LUIZ HENRIQUE SARAIVA TOLENTINO

**Desenvolvimento dos parâmetros do processo de solda a ponto por
resistência elétrica em juntas**

São Paulo

2019

LUIZ HENRIQUE SARAIVA TOLENTINO

**Desenvolvimento dos parâmetros do processo de solda a ponto por
resistência elétrica em juntas**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica de Projeto e Fabricação

Orientador:
Professor Dr. Gilmar Ferreira Batalha

São Paulo
2019

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Tolentino, Luiz Henrique Saraiva

Desenvolvimento dos parâmetros do processo de solda a ponto por resistência elétrica em juntas / L. H. S. Tolentino -- versão corr. -- São Paulo, 2019.

81 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.solda por ponto 2.soldagem por resistência 3.processos de fabricação
4.resistência dos materiais 5.manufatura I.Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus e aos meus pais, Georgina e Adalberto, que me incentivaram e me ajudaram no limite das possibilidades.

Gostaria de agradecer, especialmente, à minha companheira Edilene e ao meu filho Yan. Ela me advertiu, apoiou a conclusão das tarefas, quando não estava focado no assunto. Foi paciente e testemunha ocular do caminho árduo, porém compensador. À minha sogra Ileuza, que deu suporte em diversas atividades para ajudar no ambiente familiar, quando precisei estudar.

Agradeço ao Professor Gilmar Batalha, por compartilhar um pouco de sua experiência, conhecimento e sabedoria.

Agradeço ao Valdir Furlanetto, que me abriu a mente para a possibilidade de me tornar um aluno pós-graduando. Agradeço ao Marcio Batista pelos artigos, livros e indicar alguns possíveis caminhos para fazer o trabalho.

Agradeço também à professora Izabel Machado e ao técnico de laboratório Rafael, que permitiram que fizesse medidas de microdureza e micrografias no laboratório.

Agradeço aos meus responsáveis diretos nas empresas em que trabalhei e me liberaram para aulas, entregar trabalhos e demais compromissos.

RESUMO

Tendo em vista a intensa competitividade entre empresas no cenário global atual, entre essas as montadoras de carros. O trabalho se fundamenta em estudar uma variação do processo de soldagem por resistência elétrica, visando melhoria contínua dos processos produtivos. A melhoria de processos exige estudos de viabilidade econômica, o refino e o aperfeiçoamento tecnológico do novo processo. No presente estudo foi desenvolvida uma aplicação industrial, utilizando uma configuração com densidade de corrente assimétrica, visando unir uma junta grafada de três camadas de forma a permitir a deformação ocasionada pelo eletrodo (indentação) na parte interna da amostra. A deformação unilateral teve por objetivo preservar superfície externa de um capô automotivo, cuja qualidade de acabamento é um fator essencial para a venda do produto. Portanto, a configuração de soldagem foi experimentada, variando-se os parâmetros de soldagem, de força, de tempo, de corrente elétrica e sentido da corrente elétrica. Foram obtidas assim 35 amostras soldadas, que foram divididas e ensaiadas para avaliação quanto ao visual da superfície da amostra, força de cisalhamento, diâmetro após o rompimento, indentação, verificar aspectos macrográficos como porosidade e o formato da zona fundida. A superfície avaliada apresentou marcas térmicas para a configuração de tempo de 90 milissegundos, em que se visualizam diâmetros após o ensaio de cisalhamento e indentação maiores, também se verificou a presença de poros na zona fundida. A variação da força entre e corrente elétrica não foi significativa, ambos não marcaram as amostras. O deslocamento da massa fundida na direção do eletrodo carregado positivamente foi constatado com a inversão da polaridade de corrente.

Palavras-chave: Soldagem a Ponto, grafagem, força, tempo, corrente, aço baixo carbono.

ABSTRACT

Considering the intense competitiveness between companies in the current global scenario, among them the car manufacturers. The work is based on the study of a variation of the welding process by electrical resistance, aiming at the continuous improvement of the productive processes. The improvement of processes requires studies of economic feasibility, the refining and technological improvement of the new process. In the present study an industrial application was developed using a configuration with asymmetric current density to join a three-layer hemmed joint. The unilateral deformation aimed to preserve the external surface of an automotive hood, whose quality of the finish is an essential factor for the sale of the product. Therefore the welding configuration was tested by varying the parameters of welding, force, time, electric current and electrical current direction. Thus 35 welded samples were obtained, which were divided and assayed for evaluation of the surface of the sample, shearing force, diameter after rupture, indentation, and verifying macroscopic aspects such as porosity, such as the shape of the molten zone. The evaluated surface showed thermal marks for the time configuration of 90 milliseconds, where diameters were visualized after the test of shear and indentation, also the presence of pores in the molten zone was verified. The variation of the force between and electric current were not significant, both did not mark the samples. The displacement of the molten mass in the direction of the positively charged electrode was verified by reversing the current polarity.

Keywords: Spot Welding, hemming, force, time, current, low carbon steel.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química para aços de baixo carbono DIN EN 10346-DX54D+Z100	49
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço DIN EN 10346-DX54D+Z100	49
Tabela 3 - Massa de zinco por superfície	49
Tabela 4 - Tabela de parâmetros referência	51
Tabela 5 - Tabela de parâmetros de soldagem	54
Tabela 6 - Parâmetros para embutimento a quente	56
Tabela 7 - Conjunto de parâmetros, macrografia (a, c, e, g, i) e respectiva superfície do painel externo para a amostra soldada (b, d, f, h, j)	61
Tabela 8 - Resumo dos resultados	64
Tabela 9 - Resultados provenientes do ensaio de cisalhamento: tensão de ruptura e diâmetro após do material remanescente no ponto de solda	66
Tabela 10 - Resultados do ensaio de tração, e diâmetro do ponto após tração e indentação	68
Tabela 11 - Resultados do ensaio de tração, e diâmetro do ponto após tração e indentação	69
Tabela 12 - Resultados do ensaio de tração, e diâmetro do ponto após tração e indentação	71
Tabela 13 - Resultado ensaio de tração e diâmetro do ponto após tração e indentação	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico de publicações para o tema RSW, resistance spot welding	15
Figura 2 – Curva de custos para as novas tecnologias de junção de carrocerias automotivas, adaptado	16
Figura 3 – (a) Painel grafado com uma aba dobrada, aplicou-se cola estrutural interna e (b) adicionado ponto de solda por resistência elétrica.....	17
Figura 4 – Tipos de junção mecânica.....	19
Figura 5 - Vista explodida de um capô; a parte interna com reforços é montada com a parte externa	20
Figura 6 - O processo de grafagem; painel externo (laranja) conformado em torno do painel interno (preto) e etapa anterior (em amarelo) ao processo, peça somente flangeada.....	21
Figura 7 – Processo de estampagem do capô. À direita, corte do painel externo.....	21
Figura 8 – Processo de flangeamento, à esquerda, o resultado do flangeamento....	21
Figura 9 – Etapas de pré-grafagem e grafagem final	22
Figura 10 – Prensa com dispositivo de grafagem	22
Figura 11 - Ilustração da Pré-grafagem e Grafagem final realizada com o processo Die Hemming.....	22
Figura 12 – Mesa de movimento vertical (esquerda) e horizontal (direita), o produto é levantado entre as operações, nas quais a pré-grafagem é feita na parte inferior	23
Figura 13 - Tipos de ferramentas que são acopladas aos robôs para efetuar a grafagem	23
Figura 14 – Rolos deformam as extremidades, à direita, processo ocorre em três estágios.....	24
Figura 15 – Espaçamento entre a porta frontal e traseira (à direita) e espaçamento da porta traseira e chaparia (à esquerda)	24
Figura 16 – Ilustração do flush do capô frontal.....	24
Figura 17 - Áreas superficiais, ordem de importância: externa (à direita), raio externo e parte interna (à esquerda)	25
Figura 18 – Ilustração de alguns defeitos, como: ressalto (à direita) e empenamento (à esquerda).....	25
Figura 19 – Ilustração das interfaces resistivas do processo	27

Figura 20 – Influência da resistência de contato inicial e vida do eletrodo com revestimento de camada orgânica	28
Figura 21 – Representação esquemática dos parâmetros elétricos dinâmicos durante a soldagem a ponto	28
Figura 22 – Principais etapas do comportamento da resistência dinâmica no processo de formação do ponto de solda	30
Figura 23 – Sequência de soldagem	31
Figura 24 - Caracterização geométrica do ponto de solda para duas chapas	32
Figura 25 – (a) Macroestrutura típica de amostra solda a ponto contendo aço, que contém baixo teor de carbono (b) material base, (c) grãos colunares na zona fundida (ZF) e (d) microestrutura da zona fundida	33
Figura 26 – Aços para aplicação automotiva	34
Figura 27 - Camada de revestimento galvanizado a quente, microestrutura e dureza	36
Figura 28 – Os componentes do sistema de soldagem, além do robô: (01) DressPack, (02) controlador, (03) software, (04) pinça de solda, (05) unidade de água e ar e (06) dispositivo de dressar eletrodos	37
Figura 29 – Perfil de forças na soldagem a ponto de um sistema servo acionado....	40
Figura 30 – Efeito do tamanho do ponto de solda e a corrente com relação ao modo de falha. FI, falha interfacial e FD, falha por destacamento.	41
Figura 31 – Efeito da corrente: (a) Força e (b) Energia de falha.	42
Figura 32 – Modos de falha: (a) Interfacial e (b) Destacamento	43
Figura 33 - Força versus deformação em condições de modos de falha interfacial e destacamento	44
Figura 34 – Análise das tensões no ensaio de cisalhamento, (b) falha modo interfacial e (c) falha modo de destacamento	45
Figura 35 - Ensaio de cisalhamento	45
Figura 36 – Teste de solicitação cruzada, <i>cross tension test</i>	45
Figura 37 - Mecanismos de falha: (a) Teste de cisalhamento e (b) Teste de tensão cruzada	46
Figura 38 – Ilustração dos procedimentos de materiais e métodos	48
Figura 39 – Capô automotivo, ilustrada a área grafada, que se estende ao redor do produto	49
Figura 40 - Ilustração do corte preliminar realizado no capô e foram extraídas as amostras.....	50

Figura 41 - Seção da união dos painéis interno e externo	51
Figura 42 – Recursos utilizados na soldagem, pinça servo gun, tipo C e eletrodos..	51
Figura 43 – Dinamômetro da marca Adis, utilizado para calibrar a força entre os eletrodos.....	52
Figura 44 – Posicionamento dos eletrodos na amostra durante a soldagem	52
Figura 45 – Teste de arrancamento para amostra soldada a ponto	53
Figura 46 – Método de medição do diâmetro após o teste de arrancamento	53
Figura 47 - Representação do corte das juntas soldadas para realizar o ensaio de cisalhamento	54
Figura 48 – Dimensões finais das amostras após o corte final	55
Figura 49 – Procedimento de metalografia	55
Figura 50 – Amostra com linha imaginária que representa o corte efetuado nas amostras soldadas para a análise metalográfica	56
Figura 51 – Amostra obtida após o embutimento.....	57
Figura 52 - Lixadora (esquerda), ilustração da operação de lixamento.....	58
Figura 53 – Aspecto das superfícies não lixadas e lixadas	59
Figura 54 – Características medidas no ensaio dimensional	59
Figura 55 - Ensaio de cisalhamento executado nas juntas soldadas	60
Figura 56 – Medição do diâmetro após o ensaio de cisalhamento.....	60
Figura 57 - Macrografias: (a) parâmetro 1 e (b) parâmetro 3, com indicação de grãos colunares e porosidade	63
Figura 58 – (a) Micrografia com medidas da zona fundida e (b) indicação da zona fundida na interface das chapas.....	65
Figura 59 - Amostras após o ensaio de cisalhamento: (a) falha por destacamento e (b) falha interfacial.....	65
Figura 60 – Força de cisalhamento versus diâmetro após ensaio: (a) falha por destacamento e (b) falha interfacial	67
Figura 61 – Força de cisalhamento versus a quantidade de amostras ensaiadas	68
Figura 62 - Micrografias de (a) amostra do parâmetro 1 e (b) amostra do parâmetro 2, visualizam-se GC (indica grãos colunares) e visualiza-se zona recristalizada	69
Figura 63 – Força de cisalhamento versus o diâmetro remanescente após o ensaio	69
Figura 64 - Diâmetro remanescente após o ensaio versus a indentação.....	70

Figura 65 – Micrografias de (a) amostra do parâmetro 1 e (b) amostra do parâmetro 3, visualizam-se GC (indica grãos colunares) e visualiza-se zona recristalizada	70
Figura 66 – Amostra produzida com o parâmetro 3 (tempo aumentado) contendo poro na zona fundida.....	71
Figura 67 - Comparação da força de cisalhamento com relação aos parâmetros 1 e 472	
Figura 68 - Micrografias de (a) amostra do parâmetro 1 e (b) amostra do parâmetro 4, visualizam-se GC (indica grãos colunares) e visualiza-se zona recristalizada	72
Figura 69 – Indentação versus Diâmetro remanescente após o ensaio.....	73
Figura 70 – Força de cisalhamento versus o diâmetro remanescente medido após o ensaio.....	73
Figura 71 – Micrografias indicando a posição da zona fundida: (a.1) parâmetro 1 e (b.1) parâmetro 5 e seus respectivos aspectos visuais após o ensaio cisalhamento, (a.2) e (b.2).....	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área de contato dos eletrodos
Al-Mg	Alumínio-Magnésio
C	Carbono
CC	Corrente contínua
Ceq	Carbono Equivalente
C _p	Porcentagem da área metálica condutora em contato
Cr	Cromo
Cu	Cobre
<i>d</i>	<i>Diâmetro do ponto (mm)</i>
daN	Decanewton
ddp	Diferença de potencial
d _L	diâmetro mínimo da seção do ponto
d _p	diâmetro mínimo do ponto
<i>e</i>	<i>Espessura da chapa (mm)</i>
Fe	Ferro
<i>G</i>	<i>Condutibilidade elétrica das peças</i>
HB	Hardness Brinell
HV20	Hardness Vickers com carga de 20 kgf
Hz	Hertz
<i>I</i>	<i>Corrente elétrica</i>
IACS	International Annealed Copper Standard
<i>k</i>	<i>Condutividade térmica</i>
kA	Kiloampere
<i>k_i</i>	<i>Constantes para cada material</i>
kN	Kilonewton
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
ms	Milisegundo
<i>n</i>	<i>Número de pontos por unidade de área</i>
Ni	Níquel
P	Fósforo
Q	Calor gerado

<i>R</i>	<i>Resistência de contato</i>
RWMA	Resistance Welding Manufacturing Alliance
S	Enxofre
<i>t</i>	<i>Tempo</i>
<i>t_E</i>	<i>Profundidade de indentação</i>
Ti	Titânio
<i>V</i>	<i>Diferença de potencial</i>
V	Vanádio
<i>Y</i>	<i>Limite de escoamento</i>
Zr	Zircônio
ZAC	Zona afetada pelo calor

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Resistividade do material à temperatura a 0 °C
ρ_o	Resistividade do material à temperatura ambiente
α	Constante do material (coeficiente de temperatura °C ⁻¹)
θ	Temperatura do trabalho
θ_o	Temperatura ambiente
R	Resistência elétrica
V	Tensão aplicada
I, i	Corrente elétrica
A	Área da secção transversal
l	Comprimento
R_o	Resistência elétrica na temperatura ambiente
R	Resistência de contato ($\mu\Omega$)
n	Número de pontos por unidade de área
Y	Limite de escoamento
T	Temperatura (°C)
k	Condutividade térmica
d	Diâmetro do ponto
$G_1, G_2, \dots$	Condutibilidade elétrica das peças
$A_1, A_2, \dots$	Área de contato dos eletrodos
$e_1, e_2, \dots$	Espessura das peças
Q	Calor gerado
t	Tempo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	COLOCAÇÃO DO PROBLEMA.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	17
1.2.1	Objetivos gerais.....	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
1.2.3	Estrutura do trabalho	18
2	GRAFAGEM.....	19
2.1	TÉCNICAS DE JUNÇÃO	19
2.2	UNIÃO DE PARTES MÓVEIS	20
2.2.1	Processo de Grafagem ou Hemming.....	20
2.2.2	Etapas do Processo	20
2.2.3	Processos de Grafagem.....	22
2.2.4	Grafagem de Rolo Robotizado	23
2.2.5	Qualidade na Grafagem	24
3	PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA	26
3.1	CONCEITO.....	26
3.1.1	Resistência estática	27
3.1.2	Resistência dinâmica	28
3.2	CICLO DE SOLDAGEM.....	30
3.3	CARACTERÍSTICAS DO PONTO DE SOLDA	32
3.3.1	Características dimensionais	32
3.3.2	Características metalúrgicas do ponto de solda produzido com aço baixo carbono	32
3.4	CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS E REVESTIMENTOS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA.....	34
3.4.1	Características dos materiais.....	34
3.4.2	Revestimentos aplicados.....	34
3.5	MEIOS DE PRODUÇÃO E INSUMOS.....	36
3.5.1	Roupa de proteção segura e flexível para o robô.....	37
3.5.2	Cabine de soldagem.....	37
3.5.3	Software de soldagem por resistência elétrica.....	38
3.5.4	Pinça de solda por resistência elétrica.....	38
3.5.5	Unidade de água e ar.....	38
3.5.6	Dispositivo de dressar eletrodos	38
3.6	PARÂMETROS DE SOLDAGEM.....	39
3.6.1	Efeito do tempo de soldagem.....	39
3.6.2	Efeito da Força Aplicada entre Eletrodos.....	40
3.6.3	Efeito da Corrente Elétrica.....	40
4	QUALIDADE DO PONTO DE SOLDA	43
4.1	AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DO PONTO DE SOLDA.....	43
4.1.1	Modo de falha.....	43
FONTE: KHAN, KUNTZ E ZHOU (2008).....		43

5	MATERIAIS E MÉTODOS	47
5.1	MATERIAIS	48
5.2	MÉTODOS	50
5.2.1	Corte Preliminar	50
5.2.2	Seleção de parâmetros	51
5.2.3	Validação dos parâmetros de referência	52
5.2.4	Soldagem das amostras	54
5.2.5	Corte final das amostras	54
5.3	ANÁLISE METALOGRÁFICA	55
5.3.1	Corte das amostras	55
5.3.2	Embutimento	56
5.3.3	Lixamento	57
5.3.4	Polimento	58
5.3.5	Ataque químico	58
5.4	ANÁLISE VISUAL	58
5.5	ENSAIO DIMENSIONAL	59
5.6	ENSAIOS MECÂNICOS	59
5.6.1	Ensaio de cisalhamento	59
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
6.1	ANÁLISE VISUAL	61
6.2	ANÁLISE DIMENSIONAL	64
6.3	ENSAIOS MECÂNICOS	65
6.4	INFLUÊNCIA DA FORÇA ENTRE ELETRODOS	68
6.5	INFLUÊNCIA DO TEMPO	69
6.6	INFLUÊNCIA DA CORRENTE ELÉTRICA	71
6.7	INFLUÊNCIA DA INVERSÃO DA POLARIDADE	73
7	CONCLUSÕES	76
8	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	77
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

1.1 Colocação do Problema

A indústria automotiva é um dos ramos mais importantes da economia global, sendo produzidos 70,5 milhões de carros no ano de 2018 em todo mundo, sendo o Brasil responsável por 2,8 milhões de veículos, cujo mercado contribui com 22% do PIB brasileiro, responsável por 1,3 milhões de empregos diretos e indiretos (MINISTÉRIO DA ECONOMIA, 2019; STATISTA, 2019; ANFAVEA, 2018). Considera-se a fabricação de um veículo algo bastante complexo e oneroso, não apenas pela estrutura necessária, mas também pela tecnologia envolvida, na qual a redução de custos possui um papel de vital importância e a sua busca deve ser constante (RUIZ, 2005). Sendo assim, a pesquisa de novos métodos de produção é uma necessidade para a manutenção em constante evolução tecnológica e aumentar a competitividade no mercado global.

O processo de soldagem por resistência elétrica é um tema muito estudado desde a década de 1950, em que se caracterizou o comportamento, o mecanismo de crescimento do ponto de solda e, nos últimos anos, as pesquisas são voltadas para se soldar configurações multiespessura, materiais distintos, melhorar métodos de controle dos parâmetros. A quantidade de publicações tem aumentado o que valida o tema quanto à relevância, conforme se visualiza na figura 1, cujos dados coletados da base para o termo RSW, abreviação do termo no idioma inglês, *resistance spot welding*.

Figura 1 - Gráfico de publicações para o tema RSW, resistance spot welding

Fonte Dados compilados da base Sciente Direct.

Na fabricação de veículos, aproximadamente 90% da montagem é executada utilizando o processo de soldagem por resistência elétrica (LI *et al.*, 2011). O processo é complexo, em função das interações complexas entre os processos elétricos, mecânicos, térmicos e metalúrgicos (MANLADAN; ABDULLAHI; HAMZA, 2015). Possui excelente custo-benefício e produtividade comparando com os demais métodos de união, como se pode visualizar na figura 2.

Figura 2 – Curva de custos para as novas tecnologias de junção de carrocerias automotivas, adaptado

Fonte: Ruiz (2005).

O processo de soldagem a ponto por resistência elétrica é o principal método de união de chapas metálicas. A qualidade das soldas realizadas depende da definição de parâmetros ótimos e na implementação de controles adequados destes parâmetros ao longo da produção (WILLIAMS; PARKER, 2004).

Na carroceria automotiva, realizam-se muitas soldagens nas quais se têm duas camadas de chapas, mas em função das limitações no projeto estrutural e a crescente complexidade do design, a soldagem multicamadas com três ou quatro camadas se tornou inevitável. Nesta modalidade é possível que ocorra maior incidência de uma solda com má qualidade, porque a soldagem multicamadas não é bem compreendida e as diretrizes são, geralmente, baseadas na experimentação em campo. Este fato pode ser fonte de problemas na produção, uma vez que podem surgir situações em que a zona fundida cresce e se desenvolve de forma inadequada ou não sejam unidas as interfaces de interesse da aplicação.

O desenvolvimento do trabalho foi concentrado em uma solução industrial aplicada, na qual se uniram amostras grafadas e com cola estrutural internamente,

as amostras soldadas foram provenientes de um capô automotivo. As amostras características para a junção estudada, figura 3: (a) tem-se de uma amostra grafada, somente grafada e cola estrutural aplicada e (b) amostra com aplicação de cola estrutural e um ponto de solda.

Figura 3 – (a) Painel grafado com uma aba dobrada, aplicou-se cola estrutural interna e (b) adicionado ponto de solda por resistência elétrica

Fonte: Adaptado de European Association Aluminium (2015).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos gerais

Desenvolver uma solução para unir os painéis, interno e externo, de um capô automotivo, no qual o material é revestido com zinco puro, utilizando-se o processo de soldagem por resistência elétrica nas amostras grafadas e com três camadas.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Estudar a influência da variação dos parâmetros de soldagem nas características dimensionais, verificar se possui marcas visíveis na superfície externa do capô, o modo de falha e o formato da zona fundida.
2. Estudar a influência do sentido da corrente elétrica nas características dimensionais, verificar se possui marcas visíveis na superfície externa do capô, modo de falha e formato da zona fundida na soldagem por resistência.

1.2.3 Estrutura do trabalho

No segundo capítulo se caracteriza o processo de grafagem, suas limitações, vantagens e a importância do processo na fabricação do veículo. Terceiro capítulo introduz o processo de soldagem por resistência, ciclo de soldagem, a influência dos revestimentos orgânicos na resistividade da superfície de contato, as resistências estática e dinâmica, características dimensionais, meios de produção, efeito da variação dos parâmetros. Quarto capítulo aborda critérios de qualidade dos pontos de solda, modo de falha, ensaios mecânicos, abordagem de alterações na microestrutura e demais assuntos relacionados ao processo, sua validação, as condições gerais que delimitam a aplicação.

No quinto capítulo apresenta o material utilizado, a preparação das amostras, procedimento de soldagem, procedimentos dos ensaios mecânicos e métodos de medição. Propôs-se uma forma para avaliar a junta grafada e unida por solda por resistência elétrica, por meio da qual a série de experimentos foi realizada para se ter as condições de avaliar condições de união das amostras.

Resultados e discussões são apresentados no sexto capítulo e no sétimo capítulo são expostas as conclusões.

2 GRAFAGEM

2.1 TÉCNICAS DE JUNÇÃO

1. A junção mecânica pode ser diferenciada em dois tipos, a primeira é a junção sem utilizar elementos para a fixação e a segunda na qual se utilizam elementos para fixar, conforme se visualiza na figura 4.

Figura 4 – Tipos de junção mecânica

Fonte: European Association Aluminium (2015).

As vantagens da união por meio dos métodos de junção comparada ao processo de união por soldagem:

- Unir Materiais difíceis de soldar e materiais dissimilares.
- Não emite fumaça, geração de calor, baixa emissão de calor, baixo consumo de energia.
- Mínimo de distorção geométrica.

2.2 UNIÃO DE PARTES MÓVEIS

2.2.1 Processo de Grafagem ou Hemming

A percepção da qualidade em veículos automotores se relaciona com a beleza e harmonia das curvas no design, sendo um fator determinante para o consumidor final. E o formato, cor, pintura, precisão de montagem dos painéis são percebidos por clientes cada vez mais exigentes (SAKURAMOTO, 2013).

Com o design mais atrativo, complexo, a dificuldade de se produzir utilizando-se o processo de conformação aumenta, há ocorrências nas quais a pintura não esconde as pequenas imperfeições, que são de ordem de dezenas de microns (SAKURAMOTO, 2013).

O processo de grafagem é largamente utilizado na fabricação de automóveis, cujo objetivo é unir, por meio de conformação mecânica, a parte na qual os painéis de chapa metálicos são posicionados na face externa com os painéis de chapa metálica, que são posicionados na face interna, como se observa em portas de veículos, capôs, tampa do porta-malas, conforme ilustrado na figura 5 (ERSOY; ERTUGRUL; AYGUL, 2017).

Figura 5 - Vista explodida de um capô; a parte interna com reforços é montada com a parte externa

Fonte: Adaptado de Jonkers (2006).

2.2.2 Etapas do Processo

O processo anterior à Grafagem se chama flangeamento, figura 6, no qual se conformam as bordas do painel externo para ser grafado posteriormente. Durante

o flangeamento, as peças são dobradas com 90° ou próximas desta dimensão (JONKERS, 2006).

Figura 6 - O processo de grafagem; painel externo (laranja) conformado em torno do painel interno (preto) e etapa anterior (em amarelo) ao processo, peça somente flangeada

Fonte: Jonkers (2006).

Na figura 7 se ilustra a produção de um capô que inicia com o processo de estampagem, este é realizado em prensas, que moldam a forma e cortam as extremidades, conforme mostrado na figura 7.

Figura 7 – Processo de estampagem do capô. À direita, corte do painel externo

Fonte: Ersoy, Ertugrul e Aygul (2017).

A seguir é realizada dobra na extremidade do capô, resultando em ângulo de aproximadamente 90 graus, mostrado na figura 8. À esquerda da figura, a seção da extremidade do capô ilustra o perfil resultante conforme a operação.

Figura 8 – Processo de flangeamento, à esquerda, o resultado do flangeamento

Fonte: Ersoy, Ertugrul e Aygul (2017).

2.2.3 Processos de Grafagem

Os processos de grafagem são utilizados: die, tabletop e robot roller hemming (Figura 9). Estes processos apresentam em comum o fato de haver uma etapa de pré-grafagem (JONKERS, 2006).

Fonte: Jonkers (2006).

O Die hemming é realizado por prensas, nas quais a ferramenta de conformação (cor azul) é fabricada, especificamente, para o produto (rosa), vide figura 10.

Figura 10 – Prensa com dispositivo de grafagem

Fonte: Jonkers (2006).

Visualiza-se, na figura 11, o processo de dobra de 90° que é realizado em duas etapas, a ferramenta se movimenta verticalmente para efetuar o processo pré-grafagem e grafagem final (JONKERS, 2006).

Figura 11 - Ilustração da Pré-grafagem e Grafagem final realizada com o processo Die Hemming

Fonte: Jonkers (2006).

O método de grafagem por Table Top é um projeto especial para se fazer as dobras, estes dispositivos podem se mover na vertical ou horizontal. Produtos com geometrias mais complexas podem ser produzidos, vide figura 12 (JONKERS, 2006).

Figura 12 – Mesa de movimento vertical (esquerda) e horizontal (direita), o produto é levantado entre as operações, nas quais a pré-grafagem é feita na parte inferior

Fonte: Jonkers (2006).

2.2.4 Grafagem de Rolo Robotizado

O robô guia a ferramenta, figura 13, que é constituída por rolos que efetuam a operação de grafagem. A dobra é efetuada na medida em que o rolo é guiado ao longo do flange e o processo ocorre em três estágios, cada um com seu ângulo de deformação, conforme ilustrado na figura 14.

Figura 13 - Tipos de ferramentas que são acopladas aos robôs para efetuar a grafagem

Fonte: Core Tech (2018).

Figura 14 – Rolos deformam as extremidades, à direita, processo ocorre em três estágios

Fonte: Jonkers (2006).

2.2.5 Qualidade na Grafagem

A qualidade dimensional e de acabamento superficial é monitorada na operação de grafagem.

A característica dimensional pode ser visualizada no espaçamento entre as partes móveis, conforme ilustrado na figura 15. Este espaçamento é importante para garantir o funcionamento correto entre as peças, que vem sendo reduzido nas aplicações, sendo essencial o controle do mecanismo do rolo de grafagem.

Figura 15 – Espaçamento entre a porta frontal e traseira (à direita) e espaçamento da porta traseira e chaparia (à esquerda)

Fonte: Adaptado de Jonkers (2006).

A distância entre painéis grafados, vide figura 16, é denominada pelo termo flush, sendo uma característica controlada. Podem ocorrer problemas de acústica se os parâmetros de grafagem e flush não estiverem dentro dos limites especificados.

Figura 16 – Ilustração do flush do capô frontal

Fonte: Jonkers (2006).

Com relação aos requisitos visuais, devem ser observados: o painel externo, raio visível da amostra e o raio da parte interna, conforme ilustrado na figura 17.

Figura 17 - Áreas superficiais, ordem de importância: externa (à direita), raio externo e parte interna (à esquerda)

Fonte: Jonkers (2006).

As amostras grafadas podem apresentar ondulações e empenamentos nas extremidades, figura 18.

Figura 18 – Ilustração de alguns defeitos, como: ressalto (à direita) e empenamento (à esquerda)

Fonte: Jonkers (2006).

Alguns defeitos são de difícil detecção durante o processo de grafagem, sendo visualizados após a pintura.

3 PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA

3.1 CONCEITO

Durante a soldagem por resistência elétrica, duas ou mais chapas metálicas são pressionadas juntas pela força aplicada ao eletrodo, que geralmente é controlada pela pressão do ar no cilindro pneumático, ou servo atuador. Depois que as chapas metálicas são pressionadas, a energia elétrica é fornecida ao sistema de soldagem e a corrente de soldagem passa pelas chapas, a energia térmica é inicialmente gerada na interface do metal em função de contaminações e asperezas de superfície e possuem as maiores resistências no início do processo (ZHOU; YAO, 2018).

A energia de aquecimento gerada, em um ponto de solda, é relacionada com três principais fatores: força entre eletrodos, tempo e corrente elétrica, na qual a corrente é o principal. Este fator é quantificado pelo fluxo de elétrons que atravessa um material em um dado período, denominada de Lei de Joule. A relação é descrita pela Equação 1 (TARISMER *et al.*, 2011).

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

Em que o Q é a energia, I é a corrente, $f(R)$ é função da resistência e t é o tempo. Quando a corrente ou a resistência não é constante, integrando-a, esta resulta em uma quantidade de energia térmica em um intervalo de tempo t (ZHANG; SENKARA, 2006). Quanto maior a energia fornecida ao sistema de soldagem, maior será a área fundida formada. E a absorção energética é seguida de fusão e solidificação, que depende da magnitude de corrente de soldagem aplicada (ZHOU; YAO, 2018).

A resistência total pode ser atribuída à resistência de contato nas interfaces eletrodo-peça (R_1 e R_5), a interface entre peças (R_3) e a resistência das peças que serão soldadas (R_2 e R_4), conforme a figura 19 e equação 2 (ZHANG; SENKARA, 2006).

Figura 19 – Ilustração das interfaces resistivas do processo

Fonte: Adaptada de Batista e Brandi (2013).

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad (2).$$

A resistência é um parâmetro variável durante o processo, pois à medida que a temperatura da junta soldada muda, os valores de resistência também se alteram, por exibir este comportamento se fala em resistência dinâmica nos processos de soldagem por resistência elétrica.

3.1.1 Resistência estática

A resistência de contato estática desempenha um papel importante na determinação do fluxo de corrente entre os eletrodos e estabelece o valor de corrente necessário para a formação e crescimento da solda. Se a resistência de contato é muito alta, a interface atua como um isolante e o fluxo de corrente elétrica é inibido. Geralmente, ocorre com os aços revestidos de camada orgânica, primers, aços cromados e para o fosfato o fluxo de corrente elétrica pode ser utilizado até certa espessura somente, como mostrado por Chatterjee. Concluiu-se que o aumento da espessura do revestimento de fosfato diminuiu a corrente elétrica necessária para produzir uma solda satisfatória, em função de maior resistividade da camada de revestimento, vide figura 20. Tendências semelhantes foram observadas referentes à aplicação de camada de zinco em aços. Em geral, a interface precisa estar dentro de limites relativamente estreitos, caso contrário, resultados inconsistentes são obtidos, como é o caso ao tentar soldar ligas de alumínio ou aços zinco com primers "soldáveis" (WILLIAMS e PARKER, 2004).

Figura 20 – Influência da resistência de contato inicial e vida do eletrodo com revestimento de camada orgânica

Fonte: Adaptado de Williams e Parker (2004).

3.1.2 Resistência dinâmica

Variações contínuas nos parâmetros elétricos da soldagem de aço de baixo carbono (*mild steel*) foram relatadas por diversos autores e estão representativamente esboçadas na figura 21. Visualiza-se um aumento na tensão, após aproximadamente o primeiro ciclo, redução da corrente até um valor mínimo ser alcançado. Ao longo do restante do ciclo de solda, a tensão diminui para um valor constante, enquanto a corrente aumenta para um valor constante (DICKINSON, FRANKLIN e STANYA, 1980). A curva da resistência, variando ao longo do tempo, é intitulada de resistência dinâmica.

Figura 21 – Representação esquemática dos parâmetros elétricos dinâmicos durante a soldagem a ponto

Fonte: Dickinson, Franklin e Stanya (1980).

A resistência dinâmica de contato é responsável pelo aquecimento por efeito Joule e, conseqüentemente, a formação do ponto de solda. Muito já foi estudado para se compreender a formação do ponto de solda e se utiliza como parâmetro de qualidade (BATISTA; BRANDI, 2013).

Segundo Gogeon et al (GEDEON *et al.*, 1987), a resistência dinâmica é precisa, reprodutível e um relevante parâmetro de qualidade que pode ser obtido no processo de solda a ponto utilizando a instrumentação adequada. Constituído de circuito com amplificador de tensão especificamente projetado para obter os valores de resistência dinâmica.

Na figura 22 se tem a curva da resistência dinâmica, sendo esta dividida por regiões para explorar o processo de formação do ponto. Na região 1, os eletrodos pressionam a amostra a ser soldada, deformando as rugosidades superficiais entre os materiais e os eletrodos. Região 2, o zinco aquecido é rapidamente removido, em função de aquecimento e de pressão dos eletrodos. Região 3, a resistividade cresce e há uma incandescência. Região 4, a resistividade cresce, ocorre o início da fusão, chega ao ponto máximo e a resistividade decai na medida em que a temperatura da amostra troca energia com o ambiente. Região 5, após a fusão da amostra, a corrente elétrica é interrompida, porém os eletrodos continuam pressionando a amostra por um determinado tempo para promover uma transferência de energia térmica para evitar a expulsão do material em alta pressão e temperatura no interior da amostra.

Figura 22 – Principais etapas do comportamento da resistência dinâmica no processo de formação do ponto de solda

Fonte: Batista e Brandi (2013).

3.2 CICLO DE SOLDAGEM

Os tempos de soldagem podem ser otimizados sendo diminuído o tempo de pré-pressão. Isto pode ser realizado apenas aumentando-se a velocidade de fechamento da pinça de soldagem. O exemplo da figura 23 mostra uma redução de 7 ou 117 milissegundos por ponto de solda, com os mesmos parâmetros de soldagem (BATISTA, 2011).

- Tempo de fechamento dos eletrodos ou pré-pressão é o tempo de movimentação dos braços robóticos até pressionar as chapas a serem soldadas.
- Tempo de estabilização da força é o espaço de tempo durante o qual os eletrodos comprimem a peça de trabalho, até o momento em que se inicia a passagem da corrente. Esse estágio é para garantir a existência de uma força suficiente, quando for aplicada a corrente de solda.
- Tempo de soldagem é o intervalo de tempo durante o qual é mantida a compressão sobre o trabalho, simultaneamente com a passagem da corrente elétrica de solda pelas peças sendo soldadas.

- (d) Tempo de resfriamento do ponto ocorre durante o momento no qual os eletrodos mantêm a pressão sobre a peça de trabalho, após a cessação da passagem de corrente e o seu esfriamento e solidificação sob pressão.
- (e) Tempo de liberação da peça envolve o estágio de tempo durante o qual os eletrodos não mantêm contato com a peça de trabalho, permitindo o reposicionamento da peça de trabalho ou da máquina de solda, para início de um novo ciclo de solda (BATISTA, 2011).

Figura 23 – Sequência de soldagem

Fonte: Batista (2011).

3.3 CARACTERÍSTICAS DO PONTO DE SOLDA

3.3.1 Características dimensionais

Figura 24 - Caracterização geométrica do ponto de solda para duas chapas

Fonte: Furlanetto (2014).

Em que:

d_{p1}, d_{p2} Diâmetro do ponto respectivamente chapa 1 e 2
 d_{ZAC1} Diâmetro da ZAC entre as chapas
 i_1, i_2 Indentação do ponto respectivamente 1 e 2
 a_{c12} Abertura entre as chapas 1 e 2
 p_p, p_1, p_2 Penetração do ponto
 p_{ZAC1}, p_{ZAC2} Penetração da ZAC respectivamente chapas 1 e 2
 e_c Espessura resultante das chapas soldadas

3.3.2 Características metalúrgicas do ponto de solda produzido com aço baixo carbono

A figura 24 ilustra um ponto de solda típico com suas respectivas zonas microestruturais, que são: material base (MB), zona afetada pelo calor (ZAC) e zona fundida (ZF) (POURANVARI; MARASHI, 2010).

A figura 25 (b) indica que a microestrutura do MB consiste, principalmente, de ferrita. A zona fundida (ZF) consiste em uma estrutura colunar direcional em crescimento em direção à linha central da zona fundida, figura 25 (c). A microestrutura da ZF consiste, principalmente, em agulhas de martensita com

contornos de grão de ferrita e ferrita Widmanstätten, figura 25 (d). Apesar do baixo teor de carbono do metal base, esse contém estrutura ferrítica, formou-se martensita decorrente de alta taxa de resfriamento (POURANVARI; MARASHI, 2010). É relatado que a taxa de resfriamento durante o processo varia de aproximadamente $3000^{\circ}\text{C} / \text{s}$ para 2 milímetros de espessura, contra $105^{\circ}\text{C} / \text{s}$ para espessuras inferiores a 0,5 mm (GOULD; KHURANA; LI). A presença dos eletrodos de cobre refrigerados a água e seu efeito de têmpera, bem como o curto ciclo de soldagem podem explicar as altas taxas de resfriamento do processo de solda por resistência elétrica.

Figura 25 – (a) Macroestrutura típica de amostra solda a ponto contendo aço, que contém baixo teor de carbono (b) material base, (c) grãos colunares na zona fundida (ZF) e (d) microestrutura da zona fundida

Fonte: Pouranvari e Marashi (2010).

3.4 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS E REVESTIMENTOS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

3.4.1 Características dos materiais

Os aços automotivos podem ser classificados de várias maneiras diferentes. Uma é a designação metalúrgica que fornece algumas informações sobre o processo. As designações comuns incluem: (i) aços de baixa resistência (aços livres e intersticiais), (ii) aço convencional de alta resistência (HSS) (carbono-manganês, endurecimento por asse e aços de baixa resistência) e (iii) o novo AHSS (fase dupla, plasticidade induzida por transformação, plasticidade induzida por geminação, fase ferrítico-bainítica, fase complexa e aços martensíticos). Aços de maior resistência adicional para a indústria automotiva incluem aços moldados a quente, aços tratados termicamente pós-moldagem e aços projetados para aplicações exclusivas, que incluem melhor esticamento de aresta e flexão por estiramento. Na figura 26 podem ser observados graficamente os tipos de aços, de tensão de ruptura e de alongamento (ISPAT GURU, 2018).

Figura 26 – Aços para aplicação automotiva

Fonte: Adaptado de (ISpat Guru, 2018).

3.4.2 Revestimentos aplicados

Os aços são parte integrante da construção e da indústria em função de sua alta resistência e durabilidade. Embora muitos materiais novos e avançados tenham

sido desenvolvidos para engenharia e aplicações, o aço ainda é considerado o principal material de construção para automóveis, eletrodomésticos e máquinas industriais. O aço sofre corrosão quando exposto a diferentes ambientes, assim, métodos diferentes são aplicados para evitar a corrosão, como: a proteção catódica, proteção anódica e adição de inibidores, revestimentos protetores e revestimentos metálicos. Revestimentos de zinco são amplamente utilizados para a proteção de aço. Nesses casos, o zinco metálico mais recente corrói, preferencialmente, do que o substrato de aço por uma reação catódica, que impede o aço de passar por reação de corrosão anódica. Diferentes tipos de revestimentos de zinco incluem: galvanização por imersão a quente (descontínuo ou contínuo), galvanização, metalização (pulverização de zinco), revestimento mecânico e tinta rica em zinco. Entre esses, o processo de galvanização por imersão a quente oferece uma combinação única de propriedades superiores, tais como: alta resistência, formabilidade, peso leve, resistência à corrosão, baixo custo e reciclabilidade.

Em processo de galvanização por imersão, um artigo de aço é limpo, fluxado e imerso em banho de zinco fundido a uma temperatura de cerca de 450 °C. Aços galvanizados por imersão a quente têm sido amplamente utilizados em campos industriais, tais como: automóveis, eletrodomésticos ou construção perante suas excelentes características de resistência à corrosão. O motivo do uso de galvanização por imersão a quente é a dupla natureza protetora do revestimento. Como um revestimento de barreira, esse fornece uma liga resistente, metalurgicamente, o revestimento de zinco, que cobre completamente a superfície do aço e protege o aço da corrosão. Além disso, a ação sacrificial do zinco protege o aço, mesmo quando ocorrem danos ou uma pequena descontinuidade na sua superfície. Um revestimento galvanizado por imersão a quente consiste em uma montagem heterogênea de diferentes fases, que são formadas como resultado de reações metalúrgicas entre ferro e zinco, quando um substrato de ferrita é imerso em fundido zinco. Após a solidificação, o revestimento consiste em uma camada externa de 100% de zinco (camada η -eta) e camadas internas denominadas camadas de liga de fases intermetálicas de ferro e zinco, como a camada zeta (ζ) (94% Zn-6% Fe), camada delta (δ) (90% Zn-10% Fe) e camada gama (75) (75% Zn – 25% Fe), vide figura 27 (GESLAINA *et al.*, 2017).

Diversos trabalhos relevantes destacaram a importância da resistência de contato, principalmente, em casos nos quais as configurações de materiais são

dissimilares. A constituição do revestimento influencia as condições de contato. Aço galvanizado possui a resistência de contato na interface reduzida em comparação aos aços não revestidos. Medições em campo das resistências de contato elétrico durante o processo de soldagem se apresentam como um grande desafio técnico (GESLAINA *et al.*, 2017).

Figura 27 - Camada de revestimento galvanizado a quente, microestrutura e dureza

Fonte: Geslaina *et al.* (2017).

3.5 MEIOS DE PRODUÇÃO E INSUMOS

Um sistema de soldagem a ponto moderno, utilizado nas empresas automobilísticas, é essencial para garantir a qualidade e a produtividade. Os componentes do sistema de soldagem seguem ilustrados na figura 28.

Figura 28 – Os componentes do sistema de soldagem, além do robô: (01) Ropua de proteção, *DressPack*, (02) controlador, (03) software, (04) pinça de solda, (05) unidade de água e ar e (06) dispositivo de dressar eletrodos

Fonte: ABB.

3.5.1 Ropua de proteção segura e flexível para o robô

A roupa de proteção segura e flexível para o robô é um pacote de roupas parcialmente integrado, que torna a produção mais segura e flexível e reduz o desgaste dos cabos, o que leva a menos substituições de cabos, aumentando o tempo de atividade das produções. Também se adapta bem à simulação 3D (ABB).

3.5.2 Cabine de soldagem

O gabinete de soldagem a ponto contém os componentes elétricos e os circuitos necessários para a aplicação de solda a ponto. Esse tem o controlador de soldagem embutido e é totalmente controlado a partir do controlador do robô, através do software de soldagem por pontos. A capacidade e a funcionalidade dependem da escolha de diferentes opções. O gabinete tem um tamanho grande para suportar a manutenção (ABB).

3.5.3 Software de soldagem por resistência elétrica

O software de soldagem a ponto é simples e tem funcionalidade completa, mas ainda é flexível para adaptação a necessidades específicas. Contribui com confiabilidade e qualidade na produção e está disponível para pistolas de soldagem carregadas por robôs e estacionárias. A capacidade e a funcionalidade dependem da escolha de diferentes opções. O gabinete tem um tamanho grande para suportar a manutenção (ABB).

3.5.4 Pinça de solda por resistência elétrica

A *FlexGun* é uma pistola de solda por pontos modular simples e robusta com braço de aumento do movimento do braço paralelo para garantir a qualidade do processo. Esse é projetado para a força pesada do eletrodo, tem seu centro de gravidade próximo ao acessório do robô e é fácil de integrar e manter. A mesma configuração é usada para armas transportadas por robôs ou estacionárias. Como padrão, existem dois tipos de armas - "X" ou "C / J" e 12 variantes diferentes, que oferecem uma ampla gama de soluções de soldagem (ABB).

3.5.5 Unidade de água e ar

A unidade de água e ar é montada na base do robô e contém componentes para distribuição e controle de água e ar dentro do *SpotPack*. Esse está disponível tanto para pistolas carregadas por robô quanto para pistolas estacionárias e é controlado pelo controlador do robô através do software de soldagem por pontos. A capacidade e a funcionalidade dependem da escolha de opções diferentes (ABB).

3.5.6 Dispositivo de dressar eletrodos

O dispositivo recupera a ponta do eletrodo em um passo rápido com condições de corte uniformes e predefinidas. É um produto confiável e seguro que garante um comissionamento rápido. Há uma ampla gama de tipos de eletrodos personalizados disponíveis mediante solicitação. O mesmo aparador de ponta pode

ser aparafusado no chão para armas carregadas por robô ou colocado em um braço oscilante para uso em máquinas de solda estacionárias (ABB).

3.6 PARÂMETROS DE SOLDAGEM

Uma soldagem com qualidade adequada começa com um bom processo de projeto, no qual se minimizam as variáveis. A força entre os eletrodos, corrente elétrica e tempo são os parâmetros de soldagem mais importantes na soldagem a ponto por resistência elétrica. Um controlador eletrônico é usado em máquinas de solda para ajustar as variáveis do processo. O diâmetro fundido é obtido sendo ajustada a intensidade da corrente elétrica com relação à soldagem tempo, pois se considerar um tempo menor, o diâmetro fundido também terá dimensões reduzidas. Porém, se o tempo de operação for excessivo, a quantidade de metal fundido aumenta, causando a expulsão do material fundido, fragilizando a junta soldada, pois esta terá menor resistência às solicitações (ASLANLAR, 2006).

3.6.1 Efeito do tempo de soldagem

A taxa de geração de calor deve ser adequada, sem excessivo aquecimento, para não resultar em desgaste prematuro dos eletrodos (AWS, 2007). O calor é dissipado por condução na interface metal base e eletrodos, e uma pequena parte por radiação, as perdas aumentam, proporcionalmente, com o tempo de soldagem e a temperatura do metal. Um tempo mínimo é requerido para atingir a temperatura de fusão, quando se tem uma densidade de corrente adequada. Se a corrente é mantida por longo tempo, a temperatura na formação do ponto irá exceder muito a temperatura de fusão, gerando acréscimo da pressão interna e ocorre expulsão do material do ponto de solda. À medida que se reduz demasiadamente o tempo, incrementando proporcionalmente a corrente irá produzir uma condição de dissipação térmica na interface de contato, causando uma severa expulsão, ou respingo. O calor deve ser adequado para que haja a formação do ponto de solda (AWS, 2007).

Quando se soldam chapas grossas, a corrente é aplicada por meio de pequenos pulsos sem redução da força aplicada nos eletrodos. O propósito de

pulsar a corrente é o de acrescentar calor, gradualmente, aos materiais a serem unidos (AWS, 2007).

3.6.2 Efeito da Força Aplicada entre Eletrodos

À medida que a força do eletrodo aumenta, o tamanho do diâmetro fundido diminui. Resistência dinâmica determina o desenvolvimento do ponto. Aumento da força do eletrodo reduz a espessura localizada das chapas e aumenta a área de contato da interface, pois deforma e altera a rugosidade da superfície (POURANVARI *et al.*, 2007). Como a resistência está diretamente relacionada ao comprimento e indiretamente à área de acordo com a segunda lei de Ohm, Equação 3.

$$R_F = \rho \frac{L}{A} \quad (3).$$

O ideal é que a força seja mantida constante durante todo o período de soldagem, entretanto ocorrem variações de força durante a soldagem decorrente do fato do material coalescer (SANTOS, 2006). Charde verificou que a força não é constante durante o processo de soldagem e se consegue um perfil uniforme e maiores esforços resultantes, quando se usa um sistema servo acionado para controlar o fechamento da pinça de solda, conforme figura 29.

Figura 29 – Perfil de forças na soldagem a ponto de um sistema servo acionado

Fonte: Charde (2016).

3.6.3 Efeito da Corrente Elétrica

A corrente elétrica é a variável crítica do processo, que determina a taxa de calor gerado na soldagem, uma vez que na Equação de Joule, Equação 1, é a única

variável elevada à segunda potência. Tanto a corrente alternada quanto a corrente contínua podem ser utilizadas no processo de solda a ponto. A corrente contínua reduz as perdas no circuito secundário e é, normalmente, utilizada em aplicações que requerem alta intensidade de corrente (BATISTA, 2011).

O tamanho do diâmetro do ponto de solda tem relação com a taxa de calor gerado por dissipação que ocorre nos eletrodos. Fixando os parâmetros de tempo e pressão se tem que o diâmetro da solda e sua resistência mecânica são funções diretas da corrente de solda. Correntes baixas produzem zonas de fusão muito pequenas e soldas de baixa resistência mecânica, enquanto que correntes elevadas produzem aumento uniforme do diâmetro e da resistência até o ponto em que se inicia a expulsão de metal, pela qual se formam vazios internos e trincas na solda (BATISTA, 2011). A densidade de corrente pode ser alterada pela variação do diâmetro do eletrodo, o aumento da área projetada diminui a densidade de corrente e, conseqüentemente, o calor gerado (BATISTA, 2011).

A relação do diâmetro do ponto de solda e a corrente aplicada no processo está apresentada na figura 30. Todas as uniões por solda a ponto possuem esta transição de interfacial e destacamento, somente há diferenças na curva diâmetro versus corrente. O ponto de transição marcado é de aproximadamente 8,6 milímetros para esta aplicação (POURANVARI; RANJBARNODEH, 2011).

Figura 30 – Efeito do tamanho do ponto de solda e a corrente com relação ao modo de falha. FI, falha interfacial e FD, falha por destacamento.

Fonte: Pouranvari e Ranjbarnoodeh (2011).

A energia de falha é uma medida da capacidade de absorção de energia do ponto de solda, cujo maior valor demonstra um aumento na confiabilidade de

desempenho de solda contra cargas de impacto como acidentes. Existe uma relação direta entre a energia de falha estática obtida por meio do ensaio de cisalhamento e um ensaio de impacto, no qual se aumenta a velocidade do ensaio. A relação da corrente e a solicitação à tração e energia de absorção, vide Figura 31 (POURANVARI; RANJBARNODEH, 2011).

Figura 31 – Efeito da corrente: (a) Força e (b) Energia de falha.

Fonte: Pouranvari e Ranjbarnoodeh (2011).

4 QUALIDADE DO PONTO DE SOLDA

Para garantir a integridade estrutural de um veículo, sob condições de solicitações diversas, deve-se atentar para a qualidade das soldas, pois o fato de possuir uma ou duas soldas defeituosas, um componente crítico afeta o funcionamento. Portanto, a avaliação da qualidade das soldas por resistência elétrica a ponto é uma questão vital para a confiabilidade do veículo, conseqüentemente, com a melhoria da qualidade se melhora o processo de produção de veículos, refletindo também em fatores econômicos (POURANVARI; RANJBARNODEH, 2011). Avaliar a qualidade das soldas requer o estudo do processo, a relação entre as variáveis e como influenciam no desempenho (POURANVARI; MARASHI, 2010).

4.1 AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DO PONTO DE SOLDA

4.1.1 Modo de falha

Dois modos de falha distintos ocorrem ao se romper um ponto de solda: (CHAO, 2003) modo interfacial, a falha dominante modo para soldas por pontos de pequenos diâmetros, na qual se cisalha o ponto. Modo de destacamento: fratura da folo ponto ao redor da solda; o ponto permanece intacto, dominante para soldas por pontos de maiores diâmetros. Ambos os modos são visualizados na figura 32 (DONDERSA *et al.*, 2006).

Figura 32 – Modos de falha: (a) Interfacial e (b) Destacamento

Fonte: Khan, Kuntz e Zhou (2008).

Pontos de solda pequenos não têm capacidade suficiente de solicitação e absorção de energia. Tornam-se o elo mais fraco na conexão, atuando no modo de falha interfacial, esta falha deve ser evitada produzindo soldas com diâmetros maiores (DONDERSA *et al.*, 2006). Devem ser obedecidos critérios de tamanhos mínimos permitidos, que são definidos de maneira particular para a aplicação em questão ou se adotar com base na experimentação.

O teste de cisalhamento é utilizado para validação de soldas a ponto, no qual o pico de carga (o ponto com o máximo valor da curva tensão-deslocamento), no qual se mensura a energia de falha (área abaixo do gráfico tensão-deslocamento), vide figura 33 (POURANVARI; RANJBARNODEH, 2011).

Figura 33 - Força versus deformação em condições de modos de falha interfacial e destacamento

Fonte: Pouranvari e Ranjbarnodeh (2011).

O ensaio de tração é muito utilizado em função da simplicidade na fabricação da junta e na execução do ensaio (ZHANG; SENKARA, 2006). O ensaio consiste em tracionar a junta sob condições controladas, padronizadas até o rompimento e essa rotação (θ) ao ser solicitado durante o ensaio, vide figura 34.

Figura 34 – Análise das tensões no ensaio de cisalhamento, (b) falha modo interfacial e (c) falha modo de destacamento

Fonte: Li *et al.* (2011)

Testes de resistência com diferentes casos de carga estática foram realizadas por Chao (CHAO, 2003), a fim de revelar os mecanismos de falha para a geometria de carregamento de cisalhamento, na figura 35 e a geometria de carga na figura 36.

Figura 35 - Ensaio de cisalhamento.

Fonte: Dondersa *et al.* (2006).

Figura 36 – Teste de solitação cruzada, *cross tension test*.

Fonte: Dondersa *et al.*, (2006).

A fratura inicia em um dos pontos de verificação localizados quando a ductilidade da chapa é alcançada, vide figura 36. Embora uma carga de

cisalhamento seja aplicada, o mecanismo de falha é tração (DONDERSA *et al.*, 2006).

No teste de tensão cruzada, uma carga normal é aplicada. O mecanismo de falha corresponde ao cisalhamento ao redor do ponto de solda, ver figura 37 (DONDERSA *et al.*, 2006).

Figura 37 - Mecanismos de falha: (a) Teste de cisalhamento e (b) Teste de tensão cruzada

Fonte: Dondersa *et al.*, (2006).

É um dado experimentalmente verificado que a solicitação do teste de carga cruzada equivale a 74% da carga de solicitação por cisalhamento (CHAO, 2003).

O objetivo de classificar o modo de falha é de correlacioná-lo com o tamanho do ponto de solda, este que pode ser alterado por energia de soldagem em processo. O diâmetro do ponto de solda é estimado pela equação do diâmetro do ponto de solda, no qual o coeficiente varia de 3,5 a 6 (POURANVARI; RANJBARNODEH, 2011).

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

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram executados em um capô automotivo, que recebeu o material de forma que os painéis, interno e externo, estavam unidos por meio da operação de grafagem. Para realizar a união por solda a ponto, foram necessárias algumas etapas como: corte preliminar, seleção de parâmetros, ensaio em campo e soldagem com os parâmetros definidos, corte final e avaliação por meio de ensaios visual, dimensional e mecânicos, vide figura 38.

Figura 38 – Ilustração dos procedimentos de materiais e métodos

5.1 MATERIAIS

O material obtido para a experimentação foi um capô automotivo, figura 39, no qual os painéis internos e externos foram unidos por meio da operação de grafagem.

Figura 39 – Capô automotivo, ilustrada a área grafada, que se estende ao redor do produto

Fonte: Adaptado de Carrão Peças (2018).

O material utilizado foi um aço baixo carbono para conformação a frio, com espessura de 0,8 milímetros, galvanizado a quente por imersão, com espessura de camada de 5 a 12 μm por superfície de zinco puro e classificação DIN EN 10346-DX54D+Z100 (DIN - GERMAN INSTITUTE FOR STANDARDIZATION, 2009). Seguem as Tabelas 1, 2 e 3, respectivamente com a composição química, propriedades mecânicas e massa de zinco por superfície.

Tabela 1 - Composição química para aços de baixo carbono DIN EN 10346-DX54D+Z100

Designação	Composição química (%)					
Nº aço	C	Si	Mn	P	S	Ti
DX54D +Z100	0,12	0,5	0,6	0,1	0,045	0,3

Fonte: DIN - German Institute for Standardization (2009).

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço DIN EN 10346-DX54D+Z100

Designação	Limite de Escoamento	Limite de Resistência	Elongamento
DX54D +Z100	120 – 220 MPa	260 – 350 MPa	36% mín

Fonte: DIN - German Institute for Standardization (2009).

Tabela 3 - Massa de zinco por superfície

Designação	Massa de zinco por superfície
+Z100	5 – 12 μm por superfície

Fonte: DIN - German Institute For Standardization (2009).

5.2 MÉTODOS

5.2.1 Corte Preliminar

Nesta etapa, o capô foi recortado na região central, cuja área destacada em vermelho na figura 40 foi descartada. O material remanescente utilizado é o localizado ao longo de toda a borda do capô, sendo este usado na preparação das amostras, que foram soldadas e testadas.

Figura 40 - Ilustração do corte preliminar realizado no capô e foram extraídas as amostras

Fonte: Adaptado de Carrão Peças (2018).

A amostra cortada do capô segue detalhada abaixo, na figura 41. As dimensões da amostra ficaram com 120 milímetros de largura e 130 milímetros de profundidade. A largura de 120 milímetros foi escolhida visando manter a união por grafagem dos painéis internos e externo, mais intacta possível, visto que ao cortar as amostras que as larguras eram inferiores ao valor de 120 milímetros, houve deformações que alteraram a característica da amostra unida e, assim, se teria mais um fator a considerar no estudo.

Figura 41 - Seção da união dos painéis interno e externo

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2.2 Seleção de parâmetros

Para a realização dos experimentos de seleção dos parâmetros se utilizou uma pinça servo gun, tipo C da Marca During, em corrente contínua e média frequência 1000 – 1200 Hz. Os eletrodos usados, conforme norma RWMA, composição cobre – zircônio (0,15% Zr), endurecido por trabalho a frio, com dureza de 70 HB e condutividade elétrica de 90% IACS, vide figura 42.

Figura 42 – Recursos utilizados na soldagem, pinça servo gun, tipo C e eletrodos

Fonte: À esquerda, Adaptado de During e à direita, elaborada pelo autor.

A definição dos parâmetros foi um processo que exigiu a pesquisa de parâmetros previamente, sendo realizados experimentos anteriores para verificar a exequibilidade da união soldada, e os parâmetros de referência foram definidos via experimentação exaustiva e seguem mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Tabela de parâmetros referência

Força [kN]	Tempo [ms]	Corrente [kA]
0,8	45	6,2

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após ajustar os parâmetros no equipamento foi medida a força aplicada entre os eletrodos com um dinamômetro para se garantir que o valor ajustado no equipamento correspondesse ao aplicado na operação, inclusive, o dinamômetro da Adis Development de até 1330 daN, apresentado na figura 43.

Figura 43 – Dinamômetro da marca Adis, utilizado para calibrar a força entre os eletrodos

Fonte: Elaborada pelo autor.

Realizou-se a soldagem, conforme ilustrado na figura 44, em que o eletrodo com menor área de contato está posicionado sobre o lado que o material conformado via grafagem tem a aba resultante.

Figura 44 – Posicionamento dos eletrodos na amostra durante a soldagem

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2.3 Validação dos parâmetros de referência

O ponto de solda produzido foi avaliado quanto a sua fusão, o método de avaliação via teste de arrancamento, conforme norma ISO 10447:2015.

O teste de arrancamento é uma avaliação, em ambiente produtivo, para a validação da fusão entre os materiais, por meio da medição das dimensões do material remanescente após o arrancamento. Portanto, foi ensaiada a amostra

soldada em uma morsa de bancada. E para fazer a movimentação e destacar o ponto de solda foi utilizado um alicate de pressão e esforço manual para destacar o ponto, conforme é mostrado na figura 45.

Figura 45 – Teste de arrancamento para amostra soldada a ponto

Fonte: Organization Internationale de Normatisation (2015).

Avaliação da amostra soldada foi validada por medição do material remanescente na chapa, o qual foi medido em dois sentidos perpendiculares entre si, vide figura 46 e equação 3.

Figura 46 – Método de medição do diâmetro após o teste de arrancamento

Fonte: Organization Internationale de Normatisation (2015).

Calculou-se a média dos valores, conforme equação 3:

$$d_{rem} = \frac{(D1+D2)}{2} \quad (3).$$

O critério de aceitação adotado foi que o diâmetro no mínimo, que é um critério recomendado na indústria automotiva, conforme ISO/DIS 14373. E o coeficiente pode variar de 3,5 a 6, vide equação 4.

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

O critério de aceitação entre os diâmetros, mínimo e máximo, pode ser atingido sendo utilizadas diversas combinações de parâmetros, mas na experimentação foram trabalhados tempos de soldagem bem reduzidos, o que é um fator positivo com relação à produtividade.

5.2.4 Soldagem das amostras

A seleção da variação dos parâmetros foi um processo baseado nos parâmetros iniciais definidos na seleção de parâmetros e, assim, foi definida a Tabela 5, com as faixas de valores suficientes para se visualizar alterações no comportamento mecânico.

Tabela 5 - Tabela de parâmetros de soldagem

Combinações	Força [kN]	Tempo [ms]	Corrente [kA]	Pontos de solda
1	0,8	45	6,2	1 - 11
2	1,4	45	6,2	12 - 17
3	0,8	90	6,2	18 - 23
4	0,8	45	7	24 - 29
5	0,8	45	6,2	30 - 35

Fonte: Elaborada pelo autor.

Portanto, foi executada a soldagem, na qual se produziram 35 amostras entre cinco combinações de conjunto de parâmetros.

5.2.5 Corte final das amostras

As amostras foram soldadas e nessas foram realizados três pontos de solda por amostra, portanto as dimensões finais das amostras foram obtidas após a operação de corte do material, mostradas na figura 47.

Figura 47 - Representação do corte das juntas soldadas para realizar o ensaio de cisalhamento

Fonte: Elaborada pelo autor.

As dimensões finais das amostras foram ilustradas na figura 48, sendo comparadas as dimensões das amostras com dimensões indicadas conforme normas mais utilizadas em diversos ramos de aplicação.

Figura 48 – Dimensões finais das amostras após o corte final

Fonte: Zhou, Hu e Zhang (1999).

5.3 ANÁLISE METALOGRAFICA

A análise metalográfica foi realizada para verificação da presença de descontinuidades, tais como: falta de penetração, falta de fusão, contração de volume (rechupe), porosidade, zona afetada pelo calor e zona fundida. Consiste na análise da seção de um corpo de prova e realizada a olho nu ou com o auxílio de uma lupa.

O processo de confecção da amostra a ser analisada é ilustrado na figura 49.

Figura 49 – Procedimento de metalografia

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3.1 Corte das amostras

O corte da amostra na posição correta é imprescindível para a avaliação por meio de microscopia. Cortou-se a amostra de maneira a ficar deslocada no centro do ponto de solda, pois o material adicional garante que o desgaste sofrido ao lixar e

polir a amostra nas etapas subsequentes garantiu que a análise seja realizada visualizando-se a seção aproximadamente no centro do ponto, vide figura 50.

Figura 50 – Amostra com linha imaginária que representa o corte efetuado nas amostras soldadas para a análise metalográfica

Fonte: Elaborada pelo autor.

O corte foi refrigerado para não gerar aquecimento excessivo visando não alterar a constituição microestrutural da amostra.

5.3.2 Embutimento

Decidiu-se embutir a amostra para facilitar a visualização posterior no microscópio e o embutimento a quente foi o método utilizado. Este método consiste em colocar o corpo de prova com a face de interesse em contato com o êmbolo inferior da máquina de embutimento, conforme figura 51. Após apertar o êmbolo, a resina foi colocada na câmara de embutimento, sendo pressionada por um determinado tempo, tendo sido inserido o polímero baquelite, de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros para embutimento a quente

Tipo de plástico	Cor	Nº de medidas	Pressão (kgf/mm ²)	Tempo de aquecimento (min)	Tempo de resfriamento (min)
Baquelite	Preta	2 a 5	125 a 150	10	5

Fonte: Materiais e Rohde (2009).

Figura 51 – Amostra obtida após o embutimento

Fonte: Elaborada pelo autor.

A importância deste processo para a realização do ensaio macrográfico decorre da facilidade do manuseio das amostras e evitar com que ocorram danos nas lixas de polimento.

5.3.3 Lixamento

O lixamento tem objetivo de eliminar qualquer imperfeição da superfície da amostra, sendo um dos processos mais demorados na preparação das amostras. O procedimento acontece de forma que a granulometria seja aplicada, sendo reduzida até a superfície atingir estado próximo ao polimento. Atentou-se para os fatores para não prejudicar a sequência do ensaio:

- a superfície rigorosamente limpa isenta de líquidos e graxas que pudessem provocar reações químicas na superfície;
- riscos profundos que surgiram durante o lixamento foram eliminados por um novo lixamento.

Existem dois processos de lixamento: manual (úmido ou seco) e automático. Utilizou-se o lixamento manual, ilustrado na figura 52, na qual o rebolo rotaciona e se coloca a amostra em contato com o mesmo e há o desbaste. Este ciclo de desbaste foi repetido, respectivamente, com lixas nas granulometrias 100, 220, 320 e 600.

Figura 52 - Lixadora (esquerda), ilustração da operação de lixamento

Fonte: Materiais e Rohde (2009).

5.3.4 Polimento

A finalidade do polimento é obter uma superfície plana, polida, sem riscos, com o máximo de reflexibilidade. O polimento foi realizado pelo processo mecânico, sendo feito nas lixadoras com a inserção de pasta de diamante, indicada para aços. Antes da realização do polimento as amostras foram limpas de modo que não apresentassem solventes, sujeiras e qualquer substância abrasiva.

5.3.5 Ataque químico

O ataque químico tem como objetivo evidenciar a microestrutura, que poderá ser analisada com a utilização de uma lente de aumento ou observável sem auxílio de lentes. Utilizou-se Nital 2% como reagente para a revelação da microestrutura (BENSCOTER e BRAMFITT) e para obter as imagens foi utilizado o microscópio ótico modelo BX-51 da marca Olympus com câmera fotográfica acoplada.

Após o polimento, as amostras foram lavadas em água corrente e secas, sendo limpas com álcool, secas e essas foram imersas na substância para efetuar o ataque químico.

5.4 ANÁLISE VISUAL

A análise visual é realizada com o objetivo de visualizar marcas provenientes da operação de soldagem na amostra.

Lixou-se a amostra de maneira a deixar a superfície mais reflexiva de forma a revelar a marca térmica de forma inequívoca, conforme figura 53.

Figura 53 – Aspecto das superfícies não lixadas e lixadas

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.5 ENSAIO DIMENSIONAL

No ensaio dimensional foi medido, via microscopia, as características: indentação, largura da zona fundida e diâmetro do ponto, conforme ilustrado na figura 54.

Figura 54 – Características medidas no ensaio dimensional

Fonte: FURLAMENTO, V.

5.6 ENSAIOS MECÂNICOS

5.6.1 Ensaio de cisalhamento

O Ensaio de cisalhamento verificou a resistência dos pontos de solda. Após o ensaio, foi medido o diâmetro mínimo do ponto, que é medido com base no material remanescente na amostra após o ensaio. Para cada grupo de parâmetros, três amostras foram ensaiadas visando determinar a força de resistência ao cisalhamento.

As amostras foram desdobradas manualmente e fixadas nas garras da máquina de tração, vide figura 55. O ensaio de cisalhamento ocorreu por meio da

máquina Kratos, modelo K500/2000, com taxa de deformação de 5 mm/min, o que caracteriza um regime de carga estático, o qual foi tracionado até ruptura total dos pontos.

Figura 55 - Ensaio de cisalhamento executado nas juntas soldadas

Fonte: Elaborada pelo autor.

A figura 56 apresenta a determinação do diâmetro medido após o ensaio de cisalhamento.

Figura 56 – Medição do diâmetro após o ensaio de cisalhamento

Fonte: Volkswagen (2010).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 ANÁLISE VISUAL

O aspecto visual da amostra é importante para a aceitação do produto, sendo assim, é primordial que não haja marcas no lado externo da amostra, conforme requisitos da norma VW 01105-1, em que a classificação da superfície é OG1. Esta classificação diz que a classe de qualidade da superfície se aplica a superfícies de chapas metálicas que, após “acabamento de metal” precisam ser isentas o suficiente de marcas e de impurezas, que são invisíveis após a pintura (área visível). Entretanto, não mais do que 10% da espessura da chapa poderá ser removida do “acabamento metálico”. Marcas superiores a 10% da espessura da chapa devem ser preenchidas, antes do “acabamento metálico” (VOLKSWAGEN, 2010). As superfícies ensaiadas podem ser visualizadas na Tabela 7.

Observou-se que as juntas fabricadas com as configurações de parâmetros 1, 2, 4 e 5, não resultaram em marcações nas faces externas. Porém, ao se soldar com os parâmetros delimitados pelas condições do parâmetro 3, observa-se a marca na face externa.

Tabela 7 - Conjunto de parâmetros, macrografia (a, c, e, g, i) e respectiva superfície do painel externo para a amostra soldada (b, d, f, h, j)

Parâmetros	Macrografia	Superfície Resultante
1	Painel interno
	Painel externo (a)	(b)

2	<p>Painel interno</p> <p>Painel externo</p> <p>(c)</p>	<p>(d)</p>
3	<p>Painel interno</p> <p>Painel externo</p> <p>(e)</p>	<p>(f)</p>
4	<p>Painel interno</p> <p>Painel externo</p> <p>(g)</p>	<p>(h)</p>
5	<p>Painel interno</p> <p>Painel externo</p>

	(i)	(j)
--	-----	-----

Fonte: Elaborada pelo autor.

As marcas são provenientes do aprofundamento do eletrodo na face perante o colapso da superfície, cuja resistência superficial se reduz na medida em que há o aumento da temperatura. Quando o material é aquecido, a força é suficiente para que haja o trabalho na zona plástica do material, portanto se visualiza a marca do eletrodo.

Os resultados da análise visual foram obtidos lixando-se a superfície de maneira a prover maior reflexibilidade à amostra. Considerou-se o lixamento como alternativa viável para a visualização, em função da classificação da superfície como OG1, que exige que as marcas não possam ser superiores a 10% da espessura da amostra. Com a aplicação do método foi possível detectar amostras com marcas térmicas, todas com a configuração de tempo aumentada para 90 ms. O método foi utilizado em escala laboratorial e não é recomendado para um ambiente produtivo em larga escala.

Também se deve considerar que os eletrodos contêm áreas de contatos distintas, assim o desbalanceamento em função da diferença de densidade de corrente que resulta em um perfil térmico não linear. Os resultados sugerem uma troca térmica mais intensa na amostra soldada com os parâmetros da configuração 3, vide figura 57 (b), visualiza-se a presença de grãos colunares, mais alongados, principalmente, na parte inferior da amostra, enquanto são visualizados grãos circulares, recristalizados, de tamanho reduzido na chapa inferior da figura 57 (a), o que propõe uma troca térmica de menor intensidade.

Figura 57 - Macrografias: (a) parâmetro 1 e (b) parâmetro 3, com indicação de grãos colunares e porosidade

(a)

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.2 ANÁLISE DIMENSIONAL

As dimensões obtidas nas medições da análise dimensional estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Resumo dos resultados

Parâmetro		Indentação média	Desvio padrão
	Indentação		
1	0,356	0,45	± 0,11
1	0,388		
1	0,370		
1	0,561		
1	0,604		
2	0,291	0,48	± 0,27
2	0,674		
3	0,65	0,72	± 0,07
3	0,705		
3	0,800		
4	0,472	0,45	± 0,11
4	0,561		
4	0,325		
5	0,210	0,28	± 0,10
5	0,356		

Fonte: Elaborada pelo autor.

O diâmetro do ponto não foi medido via microscopia, pois foi medida a penetração do ponto e a indentação, sendo o resultado exibido na Tabela 8. O formato da zona fundida é assimétrico, conforme observado na figura 58 e a identificação da delimitação aproximada da zona fundida não seria simples, portanto, a decisão foi de medir o diâmetro somente após o ensaio de cisalhamento.

Figura 58 – (a) Micrografia com medidas da zona fundida e (b) indicação da zona fundida na interface das chapas

(a)

(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.3 ENSAIOS MECÂNICOS

No mecanismo de falha no modo de destacamento se espera o espescoçamento na amostra na direção da espessura da chapa, a falha tende a ocorrer nas regiões de menor dureza (POURANVARI *et al.*, 2007). Observa-se à direita, figura 59 (a), o ponto de solda do modo de destacamento e à esquerda, figura 59 (b), verificam-se marcas térmicas, sem fusão entre as chapas, o que caracteriza o modo de falha interfacial.

Figura 59 - Amostras após o ensaio de cisalhamento: (a) falha por destacamento e (b) falha interfacial

(a)

(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 9 é apresentado o resultado do ensaio de cisalhamento, por meio do qual se mediu a força de rompimento, o diâmetro remanescente após o ensaio e o modo de falha.

Tabela 9 - Resultados provenientes do ensaio de cisalhamento: tensão de ruptura e diâmetro após do material remanescente no ponto de solda

Parâmetro	Amostra nº	Tensão de ruptura	Diâmetro após o ensaio	Modo de falha
1	1	1400	3,55	Destacamento
1	2	1090	2,84	Destacamento
1	3	1160	3,18	Destacamento
2	4	1286	3,06	Interfacial
2	5	885	1,91	Interfacial
2	6	1375	3,54	Destacamento
3	7	1475	4,76	Destacamento
3	8	1540	4,89	Destacamento
3	9	1120	3,36	Destacamento
4	10	1740	Rasgou duas chapas	Destacamento
4	11	1260	3,11	Destacamento
4	12	1115	2,86	Destacamento
5	13	730	3,09	Destacamento
5	14	835	4,11	Destacamento
5	15	820	2,56	Destacamento

Fonte: Elaborada pelo autor.

A capacidade de absorver a energia do ponto soldado depende do diâmetro do ponto, da largura da amostra, da taxa de deformação e estes fatores combinados resultam em um determinado modo de falha. Portanto, a figura 60 mostra a relação do diâmetro do ponto de solda, após o ensaio de cisalhamento, força e respectivo modo de falha.

O diâmetro do ponto teórico conforme especificado ISO/DIS 14373 foi calculado para o coeficiente igual a 3,5. Na Equação 4 é possível visualizar o valor do diâmetro, que se estima que este fosse a transição de modo de falha interfacial

para destacamento quanto à ruptura dos pontos de solda. Este coeficiente é aplicado em situações industriais análogas.

$$d_{\min} = 3,5\sqrt{t} \rightarrow d_{\min} = 3,5\sqrt{t} \text{ (4)}.$$

Figura 60 – Força de cisalhamento versus diâmetro após ensaio: (a) falha por destacamento e (b) falha interfacial

Fonte: Elaborada pelo autor.

O ensaio dimensional resultou na avaliação da força de cisalhamento e no diâmetro medido após o ensaio, cujos resultados podem ser visualizados na Tabela 9. Os dados no ensaio foram exibidos, conforme figura 60, na qual se verificou que a força tende a aumentar conforme o diâmetro remanescente medido após o ensaio de cisalhamento aumenta e o modo de falha predominante nas amostras verificado foi o destacamento. E o valor médio da transição de modo de falha que foi estimado em 3,13 milímetros corresponde ao valor aproximado da zona de transição de modos de falhas.

Na figura 61 se tem a variação da força de cisalhamento por parâmetro, para cada amostra medida no ensaio. No parâmetro 4 somente duas amostras foram consideradas. Verifica-se que há uma tendência dos valores do parâmetro 3 em superar os demais, porém os campos de tolerância dos parâmetros se interpenetram.

Figura 61 – Força de cisalhamento versus a quantidade de amostras ensaiadas

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.4 INFLUÊNCIA DA FORÇA ENTRE ELETRODOS

Na Tabela 11 são apresentados os dados dos resultados referentes aos parâmetros 1 e 2, nos quais se alterou a força entre eletrodos (de 0,8 para 1,4 kN).

Tabela 10 - Resultados do ensaio de tração, e diâmetro do ponto após tração e indentação

Parâmetros	Força [kN]	Diâmetro do ponto [mm]	Indentação [mm]
Parâmetro 1	1217 ± 163	3,2 ± 0,36	0,45 ± 0,11
Parâmetro 2	1173 ± 256	2,8 ± 0,83	0,48 ± 0,27

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores de resistência à tração média são maiores para a condição do parâmetro 1 (1217 N contra 1173 N), porém a dispersão dos dados do parâmetro 2 são maiores. Os valores inferiores do parâmetro 2 se devem a maior aplicação de força entre eletrodos, que leva à queda da resistência de contato e, consequentemente, menor quantidade de energia sendo transferida para a amostra.

Na micrografia do parâmetro 1, vide figura 62(a), visualiza-se a zona fundida delimitada e posicionada na parte superior da amostra. Na figura 62(b) são visualizadas as alterações microestruturais em função da energia imposta sobre a amostra, mas não possui zona fundida entre as interfaces e não se visualiza com clareza a área fundida.

Figura 62 - Micrografias de (a) amostra do parâmetro 1 e (b) amostra do parâmetro 2, visualizam-se GC (indica grãos colunares) e visualiza-se zona recristalizada

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.5 INFLUÊNCIA DO TEMPO

A relação entre parâmetros 1 e 3 teve alterado o tempo de 45 segundos para 90 segundos. Na Tabela 11 são apresentados os resultados, podendo-se visualizar a relação da força versus diâmetro do ponto, conforme figura 63 e do diâmetro do ponto versus a indentação, conforme figura 64.

Tabela 11 - Resultados do ensaio de tração, e diâmetro do ponto após tração e indentação

Parâmetros	Força [kN]	Diâmetro do ponto [mm]	Indentação [mm]
Parâmetro 1	1217 ± 163	3,2 ± 0,36	0,45 ± 0,11
Parâmetro 3	1521 ± 226	4,87 ± 0,10	0,72 ± 0,07

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 63 – Força de cisalhamento versus o diâmetro remanescente após o ensaio

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 64 - Diâmetro remanescente após o ensaio versus a indentação

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se visualizar que ao aumentar o tempo se verifica tendência de maiores níveis de força de cisalhamento, maiores diâmetros remanescentes e maior grau de indentação, conforme visualizado nas figuras 63 e 64.

Verifica-se que a energia transferida à amostra foi superior nas juntas da configuração de parâmetros 3, em função de o tempo ter correlação direta com a energia promovida.

Figura 65 – Micrografias de (a) amostra do parâmetro 1 e (b) amostra do parâmetro 3, visualizam-se GC (indica grãos colunares) e visualiza-se zona recristalizada

Fonte: Elaborada pelo autor.

Comparando as figuras 65 (a) e (b) se percebe que há diferenças entre as amostras. Na figura 65 (b), os grãos colunares predominam na chapa inferior, portanto mostra que houve alteração estrutural e maior gradiente térmico. Enquanto na figura 65 (a) se pode observar que há alteração do tamanho dos grãos na chapa inferior, sendo que a recristalização tem maior extensão na micrografia do parâmetro.

A presença de poros é uma situação não ideal, tendo sido detectada a porosidade em uma amostra soldada com as configurações do parâmetro 3, conforme figura 66.

Figura 66 – Amostra produzida com o parâmetro 3 (tempo aumentado) contendo poro na zona fundida

Fonte: Elaborada pelo autor.

A figura 66 apresenta porosidade localizada na zona fundida, sendo uma das amostras configuradas com o parâmetro 3 (tempo 90 ms). Verificou-se que o modo de falha das amostras ocorreu pelo modo de destacamento. Pode-se dizer que o poro pode ter fragilizado a junção, em função da descontinuidade interna, mas não alterou o modo de falha da amostra, que foi igual às demais ensaiadas para a mesma condição. Apesar de não ser uma condição desejável, a falha ocorreu pelo modo destacamento, garantido uma junção dentro de condições aceitáveis, porém se sabe que para aumentar o desempenho da junção, mostra-se necessária a eliminação do poro no interior da amostra.

6.6 INFLUÊNCIA DA CORRENTE ELÉTRICA

Os resultados da influência da corrente elétrica estão expostos conforme Tabela 12 e figura 67.

Tabela 12 - Resultados do ensaio de tração, e diâmetro do ponto após tração e indentação

Parâmetros	Força [kN]	Diâmetro do ponto [mm]	Indentação [mm]
Parâmetro 1	1217 ±163	3,2 ±0,36	0,45 ±0,11
Parâmetro 4	1400 ±295	3,0 ±0,13	0,45 ±0,11

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 67 - Comparação da força de cisalhamento com relação aos parâmetros 1 e 4

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir dos resultados apresentados na tabela 12, nota-se que os valores do parâmetro 4 quanto à resistência ao cisalhamento tendem a superar valores do parâmetro 1. Porém analisando-se o diâmetro do ponto e indentação, os valores são equivalentes.

Figura 68 - Micrografias de (a) amostra do parâmetro 1 e (b) amostra do parâmetro 4, visualizam-se GC (indica grãos colunares) e visualiza-se zona recristalizada

Fonte: Elaborada pelo autor.

Comparando-se as micrografias, a do parâmetro 4, figura 68(b) tem maior zona fundida, não sendo possível ver a divisão entre as chapas, a zona fundida distribui-se por toda a amostra visualizada. Na figura 68(a), é possível perceber que a zona fundida se concentra mais na parte superior da amostra, tendo área de união das interfaces soldadas menor.

6.7 INFLUÊNCIA DA INVERSÃO DA POLARIDADE

Os resultados apresentados na Tabela 13 e figuras 69 e 70 mostram os valores obtidos no ensaio de cisalhamento e o diâmetro do ponto após ensaio e da indentação.

Tabela 13 - Resultado ensaio de tração e diâmetro do ponto após tração e indentação

Ensaio	Força [kN]	Diâmetro do ponto [mm]	Indentação [mm]
Parâmetro 1	1217 ±163	3,2 ±0,36	0,45 ±0,11
Parâmetro 5	795 ±57	3,25 ±0,79	0,28 ±0,10

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 69 – Indentação versus Diâmetro remanescente após o ensaio

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 70 – Força de cisalhamento versus o diâmetro remanescente medido após o ensaio

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores para a indentação na condição de corrente de polaridade invertida, parâmetro 1, possui amplitude maior, com valores inferiores quanto ao diâmetro do ponto medido após o ensaio e a indentação. A força de cisalhamento é maior para a condição do parâmetro 1.

A força de cisalhamento é proporcional ao diâmetro do ponto soldado, e o fato desta relação não ser atendida pode ser entendido visualizando-se os resultados na figura 71.

Figura 71 – Micrografias indicando a posição da zona fundida: (a.1) parâmetro 1 e (b.1) parâmetro 5 e seus respectivos aspectos visuais após o ensaio cisalhamento, (a.2) e (b.2)

Fonte: Elaborada pelo autor.

A zona fundida tem diferentes formatos e áreas de fusão nas interfaces das chapas. Sendo a figura 71 (a.1) do parâmetro 1, o que tem a zona fundida destacada e a interface representada por d_L , assim como ocorre na figura 71 (b.1), na qual se visualiza a micrografia de uma amostra configurada com o parâmetro 5 e a zona fundida segue destacada, visualiza-se um formato diferente mais compacto, no qual a interface unida tem menor extensão.

Visualiza-se conforme demonstra a figura 69, que o formato imposto ao ponto de solda, pela condição do parâmetro 5, favorece maiores diâmetros de pontos de solda remanescentes, visto que em grande parte a zona fundida está

localizada na parte superior da amostra, e após o ensaio se verificou que parte da zona fundida ficou aderida na chapa da amostra ensaiada, conforme figura 69 (b.2).

7 CONCLUSÕES

A partir dos materiais, processos, parâmetros empregados e das técnicas experimentais adotadas neste estudo, foi possível concluir que:

- A solda ponto executada por eletrodos com diferentes áreas de contato alteram o formato da zona fundida.
- Verificou-se que o modo de falha da amostra solicitada à tração altera conforme a dimensão do diâmetro da solda remanescente após o ensaio de cisalhamento aumenta. O modo de falha de destacamento é predominantemente.
- A força de cisalhamento é proporcional ao diâmetro remanescente após o ensaio de cisalhamento, válido as condições soldadas com ou sem a inversão do sentido da corrente elétrica.
- O aumento da força entre eletrodos, de 0,8 kN para 1,4 kN, pode demonstrar uma tendência a decrescer a resistência mecânica, diâmetro do ponto e da indentação. Não houve marcas do eletrodo, atendendo ao requisito visual.
- Com o aumento do tempo de soldagem, de 45 para 90 milissegundos, verificou-se tendência a maiores forças de cisalhamento, maiores diâmetros remanescentes do ensaio de cisalhamento, maiores indentações e as amostras possuem marcas de eletrodos, não atendendo ao requisito visual.
- Com o aumento da corrente de soldagem, de 6,2KA para 7,0kA, a resistência mecânica, diâmetro remanescente após o ensaio e a indentação não apresentaram significativa alteração e não houve marcas do eletrodo, sendo o requisito visual atendido.
- O deslocamento da massa fundida, na direção do eletrodo carregado positivamente, foi constatado com a inversão da polaridade de corrente. A resistência mecânica não tem relação com diâmetro do ponto medido após o ensaio de tração e o mesmo tratamento se estende à indentação.

8 SUGESTAO DE TRABALHOS FUTUROS

Influência da forma de onda na soldagem a ponto por resistência elétrica

Estudar o deslocamento da zona fundida sendo alteradas as densidades de corrente.

REFERÊNCIAS

1. ABB. Spot Welding Equipment. Disponível em: <<https://new.abb.com/products/robotics/application-equipment-and-accessories/spot-welding-equipment>>. Acesso em: 15 Junho 2018.
2. ANFAVEA. Estatísticas, 2018 Maio 2018. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/estatisticas-copiar.html>>.
3. 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, 2006. 125-133 p.
4. AWS. **Welding Handbook**. 9. ed. [S.l.]: [s.n.], v. 2, 2007.
5. BATISTA, M. **Estudo comparativo da soldabilidade de chapas para indústria automotiva utilizando dois equipamentos de soldagem a ponto por resistência**. Dissertação de mestrado - São Paulo. 2011. 20-22 p.
6. BATISTA, M.; BRANDI, S. D. Use of Dynamic Resistance And Dynamic Energy to Compare Two Resistance Spot Welding Equipments for Automotive Industry In Zinc Coated And Uncoated Sheets. **Journal of Engineering Research (AJER)**, v. 02, 2013. 79-93 p.
7. BENSCOTER, B.; BRAMFITT, A. **-Metallographer's Guide Practices and Procedures for Irons and Steels**. [S.l.]: [s.n.].
8. CARRÃO PEÇAS. Carrão Peças. Disponível em: <<http://www.carraopecas.com.br/capo-dianteiro-gol-g3-2000-2001-2002-2003-2004-2005-importado.html>>. Acesso em: 10 Agosto 2018.
9. CARVALHO, J. R. P. D. *et al.* Evaluation of nugget formation n resistance spotwelding process of galvanized sheet. **COBEM 2009**, Gramado, 2009. 15-20 p.
10. CHAO, Y. J. Ultimate Strenght and Failure Mechanism of Resistance Spot Weld Subjected to Tensile, Shear, or Combined Tensile/Shear Loads. **Journal of Enginnering Materials and Technolgy**, v. 125, Abril 2003. 125-132 p.
11. CHARDE, N. Spot weld growth on medium carbon steel. Part2: Servo based electrode atuation system. **Welding and Material Testing**, v. 2, 2016. 8 p.
12. CORE Tech, 2018. Disponível em: <http://core-t.co.kr/eng/02_business/?mcode=0502010000>. Acesso em: Junho 23.

13. DICKINSON, D. W.; FRANKLIN, J. E.; STANYA, A. **Characterization of Spot Welding Behavior by Dynamic Electrical Parameter Monitoring**. New York: WRC Bulletin 254, 1980. 170-s-176-s.
14. DIN - GERMAN INSTITUTE FOR STANDARDIZATION. **DIN EN 10346 - Continuously hot-dip coated steel flat products - Technical delivery conditions**. English version of DIN EN 10346:2009-07. 2009. 42 p.
15. DONDERSA, S. *et al.* The robustness of dynamic vehicle performance to spot weld failures. **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 42, 2006. 670 – 682 p.
16. ERSOY, ; ERTUGRUL, ; AYGUL,. The Methods Used in the Automotive Production: Hemming Operations Planning. **Engineering and Applied Sciences**, v. 2, n. 6, 2017. 103-106 p. Disponível em: <<http://www.sciencepublishinggroup.com/j/eas>>.
17. EUROPEAN ASSOCIATION ALUMINIUM. The Aluminium Automotive Manual, 2015. 66 p.
18. FIAT AUTOMÓVEIS. **Fiat Automóveis**, 2017. Disponível em: <<http://www.fiat.com.br/institucional/processo-produtivo.html>>.
19. FURLANETTO, V. Desenvolvimento e instrumentação de um cabeçote de soldagem a ponto por resistência elétrica para aplicação em condições industriais. Tese de doutorado - São Paulo, 2014. 280 p.
20. GEDEON, S. A. *et al.* **Measurement of Dynamic and Mechanical Properties of Resistance Spot Welds**. New York: WRC Bulletin 322, 1987. 378-s-385-s.
21. GESLAINA, E. *et al.* Coating effects on contact conditions in resistance spot weldability. **Journal of Materials Processing Tech.**, v. 253, 2017. 160-167 p.
22. GOULD, J. E.; KHURANA, S. P.; LI, T. Predictions of Microstructures when Welding Automotive Advanced High-Strength Steels. **Welding Journal**, v. 85. 111-s - 116-s.
23. ISPAT Guru, 15 Junho 2018. Disponível em: <<http://www.ispatguru.com/steels-for-automotive-applications/>>.
24. JONKERS, B. **Simulation of the Robot Roller Hemming process**. Voestalpine Polynorm Automotive. Dissertação de mestrado – Universidade de Twente, 2006. 104 p.

25. KHAN, M. I.; KUNTZ, M. L.; ZHOU, Y. Effects of weld microstructure on static and impact performance of resistance spot welded joints in advanced high strength steels. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 13, 2008. 294-304 p.
26. KIM, E. W.; EAGAR, T. W. Parametric Analysis of Resistance Spot Welding Lobe Curve. Massachusetts: **Sae Technical Paper Series**. 1998. 1-12 p.
27. LI, *et al.* Numerical Analysis of Transport Phenomena in Resistance Spot Welding Process. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, 2011. 133 p.
28. LI, Y. *et al.* Failure Mode Transition of TripleThinSheet Aluminum Alloy Resistance Spot Welds under TensileShear. **Welding Journal**. 475-490 p.
29. MATERIAIS, L. L. D. E. M. E.; ROHDE, A. **Metalografia Preparação de amostras**. LEMM Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais. [S.I.]. 2009.
30. MINISTÉRIO DA ECONOMIA. Ministério da Economia - Indústria, Comércio Exterior e Serviços, 30 Maio 2019. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/index.php/competitividade-industrial/setor-automotivo>>.
31. NAKANO, R. K. Influência da taxa de deformação na falha de uniões por solda a ponto. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, 2005. 75 p.
32. ORGANIZATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION. Resistance welding — Testing of welds — Peel and chisel testing of resistance spot and projection welds, 2015. Disponível em: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10447:ed-3:v1:en>>. Acesso em: 10 Janeiro 2017.
33. PENTEADO, K. M. Otimização da Solda de Pontos por Resistência Elétrica na Liga de Alumínio 5032-H32 através do Projeto e Análise de Experimentos (DOE). Dissertação de mestrado. Itajubá, 2011. 32-40 p.
34. POURANVARI, ; MARASHI, S. P. H. On the failure of low carbon steel resistance spot welds in quasi-static tensile–shear loading. **Materials and Design**, v. 31, 2010. 3647–3652 p.

35. POURANVARI, M. *et al.* Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 12, 2007. 217-225 p.
36. POURANVARI, M.; MARASHI, S. P. H. Factors affecting mechanical properties of resistance spot welds. **Materials Science and Technology**, v. 26, 2010. 1137-1144 p.
37. POURANVARI, M.; RANJBARNODEH, E. Resistance Spot Welding Characteristic of Ferrite-Martensite DP600 Dual Phase Advanced High Strength Steel-PartII: Failure Mode. **World Applied Sciences Journal**, v. 15, 2011. 1527-1531 p.
38. RUIZ, D. C. **Contribuição ao Desenvolvimento de Processos de Montagem e Soldagem de Carrocerias Automotivas**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005. 127 p.
39. RUIZ, D. C.; BATALHA, G. Estudo de um critério de modo de falha para a solda a ponto por resistência, Joinville, 2005.
40. RUIZ, D. C.; BATALHA, G. F. **Desenvolvimento de critério de falha de solda a ponto para montagem de carroceria automotiva**. COBEF 2007. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007. 11 p.
41. SAKURAMOTO, C. Automotive Skin Panels Quality Improvement b Means of Finite Element Method. **Congresso SAE Internacional**, 2013. 18 p.
42. STATISTA. Worldwide automobile production throught 2018, 30 Maio 2019. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/262747/worldwide-automobile-production-since-2000/>>.
43. TARISMER, I. *et al.* A case study of a new spot welding elde which the best current density by magnetic solutions. **Journal of Electrical Engineering**, v. 62, 2011. 233-238 p.
44. USIMINAS. Laminados a frio. **www.usiminas.com**. Disponível em: <<http://usiminas.com/wp-content/uploads/2014/02/novo-laminados-frio-v20-baixa.pdf>>. Acesso em: 10 Janeiro 2017.
45. VOLKSWAGEN. **Norma VW 01105-1 Solda por pontos a resistência**. 2010.
46. WILLIAMS, N. T.; PARKER, J. D. Review of resistance spot welding of steel sheets: Part 1 Modelling and control of weld nugget formation. **International Materials Review**, v. 49, 2004.

47. ZHANG, H.; SENKARA, J. **Resistance Welding**. Primeira Edição. Boca Raton, Flórida, USA. Taylor & Franics Group, 2006.
48. , ; HU, S. J.; ZHANG,. Critical Specimen Sizes for Tensile-Shear Testing of Steel Sheets. **Welding Research Supplement**, v. 78, 1999. 305s-313s.
49. ZHOU, ; YAO,. Overview of recent advances of process analysis and quality control in resistance spot welding. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 124, 2018. 170-198 p.