

André Setsuo Fukamizu

**A INFLUÊNCIA DA REFRIGERAÇÃO DO ELETRODO NA
SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA EM CHAPAS DE AÇO
CARBONO COM REVESTIMENTO DE ZINCO.**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de curso de Especialização.

São Paulo
Março/2014

André Setsuo Fukamizu
(Tecnólogo em Soldagem, FATEC-SP, 2008).

**A INFLUÊNCIA DA REFRIGERAÇÃO DO ELETRODO NA
SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA EM CHAPAS DE AÇO
CARBONO COM REVESTIMENTO DE ZINCO.**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração: Engenharia da Soldagem

Orientador: Prof. MSc. Márcio Batista

São Paulo
Março/2014

Catalogação-na-publicação

Fukamizu, André Setsuo

A influência da refrigeração do eletrodo na soldagem a ponto por resistência em chapas de aço carbono com revestimento de zinco / A.S. Fukamizu. -- São Paulo, 2014.
112 p.

Monografia (Especialização em Engenharia de Soldagem) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Soldagem 2.Chapas 3.Aço carbono 4.Refrigeração 5.Eletrodo I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

“Pense sempre em melhoria contínua. Hoje melhor que ontem, pior que amanhã.”

Anônimo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais Kazuyuki Fukamizu e Yumiko Yoshida Fukamizu (in memorian), minha madrasta Dilma, meu irmão Shindy e meu amigo Coichi.

AGRADECIMENTOS

Ao professor MSc. Márcio Batista pelas orientações valiosas na realização deste trabalho.

Aos meus colegas de trabalho, em especial ao Engenheiro Coichi Urano pelo incentivo em realizar este curso.

Ao Engenheiro Valdir Furlanetto da empresa Welding Science, pela grande ajuda nas orientações.

Aos meus amigos: Rodrigo Bispo, pela contribuição na realização deste trabalho.

A todos, que direta ou indiretamente ajudaram na realização do presente trabalho.

CURRICULUM VITAE

André Setsuo Fukamizu

FORMAÇÃO

- Cursando Pós-graduação Especialização em Engenharia da Soldagem. USP – Butantã Programa de Educação Continuada Escola Politécnica da USP (PECE). Início em Janeiro 2012 e término em Dezembro de 2013.
- Graduado em Tecnologia da Soldagem. FATEC-SP/Centro Paula Souza. Início em 2005 e conclusão em 2008.
- Formado em Técnico de Eletrônica. ETEC-SP/Centro Paula Souza. Início em 2003 e conclusão em 2005.
- Ensino médio formado na Escola Estadual Prof.^a Raquel Assis Barreiros. Em 2005

EXPERIÊNCIA PROFISSIONAL

- **Aisin do Brasil Com. e Ind. Ltda. Barueri – SP - 2008 - Até o momento**
Cargo: Analista de Processo.

Principais atividades: Atuando na engenharia de processos em empresa de autopeças, responsável pelo controle de parâmetros de máquinas e auxílio à produção. Experiência com máquinas de soldagem por resistência, Soldagem por projeção e por costura, programação de robôs de soldagem a arco TIG e MIG/MAG, ajuste de parâmetro de soldagem e movimentação. Coordenador de atividades de melhoria contínua desenvolvendo projetos de Kaizens, Círculos de Qualidade, Jishuken, 5S's e redução de custos. Participação em desenvolvimento de novos projetos dando apoio aos staffs estrangeiros. Elaboração de documentos de controle de acordo com o sistema de gestão Integrado (SGI).
- **Autônomo. Barueri – SP – 2007/2008**
Cargo: Técnico em eletrônica (Autônomo)

Principais atividades: Reparo de placas eletrônicas de máquinas ligadas a tecnologia de informação, máquinas de cartão de crédito/débito (POS) e impressoras fiscais.
- **Bematech. Diadema – SP – 2005/2007**
Cargo: Técnico em eletrônica Júnior (Líder de produção)

Principais atividades: Líder de produção responsável por uma célula de reparo de máquinas de cartão de crédito/débito (POS) via GSM. Reparo de placas eletrônicas, carregamento de software de desbloqueio, acabamento e embalagem das peças.

QUALIFICAÇÕES E ATIVIDADES PROFISSIONAIS

- Informática: Excel avançado - SENAI Barueri. Março, 2012
- Japonês – Curso Aliança Cultural Brasil-Japão: nível intermediário, conversação fluente.
- Inglês – CNA: nível Intermediário, conversação Básica.
- Curso de PPAP - Processo de Aprovação de Peças de Produção - Interaction Plexus S/S Terceirizados Ltda. Junho, 2011.
- Curso de MSA - Análise do Sistema de Medição - VTB Consultoria e treinamento. Julho, 2011.
- Curso de CEP - Controle Estatístico de Processo - VTB Consultoria e treinamento. Novembro, 2011.
- Cursos de FMEA – VTB Consultoria e treinamento. Dezembro, 2011
- Eletrônica de potência – SENAI “Mariano Ferraz” Vila Leopoldina. 2008
- Desenho técnico – SENAI “Mariano Ferraz” Vila Leopoldina. 2007

EXPERIÊNCIAS NO EXTERIOR

- Representante Brasileiro do evento global de Círculo de Qualidade Aisin – Dezembro, 2012.
- Estágio no Japão pela Aisin do Brasil Com. e Ind. Ltda. na matriz Aisin Seiki Co. Ltd. durante 1 ano através da AOTS (Fábrica de Shintoyo em Toyotashi província de Aichi, 2010).

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

- Atleta da seleção brasileira de Kendo. Brasil, 2009 e Itália, 2012.
- Premiado no CCQ – Círculo de Qualidade Aisin do Brasil - Menção Honrosa. Junho, 2009
- Participação no GQCC –Global Quality Control Circle convention, Aisin, Menção Honrosa. Japão, 2011 e 2013.

RESUMO

Atualmente na indústria automotiva é comum a utilização de chapas aço com revestimento de zinco para evitar a oxidação das carrocerias de aço. Esse revestimento se torna mais um obstáculo para este processo, onde é exigido soldagem de qualidade, com alta produtividade e bom acabamento. Este trabalho consiste em estudar a influência da refrigeração dos eletrodos, avaliando o desempenho de eletrodos de mesma geometria e composição, CuCrZr, na soldagem de duas chapas com revestimento de zinco nas duas faces, de mesma composição e espessuras de 0,80 mm, variando a temperatura de refrigeração em 13 °C, 20 °C e 25 °C e a vazão de refrigeração em 1,7 l/min., 3,0 l/min. e 4,3 l/min.. Os testes foram realizados em uma máquina estacionária CA onde inicialmente definiu-se o parâmetro ideal através da janela operacional do diagrama de soldabilidade: Tempo de soldagem versus corrente, identificando o ponto ótimo através do diâmetro do ponto de solda. O parâmetro definido foi de 9,5 KA de corrente, com o tempo de soldagem de 12 ciclos (200 ms) e 290 Kgf de força nos eletrodos. Com os parâmetros de soldagem definidos, para cada parâmetro de refrigeração, foram executadas as soldagens. Inicialmente verificou-se a cada 100 pontos as deformações causadas na face do eletrodo através de imagens tiradas por uma câmera adaptada e verificou-se que a deformação máxima foi de 6,4mm. Igualmente a cada 100 pontos foram analisados por meio do ensaio de ultrassom até o limite dos requisitos mínimos da norma, ou diâmetro 5,0 mm. Em seguida foram realizados testes de tração para verificar a qualidade em relação ao cisalhamento. Como comparação ao ultrassom realizou-se também a análise macrográfica onde se pode verificar que é um método confiável de análise. Os resultados mostraram que a temperatura de refrigeração tem influência maior do que a vazão de refrigeração. Em ambos os testes, de temperatura e vazão, foram possíveis soldar 800 pontos de solda no melhor caso. Em relação a temperatura, aumentando 92% foi possível soldar 400 pontos no pior caso. No caso da vazão, mesmo reduzindo 252% foi possível soldar 600 pontos de solda no pior caso.

ABSTRACT

Currently in the automotive industry is common the use of zinc coating steel sheet to prevent oxidation of the steel bodies. This coating becomes an obstacle to this process, since it will demand a welding with high quality, high productivity and good finishing. This paper has as purpose to study the effect of cooling the electrodes, evaluating the their performance of electrodes with same geometry and composition, CuCrZr, in the welding process of two zinc coating steel sheets on both sides, with same composition and thickness of 0.80 mm, where the cooling temperature are varied in 13°C, 20°C and 25 °C and the cooling flow rate are varied in 1.7 l/min., 3.0 l/min. And 4.3 l/min.. The tests were accomplished on a CA stationary machine where the ideal parameter was initially set up through the weldability diagram operation window: welding time versus current, identifying the optimal point by point diameter welding. The parameter set was 9.5 KA current, with the welding time of 12 cycles (200 ms) and 290 Kgf of force in the electrodes. With welding parameters defined for each cooling parameter, the welds were performed. Initially it was found that every 100 points it was possible to see the deformations caused in the electrode face through the images taken by a camera adapted and it was found that the maximum deformation was 6.4 mm. Also at every 100 points were analyzed by the use of ultrasound test until the limit of the minimum requirements from the standard, or 5.0 mm diameter. Then tensile tests were accomplished to verify the quality in relation to shear. As comparison to ultrasound test it was also accomplish a macrographic analysis where it was possible to check that this is a reliable method for analysis. The results showed that the coolant temperature has a higher influence than the cooling effect flow rate. In both tests, temperature and flow rate, it was possible to weld 800 welding points at best case. Regarding the temperature, when increased by 92% it was possible to weld 400 points in the worst case. In the case of flow rate, even reducing 252 % it was possible to weld 600 welding points in the worst case.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Imagem esquemática do ponto de solda (adaptado)	24
Figura 3.2 - Resistências elétricas da máquina de soldagem por resistência (adaptado)	25
Figura 3.3 - Resistência elétrica entre eletrodos	26
Figura 3.4 - Temperatura no ponto de solda e demais regiões na máxima temperatura	27
Figura 3.5 - Sequência e parâmetros de soldagem.....	29
Figura 3.6 - Exemplo esquemático de diagrama de soldabilidade (adaptado) .	30
Figura 3.7 - Relação entre o diâmetro mínimo do ponto e o diagrama de soldabilidade	31
Figura 3.8 - Equipamento estacionário de soldagem a ponto por resistência ..	32
Figura 3.9 - Deformação da face do eletrodo (adaptado).....	33
Figura 3.10 - Desgaste ou deformação do eletrodo (Vista frontal)	34
Figura 3.11 - Desgaste ou deformação do eletrodo (Vista superior)	34
Figura 3.12 - Influência da chapa com revestimento de Zinco na vida útil do eletrodo, formação de latão na face do eletrodo	35
Figura 3.13 - Troca de calor no eletrodo (adaptado)	36
Figura 3.14 - Sistema de refrigeração do eletrodo	38
Figura 3.15 - Medidas de referência para correta posição do tubo de refrigeração	39
Figura 3.16 - Perfil 2D da temperatura sobre a superfície do eletrodo (adaptado)	39

Figura 3.17 - Linhas térmicas em alta velocidade de um visor de escâner (adaptado)	40
Figura 3.18 - Geometria do eletrodo (adaptado)	41
Figura 3.19 - Troca de temperatura máxima da superfície do eletrodo pela versus a função do número de pontos de solda (adaptado).....	42
Figura 3.20 - Troca de temperatura máxima da superfície do eletrodo durante as soldagens (adaptado)	43
Figura 3.21 - Efeito da taxa de fluxo de refrigeração e espessura da face do eletrodo sobre a temperatura máxima da superfície (adaptado)	43
Figura 3.22 - Tipos de eletrodos de cobre para soldagem	48
Figura 3.23 - Contato uniforme dos eletrodos em perfeito alinhamento	48
Figura 3.24 - Distribuição assimétrica da pressão.....	49
Figura 3.25 - Macrografia de um ponto não uniforme	49
Figura 3.26 - Defeitos no processo de soldagem a ponto por resistência	50
Figura 3.27 - Teste por tensão cisalhante da junta soldada	51
Figura 3.28 - Exemplo de máquina de ensaio de cisalhamento	51
Figura 3.29 - Exemplo de ensaio de cisalhamento.....	52
Figura 3.30 - Exemplo de equipamento de ultrassom por imagem	53
Figura 3.31 - Transdutor utilizado no equipamento de ultrassom por imagem.	53
Figura 3.32 - Exemplo de captação de imagem do ensaio de ultrassom por imagem (adaptado)	54
Figura 3.33 - Exemplo de imagem do ensaio de ultrassom por imagem (adaptado)	54
Figura 3.34 - Comparação de eficiência do ensaio por ultrassom (adaptado) .	55
Figura 3.35 - Exemplo de amostra de ensaio macrográfico	56

Figura 4.1 - Eletrodo utilizado nos testes	57
Figura 4.2 - Dimensões do eletrodo utilizado nos testes	68
Figura 4.3 - Máquina de soldagem estacionária de corrente alternada utilizada nos testes.....	60
Figura 4.4 - Equipamento de leitura de corrente utilizado nos testes.....	61
Figura 4.5 - Computador e Dinamômetro digital para a leitura da pressão e corrente de soldagem utilizado nos testes	61
Figura 4.6 - Método de determinação dos limites mínimo e máximo de correntes de soldagem utilizado nos testes.....	63
Figura 4.7 - Unidade de refrigeração utilizada nos testes	64
Figura 4.8 - Parâmetros de temperaturas da refrigeração utilizados no teste 1	65
Figura 4.9 - Sistema de regulagem da vazão da água de refrigeração utilizado nos testes	67
Figura 4.10 - Parâmetros de vazão de refrigeração teste 2 utilizados nos testes	68
Figura 4.11 - Croqui das chapas de trabalho utilizadas nos testes	69
Figura 4.12 - Chapas de trabalho soldadas nos testes	69
Figura 4.13 - Corpos de prova dos testes de temperatura e vazão realizados nos ensaios	70
Figura 4.14 - Exemplo de congelamento da imagem para medir a área do desgaste do eletrodo	71
Figura 4.15 - Câmera adaptada para capturar face do eletrodo utilizado no ensaio.....	72
Figura 4.16 - Bancada do ensaio de arrancamento	73

Figura 4.17 - Método de ensaio destrutivo	73
Figura 4.18 - Medição do ponto de solda (adaptado)	74
Figura 4.19 - Determinação do diâmetro médio do ponto de solda.....	74
Figura 4.20 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de arrancamento utilizados nos testes	75
Figura 4.21 - Máquina de ensaio de cisalhamento utilizado nos teste	76
Figura 4.22 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento adaptado da referência.....	77
Figura 4.23 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento utilizado no ensaio.....	78
Figura 4.24 - Amostras de ensaio de cisalhamento realizados	79
Figura 4.25 - Exemplo de gráfico do ensaio de cisalhamento realizado	80
Figura 4.26 - Equipamento de ultrassom por imagem utilizado no ensaio	81
Figura 4.27 - Exemplo de ensaio de ultrassom por imagem	82
Figura 4.28 - Estufa para cura da resina do embutimento de macrografia utilizada no ensaio.....	83
Figura 4.29 - Politriz para acabamento dos embutimentos de macrografia utilizada no ensaio.....	84
Figura 4.30 - Embutimentos de macrografia realizados	84
Figura 4.31 - Microscópio para análise das macrografias utilizado no ensaio..	85
Figura 4.32 - Exemplo de macrografia realizada.....	86
Figura 5.1 - Diagrama de soldabilidade tempo versus corrente e força constante de 290 kgf para determinação dos parâmetros otimizados de soldagem	87
Figura 5.2 - Exemplo do resultado da medição do diâmetro da face do eletrodo superior e inferior após soldagem	88

Figura 5.3 - Gráfico do diâmetro da face do eletrodo inferior versus quantidade de pontos de solda variando a temperatura de refrigeração – Teste 1	90
Figura 5.4 - Gráfico de diâmetro da face do eletrodo superior versus quantidade de pontos de solda variando a temperatura de refrigeração – Teste 1	91
Figura 5.5 - Gráfico de diâmetro da face do eletrodo inferior versus quantidade de pontos variando a vazão de refrigeração – Teste 2	93
Figura 5.6 - Gráfico de diâmetro da face do eletrodo superior versus quantidade de pontos variando a vazão de refrigeração – Teste 2	93
Figura 5.7 - Gráfico da quantidade de pontos de solda em relação à variação da temperatura da água de refrigeração – Teste 1	94
Figura 5.8 - Gráfico da quantidade de pontos de solda em relação à variação da vazão da água de refrigeração – Teste 2	95
Figura 5.9 - Exemplo do resultado do ensaio de cisalhamento	96
Figura 5.10 - Gráfico da força de cisalhamento em kgf. versus quantidade de pontos de solda (vazão constante) – Teste 1	97
Figura 5.11 - Gráfico força de cisalhamento do ponto de solda versus quantidade de pontos de solda (temperatura constante) Teste 2	99
Figura 5.12 - Exemplo do resultado do ensaio de ultrassom por imagem.....	100
Figura 5.13 - gráfico do diâmetro do ponto de solda versus quantidade de pontos através do ensaio de ultrassom de imagem (vazão constante) – Teste 1	101
Figura 5.14 - Gráfico do diâmetro do ponto de solda versus quantidade de pontos através do ensaio de ultrassom de imagem (temperatura constante) – Teste 2	102
Figura 5.15 - Exemplo do resultado do ensaio de macrografia	103

Figura 5.16 - Gráfico do diâmetro do ponto de solda versus quantidade de pontos através do ensaio de macrografia (vazão constante) – Teste 1 104

Figura 5.17 - Gráfico do diâmetro do ponto de solda versus quantidade de pontos através do ensaio de macrografia (temperatura constante) – Teste 2

..... 105

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características dos materiais dos eletrodos conforme a classificação da RWMA (adaptado)	46
Tabela 4.1 - Composição química e propriedades eletromecânicas do eletrodo utilizado nos testes.....	58
Tabela 4.2 - Composição química e propriedades mecânicas da chapa utilizada nos testes.....	59
Tabela 4.3 - Revestimento eletrolítico de zinco da chapa utilizada nos testes.	59
Tabela 4.4 - Descritivo dos equipamentos para a definição dos parâmetros utilizados nos testes	62
Tabela 4.5 - Parâmetros de soldagem utilizados nos testes	63
Tabela 4.6 - Parâmetros de temperatura utilizados no Teste 1.....	66
Tabela 4.7 - Parâmetros de fluxo de vazão utilizado no Teste 2.....	68
Tabela 5.1 - Diâmetro do eletrodo inferior – Teste 1	89
Tabela 5.2 - Diâmetro do eletrodo superior – Teste 1	89
Tabela 5.3 - Diâmetro do eletrodo inferior – Teste 2	91
Tabela 5.4 - Diâmetro do eletrodo superior – Teste 2	92
Tabela 5.5 - Ensaio de cisalhamento do ponto de solda com variação da temperatura – Teste 1	97
Tabela 5.6 - Ensaio de cisalhamento do ponto de solda com variação da vazão – Teste 2	98
Tabela 5.7 - Ensaio de ultrassom de imagem do ponto de solda com variação da temperatura – Teste 1	101

Tabela 5.8 - Ensaio de ultrassom de imagem do ponto de solda com variação da vazão – Teste 2	102
Tabela 5.9 - Ensaio de macrografia do ponto de solda com variação da temperatura – Teste1	104
Tabela 5.10 - Ensaio de macrografia do ponto de solda com variação da temperatura – Teste 2	105

SÍMBOLOS

- RWMA: Resistance Welder Manufacturers Association
- AWS: American Welding Society
- IACS: International Annealed Copper Standard
- CA: Corrente alternada
- CC: Corrente contínua
- Q: Calor
- K: Constante
- R: Resistência elétrica
- F: Força
- Cu: Cobre
- Zr: Zircônio
- CuAl₂O₃: Alumina
- Al: Alumínio
- C: Carbono
- P: Fósforo
- S: Enxofre
- Mn: Manganês
- Zn: Zinco
- g: Grama
- I_s: Corrente de soldagem
- T: Temperatura
- t: Tempo
- E: Energia

A:	Ampere
KA:	Kilo Ampere
V:	Tensão
KN:	Kilo Newton
Kgf:	Kilo grama força
l:	Litros
Min.:	Minuto
ms:	Mile Segundo
t:	Espessura
dm:	Diâmetro médio
ZAC:	Zona afetada pelo calor
°C:	Grau Celsius
°F:	Grau Fahrenheit
Kg:	Kilograma
lbs:	Libra
l/min.:	Litros por minuto
Gal./min.:	Galões por minuto
GPM:	Galões por minuto
Hz:	Hertz
M:	Metros
mm:	Milímetro
g/m ² :	Gramas por metro quadrado

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	II
AGRADECIMENTOS.....	III
CURRICULUM VITAE.....	IV
RESUMO	VI
ABSTRACT.....	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS.....	XIV
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	XVI
SUMÁRIO	XVIII
1. Introdução e justificativa.....	21
2. Objetivo.....	23
3. Revisão bibliográfica.....	24
3.1. Processo de soldagem por resistência a ponto.....	24
3.2. Resistências elétricas na máquina.....	24
3.3. Resistências elétricas no ponto de solda.....	25
3.4. Gerações de calor	26
3.5. Parâmetros de soldagem por resistência a ponto.....	27
3.5.1. Força de soldagem.....	28
3.5.2. Tempo de soldagem.....	28
3.5.3. Corrente de soldagem.....	28
3.5.4. Diagrama de soldabilidade.....	29
3.6. Equipamento de soldagem por resistência a ponto.....	31
3.7. Efeito dos parâmetros de soldagem no eletrodo.....	32
3.8. Efeito dos desgastes no eletrodo.	33
3.9. Efeito da chapa revestida com zinco na vida útil do eletrodo ...	34
3.10. Refrigeração do eletrodo	35
3.10.1. Temperatura do eletrodo.....	39
3.10.2. Influência da geometria do eletrodo.....	40
3.10.3. Influência do fluxo de refriagreção do eletrodo.	42
3.11. Materiais dos eletrodos e suas classificações	45
3.12. Geometria do eletrodo.....	47
3.13. Alinhamento e centralização dos eletrodos.....	48

3.14. Defeitos no processo de solda ponto por resistência.....	49
3.15. Ensaios de cisalhamento.....	50
3.16. Ensaios de ultrassom por imagem	52
3.17. Ensaios de macrografia.....	56
4. MATERIAIS E MÉTODOS	57
4.1. Características do eletrodo	57
4.1.2. Geometria do eletrodo	57
4.2. Características da chapa de aço	59
4.3. Características da máquina de soldagem a ponto por resistência	59
4.4. Equipamentos de calibração da soldagem.....	60
4.5. Determinação do diâmetro do ponto de solda através do diagrama de soldabilidade.....	62
4.6. Parâmetros de soldagem.....	63
4.7. Temperatura de refrigeração dos eletrodos.....	64
4.8. Vazão de refrigeração dos eletrodos.....	66
4.9. Características da chapa de trabalho	69
4.10. Ensaios realizados	70
4.11. Medição do desgaste dos eletrodos	71
4.12. Ensaio de arrancamento.....	72
4.12.1. Corpo de prova do ensaio de arrancamento.....	75
4.13. Ensaio de cisalhamento do ponto de solda	75
4.13.1. Corpo de prova do ensaio de cisalhamento.....	76
4.14. Ensaio de ultrassom por imagem do ponto de solda.....	80
4.15. Macrografia do ponto de solda	82
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	87
5.1. Diagrama de soldabilidade para determinação dos parâmetros otimizados de soldagem	87
5.2. efeitos da temperatura e vazão da água de refrigeração na vida útil dos eletrodos	88
5.2.1. Efeitos da temperatura da água de refrigeração na vida útil dos eletrodos	89
5.2.2. Efeitos da vazão da água de refrigeração na vida útil dos eletrodos.....	91

5.3. Comparação entre a variação da temperatura e vazão em relação à quantidade de pontos de solda.....	93
5.4. Comparação entre a variação da temperatura e vazão em relação ao teste de cisalhamento	95
5.4.1. <i>Efeitos da variação da temperatura em relação à resistência mecânica do ponto de solda.....</i>	96
5.4.2. <i>Efeitos da variação da vazão em relação à resistência mecânica do ponto de solda</i>	98
5.5. Comparação entre a variação da temperatura e vazão em relação ao diâmetro do ponto de solda, utilizando ultrasom de imagens.....	100
5.6. Comparação entre o ensaio de macrografia em relação ao ensaio de ultrasom de imagem.....	103
6. Conclusões.....	107
7. Sujestões de trabalhos futuros.....	109
8. Referências bibliográficas.....	110

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A soldagem a ponto por resistência elétrica é o processo mais usado na montagem de estruturas, tais como: eletrodomésticos, automóveis, caminhões, aviões, vagões de trem, etc. Como exemplo, na montagem das carrocerias de automóveis são necessários em média 5000 pontos de solda [1].

Segundo a OICA “Organisation Internationale des Constructeurs d’Automobiles” a produção de 2012 no Brasil ultrapassou os 3,3 milhões de automóveis. Mundialmente este valor é bem maior, foram mais de 84,1 milhões de carros produzidos, ou seja, foram aproximadamente 420,5 bilhões de pontos de solda/ano no mundo todo [2].

As maiores vantagens da soldagem por pontos são a alta velocidade e a facilidade de automação com alta taxa de produção. A desvantagem é que a sobreposição da junta aumenta o peso da estrutura, o custo do material, tem menor resistência à tração e menor resistência à fadiga em comparação a soldagem por arco elétrico [1].

Para se atingir os melhores resultados em qualquer operação de soldagem a ponto é necessário utilizar os eletrodos adequados para uma dada aplicação. Cada um dos eletrodos é fabricado usando um número de ligas diferentes ou processo de fabricação diferente, com o objetivo de fornecer a melhor combinação de propriedades elétricas e mecânicas para uma operação de soldagem [3].

Durante a operação de soldagem, os eletrodos estão sujeitos a grandes tensões compressivas em elevadas temperaturas, fazendo com que sua face se deformem progressivamente, necessitando de restauração ou substituição à medida que os pontos de solda obtidos não sejam satisfatórios [3].

Além do parâmetro de soldagem influenciar no desgaste do eletrodo, a formação de ligas entre o material do eletrodo e o metal de base aumenta intensamente a velocidade de deformação da face do eletrodo [3].

Com o aumento da demanda do setor automotivo e a exigência por melhor qualidade dos clientes, este trabalho procura estudar a influência da refrigeração dos eletrodos na soldagem por resistência a ponto, a fim de melhorar a qualidade da solda e aumentar a vida útil do eletrodo.

Portanto, o presente trabalho está voltado para o estudo da influência da refrigeração dos eletrodos. As variáveis estudadas foram a temperatura da água de refrigeração e o fluxo de vazão de refrigeração, a fim de compreender a influência que cada uma exerce sobre a vida útil do eletrodo.

2. OBJETIVO

O objetivo do trabalho é estudar a influência dos parâmetros de refrigeração (temperatura e vazão) sobre a vida útil do eletrodo no processo de soldagem a ponto por resistência, visando à qualificação aos requisitos mínimos da norma, em chapas de aço carbono com revestimento de zinco utilizado na indústria automotiva.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processo de soldagem por resistência a ponto.

A junção de duas peças na soldagem por resistência elétrica é realizada através da geração de calor, devido à passagem da corrente elétrica, e da aplicação de pressão nas peças. Durante o processo as peças se aquecem e ocorre a fusão localizada no ponto de contato na superfície de separação entre ambas.

A geração de calor é devida à resistência elétrica do conjunto à passagem de corrente. Neste processo de soldagem, essa resistência é composta de resistência de contato peça/eletrodo e peça/peça [4].

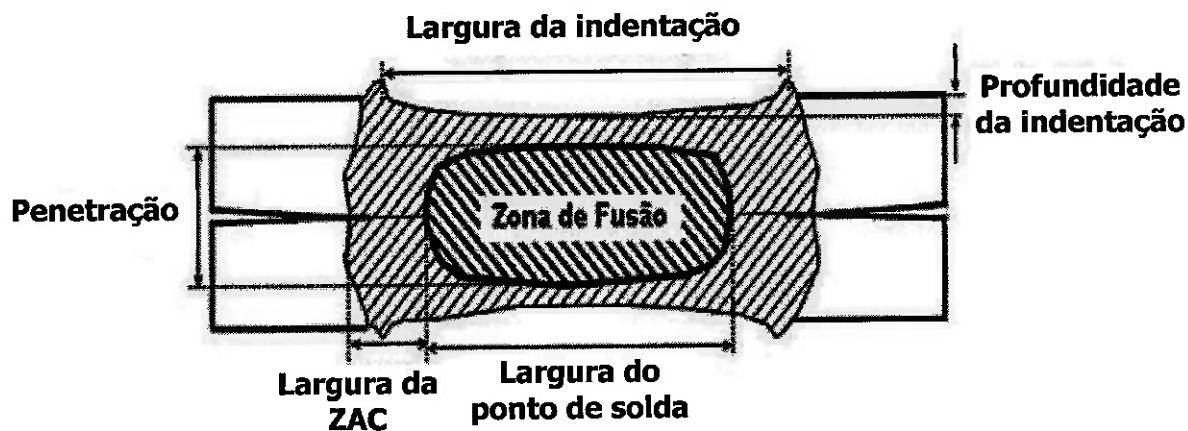


Figura 3.1 - Imagem esquemática do ponto de solda (adaptado) [5].

3.2 Resistências elétricas na máquina.

A figura 3.2 mostra esquematicamente as resistências elétricas que existem no secundário de uma máquina de soldagem. A maior resistência deverá ser na interface do material a ser soldado, seguido da resistência entre o eletrodo e a peça. Todas as outras resistências devem ser inferiores.

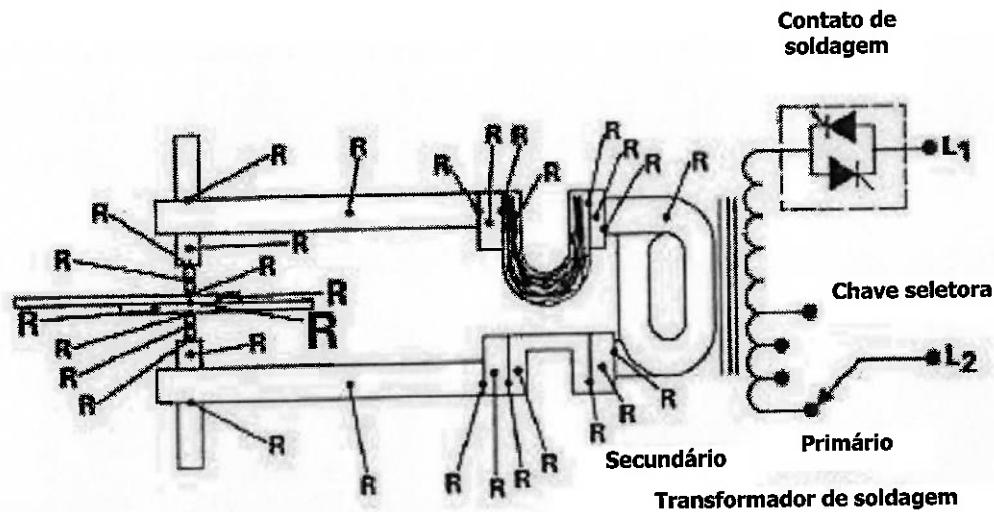


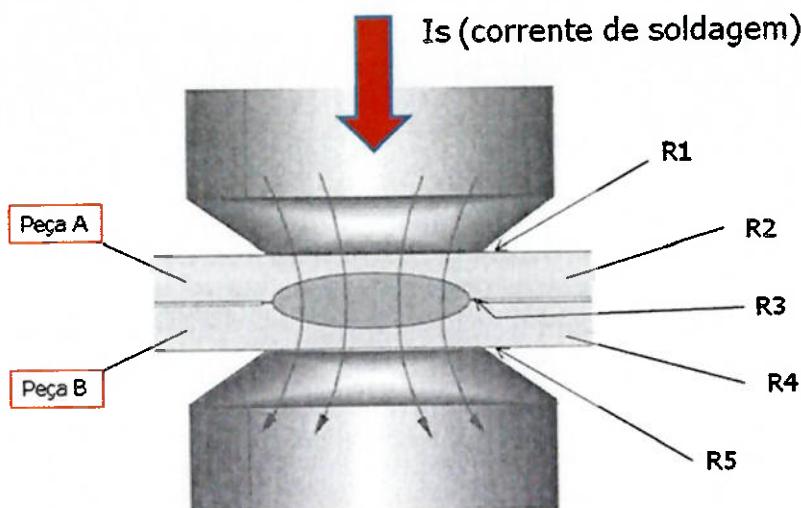
Figura 3.2 - Resistências elétricas da máquina de soldagem por resistência (adaptado) [6].

3.3 Resistências elétricas no ponto de solda.

As chapas a serem soldadas constituem uma série de resistência, existem na realidade pelo menos cinco resistências conectadas em série que produzem o aquecimento da junta como mostra a equação 1. A mais importante resistência requerida para formação da solda esta localizada na interface entre chapas a serem soldadas R3, onde será formado o ponto. [7].

A figura 3.3 mostra a localização de cada resistência elétrica.

$$RT = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad (1)$$



Resistências	
R1	resistência de contato entre eletrodo e peça
R2	resistência da peça A
R3	resistência de contato entre peça A e peça B
R4	resistência da peça B
R5	resistência de contato entre eletrodo e peça

Figura 3.3 - Resistência elétrica entre eletrodos [8].

3.4 Gerações de calor.

O aquecimento das chapas é formado pelo efeito Joule, esse fenômeno ocorre devido o encontro dos elétrons da corrente elétrica com os átomos do condutor, ou seja, a peça. Os elétrons sofrem colisões com átomos do condutor e parte da energia cinética (energia de movimento) do elétron é transferida para o átomo aumentando seu estado de agitação, consequentemente sua temperatura, conforme mostra a equação 2. Assim, a energia elétrica é transformada em energia térmica [9].

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

Onde:

Q = Calor gerado (cal).

$K= 1/ 4,185$ (J) (constante).

R = Conjunto de resistência elétrica (Ω).

dt = Intervalo de tempo de passagem de corrente (s).

I = Corrente de soldagem (A).

A figura 3.4 mostra a distribuição das faixas de temperatura em uma soldagem por ponto.

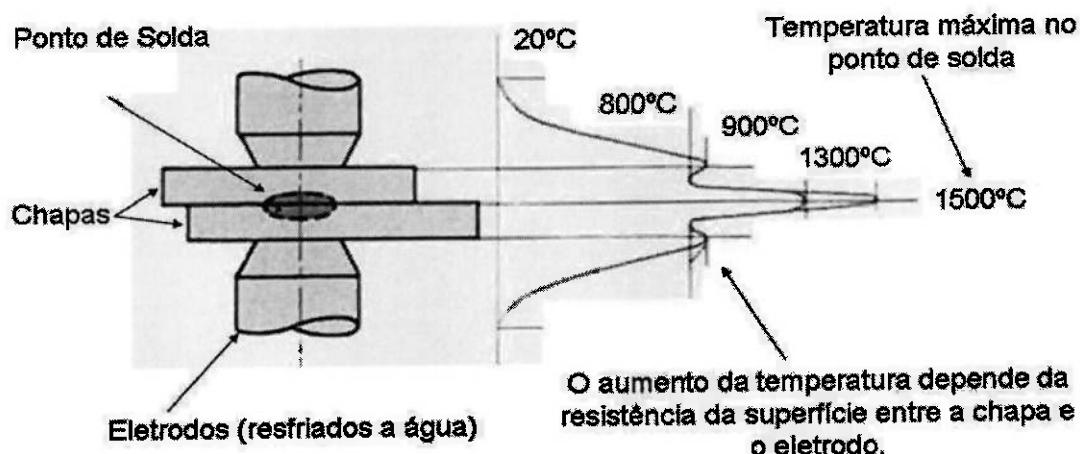


Figura 3.4 - Temperatura no ponto de solda e demais regiões na máxima temperatura [10].

3.5 Parâmetros de soldagem por resistência a ponto.

Os parâmetros básicos do processo de soldagem a ponto por resistência são a força no eletrodo, o tempo de soldagem e a intensidade da corrente. Existem outros fatores e parâmetros que influenciam a qualidade da soldagem, porém neste item serão comentados os principais.

3.5.1 Força de soldagem.

É a força exercida na face do eletrodo sobre a chapa, gerando a pressão adequada e necessária para soldagem. A força nos eletrodos está ligada diretamente com a resistência elétrica que gera o calor com a passagem da corrente. [7].

3.5.2 Tempo de soldagem.

É o tempo que a corrente elétrica atravessa a peça a ser soldada é diretamente proporcional a geração de calor e tem influência direta na qualidade da solda. O tempo é definido em ciclos, de acordo com a frequência do ciclo de energia elétrica, que no caso de uma máquina de soldagem CA seria de 60 Hz [7], ou seja, um ciclo é igual a 1/60Hz

3.5.3 Corrente de soldagem.

É a variável de maior influência na geração de calor, pois o calor é proporcional ao quadrado da intensidade da corrente de soldagem [7].

Normalmente em escala de Kilo ampéres, a corrente pode ser ajustada de acordo com a necessidade do processo.

A figura 3.5 apresenta a sequência de soldagem por resistência de um ponto, executada pela máquina com os parâmetros de força, corrente e tempo.

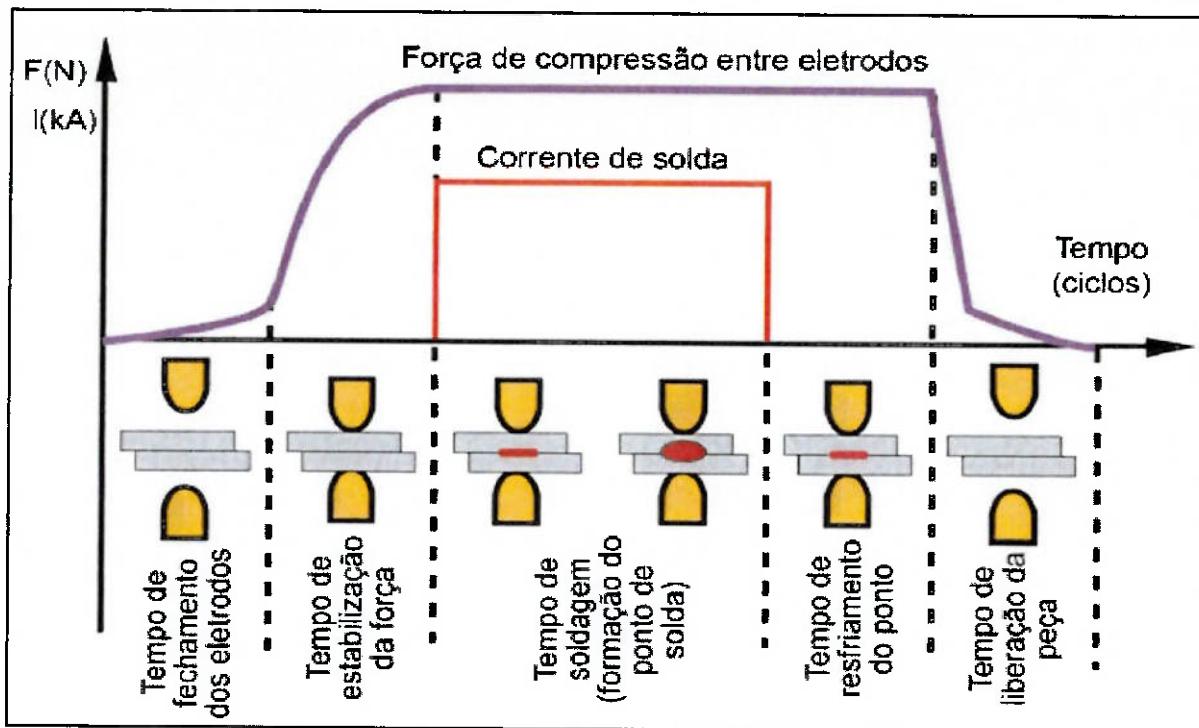
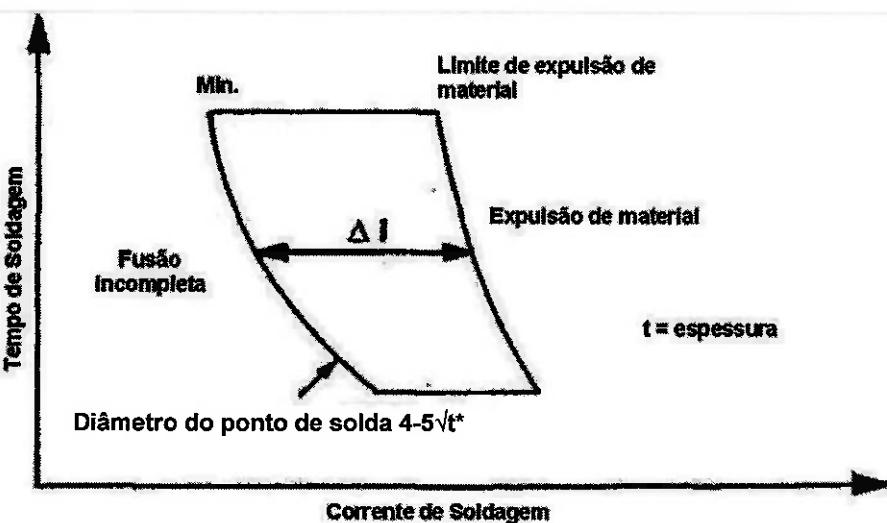


Figura 3.5 - Sequência e parâmetros de soldagem [11].

3.5.4 Diagrama de soldabilidade.

A prática mais comum no controle de um processo de soldagem por resistência é fazer a seleção dos parâmetros de soldagem incluindo pressão de soldagem, corrente e tempo de soldagem, através do diagrama de soldabilidade, como mostra a figura 3.6. O diagrama de soldabilidade pode ser produzido em função da corrente e tempo de soldagem para uma determinada pressão fixa, eles indicam as combinações de corrente máxima e mínima. A corrente mínima de soldagem é definida através, do tamanho mínimo do ponto aceitável, depende da norma estabelecida, geralmente numa faixa de 3 a 5 vezes a raiz quadrada da espessura da chapa (t em milímetros). A corrente máxima corresponde à ocorrência de expulsão de material ou respingo. São repetidos estes mesmos passos para definir a corrente mínima e a máxima em tempos de soldagem diferentes. A região da diferença entre a máxima e a mínima corrente representa a janela operacional. Ocasionalmente, a uma corrente correspondente para cada tamanho do diâmetro do ponto de solda que é também plotado dentro do diagrama como uma referência para seleção de corrente de soldagem [7].



* Normalmente conforme com especificações ou normas de trabalho, mas o limite Inferior para o diâmetro do ponto de solda é frequentemente $4-5\sqrt{t}$

Figura 3.6 – Exemplo esquemático de diagrama de soldabilidade adaptado [10].

A mínima corrente num determinado tempo de soldagem corresponde ao requisito mínimo aceitável para o ponto de solda, geralmente em termos de tamanho do ponto, conforme mostra figura 3.7.

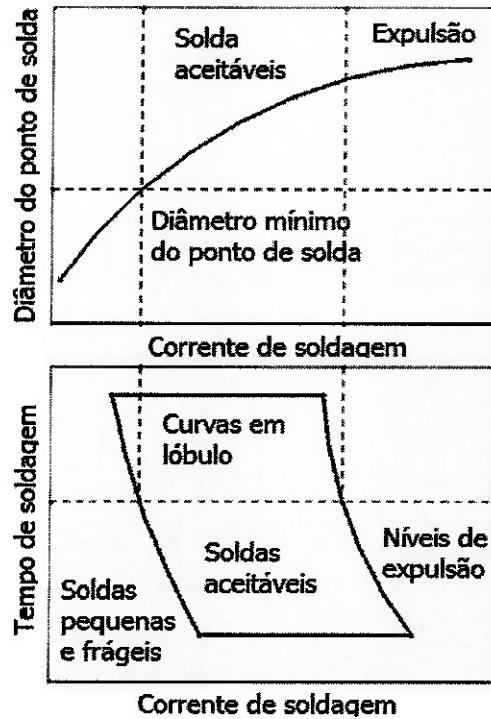


Figura 3.7 - Relação entre o diâmetro mínimo do ponto e o diagrama de soldabilidade [12].

3.6 Equipamento de soldagem por resistência a ponto.

Todas as máquinas de soldagem por resistência apresentam basicamente três componentes: sistema mecânico, circuito primário e sistema de controle.

O sistema mecânico é composto de sistema pneumático ou hidráulico, na qual a peça é fixada e a força do eletrodo é aplicada.

O circuito primário consiste de um transformador cuja função é regular a corrente de soldagem.

O sistema de controle pode atuar somente sobre o tempo de soldagem ou também sobre a ação mecânica da aplicação da força do eletrodo, como apresenta a figura 3.8.

Esses três componentes regulam as variáveis mais importantes na soldagem por resistência, isto é, a força do eletrodo, a intensidade da corrente e o tempo de passagem da corrente de soldagem [4].

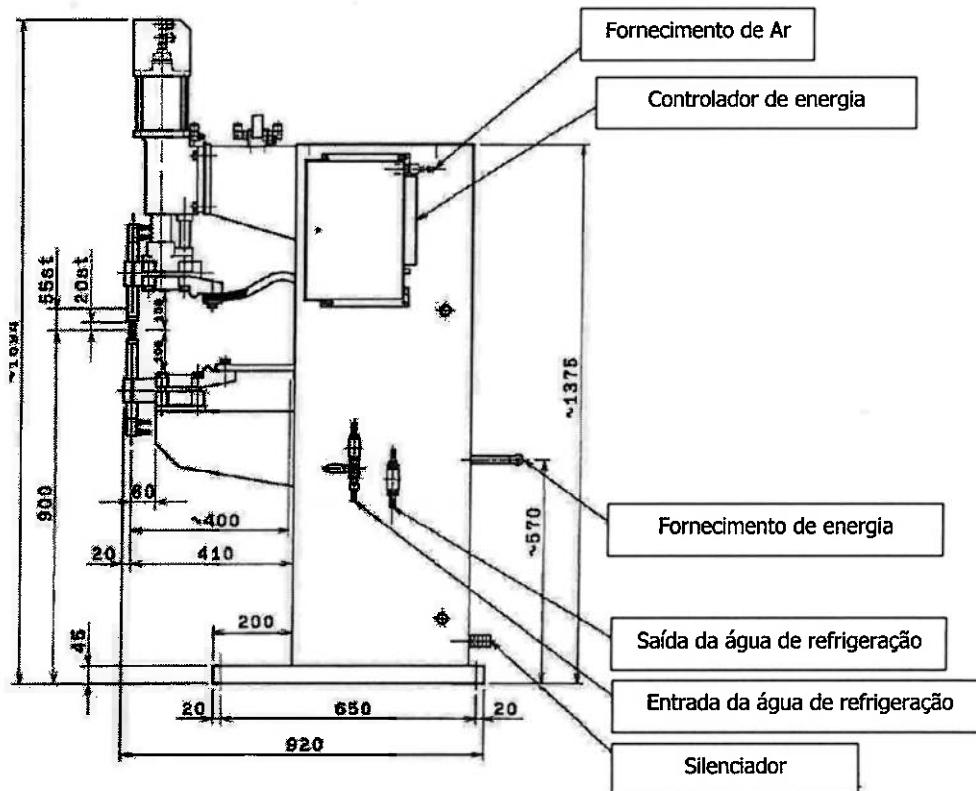


Figura 3.8 - Equipamento estacionário de soldagem a ponto por resistência [13].

3.7 Efeito dos parâmetros de soldagem no eletrodo.

Não é raro uma linha de soldagem por resistência expulsar metal líquido e eletrodos terem sua face deformada a ponto de não se saber o seu formato original. Tabelas tais como a figura 3.9, foram publicadas para mostrar os efeitos sobre as alterações do diâmetro da face do eletrodo com a intensidade na corrente de soldagem. No entanto nenhuma pesquisa de literatura poderia produzir um estudo definitivo que mostra como controlar a mudança do diâmetro ou efeito sobre a resistência da soldagem e a aparência [14].

(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)
400% menor Eletrodo novo adequado	56% maior	125% maior	300% maior	525% maior	800% maior	
						
						
Diâmetro da face 1/8"	Diâmetro da face 1/4"	Diâmetro da face 5/16"	Diâmetro da face 3/8"	Diâmetro da face 1/2"	Diâmetro da face 5/8"	Diâmetro da face 3/4"
Necessário 2.460 Ampéres.	Necessário 9.823 Ampéres.	Necessário 15.337 Ampéres.	Necessário 22.100 Ampéres.	Necessário 39.300 Ampéres.	Necessário 61.350 Ampéres.	Necessário 88.500 Ampéres.
127.640 lbs. Sq de pressão ("")	31.960 lbs. Sq de pressão ("")	20.470 lbs. Sq de pressão ("")	14.200 lbs. Sq de pressão ("")	7.990 lbs. Sq de pressão ("")	5.120 lbs. Sq de pressão ("")	3.500 lbs. Sq de pressão ("")
RESULTADO: Quatro vezes mais pressão, corrente. Indentação muito grave e respingo pela alta densidade de corrente.	RESULTADO: pressão correta, corrente, eletrodos. Excelente solda. Este é o tamanho da ponta (novo) para o qual a pressão, tempo e corrente são ajustados.	RESULTADO: Apenas 60% da pressão e corrente adequadas. Linha de borda da solda. Menor resistência. Último tamanho de diâmetro tolerado a corrente e pressão menores foram fixados entre eletrodos com face de 1/4" e 5/16".	RESULTADO: Apenas 45% da pressão e corrente necessárias. As soldas seriam inaceitáveis. Se a corrente ou o tempo foram elevadas com os eletrodos nesta condição resultaria numa grande solda fraca.	RESULTADO: Apenas 25% da pressão e corrente necessárias. Nenhuma solda seria feita se os eletrodos ficassem nesta condição	RESULTADO: Apenas 16% da pressão e corrente necessárias. Esta é uma condição muito séria e a única solução, é dressar as pontas de volta para a condição (B)	RESULTADO: Apenas 11% da corrente e pressão necessária.

Figura 3.9 - Deformação da face do eletrodo (adaptado) [14].

3.8 Efeito dos desgastes no eletrodo.

Devido ao desgaste na ponta do eletrodo, haverá aumento na área de contato, conforme mostra a figura 3.10 e 3.11. Por outro lado, na recuperação da ponta (Dressado), pode haver diminuição na área de contato. Ambas as situações causam perdas no processo. No primeiro caso, haverá diminuição da densidade superficial de corrente, diminuindo o rendimento do processo. No

segundo, haverá aumento na densidade superficial de corrente, acarretando sobreaquecimento do eletrodo e diminuindo sua vida útil [4].



Figura 3.10 - Desgaste ou deformação do eletrodo (Vista frontal).

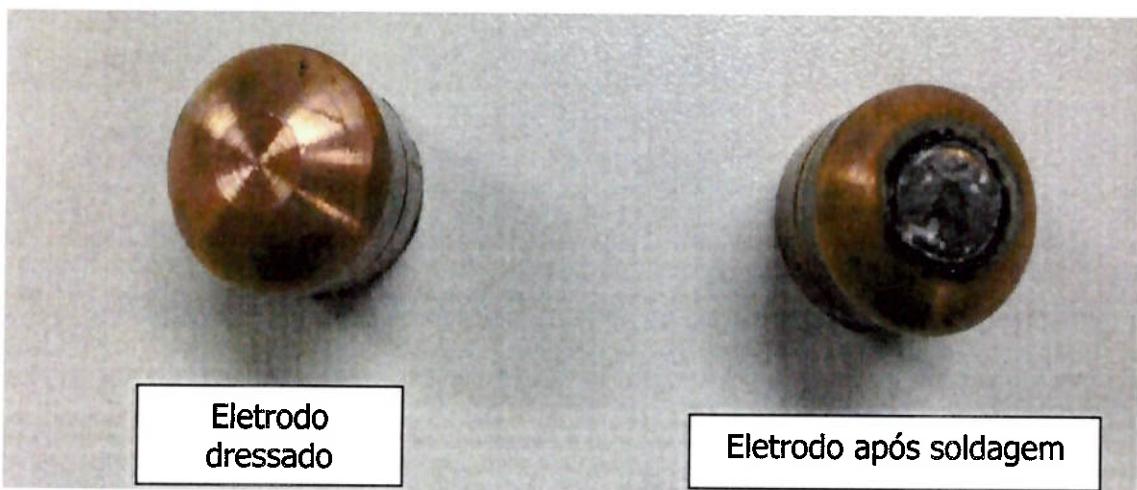


Figura 3.11 - Desgaste ou deformação do eletrodo (Vista superior).

3.9 Efeito da chapa revestida com zinco na vida útil do eletrodo.

A resistência de contato é baixa na soldagem em chapas revestidas com zinco devido sua alta condutividade elétrica. A presença do zinco na soldagem por resistência diminui a vida útil do eletrodo. Isto é devido à liga de cobre com o zinco formarem o latão o que aumenta a resistência elétrica na

face do eletrodo. Em consequência deste fato a temperatura do eletrodo aumenta durante a soldagem.

A face do eletrodo é deformada através do aquecimento e por repetidos impactos mecânicos na interface eletrodo-chapa. O latão formado na face de contato do eletrodo é frequentemente captado pelas chapas, deixando um anel dourado marcando no contorno da indentação na chapa. Portanto, o revestimento do zinco promove o desgaste do eletrodo [7]. Na figura 3.12 mostra um par de eletrodos depois de um grande número de pontos de solda, o primeiro sobre a chapa de aço sem revestimento e o segundo após soldar chapa com revestimento de zinco. A superfície do eletrodo nota-se claramente sinais de oxidação e formação de latão.

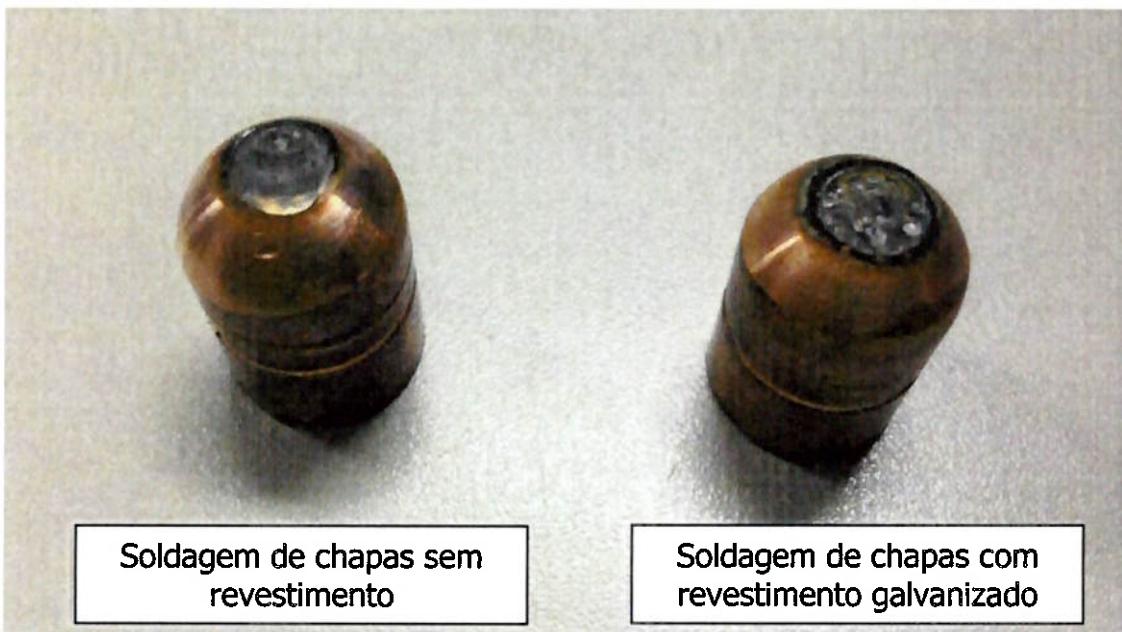


Figura 3.12 - Influência da chapa com revestimento de Zinco na vida útil do eletrodo, formação de latão na face do eletrodo.

3.10 Refrigeração do eletrodo.

Textos bem reconhecidos em soldagem por resistência cobrem o assunto de água de refrigeração em um ou dois parágrafos. Por exemplo, a AWS diz que na prática, eletrodos de soldagem devem ter uma passagem de refrigeração interna que se estende próximo à face de soldagem. Esta passagem deve ser projetada para acomodar um tubo de entrada de água e

para fornecer a água para fluir em torno do tubo, conforme mostra a figura 3.15. Nenhuma menção é feita em relação a temperatura recomendada ou a faixa de fluxo de refrigeração.

A RWMA salienta a importância da água de refrigeração para manter as propriedades mecânicas e físicas do eletrodo. Em relação à vazão da água de refrigeração deve ser no mínimo de 1-1/2 gal./min. (3,78 litros/min.) em cada eletrodo e a temperatura da água de entrada não deve exceder 50 ° F (10 °C). Estas condições ideais nem sempre são possíveis sob condição de produção porém terão grande impacto na vida útil do eletrodo.

Nenhum destes dois manuais abordam a relação entre a água de refrigeração e qualidade da solda. Adicionalmente, nenhuma figura é apresentada para apoiar os valores de fluxo e de temperatura, como mostra a figura 3.13 [14].

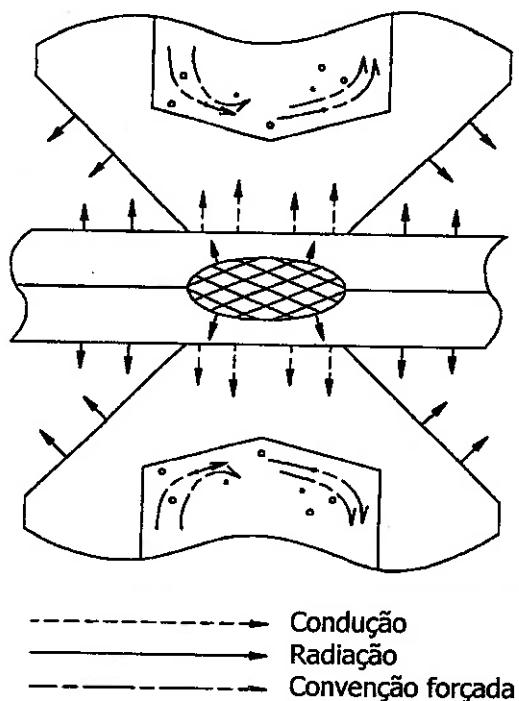


Figura 3.13 - Troca de calor no eletrodo (adaptado) [14].

Para o calor transferido por condução, a fórmula é conforme a equação 3.

$$K = Q/[A.(T^1 - T^2)/X] \quad (3)$$

Onde:

Q = Taxa de fluxo de calor do material,

A = Área da secção transversal do produto,

T^1 = Temperatura da área que precisa do calor removido,

T^2 = Temperatura do material circundante frio e

X = O caminho do fluxo de calor.

Para o calor transmitido por radiação, a fórmula para a transferência de calor foi expressa conforme a equação 4.

$$Q = A.e.u.(T) \quad (4)$$

Onde:

A = Área da superfície de irradiação de calor,

e = Valor de emissividade do material (a uma dada temperatura),

u = Constante de Stefan-Boltzmann e

T = Temperatura da superfície.

A fórmula para calcular o calor removido pela água no interior do eletrodo é conforme mostra a equação 5.

$$Q = h.A.(T_f - T_s) \quad (5)$$

Onde:

h = o coeficiente de material da superfície de convecção,

A = área da superfície da transferência de calor,

T_f = temperatura interna e

T_s = temperatura de sólidos.

A refrigeração dos eletrodos é um aspecto muito importante para sua manutenção, principalmente na soldagem de chapas com revestimento de zinco devido à formação do latão no contato do cobre com o zinco da chapa, em consequência disso, a resistência elétrica na face do eletrodo aumenta, elevando a densidade de corrente e consequentemente sua temperatura.

A figura 3.14 a seguir, exemplifica como funciona o sistema de refrigeração de um processo de solda a ponto por resistência convencional.

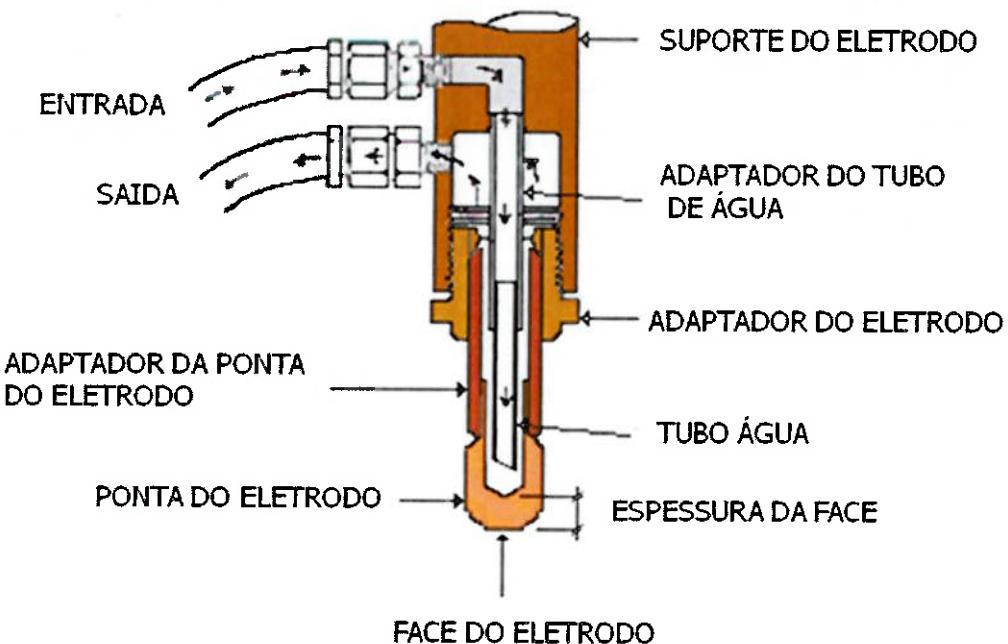


Figura 3.14 - Sistema de refrigeração do eletrodo [12].

A água para refrigeração deve estar dentro das especificações do fabricante da máquina, a fim de manter a qualidade do equipamento e garantir a correta taxa de transferência térmica [11].

A correta refrigeração do eletrodo depende da distância do tubo interno de água, além do alinhamento e ângulo de corte, abaixo a figura 3.15 mostra a posição correta para o tubo de refrigeração, recomenda-se que o tubo seja de metal, podendo ser flexível ou rígido.

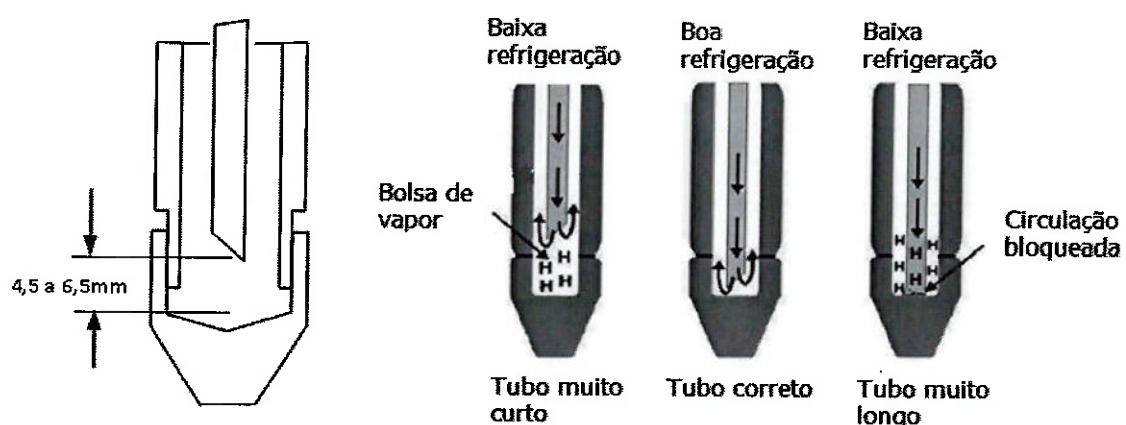


Figura 3.15 - Medidas de referência para correta posição do tubo de refrigeração [11].

3.10.1 Temperatura do eletrodo.

Um exemplo dos dois campos de temperatura dimensional na superfície dos eletrodos, medido com o sistema de termovisual como é mostrado na figura 3.16. O campo de temperatura relativamente uniforme na direção horizontal é claramente visto e é forte justificativa para a simplicidade do modelo térmico unidimensional [15].

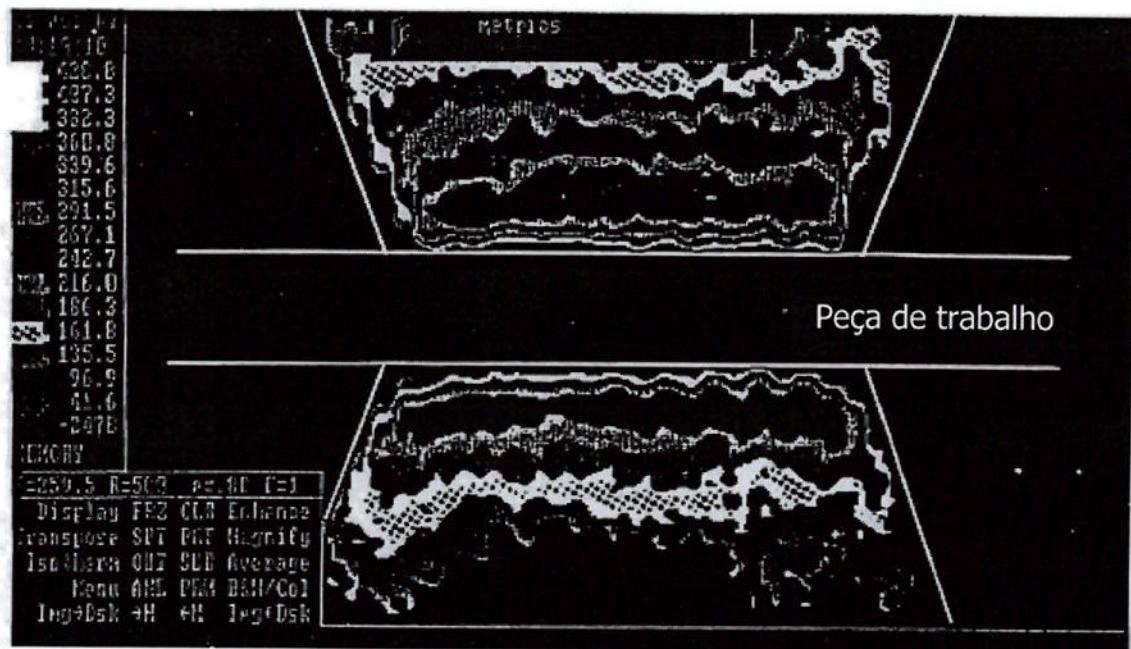


Figura 3.16 - Perfil 2D da temperatura sobre a superfície do eletrodo (adaptado) [15].

Uma exibição típica de um varrimento em alta frequencia ao longo da linha de centro de uma soldagem é mostrada na figura 3.17. A queda de temperatura no centro é devido à baixa temperatura da aresta da peça de trabalho que está longe da zona de formação de nugget. Neste experimento, a temperatura da peça de trabalho não tem qualquer significado, como o objetivo é medir o fluxo de calor nos eletrodos. A direcção vertical nesta figura representa o eixo de tempo e no sentido horizontal representa a posição ao longo do eixo geométrico do eletrodo. A geometria interna dos eletrodos foi modificada por usinagem convencional RWMA Classe 2, eletrodos com espessura da face mais finos [15].

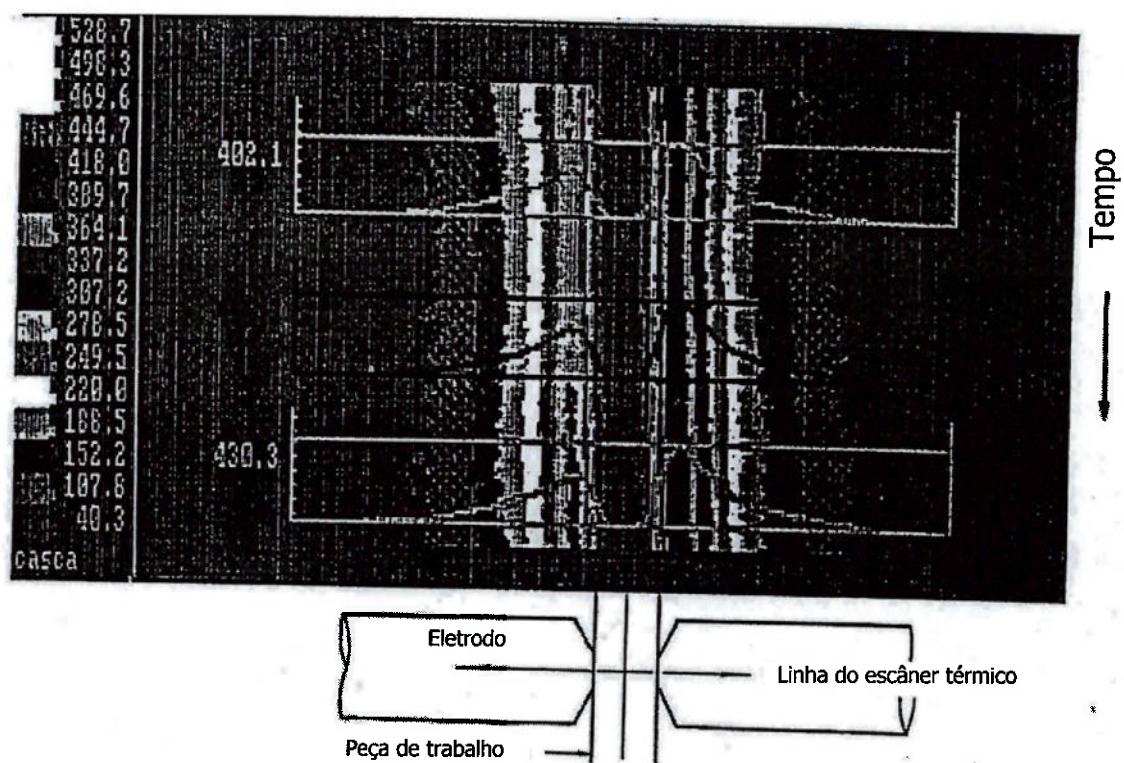


Figura 3.17 - Linhas térmicas em alta velocidade de um visor de escâner (adaptado) [15].

3.10.2 Influência da geometria do eletrodo.

Quatro diferentes espessuras de face foram testadas, 2,8 mm, 4,7 mm, 6,6 mm e 8,5 mm. A geometria geral do eletrodo, que foi utilizado é mostrada na figura 3.18. Soldagem foi realizada em chapas de aço eletrogalvanizados

com 0,8 milímetros de espessura, 70 g/m² de revestimento de zinco em ambos os lados. Para todos os casos, a pressão nos eletrodo era de 720 lbs e o tempo de soldagem foi de 12 ciclos, com duas intensidades de corrente diferentes no mesmo eletrodo [15].

Efeito da espessura da face do eletrodo Figura 3.19, mostra a temperatura máxima observada experimentalmente na superfície do eletrodo versus a quantidade de pontos soldados. As soldas foram feitas em $10,6 \pm 0,1$ KA com taxa de fluxo de refrigeração fixado em 0,7 GPM. Estes experimentos foram realizados para investigar o efeito da espessura da face do eletrodo e da evolução da temperatura do eletrodo na soldagem sucessiva. Observa-se que os aumentos de temperatura máxima ocorreram durante os primeiros 3 a 5 pontos de soldas e depois estabilizaram. O aumento de temperatura no final da vigésimo ponto é devido ao calor formado na peça de trabalho [15].

À medida que a espessura da face é reduzida, a temperatura diminui ao máximo, mas em seguida, aumenta quando a espessura da face torna-se muito fina. Assim, existe uma espessura crítica cara que minimiza a temperatura da superfície do eletrodo. Nesta experiência, para uma soldagem de 12 ciclos, o aumento da temperatura mínima ocorre a uma espessura da face de cerca de 4,7 mm [15], como pode-se observar na figura 3.19.

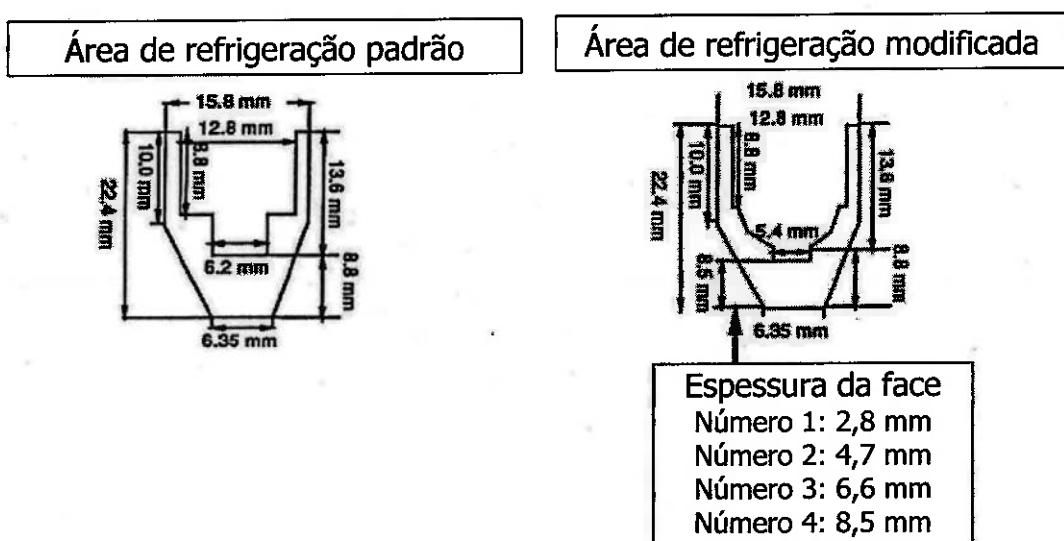


Figura 3.18 - Geometria do eletrodo (adaptado) [15].

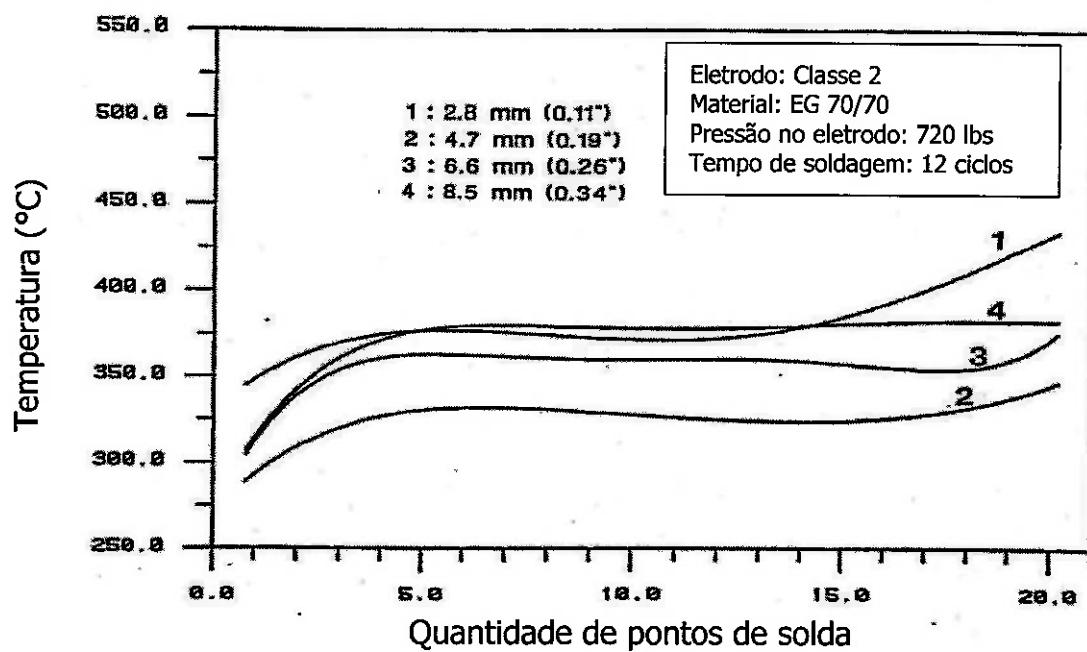


Figura 3.19 - Troca de temperatura máxima da superfície do eletrodo pela versus a função do número de pontos de solda (adaptado) [15].

3.10.3 Influência do fluxo de refrigeração do eletrodo.

A figura 3.20 resume outro conjunto de experiências em que a temperatura máxima da face do eletrodo foi monitorada como uma função de várias taxas de fluxo de refrigeração e as espessuras de face de eletrodo. A corrente de soldagem variou de 12,5 a 12,7 KA. Os dados são apresentados na figura 3.21, que representam a mudança de temperatura máxima do eletrodo durante o ciclo de soldagem. As curvas foram geradas pela curva de ajuste dos dados experimentais discretas com factor de correlação superiores a 0,98 em todos os casos. Quatro pontos de dados foram obtidos correspondendo à 8^a, 10^a, 12^a e 20^a soldas. É evidente na figura 9 e tabela 1 que a espessura da face do eletrodo tem um efeito muito maior na temperatura máxima do eletrodo do que o fluxo do líquido de refrigeração. A faixa de temperaturas máximas medidos é de cerca de 80 ° C durante esta experiência [15].

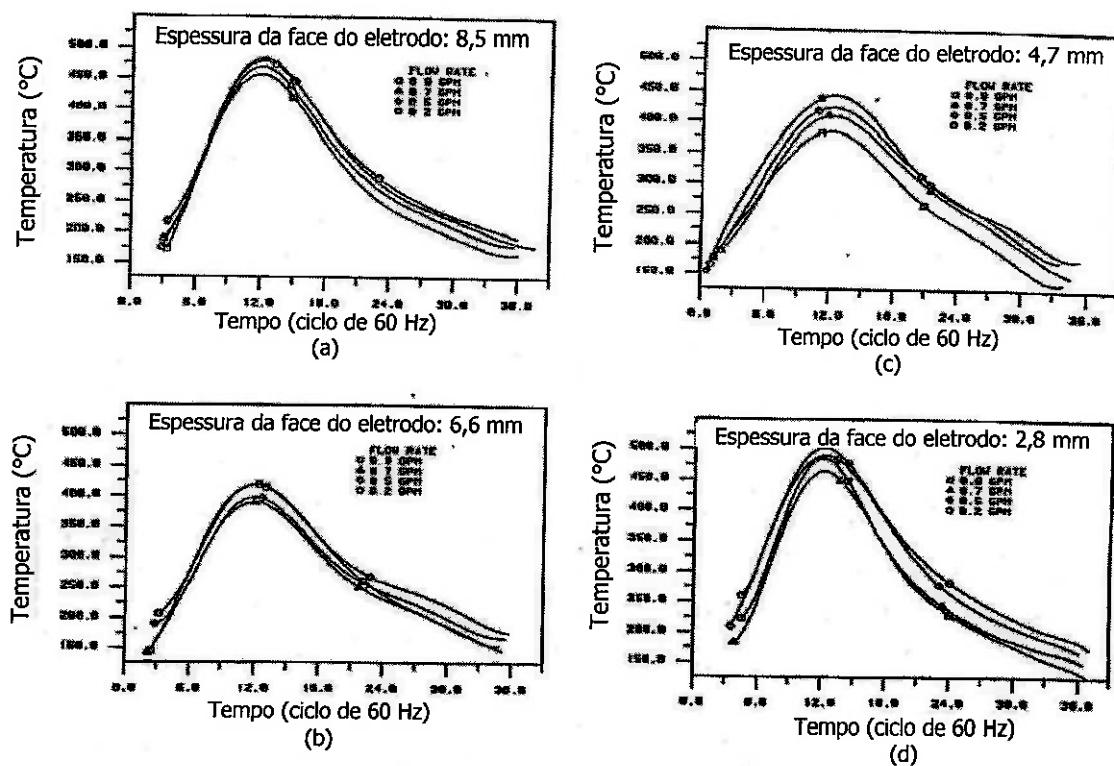


Figura 3.20 - Troca de temperatura máxima da superfície do eletrodo durante as soldagens (adaptado) [15].

A temperatura mais baixa foi observada no eletrodo de 4,7 milímetros, quando a taxa de fluxo do líquido de refrigeração foi de 0,9 GPM. Para uma dada taxa de fluxo, os efeitos da espessura da face eletrodo podem ser explicados na figura 3.21 [15].

Fluxo Espessura	0.9 GPM	0.7 GPM	0.5 GPM	0.2 GPM
8.5 mm	460	472	485	481
6.6 mm	421	392	400	420
4.7 mm	388	413	429	450
2.8 mm	487	466	491	505

Temperatura (°C)

Figura 3.21 - Efeito da taxa de fluxo de refrigeração e espessura da face do eletrodo sobre a temperatura máxima da superfície (adaptado) [15].

O comprimento de difusão de calor em um corpo sólido pode ser estimado calculando o comprimento de difusão de calor específico. Se a temperatura na interface de eletrodo é assumida constante durante cada meio ciclo de soldagem, este comprimento de difusão, I , é igual a equação 6 [15]:

$$I = 2 \sqrt{\alpha t} \quad (6)$$

Onde:

I = Comprimento de difusão de calor

α = Difusão térmica do material do eletrodo

t = Tempo de soldagem

Para um aumento de temperatura de 16 % da temperatura de interface de eletrodo. Aqui α é a difusividade térmica do material do eletrodo, que é aproximadamente $0,9 \text{ cm}^2/\text{seg}$. e t é o tempo de soldagem, que neste caso foi de 0,2 segundos (12 ciclos). Assim, a característica comprimento de difusão de calor estimada durante o ciclo de solda é de 8,5 mm. Isto significa que o calor gerado no primeiro ciclo de tempo de soldagem irá difundir uma distância de cerca de 8,5 mm a partir da interface do eletrodo até ao final do ciclo de soldagem. Por outro lado, o calor gerado no 12º ciclo irá propagar apenas cerca de 2,5 mm, antes do fim do ciclo de soldagem . Ao diminuir a espessura da face do eletrodo, a área de superfície refrigerada pela água pode ser aumentada. Se o fluxo de calor na interface do líquido de refrigeração é a etapa determinante da velocidade, a temperatura do eletrodo na superfície da água refrigerada irá aumentar produzindo assim uma maior queda de temperatura através da camada limite do líquido de refrigeração [15].

Portanto, o aumento da área da superfície de contato da água refrigerada e a maior queda de temperatura, com os eletrodos de face mais fina, ajudarão a reduzir a temperatura do eletrodo. A temperatura máxima do eletrodo vai ser determinada por dois fatores: o comprimento de difusão de calor e a área de refrigeração na interface do eletrodo / interface do líquido de refrigeração [15].

Como pode ser visto nas figuras 3.19 e 3.21, os eletrodos com faces de 8,5 mm e 2,8 mm de espessura, apresentam as temperaturas de eletrodos mais elevadas. Para 8,5 mm de espessura do eletrodo, a água de refrigeração não tem qualquer efeito sobre a temperatura do eletrodo / folha de temperatura de interface durante o tempo do ciclo de solda, já que a maior parte do calor não pode difundir-se tanto quanto a água no tempo permitido. Isto está ilustrado na figura 9 - (a). Neste caso, a água de refrigeração, refrigera o eletrodo apenas após o fim da soldagem. Não há nenhum efeito da água sobre a temperatura da superfície do eletrodo durante a soldagem por si só. Ao contrário, da experiência com os 2,8 milímetros de espessura da face dos eletrodos refrigerada por água durante o ciclo de soldagem [15].

3.11 Materiais dos eletrodos e suas classificações.

Pelos eletrodos trabalharem sob condições extremamente desfavoráveis, com pressão e elevadas temperaturas, eles devem possuir propriedades mecânicas, térmicas e elétricas bastante elevadas [11].

As principais características dos materiais necessárias ao bom desempenho das funções do eletrodo são [16]:

- Alta condutividade elétrica: Devido à passagem da corrente elétrica elevada, para evitar perdas e superaquecimento dos eletrodos. A resistência de contato eletrodo-peça é muito influenciada pela condição elétrica do eletrodo;
- Alta condutividade térmica: para melhor conduzir o calor gerado principalmente nos pontos de contato eletrodo-peça;
- Elevada dureza e resistência ao desgaste a elevadas temperaturas: a fim do eletrodo não se gastar e deformar, mantendo a forma original;
- Elevada resistência à redução da dureza a temperaturas elevadas: o eletrodo, pela sua própria função, trabalha em temperaturas elevadas, a redução da dureza é devido ao efeito da temperatura diminuirá a vida útil do eletrodo, devendo por isto o material ser resistente à redução da dureza depois de submetido a longos tempos a temperaturas elevadas;
- Baixa tendência para formar liga com material a ser soldado a fim de evitar que o material fique aderido ao eletrodo.

Os eletrodos à base de cobre estão classificados segundo a Resistance Welder Manufacturers Association (RWMA) em 3 classes [17] :

Classe 1: Não são tratáveis termicamente mas são endurecidas por trabalho a frio, que não afeta as propriedades elétricas e térmicas. Possuem resistência mecânica, dureza e condutibilidade elétrica elevada. Essa classe é usada na soldagem de chapas de aço zinkadas, estanhadas ou cromadas, alumínio e suas ligas e magnésio e suas ligas [4].

Classe 2: Endurecem por tratamento térmico ou por tratamento termodinâmico. Possuem propriedades mecânicas melhores que as ligas de classe 1, porém com condutibilidade elétrica e térmica inferiores. Esta classe é a de mais amplo uso em soldagem por resistência, tanto do ponto de vista das ligas como das condições de soldagem. Utilizadas na soldagem por resistência de aço de baixo carbono, aço-carbono niquelado, aços inoxidáveis, ligas a base de níquel e ligas a base de cobre, como bronze-silício e cobre-prata [4].

Classe 20: É composta por materiais com capacidade de resistir a altas taxas de calor e pressão quando comparado com os materiais das classes 1 e 2. São fabricados utilizando cobre e material refratário. A Tabela 3.1 mostra as características dos materiais de fabricação dos eletrodos conforme a classificação da RWMA [17].

Tabela 3.1 – Características dos materiais dos eletrodos conforme a classificação da RWMA adaptado [17].

Classe RWMA	Descrição	Condutividade de (I.A.C.S)	Dureza (HB)	Mecanismo Endurecimento
RWMA 1 (Classe 2)	Cobre-Zircônio CuZr (0,15%Zr)	90%	70HB	Precipitação
RWMA 2 (Classe 2)	Cobre - Cromo CuCr (1%Cr)	85%	83HB	Precipitação
RWMA 2 (Classe 2)	Cobre Cromo Zircônio CuCrZr (1%Cr 0,25%Zr)	85%	83HB	Precipitação
RWMA 20 (Classe 20) Al-60	Cobre Resistente por Dispersão CuAl ₂ O ₃ (1,1%Al ₂ O ₃)	85%	75HB	Dispersão

3.12 Geometria do eletrodo.

Um eletrodo para soldagem a ponto possui 4 características geométricas que devem ser destacadas [4]:

- Face: é a parte que mantém contato com a peça de trabalho;
- Corpo: deve ter a suficiente massa, área ou espessura para suportar a força aplicada nas chapas e também para carregar a corrente de solda;
- Conexão é a forma como ele vai conectado no porta eletrodo ou suporte do eletrodo.
- Cavidade para refrigeração é a parte oca interna do eletrodo que está conectado ao suporte de eletrodo, serve para a refrigeração do eletrodo, não pode ser muito pequena para não dificultar a passagem da água de refrigeração e nem muito larga para não debilitar a estrutura do eletrodo.

Para este processo a manutenção e o consumo dos eletrodos são de grande relevância econômica, grande parte do desgaste dos eletrodos ocorre devido à alta temperatura de trabalho e o tempo de permanência que o eletrodo fica na mesma, sendo que a vida útil dos eletrodos está diretamente ligada à correta especificação da matéria prima e da geometria para a aplicação do eletrodo [4].

A figura 3.22 mostra alguns tipos de eletrodos para soldagem a ponto por resistência.



Figura 3.22 - Tipos de eletrodos de cobre para soldagem [18].

3.13 Alinhamento e centralização dos eletrodos.

O alinhamento dos eletrodos é muito importante durante a soldagem, no qual tem a finalidade de manter um contato uniforme (eletrodo/peça) para melhor eficácia na condução de corrente elétrica e geração de calor, obtendo assim uma boa formação do ponto solda [8].

A figura 3.23 mostra o perfeito alinhamento dos eletrodos, mostrados através de uma pasta para verificação de contato.



Figura 3.23 - Contato uniforme dos eletrodos em perfeito alinhamento.

O desalinhamento do eletrodo pode causar ovalização, descentralização do ponto e aumento de indentação. Outra consequência do desalinhamento é a mudança induzida na pressão de contato, causando uma distribuição assimétrica da pressão no contorno do ponto entre chapas, como mostra a figura 3.24, no entanto fica desfavorável a prevenção da vida útil do eletrodo e a expulsão de material, como mostra a macrografia na Figura 3.25 [8].



Figura.3.24 - Distribuição assimétrica da pressão.



Figura 3.25 - Macrografia de um ponto não uniforme [8].

3.14 Defeitos no processo de solda ponto por resistência.

No processo de soldagem a ponto por resistência como em outros processos, existe a possibilidade de gerar defeitos, como solda sem fusão, respingo, indentação elevada entre outras. Cada não conformidades são geradas pelas variáveis do processo. A figura 3.26 resume em uma tabela os

defeitos gerados nos processos de soldagem a ponto por resistência e as suas possíveis causas.

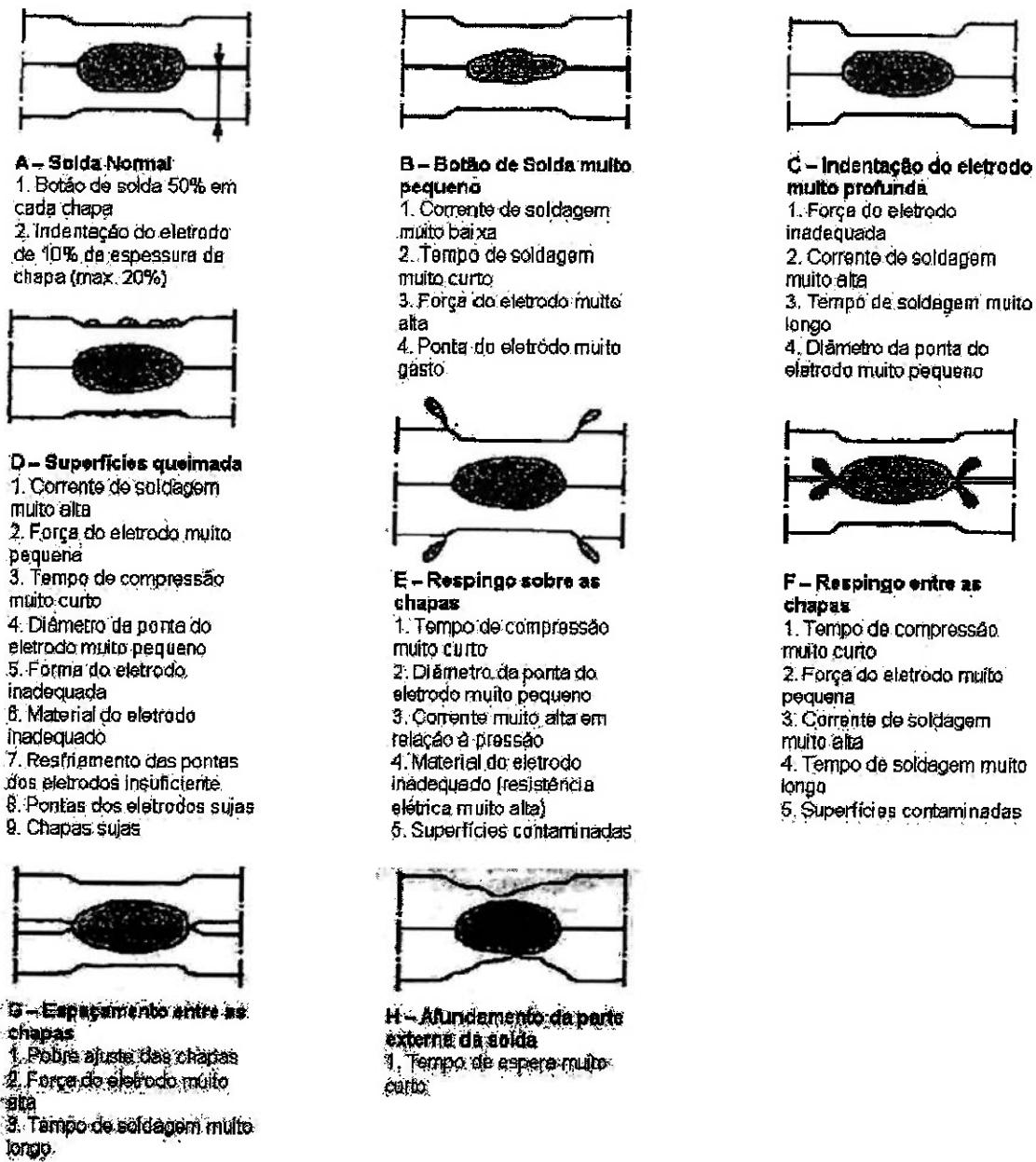


Figura 3.26 – Defeitos no processo de soldagem a ponto por resistência [10].

3.15 Ensaios de Cisalhamento.

O teste por tensão cisalhante consiste na aplicação de forças opostas que agem paralelamente à superfície da peça. O corpo de prova é carregado até a tensão de ruptura numa máquina padrão para o teste, conforme a figura 3.27 [12].

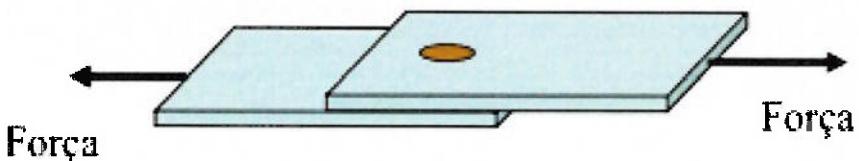


Figura 3.27 - Ensaio por tensão cisalhante da junta soldada [12].

Conhecido também como “Lap Shear” foi criado analisar a qualidade mecânica do ponto de solda em relação ao cisalhamento [19].

Em uma avaliação de impacto veicular, os pontos de solda podem ser rompidos, o que pode potencialmente afetar os sinais adquiridos no crash test. Por isso, a resistência dinâmica dos pontos de solda tem sido um dos itens mais importantes no desenvolvimento estrutural de um veículo. E dessa forma, a modelagem da separação do ponto de solda deve ser uma das propriedades consideradas na análise [19].

Para a execução do ensaio, utiliza-se uma máquina de tração convencional, onde o corpo de prova é preso entre as garras de fixação, conforme mostra as figuras 3.28 e 3.29.



Figura 3.28 - Exemplo de máquina de ensaio de cisalhamento.



Figura 3.29 - Exemplo de ensaio de cisalhamento.

3.16 Ensaios de Ultrassom por imagem.

Atualmente o ensaio por ultrassom utilizando o transdutor matricial (MAEV, 2000) pode ser considerada o estado da arte da tecnologia de inspeção por ultrassom na soldagem a ponto por resistência [20]. Este ensaio vem cada vez mais sendo utilizado para analisar e validar processos de soldagem dentro de fábricas. Assim como o ensaio destrutivo é muito rápido de se realizar, com a vantagem de não gerar descartes de sucata. Existem dúvidas na confiabilidade do processo, porém estudos mostram que o método é confiável. A figura 3.30 mostra um equipamento convencional e portátil de ultrassom por imagem.

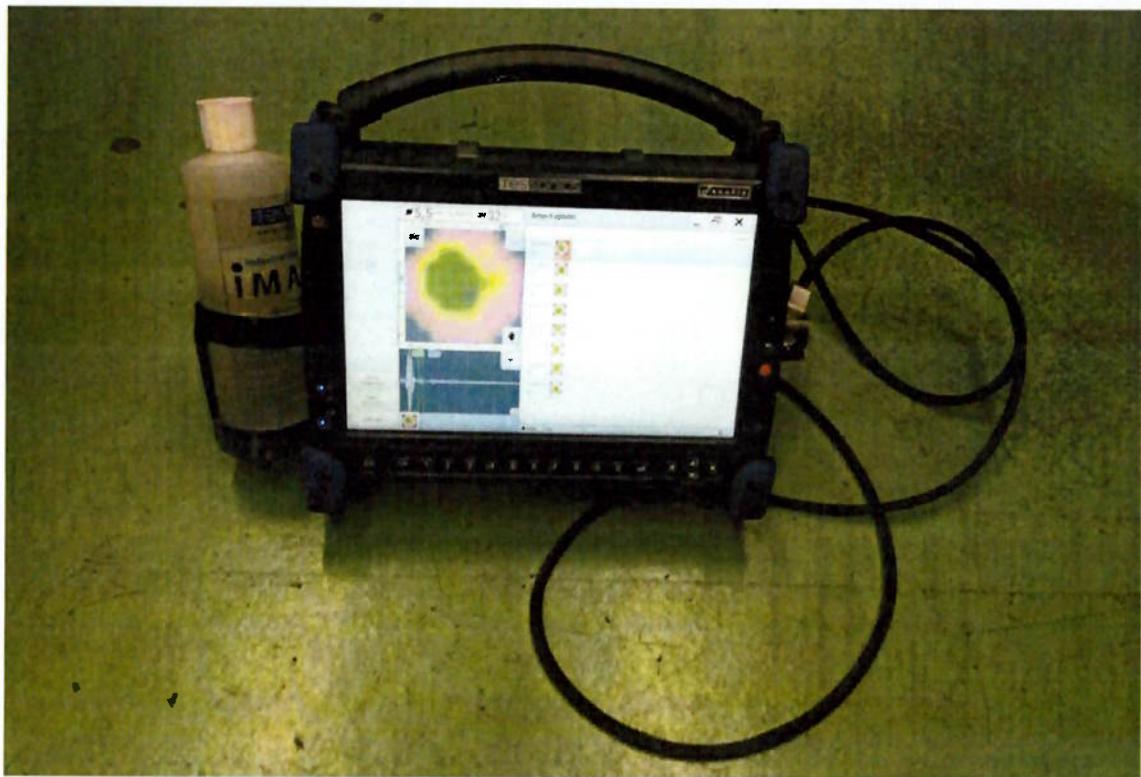


Figura 3.30 - Exemplo de equipamento de ultrassom por imagem.

A captação de imagem é realizada por um transdutor com 52 elementos de imagem acoplada ao equipamento, conforme mostra a figura 3.31. Normalmente é utilizado um gel a base de água para facilitar a passagem das ondas ultrassônicas [21].

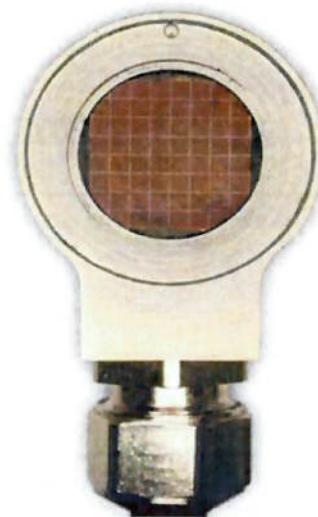


Figura 3.31 - Transdutor utilizado no equipamento de ultrassom por imagem [22].

Através da onda ultrassônica, pode-se identificar uma possível descontinuidade do ponto de solda. A figura 3.32, mostra um modelo esquemático do funcionamento do equipamento de ultrassom.

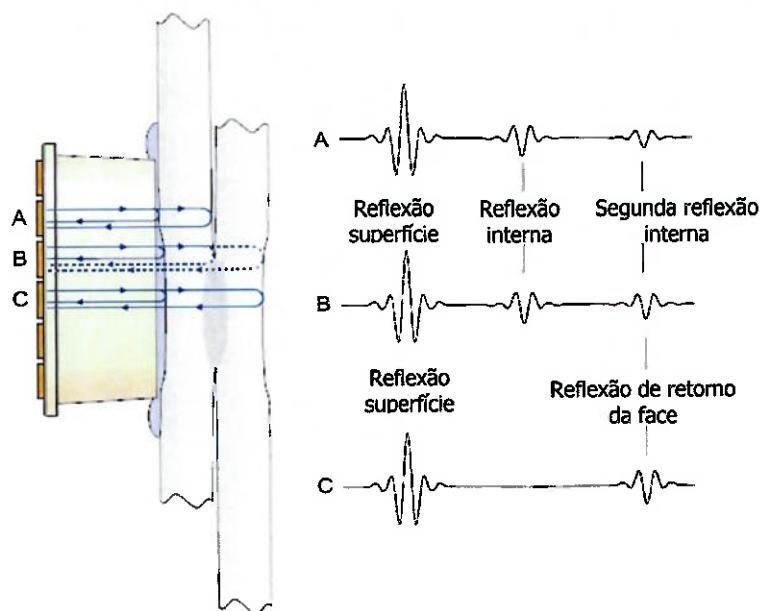


Figura 3.32 - Exemplo de captação de imagem do ensaio de ultrassom por imagem (adaptado) [22].

Após a captação do transdutor, os sinais ultrassônicos são convertidos em formato de imagem de acordo com a intensidade da onda. A figura 3.33 mostra a imagem gerada pelo equipamento ultrassom por imagem.

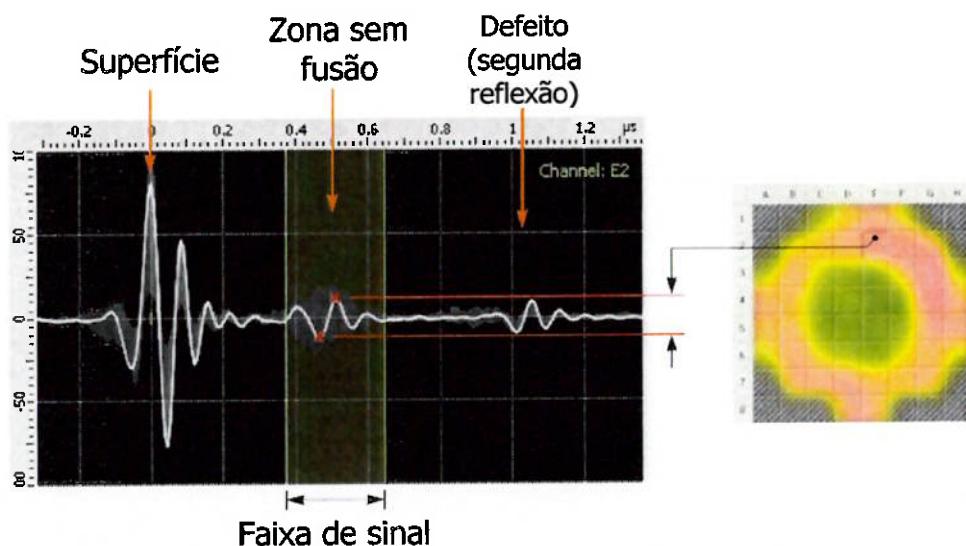


Figura 3.33 - Exemplo de imagem do ensaio de ultrassom por imagem (adaptado) [22].

O equipamento, em suas condições normais de uso, pode apresentar variações de medição em comparação com um resultado metalográfico da ordem 0,1 a 0,2 mm. Isto ocorre especialmente devido ao fato de o algoritmo "estimar" o diâmetro do ponto, visto que os mesmos em sua grande maioria não se formam como um diâmetro perfeito. Pode-se ressaltar que existe uma série de ajustes que podem ser feitos nos parâmetros do equipamento, e que se o processo de soldagem se mantiver estável, estes resultados de correlação aumentam significativamente, reduzindo o desvio a um valor quase que desprezível. A figura 3.34 mostra uma comparação entre os ensaios por microscópio acústico, ultrassom por imagem, e teste destrutivo por arrancamento respectivamente [22].

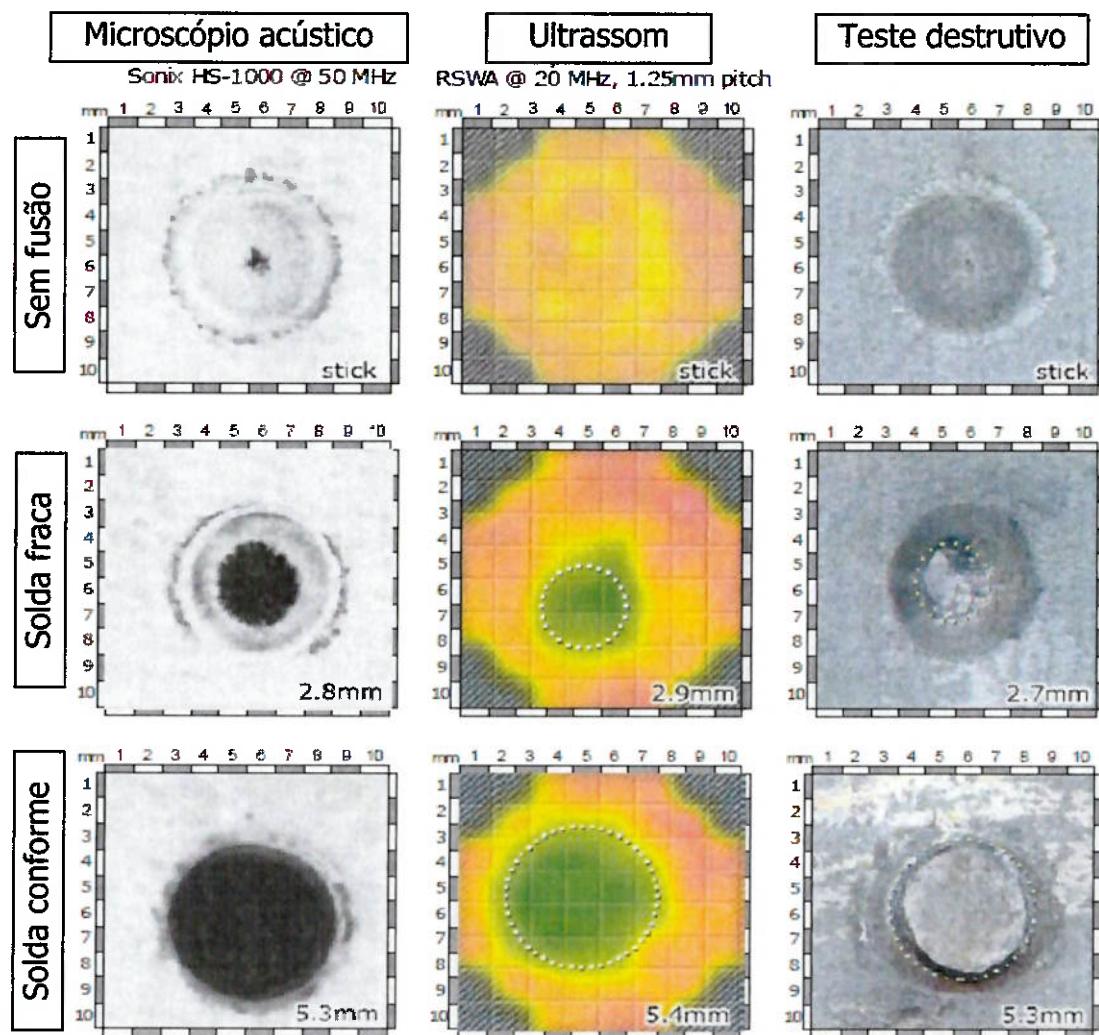


Figura 3.34 - Comparação de eficiência do ensaio por ultrassom (adaptado) [22].

3.17 Ensaios de Macrografia.

O ensaio de macrografia é realizado para verificação da presença de descontinuidades, tais como, falta de penetração, falta de fusão, contração de volume, porosidade, zona afetada pelo calor (ZAC) e medição do diâmetro mínimo da seção do ponto. Além disso, pode-se analisar as microestruturas presentes na zona fundida e na zona afetada pelo calor dos pontos de solda.

Para isso as amostras são cortadas no centro do ponto de solda, embutidas em corpos de prova, lixadas, polidas, e atacadas quimicamente para estudo via microscópio ótico, como mostra a figura 3.35.

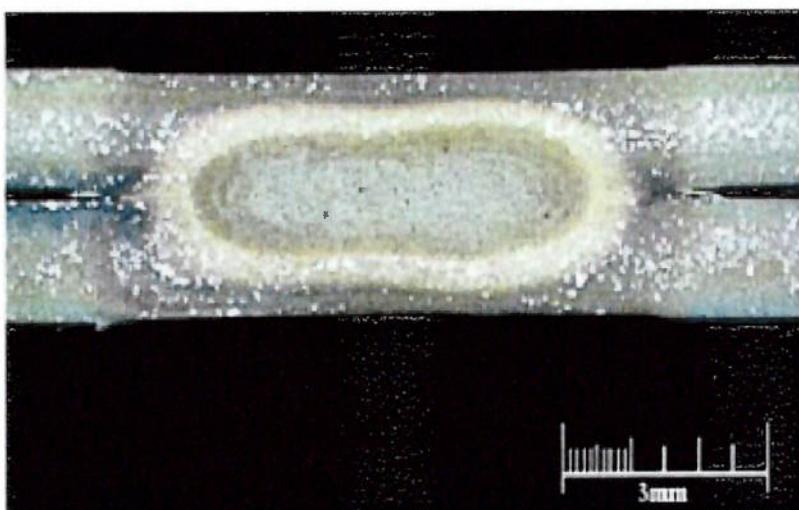


Figura 3.35 - Exemplo de amostra de ensaio macrográfico [23].

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Características do eletrodo.

Para a execução das soldas, utilizou-se um eletrodo em cobre cromo zircônio ($\text{CuCrZr} - 1\% \text{Cr} 0,25\% \text{Zr}$) - Classe 2, estampado a frio, como mostra a figura 4.1.



Figura 4.1 - Eletrodo utilizado nos testes.

4.1.2 Geometria do eletrodo.

As pontas dos eletrodos tem face reta com diâmetro de 6 mm, raio esférico de 8 mm e 23 mm de comprimento, como mostra a figura 4.2.

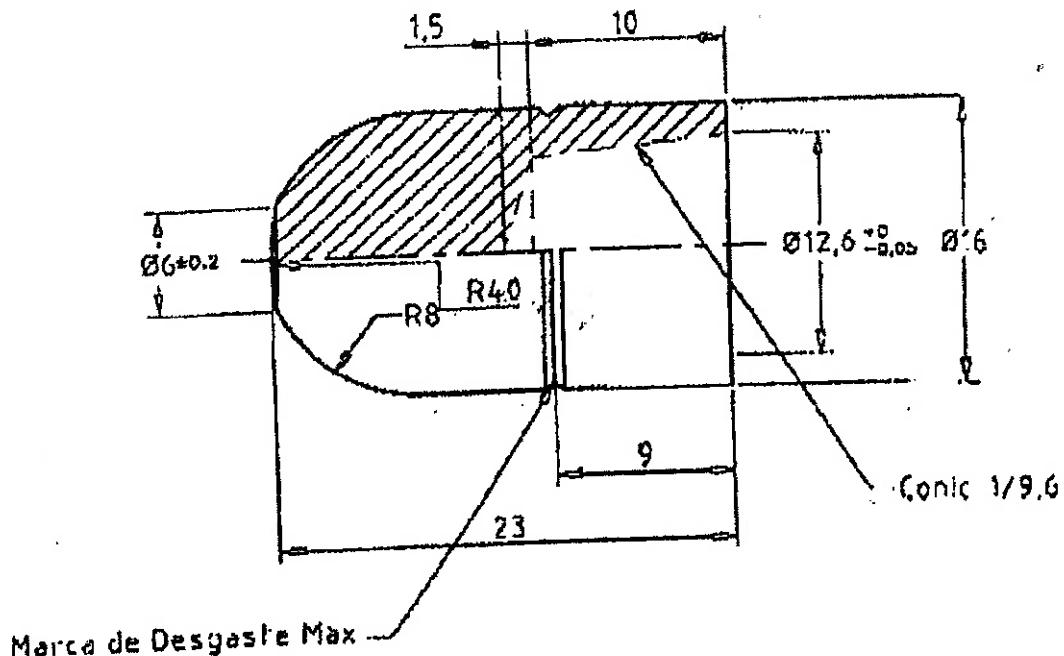


Figura 4.2 - Dimensões do eletrodo utilizado no testes.

A tabela 4.1 mostra as especificações técnicas do material dos eletrodos utilizados nos experimentos.

Tabela 4.1 - Composição química e propriedades eletromecânicas do eletrodo utilizado nos testes.

Eletrodo (CuCrZr)	
Composição química encontrada	Equipamento utilizado
Cu 99,16%	Espectrômetro de emissão optico 4480 0062
Cr 0,091%	
Zr 0,75%	
Dureza	Equipamento utilizado
80 HRB	Microdurômetro HMV 4480 0016
Condutividade	Equipamento utilizado
80% IACS	Condutivímetro ZAPPI DC 9

4.2 Características da chapa de aço.

O Material das chapas de aço utilizado tanto para a execução das soldagens quanto para os corpos de provas foi o GMW2M-ST-S-CR3-HD60G60G-U com espessura 0,80 mm conforme norma GMW8 [24]

Chapa de aço carbono com revestimento de zinco por imersão a quente numa superfície de aço, devidamente preparada. As tabelas 4.2 e 4.3 mostram a composição química, propriedades mecânicas e revestimento da chapa utilizada nos experimentos.

Tabela 4.2 - Composição química e propriedades mecânicas da chapa utilizada nos testes.

Superfície	Limite de escoamento	Limite de resistência	Alongamento	Composição química (% peso)									
				C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Cr	Ni	
Galvanizada	169 MPa	300 MPa	49%	0,001	0,01	0,016	0,018	0,009	0,048	0,062	0,01	0,01	

Tabela 4.3 - Revestimento eletrolítico de zinco da chapa utilizada nos testes.

Índice de camada	Camada nominal de zinco em cada lado	
	Espessura µm	Massa g/m ²
60G/60G	8,5	142

4.3 - Características da máquina de soldagem a ponto por resistência.

As soldagens foram executadas por uma máquina estacionária de corrente alternada com alimentação 440 V (60 Hz) com acionamento pneumático, como mostra na figura 4.3.



Figura 4.3 - Máquina de soldagem estacionária de corrente alternada utilizada nos testes.

4.4 Equipamentos de calibração da soldagem.

O equipamento de soldagem passou por processo de calibração após definido os parâmetros de soldagem visto na tabela 4.4. Para calibração do tempo e corrente de soldagem, foi utilizado o medidor de corrente, mostrado na figura 4.4. Para calibração da força foi utilizado um dinamômetro digital com capacidade de carga 1000 kg, mostrado na figura 4.5.



Figura 4.4 - Equipamento de leitura de corrente utilizado nos testes.



Figura 4.5 - Computador e Dinamômetro digital para a leitura da pressão e corrente de soldagem utilizado nos testes.

Tabela 4.4 - Descritivo dos equipamentos para a definição dos parâmetros utilizados nos testes.

Item	Equipamentos	Descrição
1	Computador	Com programa instalado USB Microscope
2	Dinamômetro digital	Capacidade 1000kg
3	Equipamento de leitura de corrente	WELD TESTER TECNA
4	Calibrador de tempo e corrente	FASE HCM 4300 HHT

4.5 - Determinação do diâmetro do ponto de solda através do diagrama de soldabilidade.

Antes de iniciar a soldagem nas chapas de teste, definimos um parâmetro através do diagrama de soldabilidade tempo versus corrente. A janela operacional é a área que compreende os parâmetros ideais para o processo, em função da intensidade da corrente e o tempo de soldagem, já que a força é constante. A janela operacional situa-se entre os limites mínimos, que são pontos de solda menores que o especificado (corrente baixa) e os limites máximos, que são determinados pela expulsão do material através de respingos (corrente alta). No experimento utilizou-se o seguinte método:

Fixou-se força aplicada na soldagem em 290kgf e o tempo em 100ms. Iniciou-se o primeiro teste com uma corrente de 6KA, aumentando-se gradualmente a corrente em intervalos de 100 A, até que, pelo menos três amostras apresentassem o diâmetro do ponto menor que o especificado (menor que 4 mm), conforme o teste de arrancamento de acordo com a norma GMW140057. Desta forma o limite mínimo da corrente foi pré-fixada a partir desse ponto e acrescentou-se 200A para a determinação final do limite mínimo da corrente de soldagem.

Com o limite mínimo estabelecido aumentou-se gradualmente a corrente em intervalos de 100 A até ocorrer a expulsão de material, neste ponto diminui-se 200 A e encontrou-se o limite máximo, mostrado na figura 4.6.

Repetiu-se o mesmo procedimento acima para os outros três tempos de soldagem, 150, 200 e 250 ms.

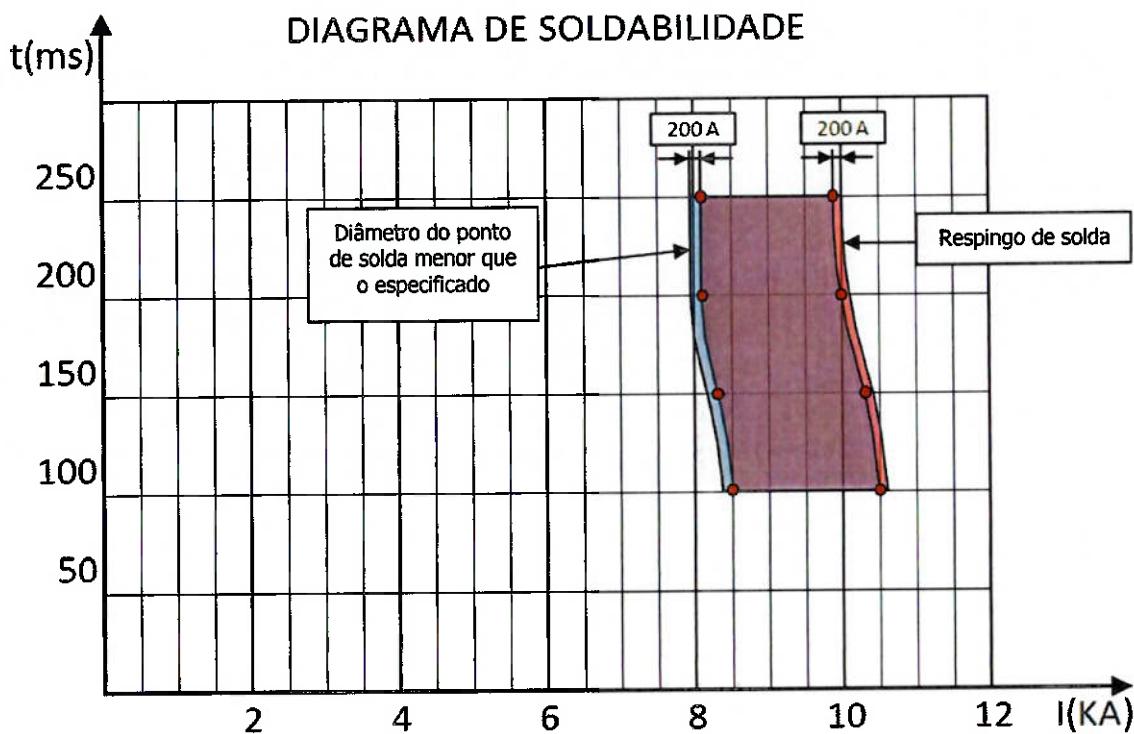


Figura 4.6 - Método de determinação dos limites mínimo e máximo de correntes de soldagem utilizado nos testes.

4.6 parâmetros de soldagem.

Os parâmetros de soldagem, mostrados na tabela 4.5 foram definidos através do diagrama de soldabilidade visto na figura 4.6. Com esses parâmetros foi obtido o ponto de solda acima do diâmetro mínimo de 5,0 mm para chapas com revestimento de acordo com a norma.

Tabela 4.5 - Parâmetros de soldagem utilizados nos testes.

Pré-Pressão	Corrente de soldagem	Tempo de soldagem	Refrigeração	Tempo de espera	Força de atuação nos eletrodos
60 ciclos	9,5kA	200ms (12 ciclos)	5 ciclos	10 ciclos	290Kgf

4.7 Temperatura de refrigeração dos eletrodos.

Para manter a temperatura da água de refrigeração do eletrodo constante, conectou-se uma unidade de refrigeração à máquina de soldagem estacionária conforme mostra a figura 4.7.



Figura 4.7 - Unidade de refrigeração utilizada nos testes.

No teste 1 onde foi fixada uma vazão de 4,3 l/min. e definido três valores de temperatura. A cada valor de temperatura foi executados soldagens para a análise da influência dos mesmos.

A figura 4.8 mostra o visor da unidade de refrigeração ajustado para que a água de refrigeração mantenha 13 °C, 20°C e 25°C de temperatura.



Figura 4.8 - Parâmetros de temperaturas da refrigeração utilizados no teste 1.

Na tabela 4.6 pode-se verificar os parâmetros de temperatura definidos para o teste 1.

Tabela 4.6 - Parâmetros de temperatura do teste 1 utilizados nos testes.

Teste 1 - Parâmetros de Temperatura da água de refrigeração			
Temperatura:	13 °C	20°C	25°C
Vazão:	4,3 l/min.	4,3 l/min.	4,3l/min.

4.8 Vazão de refrigeração dos eletrodos.

Igualmente para o teste 2, foi fixado uma temperatura e variou-se o fluxo da vazão de água de refrigeração dos eletrodos. Foram conectados nos porta-eletrodos superior e inferior um sistema de regulagem de vazão e através de um fluxômetro digital mediu-se a vazão e a temperatura da água de refrigeração que eram controlados através de um regulador de vazão, conforme mostra a figura 4.9.

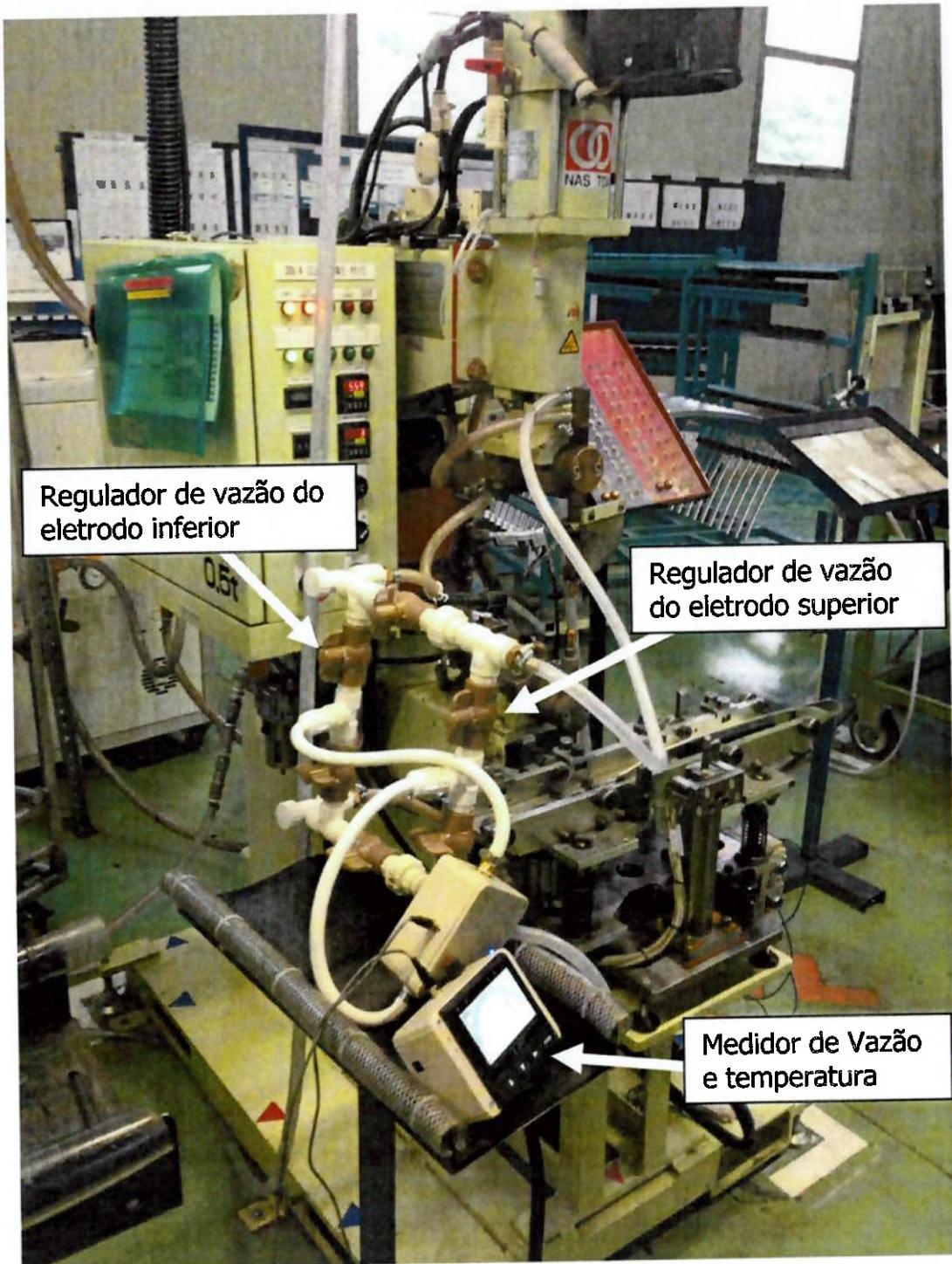


Figura 4.9 - Sistema de regulagem da vazão da água de refrigeração utilizado nos testes.

Foram definidos três valores diferentes de vazão do fluxo de refrigeração para realizar os testes. A temperatura da água de refrigeração foi mantida a 13 °C.

Um fluxo mínimo de 1,7 l/min., um intermediário de 3,0 l/min. e um fluxo máximo de 4,3 l/min., como se pode observar na figura 4.10.



Figura 4.10 – Parâmetros de vazão de refrigeração utilizados no teste 2.

Fixou-se a temperatura da água de refrigeração em 13°C para analisar separadamente a influência do fluxo de vazão na qualidade da soldagem e na vida útil do eletrodo conforme a tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Parâmetros de Fluxo de vazão do teste 2 utilizado nos experimentos.

Teste 2 - Parâmetros de Fluxo de vazão da água de refrigeração			
Vazão:	1,7 l/min.	3,0 l/min.	4,3 l/min.
Temperatura:	13 °C	13 °C	13 °C

4.9 Características da chapa de trabalho.

Para produzir os pontos de solda foram utilizadas chapas de 60 x 500 mm com 0,80 mm de espessura para cada etapa dos testes, como mostra na figura 4.11.

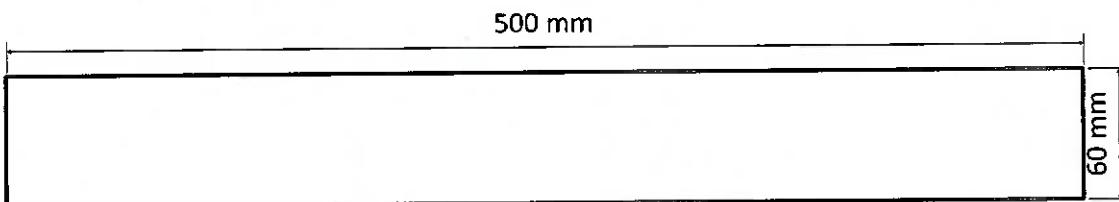


Figura 4.11 - Croqui das chapas de trabalho utilizadas nos testes.

As soldagens foram realizadas em chapas de aço com revestimento de zinco, mesmo material das chapas de teste conforme norma GMW8 com espessura de 0,8 mm conforme mostra a figura 4.12.

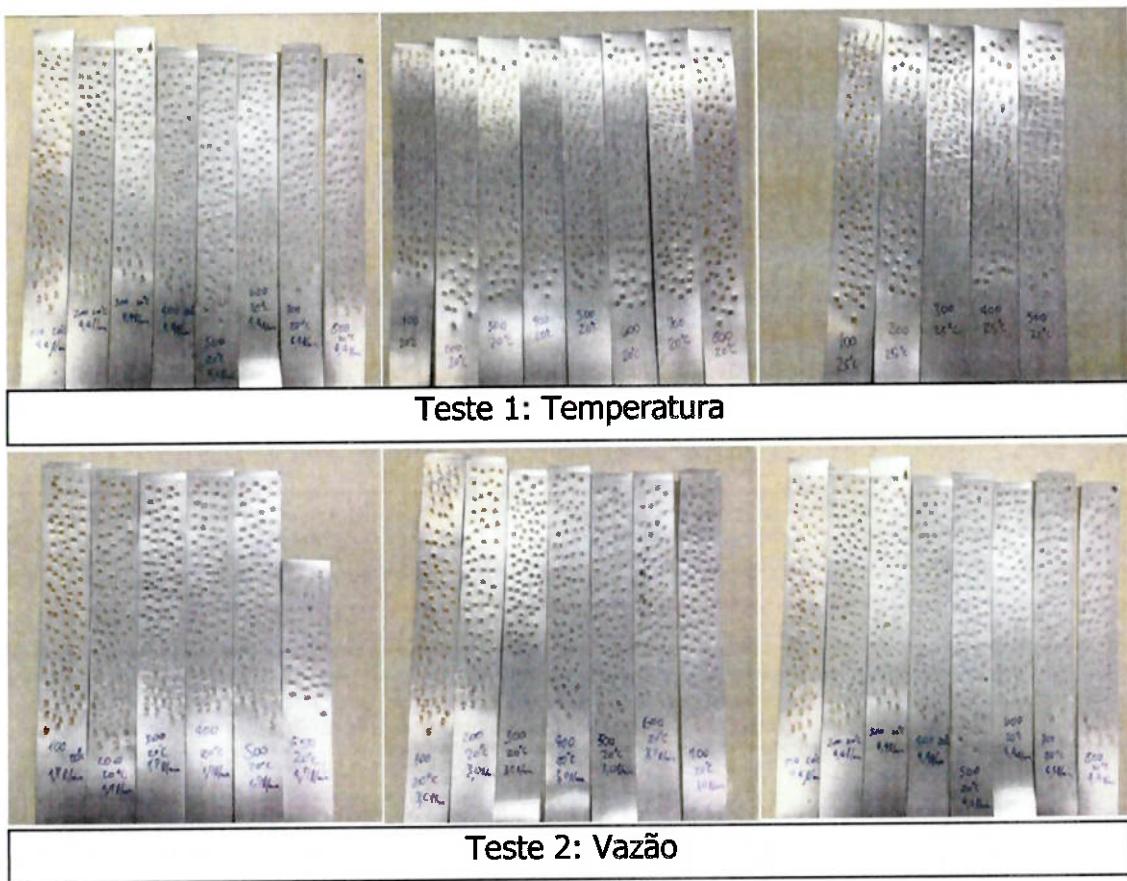


Figura 4.12 - Chapas de trabalho soldadas nos testes.

4.10 Ensaios realizados.

Para cada teste (1 Temperatura, 2 Vazão) realizou-se a medição da deformação dos eletrodos, teste de arrancamento para a definição dos parâmetros de soldagem ideais, ensaio de cisalhamento, ensaio de macrografia, e ensaio por ultrassom.

Para cada ensaio foram separados corpos de prova para a análise conforme mostra a figura 4.13.



CORPOS DE PROVA PARA O TESTE 1 DE TEMPERATURA



CORPOS DE PROVA PARA O TESTE 2 DE VAZÃO

Figura 4.13 - Corpos de prova dos testes de temperatura e vazão realizados nos ensaios.

4.11 Medição do desgaste dos eletrodos.

A cada cem pontos de solda eram medidas as áreas das superfícies desgastadas dos eletrodos inferior e superior, através do congelamento de imagem gerada pela mini câmera adaptada pela Welding Science conforme a figura 4.15, ligado a um programa chamado USB Microscope, que se permite fazer eletronicamente um círculo no contorno da área desgaste do eletrodo, após o congelamento da imagem como mostra na figura 4.14, obtendo assim o valor da área calculada pelo programa.

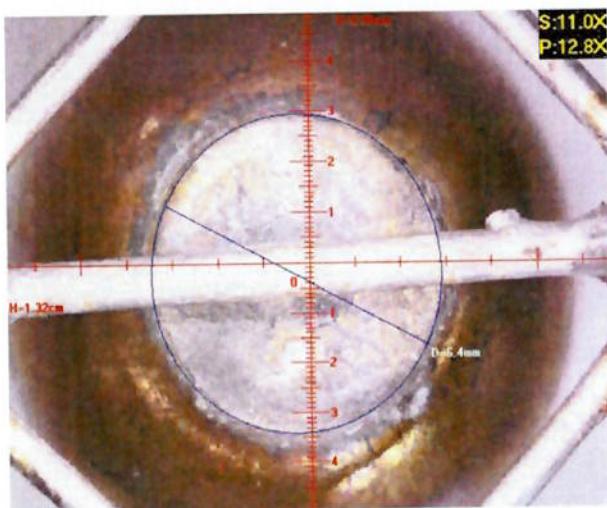


Figura 4.14 – Exemplo de congelamento da imagem para medir a área do desgaste do eletrodo.

A vantagem deste processo de medição, é que não há necessidade de retirar os eletrodos da máquina, mantendo-os na mesma posição durante os testes, obtendo assim maior garantia nos resultados medidos, além do equipamento ter maior precisão. A figura 4.15 mostra a câmera utilizada.

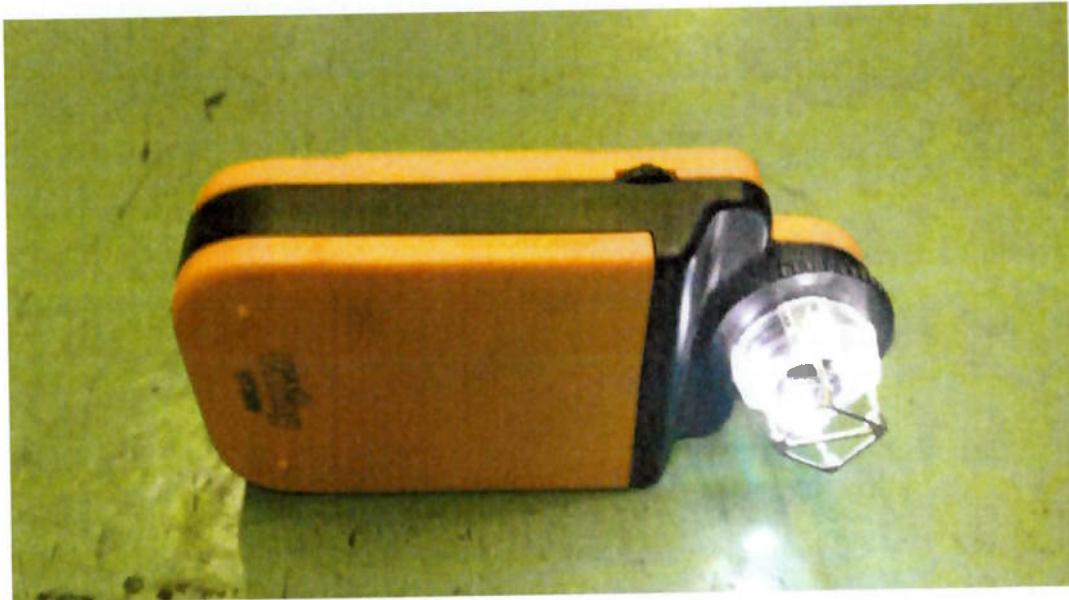


Figura 4.15 - Câmera adaptada para capturar face do eletrodo utilizado no ensaio.

4.12 Ensaio de Arrancamento.

Este ensaio é realizado com mais frequência em processo de soldagem a ponto por resistência. Ele é utilizado para determinar a soldabilidade do ponto em todas as especificações automobilísticas.

Existem muitas vantagens neste ensaio: facilidade de execução, baixo custo, execução no chão de fábrica como teste de controle de qualidade.

Utilizou-se uma morsa para prender o corpo de prova e um alicate para a realização do ensaio de arrancamento conforme a figura 4.16.

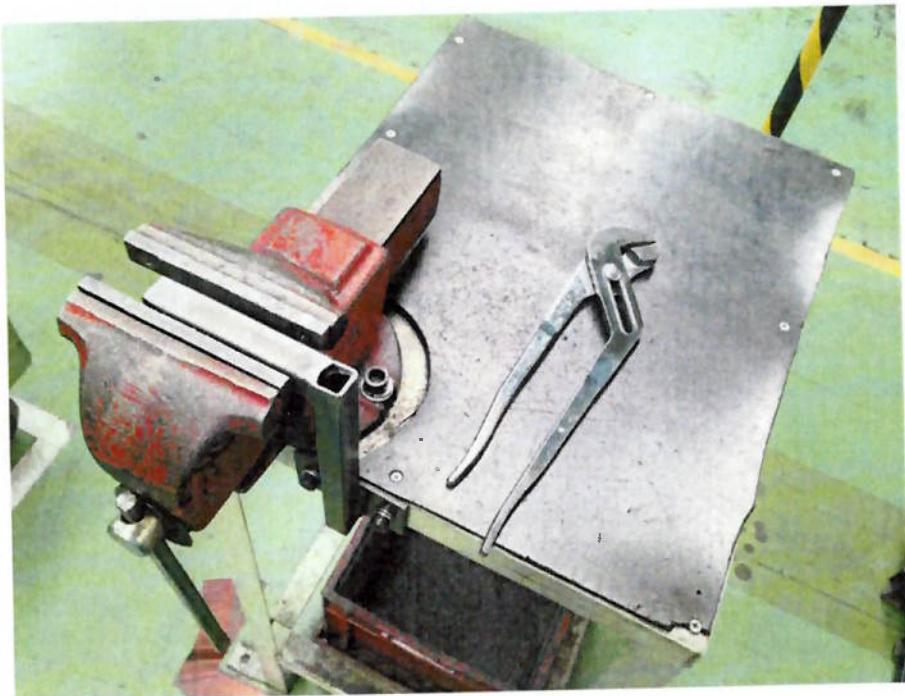


Figura 4.16 - Bancada do ensaio de arrancamento.

Para analisar a dimensão do ponto de solda, realizou-se o teste destrutivo e a medição conforme a norma GMW14057 como mostra a figura 4.17 e 4.18.

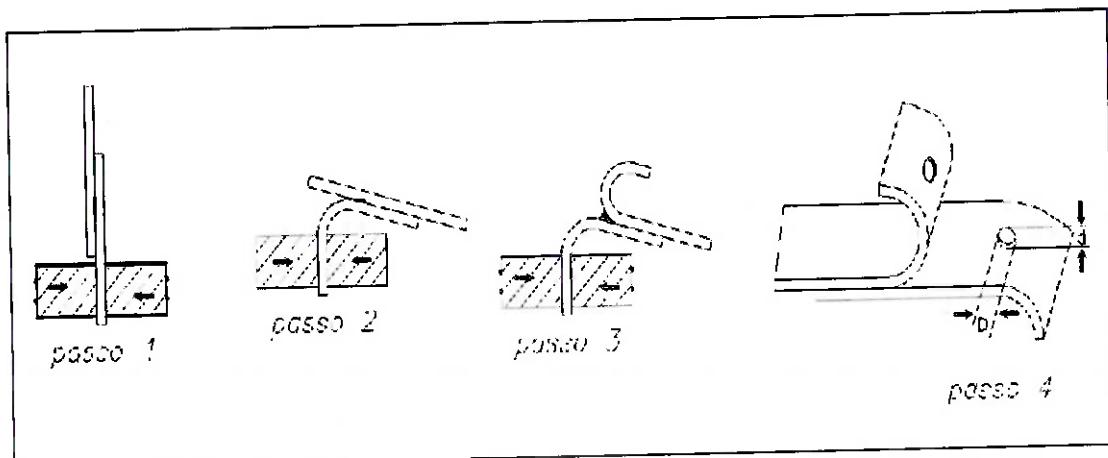


Figura 4.17 – Método de ensaio utilizado no destrutivo [12].

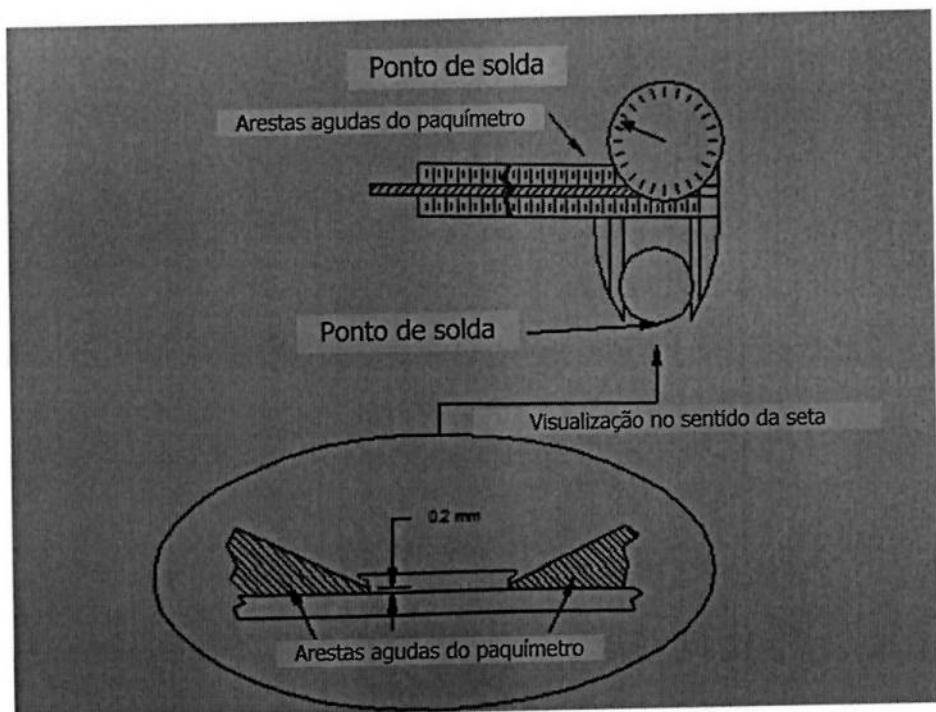
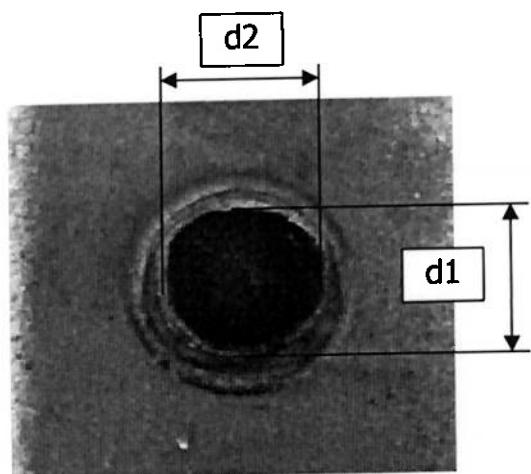


Figura 4.18 - Medição do ponto de solda (adaptado) [25].

A cada cem pontos mediu-se o diâmetro médio do ponto de solda, tirando a média de três amostras. Os pontos de solda foram dimensionados conforme a equação 6, tirando a média entre dois diâmetros medidos, como mostrado na figura 4.19.

A verificação do tamanho do ponto solda foi feito até chegar o limite de não ocorrer mais a fusão, devido à variação da densidade de corrente.

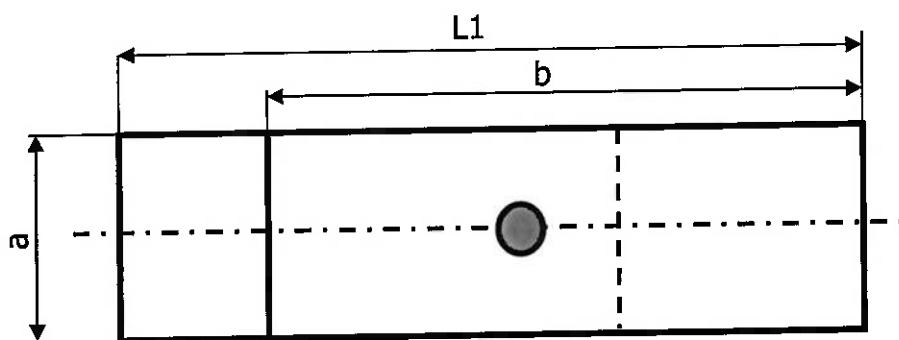


$$dm = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (6)$$

Figura 4.19 - Determinação do diâmetro médio do ponto de solda.

4.12.1 Corpo de prova do ensaio de arrancamento.

Para a realização dos ensaios de arrancamentos foram utilizados corpos de prova conforme a figura 4.20.



Medidas em mm			
Espessura	a	b	L1
0,8	30	100	120

Figura 4.20 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de arrancamento utilizados no ensaio.

4.13 Ensaio de cisalhamento do ponto de solda.

O ensaio foi realizado em uma máquina de tração convencional com capacidade de 30 KN e duas colunas. A velocidade do teste foi de 5m/min., não foi utilizado extensômetro e os corpos de provas foram presos direto nas garras da máquina conforme a figura 4.21.

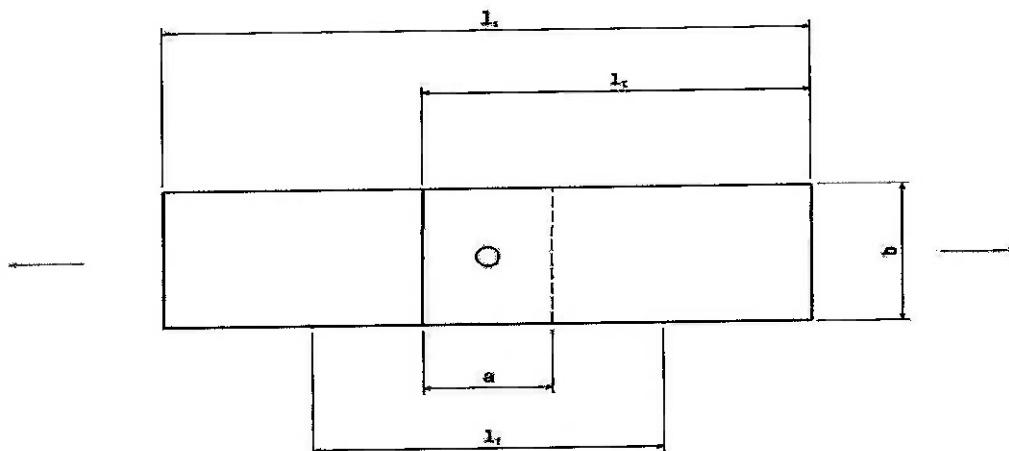


Figura 4.21 - Máquina de ensaio de cisalhamento utilizado no ensaio.

4.13.1 Corpo de prova do ensaio de cisalhamento.

Para a realização do teste de cisalhamento, utilizou-se corpos de prova nas dimensões conforme a norma EN ISO 14273, como mostra a figura 4.22. Estas dimensões a respeito do posicionamento do ponto de solda impedem a influência das bordas do corpo de prova, como por exemplo, fuga de corrente que não permitiria a existência de um ponto de solda de boa qualidade, e a

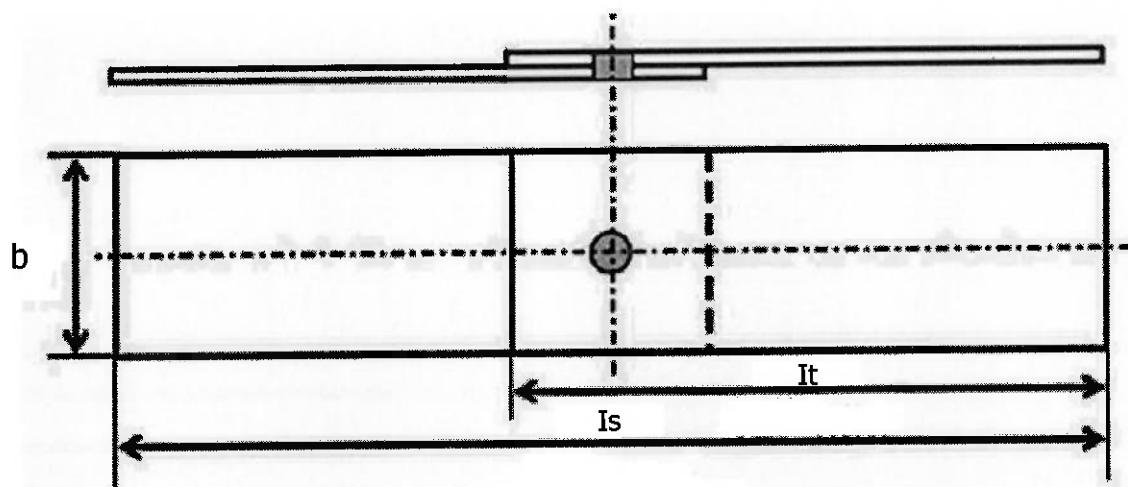
falha do material base ao invés da falha ao redor do ponto de solda, que pode ser causada pela utilização de corpos de prova estreito [5].



Dimensões dos corpos-de-prova, conforme Norma - EN ISO 14273					
t (espessura)	a	b	l_s	l_f	l
$0,5 < t \leq 1,5$	35	45	175	95	105
$1,5 < t \leq 3$	46	60	230	105	138
$3 < t \leq 5$	60	90	260	120	160
$5 < t \leq 7,5$	80	120	300	140	190
$7,5 < t \leq 10$	100	150	320	160	210

Figura 4.22 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento utilizado da referência [26].

A figura 4.23 mostra o corpo de prova de acordo com a espessura da chapa utilizada no ensaio.



Medidas em mm			
Espessura	b	Is	It
0,8	45	175	105

Figura 4.23 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento utilizado no ensaio (adaptado) [20].

Foram realizados ensaios para todos os parâmetros de refrigeração, Temperatura e vazão conforme a figura 4.24.

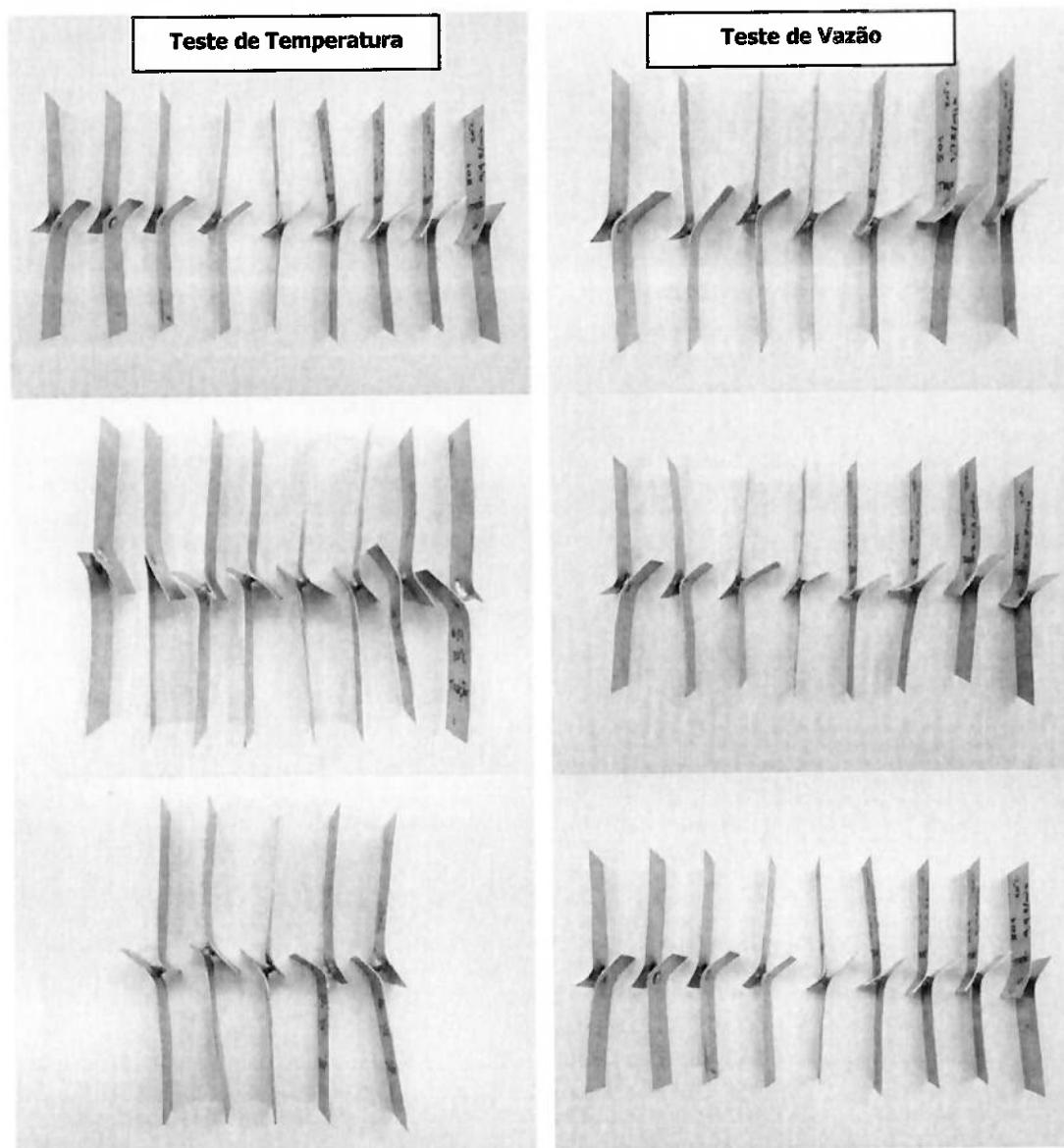
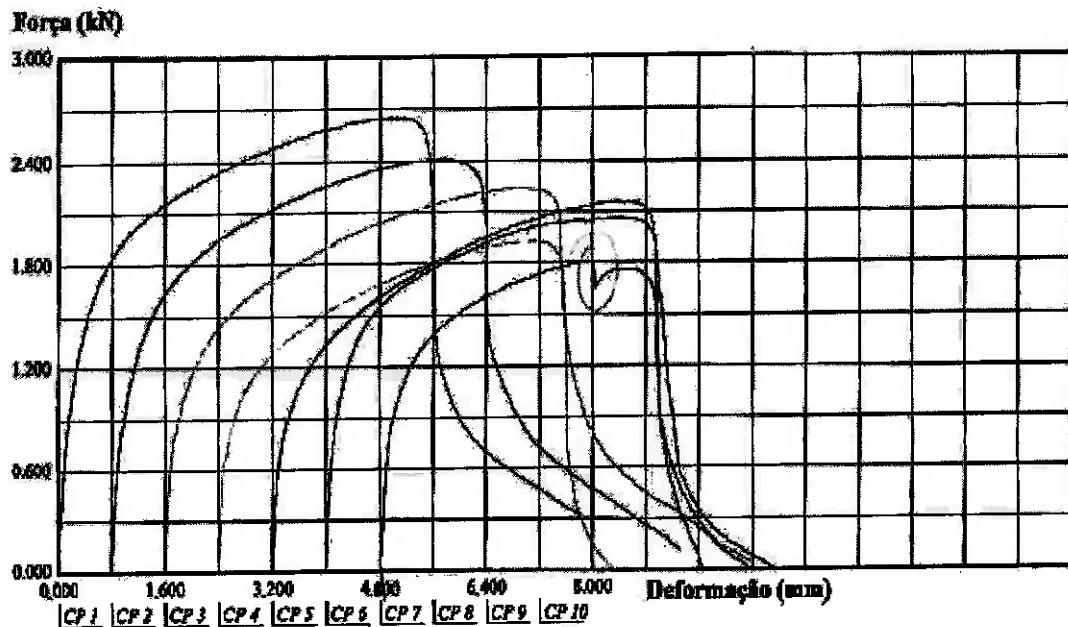


Figura 4.24 - Amostras de ensaio de cisalhamento realizados nos ensaios.

Após o ensaio, foram gerados gráficos de curvas de força versus deslocamento conforme a figura 4.25.



Observação: CP1:solda 1...CP2:solda 101...CP3:solda 201...CP4: solda 301....CP5:solda 401....CP6:solda 501...CP7:solda 551.

Figura 4.25 - Exemplo de gráfico do ensaio de cisalhamento realizado.

4.14 Ensaio de ultrassom por imagem do ponto de solda.

Utilizou-se um equipamento de ultrassom por imagem para realizar ensaios não destrutivos de soldagem a ponto por resistência além de medir espessura da chapa. Através de um transdutor com 52 elementos de imagem é realizado a captura da imagem e salva no próprio equipamento. Para facilitar a passagem das ondas ultrassônicas, utilizou-se um gel a base de água sobre o ponto de solda conforme mostra a figura 4.26.

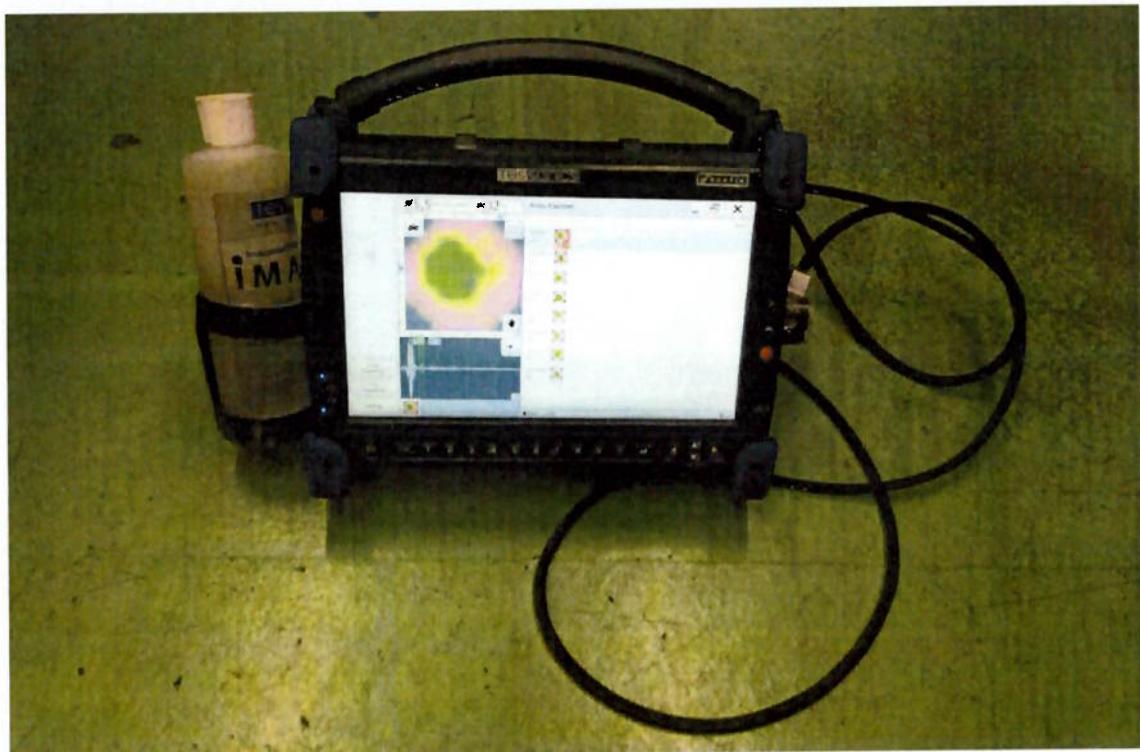


Figura 4.26 - Equipamento de ultrassom por imagem utilizado no ensaio.

Assim como os demais ensaios executados, foi realizado a cada 100 pontos de solda nos testes de parâmetro de refrigeração o ensaio de ultrassom por imagem, como mostra a figura 4.27.

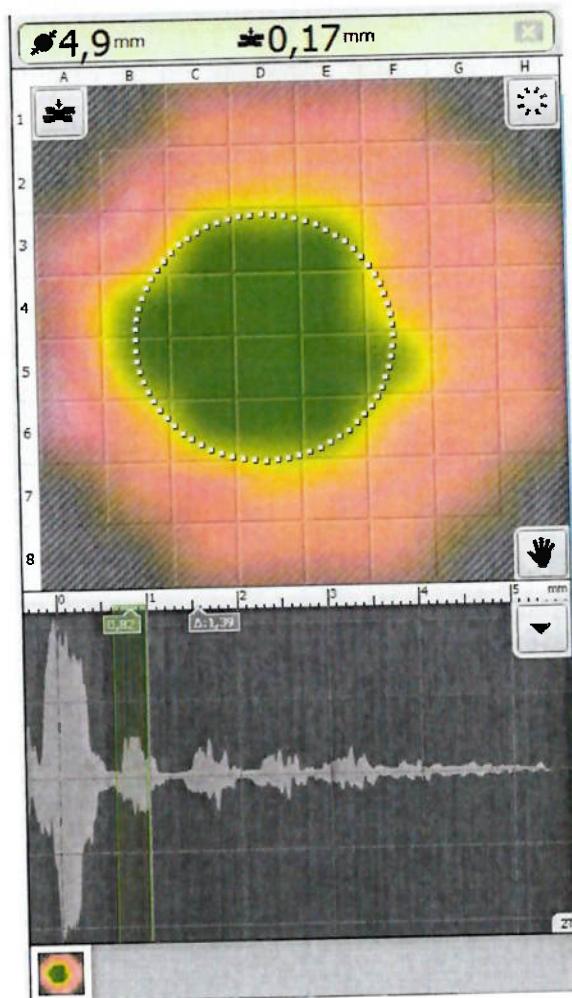


Figura 4.27 – Exemplo de ensaio de ultrassom por imagem

4.15 Macrografia do ponto de solda.

Na avaliação dos testes de soldagem utilizou-se também a análise macrográfica dos pontos de solda. Verificando com mais detalhe a fusão e a formação do ponto de solda.

Consiste basicamente em três processos de corte do ponto de solda no centro, embutimento, acabamento e polimento, ataque químico e análise no microscópio.

Para o corte do ponto de solda utilizou-se uma serra de fita. O corte do ponto de solda foi calculado para que não afete nos resultados da macrografia. Foi traçado o centro e deixou-se uma sobra para desbastar no acabamento.

O embutimento foi realizado com resina poliéster e catalisador líquido, com espera em torno de 4 horas para acura total da resina em uma estufa conforme mostra a figura 4.28.



Figura 4.28 - Estufa para cura da resina do embutimento de macrografia utilizada nos ensaios.

Para acabamento dos embutimentos, utilizou-se um processo de acabamento com uma sequência de lixas número 220 350 400 600 800 e 1200. Após o acabamento mais grosso, realizou-se o polimento com óxido de Alumina concentrada como abrasivo, como mostra a figura 4.29.



Figura 4.29 - Politriz para acabamento dos embutimentos de macrografia utilizada nos ensaios.

Após polidos os embutimentos estão pronto para serem atacados com ácido. No ataque utilizou-se ácido nital de 6 % e água destilada, como mostra a figura 4.30.

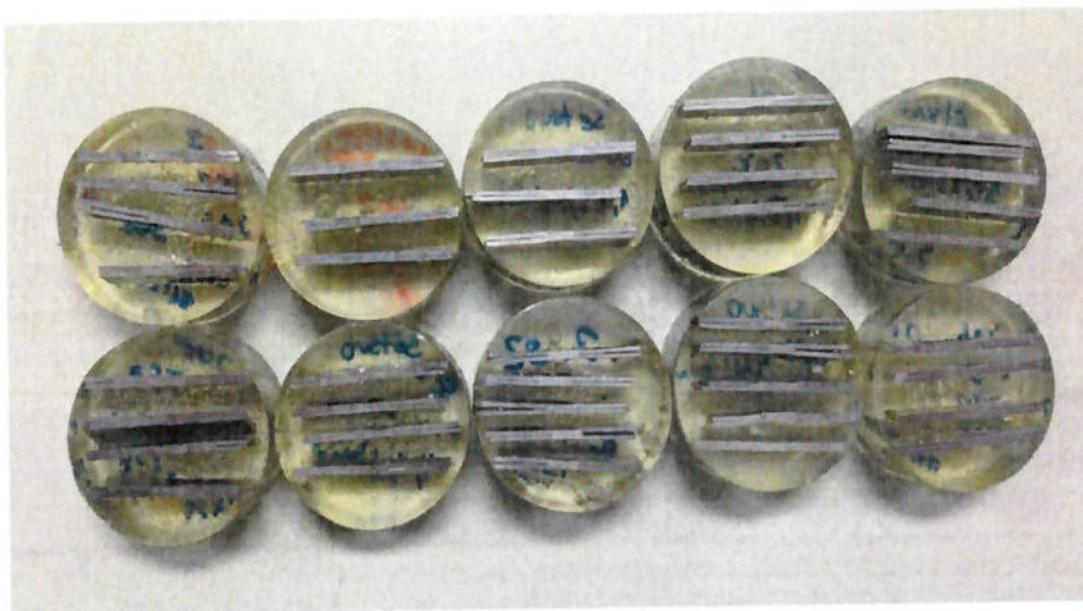


Figura 4.30 - Embutimentos de macrografia realizados nos ensaios.

A figura 4.31 mostra o microscópio utilizado para a análise macrográfica. O equipamento tem “zoom” ótico com aumento da imagem em 10 vezes.



Figura 4.31 - Microscópio para análise das macrografias utilizado nos ensaios.

No geral a macrografia é um processo mais trabalhos e demorado, porém pode se analisar com mais precisão o diâmetro do ponto de solda, a Zona afetada pelo calor (ZAC) e a profundidade da indentação, sendo muito utilizados na validação de processos de soldagem. Podemos verificar o resultado da macrografia na figura 4.32.

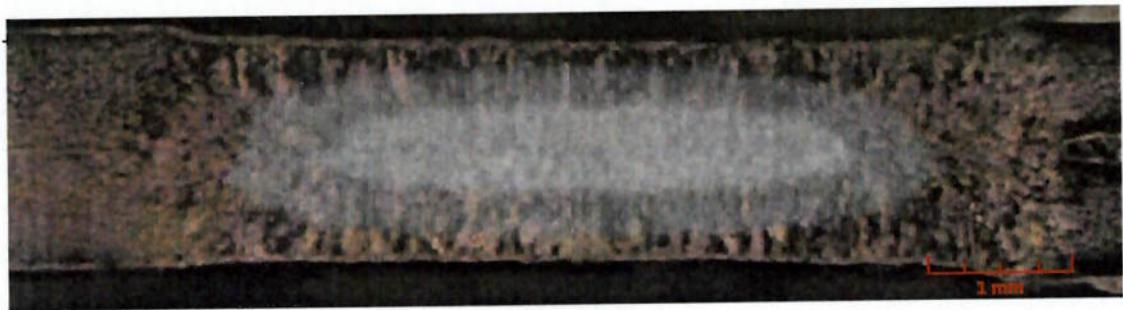


Figura 4.32 - Exemplo de macrografia realizada.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Diagrama de soldabilidade para determinação dos parâmetros otimizados de soldagem:

Foram realizados testes para encontrar os parâmetros ideais ou otimizados de soldagem, por este motivo utilizou-se o diagrama de soldabilidade com a metodologia descrita no item 4.5.

Na figura 5.1 pode-se notar que o diâmetro do ponto para o limite mínimo e o diâmetro do ponto para o limite máximo se estabilizam aproximadamente em 200 ms, respectivamente, com os valores de 8,3 KA e 10,0 KA. Os parâmetros para o experimento foram localizados a partir do ponto de maior grau de liberdade, no começo da estabilização do diâmetro do ponto, utilizando-se uma força constante de 290 Kgf.

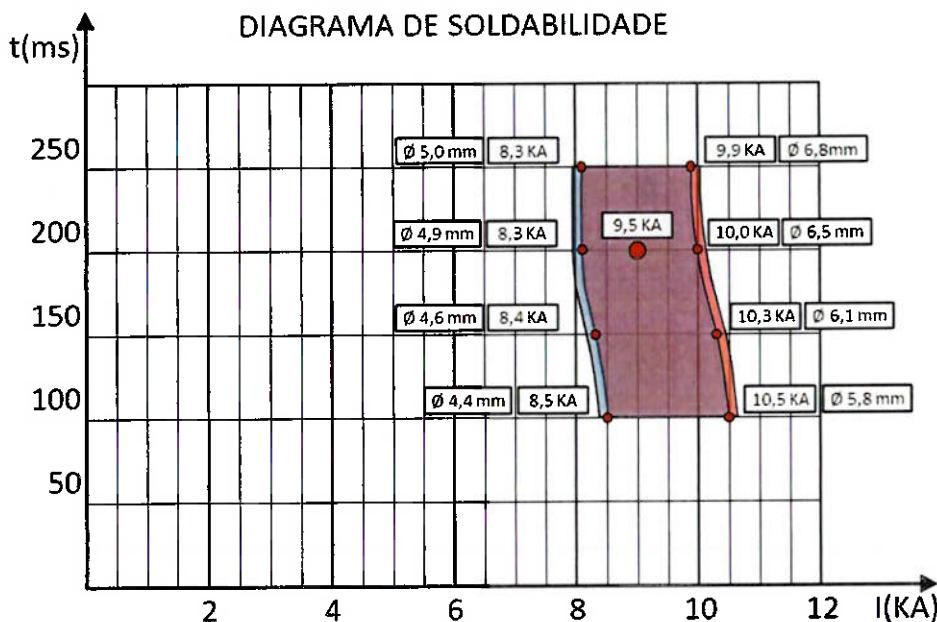


Figura 5.1 - Diagrama de soldabilidade tempo versus corrente e força constante de 290 Kgf para determinação dos parâmetros otimizados de soldagem.

Portanto, os parâmetros de soldagem do ponto ótimo foram: corrente 9,5 KA, tempo de 200ms (12 ciclos) e uma força entre os eletrodos de 290 Kgf. No diagrama de soldabilidade mostrado na figura 5.1 estão representados os

diâmetros médios dos pontos. A média do diâmetro de cada ponto foi determinada através de três corpos de prova pelo processo de arrancamento.

5.2. Efeitos da temperatura e vazão da água de refrigeração na vida útil dos eletrodos.

A cada 100 pontos de solda foi analisado o diâmetro do eletrodo inferior e superior através da câmera de fotografia adaptada e do software USB Microscópio, como pode-se observar na figura 5.2. No primeiro experimento (Teste 1) a vazão permaneceu constante em 4,3l/mi. e no segundo experimento (Teste 2) a temperatura permaneceu constante em 13°C.

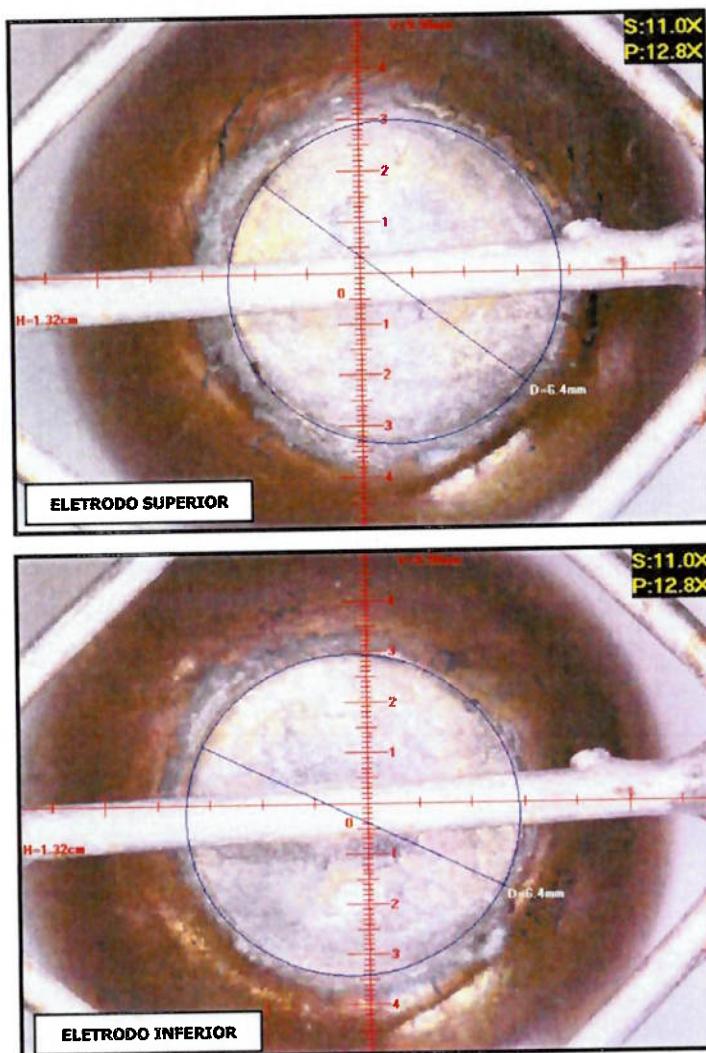


Figura 5.2 - Exemplo do resultado da medição do diâmetro da face do eletrodo superior e inferior após soldagem.

5.2.1 Efeitos da temperatura da água de refrigeração na vida útil dos eletrodos.

A tabela 5.1 e 5.2 mostram os dados do aumento do diâmetro da face do eletrodo inferior e superior respectivamente de acordo com a quantidade de pontos soldados no Teste 1. Neste experimento variaram-se as temperaturas da água de refrigeração em 13°C, 20°C e 25°C e vazão foi mantida constante de 4,3l/min.

Tabela 5.1 - Diâmetro do eletrodo inferior - Teste 1.

Quantidades de pontos de solda	Diâmetro do eletrodo Inferior 13°C - 4,3 l/min. (mm)	Diâmetro do eletrodo Inferior 20°C - 4,3 l/min. (mm)	Diâmetro do eletrodo Inferior 25°C - 4,3 l/min. (mm)
1	6,00	6,00	6,00
100	6,06	6,15	6,23
200	6,09	6,19	6,31
300	6,17	6,23	6,37
400	6,24	6,25	6,40
500	6,30	6,28	-
600	6,36	6,30	-
700	6,38	-	-
800	6,40	-	-

Tabela 5.2 - Diâmetro do eletrodo superior - Teste 1.

Quantidades de pontos de solda	Diâmetro do eletrodo Superior 13°C - 4,3 l/min. (mm)	Diâmetro do eletrodo Superior 20°C - 4,3 l/min. (mm)	Diâmetro do eletrodo Superior 25°C - 4,3 l/min. (mm)
1	6,00	6,00	6,00
100	6,04	6,21	6,26
200	6,08	6,27	6,38
300	6,15	6,29	6,39
400	6,23	6,32	6,40
500	6,28	6,36	-
600	6,35	6,40	-
700	6,39	-	-
800	6,40	-	-

Pode-se na figura 5.3 e 5.4 pode-se observar que a taxa de deformação nos primeiros 100 pontos influenciou diretamente na vida útil dos eletrodos. Nota-se que com 13°C a deformação do eletrodo permaceu com taxas de deformações menores e praticamente constantes. Por este motivo com uma

temperatura de 13°C da água de refrigeração, o eletrodo realizou 800 pontos de solda até atingir um diâmetro mínimo do ponto conforme norma (5mm). Este resultado está relacionado com a maior taxa de transferência de calor da água de refrigeração com 13°C em relação às temperaturas de 20°C e 25°C, ou seja, com menores temperaturas nas pontas dos eletrodos menores serão as deformações e maior será a vida útil dos mesmos.

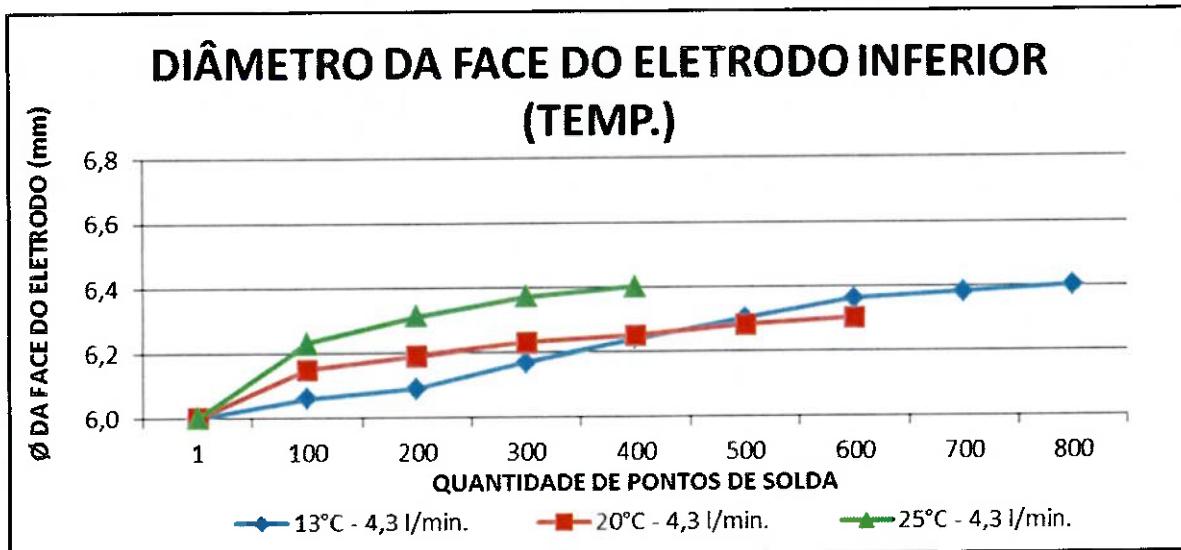


Figura 5.3 - Gráfico do diâmetro da face do eletrodo inferior versus quantidade de pontos de solda variando a temperatura de refrigeração – Teste 1.

Pode-se observar também que o diâmetro máximo de deformação atingido pelos eletrodos nas três temperaturas foi de 6,4mm. Este fato mostra que para obter o diâmetro mínimo do ponto de solda aprovado conforme norma (5mm) nestas condições e parâmetros o diâmetro máximo que o eletrodo poderá atingir é de 6,4mm.

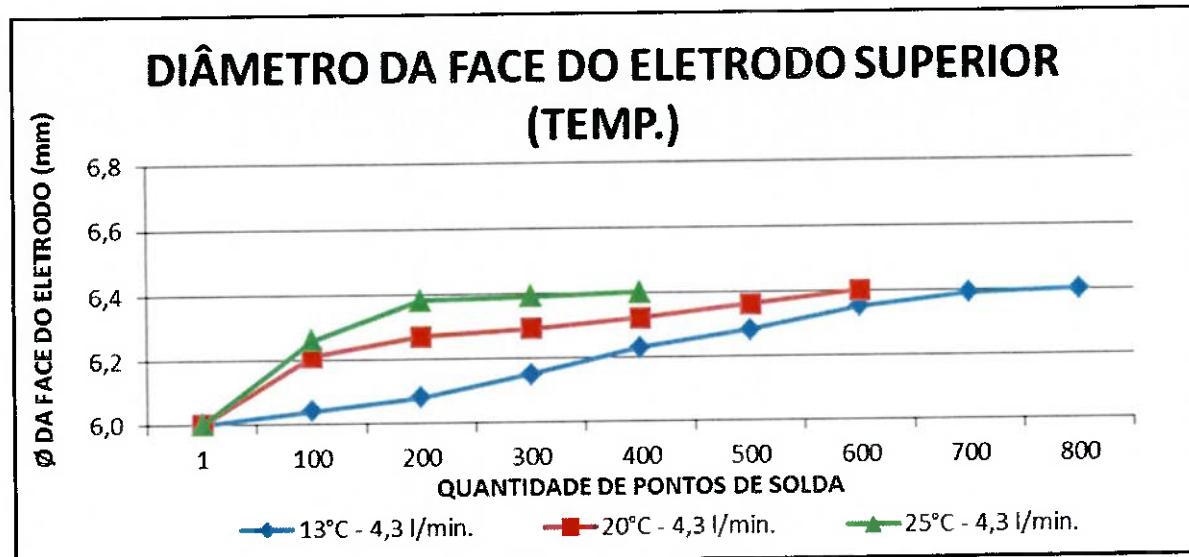


Figura 5.4 - Gráfico de diâmetro da face do eletrodo superior versus quantidade de pontos de solda variando a temperatura de refrigeração – Teste 1.

5.2.2 Efeitos da vazão da água de refrigeração na vida útil dos eletrodos.

As tabelas 5.3 e 5.4 mostram o aumento das faces dos eletrodo durante os testes de variação da vazão de refrigeração.

Tabela 5.3 - Diâmetro do eletrodo inferior - Teste 2.

Quantidades de pontos de solda	Diâmetro do eletrodo Inferior 1,7 l/min. - 13°C (mm)	Diâmetro do eletrodo Inferior 3,0 l/min. - 13°C (mm)	Diâmetro do eletrodo Inferior 4,3 l/min. - 13°C (mm)
1	6,00	6,00	6,00
100	6,12	6,16	6,06
200	6,25	6,24	6,09
300	6,27	6,27	6,17
400	6,29	6,32	6,24
500	6,30	6,35	6,30
600	6,30	6,39	6,36
700	-	6,40	6,38
800	-	-	6,40

Tabela 5.4 - Diâmetro do eletrodo superior - Teste 2.

Quantidades de pontos de solda	Diâmetro do eletrodo Superior 1,7 l/min. - 13°C (mm)	Diâmetro do eletrodo Superior 3,0 l/min. - 13°C (mm)	Diâmetro do eletrodo Superior 4,3 l/min. - 13°C (mm)
1	6,00	6,00	6,00
100	6,22	6,15	6,04
200	6,26	6,22	6,08
300	6,29	6,25	6,15
400	6,34	6,26	6,23
500	6,39	6,27	6,28
600	6,40	6,29	6,35
700	-	6,30	6,39
800	-	-	6,40

As figuras 5.5 e 5.6 mostram o aumento do diâmetro da face do eletrodo de acordo com a quantidade de pontos soldados no Teste 2. Neste experimento as vazões utilizadas da água de refrigeração foram: 1,7l/min., 3,0l/min. e 4,3l/min. e temperatura constante de 13°C. Nota-se que a taxa de deformação nos primeiros 100 pontos influenciou diretamente na vida útil dos eletrodos, principalmente para o eletrodo superior. É possível observar que com uma vazão de 4,3l/min. a deformação do eletrodo permaneceu com taxas de deformações menores e praticamente constantes. Devido a este fato, com uma vazão de 4,3l/min. da água de refrigeração, o eletrodo realizou 800 pontos de solda até alcançar um diâmetro mínimo do ponto conforme norma (5 mm). Este fenômeno está relacionado com a maior taxa de transferência de calor da água de refrigeração com uma vazão de 4,3l/min. se comparadas às vazões de 1,7l/min., 3,0l/min. Isto significa que com menores temperaturas nas pontas dos eletrodos, menores serão as deformações e maior será a vida útil dos mesmos. De modo geral, é possível notar também que a temperatura constante obteve melhores resultados no que se refere à vida útil do eletrodo se comparada à vazão constante da água de refrigeração, conforme mostra o item 5.2.1.

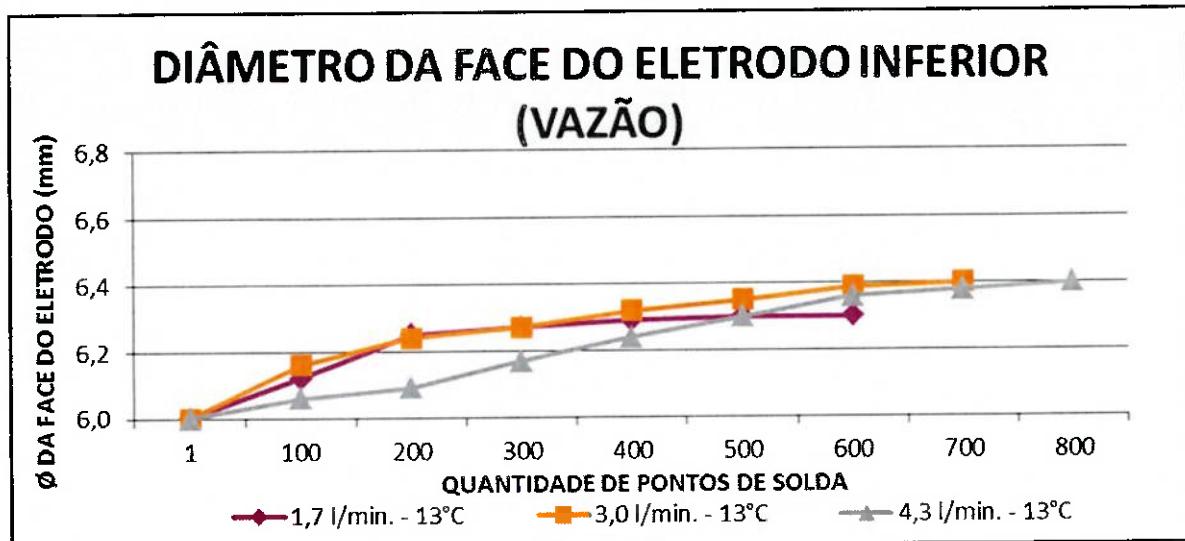


Figura 5.5 - Gráfico de diâmetro da face do eletrodo inferior versus quantidade de pontos variando a vazão de refrigeração – Teste 2.

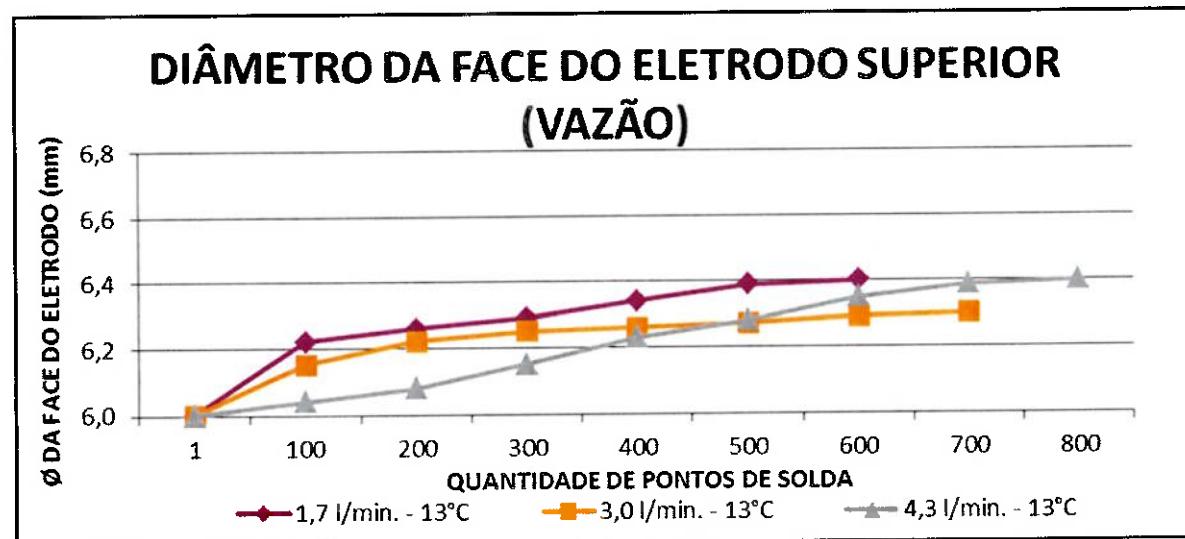


Figura 5.6 - Gráfico de diâmetro da face do eletrodo superior versus quantidade de pontos variando a vazão de refrigeração – Teste 2.

5.3. Comparação entre a variação da temperatura e vazão em relação à quantidade de pontos de solda.

A figura 5.7 apresenta a análise da quantidade de pontos de solda, aprovados conforme norma (diâmetro de 5mm), em relação a variação da temperatura e vazão constante de 4,3l/min. Pode-se observar que com 13°C foi possível alcançar 800 pontos de solda até atingir um diâmetro mínimo de 5mm. Ainda pela análise da figura 5.7 é possível notar que com uma temperatura de

25°C, ou seja, 92% maior que o primeiro experimento, apenas foi possível alcançar a metade dos pontos de solda (400 pontos).

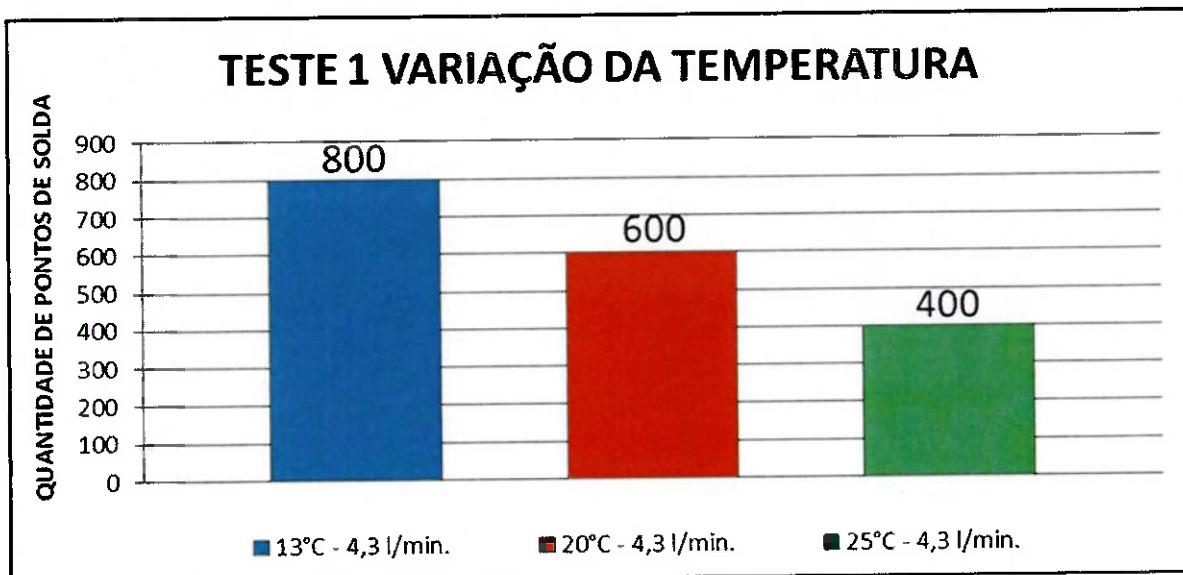


Figura 5.7 - Gráfico da quantidade de pontos de solda em relação à variação da temperatura da água de refrigeração – Teste 1.

A figura 5.8 mostra a análise da quantidade de pontos de solda, aprovados conforme norma (diâmetro de 5mm), em relação a variação da vazão e temperatura constante de 13°C. Nota-se que com uma vazão de 4,3l/min. foi possível alcançar 800 pontos de solda até atingir diâmetro mínimo de 5 mm. É possível notar também que com uma vazão de 1,7l/min., ou seja, 252% menor que o primeiro experimento, foi possível alcançar 600 pontos de solda. Ainda pela análise das figuras 5.7 e 5.8, nota-se que a variação da vazão com temperatura constante apresentou menor sensibilidade às mudanças se comparada com a variação da temperatura e vazão constante, no que se refere à quantidade de pontos soldados. Este fato esta relacionado com a maior eficiência da temperatura da água de refrigeração na transferência de calor se comparada com a vazão, nas condições de soldagem apresentadas nestes experimentos.

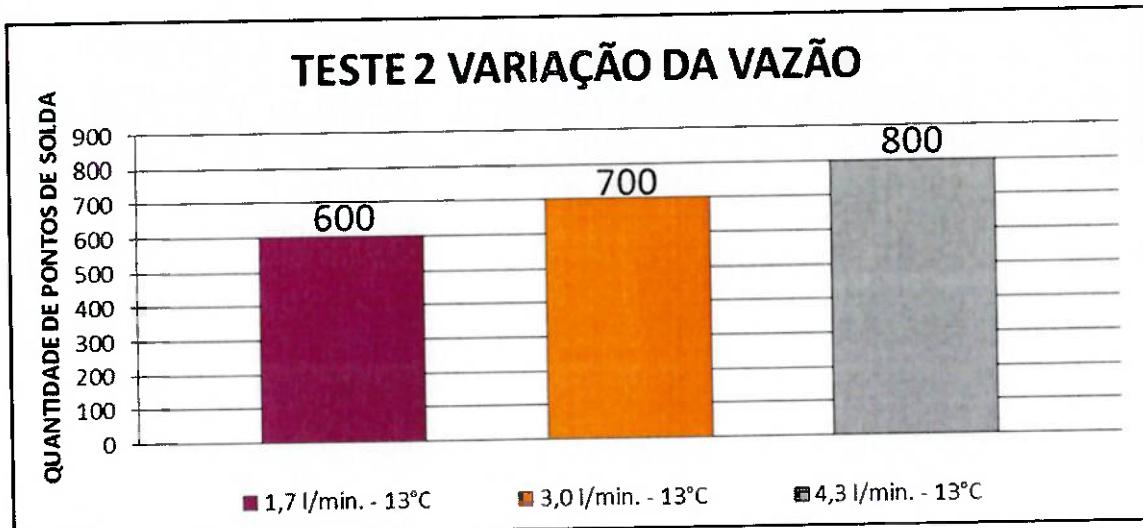


Figura 5.8 - Gráfico da quantidade de pontos de solda em relação à variação da vazão da água de refrigeração – Teste 2.

5.4. Comparação entre a variação da temperatura e vazão em relação ao teste de cisalhamento.

A resistência mecânica dos pontos de solda, tanto de temperatura constante quanto de vazão constante, foram avaliadas através do teste de cisalhamento. Para isto foram realizados ensaios a cada 100 pontos de solda. Os resultados apresentados são uma média de 3 corpos de prova conforme mostra o gráfico do relatório do ensaio de cisalhamento na figura 5.9. A força mínima de cisalhamento para que o ponto de solda seja aprovado conforme norma é de 170Kgf.

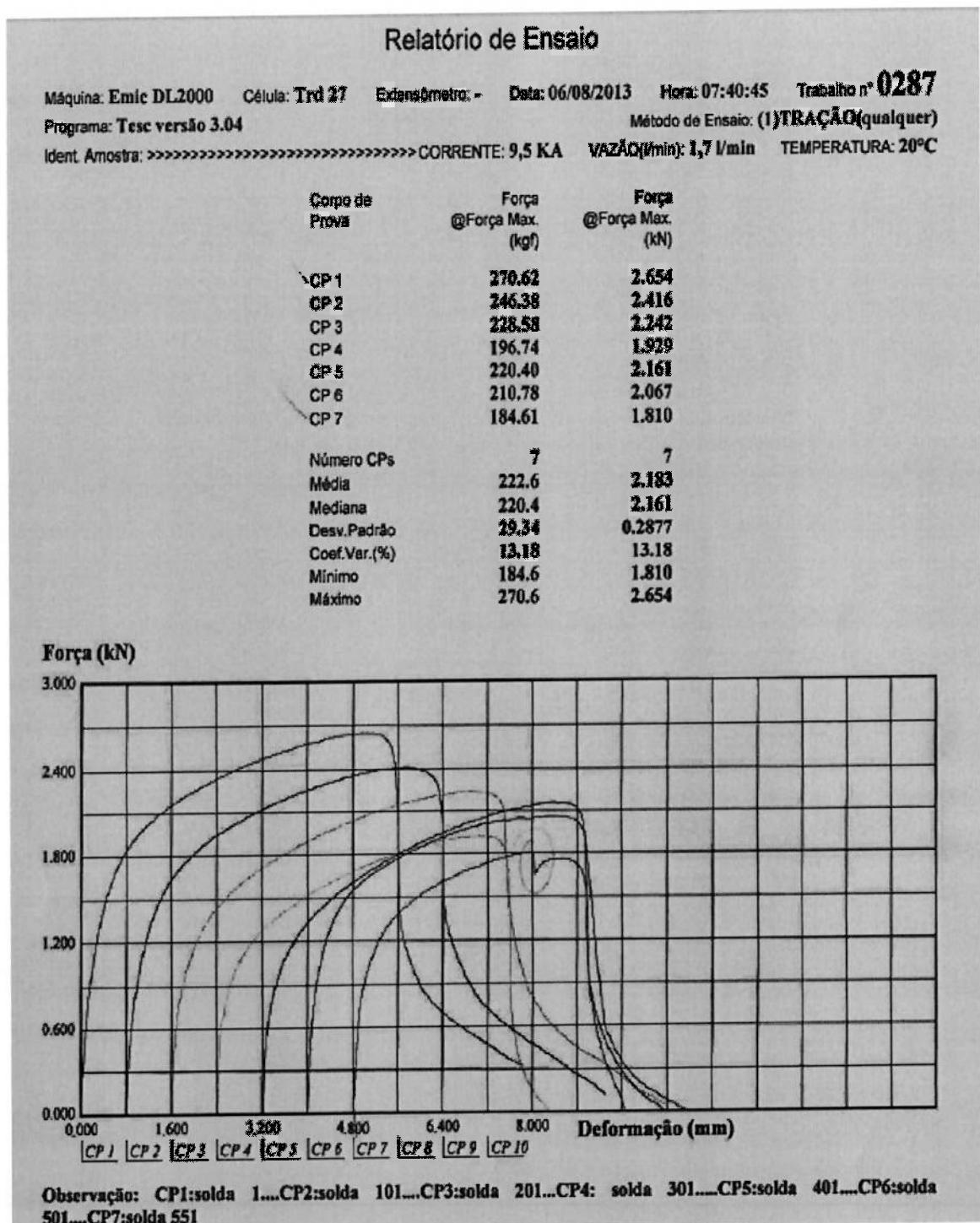


Figura 5.9 - Exemplo do resultado do ensaio de cisalhamento.

5.4.1 Efeitos da variação da temperatura em relação à resistência mecânica do ponto de solda.

A tabela 5.5 mostra os resultados obtidos nos testes de cisalhamento a cada 100 pontos de solda. As temperaturas da água de refrigeração dos

eletrodos utilizadas foram de 13°C, 20°C e 25°C e uma vazão constante de 4,3l/min.

Tabela 5.5 – Ensaio de cisalhamento do ponto de solda com variação da temperatura – Teste 1.

Quantidades de pontos de solda	Força de cisalhamento 13°C - 4,3 l/min. (Kgf)	Força de cisalhamento 20°C - 4,3 l/min. (Kgf)	Força de cisalhamento 25°C - 4,3 l/min. (Kgf)
1	252,44	267,64	281,88
100	231,95	280,72	258,21
200	210,88	262,25	223,58
300	271,10	257,63	261,39
400	232,33	251,96	219,06
500	245,80	234,83	-
600	238,58	239,84	-
700	205,11	-	-
800	179,32	-	-

E com os dados obtidos foi plotado o seguinte gráfico: força de cisalhamento em Kgf versus a quantidade de pontos de solda com vazão da água de refrigeração dos eletrodos constante em 4,3l/min., conforme mostra a figura 5.10.

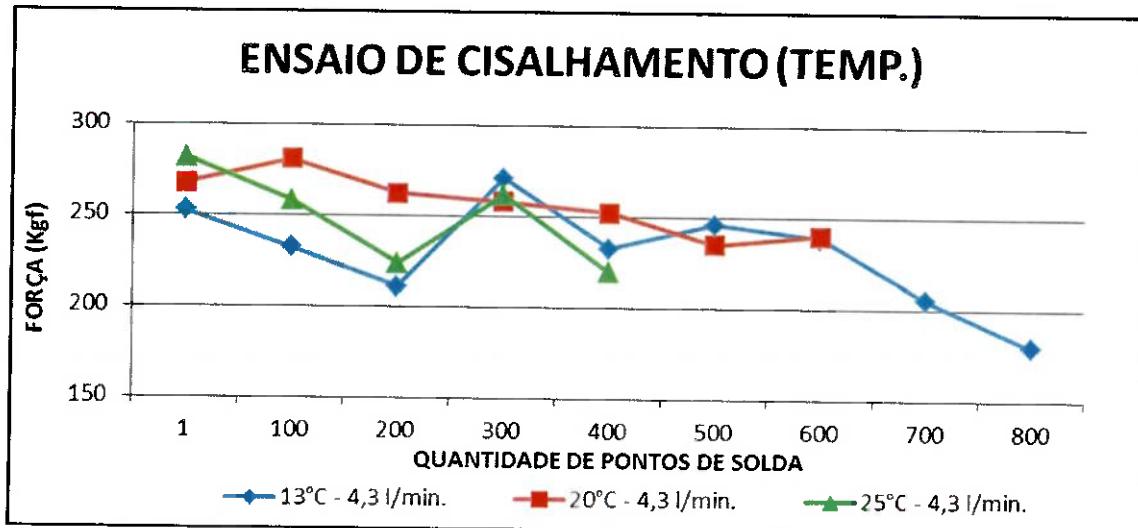


Figura 5.10 – Gráfico da força de cisalhamento em Kgf. versus quantidade de pontos de solda (vazão constante) – Teste 1.

Pode-se observar que de modo geral, a força de cisalhamento do ponto de solda diminui nos últimos 100 pontos, principalmente na temperatura de

13°C. Isto se deve a maior deformação na ponta do eletrodo, ou seja, quanto maior a deformação na ponta do eletrodo menor será a simetria de contato elétrico entre os eletrodos e a peça e também uma menor densidade de corrente. Estes fatos fazem com que o diâmetro do ponto de solda diminua e por consequência disto a força de cisalhamento também diminui. Ainda pela análise da figura 5.9, é possível notar também que todos os pontos foram aprovados em relação à força de cisalhamento conforme norma (mínimo 170 Kgf).

5.4.2 Efeitos da variação da vazão em relação à resistência mecânica do ponto de solda.

A tabela 5.6 mostra os resultados obtidos nos testes de cisalhamento a cada 100 pontos de solda. Variou-se a vazão da água de refrigeração dos eletrodos em: 1,7 l/min., 3,0l/min. e 4,3l/min. e temperatura constante de 13°C.

Tabela 5.6 - Ensaio de cisalhamento do ponto de solda com variação da vazão – Teste 2.

Quantidades de pontos de solda	Força de cisalhamento 1,7 l/min. - 13°C (Kgf)	Força de cisalhamento 3,0 l/min. - 13°C (Kgf)	Força de cisalhamento 4,3 l/min. - 13°C (Kgf)
1	270,62	241,57	252,44
100	246,38	243,49	231,95
200	228,58	232,14	210,88
300	196,74	215,50	271,10
400	220,40	253,02	232,33
500	210,78	235,89	245,80
600	184,61	215,88	238,58
700	-	200,58	205,11
800	-	-	179,32

E com os dados obtidos foi plotado o seguinte gráfico: força de cisalhamento em Kgf versus a quantidade de pontos de solda com temperatura da água de refrigeração dos eletrodos constante em 13°C, conforme mostra a figura 5.11.

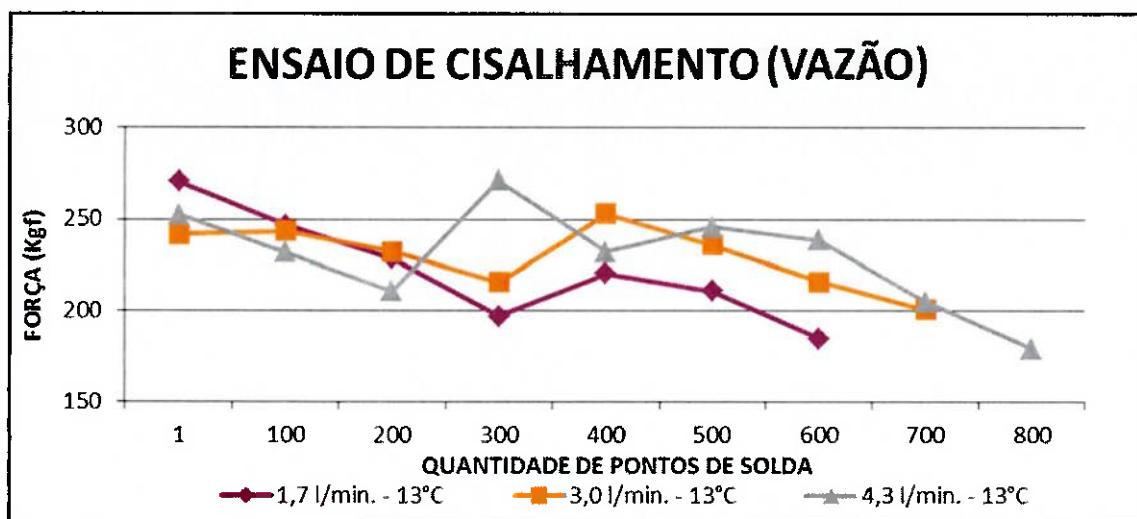


Figura 5.11 - Gráfico força de cisalhamento do ponto de solda versus quantidade de pontos de solda (temperatura constante) – Teste 2.

Pode-se observar que de modo geral, a força de cisalhamento do ponto de solda diminui nos últimos 200 pontos com uma taxa praticamente constante. Isto se deve a maior deformação na ponta do eletrodo no final de sua vida útil, ou seja, quanto maior a deformação na ponta do eletrodo menor será a simetria de contato elétrico entre os eletrodos e a peça e também uma menor densidade de corrente. Estes fatos fazem com que o diâmetro do ponto de solda diminua e por conseqüência disto a força de cisalhamento também diminui. É possível notar também que todos os pontos foram aprovados em relação à força de cisalhamento conforme norma (mín. 170 Kgf).

Ainda pela análise das figuras 5.9 e 5.10 observa-se também que com a variação de vazão e temperatura constante obteve-se uma taxa de diminuição da força de cisalhamento do ponto de solda praticamente constante nos últimos 200 pontos. Enquanto que, com a variação da temperatura e vazão constante as taxas de diminuição da força de cisalhamento nos últimos 200 pontos de solda não obtiveram o mesmo comportamento, ou seja, não foram constantes. Este resultado esta relacionado com a maior eficiência da temperatura da água de refrigeração na transferência de calor se comparada com a vazão.

5.5. Comparação entre a variação da temperatura e vazão em relação ao diâmetro do ponto de solda, utilizando ultrassom de imagens.

Foram realizados ensaios de ultrassom por imagem para avaliar as condições do ponto de solda nos experimentos. A figura 5.12 mostra a imagem gerada nos ensaios.

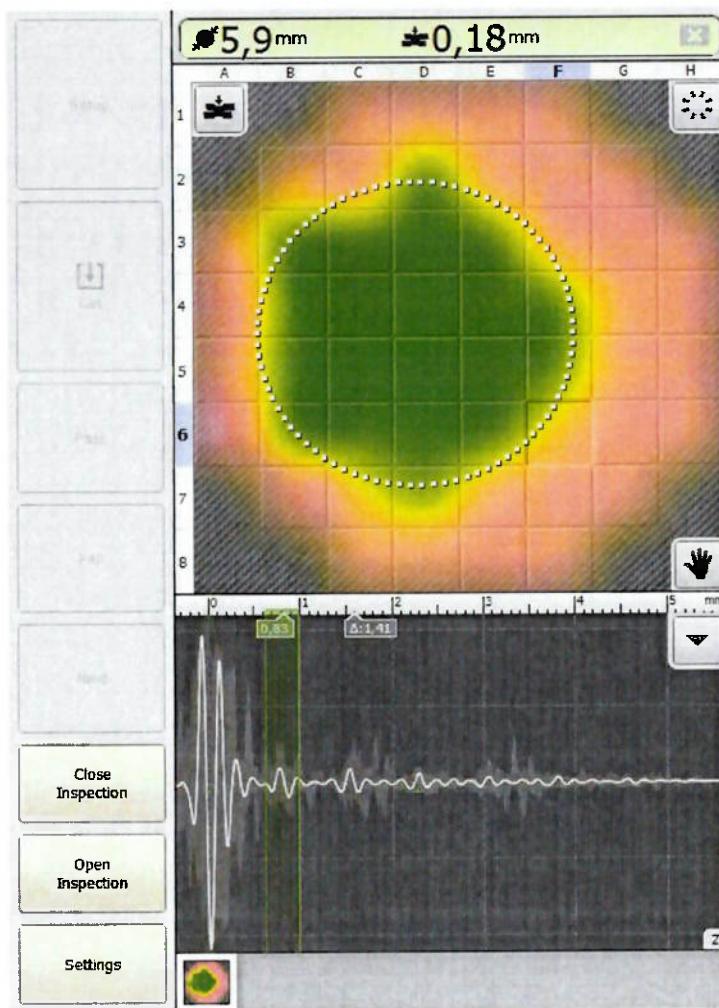


Figura 5.12 - Exemplo do resultado do ensaio de ultrassom por imagem.

A tabela 5.7 apresenta os diâmetros do ponto de solda obtidos através dos ensaios de ultrasom de imagem a cada 100 pontos de solda. As temperaturas da água de refrigeração dos eletrodos utilizadas foram de 13°C, 20°C e 25°C e uma vazão constante de 4,3l/min. O diâmetro plotado na tabela é uma média de 3 corpos de prova. O diâmetro aprovado conforme norma é de 5mm.

Tabela 5.7 – Ensaio de ultrassom de imagem do ponto de solda com variação da temperatura – Teste 1.

Quantidades de pontos de solda	Diâmetro do ponto de solda 13°C - 4,3 l/min. (mm)	Diâmetro do ponto de solda 20°C - 4,3 l/min. (mm)	Diâmetro do ponto de solda 25°C - 4,3 l/min. (mm)
1	5,40	5,60	5,70
100	5,90	5,80	6,10
200	5,60	6,50	5,50
300	5,70	5,50	5,30
400	5,60	5,50	5,00
500	5,40	5,00	-
600	5,70	5,00	-
700	5,40	-	-
800	5,10	-	-

A figura 5.13 mostra o gráfico gerado pelos dados da tabela 5.5. Pode-se notar que o diâmetros dos pontos de solda permaneceram entre 5,0mm a 6,5mm.

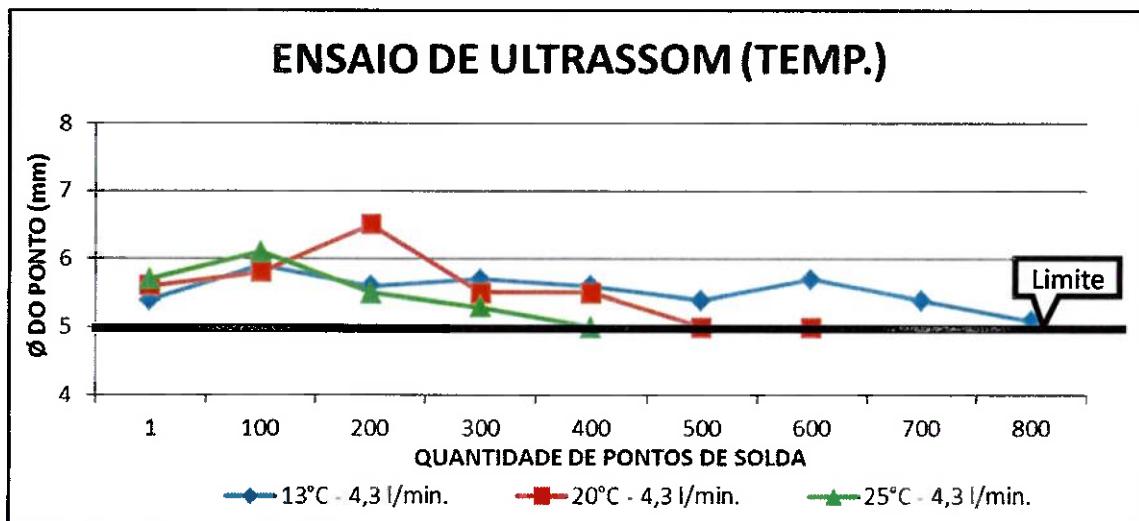


Figura 5.13 - Gráfico do diâmetro do ponto de solda versus quantidade de pontos através do ensaio de ultrassom de imagem (vazão constante) – Teste 1.

A tabela 5.8 apresenta os diâmetros dos pontos de solda obtidos através dos ensaios de ultrasom de imagem a cada 100 pontos de solda. Variou-se a vazão da água de refrigeração dos eletrodos em: 1,7 l/min., 3,0 l/min. e 4,3 l/min. e temperatura constante de 13°C.

Tabela 5.8 - Ensaio de ultrassom de imagem do ponto de solda com variação da vazão – Teste 2.

Quantidades de pontos de solda	Diâmetro do ponto de solda 1,7 l/min. - 13°C (mm)	Diâmetro do ponto de solda 3,0 l/min. - 13°C (mm)	Diâmetro do ponto de solda 4,3 l/min. - 13°C (mm)
1	5,70	5,80	5,40
100	4,90	6,00	5,90
200	5,70	5,30	5,60
300	5,30	5,40	5,70
400	5,50	5,90	5,60
500	5,60	6,00	5,40
600	5,10	5,70	5,70
700	-	5,20	5,40
800	-	-	5,10

A figura 5.14 mostra o gráfico gerado pelos dados da tabela 5.6. Nota-se que os diâmetros dos pontos de solda ficaram numa faixa entre 5,0 mm a 6,0 mm.

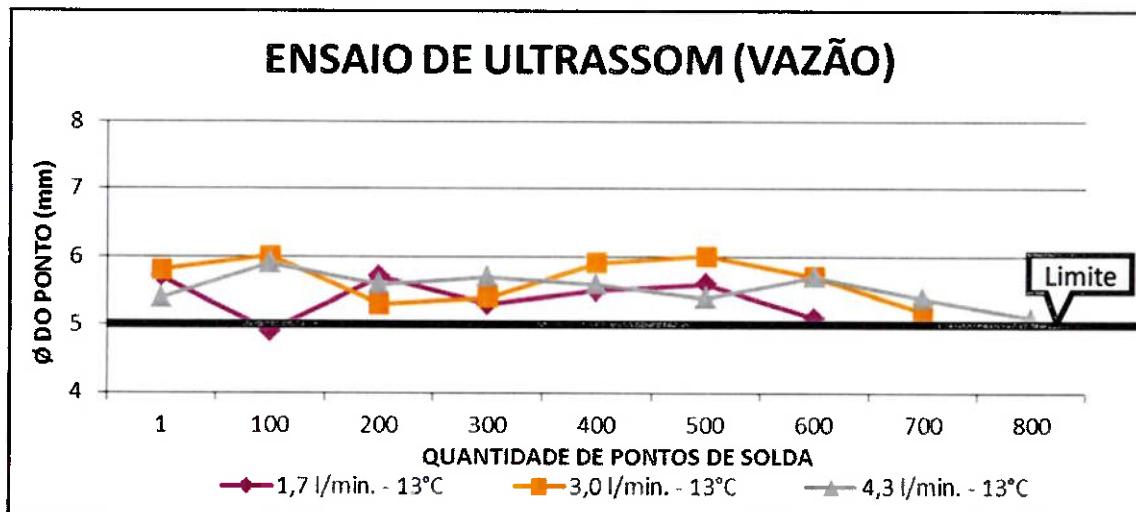


Figura 5.14 - Gráfico do diâmetro do ponto de solda versus quantidade de pontos através do ensaio de ultrassom de imagem (temperatura constante) Tese 2.

Ainda pela análise das figuras 5.11 e 5.12 é possível observar que com uma temperatura constante e variando a vazão obteve-se uma menor dispersão dos diâmetros de solda se comparada com vazão constante e variando a temperatura. Este resultado está relacionado com as menores taxas de deformação nas pontas dos eletrodos observadas no item 5.2. Com

menores taxas de deformação é possível atingir melhor simetria entre os eletrodos e a peça, este fato possibilita um melhor balanceamento térmico e uma formação mais estável do ponto de solda.

5.6. Comparação entre o ensaio de macrografia em relação ao ensaio de ultrassom de imagem.

A título de comparação foram realizados também ensaios de macrografia para serem confrontados com os resultados captados pelo equipamento de ultrasom de imagem, conforme mostra a figura 5.15.

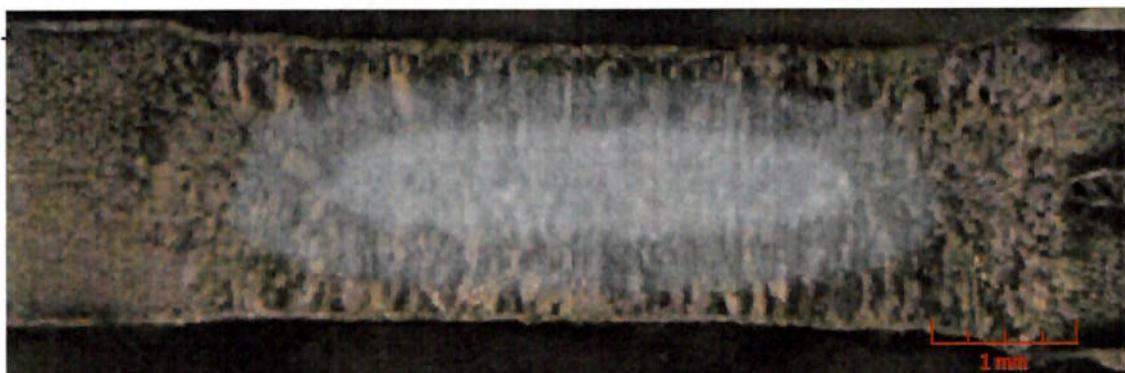


Figura 5.15 - Exemplo do resultado do ensaio de macrografia.

A tabela 5.9 apresenta os diâmetros do ponto de solda obtidos através dos ensaios de macrografia a cada 100 pontos de solda. As temperaturas da água de refrigeração dos eletrodos utilizadas foram de 13°C, 20°C e 25°C e uma vazão constante de 4,3l/min. O diâmetro plotado na tabela é uma média de 3 corpos de prova. O diâmetro aprovado conforme norma é de 5,0 mm.

Tabela 5.9 - Ensaio de macrografia do ponto de solda com variação da temperatura – Teste 1.

Quantidades de pontos de solda	Diâmetro do ponto de solda 13°C - 4,3 l/min. (mm)	Diâmetro do ponto de solda 20°C - 4,3 l/min. (mm)	Diâmetro do ponto de solda 25°C - 4,3 l/min. (mm)
1	4,74	5,88	5,66
100	4,54	6,73	5,27
200	5,55	6,61	6,02
300	4,67	5,86	5,59
400	4,85	6,32	5,87
500	5,74	6,33	-
600	5,88	6,27	-
700	5,38	-	-
800	6,24	-	-

A figura 5.16 mostra o gráfico gerado pelos dados da tabela 5.3. Nota-se que os diâmetros dos pontos de solda permaneceram entre 4,74 a 6,73.

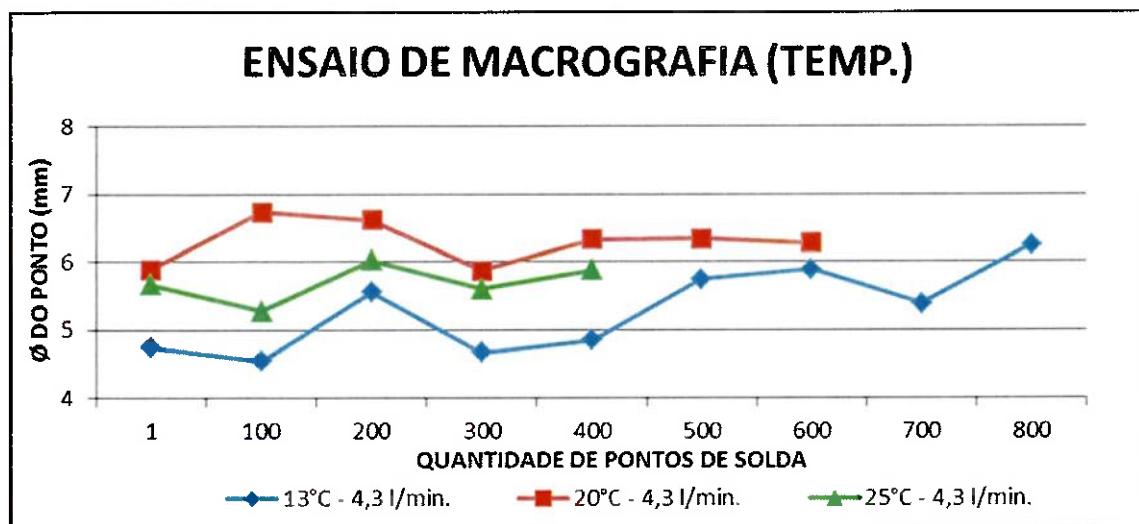


Figura 5.16 - Gráfico do diâmetro do ponto de solda versus quantidade de pontos através do ensaio de macrografia (vazão constante) Teste 1.

A tabela 5.10 apresenta os diâmetros dos pontos de solda obtidos através dos ensaios de macrografia a cada 100 pontos de solda. Variou-se a vazão da água de refrigeração dos eletrodos em: 1,7 l/min., 3,0 l/min. e 4,3 l/min. e temperatura constante de 13°C. O diâmetro apresentado na tabela é uma média de 3 corpos de prova.

Tabela 5.10 - Ensaio de macrografia do ponto de solda com variação da vazão – Teste 2.

Quantidades de pontos de solda	Diâmetro do ponto de solda 1,7 l/min. - 13°C (mm)	Diâmetro do ponto de solda 3,0 l/min. - 13°C (mm)	Diâmetro do ponto de solda 4,3 l/min. - 13°C (mm)
1	4,97	4,60	4,74
100	5,70	4,73	4,54
200	6,11	4,78	5,55
300	6,02	5,78	4,67
400	5,90	5,64	4,85
500	6,02	5,95	5,74
600	5,10	5,52	5,88
700	-	4,64	5,38
800	-	-	6,24

A figura 5.17 apresenta o gráfico gerado pelos dados da tabela 5.6. Observa-se que os diâmetros dos pontos de solda ficaram numa faixa entre 4,60mm a 6,24mm.

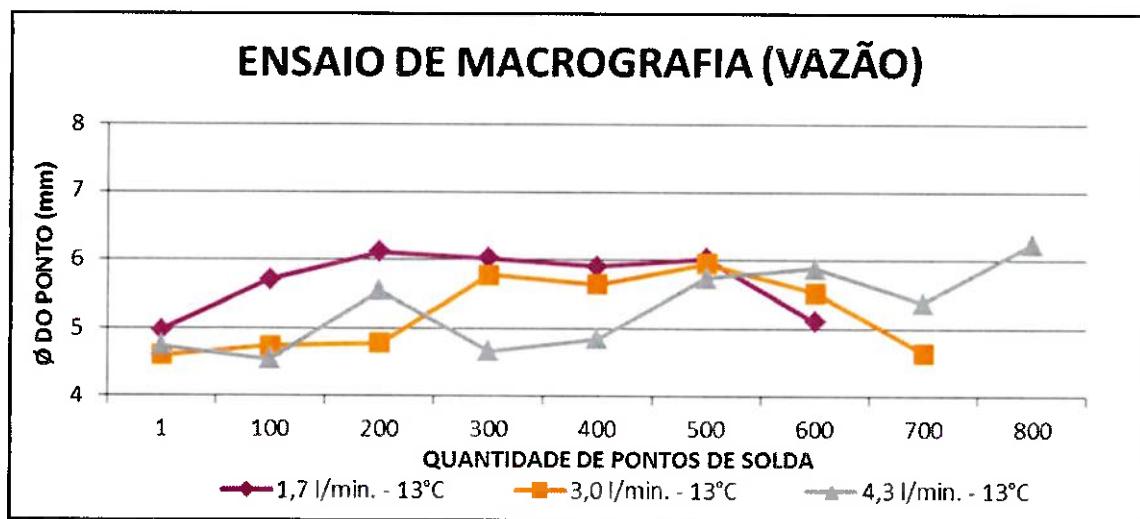


Figura 5.17 - Gráfico do diâmetro do ponto de solda versus quantidade de pontos através do ensaio de macrografia (temperatura constante) Teste 2.

Ainda pela análise das figuras 5.11 e 5.12 (ensaios de ultrassom de imagem) em comparação as figuras 5.13 e 5.14 (ensaios de macrografia), ambos para análise do diâmetro do ponto de solda. É possível observar que os ensaios de macrografia têm uma dispersão muito grande se comparada com os diâmetros apresentados pelo equipamento de ultrassom de imagem. Este resultado é devido que nos ensaios de macrografia feitos em pontos de solda é

muito difícil cortar o ponto exatamente no centro do mesmo, este fato é principalmente pela falta de precisão devido à espessura da serra em relação ao diâmetro do ponto de solda.

6. CONCLUSÕES

Com base nos materiais utilizados, experimentos realizados e nos resultados obtidos, é possível concluir que:

1. O diâmetro máximo de deformação atingido pelos eletrodos foi de 6,4mm tanto nas variações de temperatura quanto nas variações de vazão da água de refrigeração. Este fato mostra que com um diâmetro do eletrodo acima de 6,4mm não é possível gerar calor suficiente entre as chapas para atingir um diâmetro mínimo do ponto de solda (5mm) conforme norma. Com isto é possível concluir que para cada parâmetro neste processo de soldagem existe um limite máximo de deformação que o eletrodo poderá sofrer para se obter um diâmetro mínimo conforme norma.
2. Nos experimentos com vazão constante da água de refrigeração, pode-se observar que com uma temperatura de 13°C foi possível atingir 800 pontos de solda e com uma temperatura de 25°C (maior em 92%) foi possível alcançar 400 pontos. Por outro lado, nos experimentos com temperatura da água de refrigeração constante, observou-se que com uma vazão de 4,3l/min. foi possível atingir 800 pontos de solda e com uma vazão de 1,7l/min. (menor em 252%) foi possível realizar 600 pontos. Com estes resultados pode-se concluir que a temperatura da água de refrigeração dos eletrodos tem maior taxa de transferência de calor se comparada com a vazão da água de refrigeração, para as mesmas condições e parâmetros de soldagem destes ensaios.
3. Os diâmetros dos pontos de solda obtidos através dos ensaios de macrografia tiveram maior dispersão se comparada com os diâmetros apresentados pelos ensaios com ultrassom de imagem. Este resultado está relacionado com a falta de precisão no momento de cortar o ponto de solda ao meio. Com isto é possível concluir que os ensaios realizados com o equipamento de com ultrassom de imagem tem maior precisão.
4. A temperatura da água de refrigeração nos ensaios variou de 13°C a 25°C. Com 13°C foi possível atingir 800 pontos de solda e com a temperatura de 25°C foi possível alcançar 400 pontos. Este fato mostra que a diferença da temperatura ambiente (Δt) durante o dia, influencia na vida útil do eletrodo.

Podemos concluir que não somente as baixas temperaturas, mas a temperatura constante da água de refrigeração também é um parâmetro importante para a eficiência deste processo de soldagem.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

1. Fazer um estudo para saber por qual motivo da aderência do zinco no eletrodo
2. Fazer o mesmo estudo em chapas zincadas com espessuras diferentes.
3. Fazer um estudo com eletrodos sem faces retas

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DIAS S. J., Uma metodologia de parâmetro de soldagem através de solda por resistência aplicada em chapas de aço “INTERSTITIAL FREE” (IF). RJ, 2011.
2. ORGANISATION INTERNATIONALE DES CONSTRUCTEURS D'AUTOMOBILES - www.oica.net
3. BRANCO, H.L.O., Avaliação de Capas de Eletrodos utilizadas na Soldagem por Resistência de Chapas Galvanizadas Automotivas. Dissertação de Mestrado, departamento de Engenharia Mecânica. Setor de Tecnologia e Universidade federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2004. P. 20-104.
4. BRANDI, S.D. Classificação dos processos de soldagem. In: WAINER, E. et al. Soldagem: Processo e Metalurgia. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1992. P. 217-242.
5. ZHOU,M., HU, S. J., AND ZHANG, H., Critical Specimen Sizes for Tensile-Shear Testing of Steel Sheets. Welding Research supplement, 1999; pp. 305-313.
6. INTERMACHINERY COMÉRCIO LTDA. I Seminário de Solda a Ponto. São Paulo: 2003, CD-ROM.
7. BATISTA M., Estudo Comparativo da Soldabilidade da Chapa para Indústria Automotiva Utilizando Dois Equipamentos de Soldagem a Ponto por Resistência. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.194p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

8. ZHANG, H; SENKARA, j. Resistance Welding: Fundamentals and Applications. 2.ed. Taylor & Francis Group, 2012. P. 54-70.
9. EWI. Magnesium Joining for automotive Applications. EWI CPR report no. 217, July 30, 50p.
10. SSAB TUNNPLAT AB. Sheet Steel Hand book – Design and Fabrication in High Strength Sheet Steel Borlange (Suécia), 1996; p. 196.
11. WELDING SCIENCE. Manual de treinamento de soldagem por resistência. São Paulo, 2009. 82p.
12. VARGAS A., JOSE E., Estudo da Formação, Geométrica e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistência: Uma Abordagem Estatística. Dissertação de Mestrado em Sistema Mecatrônicos, Publicação: DM-05/2006, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006. P.13-20.
13. NAS TOA., Manual de máquina de solda SP WELD MC SLP-35^aS, 2012.
14. HIRSCH, R.B.; LEIBOVITZ R., Influence of water temperature and flow on electrode life. Unitrol electronics Inc. Northbrook, IL U.S.A.
15. KIM E., EAGAR T. W., Transient thermal behavior in resistance spot welding.
16. MACHADO, I.G., Soldagem & Técnicas Conexas: Processos. Porto Alegre, 1996. 477p.
17. RWMA - Resistance Welder Manufacturers Association., Resistance Wending Manual. U.S.A., 4th ED., Nov., 443p.

18. SK USI, - www.skusi.com.br
19. ROSSI, P.G., Estudo de correlação do comportamento de pontos de solda em corpos de prova pelo método dos elementos finitos. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007. P.58-61.
20. STOCCO, DANILO., Caracterização de Solda por Resistência a Ponto através de avaliações não destrutivas. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.110p. Dissertação (Mestrado).
21. TESSONICS – RSWA – Analisador de solda por resistência a ponto.
22. DENISOV A.A., SHAKARIJ C. M. MAEV R. GR., PAILLE J. M. LAWFORD B. B., Spot weld analysis with two-dimensional Ultrasonic Arrays. University of Windsor, National institute of Standards and technology, DaimlerChrysler, University of Maryland.
23. EWI. Magnesium Joining for automotive Applications. EWI CPR report no. 217, July 30, 50p.
24. GM WORLDWIDE ENGINEERING STANDARDS, Material Specification. Hot Dip Zinc Coatings for Sheet Steel - GMW8, 2008.
25. GM WORLDWIDE ENGINEERING STANDARDS, Material Specification. Weld Acceptance Criteria and Repair Procedures Resistance Spot Welds - Steel. GMW14057, 2011.
26. METALÚRGICA MARIMAX. Catálogos de máquina de solda. São Paulo, 2005.