

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Curso de Especialização em Soldagem

Jorge Kaique Menezes de Jesus Santana

**UTILIZAÇÃO DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO PARA VALIDAÇÃO DE SOLDA
PONTO POR RESISTÊNCIA (RSW)**

Belo Horizonte
2025

Jorge Kaique Menezes de Jesus Santana

**UTILIZAÇÃO DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO PARA VALIDAÇÃO DE SOLDA
PONTO POR RESISTÊNCIA (RSW)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização em Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para a obtenção do título de Especialista de Soldagem.

Área de Concentração: Engenharia de Soldagem.

Linha de Pesquisa: Utilização de ultrassom para validação de solda ponto por resistência.

Orientador: Prof. Fagner Guilherme Ferreira Coelho.

S232u

Santana, Jorge Kaique Menezes de Jesus.

Utilização de ensaio não destrutivo para validação de solda ponto por resistência (RSW) [recurso eletrônico] / Jorge Kaique Menezes de Jesus Santana. - 2025.

1 recurso online (28 f.: il., color.) : pdf.

Orientador: Fagner Guilherme Ferreira Coelho..

“Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais”

Inclui bibliografia.

1. Soldagem. 2. Controle de qualidade. 3. Testes não-destrutivos. 4. Indústria automobilística. I. Coelho, Fagner Guilherme Ferreira. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.791



Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação
Curso de Especialização em Soldagem



ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

No dia **04/12/2025**, às **11h**, a Comissão Examinadora se reuniu remotamente para avaliar o trabalho:

Título: UTILIZAÇÃO DE ENSAIO NÃO DSTRUTIVO PARA VALIDAÇÃO DE SOLDA PONTO POR RESISTÊNCIA (RSW)

Nome Completo Aluno: Jorge Kaique Menezes de Jesus Santana

Nº da Matrícula na UFMG: 2024672102


Local: Auditório da UFMG.

Parecer:


A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo (a) candidato (a) durante 30 minutos e após ter argüido o(a) candidato(a) por 20 minutos, é de parecer **FAVORÁVEL** à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de **90** e **SEM** sugestões de modificação.

Sugere-se o prazo de 30 dias para efetuar-se as modificações sugeridas com revisão final acompanhada e homologada pelo orientador **Fagner Guilherme Ferreira Coelho**.

Assinaturas:


Documento assinado digitalmente
 **FAGNER GUILHERME FERREIRA COELHO**
Data: 26/01/2026 18:12:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Fagner Guilherme Ferreira Coelho
UFMG - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Documento assinado digitalmente
 **ALEXANDRE QUEIROZ BRACARENSE**
Data: 27/01/2026 17:53:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Alexandre Queiroz Bracarense
UFMG

Jorge Kaique Menezes de Jesus Santana
069.246.405-08

Documento assinado digitalmente
 **JORGE KAIQUE MENEZES DE JESUS SANTANA**
Data: 29/01/2026 13:53:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

AGRADECIMENTO

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela saúde, força e sabedoria concedidas ao longo desta jornada.

A minha esposa e filhas pelo incentivo constante e compreensão nos momentos de ausência. O apoio de vocês foi essencial para que eu chegasse até aqui.

Aos professores e orientadores, pela dedicação, conhecimento compartilhado e contribuições valiosas para minha formação acadêmica e profissional.

Aos colegas de curso, pela troca de experiências, apoio mútuo e pelos desafios superados juntos, que tornaram essa caminhada enriquecedora.

Por fim, agradeço à instituição e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta pós-graduação. Esta conquista é resultado do esforço coletivo e marcará de forma significativa minha trajetória.

RESUMO

A soldagem a ponto por resistência é amplamente utilizada na indústria automotiva devido à sua eficiência na união de chapas metálicas, sendo essencial para garantir a integridade estrutural dos conjuntos soldados. É comum, na verificação da qualidade dessas chapas soldadas a realização de ensaios destrutivos, como o teste de arrancamento e o cisalhamento, que, apesar de eficazes, apresentam limitações como alto custo, tempo de execução e inutilização da peça pós-teste. Com isso, este trabalho tem como objetivo avaliar a utilização da tecnologia de ultrassom (Tessonics) como alternativa não destrutiva para a validação da soldagem a ponto por resistência, com objetivo na substituição dos testes destrutivos. A proposta metodológica consiste na aplicação prática do equipamento Tessonics (F1 Platform) em uma linha de produção automotiva, onde foram inspecionadas amostras reais de soldas em chapas metálicas zincadas, com posterior comparação dos resultados com aqueles obtidos por métodos destrutivos tradicionais. O processo envolveu a análise da geometria do núcleo de solda, identificação de possíveis falhas internas, níveis de indentação e registro dos dados obtidos em ambas as abordagens para posterior correlação estatística. Os resultados preliminares indicaram que o Tessonics é capaz de identificar com precisão o tamanho do núcleo e eventuais inconsistências na união, apresentando forte correlação com os dados dos testes destrutivos. Conclui-se que a adoção do ultrassom representa um avanço significativo no controle de qualidade da soldagem a ponto, proporcionando maior confiabilidade ao processo produtivo, redução de custos (scrap) e alinhamento com os princípios da manufatura avançada. O estudo também aponta a necessidade de desenvolvimento de critérios técnicos e procedimentos padronizados para garantir a implementação eficaz da tecnologia em ambientes industriais.

Palavras-chave: soldagem por resistência; inspeção não destrutiva; ultrassom tessonics; controle de qualidade; indústria automotiva.

Abstract

Resistance spot welding is widely used in the automotive industry due to its efficiency in joining metal sheets and its essential role in ensuring the structural integrity of welded assemblies. In quality verification of these welded sheets, destructive tests such as peel and shear tests are commonly performed; however, despite their effectiveness, these methods present limitations including high cost, long execution time, and the destruction of the tested component. In this context, this study aims to evaluate the use of ultrasonic technology (Tessonics) as a non-destructive alternative for validating resistance spot welding, with the objective of replacing destructive tests. The proposed methodology consists of the practical application of the Tessonics equipment (F1 Platform) on an automotive production line, where real samples of welds on galvanized metal sheets were inspected and subsequently compared with results obtained from traditional destructive methods. The process involved the analysis of weld nugget geometry, identification of possible internal defects, indentation levels, and the recording of data obtained from both approaches for subsequent statistical correlation. Preliminary results indicated that Tessonics is capable of accurately identifying nugget size and potential inconsistencies in the joint, showing strong correlation with data from destructive testing. It is concluded that the adoption of ultrasonic inspection represents a significant advancement in resistance spot welding quality control, providing greater process reliability, reduction of costs (scrap), and alignment with advanced manufacturing principles. The study also highlights the need for the development of technical criteria and standardized procedures to ensure effective implementation of the technology in industrial environments.

Keywords: resistance spot welding; non-destructive inspection; Tessonics ultrasound; quality control; automotive industry.

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição
%	Percentual
°C	Grau Celsius
Al	Alumínio
A	Ampère
CAS	Chemical Abstracts Service
C	Carbono
Cu	Cobre
DX51D+Z	Aço galvanizado segundo EN 10346
END	Ensaio Não Destrutivo
EM	Norma Europeia (European Norm)
F	Força
F1	Modelo do equipamento de ultrassom Tessonics
G	Gramas
GTM	<i>Governing Thickness Metal</i> (Espessura governante do metal)
Hz	Hertz
kA	Quiloampère
Kgf	Quilograma-força
kN	Quilonewton
kVA	Quilovolt-ampère
LRSS	Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação
mA	Miliampère
Mm	Milímetro
Mn	Manganês
Ms	Milissegundo
NDT	<i>Non-Destructive Testing</i>
OBARA	Fabricante do equipamento de soldagem
P	Fósforo

OS	<i>Production Standard</i>
Ra	Rugosidade média
RWMA	<i>Resistance Welding Manufacturers Association</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
S	Enxofre
Si	Silício
Th	Espessura da chapa
UT	Ultrassom
V	Volt
WP	<i>Weld Point</i> (Ponto de solda)
WTC	<i>Welding Transformer Controller</i>
Z	Zinco

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Cronograma de realização dos testes destrutivos
- Figura 2 – Parâmetros de soldagem utilizados no processo
- Figura 3 – Resultados do ensaio de ultrassom dos pontos de solda
- Figura 4 – Comparativo entre os valores obtidos por ultrassom e ensaio destrutivo
- Figura 5 – Desvio padrão dos resultados dos ensaios
- Figura 6 – Percentual de variação entre os métodos de ensaio
- Figura 7 – Comparação dos custos entre o ensaio destrutivo e o ensaio por ultrassom

LISTA DE TABELAS

- Figura 1 – Martelo rompedor pneumático Atlas Copco modelo RRD57-12;
- Figura 2 – Equipamento de ultrassom Tessonics F1 e gel acoplante;
- Figura 3 – Cronograma de realização dos testes destrutivos;
- Figura 4 – Parâmetros de soldagem utilizados no processo;
- Figura 5 – Execução do ensaio de ultrassom nos pontos de solda;
- Figura 6 – Execução do ensaio destrutivo (teste de destaque) dos pontos de solda;
- Figura 7 – Resultados do ensaio de ultrassom dos pontos de solda;
- Figura 8 – Teste de destaque comprometido pelo uso do martelete;
- Figura 9 – Lentilha de solda aprovada após ensaio destrutivo;
- Figura 10 – Comparativo entre os valores obtidos por ultrassom e ensaio destrutivo;
- Figura 11 – Desvio padrão dos resultados dos ensaios;
- Figura 12 – Percentual de variação entre os métodos de ensaio;
- Figura 13 – Comparação dos custos entre o ensaio destrutivo e o ensaio por ultrassom.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço DX51D+Z

Tabela 2 – Padrão de aprovação dos testes (Norma PS.50004/01)

Tabela 3 – Especificações de qualidade dos pontos de solda

Tabela 4 – Resultados do ensaio de ultrassom dos pontos de solda

Tabela 5 – Síntese estatística dos resultados do ensaio de ultrassom

Tabela 6 – Resultados do ensaio destrutivo dos pontos de solda

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVO.....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Materiais e métodos	15
3.2 Equipamento de soldagem.....	15
3.3 Equipamentos de ensaio (“push-pull”)	16
3.3.1 Equipamentos de ensaio (“end”)	16
3.4 Procedimento experimental	17
4. RESULTADOS	19
4.1 Valores de ultrassom	19
4.2 Médias e desvios.....	21
4.3 Tendências.....	21
4.4 Valores de destaque	22
4.5 Medições.....	23
4.6 Comparativo destrutivo x ultrassom.....	24
4.7 Custos	26
4.8 Tempo e ensaio.....	26
5. CONCLUSÕES.....	28
6. REFERÊNCIAS.....	29

1. INTRODUÇÃO

A soldagem a ponto por resistência é amplamente utilizada na indústria automotiva para unir chapas metálicas de forma rápida, eficiente sem o uso de metal de adição e com boa integridade mecânica. Contudo, a validação da qualidade das soldas realizadas ainda depende, em grande parte, de testes destrutivos, como o ensaio de arrancamento e o ensaio de cisalhamento, que comprometem o produto e aumentam custos operacionais. Além disso, esses ensaios não permitem a inspeção total (100%) das peças soldadas em linha de produção.

Nesse contexto, a tecnologia de ultrassom (Tessonics) surge como uma alternativa eficaz, permitindo a inspeção não destrutiva da soldagem a ponto de chapas soldadas. O sistema fornece imagens tridimensionais em tempo real, detectando possíveis falhas internas, como falta de fusão, núcleo menor que o especificado, indentação e torção.

Segundo autores como Zhang et al. (2020) e Zhao & Wang (2018), a aplicação de ensaio não destrutivo na inspeção de soldas contribui significativamente para o aumento da confiabilidade do processo produtivo, permitindo correções preventivas e garantindo a rastreabilidade da qualidade. Assim, a adoção do ultrassom como alternativa ao teste destrutivo pode representar uma evolução tecnológica nos processos de controle da soldagem e da qualidade das soldas realizadas.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade do uso do equipamento de ultrassom para a validação da soldagem a ponto por resistência, verificando se o método pode substituir ou complementar os testes destrutivos tradicionais (destrutivo). Busca-se analisar se o uso do ultrassom é capaz de garantir a qualidade das soldas e aumentar a confiabilidade do processo produtivo. Além disso, o estudo pretende avaliar a capacidade do ultrassom em identificar falhas internas e problemas na qualidade dos pontos de solda, comparando os resultados obtidos com os testes destrutivos. Também serão analisados os impactos da aplicação do ultrassom no processo produtivo, redução de custos com refugo e melhorias no controle da qualidade. Por fim, o trabalho busca verificar a viabilidade da substituição parcial ou total dos testes destrutivos pelo ultrassom, bem como os benefícios do uso contínuo dessa técnica como ferramenta de controle da qualidade na soldagem a ponto por resistência.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Materiais e Métodos

Como corpo de prova foram utilizadas aço galvanizado de baixo carbono, classe DX51D+Z (EN 10346 – Europeia), equivalente ao aço laminado a frio revestido com zinco por imersão a quente (próximo ao SAE 1010). Com espessura de 1,2mm e 1,5mm, típico de aplicações automotivas e industriais. Grande parte das chapas soldadas em carrocerias automotivas usam espessuras entre 0,80 mm e 1,60mm.

Tabela 1 – **Composição Química**

Composição química do aço DX51D+Z					
%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Al
≤0,20	≤0,800	≤0,080	≤0,030	≤0,030	≤0,080

Os corpos de prova obedeceram aos padrões para o ensaio destrutivo e ultrassom segundo a norma da FIAT (PS.50004/01) Fig. (2). Onde é disponibilizado o valor mínimo de lentilha de solda levando em consideração a espessura das chapas soldadas.

Tabela 2 – **Padrão de Aprovação dos Testes** (Norma PS.50004/01)

Governing Metal Thickness (GTM) (mm)	Minimum Required Weld (mm)
0.6 – 0.79	3.5
0.8 – 0.99	4.0
1.0 – 1.29	4.5
1.3 – 1.59	5.0
1.6 – 1.89	5.5
1.9 – 2.29	6.0
2.3 – 2.69	6.5
2.7 – 3.20	7.0

3.2 Equipamento de Soldagem

Os experimentos foram realizados por um robô KUKA modelo KRC4 em uma máquina de soldagem integrada por pontos do fabricante OBARA, modelo X, composta por pinças e servo motor, com alimentação de 440V, potência nominal de 100 KVA média frequência e capacidade do servo de 600Kgf. Possui controlador WTC (60T5). O equipamento possui ainda um fresador elétrico de eletrodos integrado da fabricante Lutz. O equipamento conta

também com uma bomba bivolt de vazão igual a 8 litros/min e pressão de 6 bar. A temperatura mínima da água no início da refrigeração é de 12,3°C, e a máxima temperatura na saída do sistema deve ser de 30°C. Os eletrodos utilizados no equipamento são fabricados em uma liga de cobre (Z-Trode) que pertence a classe I de materiais (classificação da RWMA). Comprimento de 20 mm e Raio 6 de face.

3.3 Equipamentos de Ensaio (“push-pull”)

Para verificação da resistência do ponto de solda utilizando o teste destrutivo foi necessário um martelete pneumático RRD57-12 da AtlasCopco. Uma morsa manual tamanho 10 (largura do mordente de 254mm e abertura máxima de 240mm). A peça é colocada no centro do equipamento (morsa) de forma a impedir, que ela sofra rotação e desprenda ao iniciar o teste. Utilizando o martelete, o teste é feito aplicando-se força de tração ou descascamento sobre a solda a ponto até avaliar sua resistência ou ocorrer ruptura. O teste de arrancamento tem como finalidade avaliar a qualidade da solda, verificando a resistência mecânica da união das chapas através da lenticla formada.



Figura 1 – Martelo rompedor da AtlasCopco (Catálogo da AtlasCopco)

3.3.1 Equipamentos de Ensaio (“END”)

Para validação da resistência do ponto de solda utilizando o teste de ultrassom foi utilizado o equipamento da Tessonics F1. Com as seguintes especificações: aplicação de 2 a 3 chapas, em aço, com revestimento galvanizado e espessura de chapa de 0,6mm a 2,4mm. Utilização de um gel acomplante, fornecido pelo próprio fabricante do equipamewnto, sendo sua formula a seguinte: Glicerina USP, Kosher 60-60% CAS, 56-81-5Amido modificado <5%, Água 30-35%. O teste de ultrassom tem como finalidade avaliar a qualidade da solda a ponto, detectando falhas internas, verificando a integridade da lenticla e avaliando a indentação.



Figura 2 – Ultrassom Tessonics F1 e o Gel Acoplante (Fonte: autor)

3.4 Procedimento Experimental

Para a realização dos ensaios, as amostras foram preparadas e separadas em dias e turnos alternados (1 peça por turno), de acordo com o cronograma estabelecido (Fig. 3), a fim de minimizar possíveis variações relacionadas ao processo produtivo. Os parâmetros de soldagem utilizados foram previamente definidos durante a etapa de validação do produto (Fig.4), garantindo a repetibilidade dos resultados.

A corrente de soldagem foi mantida constante em 7 kA, com tempo de aplicação de 350 ms, e força de aperto dos eletrodos ajustada para 3 kN. Esses valores foram selecionados por estarem dentro da faixa usualmente aplicada na produção automotiva e por atenderem aos requisitos de qualidade da peça soldada.

TURNO	DOMINGO	SEGUNDA-FEIRA	TERÇA-FEIRA	QUARTA-FEIRA	QUINTA-FEIRA	SEXTA-FEIRA	SÁBADO
1º TURNO			CESTELO DA BATERIA				CESTELO DA BATERIA
2º TURNO		CESTELO DA BATERIA		CESTELO DA BATERIA		CESTELO DA BATERIA	
3º TURNO	CESTELO DA BATERIA				CESTELO DA BATERIA		

Figura 3 – Cronograma de Teste Destrutivo (Fonte: autor)

Dado	Descrição	(MSEC)	(kA)	Heat	Cool	Imp.
1	Squeeze	100	-	-	-	-
45	Slope	-	-	-	-	-
2	Cool	-	-	-	-	-
60	Impulse	-	-	-	-	-
30	Weld 1	350	7,0	-	-	-
3	Hold 1	33	-	-	-	-
Força de Aproximação (kgf)		-				
Força de Aperto (kN)		3,0				

Imagem 3 – Parâmetros de Solda (Fonte: autor)

Após a soldagem, as amostras foram levadas para realização dos ensaios de ultrassom e destaque no laboratório de Tear Down (Sodecia MG). O ensaio de ultrassom foi realizado na máquina de inspeção de qualidade ultrassônica Tessonics, modelo F1. No caso do destrutivo foi utilizado o martetele rompedor pneumática da AtlasCopco, modelo RRD57-12. Em ambos os ensaios foi utilizado a norma da FIAT para testes de Ponto a resistência (Norma PS.50004/01).

Cada amostra possuía 26 pontos de solda. Cada ensaio diário com ultrassom foi realizado por inspetores diferentes (1º, 2º e 3º turno), com o objetivo de avaliar a integridade da lentilha, identificar falhas internas e medir e a indentação da solda. O procedimento foi realizado da seguinte forma:

1. Preparação superficial: a superfície da chapa foi limpa para remoção impurezas que pudessem interferir na transmissão do ultrassom.
2. Acoplamento: aplicou-se gel de acoplamento sobre a superfície da solda para garantir a correta transmissão das ondas ultrassônicas.
3. Varredura: cada ponto de solda foi inspecionado com transdutor de contato, registrando sinais refletidos para detectar falhas internas ou inconsistências na lentilha.
4. Registro e análise: os sinais de ultrassom foram capturados e analisados, permitindo a avaliação da integridade, presença de poros, fissuras ou solda ineficiente.

Após as medições, os resultados foram analisados no software REPORTER (Tessonics). Em seguida, foram realizados os ensaios de destaque, para verificar possíveis alterações em relação ao teste de ultrassom. Nos quais cada ponto de solda foi submetido a ensaios de arrancamento ou cisalhamento, registrando-se a lentilha formada e observando-se o tipo de ruptura, seja na nugget ou na chapa base. Todos os resultados foram documentados, correlacionando as informações obtidas pelo ultrassom como o comportamento mecânico das soldas, permitindo uma avaliação completa da qualidade das uniões.



Figura 4 – Teste de ultrassom (Fonte: autor)

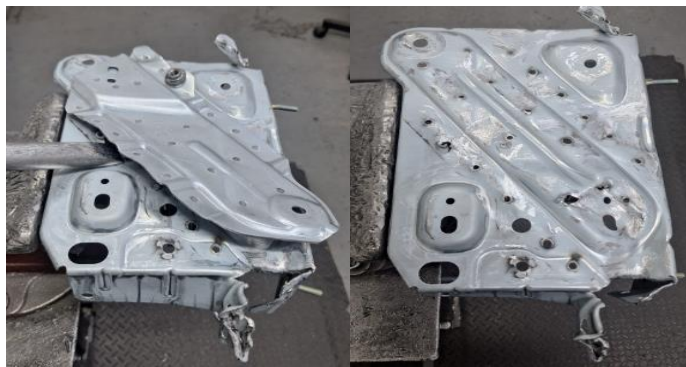


Figura 5 – Teste de destaque dos pontos de solda (Fonte: autor)

4 RESULTADOS

4.1 Valores de Ultrassom

Os ensaios foram realizados em 26 pontos de solda em 10 peças (WP 48201 a WP 48351) com leituras de ultrassom coletadas entre os dias 14/09 e 24/09. A espessura mínima de referência para todas as soldas foi de 4,5 mm (segundo norma PS.50004/01). As leituras de ultrassom variaram de 4,77 mm a 6,2 mm, indicando variações entre os pontos e os dias medidos.

Tabela 3 – Especificações de Qualidade (Fonte: autor).

Point	Type	Th1	Th2	Mínimo
WP 48201 – 48351	2T	1.2mm	1.2mm	4.5mm

Tabela 4 – Teste de Ultrassom dos Pontos de Solda (Fonte: autor).

Weld Point	14/09	15/09	16/09	17/09	18/09	19/09	21/09	22/09	23/09	24/09
WP 48201	5,02	5,62	5,72	5,91	5,55	5,22	5,49	5,35	5,97	5,69
WP	4,81	5,27	5,52	5,95	5,5	5,29	5,84	5,48	5,87	5,65

48203										
WP										
48205	4,97	5,82	5,77	5,59	5,6	5,46	5,73	5,61	5,75	5,61
WP										
48207	4,77	5,43	6,02	6,01	5,65	5,55	5,55	5,34	6,08	5,89
WP										
48301	5,55	5,74	6,1	5,89	5,96	5,75	5,68	5,76	5,39	5,26
WP										
48305	5,08	5,32	5,47	5,82	5,73	5,36	6,17	5,28	5,56	5,72
WP										
48307	5,02	5,5	5,95	5,89	5,81	5,62	5,81	5,44	5,55	5,55
WP										
48309	5,33	5,47	5,86	5,78	5,5	5,29	5,41	5,5	5,7	5,41
WP										
48311	5,55	5,52	6	5,75	5,6	5,35	5,95	5,15	5,51	5,17
WP										
48313	5,29	5,69	5,53	5,82	6,18	5,69	5,9	5,16	6,2	5,76
WP										
48315	5,17	5,29	5,69	6,2	5,67	5,74	5,18	5,39	5,63	5,38
WP										
48317	4,92	5,89	6,01	5,83	5,94	5,71	5,81	5,34	5,71	5,89
WP										
48319	5,21	5,74	5,53	6,2	5,69	5,35	5,49	5,31	6,06	5,11
WP										
48323	5,52	5,59	5,69	5,83	5,55	5,54	6	5,72	5,91	5,74
WP										
48325	5,19	5,72	6	6,01	6,03	5,76	5,48	5,54	5,85	5,77
WP										
48327	5,02	5,51	5,45	6,17	5,55	5,22	5,71	5,63	5,3	5,3
WP										
48329	4,77	5,21	5,69	5,33	5,83	5,17	5,39	5,24	5,91	5,51
WP										
48331	5,16	5,51	5,63	5,82	5,69	5,36	5,98	5,48	5,69	5,15
WP										
48333	5,69	5,42	5,55	6,13	5,48	5,9	6,2	5,81	5,59	5,35
WP										
48337	5,11	5,55	6,06	5,65	5,45	5,4	5,77	5,57	6,18	5,54
WP										
48339	5,17	5,49	5,71	5,98	5,88	5,22	5,51	5,7	5,98	5,46
WP										
48341	5,29	5,35	5,37	6,1	5,68	5,51	5,52	5,6	5,94	5,44
WP										
48345	5,26	5,55	5,61	5,94	5,29	5,36	6,18	5,69	5,93	5,6
WP										
48347	5,24	5,79	5,43	5,66	5,55	5,55	5,31	5,67	5,65	5,36
WP										
48349	5,12	5,5	5,55	5,8	5,56	5,6	5,71	5,98	5,92	5,9
WP										
48349	5,53	5,68	5,82	5,57	5,81	5,26	6,1	5,46	5,83	5,82

4.2 Médias e Desvios

A média geral das leituras de todos os pontos foi aproximadamente 5,61 mm, o que representa um aumento médio de 20% a 27% acima do valor mínimo estabelecido entre os pontos. A maior variação percentual foi registrada no ponto WP 48333 (27% acima do mínimo) e a menor no ponto WP 48329 (20% acima do mínimo).

Tabela 5 – Teste de Ultrassom dos Pontos de Solda. (Fonte: autor).

Peças	Pontos	Amostra	Min. Aceitável	Maior Medição	Menor Medição	Média	% Acima do Min
10	26	260	4,5mm	6,2	4,77mm	5,6mm	25%

4.3 Tendências

Observa-se que os valores de ultrassom tendem a manter estabilidade ao longo do período de monitoramento, com pequenas flutuações, possivelmente relacionadas à variabilidade do processo de soldagem ou condições de medição. Não foram observadas quedas abaixo do valor mínimo de referência em nenhum ponto durante o período monitorado, indicando consistência do processo de soldagem. Alguns pontos, como WP 48207, WP 48331 e WP 48337, apresentaram leituras acima de 6 mm em determinados dias, sugerindo soldas mais robustas. Não há registro de leituras críticas ou abaixo do mínimo, confirmando que todos os pontos avaliados atendem aos critérios de espessura mínima.

Os resultados sugerem que o processo de solda a ponto está dentro dos parâmetros esperados, com todas as lentilhas apresentando espessura acima do mínimo especificado. A variabilidade observada entre os pontos é aceitável dentro de processos industriais, indicando um controle de qualidade adequado.

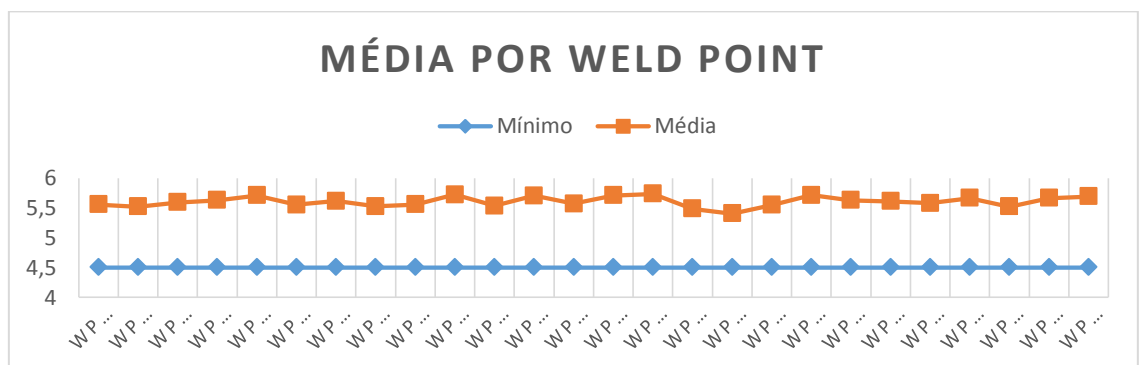


Imagem 5 – Teste de Ultrassom dos pontos de solda. (Fonte: autor)

4.4 Valores de Destaque

O monitoramento da lentilha de solda a ponto foi realizado em 26 amostras, obtidas a partir da união de chapas de 1,2 mm e 1,5 mm de espessura (total de 2,7 mm). O critério mínimo estabelecido para aceitação foi de 4,5 mm no diâmetro da lentilha, considerado critério de aceitação do processo.

Os resultados médios observados apresentaram variação entre 5,17 mm (WP 48329) e 5,83 mm (WP 48351), representando margens de 15% a 30% acima do valor mínimo. Isso confirma que todas as soldas avaliadas atenderam ao requisito estabelecido, sem ocorrência de falhas críticas no processo. A média geral dos valores situou-se entre 5,4 mm e 5,6 mm, aproximadamente 20% acima do limite especificado, o que demonstra uma condição de soldagem robusta.

Apesar da conformidade, algumas oscilações diárias foram observadas em determinados pontos, refletindo a variabilidade natural do processo de soldagem por resistência ou condições da lentilha ao realizar a medição.

Por exemplo, o ponto WP 48329 apresentou valores próximos ao limite de aceitação (4,75 a 5,34 mm), resultando na menor margem de segurança (15%). Em contraste, o ponto WP 48351 apresentou comportamento mais estável, com médias elevadas e margem de 30% acima do mínimo, evidenciando maior confiabilidade.

De forma geral, os resultados indicam que o processo se encontra estável e controlado, com todas as amostras dentro da especificação.

Tabela 6 – Teste de Destrutivo dos Pontos de Solda (Fonte: autor).

Weld Point	14/09	15/09	16/09	17/09	18/09	19/09	21/09	22/09	23/09	24/09
WP 48201	5,42	5,01	6,17	5,54	4,66	5,94	5,63	4,94	5,19	5,03
WP 48203	5,31	6,04	5,62	5,78	4,69	5,08	4,94	5,21	5,15	4,81
WP 48205	5,47	4,89	6,1	4,84	4,63	4,64	5,21	5,59	5,75	5,65
WP 48207	5,63	5,88	5,03	6,28	5,96	6,26	5,05	5,66	6,14	5,49
WP 48301	5,79	5	6,18	5,05	5,03	6,2	6,35	5,29	6,11	4,89
WP 48305	5,2	4,78	5,97	5,55	5,82	4,53	5,31	5,22	5,24	5,15
WP 48307	5,44	5,53	5,78	6,25	5,25	5,48	6,18	5,01	4,85	4,9
WP	4,96	5,84	5,84	5,28	4,93	5,64	5,61	4,52	5,1	5,84

48309										
WP										
48311	4,88	5,89	5,49	5,62	5,51	5,47	5,69	5,49	5,12	5,08
WP										
48313	5,17	5,93	5,47	5,34	5,74	5,79	5,23	5,78	5,79	5,43
WP										
48315	5,08	5,6	5,61	5,76	5,41	5,55	5,38	5,73	5,89	5,1
WP										
48317	5,6	6,28	5,98	5,76	5,43	5,39	5,53	6,06	4,93	5,46
WP										
48319	5,77	6,11	4,89	5,62	5,17	6,21	6,06	5,12	5,89	4,79
WP										
48323	5,59	5,35	6,23	6,16	4,81	5,8	5,68	5,38	5,53	5,12
WP										
48325	5,41	4,74	6,07	5,78	5,81	6,13	5,84	5,92	5,37	4,86
WP										
48327	5,14	4,96	5,48	5,77	5,99	4,58	5,27	5,21	5,42	5,22
WP										
48329	4,75	5,04	5,98	5,19	4,86	5,1	5,34	4,78	5,29	5,34
WP										
48331	5,18	5,33	5,21	5,58	4,9	5,12	6,03	4,59	5,63	5,23
WP										
48333	5,89	5,99	5,85	5,29	5,87	5,4	5,58	5,12	5,41	5
WP										
48337	5,74	5,35	6,27	4,95	6,05	5,31	5,91	5,72	6,01	5,44
WP										
48339	5,53	5,56	5,96	5,09	5,3	6,02	5,6	4,79	5,19	5,29
WP										
48341	4,89	4,97	5,62	5,89	5,45	4,93	5,6	4,54	5,59	4,97
WP										
48345	5,22	6,1	5,22	5,25	4,63	5,46	5,85	5,97	5,84	4,89
WP										
48347	5,89	5,19	5,87	6,12	5,78	5,21	5,93	5,27	5,29	5,44
WP										
48349	5,49	5,98	5,87	5,53	4,6	5,27	5,01	5,26	5,81	5,17
WP										
48349	6,01	5,98	6,15	6,02	5,79	5,89	6,3	5,21	5,19	5,78

4.5 Medições

Outro aspecto a ser considerado refere-se às dificuldades inerentes ao método de medição da lentilha obtida por ensaios destrutivos. Durante o processo de destacamento, a utilização do martelo pode provocar **deformações** na região da solda, alterando a geometria original da lentilha. Esse efeito tende a ocorrer principalmente quando o acesso do martelo é restrito, normalmente em sequências de pontos próximos. Nessas condições, o diâmetro

medido pode ser **subestimado em relação ao real**, comprometendo a exatidão da avaliação. Dessa forma, a dispersão observada em alguns pontos não pode ser atribuída apenas ao processo de soldagem, mas também às limitações do método destrutivo empregado para mensuração da lentilha.



Figura 6 – Teste de destaque comprometido pelo marteleto (Fonte: autor)



Figura 7 – Lentilha de Solda OK (Fonte: autor)

4.6 Comparativo Destrutivo x Ultrassom

A comparação entre os métodos de ensaio destrutivo e ultrassom evidenciou resultados consistentes. A análise dos valores médios revelou uma diferença percentual de apenas 2,47% entre os testes, enquanto o desvio padrão médio foi de 2,31%, indicando elevada correlação entre as técnicas.

O comportamento dos pontos medidos demonstra que o ultrassom acompanha a mesma tendência do ensaio destrutivo, com pequenas variações pontuais. Em diversas amostras, o método não destrutivo apresentou inclusive desvio padrão inferior, sugerindo maior estabilidade e menor influência de fatores externos, como erros associados ao manuseio e à medição manual no ensaio destrutivo.

A análise da variação percentual ponto a ponto mostrou amplitudes inferiores a $\pm 5\%$, valor considerado aceitável em ensaios comparativos. A maioria das amostras apresentou variações

inferiores a 3%, reforçando a confiabilidade do ultrassom como método alternativo de monitoramento.

Em termos práticos, além da redução significativa de custo e do menor tempo de execução por amostra já demonstrados, o ensaio por ultrassom apresentou desempenho estatisticamente comparável ao método destrutivo. Esses resultados confirmam que a técnica de ultrassom constitui uma ferramenta eficaz e sustentável para a avaliação de soldas por resistência, permitindo a preservação da peça ensaiada e garantindo maior eficiência operacional.

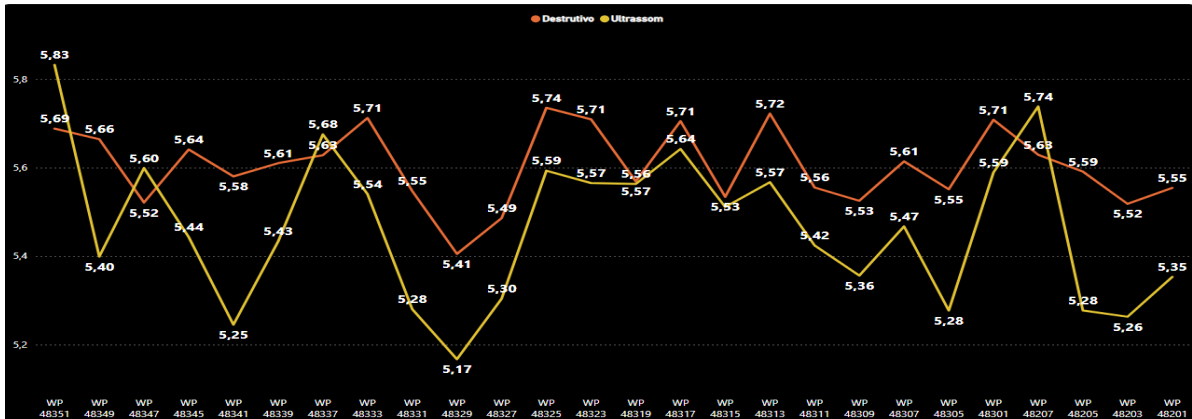


Figura 8 – Comparativo Valor dos Pontos (Fonte: autor)

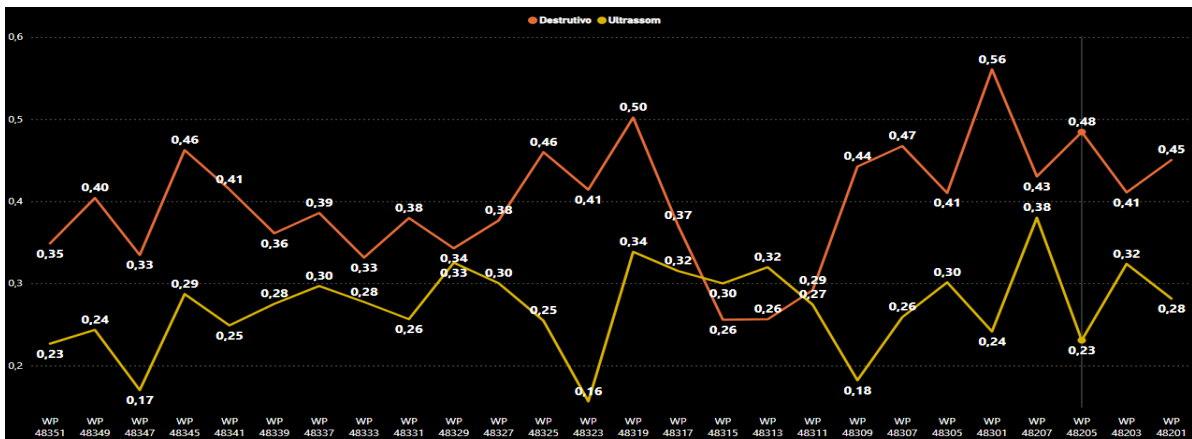


Figura 9 – Desvio Padrão (Fonte: autor)

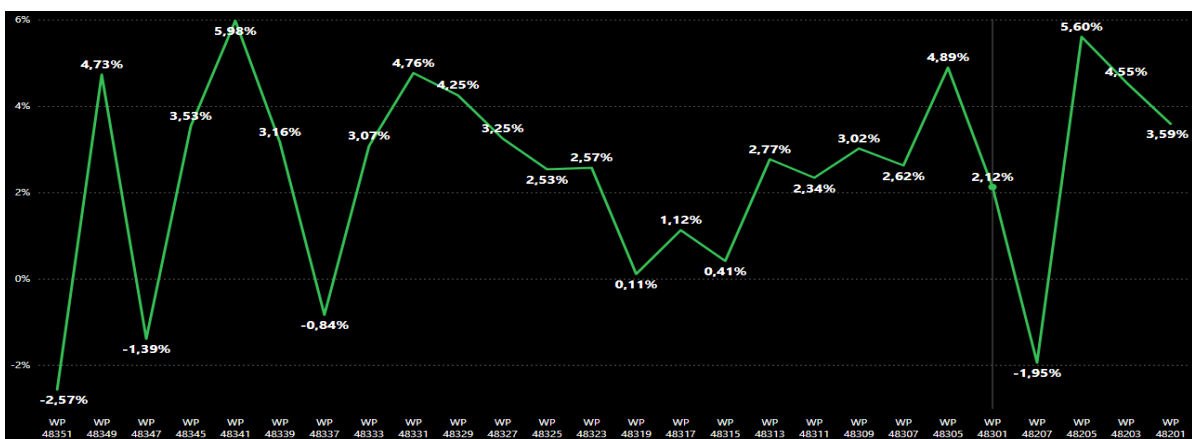


Figura 10 – % de Variação dos Pontos (Fonte: autor)

4.7 Custos

A Figura 11 apresenta a análise comparativa entre os custos associados ao ensaio destrutivo e ao ensaio não destrutivo por ultrassom. Os resultados evidenciam uma discrepância significativa entre os métodos. O custo unitário por peça para o ensaio destrutivo foi estimado em R\$ 32,05, enquanto para o ultrassom o valor calculado foi de apenas R\$ 0,23.

Considerando uma rotina de 30 ensaios mensais, o custo acumulado do método destrutivo atinge aproximadamente R\$ 961,50, ao passo que o ensaio por ultrassom apresenta um custo total de apenas R\$ 7,01. Essa diferença representa uma redução de 99,27% nos custos diretos, com impacto potencial de até 13.721,70% em termos de economia relativa.

Do ponto de vista prático, além da expressiva redução de custos, o ensaio por ultrassom apresenta a vantagem de não comprometer a integridade do componente analisado, permitindo que ele permaneça disponível para uso. Em contraste, no ensaio destrutivo a amostra é inutilizada.

Assim, os dados reforçam que a adoção do ensaio por ultrassom configura-se não apenas como uma alternativa economicamente viável, mas também como uma prática mais sustentável e eficiente no contexto industrial, contribuindo para a redução de desperdícios e aumento da confiabilidade no monitoramento da qualidade das soldas por resistência.

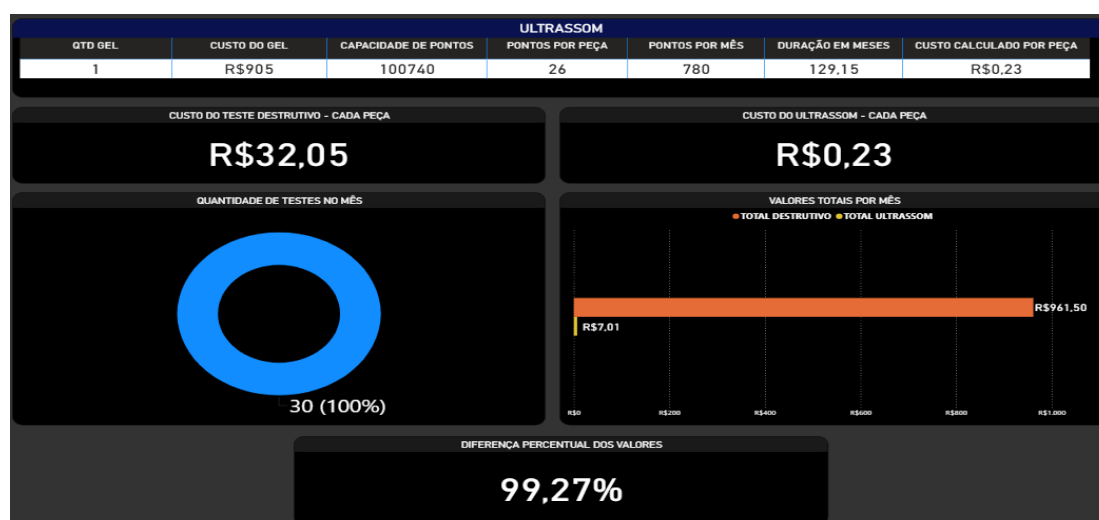


Figura 11 – Comparação dos custos entre o ensaio destrutivo e o ensaio por ultrassom (Fonte autor).

4.8 Tempo de Ensaio

A análise dos tempos médios de execução demonstrou diferenças relevantes entre os métodos avaliados. O ensaio por ultrassom apresentou um tempo médio de aproximadamente 12 minutos por peça.

Por outro lado, o ensaio destrutivo demandou um tempo significativamente superior, com média de 26 minutos por peça. Esse valor se deve não apenas ao procedimento de arrancamento da solda, mas também às etapas subsequentes, como a medição dos pontos por meio de paquímetro e o preenchimento do relatório de resultados, que prolongam a duração total da atividade.

Esses dados indicam que, além da vantagem econômica já demonstrada, o método de ultrassom apresenta maior eficiência temporal, reduzindo o tempo de execução por amostra em mais de 50% em comparação ao ensaio destrutivo.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a utilização do ultrassom como método de inspeção não destrutiva (dentro dos limites estabelecidos) é eficaz para a avaliação da qualidade das soldas a ponto em chapas automotivas. A técnica permitiu identificar variações na lentilha de solda e assegurar que os pontos avaliados atendam aos critérios de qualidade definidos. Comparativamente, os testes destrutivos complementares confirmaram a consistência das medições ultrassônicas, embora demandem maior tempo operacional devido à necessidade de medições adicionais e registro em relatórios.

Além disso, a análise quantitativa mostrou que o ultrassom proporciona rapidez e confiabilidade na detecção de irregularidades, sendo uma ferramenta adequada para aplicação em controle de qualidade industrial, especialmente em linhas de produção de carrocerias automotivas. A metodologia adotada contribui para a padronização dos ensaios e oferece suporte técnico para decisões sobre aprovação de peças, redução de retrabalho e garantia da integridade estrutural dos componentes.

Em suma, o monitoramento por ultrassom se mostrou eficiente para identificar rapidamente as variações entre pontos de solda sem a necessidade de ensaios destrutivos. O método permite rastrear tendências diárias, garantindo uma visão contínua da qualidade do processo e possibilitando intervenção precoce em caso de desvios.

6 REFERÊNCIAS

- ATLAS COPCO. RRD57-12 – Percussive tools, Chipping hammers, Rammers, Scalers. Atlas Copco Brasil, [s.d.]. Disponível em: <https://www.atlascopco.com/pt-br/itba/products/material-removal-tools/percussive/rrd57-12-sku8425110338>. Acesso em: 20 set. 2025.
- LUVATA. Spot Welding Electrodes. [s.d.]. Disponível em: <https://www.luvata.com/products/welding-products/spot-welding-electrodes>. Acesso em: 20 set. 2025.
- TESSONICS. F1. [s.d.]. Disponível em: <https://www.tessonics.com/products/f1/>. Acesso em: 20 set. 2025.
- TESSONICS. IMAGEL. [s.d.]. Disponível em: <https://www.tessonics.com/products/imagel/>. Acesso em: 20 set. 2025.
- ULBRICH, D.; KNOOP, M.; WAGNER, M. et al. Inspection of spot welded joints with the use of ultrasonic surface waves. 2023.
- YANG, Liang; CHUAI, Rongyan; CAI, Guixi et al. Ultrasonic non-destructive testing and evaluation of stainless-steel resistance spot welding based on spiral C-scan technique. *Sensors*, v. 24, n. 15, p. 4771, 2024.
- ZHANG, Bo; WEI, Ziang; ZHAO, Yang et al. An ultrasonic non-destructive testing method for evaluating resistance spot welding quality. 2018.