4.1. ANÁLISE DO EFEITO DA CORRENTE DE SOLDAGEM.....	32
4.1.1 Correlação entre a Energia de Soldagem e a Corrente de Soldagem	36

4.1.2 <i>Correlação entre as resistências elétrica e dinâmica e a Corrente de Soldagem</i>	38
4.2 ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE INÍCIO DAS EXPULSÕES	41
5. CONCLUSÕES	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Processos e soldagem por ponto (WAINER, 1992).....	4
Figura 2.2: (a) Soldagem topo a topo por resistência pura. (b) aspecto da soldagem terminada (WAINER, 1992).....	4
Figura 2.3: Esquema da soldagem de ressalto por resistência (a) e o tipo de soldagem obtida (b) (WAINER, 1992).....	5
Figura 2.4: Soldagem por resistência a ponto (a) e costura (b) (PORTAL MET@LICA, 2017).....	6
Figura 2.5: Esquema do processo de fabricação de tubos com costura (WAINER, 1992).....	6
Figura 2.6 Ciclo de Soldagem por Resistência (BRANCO, 2004)	8
Figura 2.7: Distribuição de temperatura no processo (PENTEADO, 2011)	10
Figura 2.8: Pinça de soldagem (COMAU, 2017)	11
Figura 2.9: Transformador para controle de solda. (BOSCH REXROTH, 2012).....	11
Figura 2.10: Efeito shunt na solda por resistência (ZHANG, 1999)	13
Figura 2.11: Grafico de Resistencia mecanica versus Corrente. (Adaptado de AWS, 2007) ..	14
Figura 2.12: Formação do núcleo de solda. (SD Service, 2018).....	15
Figura 2.13: Forças atuantes durante a soldagem por resistência (ZHANG, 1999).....	17
Figura 2.14: Evidência de expulsão (ZHANG, 1999)	18
Figura 2.15: Modelo probabilístico de expulsões para uma liga de Alumínio. (ZHANG, 1999).....	19
Figura 2.16: Expulsões em soldagem por resistência na indústria automotiva (CAR TV, 2014).....	21
Figura 2.17: Respingo superficial e eletrodo comprometido por respingos.....	21
Figura 2.18: Respingo Interfacial (BRANCO, 2004).....	22
Figura 2.19: Utilização de adesivo estrutural em um automóvel (DOW, 2015).....	23
Figura 3.1: Preparação das chapas de 1,2mm para soldagem	24
Figura 3.2: Cordão de adesivo estrutural aplicado entre chapas	25
Figura 3.3: Software Bosch 6000	34
Figura 3.4: Sistema de Refrigeração dos eletrodos (STTOCO, 2010, Apud MEDAR, 2004).27	
Figura 3.5: Procedimento Experimental.....	29
Figura 3.6: Diagrama do equipamento de soldagem (BOSCH, 2012)	29

Figura 4.1: Chapas soldadas com Corrente de 5kA a 9kA. (a) sem adesivo; (b) com adesivo	32
Figura 4.2: Chapas soldadas com Corrente de 10 kA a 12 kA. (a) sem adesivo; (b) com adesivo	33
Figura 4.3: Energia x Corrente das amostras com e sem adesivo entre chapas	36
Figura 4.4: Diferença de energia resultante entre solda com e sem adesivo entre chapas	36
Figura 4.5: Gráfico Resistência x Corrente de 5kA a 12kA	37
Figura 4.6: Gráfico de resistência dinâmica gerado para baixa corrente de 6 kA.....	38
Figura 4.7: Gráfico de resistência dinâmica gerado para alta corrente de 11 kA.....	38
Figura 4.8: Chapas soldadas com Corrente de 10,2 kA a 11 kA. (a) sem adesivo; (b) com adesivo	39
Figura 4.9: Energia x corrente de soldagem dos pontos com e sem adesivo entre chapas de 10,2 kA a 11 kA.....	41
Figura 4.10: Respingo de solda interfacial durante experimento	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Níveis de corrente de soldagem utilizadas na execução do procedimento experimental.	28
Tabela 4.1: Ordem de execução do procedimento experimental, para de corrente de soldagem variando de 5 kA a 9 kA.	31
Tabela 4.2: Ordem de execução do procedimento experimental, para de corrente de soldagem variando de 10 kA a 12 kA..	32
Tabela 4.3: Amostras utilizando adesivo entre chapas de 5kA a 12kA.	34
Tabela 4.4: Amostras sem utilização de adesivo entre chapas de 5kA a 12kA.....	35
Tabela 4.5: Amostras sem utilização de adesivo entre chapas 10,2kA a 11kA.	40
Tabela 4.6: Pontos utilizando adesivo entre chapas 10,2 kA a 11 kA.....	40

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampere
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHSS	Aços avançados de alta resistência
AWS	Sociedade Americana de Soldagem
I	Intensidade de corrente
J	Joule
kA	Kilo Ampere
ms	Milisegundo
OICA	Organização Internacional de Construtores Automotivos
Q	Energia ou calor
R	Resistência Elétrica
RSW	Soldagem de Pontos por Resistência
t	tempo
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
Ω	Ohms

1. INTRODUÇÃO

A Soldagem de pontos por resistência elétrica tem um lugar importante na indústria, sendo a forma mais utilizada do processo de soldagem por resistência elétrica em que as partes metálicas são unidas em um ou mais pontos. A coalescência é produzida em uma área relativamente pequena pelo calor obtido a partir da resistência ao fluxo de corrente elétrica através das peças mantidas juntas sob pressão de eletrodos. A quantidade de calor produzido é uma função da corrente de soldagem, do tempo de permanência e da resistência elétrica entre as peças de trabalho.

A soldagem por pontos é muito utilizada na soldagem de aços carbonos. Este fato deve-se a maior resistência elétrica e menor condutividade térmica que os aços possuem em relação aos eletrodos de cobre. A soldagem por pontos é comumente usada na indústria automobilística, este processo também pode ser completamente automatizado e tem uma ótima produtividade e repetibilidade.

Segundo a Organização Internacional de Construtores Automotivos (OICA), a produção anual de automóveis no mundo é de aproximadamente 100 milhões de unidades. Tal volume requer melhoria constante na produtividade e qualidade para os fabricantes. (AUTODATA, 2018)

Um fenômeno indesejado e bastante comum associado ao processo de solda por resistência é a formação de respingos de solda, também conhecidos por expulsão. A expulsão é causada pela ejeção de material fundido durante o processo da solda, que podem ser interfaciais ou superficiais e são profundamente indesejáveis no processo industrial.

A expulsão tem um efeito prejudicial no desempenho e na aparência da solda e deve ser suprimida, como sugerido nos trabalhos de Newton et al. (1994) e Hao et al. (1996). Alguns métodos alternativos para análise das expulsões foram introduzidos por Hwang et al. (2001), caracterizando o efeito na formação de respingos pela variação do aquecimento e resfriamento através do controle da forma de onda de corrente de pulso.

A qualidade do material soldado e do eletrodo é também afetada pela presença dos respingos. Quando o respingo é proveniente do núcleo fundido, a resistência da solda pode ser prejudicada. Os respingos também servem como um indicador visual de um processo de solda, para atingir os requisitos do processo de solda, as altas correntes utilizadas chegam geralmente muito próximas do limite de formação dos respingos. (ZHANG, 1999)

Através da análise da influência da variação de corrente este trabalho propõe uma parametrização que otimiza o nível de expulsões na solda de duas chapas de aço zincado de 1,2mm de espessura. Também é avaliado a influência, dos adesivos estruturais utilizados na indústria automotiva atualmente, na formação dos respingos de solda.

1.1. Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo principal otimizar parâmetros de soldagem de pontos por resistência elétrica para redução de respingos de solda, que afetam a segurança e qualidade do processo, em juntas soldadas para indústria automobilística.

1.2. Objetivos específicos

- Avaliar a influência da corrente de soldagem na formação de expulsões para uma composição de chapas de aço zincado com 1,2 mm de espessura.
- Avaliar a influência do adesivo estrutural quando utilizado em conjunto com a solda ponto na geração de respingos.
- Avaliar a influência do adesivo estrutural sobre a energia de soldagem e a resistência elétrica na soldagem de pontos.
- Propor uma parametrização para soldagem de chapas de aço zincado com 1,2 mm de espessura para reduzir respingos atendendo aos conjuntos com e sem a utilização de adesivos estruturais.
- Identificar os tipos de defeitos de soldagem associados a determinados níveis de corrente.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Soldagem por Resistência Elétrica

A soldagem por resistência elétrica é um processo de soldagem por pressão na qual as peças a serem soldadas são unidas entre si em estado pastoso (ou em parte fundidas) sob pressão, e sem metal de adição.

Os materiais normalmente soldados por resistência elétrica são (MACHADO, 1996): os aços ao carbono, inclusive os zincados, baixa liga e inoxidáveis; o cobre e suas ligas; alumínio; magnésio; titânio e suas ligas.

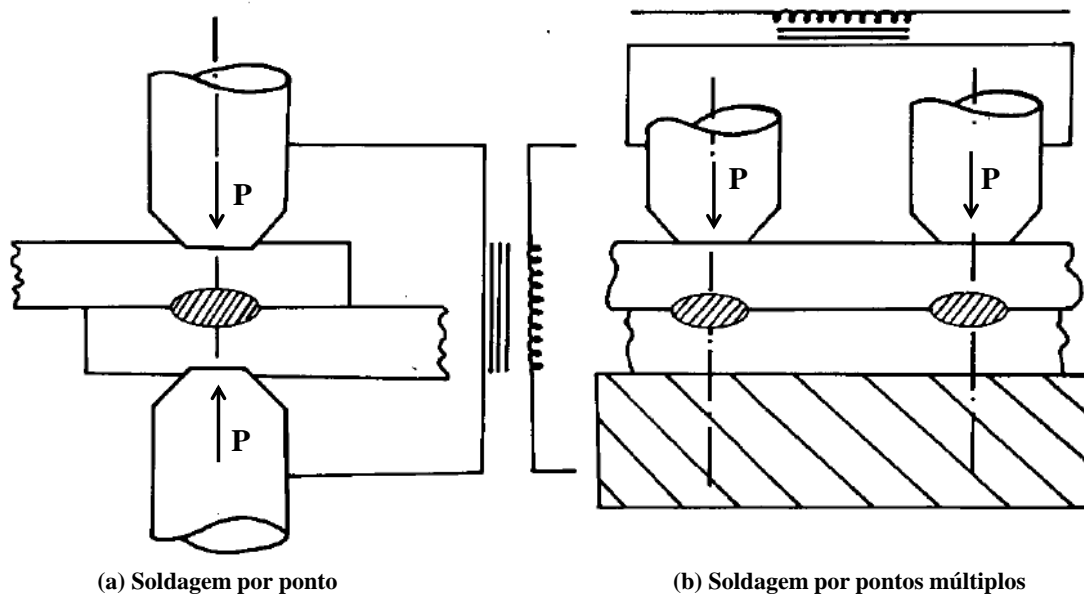
A soldagem por resistência é utilizada em diversas atividades industriais, envolvidas na montagem de componentes com chapas relativamente finas. Entretanto, destacam-se a indústria automobilística. Hoje provavelmente sua maior usuária (MACHADO, 1996).

Os principais tipos de soldagem por resistência são soldagem por ponto, soldagem topo a topo, soldagem por ressalto e soldagem por costura (WAINER, 1992):

2.1.1. Soldagem por pontos

Neste processo de soldagem, a corrente passa diretamente por um único núcleo de solda sendo formado. Para efetuar uma boa solda é necessário que as peças façam um bom contato metal - metal. Todos os elementos (peças e eletrodos) devem ser concebidos de tal maneira que permitam a corrente de soldagem chegar ao ponto desejado pelo caminho mais curto. A soldagem por ponto pode ser simples ou múltipla. A Figura 2.1 mostra esquematicamente as duas variantes. Este processo é bastante utilizado pela indústria de linha branca, automobilística e aeronáutica.

Figura 2.1- Processos e soldagem por ponto

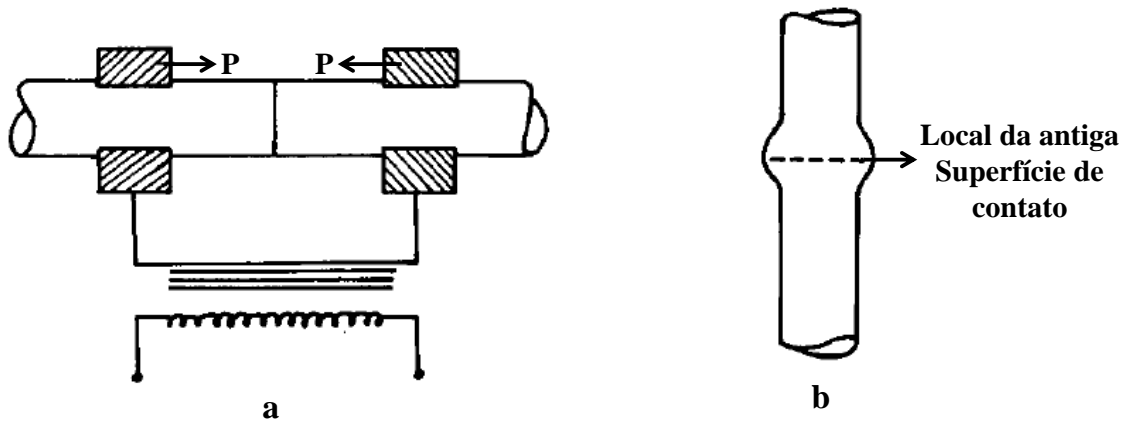


Fonte: WAINER (1992)

2.1.2. Soldagem topo a topo

Nesta soldagem, as duas superfícies de contato devem ter a mesma área, para tornar possível, em toda a seção, a mesma densidade de corrente e o mesmo aquecimento. Neste tipo de solda, faz-se distinção entre dois gêneros de execução: Topo a topo por resistência e por faiscamento. As Figuras 2.2a e 2.2b mostram esquematicamente os dois gêneros de execução da soldagem por resistência topo a topo.

Figura 2.2 - (a) Soldagem topo a topo por resistência pura. (b) aspecto da soldagem terminada



Fonte: WAINER (1992)

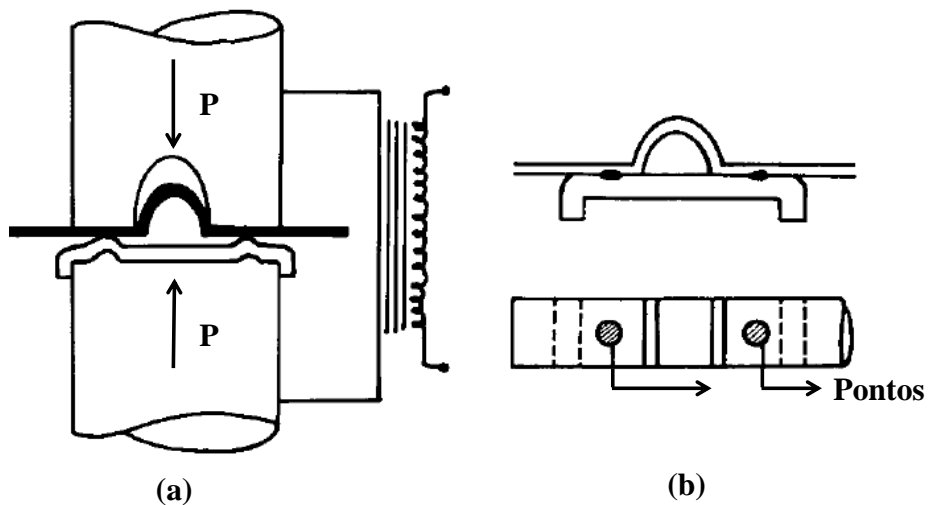
A execução por resistência é utilizada para materiais com seção de forma geométrica variadas. As peças são prensadas uma contra a outra, por meio de um dispositivo de compressão, depois é ligado a corrente de solda.

A execução por faiscamento, ao contrário da solda topo a topo por resistência, não requer nenhuma preparação das superfícies de contato. Neste sistema, liga-se a corrente e depois as superfícies de contato, que podem apresentar qualquer forma, são postas lentamente em contato, sob uma pressão de compressão reduzida. Como o início do contato é provocado por irregularidade na superfície dos materiais, o processo de fusão introduz-se no ponto de solda, pelos arcos formados pelas irregularidades da superfície entre as peças, este sistema acelera-se e estende-se, progressivamente.

2.1.3. Soldagem por ressalto

É uma variação da soldagem de resistência na qual o fluxo de corrente é concentrado nos pontos contato. Essas projeções são usadas para concentrar a geração no ponto de contato, conforme mostrado esquematicamente na Figura 2.3. Tem como características o uso de baixas correntes, baixas forças, e curtos tempos de solda. Este processo é frequentemente usado nos mais difíceis aplicações de solda a resistência, porque um número de soldas pode ser feito ao mesmo tempo, resultando em altas velocidades de produção. Este processo é utilizado na solda de porcas e parafusos.

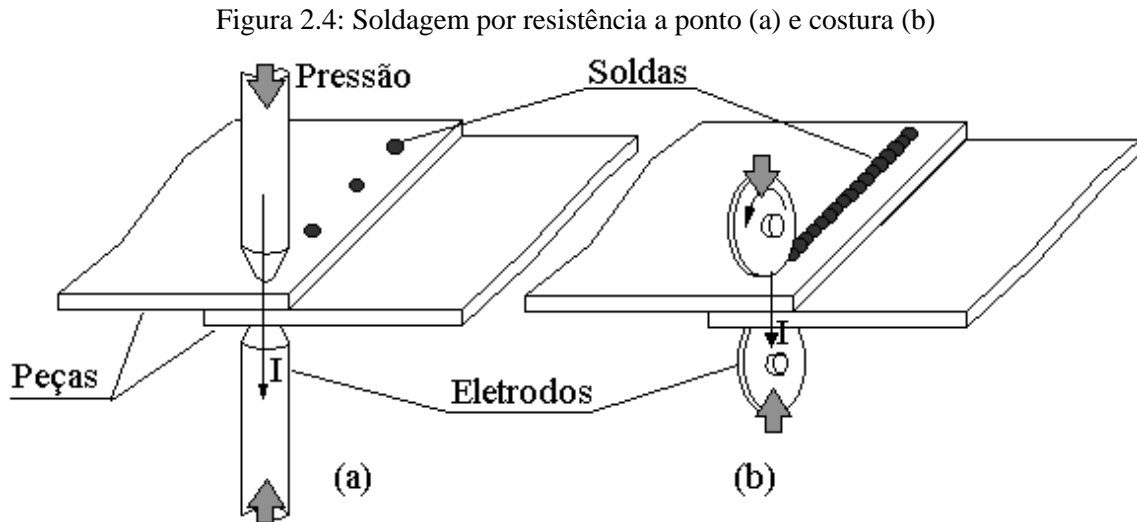
Figura 2.3: Esquema da soldagem de ressalto por resistência (a) e o tipo de soldagem obtida (b)



Fonte: WAINER (1992)

2.1.4. Soldagem por costura

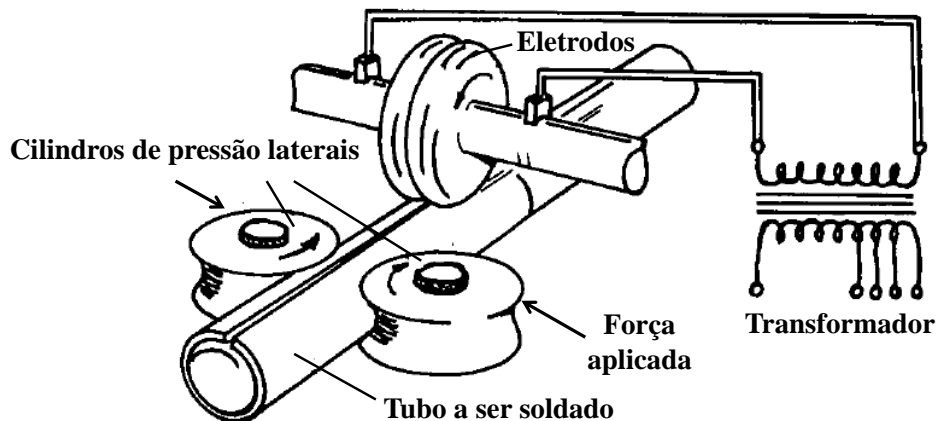
O processo é semelhante à soldagem por ponto. Porém, neste caso, o eletrodo tem o formato de discos. Forma-se uma união soldada por ponto, conforme pode ser observado na Figura 2.4.



Fonte: PORTAL MET@LICA (2017)

Uma aplicação importante deste processo é a fabricação de tubos com costura. Os tubos são enrolados por cilindros rotativos e no estágio final, as duas bordas são pressionadas uma contra a outra e dois eletrodos circulares executam a solda. A Figura 2.5 apresenta o processo de soldagem de tubos por resistência elétrica.

Figura 2.5: Esquema do processo de fabricação de tubos com costura



Fonte: (WAINER, 1992)

2.2. Processo de Soldagem a Ponto por Resistência

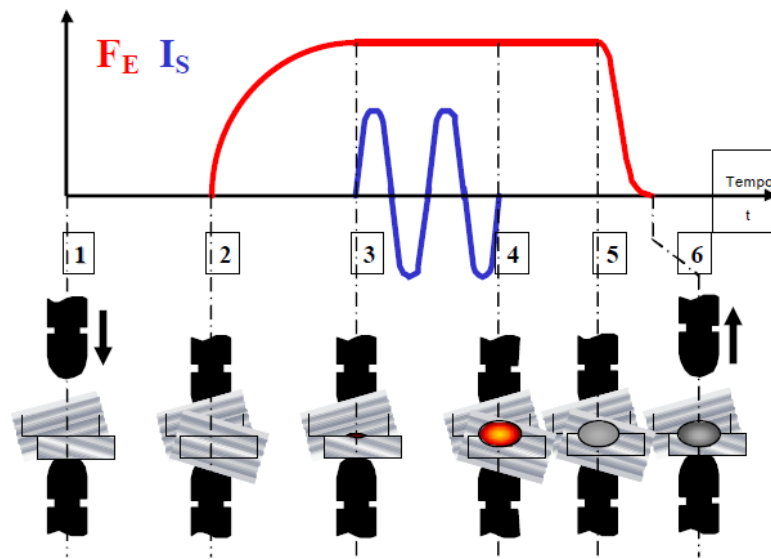
A junção de duas peças através da soldagem por resistência se dá por meio da geração de calor devido à passagem da corrente elétrica e da aplicação de pressão, onde, durante este processo, as peças se aquecem e ocorre a fusão localizada no ponto de contato na superfície de separação entre ambas (WAINER, et al., 1992)

A soldagem a ponto por resistência (Resistance Spot Welding - RSW) tem um lugar importante na indústria, por ser a forma mais utilizada do processo de soldagem por resistência elétrica, em que as partes metálicas são unidas em um ou mais pontos. Conforme mostrado na Figura 2.6, a coalescência é produzida em uma área relativamente pequena pelo calor obtido a partir da resistência ao fluxo de corrente elétrica através das peças mantidas juntas por eletrodos sob pressão. A quantidade de calor produzido é uma função da corrente, tempo e resistência entre as peças de trabalho.

O termo “Soldagem por Resistência” é proveniente de uma propriedade elétrica, chamada resistência, que dificulta a passagem do fluxo da corrente de elétrica no metal a ser soldado, promovendo a geração de calor. Esta resistência ao fluxo de corrente é a fonte geradora de calor na soldagem por resistência. Para realizar uma solda a ponto, que é uma sub classificação de soldagem por resistência, duas chapas ou mais, são colocadas sobrepostas, como na Figura 2.6, sendo pressionadas por eletrodos para garantir um bom contato elétrico (BRANCO, 2004).

A Figura 2.6 mostra a sequência básica de um ciclo de soldagem a ponto. Sendo FE a força de soldagem e IS a corrente de soldagem. O tempo compreendido entre as fases 1 e 6 chama-se tempo de soldagem. Na etapa 1, os eletrodos iniciam o processo de descida para que as chapas seja pressionadas. As chapas devem ser pressionadas a fim de eliminar o espaçamento entre elas e controlar a resistência elétrica na interface entre as chapas, este processo ocorre na etapa 2. Na etapa 3, os eletrodo são mantidos sobre pressão e a corrente de soldagem é liberada, inicia-se então o processo de formação do ponto de solda. Na etapa 4, o ponto de solda já formado, a corrente de soldagem é desligada, porém os eletrodos são mantidos sobre pressão para que o ponto de solda solidifique sob pressão. Após a solidificação do ponto de solda, a força de soldagem aplicada pelos eletrodos é desligada até a abertura total dos eletrodos, esse processo ocorre nas etapas 5 e 6 (BRANCO, 2004).

Figura 2.6: Ciclo de Soldagem por Resistência.



Fonte: (BRANCO, 2004)

Podem ser destacadas algumas vantagens e limitações na utilização deste processo.

Como vantagens destacam-se:

- Alta produtividade e possibilidade de automação;
- Não há necessidade de acabamento final;
- Não utiliza material de adição;
- Exige menor habilidade na execução manual.

As principais limitações são:

- Alto custo dos equipamentos;
- Soldas a ponto têm baixos limites de resistência a tração e fadiga;
- Materiais diferentes só podem ser soldados quando suscetíveis a formar uma liga ou quando se introduz entre eles um material intermediário que pode se ligar aos metais de base.

Segundo Stocco et al. (2008), a caracterização de soldagem por pontos em tempo real usando ultrassom é uma realidade na indústria automotiva de hoje e tem como principal objetivo reduzir o tempo de operação e fornecer meios confiáveis de inspeção de qualidade. Os resultados obtidos proporcionam maior confiabilidade, com um controle nas

regiões mais críticas dos corpos e também diminuirá o tempo de inspeção durante a produção.

Furlanetto et al. (2012) correlacionaram os métodos tradicionais de teste destrutivo com a análise utilizando ultrassom B-Scan de porcas soldadas de resistência por projeção. O sistema de ultrassom pode facilmente detectar qualquer desvio no processo de soldagem, com algumas vantagens importantes em relação aos procedimentos de inspeção atualmente utilizados, que são destrutivos ou se utilizam de testes de torque aplicados estatisticamente em alguns locais do corpo de prova.

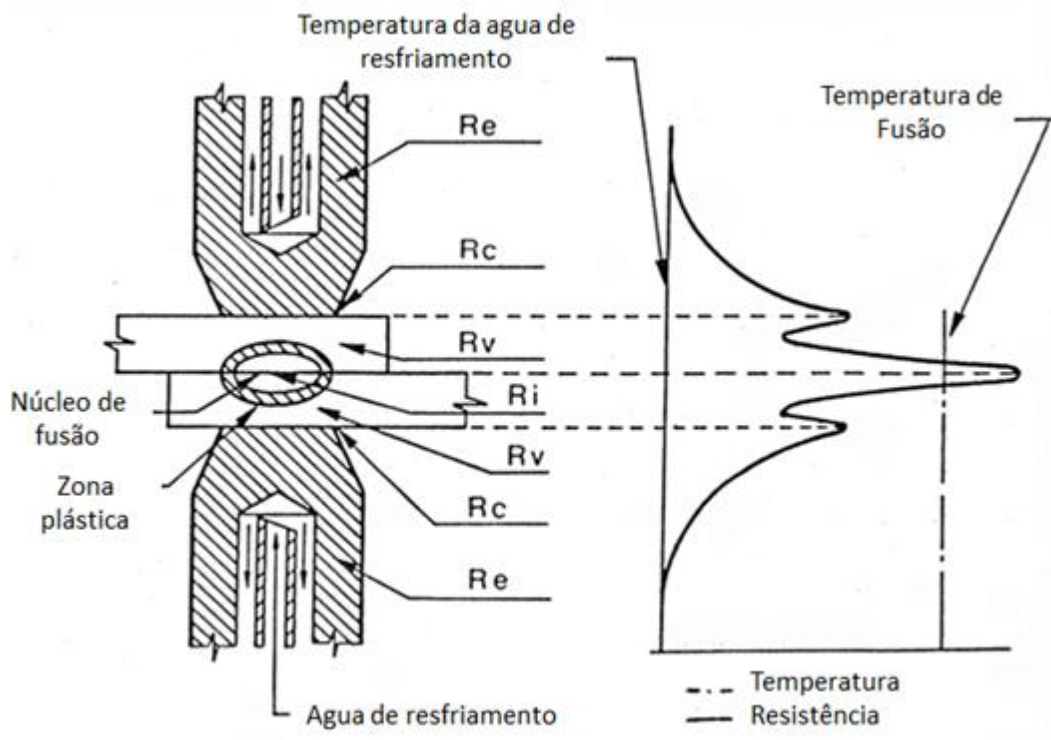
Segundo Zhang e Senkara (2006), problemas operacionais durante o processo de soldagem por resistência ocorrem, dentre os quais, os mais comuns são: desvio de corrente; indentação excessiva; distribuição da corrente; alinhamento e desalinhamento de eletrodos e expulsão de material.

A soldagem por resistência elétrica tem uma característica relevante, que é a rapidez com que o calor pode ser produzido. A Figura 2.7 mostra os efeitos da geração de calor no metal base e nos eletrodos. Também é possível verificar a função da água de resfriamento, que é manter a região de contato entre eletrodo e chapa na fase sólida, reduzindo a temperatura na parte externa das chapas, garantindo o bom crescimento do núcleo de fusão.

Na Figura 2.7 vê-se um diagrama com as resistências associadas a este processo. Podem ser consideradas sete resistências em série na distribuição de temperatura em uma solda, são elas:

- Re: resistência elétrica do material do eletrodo;
- Rc: resistência entre o eletrodo e o metal base. Este é um ponto de alta geração de calor, porém a superfície do metal não atinge sua temperatura de fusão durante a passagem de corrente devido à alta condutibilidade térmica dos eletrodos Re e ao fato de que eles são geralmente refrigerados a água;
- Rv: resistência total do próprio metal base, que é inversamente proporcional à área da seção transversal por onde a corrente passa;
- Ri: a interface do metal base é o local de formação da solda, este é o ponto de maior resistência e, portanto o que gera mais calor.

Figura 2.7: Distribuição de temperatura no processo



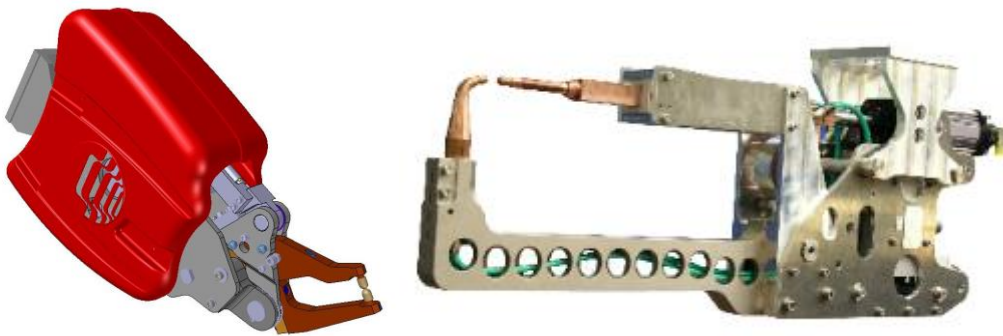
Fonte: (PENTEADO, 2011)

2.3. Máquina de Soldagem por Resistência Elétrica

Os equipamentos utilizados na soldagem por resistência são compostos fundamentalmente por três elementos básicos: circuito de controle, sistema mecânico e circuito elétrico (INTERMACHINERY, 2003).

O sistema mecânico de uma pinça de solda a ponto deve assegurar que a velocidade de aproximação dos eletrodos seja rápida e absolutamente controlável, a fim de evitar que as faces de contato dos eletrodos sejam danificadas por pressões de contato repetitivas. A Figura 2.8 apresenta modelos de pinça de soldagem utilizados no processo de soldagem por resistência a ponto.

Figura 2.8: Pinça de soldagem

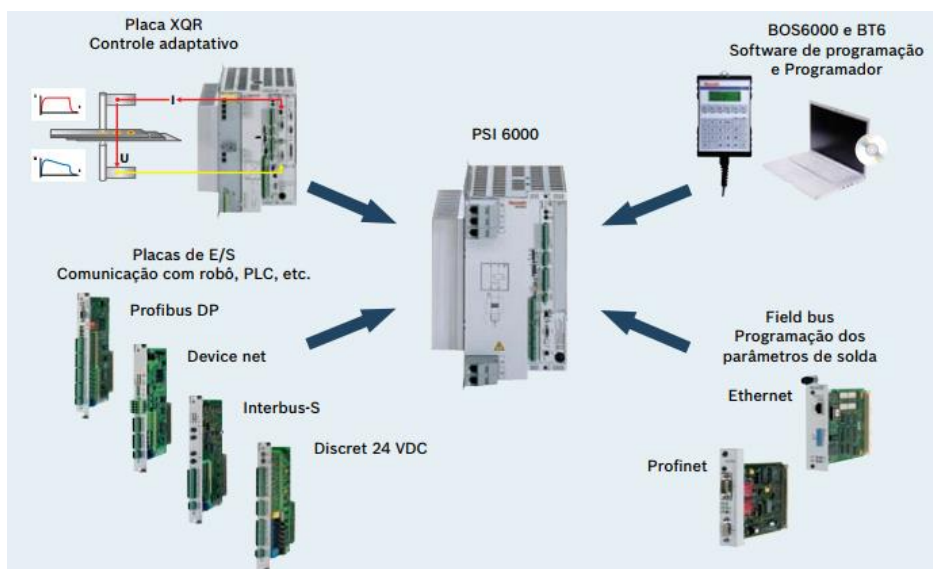


Fonte: COMAU (2017)

As pinças de soldagem vistas na Figura 2.8 podem ser manuais ou robotizadas possuindo diversas geometrias de eletrodos e porta eletrodos, dependendo da aplicação desejada.

O circuito de controle mostrado na Figura 2.9 é responsável pelo controle da soldagem, que fornece as seguintes funções principais: inicializar ou cessar a corrente de soldagem; controlar a magnitude da corrente de soldagem; liberar o mecanismo de força do eletrodo no tempo adequado.

Figura 2.9: Transformador para controle de solda.



Fonte: BOSCH REXROTH (2012)

Os transformadores modernos, como o da Figura 2.9, realizam a soldagem por resistência em média frequência com um inversor de solda trifásico, fornecendo uma saída ao transformador na frequência de 1000 Hz. Esse possui uma ponte retificadora integrada, de modo que a corrente de soldagem entregue à pinça seja sempre corrente contínua (CC). Comparado à corrente alternada CA (60Hz) a soldagem em média frequência (1000 Hz) oferece a vantagem de ter menos interferência da rede elétrica, pois a energia é fornecida pelo inversor e não diretamente da rede.

2.4. Parâmetros de soldagem a ponto por resistência

Devido à alta resistência na região de solda, o fluxo de corrente elétrica elevada provoca o aquecimento na área de contato, formando o núcleo de solda através do efeito Joule, que pode ser calculado como mostrado na Equação do calor (2.1).

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

Sendo: Q = Energia ou calor gerado(J);
 R = Resistência elétrica do material (Ω);
 I = Intensidade de corrente elétrica (A);
 t = Tempo de solda (s).

Nos casos onde a corrente de soldagem não pode ser considerada constante, a quantidade de calor pode ser calculada através da equação 2.2 (ASM, 1993).

$$Q = \int_0^t I^2 R dt \quad (2.2)$$

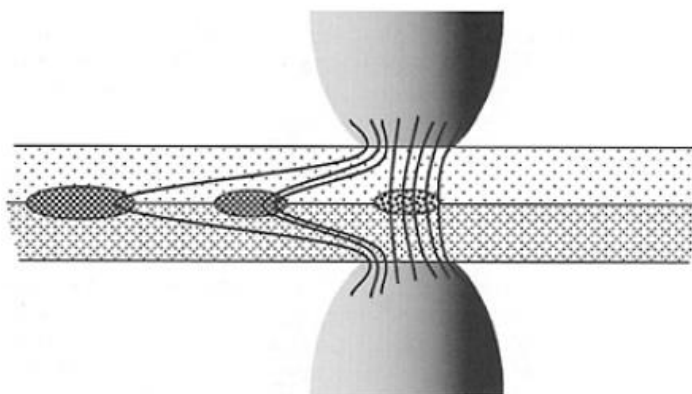
2.4.1. Corrente de soldagem

A partir da equação 2.1, é possível mensurar a influência dos parâmetros de soldagem, visto que, a corrente tem uma magnitude maior na equação, a mesma possui uma maior influência na geração de calor do que as outras variáveis.

A intensidade de corrente elétrica na soldagem por resistência (WAINER, 1995) é determinada em função das características físicas e da espessura do material a soldar, variando para as aplicações mais usuais dentro de valores entre 5 e 30 kA.

Além das variações na magnitude da corrente de soldagem, a densidade de corrente pode variar na interface de solda. Essa mudança na densidade de corrente pode resultar do desvio de corrente através de soldas precedentes e pontos de contato diferentes daqueles na solda, fenômeno conhecido como efeito shunt, mostrado na Figura 2.10. Como resultado, a densidade de corrente ou corrente pode não ser suficiente para produzir uma solda de qualidade. O efeito shunt é uma variável relevante que influencia na resistividade do material da chapa (ZHANG, 1999).

Figura 2.10: Efeito shunt na solda por resistência



Fonte: ZHANG (1999)

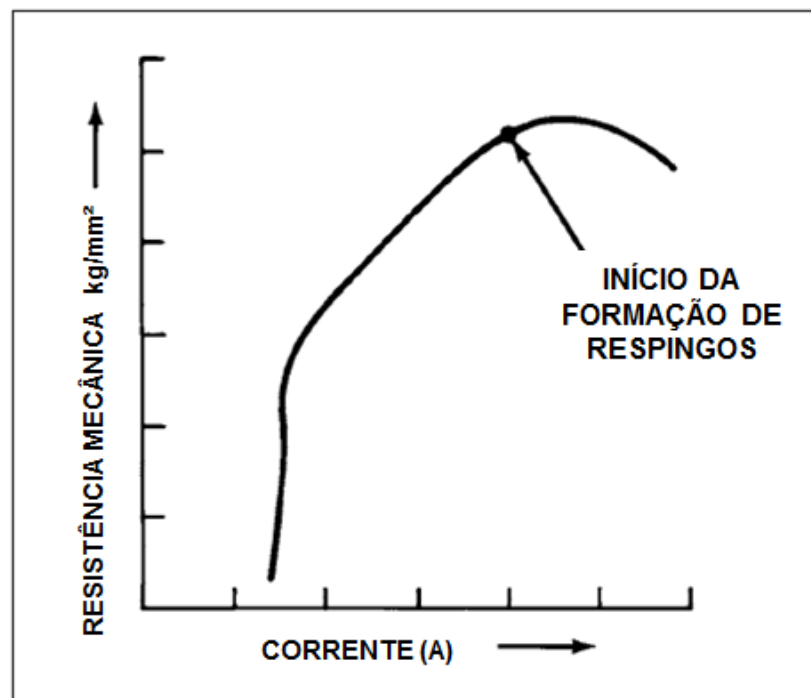
Um aumento na área da face do eletrodo diminuirá a densidade de corrente e o calor da soldagem. Isso pode causar uma diminuição mensurável no tamanho da solda. A densidade de corrente mínima por um tempo finito é necessária para produzir a fusão na interface. Calor suficiente deve ser gerado para superar as perdas para o metal base adjacentes e os eletrodos (AWS, 2007).

Akkas (2017) estudou o efeito da corrente e do tempo de soldagem na resistência da junta soldada a um carregamento de tração na soldagem de ponto por resistência de chapas de aço SPA-H usadas em veículos ferroviários. Foi concluído que, para uma força do eletrodo de 4 kN na união de chapas de aço SPA-H, a resistência máxima à tração é obtida com corrente de soldagem de 7,5 kA, em 25 períodos (1 período é igual a 0,02 segundos). Quando a alta qualidade da superfície é mais importante do que a resistência, a

corrente de soldagem de 7 kA para o tempo de soldagem de 30 períodos ou a corrente de soldagem de 8 kA para o tempo de soldagem de 20 são suficientes. A profundidade do recuo do eletrodo no material não excedeu os 30% do limite de espessura da chapa, o que é aceito para uma boa qualidade de superfície. O aumento da corrente e do tempo de soldagem causam uma alta entrada de calor na zona de soldagem e no alongamento do núcleo da solda, de modo que a força de desprendimento das juntas aumentou. Em baixa corrente e tempo de soldagem, pequenos diâmetros de solda foram obtidos e similarmente menores valores de resistência à tração do que o metal base foi medido devido à baixa aplicação de calor na zona de soldagem. No entanto, em alta corrente e tempo de soldagem, a área da seção transversal diminui. O núcleo da solda jorrou entre as duas chapas, resultando na diminuição da largura da pepita.

O tamanho do núcleo e a força aumentam rapidamente com o aumento da densidade de corrente. A densidade de corrente excessiva causará expulsão de metal fundido, resultando em vazios internos, fissuras de solda e propriedades de resistência mecânica mais baixa. A Figura 2.11 mostra uma curva de resistência mecânica em relação ao aumento da corrente, onde pode ser observado o início da formação dos respingos.

Figura 2.11: Gráfico de Resistência mecânica versus Corrente.



Fonte: AWS (2007)

2.4.2. Tempo de soldagem

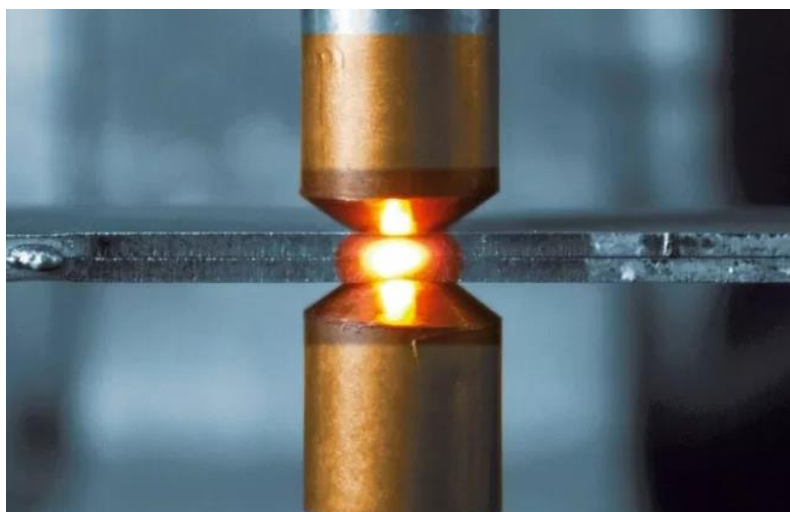
O tempo de solda é definido como o tempo de passagem da corrente elétrica na junta a ser soldada (FURLANETTO, 2004). Usualmente, este tempo é expresso em ciclos. Assim, quando o tempo de solda for 15 ciclos, a sua duração é $\frac{1}{4}$ de segundo, pois a frequência da rede elétrica no Brasil é de 60 Hertz. Quanto maior o tempo de solda maior serão as perdas de calor por dissipação, diminuindo o rendimento térmico da soldagem além de aumentar as distorções do componente que se está soldando. Sendo assim, o objetivo será sempre utilizar o menor tempo de soldagem possível.

Através da Figura 2.6 pode ser entendido como tempo de soldagem os intervalos correspondentes as fases 3 e 4, onde efetivamente ocorre a passagem de corrente elétrica no circuito. O tempo juntamente e a corrente podem ser alterados para atingir as zonas de temperaturas desejadas, dependendo das espessuras de chapas e revestimentos da liga soldada.

A Figura 2.12 mostra a formação do núcleo da solda no processo de soldagem por resistência a ponto. Segundo a AWS (2007), o tempo precisa ser suficiente para provocar o crescimento do núcleo fundido até atingir o tamanho de núcleo desejado. Para chapas muito grossas o tempo precisa ser aumentado e a passagem de corrente intercalada a fim de evitar expulsões do núcleo fundido.

Se o tempo efetivo de solda for muito alto, o núcleo pode exceder a espessura da chapa, gerando a expulsão de material fundido do núcleo.

Figura 2.12: Formação do núcleo de solda



Fonte: SD Service (2018)

A corrente e o tempo de soldagem são diretamente proporcionais a quantidade de calor sendo gerada. Na Soldagem o incremento na corrente e no tempo resultam no aumento da geração de calor. Isto facilita o crescimento do núcleo da solda que aumenta a resistência mecânica da junta soldada. No entanto, excessivas correntes e tempos de soldagem resultam em expulsão devido ao supercrescimento do núcleo da solda. Isso pode introduzir defeitos de solda na soldagem, tais como vazios e recuo excessivo, que adversamente afeta o desempenho da solda (ASLANLAR, 2006).

2.4.3. Força ou pressão de soldagem

Segundo Wainer (1995), a força entre os eletrodos assegura o perfeito contato entre as peças (pré–pressão) e evita a formação de trincas, devido aos esforços provocados pela contração de solidificação da lentilha de solda durante o resfriamento (pós – pressão). O valor da força deve ser bem determinado, pois estando muito abaixo do especificado produzirá projeções de material do ponto de solda que, ao contrário do que pensam muitos soldadores, é prejudicial à solda, tornando – a de baixa qualidade, além de aumentar o valor das resistências de contato, podendo provocar a formação de circuitos derivados.

A resistência elétrica presente na equação 2.1 é diretamente influenciada pela pressão ou força de soldagem. A pressão é considerada a força resultante nos eletrodos nas peças, ou seja, é a pressão produzida por essa força que afeta a resistência de contato. As peças a serem soldadas devem ser presas firmemente no local da solda para facilitar a passagem da corrente. Para um determinado conjunto de parâmetros, incluindo circuito de soldagem, equipamento de soldagem, geometria do eletrodo e condição da superfície da peça de trabalho, a corrente aumentará para algum valor limite à medida que a força do eletrodo ou a pressão de soldagem é aumentada. O efeito no calor total gerado na peça, no entanto, pode ser o inverso. À medida que a pressão é aumentada, a resistência de contato e o calor gerado na interface diminuirão. Para aumentar o calor para o nível anterior, a amperagem ou o tempo de soldagem devem ser aumentados para compensar a resistência reduzida.

Aumentar a força de solda reduzirá a resistência e fará com que o processo seja mais dependente da resistência do material. Isso reduz a variação do processo em

detrimento da maior corrente, maior desgaste da máquina e outros fatores negativos associados a uma força maior, como defeitos na junta soldada.

2.5. Formação de Respingos (Expulsões) em Soldagem por Resistência

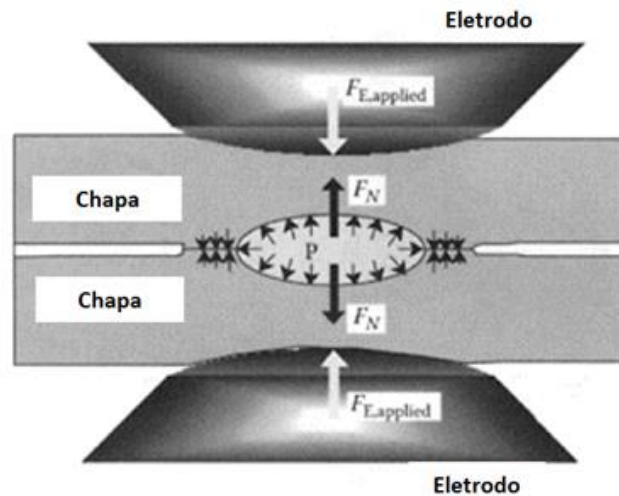
Segundo Zhang et al. (2006), um fenômeno comum na soldagem a ponto por resistência é a expulsão, isto é, a ejeção de metal fundido durante a soldagem. O risco de expulsão é especialmente elevado na soldagem por pontos de ligas de alumínio devido às características muito dinâmicas e instáveis do processo, que está relacionado à aplicação de uma alta corrente em um curto período de soldagem, e a intrínseca elétrica, térmica, metalúrgica e propriedades mecânicas das ligas de alumínio. As causas da expulsão são tanto técnicas quanto humanas. No entanto, o fenômeno ocorre também na soldagem de ligas ferrosas.

A expulsão é frequentemente usada como um indicador visual de um processo de soldagem de aço. Para alcançar um tamanho de solda tão grande quanto possível para atender a certos requisitos, uma prática predominante é usar uma grande corrente de soldagem, muitas vezes próxima ou além dos limites de expulsão. Os limites de expulsão também são muitas vezes ultrapassados deliberadamente na produção para reduzir a variação na qualidade da solda causada por fatores aleatórios. Devido à perda de metal durante a expulsão, no entanto, as descontinuidades, tais como vazios e porosidade que podem reduzir a força de solda, geralmente são introduzidas na pepita. A expulsão também tem uma influência negativa sobre os adesivos estruturais (ZHANG, 1999).

Ainda segundo Zhang et al. (2006), embora existam muitas razões complicadas para a formação de respingos, seu processo básico foi descrito pela interação entre as forças do núcleo fundido e sua contenção sólida circundante.

A Figura 2.13 mostra as principais forças que atuam durante a soldagem, evidenciando as forças do núcleo fundido, forças na zona interfacial e força na região de contato dos eletrodos.

Figura 2.13: Forças atuantes durante a soldagem por resistência



Fonte: ZHANG (1999)

Estão inseridas no diagrama mostrado na Figura 2.13, a força de compressão fornecida pelos eletrodos (F_E , aplicada), a força do núcleo fundido (F_N) sobre a sua contenção sólida, que é gerada pela pressão (P) no metal fundido e a força de compressão (F_x) agindo na região interfacial.

Existe uma ligação proporcionada pela difusão sólida na superfície de acabamento que pode fornecer alguma resistência à separação das chapas. Esta força é geralmente muito menor do que as outras e pode ser negligenciada na análise, já que este modelo considera apenas condições extremas de expulsão.

Com base nesse entendimento, neste modelo geral de expulsão, o critério de expulsão pode ser declarado como: expulsões ocorrem quando a força do núcleo fundido (F_N) sobre a sua contenção na forma sólida é igual ou superior à força efetiva aplicada pelo eletrodo (F_E), ou seja, $F_N \geq F_E$.

Segundo Zhang (1999), em geral, a expulsão causa características indesejáveis tanto na aparência quanto no desempenho de uma solda por pontos e está frequentemente associada:

- A indentação excessiva na superfície;
- Ao desgaste do eletrodo;
- A distorção ou separação entre chapas;
- A defeito de volume.

Na figura 2.14 pode ser observado uma cavidade formada no núcleo após a expulsão de material fundido do mesmo, ejetado pela região de interface entre as chapas, o que afeta a resistência mecânica da solda. Também é possível observar que o núcleo teve um crescimento muito grande, chegando muito próximo a região de indentação dos eletrodos.

Figura 2.14: Evidência de expulsão

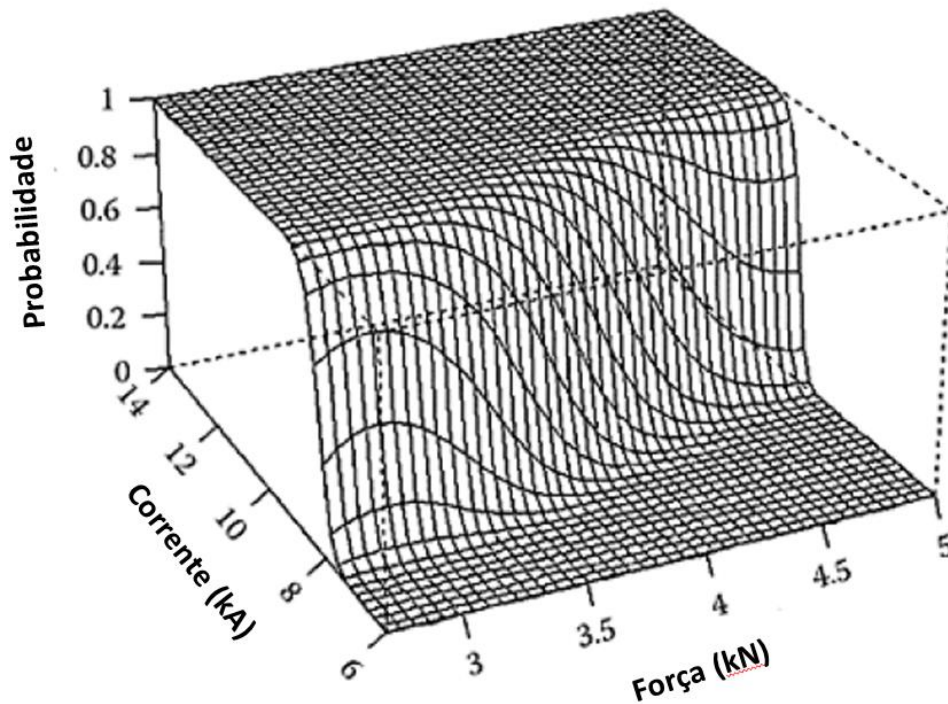


Fonte: ZHANG (1999)

A geração de respingo é também considerada um fenômeno probabilístico por alguns autores como Senkara et al. (2004) e Kaiser et al. (1982), onde mesmo com todas as condições de base atendidas, podem acontecer respingos. Usando um modelo estatístico, Zhang et al. (2000) tentaram explicar a dependência da probabilidade de expulsão com parametrizações fixadas na força do eletrodo, na corrente de soldagem e no tempo de soldagem. Como os modelos estatísticos descrevem as probabilidades de expulsão como dependentes de todos os três parâmetros de soldagem, somente é possível representar graficamente os limites de expulsão em um espaço tridimensional.

Na figura 2.15 é mostrado um modelo probabilístico tridimensional para o aparecimento de expulsões em uma liga de Alumínio proposto por Zhang onde foi fixado o tempo representando uma análise com probabilidade de 5% de expulsões.

Figura 2.15: Modelo probabilístico de expulsões para uma liga de Alumínio



Fonte: ZHANG (1999)

Shen et al. (2010) estudaram a influência da folga inicial entre chapas de aço dupla fase e aço carbono e concluíram que a folga inicial crítica do aço dupla fase é muito menor do que a do aço de baixo carbono. Tanto para o aço dupla fase como para o aço de baixo carbono, a diferença inicial crítica aumentaria com a espessura da chapa de aço.

Segundo Zhang et al. (2012), uma grande força do eletrodo pode ser útil para inibir a expulsão da solda, melhorando o estado de contato entre as chapas. Para aço DP600 de 0,8 mm com espaçamento de 1,6 mm, a força mínima do eletrodo sem expulsão é de aproximadamente 2,5 kN. Para aços DP600 com espessuras diferentes de 0,8 a 1,8 mm, forças mínimas de eletrodo foram determinadas para inibir a expulsão da solda com diferentes espaçamentos para melhorar a qualidade da soldagem por resistência.

Wan et al. (2014) investigaram a Influências da força do eletrodo, corrente de soldagem e tempo de soldagem na ocorrência de defeitos de soldagem. Análise metalográfica e testes de cisalhamento por tração foram implementados para detecção de qualidade de solda. Verificou-se que os defeitos de soldagem eram fáceis de ocorrer

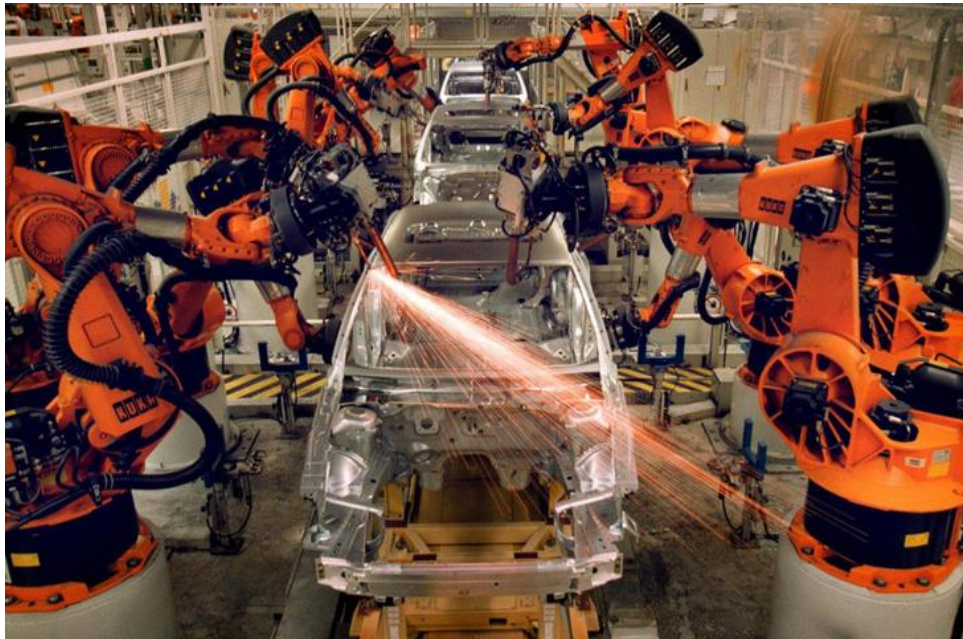
durante o processo de soldagem a ponto de aço DP600. Menor força do eletrodo, maior corrente de soldagem e maior tempo de soldagem contribuíram para a fácil ocorrência de defeitos de soldagem. A diminuição da dureza da zona afetada pelo calor (ZTA) causada pelo revenido da martensita foi observado sob fortes parâmetros de soldagem. O efeito da expulsão na qualidade da solda não foi tão significativo como sugerido por outras pesquisas.

2.5.1. Impactos gerados pelos respingos

A Figura 2.16 mostra a emissão de respingos de soldagem em um ambiente industrial. Essas expulsões impactam diretamente na segurança e provocam degradação e sujeira indesejada nos equipamentos e chão de fábrica. Os respingos são praticamente impossíveis de serem eliminados, pois sofrem influências de diversos ruídos e são extremamente complexos. No entanto é possível otimizar e controlar melhor os parâmetros e materiais envolvidos, a fim de obter um melhor desempenho do processo e reduzir o nível de emissão de respingos no ambiente industrial. Este controle pode resultar em um aumento na vida útil dos equipamentos, redução de custos com materiais consumíveis e melhorar a qualidade do produto e processo.

Hwang et al. (2011) sinalizaram que na indústria automotiva, para aumentar a eficiência de combustível reduzindo o peso da carroceria, está aumentando a aplicação de aços avançados de alta resistência (Advanced High Strength Steels – AHSS), reduzindo a espessura e peso das chapas. Com a aplicação da chapa AHSS nas carrocerias, surge um novo problema na soldabilidade e o estudo da soldagem por resistência, que ocupa quase parte do processo de montagem da carroceria na linha de fabricação de automóveis, tornou-se uma questão importante.

Figura 2.16: Expulsões em soldagem por resistência na indústria automotiva



Fonte: CAR TV (2014)

A expulsão acontece tanto na superfície quanto entre o eletrodo e a peça, como mostrado nas Figuras 2.17 e Figura 2.18, respectivamente. Este último pode afetar severamente a qualidade da superfície e a vida útil dos eletrodos, mas não a resistência da solda, se for limitada à superfície. Por outro lado, a expulsão interfacial é indesejável em termos de qualidade de soldagem porque envolve a perda de metal líquido do núcleo fundido durante a soldagem.

Figura 2.17: Respingo superficial e eletrodo comprometido por respingos



Fonte: O AUTOR (2018)

Figura 2.18: Respingo Interfacial



Fonte: BRANCO (2004)

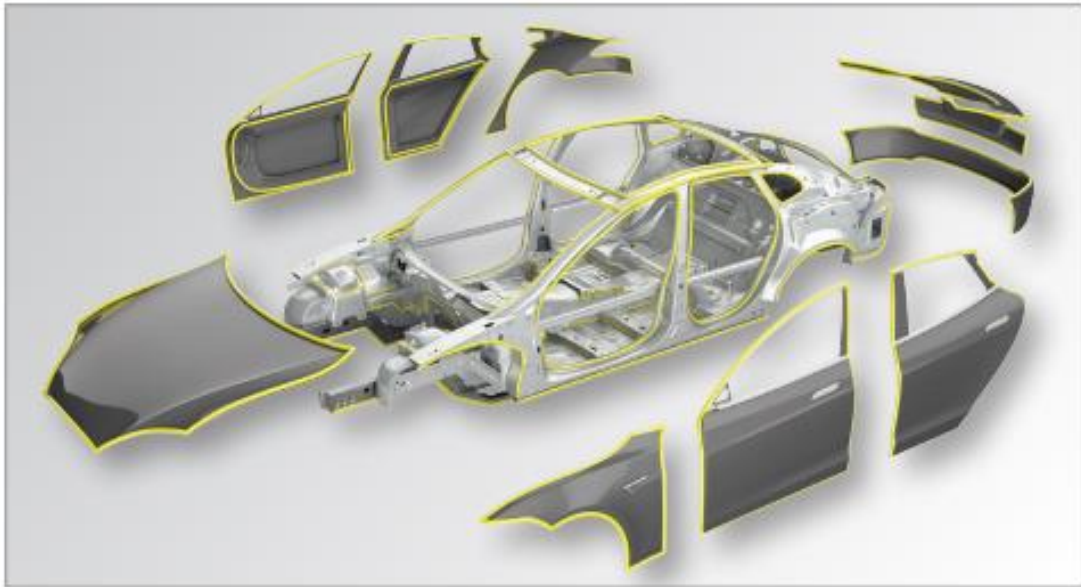
2.6. Adesivos Estruturais

Com a modernização dos designs dos automóveis que apresentam geometrias complexas, são requeridas a utilização de mais adesivos estruturais, que são utilizados em conjunto com a solda ponto. Na Figura 2.19 é possível verificar a grande quantidade de zonas de um automóvel onde são utilizados adesivos estruturais.

A presença de adesivo na junta torna a soldagem mais difícil e pode contribuir para variações significativas na qualidade da solda e degradação dos equipamentos devido ao grande volume de sujeira oriundo dos respingos contendo adesivos. Independentemente das condições de soldagem, nem todo o adesivo será deslocado entre as chapas, então a resistência de contato será maior do que com as chapas limpas.

Os adesivos podem ser classificados conforme suas bases químicas em: epóxidos; epóxidos híbridos; fenólicos; fenólicos híbridos; poliaromáticos; poliuretanos; cianoacrilatos; acrílicos modificados; poliésteres, entre outros menos comuns.

Figura 2.19: Utilização de adesivo estrutural em um automóvel



Fonte: DOW (2015)

Os adesivos de maior aplicação industrial são os de base química epoxídica, acrílica e uretânica devido as suas diversas características de desempenho e aplicação (HOEHNE,2013).

O processo consiste em um adesivo na forma de pasta ou filme que é colocado entre as peças de trabalho. Soldas por resistência são então feitas através da camada adesiva. O adesivo é deixado curar a temperatura ambiente ou por aquecimento em um forno, conforme exigido pelo fabricante do adesivo. O objetivo principal da soldagem por ponto, neste caso, é manter a junta unida durante a cura, uma vez que as soldas não contribuem muito para a resistência da junta quando existe o adesivo (AWS, 2011).

Hayat et al. (2010) mencionam que os adesivos estruturais devem ser evitados durante ou antes da soldagem a ponto, pois pode aumentar significativamente a resistência elétrica. Altos valores de resistência elétrica podem resultar em geração excessiva de calor na vizinhança da interface seguida por expulsão de metal subsequente, ou pode simplesmente impedir a passagem da corrente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Material

Os materiais utilizados foram chapas de aço zincado com espessura de 1,2 mm, que é um tipo de aço amplamente utilizado na indústria automobilística, conforme a Figura 3.1, onde vê-se a espessura total de 2,4mm na junta a ser soldada.

As chapas foram fixadas com o auxílio de um dispositivo de geometria, que contém pinos de referência e grampos que pressionam as chapas mantendo o mesmo posicionamento em amostras diferentes.

Figura 3.1: Preparação das chapas de 1,2mm para soldagem

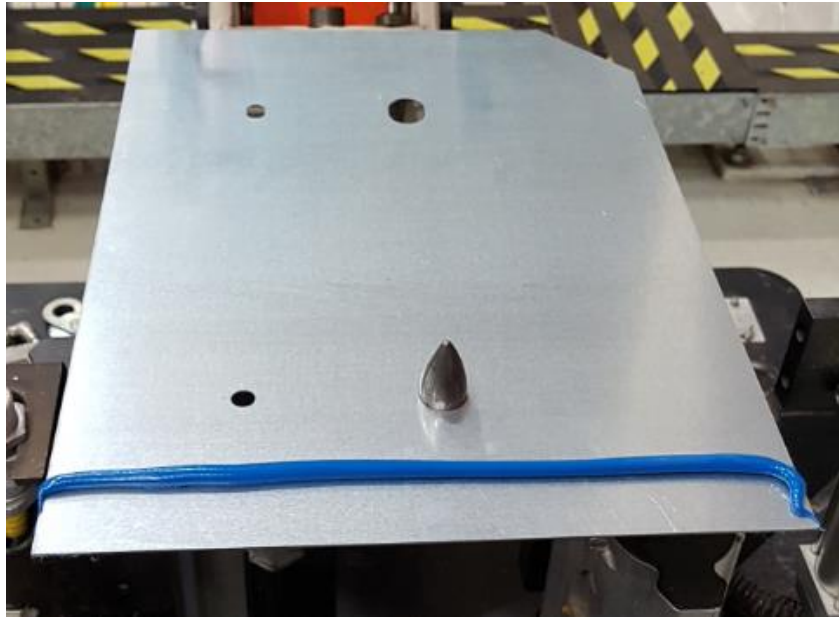


Fonte: O AUTOR (2018)

Foi utilizado adesivo estrutural Betamate. Os adesivos têm como função realizar a união de chapas com superfícies complexas e isolar a interface das chapas contra infiltração de água, tornando importante o estudo da influência da presença do adesivo na formação de respingos em soldas a ponto por resistência elétrica.

A Figura 3.2 apresenta uma chapa com um cordão de adesivo estrutural de 5mm de diâmetro, aplicado antes da sobreposição das chapas para a execução da solda.

Figura 3.2: Cordão de adesivo estrutural aplicado entre chapas



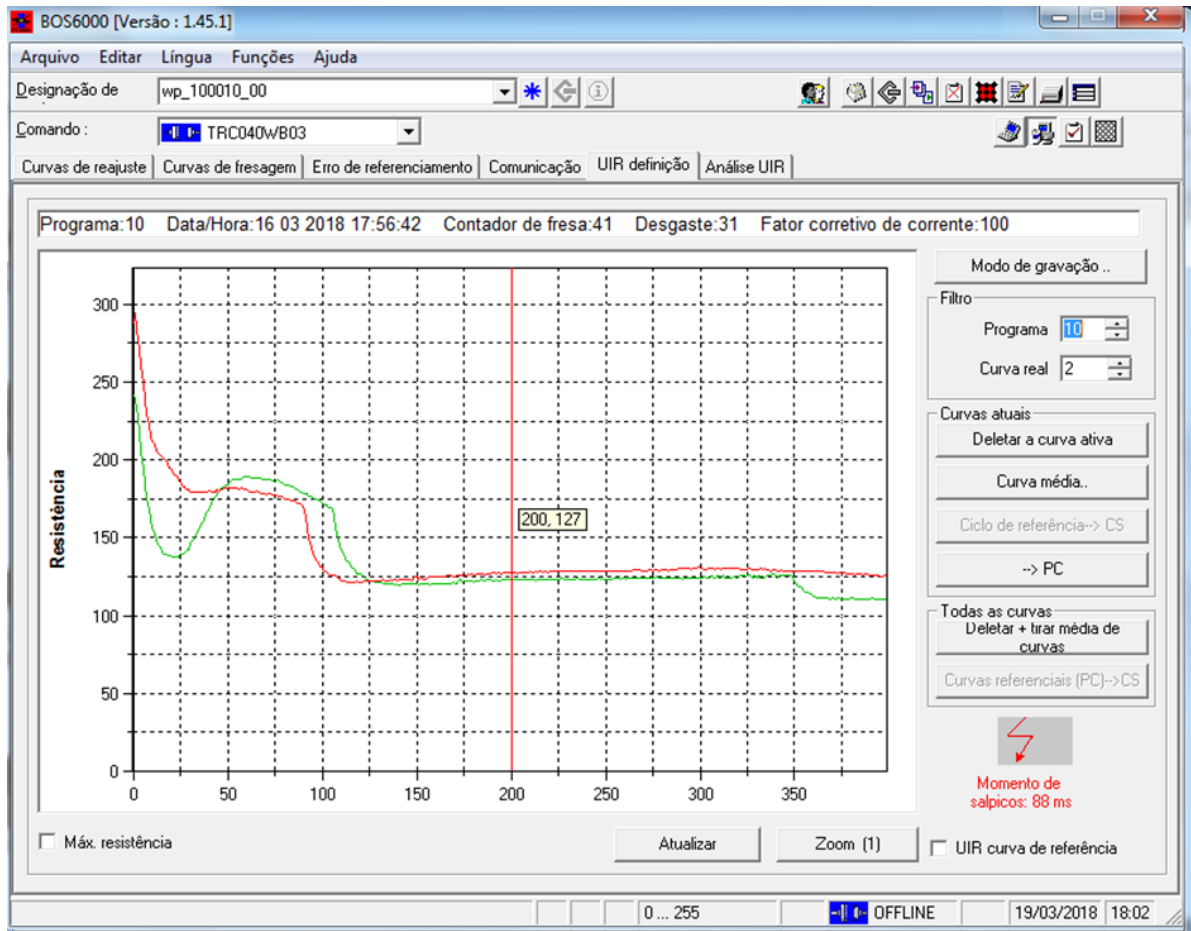
Fonte: O AUTOR (2018)

Observando a Figura 3.2 é possível visualizar o cordão de adesivo estrutural Betamate, que tem como base epóxi. Foi utilizado um cordão de 5mm entre as chapas, na região onde serão aplicados os pontos de solda. Esta situação existe em diversas partes de um automóvel, conforme pode ser observado na Figura 2.18. Nesta configuração os pontos de solda são utilizados para manter a geometria da região até que o adesivo passe pelo forno. Após o forno o adesivo é curado e confere uma resistência mecânica similar a de uma solda.

3.2. Equipamentos

O procedimento de soldagem das chapas foi desenvolvido utilizando-se uma pinça de soldagem robotizada da Comau Robotics. Para garantir a repetibilidade do experimento, a execução das soldas foi controlada por um sistema de soldagem Rexroth juntamente com o software BOSCH 6000, conforme pode ser observado na Figura 3.3.

Figura 3.3: Software Bosch 6000



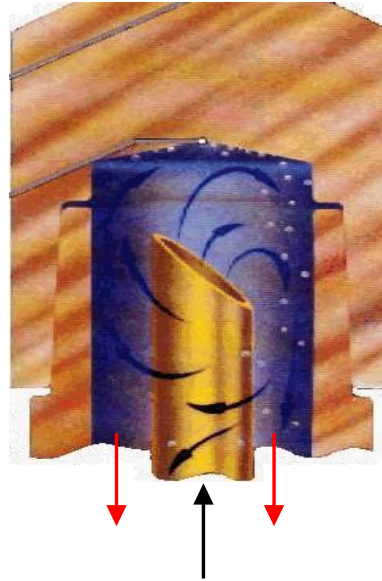
Fonte: O AUTOR (2018)

Foi utilizado um eletrodo de cobre com diâmetro de 6 mm no núcleo de contato. As condições de base de alinhamento e fresagem dos eletrodos foram realizadas antes de todos os procedimentos de soldagem para eliminar a influência destas variáveis nos experimentos.

A temperatura da água de refrigeração foi mantida em 24°C. O ponto de solda deve resfriar mantendo-se a força entre os eletrodos após a interrupção da corrente elétrica, denominado pós – pressão. A dissipação do calor é feita em grande parte pelo eletrodo, que é refrigerado através de um sistema de passagem de água sob pressão. A Figura 3.4 mostra um sistema de refrigeração de eletrodos utilizado no processo de soldagem por resistência elétrica.

Figura 3.4: Sistema de Refrigeração dos eletrodos

— Saída de Água
— Entrada de Água



Fonte: STTOCO (2010); Apud MEDAR (2004)

Os vazamentos de água nos eletrodos e tubulações devem ser corrigidos, pois provocam uma queda na pressão do sistema e a consequente perda do rendimento na refrigeração, provocando o desgaste prematuro dos eletrodos.

3.3. Variáveis de Soldagem

As variáveis de influência foram:

- a corrente de soldagem;
- a presença ou não de adesivo nas chapas.
- o tempo foi mantido constante em 400ms
- a força dos eletrodos foi mantida constante em 300dN

No experimento, a corrente de soldagem variou conforme está mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Níveis de corrente de soldagem utilizadas na execução do procedimento experimental.

Corrente (kA)	
Nível 1	5
Nível 2	6
Nível 3	7
Nível 4	8
Nível 5	9
Nível 6	10
Nível 7	10,5
Nível 8	11
Nível 9	12

Durante o experimento o nível de 12kA se mostrou extremamente agressivo e para garantir a segurança, foi interrompido. Assim foi introduzido um parâmetro de 10,5kA nas últimas amostras para avaliar um nível de corrente menor do que o nível que provocou o início do aparecimento dos respingos.

As variáveis de resposta foram:

- a presença ou não de expulsões (respingos);
- a aparência visual resultante nas soldas;
- a energia de soldagem resultante na junta.

Após a determinação da zona de transição de aparecimento de respingo conforme visto no gráfico da Figura 2.11, foram soldadas mais 20 amostras dentro de uma amplitude menor de correntes entre 10kA e 11kA, a fim de avaliar com maior precisão o momento da condição inicial de aparecimento dos respingos.

3.4. Procedimento Experimental

Para realização dos experimentos foram utilizadas 60 amostras de solda ponto em diferentes níveis de corrente em um tempo de soldagem fixo.

Como o tempo de soldagem é uma variável que afeta diretamente a produtividade na indústria e o material é uma imposição do projeto, o tempo de soldagem foi fixado em 400 ms, pois se trata de uma variável importante para o tempo do ciclo industrial.

Na Figura 3.5 é mostrado o experimento em execução. A fim de simular o processo industrial, os pontos foram realizados em uma mesma chapa em sequência, desta forma o efeito shunt, que é bastante comum no processo, não é uma variável anulada. Os pontos foram distanciados em 30 mm entre um ponto e outro.

Os pontos foram divididos em módulos de 10 pontos por chapa, dividindo-se em chapas com e sem a presença do adesivo estrutural. Cada nível de corrente teve amostras soldadas em duplicidade para ter uma maior representatividade do nível de corrente configurado para o ponto.

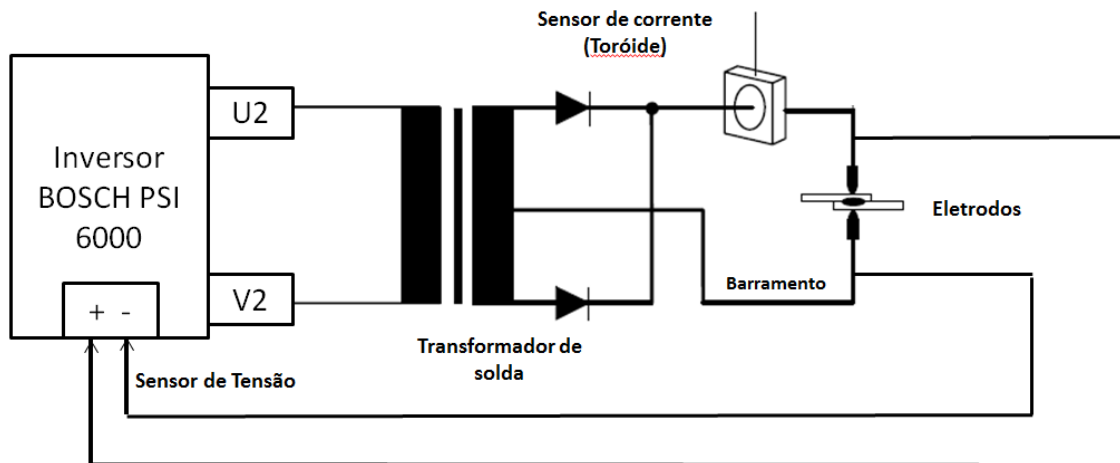
Figura 3.5: Procedimento Experimental



Fonte: O AUTOR (2018)

A presença do respingo foi ratificada visualmente nas amostras e também qualitativamente através dos sensores no sistema da Bosch, mostrado no diagrama da Figura 3.6, que interpreta uma queda brusca de resistência dinâmica como um respingo de solda.

Figura 3.6: Diagrama do equipamento de soldagem



Fonte: BOSCH (2012)

O sistema utiliza um sensor de corrente e também monitora as tensões nos terminais dos barramentos na pinça de solda conectados ao inversor de frequência. O inversor de frequência grava o valor da tensão a cada 1ms. Através da Lei de Ohm ($R=V/I$), o sistema detecta uma queda brusca de resistência dinâmica e assim gerando um gráfico de resistência dinâmica, como mostrado no gráfico da Figura 3.3. Este momento de queda da resistência é entendido como o momento exato da expulsão, interpretado pelo software quando existe uma queda maior ou igual a 4% na resistência em um intervalo de 1ms.

Através da equação 2.2 é possível calcular a energia de soldagem no sistema, que é compreendida pela integral da curva de resistência dinâmica, como a corrente é um input constante a equação 2.2 se transforma em: $Q=I^2 \int_0^t R dt$, então a energia é calculada através da variação da resistência no intervalo de tempo de soldagem.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise do Efeito da Corrente de Soldagem

A Figura 4.1 apresenta a vista superior de chapas soldadas sem adesivo (teste 1) e com adesivo (teste 2), para correntes variando de 5 kA a 9 kA, com incremento de 1kA a cada 2 pontos, ou seja, para cada nível de corrente foram soldados dois pontos, conforme mostrado na Tabela 4.1.

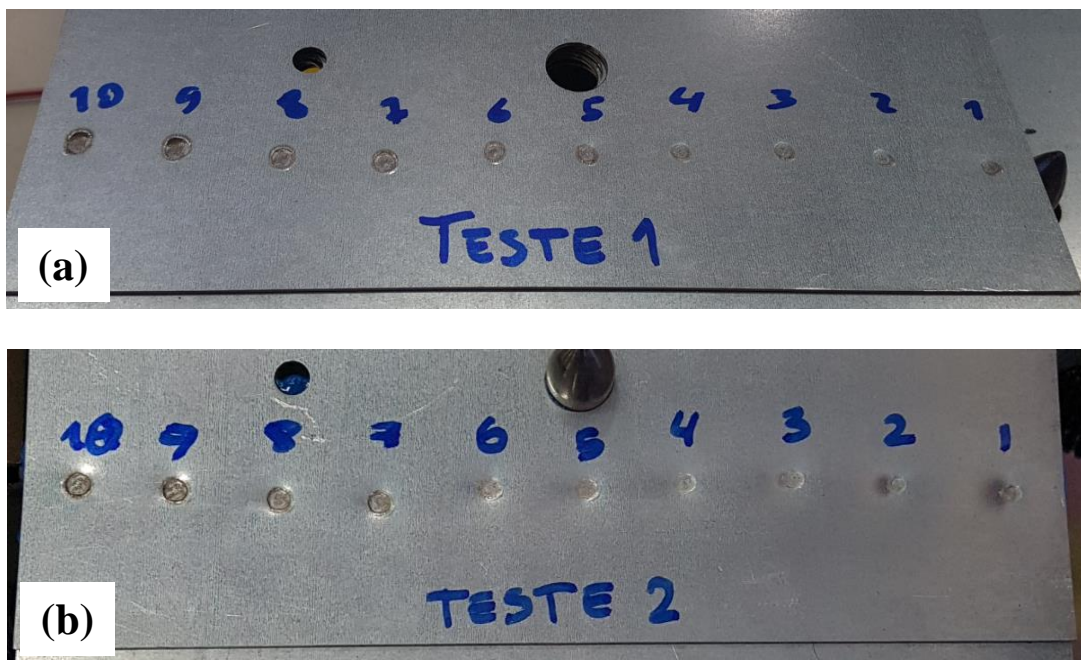
Tabela 4.1: Ordem de execução do procedimento experimental, para corrente de soldagem variando de 5 kA a 9 kA.

Corrente (kA)	
Ponto 1	5
Ponto 2	5
Ponto 3	6
Ponto 4	6
Ponto 5	7
Ponto 6	7
Ponto 7	8
Ponto 8	8
Ponto 9	9
Ponto 10	9

É possível verificar na Figura 4.1 que para as amostras iniciais até 7kA, devido à baixa corrente utilizada, que os núcleos não têm uma boa formação, pois a energia resultante é insuficiente para o núcleo fundir e crescer. Visualmente os pontos não têm uma diferença substancial, mas pode ser observado na Figura 4.1b que aparece uma marca de indentação maior devido à presença do adesivo entre chapas, que provoca um gap entre as chapas, pois o adesivo não é totalmente comprimido.

Para as soldas realizadas com os níveis de corrente de 5kA a 9kA, nenhum dos pontos apresentou expulsões, assim pode-se inferir que os pontos não estão próximos da sua resistência de cisalhamento máxima. A partir de 8kA foi observado um núcleo de solda com tamanho conforme.

Figura 4.1: Chapas soldadas com Corrente de 5kA a 9kA. (a) sem adesivo; (b) com adesivo



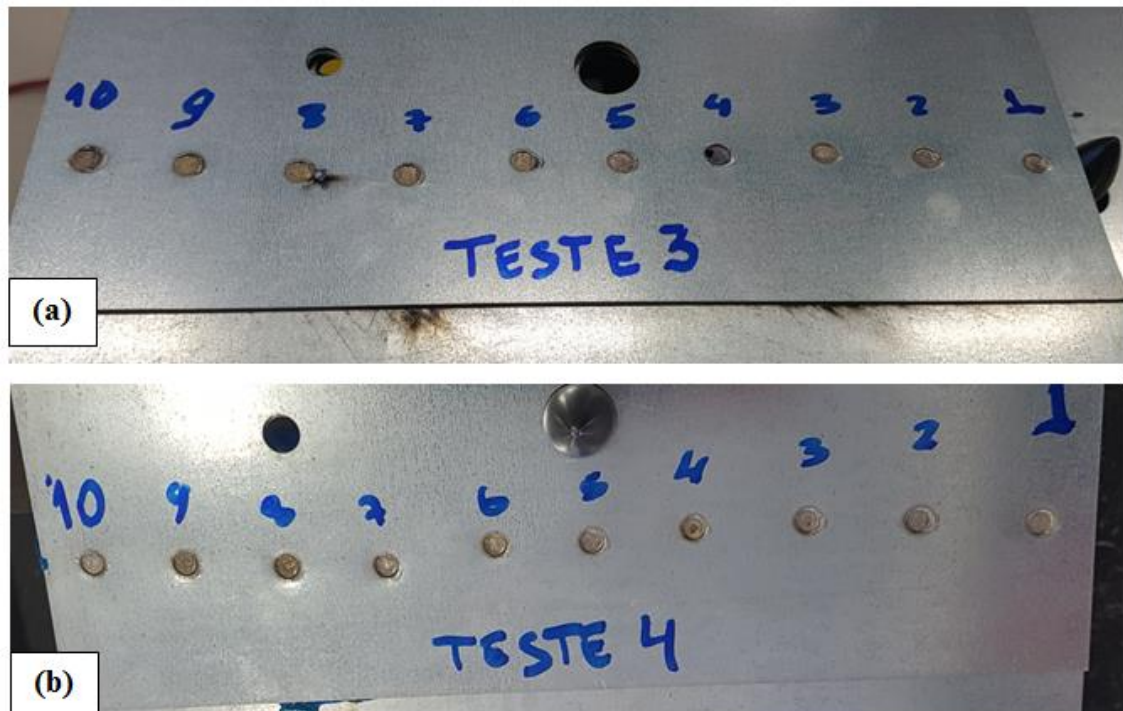
Fonte: O AUTOR (2018)

O segundo nível de corrente testado foi na faixa de 10 kA a 12 kA, conforme a ordem de execução apresentada na Tabela 4.2. A Figura 4.2 apresenta a vista superior de chapas soldadas sem adesivo (teste 3) e com adesivo (teste 4), para correntes variando de 10 kA a 12 kA.

Tabela 4.2: Ordem de execução do procedimento experimental, para corrente de soldagem variando de 10 kA a 12 kA.

Corrente (kA)	
Ponto 1	10
Ponto 2	10
Ponto 3	10
Ponto 4	10,5
Ponto 5	11
Ponto 6	11
Ponto 7	11
Ponto 8	11
Ponto 9	12
Ponto 10	12

Figura 4.2: Chapas soldadas com Corrente de 10 kA a 12 kA. (a) sem adesivo; (b) com adesivo



Fonte: O AUTOR (2018)

Durante a realização dos ensaios foi percebido que os pontos passaram a apresentar respingos em 100% dos casos a partir da corrente de soldagem de 11 kA. De acordo com Branco (2004), o ponto de soldagem com a corrente de 11 kA pode ser entendido como o ponto máximo de resistência dos pontos para ambas as amostras com e sem adesivo entre chapas. Com o aumento da corrente os pontos começaram a exibir uma melhor formação, até o início do aparecimento de defeitos como respingos superficiais, interfaciais e ponto furado, conforme pode ser observado na Figura 4.2.

As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam os dados gerais dos ensaios realizados com as respectivas correntes e energias para as chapas com e sem adesivos. Os dados foram extraídos do sistema controlador da pinça de solda.

Na Tabela 4.3 os mesmos resultados foram listados para as amostras de pontos onde foram inseridos o adesivo estrutural entre chapas, simulando uma situação de interferência comum na indústria automotiva.

Na Tabela 4.4 estão listados todos os resultados referentes as amostras soldadas sem a presença de adesivo entre chapas, onde estão listados as energias resultantes e a informação da presença de respingos em cada ponto soldado em determinado nível de corrente estabelecido.

Tabela 4.3: Amostras utilizando adesivo entre chapas de 5kA a 12kA.

<i>Ponto de soldagem</i>	<i>Corrente (kA)</i>	<i>Energia (J)</i>	<i>Respingo</i>
Ponto 1	5	1872,10	Não
Ponto 2	5	1804,06	Não
Ponto 3	6	2462,75	Não
Ponto 4	6	2490,46	Não
Ponto 5	7	3286,23	Não
Ponto 6	7	3324,00	Não
Ponto 7	8	4271,50	Não
Ponto 8	8	4300,22	Não
Ponto 9	9	5135,29	Não
Ponto 10	9	5165,5	Não
Ponto 11	10	5432,65	Não
Ponto 12	10	5466,15	Não
Ponto 13	10	5684,96	Não
Ponto 14	10,5	5953,30	Sim
Ponto 15	11	6074,71	Sim
Ponto 16	11	6082,96	Sim
Ponto 17	11	6222,01	Sim
Ponto 18	11	6115,21	Sim
Ponto 19	12	7033,75	Sim
Ponto 20	12	7039,60	Sim

A análise das Tabelas 4.3 e 4.4 mostra que para uma espessura de chapa de 1,2mm, a presença de respingos só é observada para os níveis de corrente superiores a 10,5 kA, considerando as duas configurações. Observa-se também que a presença do adesivo não tem influência substancial na ocorrência de respingos na solda em um incremento de 1 kA, aparecendo com corrente de 10,5 kA em relação aos 11kA encontrados na configuração sem adesivo.

Tabela 4.4: Amostras sem utilização de adesivo entre chapas de 5kA a 12kA.

<i>Ponto de soldagem</i>	<i>Corrente (kA)</i>	<i>Energia (J)</i>	<i>Respingo</i>
Ponto 1	5	2175,38	Não
Ponto 2	5	2164,64	Não
Ponto 3	6	2906,71	Não
Ponto 4	6	2847,69	Não
Ponto 5	7	3664,52	Não
Ponto 6	7	3591,85	Não
Ponto 7	8	4436,73	Não
Ponto 8	8	4446,53	Não
Ponto 9	9	5306,89	Não
Ponto 10	9	5318,82	Não
Ponto 11	10	5660,81	Não
Ponto 12	10	5731,23	Não
Ponto 13	10	5621,23	Não
Ponto 14	10,5	6268,96	Não
Ponto 15	11	6357,98	Sim
Ponto 16	11	6227,92	Sim
Ponto 17	11	6357,98	Sim
Ponto 18	11	6227,92	Sim
Ponto 19	12	7002,91	Sim
Ponto 20	12	7114,62	Sim

4.1.1 Correlação entre a Energia de Soldagem e a Corrente de Soldagem

Para uma melhor visualização os resultados apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4, são relacionados a energia de soldagem para cada nível de corrente e apresentados na forma de gráfico na Figura 4.3.

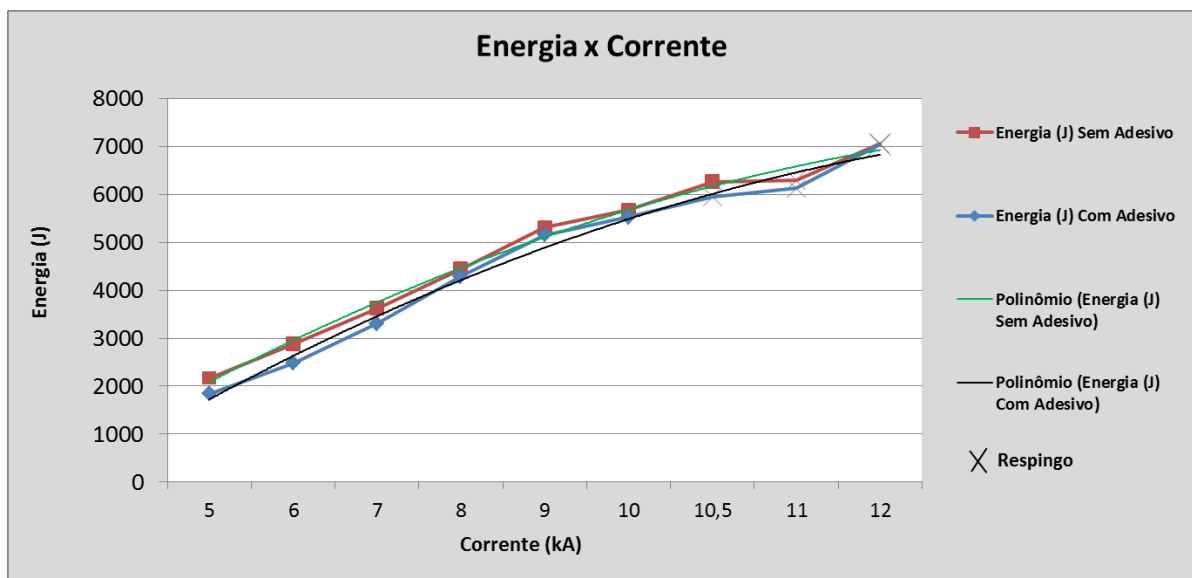
A análise da Figura 4.3 permite ratificar graficamente a função quadrática dos níveis de energia resultante que é calculada pelo sistema de maneira infinitesimal pela Equação 2.2 ($Q = \int_0^t I^2 R dt$). Também é possível verificar que os valores do nível de energia

resultante da curva das amostras com adesivo são menores que o das amostras sem adesivo e que a partir de 11 kA tem-se o aparecimento de respingo em todas as amostras.

Através da Figura 4.3 é possível correlacionar os resultados de início do aparecimento de respingos, com o que foi apresentado pela AWS (2007) na Figura 2.11, onde é entendido que a zona de transição no gráfico de energia acontece na mesma região onde os pontos de solda apresentam a sua melhor resistência mecânica.

Então através de análise da curva de energia, juntamente com os indicadores de respingos, pode-se atingir um resultado também de otimização da resistência mecânica nos pontos soldados por resistência.

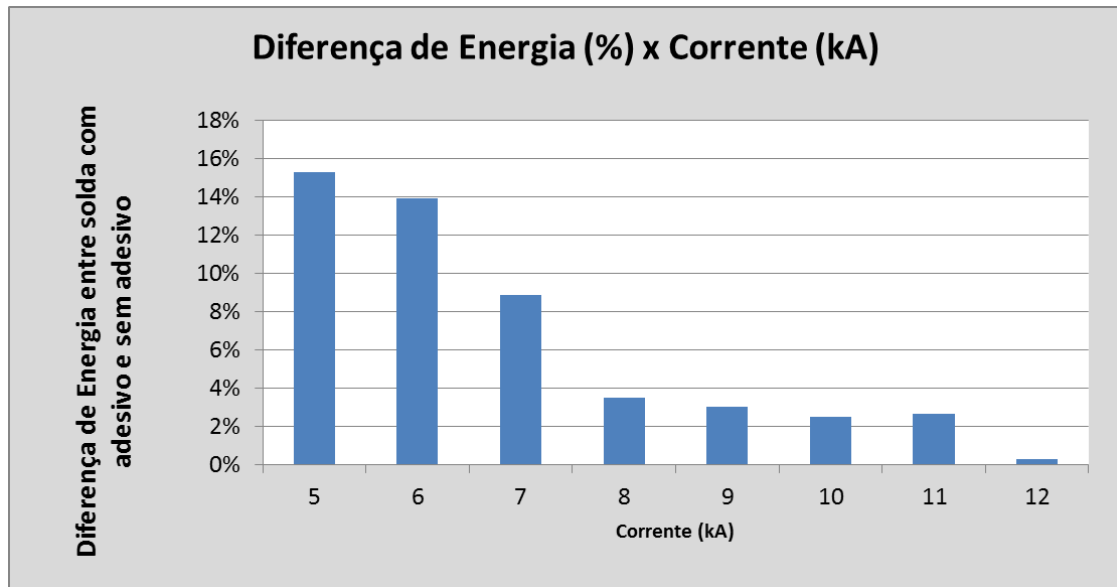
Figura 4.3: Energia x Corrente das amostras com e sem adesivo entre chapas



Fonte: O AUTOR (2018)

Para analisar as diferenças de energias observadas na Figura 4.3, foi confeccionado um gráfico de diferenças médias de energia, para cada nível de corrente entre as amostras com adesivo e sem adesivo, o resultado está mostrado na Figura 4.4.

Figura 4.4: Diferença de energia resultante entre solda com e sem adesivo entre chapas



Fonte: O AUTOR (2018)

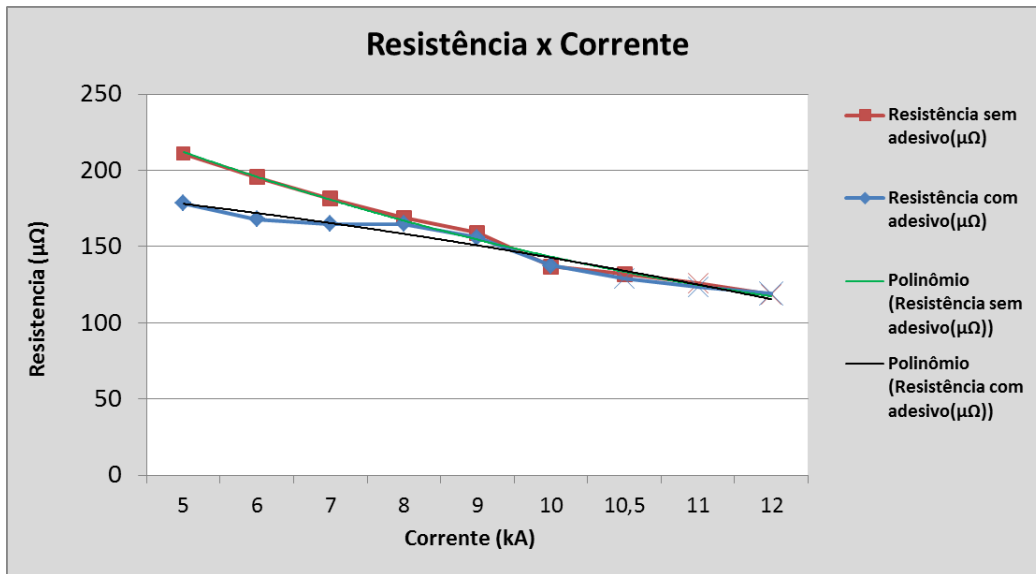
Da análise da Figura 4.4 observa-se que com o aumento da corrente a diferença de energia resultante nas 2 configurações de amostras diminui até que em 12 kA ela é próxima de zero.

Entende-se pela Figura 4.4 que o adesivo diminui a energia de soldagem da junta em até 15% para corrente de 5 kA chegando a se igualar a condição de solda sem adesivo em níveis elevados de corrente.

4.1.2 Correlação entre as resistências elétrica e dinâmica e a Corrente de Soldagem

A Figura 4.5 mostra a relação resistência elétrica versus corrente de soldagem para as amostras com e sem adesivo.

Figura 4.5: Gráfico Resistência x Corrente de 5kA a 12kA



Fonte: O AUTOR (2018)

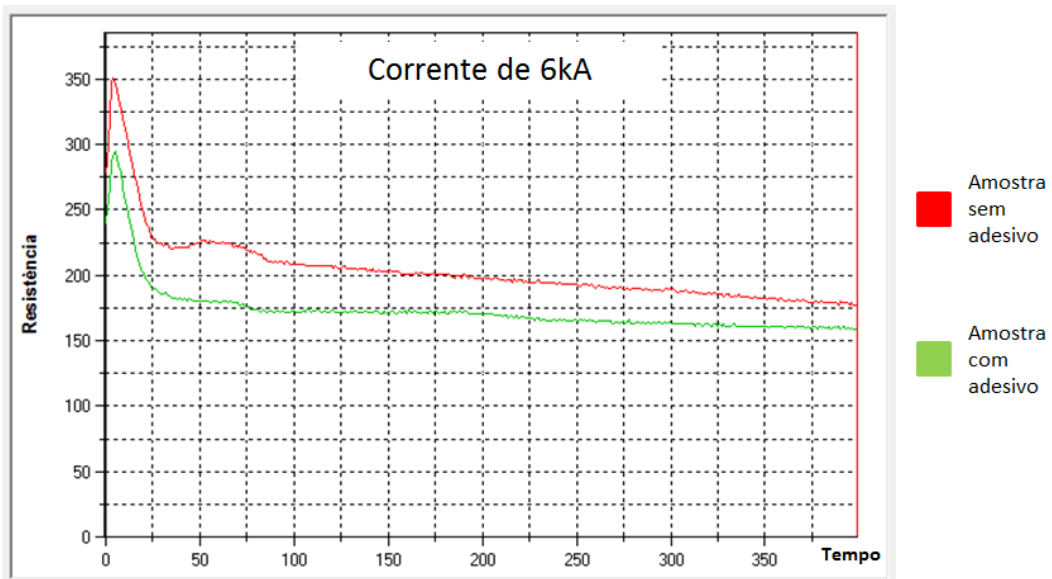
Observa-se na Figura 4.5 que a presença do adesivo contribuiu para diminuir a resistência elétrica medida pelo sistema para as amostras soldadas nos níveis de correntes propostos até 7kA. Como visto na Figura 4.4, a influência do adesivo diminuiu com o aumento da corrente para a energia e consequentemente para a resistência.

Contrariando o que foi advertido por Hayat et al. (2010), neste trabalho o adesivo betamate não aumentou a resistência elétrica da junta e sim diminuiu. Este fenômeno pode acontecer com alguns adesivos desenvolvidos para serem utilizados em conjunto com a solda, possuindo propriedades condutivas, a fim de não isolar eletricamente as chapas.

Também foi possível realizar a análise dos gráficos de resistência dinâmica gerados pelo sistema Bosch para as amostras soldadas com e sem adesivo. Os gráficos são apresentados nas Figuras 4.6 e 4.7, mostrando uma mudança de comportamento nas duas configurações propostas em baixa e alta corrente de soldagem.

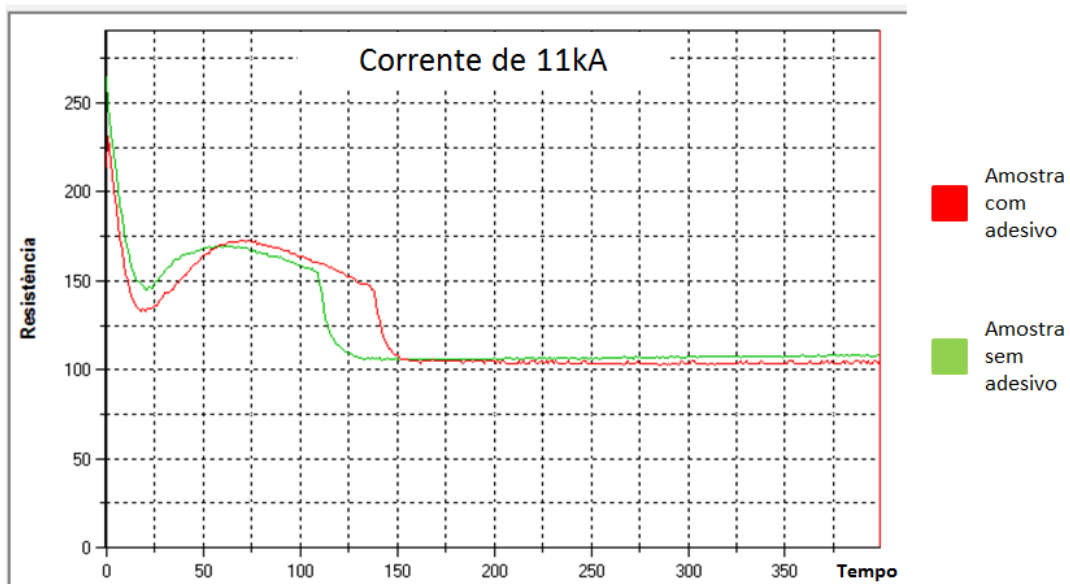
A análise da Figura 4.6 permite verificar que a resistência dinâmica é mais baixa para a amostra com adesivo, o que ocasiona uma menor resistência total e consequentemente menor geração de energia.

Figura 4.6: Gráfico de resistência dinâmica gerado para baixa corrente de 6 kA



Fonte: O AUTOR (2018)

Figura 4.7: Gráfico de resistência dinâmica gerado para alta corrente de 11 kA



Fonte: O AUTOR (2018)

Na Figura 4.7 pode ser observado o momento em que ocorre a queda brusca de resistência, que corresponde ao momento exato da formação do respingo. No nível de transição de 11 kA, para a amostra com adesivo o momento da expulsão ocorreu em 25ms após a amostra sem adesivo e a resistência final se equivalem, então as energias são quase equivalentes para este alto nível de corrente

4.2 Análise das Condições de Início das Expulsões

Para uma melhor análise do momento em que ocorrem as expulsões na configuração de chapa de aço zincado de 1,2mm, proposta neste trabalho. Foram soldadas mais vinte amostras considerando o intervalo de transição do aparecimento de respingos detectado pelas amostras iniciais, ou seja, correntes entre 10,2 kA e 11 kA.

Nesta etapa o incremento de corrente foi fixado em 0,2 kA, para determinar com uma melhor resolução uma proposta de parametrização para estas soldas. A Figura 4.8 mostra o resultado no intervalo de correntes entre 10,2 kA a 11 kA.

Figura 4.8: Chapas soldadas com Corrente de 10,2 kA a 11 kA. (a) sem adesivo; (b) com adesivo



Fonte: O AUTOR (2018)

Para este intervalo de corrente de 10,2 kA a 11kA, o resultado foi conclusivo. Em todas as amostras soldadas com adesivo entre as chapas, ocorreram expulsões. Neste caso a maioria dos respingos foi interfacial, que mostram que a presença do adesivo influencia na força da zona sólida interfacial durante a solda, provocando a expulsão.

No entanto, para as amostras sem a presença de adesivo, apenas para os níveis de corrente acima de 11 kA existiu o respingo, com exceção de um ponto com 10,4 kA que

pode ter sido provocado por algum ruído externo. De maneira estatística é esperado alguns pontos com comportamento diferente no processo de solda.

As Tabelas 4.5 e 4.6 apresentam os valores de corrente de soldagem utilizados, a energia resultante e a presença ou não de respingo para esta configuração de chapas.

Tabela 4.5 – Amostras sem utilização de adesivo entre chapas 10,2kA a 11kA.

<i>Pontos de soldagem</i>	<i>Corrente (kA)</i>	<i>Energia (J)</i>	<i>Respingo</i>
Ponto 1	10,2	6182,56	Não
Ponto 2	10,2	6206,30	Não
Ponto 3	10,4	6069,80	Sim
Ponto 4	10,4	6454,09	Não
Ponto 5	10,6	6650,07	Não
Ponto 6	10,6	6662,76	Não
Ponto 7	10,8	6852,46	Não
Ponto 8	10,8	6891,68	Não
Ponto 9	11,0	6724,34	Sim
Ponto 10	11,0	6727,36	Sim

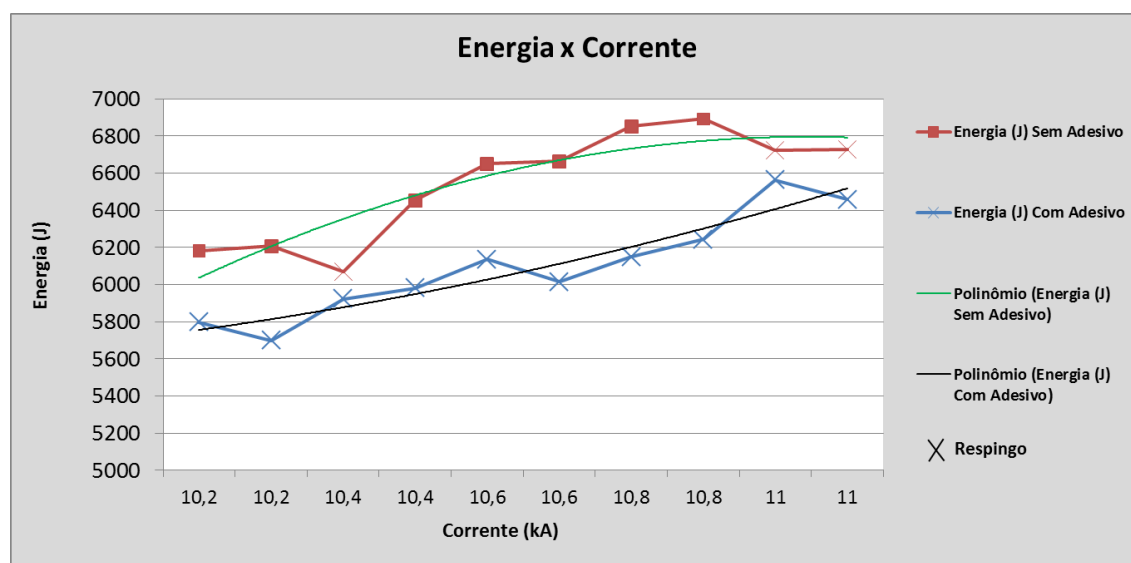
Tabela 4.6: Pontos utilizando adesivo entre chapas 10,2 kA a 11 kA.

<i>Pontos de soldagem</i>	<i>Corrente (kA)</i>	<i>Energia (J)</i>	<i>Respingo</i>
Ponto 1	10,2	5796,70	Sim
Ponto 2	10,2	5700,02	Sim
Ponto 3	10,4	5922,80	Sim
Ponto 4	10,4	5982,20	Sim
Ponto 5	10,6	6136,21	Sim
Ponto 6	10,6	6013,66	Sim
Ponto 7	10,8	6149,79	Sim
Ponto 8	10,8	6242,09	Sim
Ponto 9	11,0	6562,77	Sim
Ponto 10	11,0	6458,50	Sim

Os resultados de energia estão expostos no gráfico da Figura 4.9, bem como a presença ou não de respingos para os valores de corrente.

É possível avaliar que os valores de energia são menores para os pontos com adesivo, o que é esperado, devido a queda na resistência dinâmica quando há o aparecimento das expulsões, como expostos na Figura 4.7. O ponto onde ocorreu o respingo em 10,4 kA sem adesivo deixa claro que os níveis de energia ficam mais próximos devido a queda da resistência.

Figura 4.9: Energia x corrente de soldagem dos pontos com e sem adesivo entre chapas de 10,2 kA a 11 kA



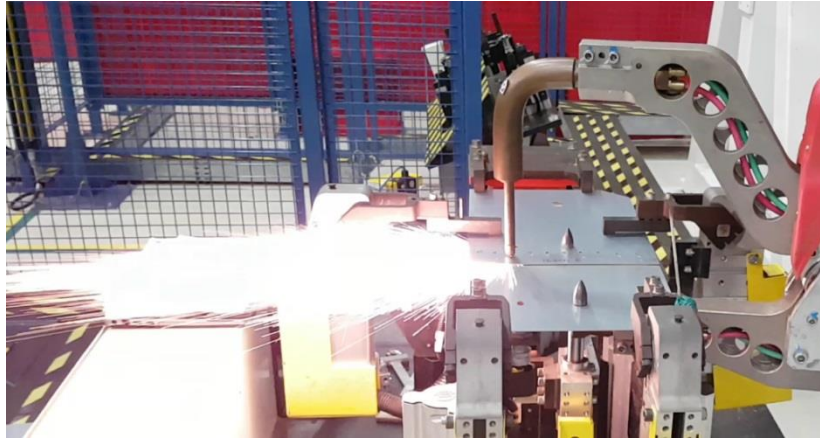
Fonte: O AUTOR (2018)

A análise dos resultados observados na Figura 4.9, com intervalo de variação de corrente entre 10,2 kA e 11 kA, permite verificar que o intervalo de aparecimento de respingos acontece de maneira antecipada com a utilização de adesivo estrutural na junta soldada.

Apesar de os respingos de solda ser um fenômeno influenciável por muitas variáveis externas e do processo, o aparecimento dos respingos na configuração de chapa utilizada foi antecipado em cerca de 1 kA em relação as juntas que não possuem adesivo. Apenas um respingo ocorreu em um dos pontos com 10,4 kA na ponto sem adesivo, que pode ocorrer devido a fatores externos, pois nos pontos até 10,8 kA não apresentaram respingos.

Na Figura 4.10 vê-se o fenômeno do respingo de solda acontecendo durante o experimento em uma imagem captada em uma câmera de alta velocidade de 960 frames por segundo.

Figura 4.10: Respingo de solda interfacial durante experimento



Fonte: O AUTOR (2018)

Além de comprometer a segurança, os respingos provocam danos qualitativos ao produto e ao processo. Através dos dados coletados neste trabalho é possível otimizar o processo de solda da configuração proposta de chapas de aço zincado de 1,2mm, ajustando os parâmetros a fim de reduzir a formação de respingos.

5. CONCLUSÕES

Os objetivos propostos, a metodologia experimental utilizada e os resultados obtidos e discutidos nesta pesquisa, permitem concluir que:

- A presença de expulsões (respingos) na solda de duas chapas de aço zincado de 1,2 mm só é observada em todos os pontos de solda para valores de corrente de soldagem a partir de 11 kA para juntas sem adesivos e acima de 10 kA para juntas com adesivos, considerando valores de força e tempo constantes.
- A presença do adesivo estrutural tem influência no nível de respingos formados nas juntas soldadas, antecipando o aparecimento das expulsões.
- A energia de soldagem é influenciada pela presença do adesivo para os valores de corrente utilizadas nesta pesquisa.
- A influência do adesivo estrutural sobre a energia de soldagem diminui com o aumento da corrente.
- O adesivo estrutural diminui a resistência elétrica da junta soldada em valores de corrente até 7kA, também diminui a resistência dinâmica. Acima de 7kA o adesivo não mostrou influência significativa na resistência.
- Para os níveis de correntes até 7kA os pontos apresentam crescimento insuficiente do núcleo ou ponto solto para os pontos sem adesivo e até 6kA nos pontos com adesivo.
- A partir de 11kA, defeitos como pontos furados e respingos superficiais foram detectados. Abaixo de 11kA os respingos ocorreram na região interfacial das chapas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASLANLAR, S., The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry. *Materials & Design*. Volume 27, Issue 2, Pages 125-131, 2006.

ASM Handbook, Welding Braserenig and Soldering, Volume 8, 1993.

AUTODATA, Produção mundial de veículos, 2018. Disponível em: http://www.agenciaautodata.com.br/noticias_interna.php?id=26351. Acesso em: 10 jun. 2018.

AWS – American Welding Society, *Welding Handbook*. Vol. 1 e Vol. 2 U.S.A., AWS, 2007.

AWS D8.9M:2012 “Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials”, An American National Standard. 3rd Edition, Miami, USA.

BOSCH. Tecnologia de solda, 2012. Disponível em: https://dc-br.resource.bosch.com/media/br/produtos/materiais_t_cnicos_2012_a_2015/folhetos/2012_3/fl-dcc-0337-05_12_comdsolda.pdf. Acesso em: 10 jun. 2018.

BRANCO, H. L. O. Avaliação de capas de eletrodos utilizadas na soldagem por resistência de chapas galvanizadas automotivas. 2004. 113 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2004.

CAR TV, BMW Spartanburg Welding Body Shop, 2014. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=-CRPcHH6uJ8>, Acesso em: 11 jun. 2018.

CHERTOV, A. M., MAEV, ROMAN GR., Determination of Resistance Spot Weld quality in Real Time Using Reflected Acoustic Waves. Comparison with Through-Transmission Mode.” 16° WCNDT, Montreal, 2004.

COMAU, Welding Guns, 2017. Disponível em: https://www.comau.com/Download/our-competences/robotics/Automation_Products/Comau_WeldingGuns_Brochure_EN.pdf
Acesso em: 01 jun. 2018.

DOW, Structural Bonding Adhesives, 2015. Disponível em: <https://www.dow.com/en-us/transportation/solutions/adhesives/structural>. Acesso em: 10 jun. 2018.

E. P. DEGARMO, J. T. BLACK, AND R. A. KOHSER, Materials and Processes in Manufacturing. New York: Macmillian Publishing Company, 1988.

FURLANETTO, VALDIR; STOCCO, DANILO; BATALHA, GILMAR F., SZABADOS, FERNANDO R., Inspection of projection welded automotive nuts through b-scan ultrasonic acoustic imaging. 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16-20 April 2012, Durban, South Africa.

HAO M., OSMAN K.A., BOOMER D.R., and NEWTON C.J., Developments in characterization of resistance spot welding of aluminum, *Welding Journal*, 75, 1-s, 1996.

HAYAT F., DEMIR B., ASLANLAR S., ACARER M., Adhesive weld bonding of interstitial free steel at spot welding for automotive application., 48, p. 137-143, 2010.

HONGYAN ZHANG & SENKARA JACEK, Resistance Welding - Fundamentals and Applications, 1st ed. New York, USA: Taylor & Francis Group, 2006.

HWANG, I. S.; KANG, M. J.; KIM, D. C., Expulsion reduction in resistance spot welding by controlling of welding current waveform. *Procedia Engineering* 10, 2775–2781, 2011.

INTERMACHINERY Comércio Ltda. I Seminário de Solda a Ponto, São Paulo: 2002.

KAISER J.G., DUNN G.J., AND EAGAR T.W., The effect of electrical resistance on

nugget formation during spot welding, *Welding Journal*, 61, 167-s, 1982.

KARAGOULIS, M. J., Control of materials processing variables in production resistance spot welding, in *Proc. AWS Sheet Metal Welding Conf. V*, Detroit (MI), Paper No. B5, 1992.

KIMCHI M., Spot weld properties when welding with expulsion—a comparative study, *Welding Journal* 63, 58-s, 1984.

MACHADO, I. G. Soldagem & Técnicas Conexas: Processos. Porto Alegre, RS: Editado pelo Autor, 1996; 447p.

MEDAR COMÉRCIO E SERVIÇOS. Apostila do Treinamento Básico do Processo de Soldagem por Resistência, 2004.

NEWTON C.J., BROWNE D.J., THORNTON M.C., BOOMER D.R., and Keay B.F., The fundamentals of resistance spot welding aluminum, in *Proc. AWS Sheet Metal Welding Conf. VI*, Detroit (MI), Paper No. E2, 1994.

PANDEY, A. K.; KHAN, M. I.; and MOEED, K. M., Optimization of Resistance Spot Welding Parameters Using Taguchi Method. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, Vol. 5, No.02, Fevereiro, 2013.

PENTEADO K. M., Otimização da Solda de Pontos por Resistência Elétrica na Liga de Alumínio 5052-H32 através do Projeto e Análise de Experimentos (DOE). 2011. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Itajubá, 2011.

SALEM, M., Control and Power Supply for Resistance Spot Welding (RSW), 2011.

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.

SDs Formation Soudure, 2018. Disponível em: <http://www.formation-soudure.com/formation-soudure-SPR-resistance-electrique-point-bossage-molette.html>, Acesso em: 11 jun. 2018.

SENKARA J., ZHANG H., AND HU S.J., Expulsion prediction in resistance spot welding, *Welding Journal*, 83, 123-s, 2004.

SHEN, J.; ZHANG, Y. S. and LAI, X. M., Influence of initial gap on weld expulsion in resistance spot welding of dual phase steel. *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 15, No 5, 2010.

STOCCO, DANILO. Caracterização de solda por resistência a ponto através de avaliações não destrutivas. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; São Paulo, 2010.

STOCCO, DANILO; MAEV, ROMAN GR.; CHERTOV, ANDRIY M.; BATALHA; GILMAR F., “Comparison between in - line ultrasonic monitoring of the spot weld quality and conventional NDT methods applied in a real production environment”, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China.

WAINER, EMILIO; BRANDI, SERGIO D.; MELLO, FABIO D. H., Soldagem: processos e metalurgia, São Paulo: Edgard Blucher, 1992. Sergio Duarte Brandi e Fabio Decourt Homem de Mello. Soldagem: processos e metalurgia, São Paulo: Edgard Blucher, 1992.

WAN, XIAODONG; WANG, YUANXUN AND FANG, CUIXIA, Welding Defects Occurrence and Their Effects on Weld Quality in Resistance Spot Welding of AHSS Steel. *ISIJ International*, Vol. 54, No. 8, pp. 1883–1889, 2014.

ZHANG, H., Expulsion and its influence on weld quality, *Welding Journal*, 78, 373-s, 1999.

ZHANG, YANSONG; SHEN, JIE AND LAI, XINMIN, Influence of Electrode Force on Weld Expulsion in Resistance Spot Welding of Dual Phase Steel with Initial Gap Using Simulation and Experimental Method. *ISIJ International*, Vol. 52, No. 3, pp. 493–498, 2012.

ZHANG, H., HU, J.; SENKARA, JACEK; CHENG, S. A statistical Analysis of Expulsion Limits in Resistance Spot Welding, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, J. Manuf. Sci. Eng. 122(3), 501-510 (1999).