

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS PONTOS DE SOLDA POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA
PELO MÉTODO DO ULTRASSOM NA LINHA DE MONTAGEM DE UMA CARROCERIA

por

Rodrigo da Silva Lopes

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2017.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS PONTOS DE SOLDA POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA
PELO MÉTODO DO ULTRASSOM NA LINHA DE MONTAGEM DE UMA CARROCERIA

por

Rodrigo da Silva Lopes

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Thammy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. José Antônio E. Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. Cintia C. Petry Mazzaferro

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 7, dezembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por sempre me dar forças para seguir rumo aos meus objetivos;

À minha família, por todo o suporte prestado durante toda a graduação;

À minha namorada Sabrina, por todo o auxílio e apoio durante o trabalho;

José Antônio E. Mazzaferro, por todo o apoio como orientador deste trabalho;

Aos meus colegas de trabalho, por todo o auxílio prestado nos testes destrutivos e análises referentes ao trabalho.

Aos meus amigos, por todos os conselhos, conversas e companheirismo durante a graduação.

LOPES, R. S. **Avaliação da qualidade dos pontos de solda por resistência elétrica pelo método do ultrassom na linha de montagem de uma carroceria**. 2017. 21. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

Este trabalho foi realizado com o objetivo de analisar os pontos de solda da parte frontal da carroceria de um modelo de carro em sua linha de produção e verificar sua integridade por meio de ensaios destrutivos de cisalhamento e arrancamento. Primeiramente, a qualidade superficial dos pontos de solda foi verificada visualmente na linha de produção. Para analisar a integridade dos pontos, foi utilizado um equipamento de ultrassom e posteriormente foram realizados ensaios de cisalhamento e arrancamento com o objetivo de comparar as tensões máximas cisalhantes entre pontos que foram aprovados em testes destrutivos com martelo e talhadeira e pontos de solda que foram reprovados nos testes realizados com o ultrassom. Nos testes comparativos, os pontos de solda que foram reprovados nos testes com ultrassom apresentaram tensões máximas cisalhantes menores aos aprovados nos ensaios destrutivos, mostrando a efetividade do método na análise da integridade dos pontos de solda por resistência elétrica.

PALAVRAS-CHAVE: Solda ponto, linha de produção, ultrassom.

LOPES, R.S **Evaluation of the quality of resistance welding points by the ultrasound method in the production line of a vehicle body.** 2017. 21. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

This study was conducted with the aim of analyzing the weld points on the front of the vehicle body in its production line and verify the integrity of the weld points using shear and detachment tests. Firstly, the surface quality of the weld points was analyzed visually on the production line. In order to analyze the integrity of the weld points, an ultrasound equipment was used, followed by shear and detachment tests in order to compare the maximum shear stresses between points that were approved in destruction tests using a hammer and a slitter and weld points that were rejected using the ultrasound. In comparative tests, the weld points that were rejected by the ultrasound tests exhibit stresses smaller than the weld points who were approved in the destruction tests, showing the effectiveness of the ultrasound method as a method to analyze the integrity of resistance welding points.

KEYWORDS: Resistance welding, production line, ultrasound.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
2.1 Fundamentos de operação	1
2.2 Equipamentos	1
2.3 Principais variáveis do processo	2
2.3.1 Energia para fusão	2
2.3.2 Força dos eletrodos e resistência elétrica	2
2.3.3 Corrente elétrica e tempo de soldagem	3
2.3.4 Ciclo de soldagem	3
2.4 Qualidade no ponto de solda	4
2.4.1 Ensaios destrutivos	5
2.4.2 Ensaios não-destrutivos	6
3. METODOLOGIA	6
3.1 Análise visual dos pontos de solda na carroceria	7
3.2 Análise por ultrassom	8
3.3 Confecção dos corpos de prova	8
3.4 Ensaios comparativos de tensão de cisalhamento e arrancamento	10
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
5. CONCLUSÕES	14
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho abordará o processo de soldagem por resistência elétrica, com foco na avaliação da integridade dos pontos de solda da parte frontal da carroceria de um modelo de carro em sua linha de montagem. O objetivo do trabalho é analisar por meios empíricos e por ultrassom os pontos de solda da carroceria. Os pontos de solda serão submetidos a testes com o ultrassom na linha de montagem para a avaliação de sua integridade. A partir dos resultados obtidos, os pontos reprovados nos testes de ultrassom serão reproduzidos em corpos de prova a fim de uma análise mais completa por meio de ensaios destrutivos de cisalhamento e arrancamento. A análise se dará por comparação das tensões máximas cisalhantes entre pontos de mesma composição de chapas reprovados no ultrassom e pontos aprovados em ensaios destrutivos com martelo e talhadeira a fim de averiguar a efetividade do ultrassom como meio de avaliação de pontos de solda por resistência elétrica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FUNDAMENTOS DE OPERAÇÃO

A soldagem a ponto por resistência elétrica pode ser executada manualmente, por robô ou por máquina estacionária. Pontos de solda similares com mesmas propriedades podem ser obtidos com altas velocidades de produção controlando automaticamente a corrente, força dos eletrodos e o tempo de soldagem. A baixa tensão e a alta intensidade de corrente elétrica para o processo de soldagem são obtidas pelos transformadores e a pressão exercida pelos eletrodos é obtida por dispositivos, que podem ser mecânicos, pneumáticos ou hidráulicos (Aslanlar et al, 2007).

A circulação de corrente elétrica entre os eletrodos de contato com as peças gera, por efeito Joule, uma quantidade de calor na resistência de contato entre as superfícies, provocando a elevação de temperatura e iniciando a fusão dos metais (Kearns, 1984), efeito que pode ser visualizado na Figura 2.1.

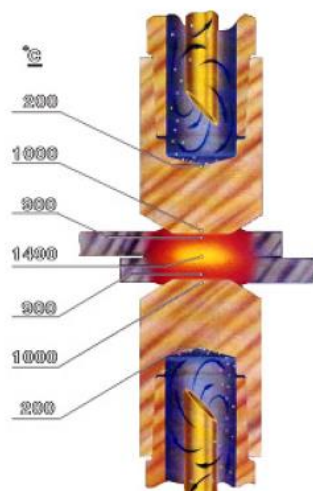


Figura 2.1: Formação do ponto de solda em duas chapas metálicas (Furlanetto, 2005).

2.2 EQUIPAMENTOS

Conforme ilustrado na Figura 2.2, um equipamento de soldagem por resistência elétrica é composto pelos seguintes componentes (Pinheiro, 2010):

- Um transformador de soldagem (TR);

- Retificador Controlado de Silício, (Silicon Controlled Rectifier, SCR);
- Controlador de soldagem;
- Pinça de soldagem.

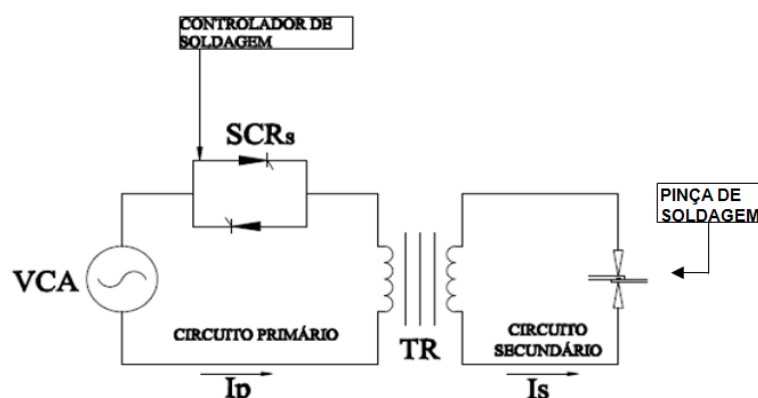


Figura 2.2: Representação dos principais componentes de um equipamento de soldagem por resistência elétrica (Pinheiro, 2010).

O transformador de solda é responsável pela redução de tensão e aumento da corrente, conforme solicitado pelo controlador de soldagem. O Retificador Controlado de Silício é responsável por energizar o transformador de soldagem, conforme solicitado pelo controlador de soldagem: o controlador é onde estão conectados todos os sinais de acionamentos e sinais de saída do equipamento (Pinheiro, 2010). Assim, o Retificador Controlado de Silício tem um papel de suma importância no processo de soldagem pois é através dele que são definidos os parâmetros de soldagem que serão usados como tempo de soldagem, força de fechamento dos eletrodos, corrente elétrica, entre outros. A pinça de soldagem tem como objetivo forçar o fechamento das duas chapas, usando uma força predeterminada.

2.3 PRINCIPAIS VARIÁVEIS DO PROCESSO

2.3.1 Energia para fusão

Segundo Machado, I.G., 1996, a energia para a fusão e formação do ponto, é gerada nos contatos elétricos (eletrodos) e nas peças. A mesma pode ser obtida pela equação da Lei de Joule (Equação 2.1).

$$Q = \frac{r}{J} \times \int_0^t I^2 \times R \times dt \quad (2.1)$$

Onde: Q = Energia, R = Resistência elétrica, I = Intensidade de corrente, t = Tempo de solda, J = Constante (4,185 J), r = Rendimento térmico (perdas por radiação e condução).

2.3.2 Força dos eletrodos e resistência elétrica

A força exercida pelos eletrodos sobre as peças resulta numa pressão, a qual altera a resistência elétrica de contato e a circulação de corrente na interface das mesmas (Machado, 1996).

A resistência elétrica total no processo de solda ponto é a soma das resistências em série, conforme a Figura 2.3.

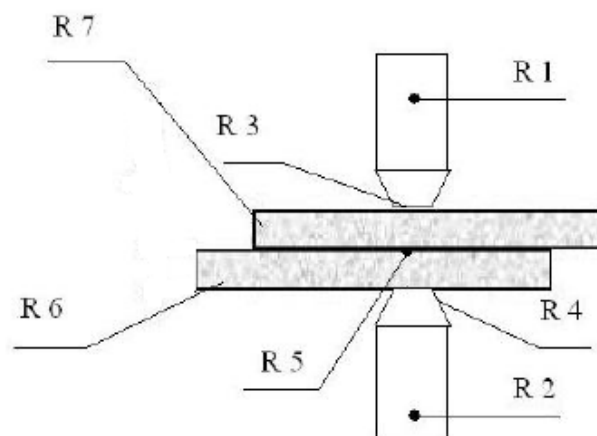


Figura 2.3: Resistências elétricas no processo de solda ponto (Stocco, 2010, modificado).

Observando a Figura 2.3, temos:

- R1 e R2: Resistências elétricas dos próprios eletrodos;
- R3 e R4: Resistências elétricas que se formam no contato peça-eletrodo;
- R5: Resistência elétrica que se forma no contato entre as chapas;
- R6 e R7: Resistência elétrica das próprias chapas.

Os eletrodos são fabricados com matérias de fácil deformação e que tem uma baixa resistência elétrica, garantindo um bom assentamento na superfície da chapa. Estes dois fatores fazem com que as resistências R1, R2, R3 e R4 sejam minimizadas e que pouca quantidade de calor seja gerada nessas regiões (Nascimento, 2008).

O valor de R5 deve ser o maior de todos, portanto é nesta região que haverá maior geração de calor por efeito Joule e conseqüentemente a fusão e formação do ponto de solda (Stocco, 2010). As resistências R6 e R7 são determinadas pela composição química e propriedades elétricas dos materiais a serem soldados.

2.3.3 Corrente elétrica e tempo de soldagem

O fato da corrente elétrica atuar elevada ao quadrado (Equação 2.1), faz com que a mesma seja o principal fator a ser considerado na taxa com que a solda é realizada. É, portanto, um parâmetro crítico. Flutuações na corrente podem diminuir a qualidade, ou mesmo desqualificar a junta, sendo as mesmas devidas, principalmente, à oscilação da tensão na rede e alterações na impedância do circuito secundário, quando a corrente alternada é usada (Machado, 1996). A Figura 2.4 ilustra correntes e tempos de soldagem para soldagem a ponto sobre chapas de aço carbono, com espessuras entre 0,5 e 3,5 mm.

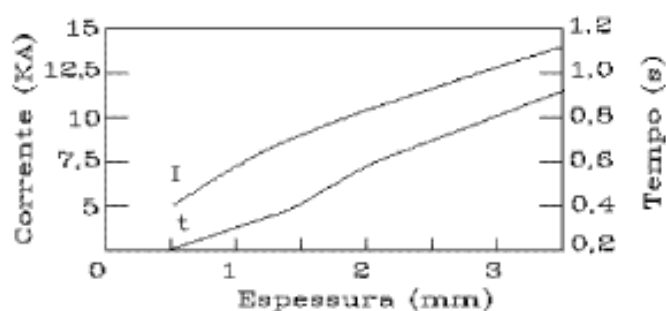


Figura 2.4: Corrente (I) e Tempo de soldagem (t) para diferentes espessuras de chapas de aço carbono (Machado, 1996).

2.3.4 Ciclo de soldagem

O ciclo de um processo de soldagem a ponto é descrito na Figura 2.5.

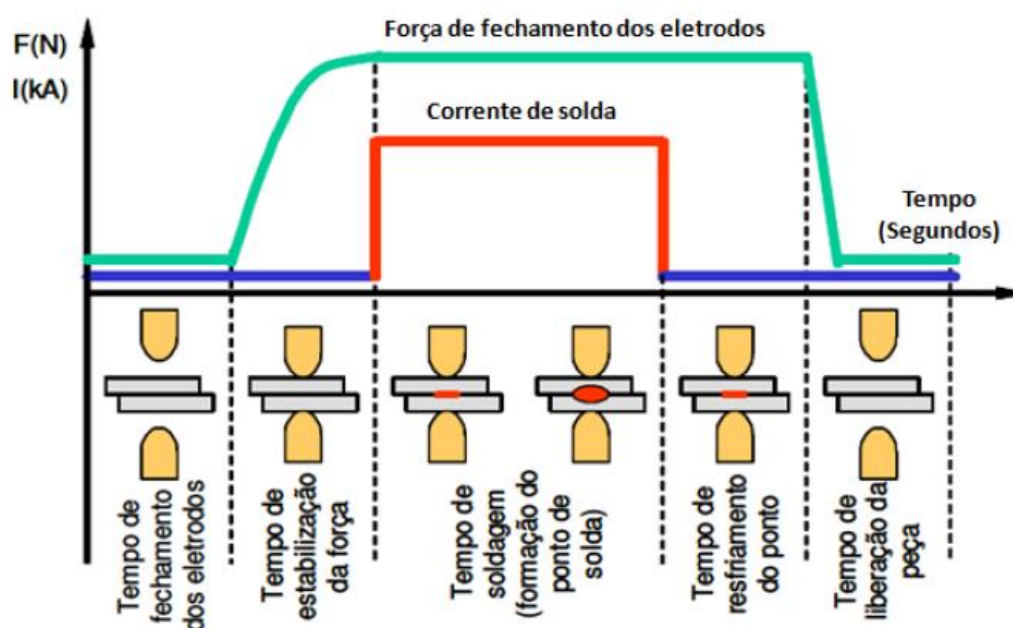


Figura 2.5: Esquemática do processo de soldagem a ponto (Batista, 2011).

O ciclo de soldagem é dividido em 4 etapas (Machado, 1996):

- Fase de Compressão: é o intervalo de tempo compreendido entre o início da operação e o início da passagem de corrente, no qual pelo menos um eletrodo se movimenta e pressiona as chapas contra o outro. Na Figura 2.5, esta fase representa o tempo de fechamento dos eletrodos e o tempo de estabilização da força;
- Fase de Soldagem: é o intervalo de tempo em que a corrente circula e ocorre a fusão, formando o ponto;
- Fase de Manutenção: também chamada de resfriamento, é o intervalo de tempo no qual, após a corrente ter sido interrompida, os eletrodos continuam a pressionar as chapas, até a completa solidificação do metal do ponto;
- Fase de Espera: designa o intervalo e tempo entre a solda e a próxima, a qual geralmente empregará as mesmas condições de soldagem.

Para uma mínima ZAC (Zona Afetada pelo Calor) e máxima produtividade, são utilizados os mais curtos períodos de tempo de soldagem possíveis, se enfatizando a reprodutibilidade da solda (Machado, 1996).

2.4 QUALIDADE DO PONTO DE SOLDA

A qualidade do ponto de solda é determinada principalmente pelos parâmetros do processo e pelas propriedades físicas e mecânicas do material a ser soldado, da região fundida e da zona afetada pelo calor. Assim, é de suma importância que a solda tenha todos os seus parâmetros adequados à solda que será realizada. Também é fundamental que o ponto tenha dimensões corretas e que sua ZAC seja de um tamanho adequado para a soldagem dos materiais ocorrer corretamente. Além disso, rebarbas, respingos ou mesmo indentações excessivas são fatores que podem contribuir para alterações nas propriedades mecânicas do ponto e devem ser evitados no processo.

Na indústria automotiva, manter os pontos de solda em boa qualidade é um fator importantíssimo para todo o processo produtivo. Além de afetar diretamente a segurança do

cliente, visto que uma soldagem não adequada pode levar a um acidente de proporções enormes, ter um processo robusto e sem muitas variações é vital para a produtividade da indústria, o que afeta o custo de produção dos automóveis. Para conseguir chegar a esse patamar em termos de processo, muitas fábricas investem em robôs de última geração para efetuarem a soldagem da carroceria. Ensaaios destrutivos e não-destrutivos também são feitos regularmente a fim de verificar a qualidade dos pontos de solda.

2.4.1 Ensaios destrutivos

Os ensaios destrutivos têm um elevado custo para a indústria, sendo feitos geralmente com uma periodicidade menor, pois requerem muitas vezes a destruição completa de uma carroceria. Os testes destrutivos mais comuns feitos pela indústria automotiva são:

- Teste com talhadeira e martelo: este teste tem como objetivo de verificar se ocorreu fusão no ponto de solda. É um método bastante simples e é bastante dependente do operador, que identifica defeitos visíveis e que podem prejudicar a qualidade da solda. O método baseia-se na introdução de uma talhadeira entre as chapas soldadas, em uma região próxima ao ponto de solda, e então, com um martelo, o operador bate na talhadeira com o objetivo de destacar o ponto de solda. Na Figura 2.6, pode-se observar a metodologia do teste.

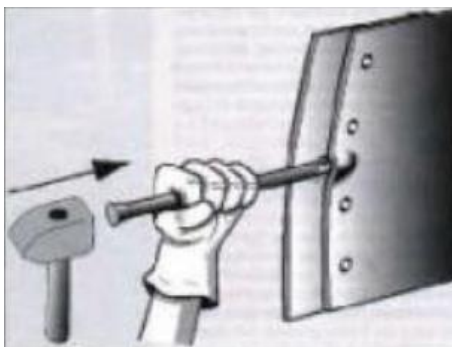


Figura 2.6: Representação do posicionamento da talhadeira entre as chapas (Stocco e Gonçalves, 2003).

- Teste de arrancamento: este teste tem por objetivo determinar o diâmetro do ponto e a ocorrência de fusão entre as chapas. É um teste simples e de fácil execução, mas que geralmente envolve um custo elevado devido a destruição de uma carroceria, porém também pode ser feito com corpos-de-prova para baratear o custo. Este teste consiste na fixação dos corpos-de-prova em um dispositivo de fixação e com o auxílio de uma ferramenta adequada, são dobrados, fazendo-se o arrancamento da lente. Em seguida, mede-se com um paquímetro o diâmetro do botão de solda em duas direções perpendiculares. A qualidade da solda é avaliada pelo diâmetro da lente de solda que ficará aderido a uma das partes após a separação (Powell, H.J., *et. al.*, 1996). Na figura 2.7 pode-se ver a metodologia do teste.

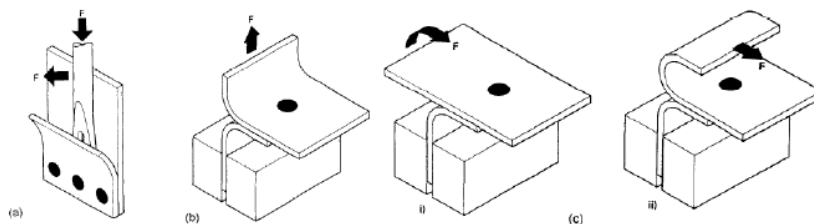


Figura 2.7: Testes de arrancamento com chave tipo pé de cabra (a), teste mecânico (b), teste de destacamento (c) (Powell, *et. al.*, 1996, modificado).

- Teste por tensão cisalhante: este teste consiste na aplicação de forças de direções contrárias nas peças soldadas. Forças opostas e paralelas agem na superfície da peça. O corpo-de-prova é submetido ao carregamento até sua ruptura. A análise é feita em função do valor máximo de carga utilizado até o rompimento do ponto de solda. Na Figura 2.8, pode-se observar como o teste é realizado.

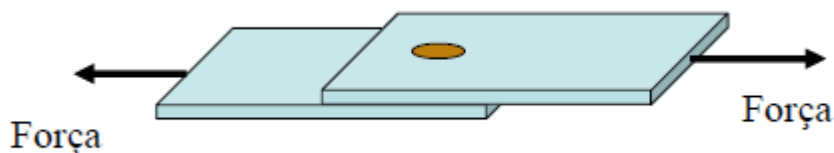


Figura 2.8: Teste por cisalhamento (Aures, 2006)

2.4.2 Ensaio não-destrutivo

Na indústria automobilística, o ensaio não-destrutivo mais comum é a verificação por ultrassom.

No teste com ultrassom, o operador aprova ou reprova o ponto de solda com o auxílio da análise ultrassônica do ponto. Os equipamentos de ultrassom geralmente permitem a verificação do ponto de solda fornecendo imagens que são de fácil compreensão. Nesses equipamentos, é possível avaliar a penetração da indentação e o diâmetro do ponto de solda. Na Figura 2.9 tem-se uma imagem da tela de um aparelho de ultrassom, onde pode-se analisar a área fundida do ponto (em verde), o diâmetro dessa área e qual a indentação correspondente.

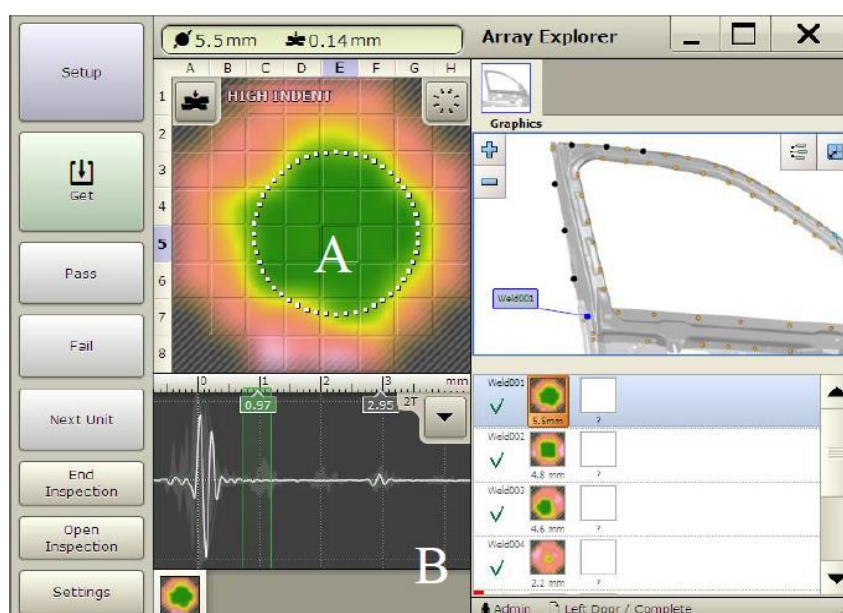


Figura 2.9: Imagem da tela do equipamento mostrando a imagem gerada do ponto em análise (Stocco, 2010).

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para elaboração do trabalho segue o fluxograma apresentado na Figura 3.1.

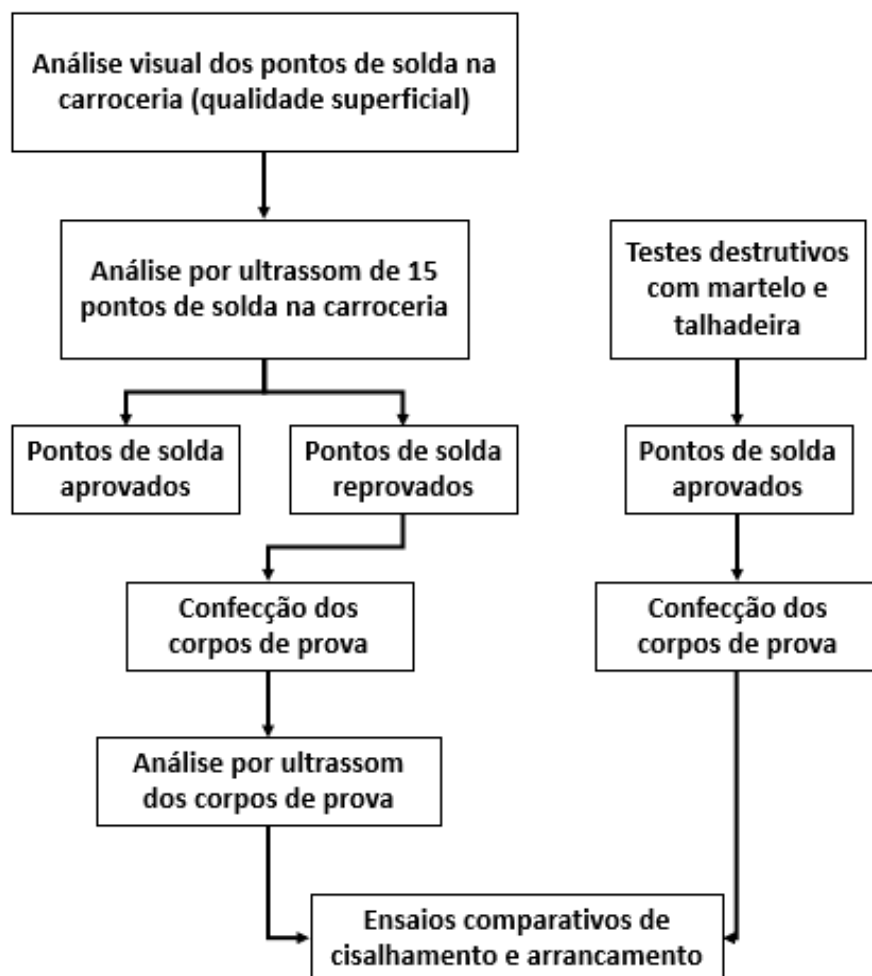


Figura 3.1: Fluxograma com a metodologia do trabalho.

3.1 ANÁLISE VISUAL DOS PONTOS DE SOLDA NA CARROCERIA

Primeiramente, foi separada na linha de montagem de um modelo de carro a parte frontal de sua carroceria, como visto na Figura 3.2.



Figura 3.2: Parte frontal da carroceria.

Nessa etapa, foi analisada a qualidade superficial dos pontos de solda a fim de encontrar algumas discrepâncias no processo de soldagem, tais como rebarbas, respingo de solda, entre outras.

3.2 ANÁLISE POR ULTRASSOM

Foram selecionados 15 pontos de solda para análise. Os critérios usados para a escolha dos pontos foram a combinação de chapas, nº de chapas soldadas, localização do ponto e histórico de falha.

O equipamento de ultrassom é da marca Tessonics, modelo RSWA (Figura 3.3). É projetado para ajudar no controle de qualidade na indústria. Esse equipamento usa a tecnologia de transdutor de matriz ultrassônica multicanal, coletando dados da superfície e das estruturas internas do ponto de solda afim de estimar um diâmetro para o ponto. É usado em chapas com espessura entre 0,6 e 2,4 mm e em praticamente todos os tipos de aço.



Figura 3.3: Equipamento usado nos testes com ultrassom

3.3 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram separados em dois grupos distintos. O primeiro grupo contém pontos de solda aprovados em testes destrutivos com martelo e talhadeira. O segundo grupo contempla pontos reprovados nos testes de ultrassom. Cada grupo possui dois corpos de prova com diferentes combinações de chapas.

Para a confecção desses dois tipos de corpos de prova, foram usadas combinações de chapas idênticas às analisadas na linha de montagem da carroceria.

A confecção dos corpos de prova baseou-se em duas normas de uma grande montadora de automóveis:

- a) GMW4491M – Arc Spot, Plug and Slot Welding Specification
- b) GMW14057 – Weld Acceptance Criteria and Repair Procedures

As especificações das chapas usadas para a confecção dos corpos de prova são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: especificações das chapas.

Chapa	Largura (mm)	Espessura (mm)	Material
Longarina	40	1,2	Aço de alta resistência (C: 0,12%; Mn: 1,60%; P: 0,03%; S: 0,03%; Al: 0,015%; Si: 0,60%)
Assoalho (chapa lateral)	60	0,7	Aço de baixo carbono (C: 0,10%; Mn: 0,50%; P: 0,025%; S: 0,02%; Al: 0,015%)
Assoalho (chapa central)	60	0,9	Aço de alta resistência (C: 0,12%; Mn: 1,50%; P: 0,03%; S: 0,03%; Al: 0,015%; Si: 0,50%)
Túnel	60	0,9	Aço de alta resistência (C: 0,12%; Mn: 1,50%; P: 0,03%; S: 0,03%; Al: 0,015%; Si: 0,50%)

Foi necessária uma adaptação nos corpos de prova, pois a máquina de tração disponível permitia uma largura máxima de 25 mm por corpo de prova. Sendo assim, os corpos de prova foram produzidos com um adaptador para máquina em formato cônico soldado na chapa nas duas extremidades das chapas com solda MAG, como esquematizado na Figura 3.4.

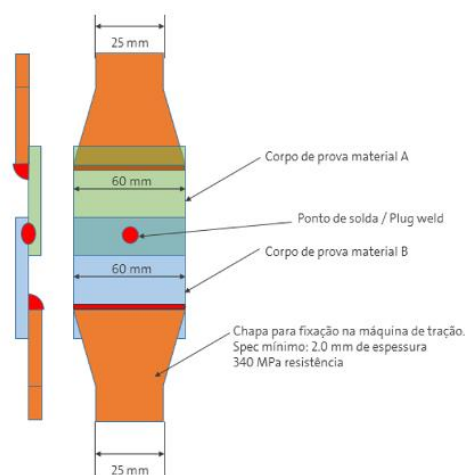


Figura 3.4: Adaptação dos corpos de prova para execução dos ensaios

As figuras 3.5 e 3.6 demonstram as estruturas dos corpos de prova.

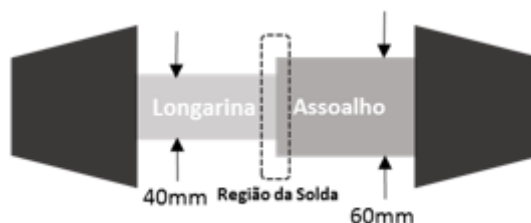


Figura 3.5: Corpo de prova com chapas 1,2x0,7 mm

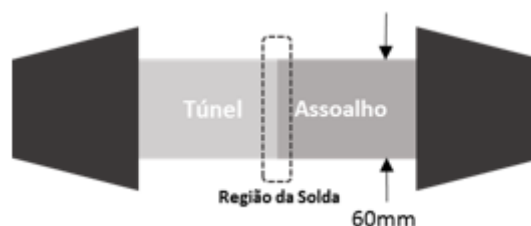


Figura 3.6: Corpo de prova com chapas 0,9x0,9 mm

Os corpos de prova foram dimensionados e estruturados dentro da fábrica, na oficina de apoio. Para a confecção dos mesmos foram usadas peças de produção corrente. Por este motivo, não foi possível obter 60 mm de chapa plana para a longarina. Os corpos de prova produzidos na oficina estão na Figura 3.7. Para cada tipo de corpo de prova, foram confeccionados dois exemplares: um com os parâmetros reprovados no teste e outro com parâmetros que foram aprovados nos testes destrutivos com martelo e talhadeira.



3.7: Corpos de prova para os ensaios destrutivos.

3.4 ENSAIOS COMPARATIVOS DE TENSÃO DE CISCALHAMENTO E ARRANCAMENTO

Os testes foram realizados no Laboratório de Componentes, situado na fábrica de uma montadora. O teste foi realizado em uma máquina de ensaio de tração e compressão da marca Instron, modelo 4467 (Figura 3.8). A máquina tem capacidade de carga de 30 kN. Para os testes de tração, foi usada uma velocidade de tração de 5mm/min para todas as amostras.



Figura 3.8: Máquina de ensaio de tração Instron 4467

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise da qualidade superficial dos pontos de solda não foi encontrada nenhuma discrepância tal como rebarbas ou respingos de solda. A seguir, as Figuras 4.1 e 4.2 mostram como foi feita a inspeção superficial dos pontos, usando como base os desenhos do projeto da carroceria.

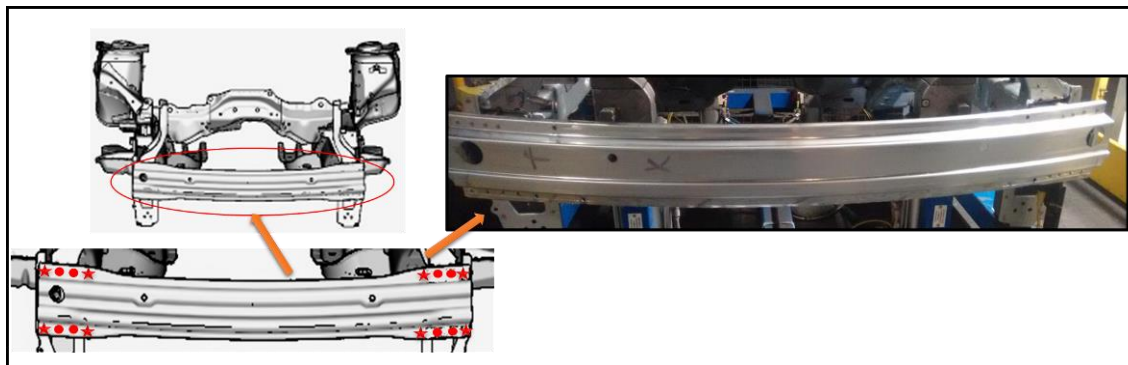


Figura 4.1: Comparação visual dos pontos de solda com o desenho do projeto

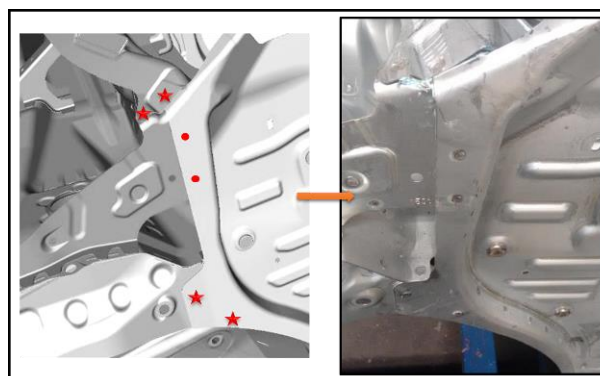
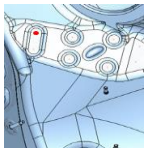
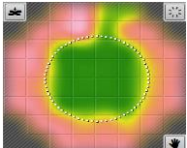
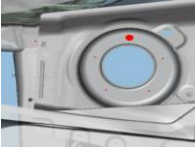
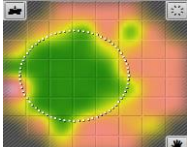
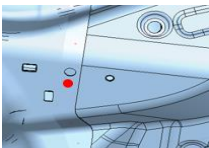
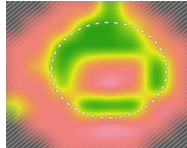
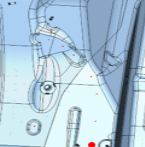



Figura 4.2: Comparação visual dos pontos de solda com o desenho do projeto

A análise por ultrassom foi realizada nos pontos pré-determinados pelo Departamento de Melhoria Contínua. Dos 15 pontos inspecionados, 2 pontos não tiveram um resultado significativo e foram reprovados no teste do ultrassom. A seguir, temos a análise de 4 amostras (Tabela 4.1), duas aprovadas no teste de ultrassom e as duas que foram reprovadas.

Tabela 4.1: Análises por ultrassom.

Amostra	Localização do Ponto	Ultrassom do ponto	Diâmetro do Ponto (mm)	Indentação (mm)	Comentários
1			5,6	0,26	Aprovado. Duas chapas: 1,5 e 0,8mm
2			5,9	0,33	Aprovado. Duas chapas: 2,0 e 0,9mm
3			-	-	Reprovado. Ponto não soldou as chapas completamente.
4			3,5	0,12	Reprovado. Ponto com diâmetro menor do que o especificado.

Para as amostras 3 e 4, reprovadas no teste, foram realizados ensaios de cisalhamento e arrancamento comparativos com pontos de mesma combinação de chapas, todavia que foram aprovadas em testes destrutivos feitos pelo método da talhadeira.

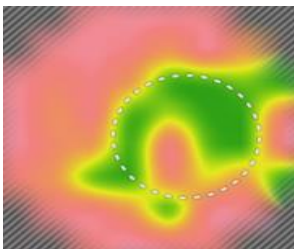
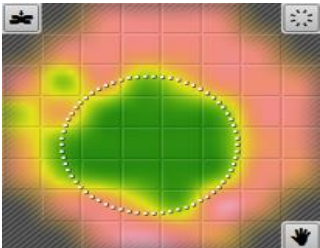
Os corpos de prova confeccionados para os ensaios de cisalhamento e destacamento foram soldados na linha de montagem, pelo mesmo robô que efetua a solda do ponto na carroceria, sem alterações de parâmetros e reproduzindo ao máximo as condições de solda na carroceria. As amostras 1 e 2 são de pontos de solda aprovados nos testes destrutivos com a talhadeira e sua soldagem é feita por um robô diferente do que solda as amostras que foram reprovadas no ultrassom. Já as amostras 3 e 4 são dos pontos de solda reprovados nos testes de ultrassom na linha de montagem da carroceria. Na Tabela 4.2, observa-se os parâmetros de solda para os dois tipos de corpos de prova.

Tabela 4.2: Parâmetros de solda.

Amostra	Combinação de chapas	Resultado no ultrassom	Corrente (A)	Pressão (kN)	Tempo de solda (ms)
1	2 chapas (1,2mm x 0,7mm)	Aprovado	9400	3,62	320
3	2 chapas (1,2mm x 0,7mm)	Reprovado	9400	3,62	320
2	2 chapas (0,9 mm x 0,9mm)	Aprovado	9000	2,80	300
4	2 chapas (0,9 mm x 0,9mm)	Reprovado	9000	2,80	300

Para garantir a reprodutibilidade dos ensaios, os corpos de prova soldados pelos robôs que tiveram a solda reprovada no teste de ultrassom foram submetidos novamente ao ultrassom para a análise da solda antes do ensaio. A Tabela 4.3 mostra os resultados dos testes. Para cada amostra, foram reproduzidos 2 corpos de prova, um para o ensaio de cisalhamento e o outro para o ensaio de arrancamento.

Tabela 4.3: Ultrassom dos corpos de prova.

Amostra	Ultrassom do ponto	Diâmetro do Ponto (mm)	Indentação (mm)	Comentários
3		-	-	Não soldou completamente.
4		3,9	0,21	Diâmetro fora do especificado

Feitas as análises, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de arrancamento e de cisalhamento. Os resultados dos testes destrutivos para as amostras 1 e 3 são mostrados no Gráfico 4.1.

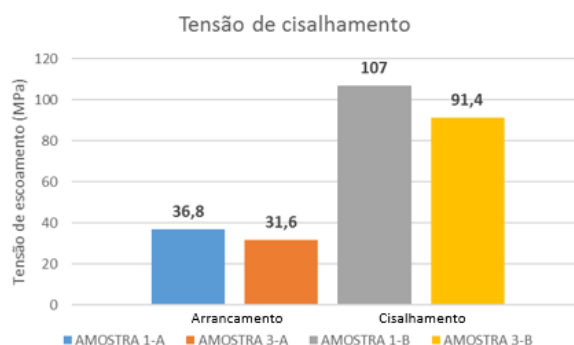


Gráfico 4.1: Ensaios destrutivos para os corpos de prova com chapas 1,2x0,7mm

Para as amostras 2 e 4, os resultados obtidos são mostrados no Gráfico 4.2.

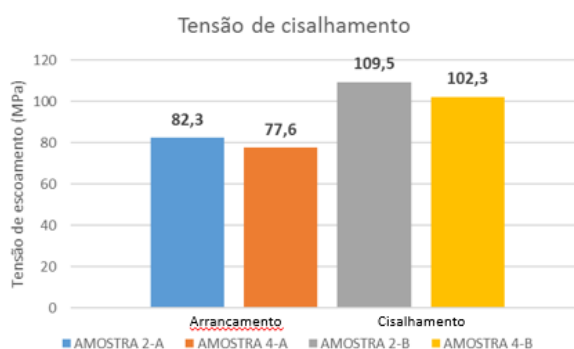


Gráfico 4.2: Ensaios destrutivos para os corpos de prova com chapas 0,9x0,9mm

Na análise dos ensaios de tração, foi observado que os pontos que foram reprovados no teste com o ultrassom tiveram uma redução em sua tensão de escoamento em comparação com os pontos aprovados nos testes com a talhadeira. Essa redução ocorreu, nos quatro casos, devido ao ponto de solda não ter sido soldado corretamente, apresentando uma redução da área soldada, diminuindo sua resistência mecânica. As Figuras 4.3 e 4.4 mostram dois pontos de solda após os ensaios.



Figura 4.3: Corpo de prova 1-a após o ensaio de arrancamento



Figura 4.4: Corpo de prova 2-b após o ensaio de cisalhamento

Foi observado que os parâmetros de solda dos pontos aprovados e reprovados são idênticos. Essa constatação pode servir de base para algumas suposições sobre o que gerou as falhas nos pontos de solda.

Área de contato do eletrodo: o eletrodo pode não estar com a área total de contato na junta, acarretando um ponto não uniforme e uma soldagem deficiente nos pontos onde não há contato. Esta diferença de geometria no eletrodo pode ocorrer devido a uma fresagem não adequada ou mesmo a um ciclo de fresagem muito alto. É recomendável a revisão das fresas e dos ciclos de fresagem para garantir que o eletrodo use a sua área total de contato durante a solda.

Sujeira no material (cola ou adesivo estrutural): caso a material a ser soldado esteja com sujeira em sua superfície, isso pode acarretar em problemas no momento da soldagem das peças pois a sujeira dificulta a passagem da corrente do eletrodo para as chapas, causando uma fusão apenas superficial.

Retificador Controlado de Silício: o controlador pode estar gerando uma falha no controle dos parâmetros de solda que estão sendo usados pelo robô. Essa falha pode estar gerando uma diferença nos parâmetros que estão sendo programados no controlador e os parâmetros que realmente estão sendo soldados pelo robô nas chapas.

Posição de soldagem: esta falha pode ser gerada quando a peça não está perpendicular aos eletrodos. Isso gera um déficit na área de contato entre os dois, gerando uma diminuição na superfície das chapas que estão em contato com os eletrodos e consequentemente, uma diferença de temperaturas na região a ser soldada.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no trabalho envolvendo os testes destrutivos de cisalhamento e arrancamento, a análise por ultrassom mostrou-se um método de análise confiável para avaliação de juntas soldadas por soldagem a ponto por resistência elétrica. Os pontos de solda reprovados nos testes de ultrassom apresentaram uma tensão de escoamento até 15% menor se comparada a dos pontos aprovados nos ensaios destrutivos com a talhadeira.

O método de análise por ultrassom ainda é pouco usado na análise de pontos de solda devido ao alto custo do equipamento, dos materiais que devem ser utilizados para realização dos testes e também da necessidade de ter pessoas treinadas e capacitadas para a programação e uso do equipamento.

Para uma análise completa da efetividade do método de análise por ultrassom, uma comparação ponto a ponto, usando diferentes parâmetros de solda e com um acompanhamento diário poderá ajudar em um melhor entendimento das análises e da confiabilidade dos resultados mostrados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASLANLAR, S. The effect of nucleous size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry. *Journal Materials and Design*, Turkey, v.27, p.125-131, Nov. 2006.

AURES, J. H. V. Estudo da formação, geometria e resistência do ponto na soldagem por resistência: uma abordagem estatística. 143 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade de Brasília – Brasília, DF, 2006.

BATISTA, M. Estudo comparativo de soldabilidade de chapas para indústria automobilística utilizando dois equipamentos de soldagem a ponto por resistência. 194 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica de São Paulo, Departamento de Engenharia Metalúrgica de Materiais. Ed. rev – São Paulo, 2011

FURLANETTO, V. Proposta e validação experimental de um modelo para máquina solda a ponto CA. USP, 2005. 88 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

GM, GMW 14057 – “Weld Acceptance Criteria and Repair Procedures Resistance Spot Welds – Steel”, 2006.

GM, GMW4491M – “Arc Spot, Plug and Slot Welding Specification”, 2006.

KEARNS, W.H. *Welding Handbook: Resistance and Solid-State Welding and Other Joining Process*. Miami: American Welding Society, 1984.

MACHADO, I.G. *Soldagem e técnicas conexas: processos* – Porto Alegre: editado pelo autor, 1996.

NASCIMENTO, V. C. Seleção de parâmetros de soldagem a ponto por resistência, baseado na medição de resistência elétrica entre chapas. 130 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia – Uberlândia, MG, 2008.

PINHEIRO, H. J. G. Estudo da correlação entre a corrente “shunt” e a geometria do ponto de solda em função do espeçamento, em chapa de aço de baixo teor de carbono e espessura de 0,8 mm. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec, Gestão e Tecnologia Industrial – Salvador, 2011.

POWELL, H. J.; Westgate, S. A. e Wiemer, K. “A practical guide to process and quality control for resistance spot welding”. *The Welding Institute*, Report nº 569/1996, August.

STOCCO, D. Caracterização de solda por resistência a ponto através de avaliações não destrutivas. 110 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos – edição revisada – São Paulo, 2010.

STOCCO, D.; GONÇALVES, R. Caracterização dos defeitos encontrados em solda a ponto utilizando a técnica do ultra-som, apoiado à exames metalográficos. PANNDT, Rio de Janeiro – RJ, 2003.