

Rui Vagner Pereira dos Santos

**ESTUDO COMPARATIVO DE SOLDABILIDADE
UTILIZANDO ELETRODOS COM DIFERENTES
GEOMETRIAS DE CONTATO NA SOLDAGEM A
PONTO POR RESISTÊNCIA.**

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
Junho/2015

Rui Vagner Pereira dos Santos

**ESTUDO COMPARATIVO DE SOLDABILIDADE
UTILIZANDO ELETRODOS COM DIFERENTES
GEOMETRIAS DE CONTATO NA SOLDAGEM A
PONTO POR RESISTÊNCIA.**

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. Marcio Batista

São Paulo
Junho/2015

“Transforme as pedras que você tropeça nas pedras de sua escada.”

Sócrates

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a minha esposa Marcia Cristina e a minha filha Ana Cristina, pela paciência, compreensão e apoio incondicional. Aos meus pais Ruy e Yolanda, meus primeiros e principais professores.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Marcio Batista, meu orientador, pelos ensinamentos, incentivo, tempo dispensado e paciência para a resolução de inúmeras dúvidas e revisões necessárias para a conclusão deste trabalho.

À minha esposa Marcia Cristina, pelo incentivo ao retorno aos estudos, carinho e dedicação.

Ao meu grande amigo Marcelo Bortolin, pelo interesse ao assunto, incentivo, compreensão e total apoio para a realização dos testes e ensaios.

Aos meus amigos Alexandre Abade, Ronaldo Ibañez, Wilson Baptista, Fernando Basso e Marcio Goes, por todo apoio prestado desde a preparação do equipamento de soldagem, programação e manipulação do robô, confecção de corpos de prova e auxílio nos experimentos.

Aos meus companheiros de estudo, Claudio Luiz, André Januzzi e Rubens Diego, pelo empenho nos estudos e momentos de descontração.

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

Agradeço a todos os professores, do curso de Engenharia e Especialização de Soldagem.

CURRICULUM VITAE

Rui Vagner Pereira dos Santos

Resumo

Carreira construída em empresas multinacionais e nacionais nas áreas de manutenção eletromecânica, programação e automação de linhas de produção, desenvolvimento de produtos automotivos, dispositivos e equipamentos.

Formação

- Cursando Pós-graduação Especialização em Engenharia de Soldagem. Escola Politécnica da USP (PECE). Início em Janeiro de 2013 e término em Dezembro de 2014.
- Graduado em Tecnólogo em Soldagem. FATEC-SP. Início em 1998 e término em 2001.
- Formado em Técnico em Eletromecânica. ETE Jorge Street. Início em 1984 e término em 1987.

Experiência Profissional

- Mercedes Benz do Brasil Ltda - São Bernardo do Campo - SP
Cargo: Eletricista Eletrônico.
Departamento: Montagem Bruta de Cabinas.
Período: Fevereiro de 1999 até o momento.
- GKW Equipamentos Industriais Ltda - São Bernardo do Campo – SP
Cargo: Mecânico de Manutenção.
Departamento: Planta Mercedes Benz.
Período: Dezembro 1997 até janeiro de 1999.
- Soplast Plástico Soprados Ltda - São Bernardo do Campo - SP

Cargo: Ferramenteiro de Protótipos.

Departamento: Desenvolvimento de Produtos e Dispositivos.

Período: Dezembro de 1991 até fevereiro de 1996.

- Ford do Brasil S.A - São Bernardo do Campo - SP

Cargo: Mecânico Ajustador.

Departamento: Manutenção.

Período: Fevereiro de 1983 até fevereiro de 1991.

Cursos de Aperfeiçoamento

- Inglês - CNA: Nível intermediário – Janeiro de 1993 até dezembro de 1994.
- Robótica - ABB: Programação, operação e manutenção elétrica de robôs IRC5 e S4-ME - Junho de 2002 e Janeiro de 2010.
- CLP - Rockwell Automation: SLC 500 Programação manutenção Devicenet e Ethernet - Março de 2002 e Julho de 2013.
- Robótica - KUKA: Programação, operação e manutenção elétrica de robôs - Julho de 2002.
- Informática e Montagem e Manutenção de Micros - ETE São Paulo - Outubro de 1999.
- Manutenção e Operação de Talhas de Pontes Rolantes: GKW Serviços Técnicos - Abril de 1998.
- CEP - Controle Estatístico de Processos: SENAI "Almirante Tamandaré" São Bernardo do Campo - Setembro de 1994.
- CLP - Controlador Lógico Programável: Cursos Piping - Março de 1994.
- Peumática Industrial - SENAI "Manuel Garcia Filho" Diadema - Outubro de 1992.
- CAD - Desenho por Computador: Escola 28 Julho - Janeiro de 1991.
- Serralheria Industrial e Artística: SENAI "Castro Alves" Ipiranga - Fevereiro de 1983 a junho de 1984.

RESUMO

Na soldagem a ponto por resistência, o consumo dos eletrodos é de grande relevância econômica, sendo que a vida útil dos eletrodos e a qualidade da solda produzida estão diretamente ligadas a sua geometria de contato. Neste trabalho foi avaliado o desempenho de dois tipos diferentes de geometria de contato dos eletrodos mais utilizados na indústria automotiva e com o mesmo material, analisando qualidade de soldagem assim como a durabilidade de cada um. Estudou-se a interação entre os fatores responsáveis pelo resultado, tornando possível identificar qual a melhor geometria em termos de produtividade e os parâmetros ideais para o acompanhamento de sua evolução. O dia a dia na indústria mostra que alteração de qualquer variável é suficiente para realizar um ponto de solda inadequado assim como desgaste prematuro dos eletrodos. Os resultados mostraram que o eletrodo de geometria esférica apresenta melhor desempenho devido à característica inicial de sua face de contato, com diâmetro menor que a face de contato do eletrodo de geometria cônica, proporcionando densidades de corrente concentradas e aplicação de força de contato mais uniforme.

ABSTRACT

In spot welding resistance, consumption of electrodes is of great economic importance, and the life time of the electrodes and the produced weld quality are directly linked to your contact geometry. This study evaluated the performance of two different electrodes of the contact geometry most commonly used in the automotive industry and with the same material, analyzing welding quality and durability of each. Is studied the interaction between the factors responsible for the result, making it possible to identify the best geometry in terms of productivity and the ideal parameters for the monitoring of its evolution. The daily routine in the industry shows that modification of any variable is sufficient to perform an inadequate weld point as well as premature wear of the electrodes. The results showed that the spherical geometry electrode shows better results due to the initial characteristic of its contact face with smaller diameter than the contact face of the conical geometry electrode, providing concentrated current densities and more uniform application of contact force.

LISTA DE FIGURAS.

Figura 3.1 - Esboço de solda por ponto; (a) Pontos de contato sendo aquecidos pela concentração de fluxo de corrente; (b) Corrente elétrica desligada iniciando o resfriamento e a cristalização do metal formando o ponto. Adaptado de (CHULOSHNIKOV, 1978).	28
Figura 3.2 - Resistências elétricas em uma junta soldada. Adaptado de (Alvarenga, 1993).	29
Figura 3.3 - Fórmula de geração de calor. Adaptado de (SENAI, 2013).....	29
Figura 3.4 - Área que define a superfície da resistência de contato. Adaptado de (VENCEGUERRA, 2012).	30
Figura 3.5 - Representação da superfície metálica. Adaptado de (Batista, 2014).....	31
Figura 3.6 - Principais tipos de soldagem por resistência. Adaptado de (VECCHIO, 1956).	33
Figura 3.7 - Representação do processo de soldagem de topo (autoria própria).	34
Figura 3.8 - Representação soldagem de topo por resistência pura. Adaptado de (VECCHIO, 1956).	35
Figura 3.9 - Detalhe do reforço resultado no processo. Adaptado de (CHULOSHNIKOV, 1978).	36
Figura 3.10 - Soldagem de topo por centelhamento: Posicionamento inicial das peças. Adaptado de (Marques, 2006).	37
Figura 3.11 - Após a energia elétrica ser ligada, as peças são aproximadas com uma velocidade V_1 ocorrendo o centelhamento. Adaptado de (Marques, 2006).	37
Figura 3.12 - Após a corrente elétrica ser desligada, as peças são pressionadas com uma velocidade V_2 . Adaptado de (Marques, 2006).	38
Figura 3.13 - Esquema de circuito utilizado por dois discos rotativos utilizados na soldagem por costura. Adaptado de (VECCHIO, 1956).	39
Figura 3.14 - Macrografia de solda por costura com excelente qualidade (VECCHIO, 1956).	40
Figura 3.15 - Esquema do processo de soldagem por projeção. Adaptado de (Cemsa, 2013).	41
Figura 3.16 - Corte transversal de solda a ponto por resistência (Rautaruukki Corporation, 2014).	42

Figura 3.17 - Fórmula da energia térmica. Adaptado de (Alvarenga, 1993). ...	43
Figura 3.18 - Resistência elétrica em chapas sobrepostas durante a soldagem. Adaptado de (Alvarenga, 1993).....	44
Figura 3.19 - Distribuição de calor em uma junta soldada. Adaptado de (HIRSCH, et al.)	45
Figura 3.20 - Equação da lei de Joule. Adaptado de (Alvarenga, 1993).....	48
Figura 3.21 - (a) Resistências envolvidas na soldagem por pontos; (b) Distribuição da temperatura em torno do ponto. Adaptado de (VECCHIO, 1956).....	49
Figura 3.22 - Influencia da pressão e acabamento superficial sobre a resistência de contato na soldagem por pontos. Adaptado de (MACHADO, 1996).....	51
Figura 3.23 - Relação entre força (F), diâmetro do eletrodo (D) e espessura da peça na soldagem por pontos. Adaptado de (MACHADO, 1996).....	51
Figura 3.24 - Corrente (I) e tempo (t) de soldagem para diferentes espessuras de chapas de aço ao carbono. Adaptado de (MACHADO, 1996)	53
Figura 3.25 - Gráfico de soldabilidade (<i>lobe curve</i>). Adaptado de (RUIZ, 2005).	54
Figura 3.26 - Sequência do Ciclo de Soldagem. Adaptado de (Rautaruukki Corporation, 2014)	56
.Figura 3.27 - Pinça manual de soldagem por pontos (Bucher, 2006).	58
Figura 3.28 - Pinça Estacionária de Soldagem por Pontos. Adaptado de (Rautaruukki Corporation, 2014)	59
Figura 3.29 - Esquema elétrico de uma pinça. Alimentação, potência, controle e secundário. Adaptado de (CHULOSHNIKOV, 1978).....	63
Figura 3.30 - Equação de cálculo de potência para ciclo de trabalho. Adaptado de (MACHADO, 1996).	64
Figura 3.31 - Circuito elétrico (monofásico) esquemático para soldagem por resistência. Adaptado de (MACHADO, 1996).....	65
Figura 3.32 - Equação da corrente do secundário. Adaptado de (MACHADO, 1996).....	65
Figura 3.33 - Diversos tipos de eletrodos utilizados na indústria (autoria própria).	66
Figura 3.34 - Formatos mais comuns de eletrodos utilizados na soldagem por pontos. Adaptado de (BATISTA, 2011)	71

Figura 3.35 - Determinação do diâmetro do ponto de solda e diâmetro da face de contato. Adaptado de (BAM SOLDAS).....	72
Figura 3.36 - Temperaturas instantâneas estimadas de soldagem por pontos em graus célsius no instante da finalização da soldagem. Adaptado de (AURES)	74
Figura 3.37 - Sistema de circuito fechado de refrigeração de água de resfriamento UMAG MECALOR (autoria própria)	75
Figura 3.38 - Circulação correta da água em um porta eletrodo (autoria própria).	76
Figura 3.39 - Montagem Correta do Tubo de Refrigeração Interno (autoria própria)	77
Figura 3.40 - Efeito do desgaste do eletrodo na superfície de contato. Adaptado de (WEINER, et al., 1992).....	78
Figura 3.41 - Fresagem automática e manual (autoria própria).....	79
Figura 3.42 - Diâmetro do eletrodo em função da soldagem de metais de espessura ou condutividade diferentes. Adaptado de (WEINER, et al., 1992).....	81
Figura 3.43 - Formação de latão na superfície da chapa durante a soldagem de cabines de caminhões (autoria própria)	85
Figura 3.44 - Configurações de juntas para soldagem por pontos. Adaptado de (EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION, 2012).....	86
Figura 3.45 - Montagem de flange típica para soldagem por pontos. Adaptado de (EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION, 2012).....	87
Figura 3.46 - Exemplos de diversos defeitos ou falhas que ocorrem no processo de soldagem por pontos; (a) perfuração da chapa; (b) soldagem na borda da chapa; (c) expulsão de material; indentação excessiva ou “ponto profundo (autoria própria).....	89
Figura 3.47 - Soldagem de borda (autoria própria).....	90
Figura 3.48 - Soldagem próxima demais (autoria própria).....	91
Figura 3.49 - Corrente de desvio com dois pontos de Solda. Adaptado de (BATISTA, 2011).....	92
Figura 3.50 - Indentação excessiva e solda fria (autoria própria)	93
Figura 3.51 - Exemplos de soldagens com expulsão de material (autoria própria)	94
Figura 3.52 - Grande cavidade após expulsão de metal (ZHANG, et al., 2006).....	95

Figura 3.53 - Separação excessiva (ZHANG, et al., 2006).....	95
Figura 3.54 - Buracos e “bigodes” na superfície de um ponto de solda (ZHANG, et al., 2006).....	96
Figura 4.1 - Eletrodo esférico de 14 mm de diâmetro.....	99
Figura 4.2 - Eletrodo cônicamente truncado de 14 mm de diâmetro.	100
Figura 4.3 - Dimensões finais dos corpos de prova conforme a espessura da chapa.....	101
Figura 4.4 - Dimensões dos corpos de prova conforme Norma EN ISO 14273.	102
Figura 4.5 - Chapas utilizadas para a definição do diagrama de soldabilidade fixadas em suporte adaptado e isolado.	103
Figura 4.6 - Desenvolvimento das chapas para testes de arrancamento para determinação das janelas operacionais.	103
Figura 4.7 - Teste de arrancamento utilizado para determinação das janelas operacionais.....	104
Figura 4.8 - Pinça pneumática de corrente alternada de soldagem por pontos utilizada nos testes.....	105
Figura 4.9 - Detalhe do robô manipulador ABB (a) e interface de programação e controle do robô <i>flex pendente</i> (b), utilizados para realização dos ensaios de soldagem.	106
Figura 4.10 - Dinamômetro digital para verificação e calibração de força utilizada nos testes.....	107
Figura 4.11 - Bobina flexível Rogowski.	107
Figura 4.12- Analisador de corrente e tempo acoplado em Netbook Dell.	108
Figura 4.13 - Diagrama da geometria do ponto de solda (autoria própria).....	109
Figura 4.14 - Medições realizadas em macrografia do corpo de prova.	111
Figura 4.15 - Determinação do diâmetro do ponto dP	112
Figura 4.16 - Diagrama de soldabilidade ou “janela operacional” utilizada para determinação de limites mínimos e máximos de corrente de soldagem.	113
Figura 4.17 - Chapa utilizada no teste de rendimento dos eletrodos.	114
Figura 4.18 - Distâncias entre os pontos de solda realizados nos testes de rendimento dos eletrodos.....	115
Figura 4.19 - Corpos de prova realizados nos ensaios.....	116

Figura 4.20 - Diâmetro da região desgastada do eletrodo.....	117
Figura 4.21 - Impressões realizadas com auxílio de folha de papel carbono para dimensionamento de área da face do eletrodo.....	118
Figura 4.22 - Detalhe da impressão da face do eletrodo vetorizada no AutoCAD® (autoria própria).	119
Figura 4.23 - Detalhe de imagem da face do eletrodo vetorizada no AutoCAD®.....	120
Figura 4.24 - Equipamento ultrassônico utilizado nos testes não destrutivos.	121
Figura 4.25 - Interface do software do ensaio por ultrassom.	121
Figura 4.26 - Gráfico gerado pelo equipamento de tração.	122
Figura 4.27 - Corpos de prova submetidos ao ensaio de tração.	122
Figura 4.28 - Sequencia do ensaio por arrancamento.....	123
Figura 5.1 - Diagrama de soldabilidade para eletrodo de geometria esférica.	126
Figura 5.2 - Diagrama de soldabilidade para eletrodo de geometria cônica.	126
Figura 5.3 - Medições realizadas em uma macrografia de um ponto de solda.	127
Figura 5.4 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos esféricos superior e inferior – ponto de solda 1.	129
Figura 5.5 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos esféricos superior e inferior – ponto de solda 50.	129
Figura 5.6 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos esféricos superior e inferior – ponto de solda 100.	130
Figura 5.7 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos esféricos superior e inferior – ponto de solda 150.	130
Figura 5.8 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos esféricos superior e inferior – ponto de solda 200.	130
Figura 5.9 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos esféricos superior e inferior – ponto de solda 250.	131
Figura 5.10 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos esféricos superior e inferior – ponto de solda 300.	131
Figura 5.11 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos esféricos superior e inferior – ponto de solda 350.	131

Figura 5.12 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos esféricos superior e inferior – ponto de solda 400	132
Figura 5.13 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos esféricos superior e inferior – ponto de solda 450	132
Figura 5.14 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos esféricos superior e inferior – ponto de solda 500	132
Figura 5.15 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos cônicos superior e inferior – ponto de solda 1	133
Figura 5.16 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos cônicos superior e inferior – ponto de solda 50	133
Figura 5.17 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos cônicos superior e inferior – ponto de solda 100	134
Figura 5.18 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos cônicos superior e inferior – ponto de solda 150	134
Figura 5.19 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos cônicos superior e inferior – ponto de solda 200	134
Figura 5.20 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos cônicos superior e inferior – ponto de solda 250	135
Figura 5.21 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos cônicos superior e inferior – ponto de solda 300	135
Figura 5.22 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos cônicos superior e inferior – ponto de solda 350	135
Figura 5.23 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos cônicos superior e inferior – ponto de solda 400	136
Figura 5.24 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos cônicos superior e inferior – ponto de solda 450	136
Figura 5.25 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos cônicos superior e inferior – ponto de solda 500	136
Figura 5.26 - Variações das áreas das faces dos eletrodos superiores e inferiores esféricos e cônicos versus número de pontos de solda	138
Figura 5.27 - Variação do diâmetro médio do ponto de solda versus número de pontos de solda	139
Figura 5.28 - Variação da profundidade da indentação versus número de pontos de solda	141

Figura 5. 29 - Gráfico número de pontos de solda versus densidade de corrente (face de contato desgastado dos eletrodos esférico e cônicos).	142
Figura 5.30 - Evolução da densidade de corrente eletrodo esférico - ponto de solda 1, 50 e 150.	143
Figura 5.31 - Evolução da densidade de corrente eletrodo esférico - ponto de solda 150, 200 e 250.	144
Figura 5.32 - Evolução da densidade de corrente eletrodo esférico - ponto de solda 300, 350 e 400.	144
Figura 5.33 - Evolução da densidade de corrente eletrodo esférico - ponto de solda 450 e ponto de solda 500.	144
Figura 5.34 - Evolução da densidade de corrente eletrodo cônicos - ponto de solda - 1, 50 e 100.	145
Figura 5.35 - Evolução da densidade de corrente eletrodo cônicos - ponto de solda 150, 200 e 250.	145
Figura 5.36 - Evolução da densidade de corrente eletrodo cônicos - ponto de solda 300, 350 e 400.	146
Figura 5.37 - Evolução da densidade de corrente eletrodo cônicos - ponto de solda 450 e ponto de solda 500.	146
Figura 5.38 - Número de pontos de solda versus densidade de corrente (eletrodo esférico e cônicos).	147
Figura 5. 39 - Densidade de corrente por medição da face de contato do eletrodo e impressão por folha de carbono versus número de pontos de solda (eletrodo esférico).	149
Figura 5. 40 - Densidade de corrente por medição da face de contato do eletrodo e impressão por folha de carbono versus número de pontos de solda (eletrodo cônicos).	150
Figura 5.41 - Gráfico de força de cisalhamento versus número de pontos de solda realizados com eletrodos esférico e cônicos.	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Propriedades térmicas dos metais.	32
Tabela 3.2 - Soldabilidade entre metais e suas ligas. Adaptado de (ASM INTERNATIONAL, 1983).	47
Tabela 3.3 - Características das fontes de potência de corrente contínua (“SCR”) para soldagem por pontos, com alimentação monofásica de onda completa. Adaptado de (MACHADO, 1996).	61
Tabela 3.4 - Características das fontes de potência de corrente contínua (“SCR”) para soldagem por pontos, Com alimentação trifásica de meia onda. Adaptado de (MACHADO, 1996).	62
Tabela 3.5 - Classificação de eletrodos de soldagem por pontos. Adaptado de (RWMA, 1989).	68
Tabela 3.6 - Calculo para determinar a área de contato de eletrodos utilizados para soldagem de metais dissimilares. Adaptado de (WEINER, et al., 1992)..	81
Tabela 3.7 - Resumo dos principais tipos de revestimentos metálicos utilizados na indústria automotiva. Adaptado de (BATISTA, 2011).	82
Tabela 3.8 - Tipos de defeitos e causas na soldagem por pontos. Adaptado de (RUIZ, 2005).	97
Tabela 4.1 - Especificações do eletrodo conforme RWMA. Adaptado de (RWMA, 1989)....	100
Tabela 4.2 - Composição química e propriedades mecânicas da chapa de aço.	101
Tabela 4.3 - Descritivo dos equipamentos de calibração.	109
Tabela 4.4 - Dimensões e força mínima de tração conforme a norma.	110
Tabela 4.5 - Parâmetros de soldagem utilizados nos ensaios para eletrodo de geometria esférica.....	115
Tabela 4.6 - Parâmetros de soldagem utilizados nos ensaios para eletrodos de geometria cônica.....	116
Tabela 5.1 - Dados dos parâmetros utilizados para elaboração do diagrama de soldabilidade do aço com eletrodo de geometria esférica.....	124
Tabela 5.2 - Dados dos parâmetros utilizados para elaboração do diagrama de soldabilidade do aço com eletrodo de geometria cônica.	125

Tabela 5.3 - Parâmetros ideais encontrados com auxílio dos diagramas de soldabilidade e utilizados na soldagem dos corpos de prova.	127
Tabela 5.4 - Dimensões dos pontos de solda.....	128
Tabela 5.5 - Número de pontos versus área da face de contato do eletrodo inferior e superior esférico.....	137
Tabela 5.6 - Número de pontos versus área da face de contato do eletrodo inferior e superior cônicos.....	137
Tabela 5.7 - Número de pontos de solda versus diâmetro médio dos pontos de solda realizados com eletrodos de geometria cônicas e esféricas.....	138
Tabela 5.8 - Número de pontos de solda versus profundidade de indentação (eletrodo esférico e cônicos).....	140
Tabela 5.9 - Número de pontos de solda versus densidade de corrente (face de contato desgastado eletrodos esférico e cônicos).....	142
Tabela 5.10 - Número de pontos de solda versus densidade de corrente (eletrodo esférico e cônicos).....	147
Tabela 5.11 – Comparação dos valores das taxas de redução de densidade de corrente utilizando as técnicas de medição da face de contato e impressão de folha de carbono versus número de pontos de solda (eletrodo esférico).....	148
Tabela 5.12 - Comparação dos valores das taxas de redução de densidade de corrente utilizando as técnicas de medição da face de contato e impressão de folha de carbono versus número de pontos de solda (eletrodo cônicos).....	149
Tabela 5.13 - Força de cisalhamento versus número de pontos de solda.....	151

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Ampere
Ag	Prata
Al	Alumínio
ASW	American Welding Society
c	Calor latente
CA	Corrente alternada
Cal	Caloria
CC	Corrente contínua
Cm	Calor específico do material
Cu	Cobre
FW	Flash Butt Welding
g	Gramma
HRB	Dureza Brinell
I	Corrente elétrica
IACS	International Annealing Copper Standart
Ip	Corrente no primário
Is	Corrente no secundário
J	Joule
K	Constante
kA	Kilo ampere
kg	Kilograma
kgf	Kilo grama força
kN	Kilo Newton
kVA	Kilo volt ampere
lbs	Libras
Mg	Magnésio
mm	Milímetros
ms	Mile segundo
Q	Calor absorvido ou cedido
R	Resistência Elétrica

r	Rendimento térmico
RESW	Resistance Seam Welding
RPW	Resistance Projection Welding
RSW	Resistance Spot Welding
RWMA	Resistance Welding Manufactures Association
s	Segundos
t	Tempo
t1	Temperatura das peças a soldas
t2	Temperatura de fusão do material
Up	Tensão no primário
Us	Tensão no secundário
UW	Upset Butt Welding
V	Tensão
v	Volume do ponto de solda
y	Peso específico do material
ZAC	Zona afetada pelo calor
Zn	Zinco
Zr	Zirconio

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	IV
AGRADECIMENTOS	V
CURRICULUM VITAE.....	VI
RESUMO	VIII
ABSTRACT.....	IX
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS	XVII
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	XIX
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	25
2. OBJETIVO.....	26
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
3.1. História da soldagem por resistência:.....	27
3.1.1. Soldagem por resistência:	27
3.1.2. Fundamentos do processo:	28
3.1.3. Resistência de contato:	30
3.2. Principais tipos de soldagem por resistência:.....	32
3.2.1. Soldagem de topo:	33
3.2.1.1. Soldagem de topo por resistência pura:	35
3.2.1.2. Soldagem de topo por centelhamento:	36
3.2.2. Soldagem por costura:.....	38
3.2.3. Soldagem por projeção:.....	40
3.2.4. Soldagem por pontos:.....	41
3.3. Detalhamento do processo de soldagem por pontos:.....	43
3.3.1. Condições de soldagem e soldabilidade:.....	45
3.3.2. Energia para a fusão:	48
3.3.3. Densidade da corrente:	49
3.3.4. Força dos eletrodos e resistência elétrica:.....	50

3.3.5. Fluxo de corrente:.....	52
3.3.6. A grandeza tempo na soldagem.	55
3.3.7. Ciclo de soldagem:	56
3.3.7.1. Pré-pressão:.....	56
3.3.7.2. Tempo de soldagem:.....	57
3.3.7.3. Pós-pressão:	57
3.3.7.4. Tempo de pausa:.....	57
3.3.8. Equipamento de soldagem por pontos:	57
3.3.9. Circuito elétrico:	59
3.3.9.1. Equipamento monofásico:	59
3.3.9.2. Equipamento trifásico:	60
3.3.9.3. Ciclo de trabalho:.....	64
3.3.9.4. Corrente de soldagem:	65
3.3.10. Eletrodos para soldagem por pontos:	65
3.3.11. Formato do eletrodo.	70
3.3.12. Tamanho do ponto:.....	71
3.3.13. Critérios de aceitação do ponto de solda:	73
3.3.14. Refrigeração dos eletrodos:	73
3.3.15. Desgaste dos eletrodos:	77
3.3.16. Fresagem dos eletrodos:	78
3.3.17. Equilíbrio térmico:	80
3.3.18. Aços galvanizados:.....	82
3.3.18.1. Revestimento contínuo por imersão a quente:.....	83
3.3.18.2. Galvanização por eletrodeposição (EG):	84
3.3.19. Soldagem de aços galvanizados:	84
3.3.20. Configurações de juntas:	86
3.3.21. Fatores que afetam a qualidade:	87
3.3.22. Descontinuidades externas:.....	89
3.3.22.1. Soldagem próxima da borda da chapa:	90
3.3.22.2. Corrente de desvio:	91
3.3.22.3. Indentação excessiva e solda fraca:	92
3.3.22.4. Expulsão de material:	93
3.3.23. Descontinuidades internas:.....	94

3.4. Considerações finais:	97
4. MATERIAIS E MÉTODOS	99
4.1. Características dos corpos de provas e eletrodos utilizados nos experimentos:	99
4.1.1. Eletrodos segundo especificações da RWMA:	99
4.1.2. Chapa de aço galvanizada:	100
4.2. Equipamento de soldagem:	104
4.3. Equipamentos de calibração:	106
4.4. Determinação do diâmetro mínimo da seção ponto de solda dL :	109
4.4.1. Determinação do diâmetro mínimo do ponto no ensaio de arrancamento (dP):	111
4.5. Determinação dos parâmetros otimizados de soldagem através do diagrama de soldabilidade ou janela operacional:	112
4.6. Chapas de trabalho para testes de rendimento dos eletrodos:	114
4.7. Parâmetros de soldagem utilizados:	115
4.8. Ensaios realizados para comparação dos eletrodos cônicos e esféricos:	116
4.8.1. Determinação da densidade de corrente de soldagem:	117
4.8.2. Medição do desgaste dos eletrodos:	119
4.8.3. Ensaio por ultrassom:	120
4.8.4. Ensaio de tração:	121
4.8.5. Ensaio de arrancamento para os corpos de prova com os parâmetros otimizados de soldagem:	123
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO:	124
5.1. Diagrama de soldabilidade para determinação dos parâmetros otimizados de soldagem:	124
5.2. Dimensões dos pontos de solda:	127
5.3. Deformação dos eletrodos de acordo com a quantidade de pontos de solda:	129
5.4. Indentação:	140
5.5. Densidade de corrente:	141
5.6. Densidade de corrente (técnica de impressão de carbono):	143
5.7. Ensaio de tração:	151
6. CONCLUSÕES	153

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS:	154
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:.....	155

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Soldagem por resistência (RSW) agrupa vários processos em que o calor de soldagem é gerado pela resistência a um fluxo de corrente elétrica que atravessa duas ou mais partes a serem unidas. Processos esses largamente utilizados na indústria automobilística para soldar juntas sobrepostas de chapas de aço ao carbono com diferentes espessuras.

A principal vantagem da soldagem por resistência na indústria é o baixo tempo de execução necessitando de pequena habilidade do operador.

Quando utilizado em sistemas robóticos tem-se maior rapidez e confiabilidade na repetição. Levando em consideração que um monobloco de um automóvel ou uma cabina de um caminhão requer milhares de pontos, em chapas de aço com características metalúrgicas, espessuras e revestimentos diferentes, seu uso realmente é muito vantajoso.

O equipamento utilizado na execução da soldagem a ponto consiste em um dispositivo eletropneumático, que nada mais é que um sistema mecânico de aplicação de força, comandado por um circuito elétrico e um equipamento digital ou analógico de controle de soldagem.

Por ser um processo rápido e repetitivo, por vezes é considerado simples é óbvio e cuidados elementares passam despercebidos, reduzindo o padrão de qualidade da solda. Não é raro uma pinça de soldagem trabalhar por dias com eletrodos desalinhados, refrigeração deficiente, pressão de trabalho abaixo do mínimo aceitável, etc... Infelizmente numa linha produtiva, por vezes a quantidade vale mais que a qualidade.

Quando pelo menos uma das variáveis do processo (corrente de soldagem, tempo de soldagem, pressão de soldagem e eletrodo) estiver fora da configuração ideal, possivelmente resultará em perda de propriedade mecânica na região soldada. Trincas de solda em uma região estrutural de um veículo nunca são aceitáveis.

Portanto, esse trabalho estará voltado ao estudo comparativo de eletrodos de diferentes geometrias, verificando vida útil de cada um e qualidade das soldagens realizadas.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo estudar a soldabilidade de chapas de aço com espessura de 1,2mm, revestida com zinco (Zn), usadas na indústria automotiva, utilizando processo de soldagem por pontos com corrente de alternada (CA), comparando eletrodos de cobre zircônio de diferentes geometrias, classificando rendimento e qualidade de soldagem visando estabelecer conjuntos otimizados de parâmetros de soldagem.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. História da soldagem por resistência:

Foi em uma aula de eletricidade em 1877 na Escola Secundária Central da Filadélfia, ao demonstrar uma operação de fiação em uma bobina que o professor de química Elihu Thomson inventou a soldagem por resistência. Elihu Thomson (1853-1937) foi fundador e presidente do Thomson Laboratory Lynn Mass. Thomson foi projetista e fabricante de motores e transformadores. Thomson Laboratory fez posteriormente uma fusão com Edison General Electric Company sendo criada então a General Electric Co. Thomson foi vice-presidente e diretor de pesquisa da nova empresa. A primeira demonstração prática da soldagem por resistência foi realizada no Franklin Institute na Filadélfia (1879) e foi aperfeiçoada em 1886. Foi nesse ano que o primeiro equipamento de soldagem por resistência foi produzida: a Thomson-Gibb (NIED, 1983).

3.1.1. Soldagem por resistência:

Todas as técnicas de soldagem por resistência são baseadas no calor que é produzido na junção por um fluxo de corrente elétrica através das peças metálicas que serão unidas. A quantidade de calor gerada basicamente depende da intensidade da corrente, o tempo de fluxo de corrente e a resistência ou o metal na junta.

No processo de soldagem por resistência, uma corrente de baixa tensão e de corrente elevada é aplicada pelos eletrodos adequados para duas ou mais chapas metálicas pressionados conjuntamente. O calor de soldagem é gerado diretamente nas partes, no ponto de contato entre eles e ao ponto de contato entre as partes e os eletrodos. Como o próprio nome sugere o fator básico na soldagem por resistência é a resistência elétrica (CHULOSHNIKOV, 1978).

A soldagem por resistência é um dos métodos mais utilizados para unir metais, pois serve para variadas espessuras, formas e tipos de materiais, e com pequenas adaptações o equipamento pode soldar várias peças diferentes (SENAI, 2013).

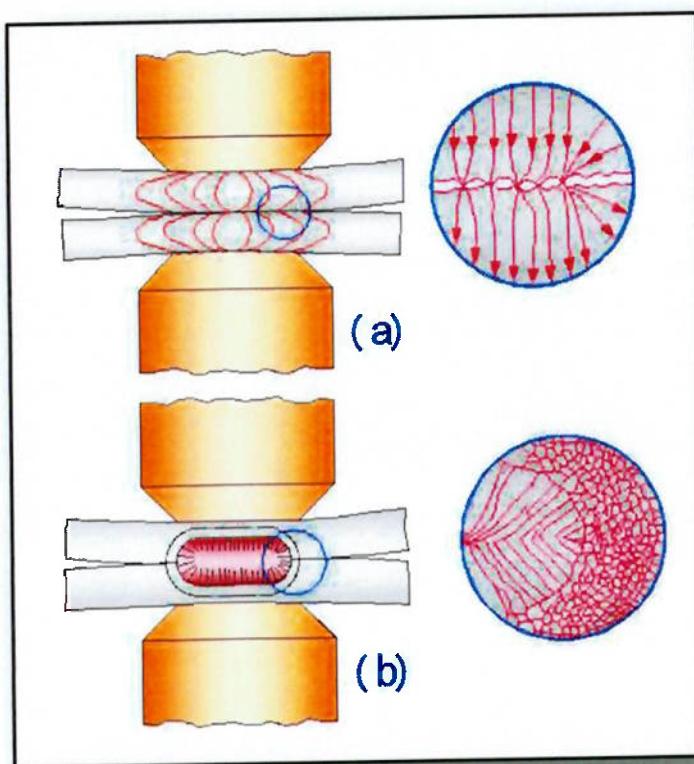


Figura 3.1 - Esboço de solda por ponto; (a) Pontos de contato sendo aquecidos pela concentração de fluxo de corrente; (b) Corrente elétrica desligada iniciando o resfriamento e a cristalização do metal formando o ponto. Adaptado de (CHULOSHNIKOV, 1978).

3.1.2. Fundamentos do processo:

Na soldagem por resistência, as resistências elétricas de todo o circuito secundário são importantes, em decorrência das elevadas correntes de soldagem. Quando as peças são unidas pela pressão dos eletrodos, a resistência total é uma somatória de sete resistências: $R=R_1+R_2+R_3+R_4+R_5+R_6+R_7$.

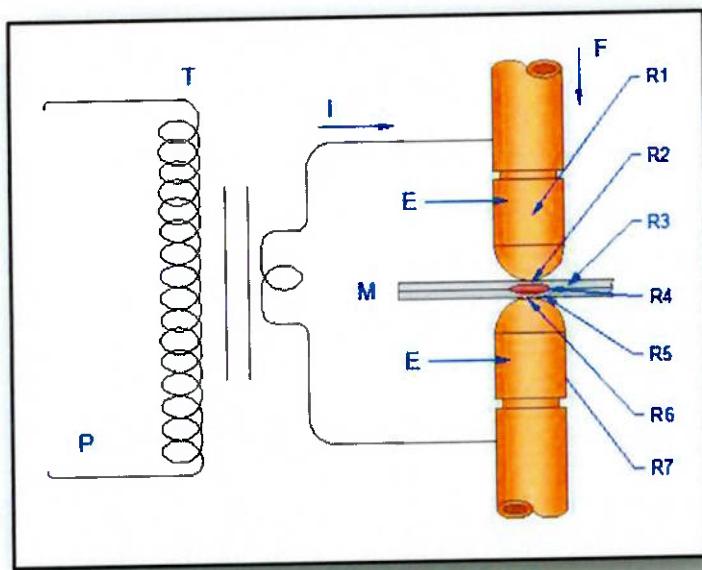


Figura 3.2 - Resistências elétricas em uma junta soldada. Adaptado de (ALVARENGA, 1993).

A quantidade de calor gerado pela passagem da corrente elétrica é proporcional ao valor da corrente segundo a lei de Joule e depende de três fatores: a intensidade da corrente, a resistência do condutor, incluindo a resistência da interface e o tempo em que a corrente é aplicada. Esses três fatores afetam a quantidade de calor, de acordo com a fórmula da figura 3.3 (SENAI, 2013):

$Q = I^2 Rt$	
Q	Quantidade de calor gerado (J)
I	Intensidade de corrente (A)
R	Resistência da peça (Ω)
T	Duração da intensidade de corrente (s)

Figura 3.3 - Fórmula de geração de calor. Adaptado de (SENAI, 2013).

3.1.3. Resistência de contato:

Quando examinado a superfície ou uma peça de metal, usinado e pressionado em uma grande ampliação, percebe-se grande número de manchas ásperas (picos e vales) conforme ilustrado na figura 3.4. Quando as partes são apertadas em conjunto, um contato é formado, ou seja, as partes se tocam a um número de pontos limitado (CHULOSHNIKOV, 1978).

A resistência de contato na interface das chapas a serem soldadas é a fonte fundamental de aquecimento pelo efeito Joule para metais de alta condutividade elétrica. Depende da resistividade intrínseca da camada de revestimento e da dureza, do contorno e da superfície. Medições de resistência estática indicam que a resistência de contato depende do revestimento da superfície e da diminuição da força nos pontos de contato. Sabe-se que a resistência de contato entre duas superfícies não tem valor tão alto como as superfícies com materiais estranhos e que a diminuição da força do eletrodo aumenta a resistência (AURES). A resistência depende da resistividade e da geometria do condutor. Sendo a resistividade do material fixa, é usual criar um local de alta resistência, providenciando um caminho restrito à passagem da corrente entre as partes a serem soldados, procedimento esse conhecido como concentração de corrente (AURES).

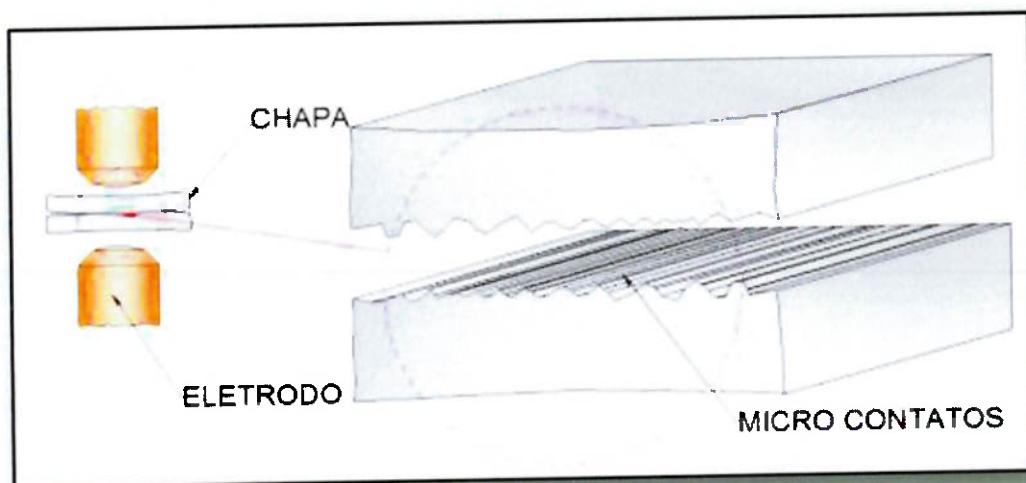


Figura 3.4 - Área que define a superfície da resistência de contato. Adaptado de (VENCEGUERRA, 2012).

Resistência de contato é sensível tanto quando ocorrem reduções súbitas na secção transversal do condutor quanto na presença de filme de óxido de baixa condutividade no ponto de contato, a figura 3.5 mostra uma representação de uma superfície metálica. À medida que a força de fechamento é aumentada, alguns pontos altos na superfície do metal entram em colapso, a área de contato eficaz aumenta e a resistência de contato diminui. Além de fazer os pontos mais altos entrarem em colapso, a pressão de aperto quebra a película de óxido e de impurezas, isso reduz a resistência de contato ainda mais. Como as peças são aquecidas, a resistividade do metal aumenta, os pontos de contato aumentam em número e área, pois o metal aquecido desmorona mais facilmente, o resultado é uma mudança considerável no contato resistente. O papel da resistência de contato na geração de calor depende das variáveis do processo de soldagem utilizados, especialmente corrente de soldagem e o tempo de fluxo de corrente (CHULOSHNIKOV, 1978). Os grandes valores das resistências nas superfícies de contato são causados pela existência de óxidos não condutores nas superfícies das peças. O valor das resistências de contato está no intervalo de 50-100 mW, porém no caso de alumínio, esse valor cai para 20 mW (WEINER, et al., 1992).

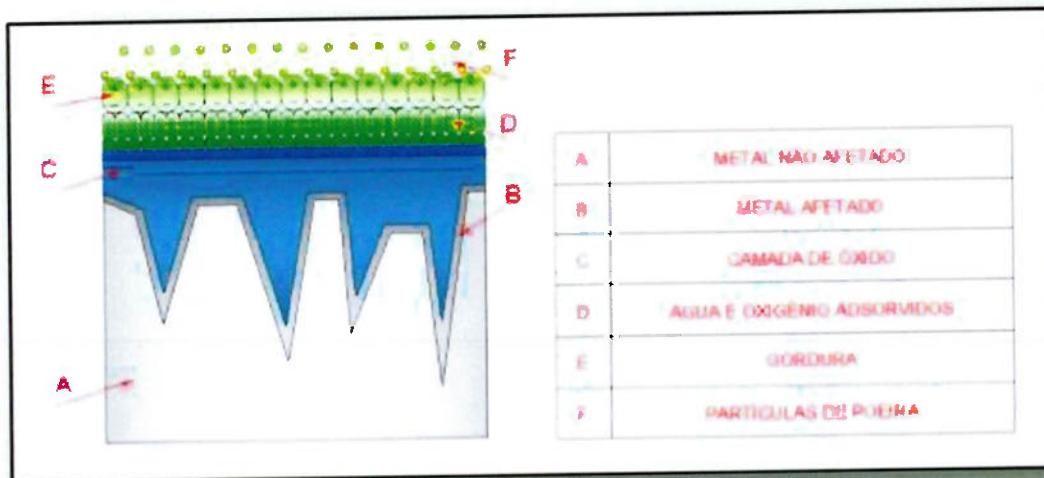


Figura 3.5 - Representação da superfície metálica. Adaptado de (BATISTA, 2014).

Composição química dos materiais a serem soldados também tem grande influência, pois a resistividade e a condutividade elétrica influenciam a geração de calor durante a soldagem. Materiais com alta condutividade elétrica, como a prata e o cobre, geram pequena quantidade de calor sobre uma alta densidade de corrente. Essa pequena quantidade de calor é rapidamente transmitida através da peça. Como mostrado na tabela 3.1, a composição química determina o calor específico, a temperatura de fusão, o calor latente de fusão e a condutividade térmica, e são esses dados que determinam a quantidade de calor necessário para fundir o metal e gerar a solda (SENAI, 2013).

Tabela 3.1 - Propriedades térmicas dos metais.

Materiais	Condutividade Térmica	Calor específico		Temperatura de fusão
	(J/s. m. K) a 27°C	(J/kg. K)	(cal/g. K)	0°C
Prata	426	235	0,056	691
Cobre	398	385	0,092	1085
Ouro	317	129	0,031	1064
Alumínio	237	903	0,216	659
Ferro	80,3	448	0,107	1535
Aço Carb.	38	435	0,104	1425-1540

3.2. Principais tipos de soldagem por resistência:

O processo de soldagem por resistência é composta pelas seguintes técnicas básicas: soldagem de topo (topo a topo por resistência e topo a topo por fiscamento ou centelhamento), soldagem por projeção, soldagem por costura e soldagem por pontos, como demonstrado na figura 3.6.

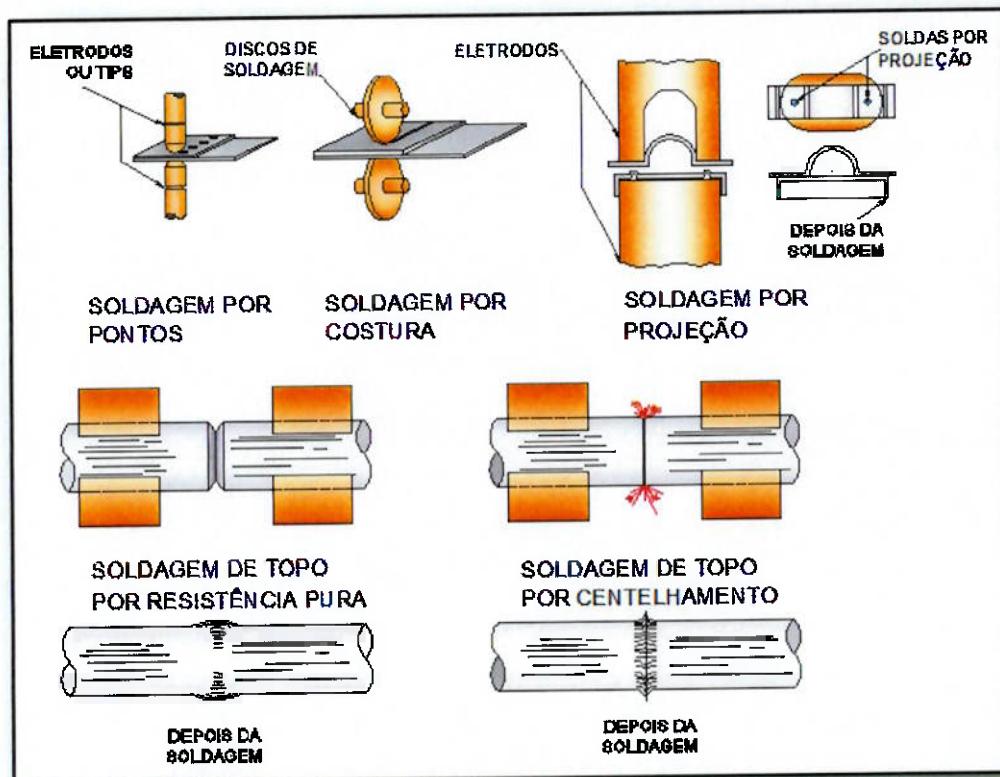


Figura 3.6 - Principais tipos de soldagem por resistência. Adaptado de (VECCCHIO, 1956).

3.2.1. Soldagem de topo:

Soldagem de topo é um processo em que as peças metálicas são unidas ao longo de toda a secção de área de contato através da aplicação de calor por meio de uma corrente elétrica e pressão. As partes que podem ser da mesma ou quase a mesma secção são mantidas por mordentes condutores de corrente de uma máquina de soldagem a topo. O calor e pressão aplicada nas faces metálicas causa a quebra de alguns grãos metálicos formando novos grãos comuns em ambas às partes. Este processo é chamado de recristalização que é importante para a formação de juntas de soldagem a topo. Além disso, uma condição necessária para a formação de uma junta confiável é a dissolução e remoção da película de óxido das extremidades das partes (CHULOSHNIKOV, 1978).

As peças metálicas são fixadas a mordentes (eletrodos) que estão ligados eletricamente ao secundário do transformador de corrente alternada ou de

média frequência. Um mordente fixo na máquina e o outro móvel que é responsável pela movimentação e aplicação de força de contato entre as peças. A fixação das peças deve ser adequada o suficiente para resistir à pressão aplicada entre as faces de contato e evitar o deslizamento das mesmas, garantindo assim a qualidade esperada, como é mostrado na figura 3.7 (MACHADO, 1996).

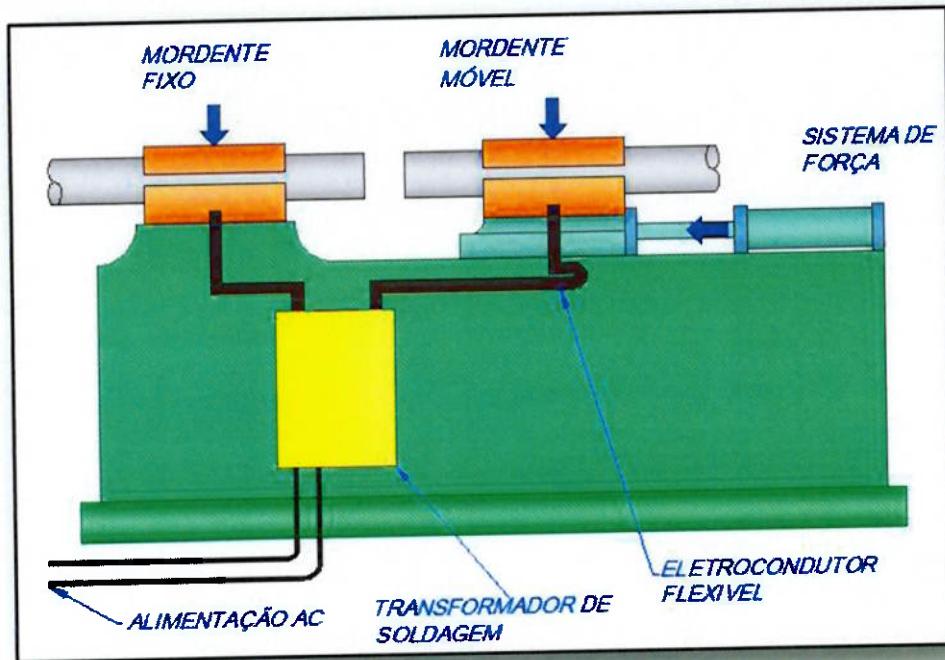


Figura 3.7 - Representação do processo de soldagem de topo (autoria própria).

Calor de soldagem é produzido parcialmente no ponto de contato entre as extremidades, ou faces das partes (devido à resistência de contato) e em parte, nas peças de trabalho, devido à sua própria resistência. Ao soldar, a resistência de contato entre um mordente e uma das peças é bastante pequena e praticamente não afeta a quantidade de calor gerado. A soldagem de topo pode ser dividida em dois tipos: Soldagem de topo por resistência pura e soldagem de topo por centelhamento (CHULOSHNIKOV, 1978).

3.2.1.1. Soldagem de topo por resistência pura:

Soldagem de topo por resistência pura (*Upset Butt Welding, UW*) é um processo em que as peças, como representado na figura 3.8, são presas conjuntamente por garras de fixação ou mordentes de uma máquina de soldagem. Inicialmente, as partes entram em contato em alguns pontos altos, que apresentam uma alta resistência de contacto. A intensa corrente aplicada aquece os pontos altos na área de contato e a pressão de aperto faz com que as desmoronem, conforme mostrado na figura 3.9(a).

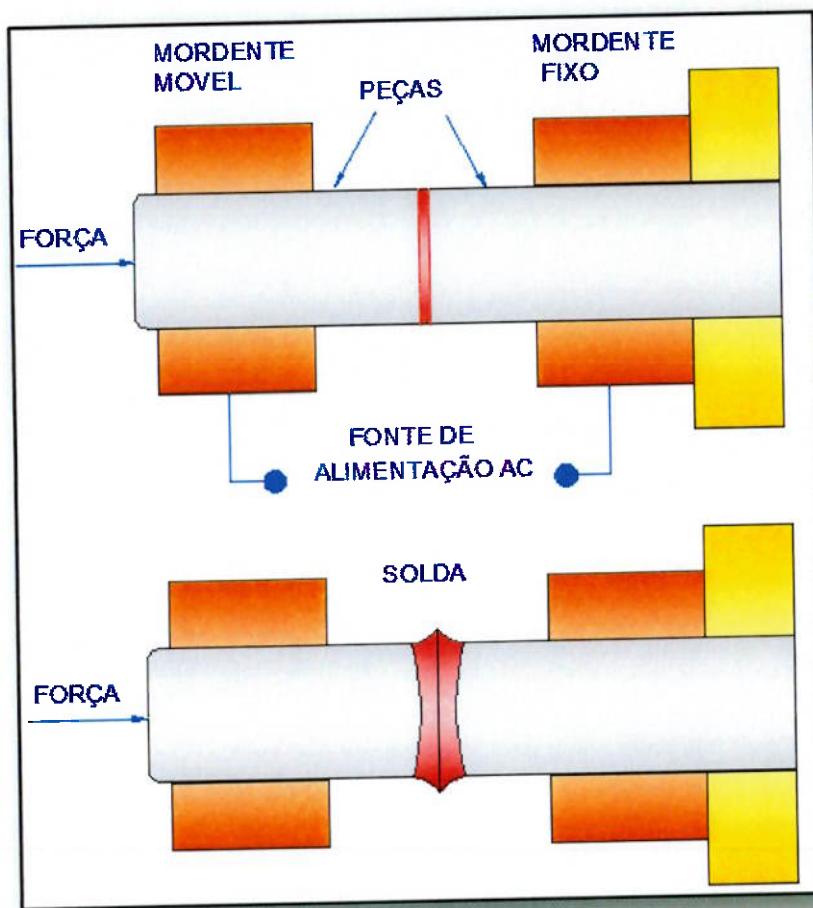


Figura 3.8 - Representação soldagem de topo por resistência pura. Adaptado de (VECCHIO, 1956).

A resistência de contato cai rapidamente, e agora as partes são aquecidas devido à sua própria resistência que aumenta com a temperatura. Quando o metal na área de contato é trazido para perto da temperatura de fusão, a

pressão de aperto comprime as peças uma contra a outra as fundindo, formando um inchaço localizado, resultado da recristalização, chamado reforço, como é visto na seção (b) da figura 3.9 (CHULOSHNIKOV, 1978).

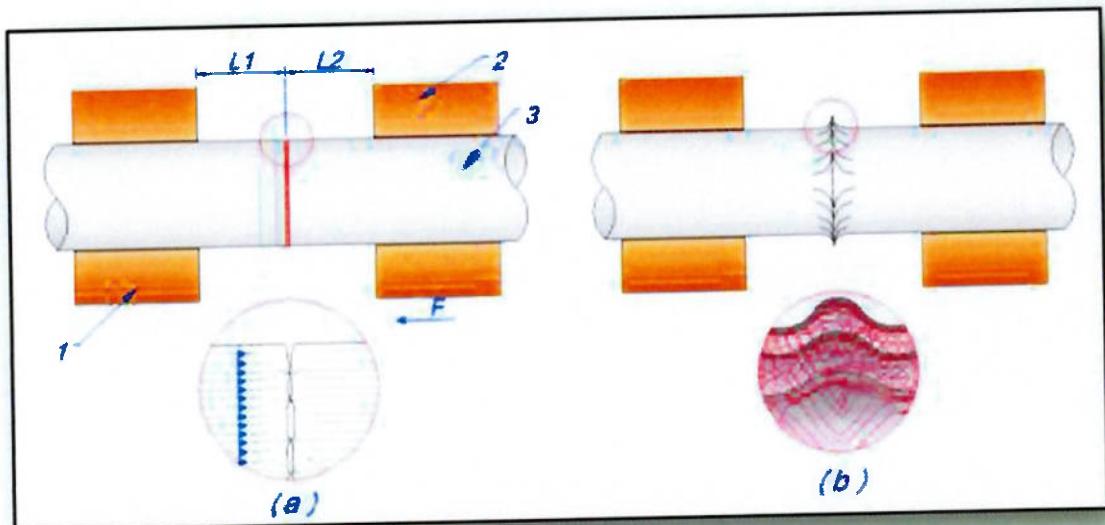


Figura 3.9 - Detalhe do reforço resultado no processo. Adaptado de (CHULOSHNIKOV, 1978).

A pressão aplicada para fixar as peças unidas pode ser mantida constante ou aumentar repentinamente no final do aquecimento. A pressão é removida após a corrente de soldagem ser desligada

3.2.1.2. Soldagem de topo por centelhamento:

Na soldagem de topo por centelhamento (*Flash Butt Welding, FW*) as faces das peças a serem soldadas são trazidos juntos pela primeira vez sem entrarem em contato, conforme mostrado no detalhe da figura 3.10 (MARQUES, 2006).

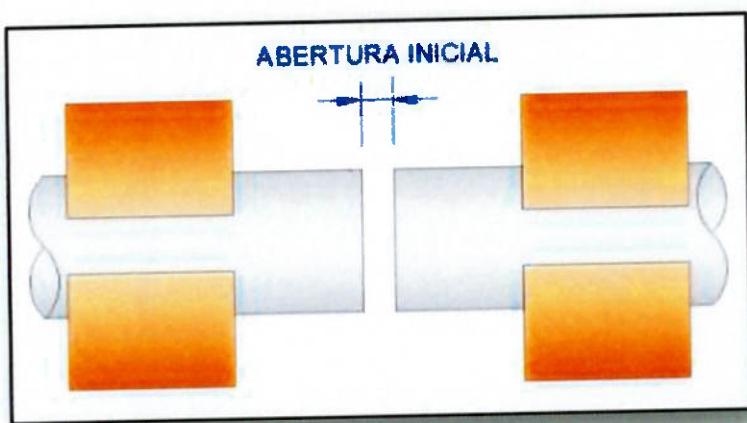


Figura 3.10 - Soldagem de topo por centelhamento: Posicionamento inicial das peças. Adaptado de (MARQUES, 2006).

Nesse ponto, é ligado a corrente elétrica e as peças são afastadas formando um arco elétrico ou centelhamento em alguns pontos de contato. Pela ação do centelhamento, ocorre a vaporização dos pontos de contato, permitindo dessa forma que novos pontos entrem em contato e o centelhamento se espalhe por toda a superfície da junta, conforme apresentado na figura 3.11 (MARQUES, 2006).

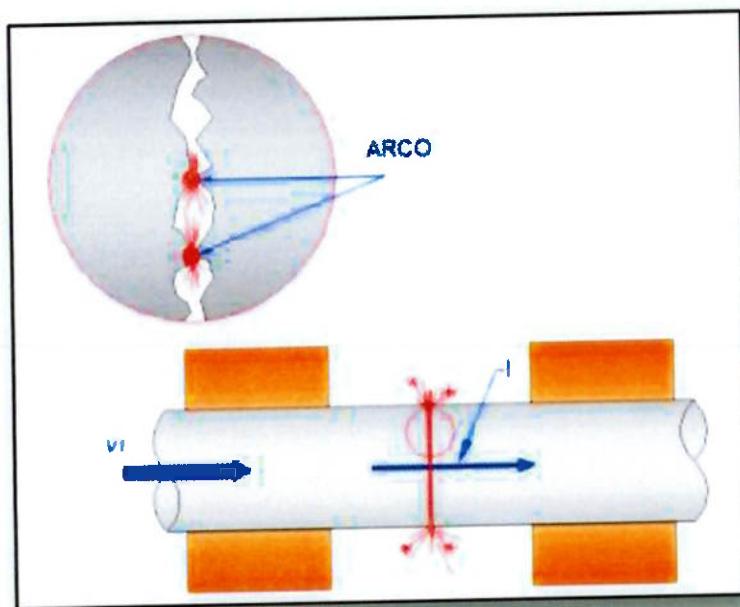


Figura 3.11 - Após a energia elétrica ser ligada, as peças são aproximadas com uma velocidade $V1$ ocorrendo o centelhamento. Adaptado de (MARQUES, 2006).

O procedimento é repetido até que atinja a temperatura ideal de forjamento, quando então é desligado a corrente elétrica e aplicada à força necessária de forjamento para completar a soldagem, a figura 3.12 detalha o fenômeno. (MARQUES, 2006)

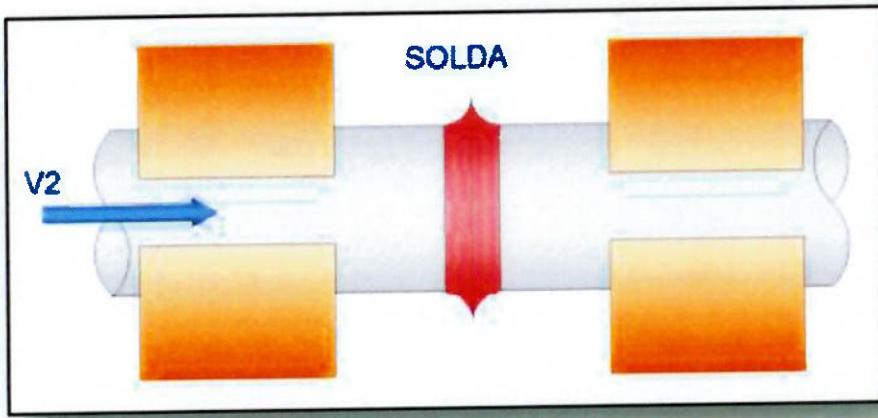


Figura 3.12 - Após a corrente elétrica ser desligada, as peças são pressionadas com uma velocidade V_2 . Adaptado de (MARQUES, 2006).

A soldagem de topo por centelhamento se assemelha ao processo de soldagem de topo por resistência pura (UW), porém a ação do centelhamento garante aquecimento mais uniforme da junta, mesmo com uma preparação de superfície não tão adequada. Pode ser utilizada em peças de maior dimensão e com desenho de face mais irregular. O processo por ser mais complexo utiliza equipamentos mais caros e complicados (MARQUES, 2006).

3.2.2. Soldagem por costura:

Soldagem por costura (*Resistance Seam Welding, RESW*) consiste na realização de uma série de sobreposição de pontos de solda por meio de dois eletrodos circulares ou um circular e uma barra, sem abertura dos eletrodos, ou seja, de maneira contínua, por sobreposição parcial dos diversos pontos. Utilizada principalmente para a produção de juntas contínuas, impermeáveis a gases e líquidos como tanques de gases, tanques de combustíveis, extintores de incêndios, etc. A Figura 3.13 mostra a disposição esquemática do circuito secundário, quando dois eletrodos rotativos são utilizados. Nota-se que o

princípio envolvido é exatamente o mesmo utilizado para a soldagem por pontos, com exceção da substituição de eletrodos convencionais por eletrodos circulares de soldagem (VECCHIO, 1956).

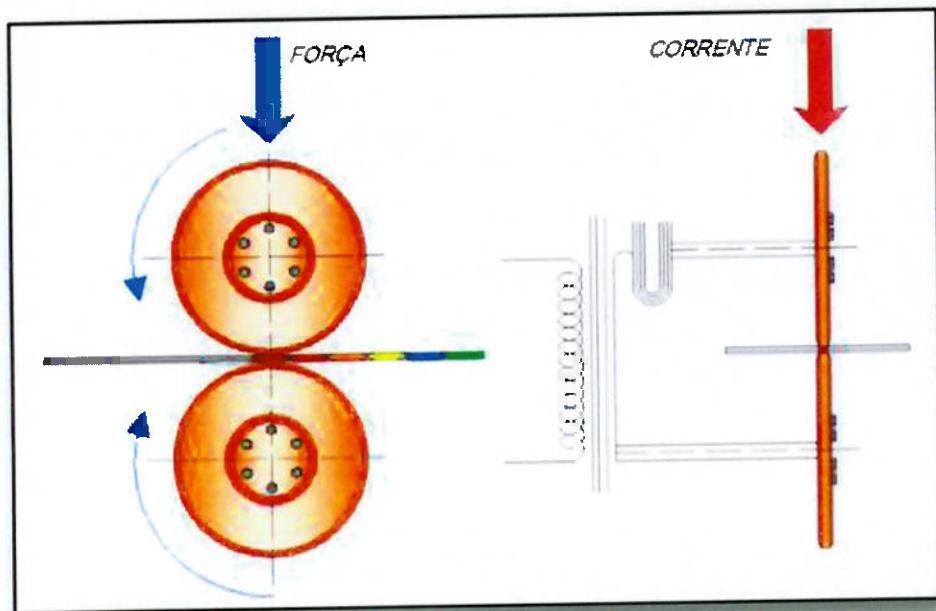


Figura 3.13 - Esquema de circuito utilizado por dois discos rotativos utilizados na soldagem por costura. Adaptado de (VECCHIO, 1956).

A costura em si consiste em uma série de pontos sobrepostos, onde o calor causado pela resistência à passagem de uma corrente elétrica na peça é combinado com pressão para produzir a costura (SENAI, 2013). Costura essa que é formada por uma série de pontos sobrepostos ou muito próximos uns dos outros por intermédio de eletrodos em forma de discos que se deslocam ao longo da junta por uma dada velocidade, e uma aplicação de uma sequência de pulsos enquanto os eletrodos se movem, obtendo uma sequência de pulsos que se sobrepõem formando a solda por costura, como mostrado na figura 3.14 (VECCHIO, 1956).



Figura 3.14 - Macrografia de solda por costura com excelente qualidade (VECCHIO, 1956).

3.2.3. Soldagem por projeção:

A soldagem por projeção (Resistance Projection Welding, *RPW*) é uma variação da soldagem por pontos onde são levantadas projeções em uma ou ambas as partes a serem unidas concentrando maior energia de soldagem. Técnica essa que permite pontos de soldas com menor espaçamento em materiais mais espessos (BRANCO). Antes de serem soldadas por projeção, as peças precisam ser estampadas, forjadas ou sofrer outro meio de conformação, de modo que possam adquirir as formas das projeções produzidas (SENAI, 2013). A soldagem por projeção é comumente usada para anexar pontos de conexão, como parafusos e porcas para fixação de chapas metálicas, especialmente na indústria automobilística, como mostrado na figura 3.15 (VECCHIO, 1956).

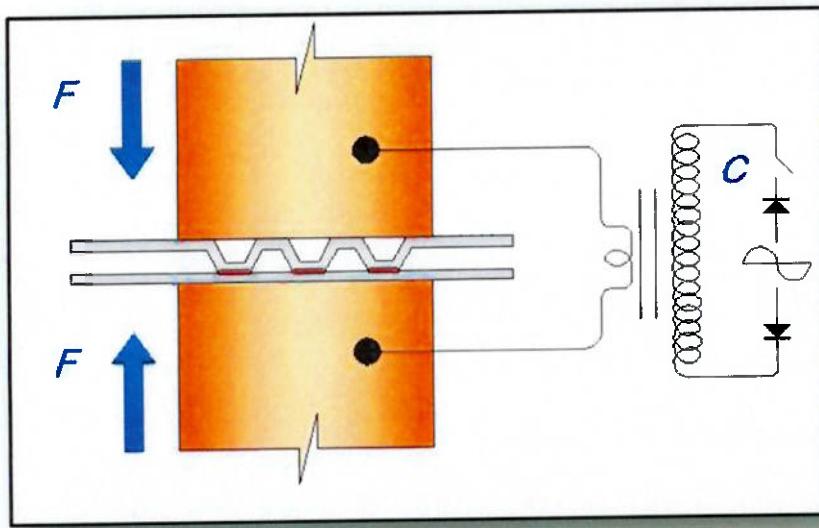


Figura 3.15 - Esquema do processo de soldagem por projeção. Adaptado de (CEMSA, 2013).

Em geral, soldas feitas por projeção podem ser utilizadas em substituição à soldagem por pontos, a escolha de um método ou outro dependem de vários aspectos. Este tipo de soldagem permite executar várias soldas ao mesmo tempo, em um ciclo único. Como limitações do processo, no caso de múltiplas soldagens, é necessária a precisão do controle de altura e do alinhamento das peças a serem soldadas, a fim de igualar a pressão e a corrente de soldagem. O processo também é limitado pela espessura (INFOSOLDA, 2014).

3.2.4. Soldagem por pontos:

A soldagem por pontos (*Resistance Spot Welding, RSW*) é o método mais utilizado no processo se soldagem por resistência. Utilizado por unir chapas sobrepostas por meio de juntas de sobreposição. Soldagem por pontos produz soldas simples e especiais, como mostrado na figura 3.16 (VECCHIO, 1956).

De maneira exemplificada, as peças são pressionadas entre eletrodos, onde corrente de alta intensidade proporciona calor necessário para atingir ponto de fusão. Todo o processo é proporcional ao tempo, resistência elétrica e intensidade da corrente elétrica. A soldagem por resistência por pontos é uma soldagem por pressão onde o metal está em estado líquido ou pastoso

(ALVARENGA, 1993). As peças sobrepostas a serem soldadas são pressionadas uma contra a outra por meio de eletrodos movimentados por forças: mecânica, pneumática, hidráulica ou uma combinação delas. Em seguida, um curto pulso de baixa tensão e alta corrente é fornecido e passa pelos eletrodos, não consumíveis, através do material base. A resistência deste material base à passagem da corrente ocasiona uma quantidade de calor nas superfícies de contato das peças proporcional ao tempo, resistência elétrica e intensidade de corrente a qual deverá ser suficiente para permitir que esta região atinja o ponto de fusão do material formando o ponto de solda (ASM INTERNATIONAL, 1983).

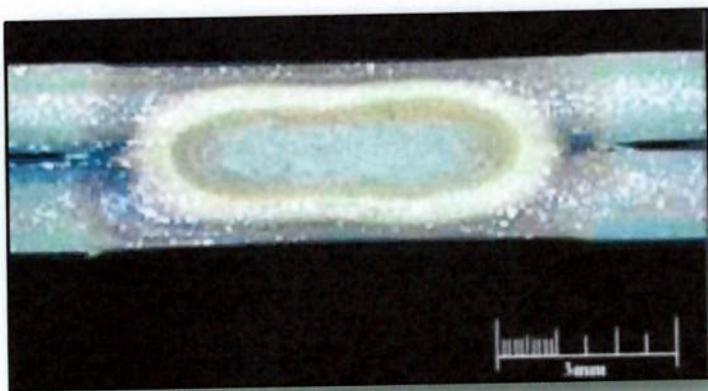


Figura 3.16 - Corte transversal de solda a ponto por resistência (RAUTARUUKKI CORPORATION, 2014).

Por ser adequado para união de chapas metálicas finas, tem grande emprego em diversas indústrias, principalmente na indústria automobilística onde possibilita grande produtividade, custo relativamente baixo, utilizado manualmente ou por robôs e atende os requisitos de qualidade. Largamente utilizada para soldagem de aço carbono comum, sua aplicação na soldagem de outros materiais tem gerado o desenvolvimento de pesquisas para melhoria dos processos. Num mercado extremamente competitivo, a procura por melhor qualidade e redução de custos é imperativa. No que se refere à soldagem por pontos, exige-se um melhor conhecimento do mecanismo de formação da lentilha de solda e determinação da influência dos diversos parâmetros do processo de soldagem na sua geometria (MOLENDI, et al.).

3.3. Detalhamento do processo de soldagem por pontos:

Analizando a finalidade de um equipamento de soldagem por pontos, que é realizar o ponto de solda, verifica-se que a energia térmica necessária para a fusão do metal depende de diversos fatores como volume previsto do ponto de solda, peso e calor específico do metal a ser soldado. Que pode ser apresentado de uma forma simplificada na fórmula, como mostrado na figura 3.17. Como a energia calorífica deve ser fornecida pela corrente elétrica, aplica-se ainda a lei de Joule.

$Q = V \times y(C_m(t_2 - t_1)) + C$	
V	Volume do ponto de solda
Y	Peso específico do material
C_m	Calor específico do material
t₂	Temperatura de fusão do material
t₁	Temperatura das peças a soldar
C	Calor latente

Figura 3.17 - Fórmula da energia térmica. Adaptado de (ALVARENGA, 1993).

Quando as peças são unidas pela força de fechamento dos eletrodos, a resistência total é a soma de sete resistências, como mostrado na figura 3.18 (SENAI, 2013). A resistência ôhmica da área a soldar depende do material, seu estado de superfície e o esforço de fechamento entre os eletrodos durante o processo de soldagem (ALVARENGA, 1993).

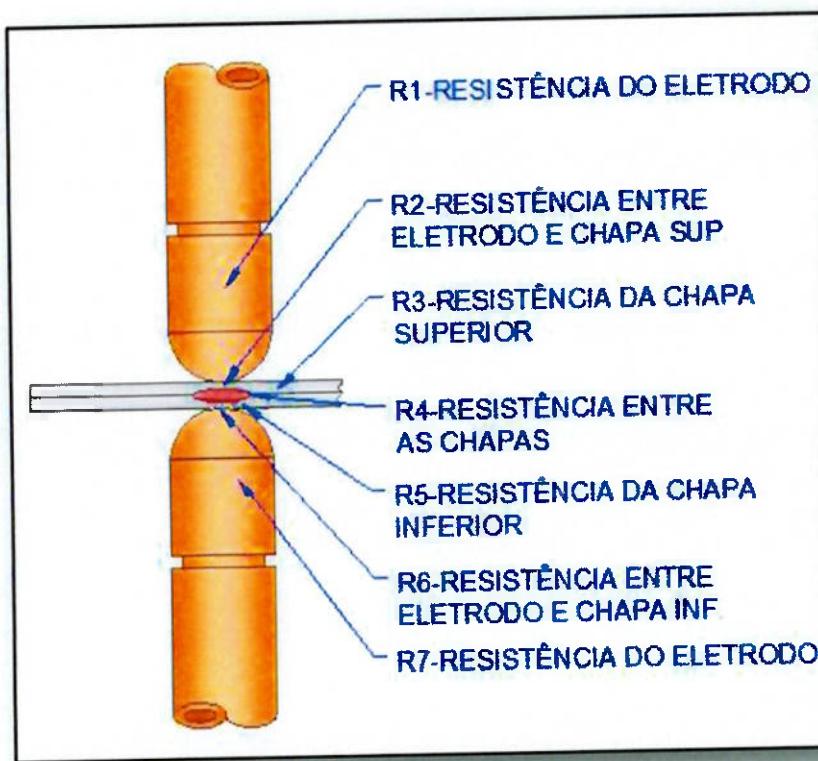


Figura 3.18 - Resistência elétrica em chapas sobrepostas durante a soldagem.
Adaptado de (ALVARENGA, 1993).

A resistência elétrica total em chapas sobrepostas pode ser atribuída por contribuições da resistência de contato entre eletrodo e chapa (R2 e R6 da figura 3.16), da interface de contato entre as faces das chapas (R4) e a resistência das chapas (R3 e R5) (ALVARENGA, 1993). O calor que é gerado em várias regiões, não somente nas interfaces do eletrodo com a peça, mas também entre as peças, é proporcional ao quadrado da intensidade de corrente de soldagem e diretamente proporcional à resistência e ao tempo. Parte do calor gerado é aproveitada para fundir a peça e uma pequena parte é perdida, na forma de condução térmica, radiação, etc. O calor estará bem distribuído ao iniciar a penetração ou fusão, que teoricamente será igual nas duas peças. Há um equilíbrio no calor gerado devido à utilização de peças de espessuras iguais, porém em muitas aplicações onde se usa espessuras de chapas diferentes, existências de impurezas nas superfícies de contato entre o eletrodo e a peça, em casos de juntas com mais de duas chapas, esse equilíbrio não é

possível (SENAI, 2013). Na figura 3.19, é demonstrado distribuição de calor na junta.

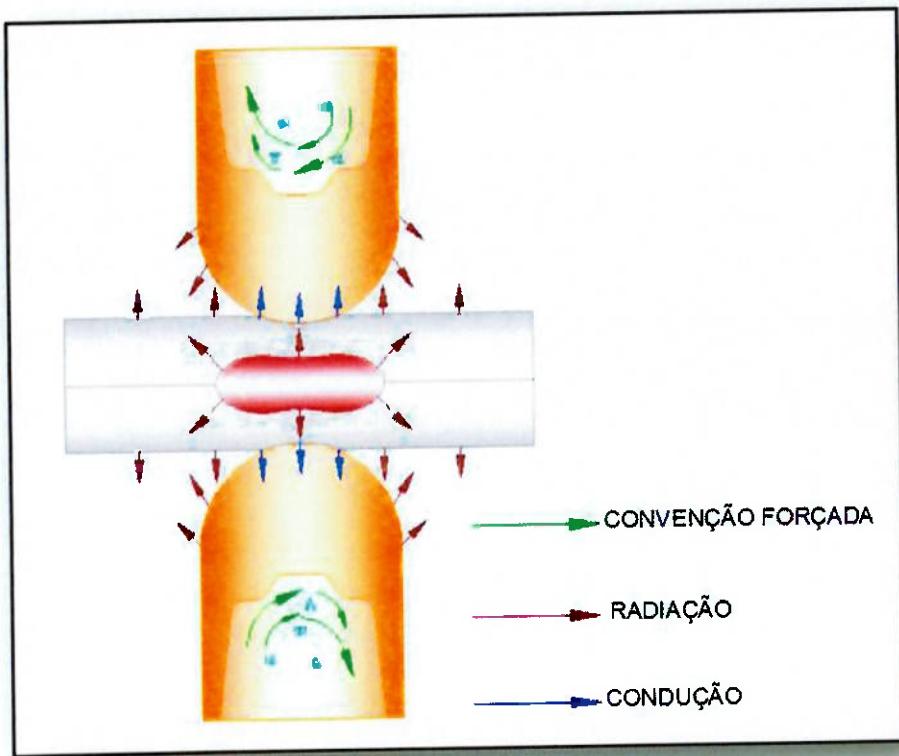


Figura 3.19 - Distribuição de calor em uma junta soldada. Adaptado de (HIRSCH, et al.).

3.3.1. Condições de soldagem e soldabilidade:

O termo condições de soldagem é a definição particular de um método de soldagem, como definido pelos controles apropriados de uma máquina de soldagem e também do formato e dimensões dos eletrodos, necessário para garantir soldas com tamanho desejado e qualidade assegurada. As condições de soldagem dependem das propriedades físicas do metal a ser soldado, do tipo do equipamento de soldagem e na maioria das vezes, do desenho e características particulares das peças a serem soldadas (CHULOSHNIKOV, 1978).

As principais variáveis da soldagem por resistência são a intensidade e tempo de fluxo da corrente de soldagem e pressão de soldagem (força do eletrodo). A intensidade de corrente de soldagem é expressa em amperes (A)

ou quilo amperes (kA), o tempo do fluxo de corrente em segundos (s) e a pressão de trabalho em quilograma-força (kgf) (GIECK).

Basicamente, o processo é resumido em eletrodos que pressionam as chapas, através de acionamento pneumático, hidráulico ou eletromecânico, que possibilita a passagem de corrente elétrica por um curto espaço de tempo, suficiente para fundir as chapas e formar o ponto. Após a interrupção da corrente, os eletrodos continuam a pressionar as chapas até que o metal se solidifique, para então serem retraídos (MACHADO, 1996).

A qualidade das juntas soldadas é determinada geralmente com base nos seguintes requisitos:

- Os metais a serem soldados e a zona de transição devem possuir estrutura uniforme, densa e livre de descontinuidades perceptíveis;
- O metal na junta soldada não deve perder resistência mecânica ou formar estruturas frágeis, especialmente na zona de transição;
- O metal a ser soldado não deve perder resistência à corrosão;
- As deformações das partes soldadas devem estar dentro dos limites permitidos.

Se todos os requisitos forem satisfeitos, com equipamento simples e através de uma vasta gama de variáveis e configurações de soldagem, o metal é considerado possuir boa soldabilidade. Se uma junta soldada puder ser realizada com uma faixa muito estreita de variável de soldagem ou possuir uma resistência muito baixa, é considerado ter baixa soldabilidade. Assim, soldabilidade descreve um metal qualitativamente. No entanto soldabilidade não é uma propriedade permanente de um metal. Como equipamentos de soldagem e técnicas são melhorados, a soldabilidade dos metais é melhorada também. Soldabilidade é afetada por muitas propriedades de um metal: condutividade elétrica e térmica, resistência a altas temperaturas, o ponto de fusão, coeficiente de expansão linear, dureza e sensibilidade às variações de temperatura durante o ciclo de soldagem (alterações nas propriedades devido ao aquecimento). Como a condutividade elétrica e térmica diminui, a corrente de soldagem é reduzida e menos energia elétrica é necessária para realizar a soldagem. Um metal com resistência a temperatura elevada, requer um maior corrente e força no eletrodo, a fim de completar a soldagem. Como se sabe, um metal com alta dureza necessita maior preaquecimento e mais força nos

eletrodos. Um metal que tem um alto coeficiente de expansão linear encolhe mais durante a cristalização, as tensões internas tão consideráveis podem, em conjunto, levar a explodir buracos e rachaduras na lentilha de solda (CHULOSHNIKOV, 1978).

A tabela 3.2 mostra o grau de soldabilidade entre diferentes combinações de metais e suas ligas, utilizados na soldagem por pontos.

Tabela 3.2 - Soldabilidade entre metais e suas ligas. Adaptado de (ASM INTERNATIONAL, 1983).

METAIS	ALUMÍNIO	AÇO INOX	LATÃO	COBRE	AÇO GALVANIZADO	CHAPAS DE AÇO	CHAPAS CHUMBADAS	METAL MONEL	NIQUEL	NIQUEL CROMO	CHAPA ESTANHADA	ZINCO	BRONZE FÓSFORO	NIQUEL PRATA	PRATEADO
ALUMÍNIO	B	E	D	E	C	D	E	D	D	D	C	C	C	F	C
AÇO INOX	F	A	E	E	B	A	F	C	C	C	B	F	D	D	B
LATÃO	D	E	C	D	D	D	F	C	C	C	D	E	C	C	D
COBRE	E	E	D	F	E	E	E	D	D	D	E	E	C	C	E
AÇO GALVANIZADO	C	B	D	E	B	B	D	C	C	C	B	C	D	E	B
CHAPAS DE AÇO	D	A	D	E	B	A	E	C	C	C	B	F	C	D	A
CHAPAS CHUMBADAS	E	F	F	E	D	E	C	E	E	E	-	C	E	E	D
METAL MONEL	D	C	C	D	C	C	E	A	B	B	C	F	C	B	C
NIQUEL	D	C	C	D	C	C	E	B	A	B	C	F	C	B	C
NIQUEL CROMO	D	C	C	D	C	C	E	B	B	A	C	F	D	B	C
CHAPA ESTANHADA	C	B	D	E	B	B	C	C	C	C	C	C	D	D	C
ZINCO	C	E	E	E	C	F	E	F	F	F	C	C	D	F	C
BRONZE FÓSFORO	C	D	C	C	D	C	E	C	C	D	D	D	B	B	D
NIQUEL PRATA	F	E	C	C	E	D	E	B	B	B	D	F	B	A	D
PRATEADO	C	B	D	E	B	A	D	C	C	C	C	C	D	D	B

A. excelente; B. bom; C. fraco; D. muito fraco; E. impraticável.

3.3.2. Energia para a fusão:

Energia para a fusão e formação do ponto de solda, é gerada nos contatos elétricos, entre eletrodos e peças, sendo essa energia obtida segundo a equação da lei de Joule, detalhado na figura 3.20 (ZHANG, et al., 20012).

$Q = \frac{r}{J} \int_0^t I^2 \cdot R dt$	
<i>r</i>	Rendimento térmico (perdas por radiação e condução)
<i>J</i>	Constante (4,185 J)
<i>I</i>	Corrente de soldagem, ou corrente do secundário – I_s (A)
<i>t</i>	Tempo que a corrente circula (s)
<i>R</i>	$R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7$ (Ω)

Figura 3.20 - Equação da lei de Joule. Adaptado de (ALVARENGA, 1993).

Como mostrado na figura 3.21(a), R_1 e R_7 são as resistências naturais dos dois eletrodos; R_2 e R_6 são as resistências entre os eletrodos e as peças; R_3 e R_5 , as resistências das chapas e R_4 as resistências na interface entre as peças, ou resistência de contato. A resistência R_4 é diretamente proporcional à raiz quadrada da razão entre as durezas das peças nas temperaturas de trabalho e de ambiente. Para que ocorra a soldagem, a região da interface entre as peças é a primeira a atingir a temperatura de fusão dos metais de base, como representado na figura 3.21(b) (RAUTARUUKKI CORPORATION, 2014). Parte do calor gerado é perdida entre eletrodos, ambiente e na própria peça a ser soldada. Essas perdas são máximas no início da operação, sendo a somatória das mesmas, diretamente proporcional à raiz quadrada do tempo de soldagem. Conclui-se que quanto menor o tempo de soldagem maior será o rendimento térmico (MACHADO, 1996).

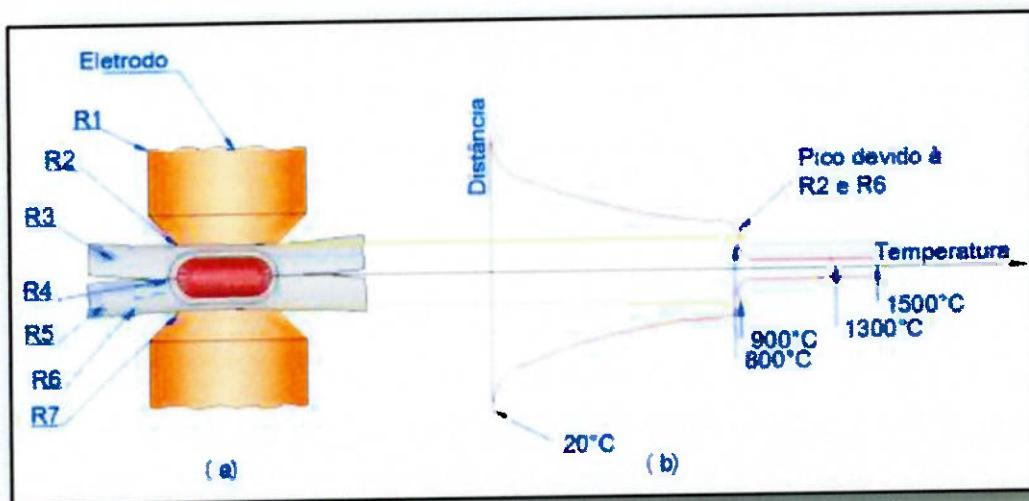


Figura 3.21 - (a) Resistências envolvidas na soldagem por pontos; (b) Distribuição da temperatura em torno do ponto. Adaptado de (VECCHIO, 1956).

3.3.3. Densidade da corrente:

Mesmo com o maior e melhor rendimento térmico ocorrer em curtos períodos de tempo, existe limites para a densidade de corrente, limites estes que dependem da intensidade da corrente e da espessura e tipo de metal utilizado no processo, ou seja, se a intensidade da corrente for insuficiente, não ocorrerá à fusão do metal, mesmo com tempo elevado. Sendo a corrente excessiva, o eletrodo atingirá temperaturas elevadas e penetrará na peça, pois parte ou toda a espessura do metal estará na fase plástica. Então, para uma determinada força de fechamento entre os eletrodos, tem-se uma corrente máxima. Acima deste limite, o metal é expulso provocando soldas com defeito. Para a soldagem ocorrer no menor tempo possível e produzir pontos de qualidade, sejam estes de bom aspecto visual e com propriedades mecânicas garantidas, a densidade de corrente máxima (D) deve ser determinada, que é exatamente anterior a aquela que provoca a expulsão (MACHADO, 1996). Três pontos importantes devem ser considerados para atingir a densidade de corrente máxima:

- A máquina de soldagem deve poder fornecer um fluxo de corrente elétrica suficientemente elevada.

- A máquina de soldagem deve poder fornecer força entre os eletrodos suficientemente grande, garantindo assim resistência de contato mais baixa dentro do possível e resistência ôhmica de um ponto de soldagem ao outro constante o suficiente para uma uniformidade nos mesmos.
- O comando elétrico dever ser capaz de dosar a energia, ou seja, o produto dos fatores: $I^2 \cdot t$ (ALVARENGA, 1993).

3.3.4. Força dos eletrodos e resistência elétrica:

O resultado da força que é exercida pelos eletrodos sobre as peças é uma pressão que altera a resistência de contato e a circulação da corrente na interface das peças. Os metais apresentando irregularidades superficiais e rugosidade particular, o aumento elevado de pressão proporciona contato entre tais superfícies, diminuindo a resistência elétrica e elevando a circulação de corrente nessa interface (MACHADO, 1996).

A resistência de contato diminui com a pressão aplicada, sendo suscetível ao acabamento superficial da peça. A figura 3.22 demonstra de maneira clara essa relação, para soldagem por pontos em uma chapa de aço inoxidável austenítico, onde a superfície sofreu: (a) Jateamento abrasivo (areia); (b) Jateamento de granulha metálica. Como consequência, a energia gerada para a mesma corrente diminui. Neste caso, a pressão deve ser determinada em conjunto com a corrente (MACHADO, 1996).

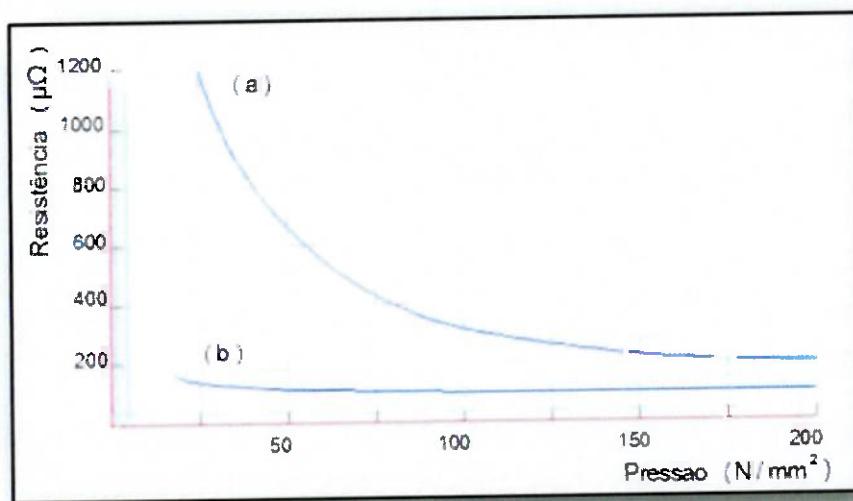


Figura 3.22 - Influencia da pressão e acabamento superficial sobre a resistência de contato na soldagem por pontos. Adaptado de (MACHADO, 1996).

A pressão de trabalho também varia com o tipo de material e sua espessura. Na figura 3.23 é verificada a pressão existente na soldagem por pontos para aço baixo carbono (MACHADO, 1996).

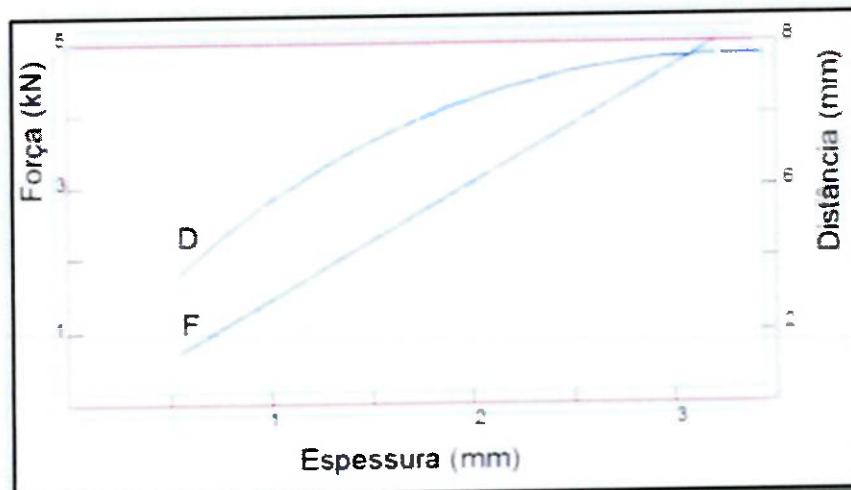


Figura 3.23 - Relação entre força (F), diâmetro do eletrodo (D) e espessura da peça na soldagem por pontos. Adaptado de (MACHADO, 1996).

3.3.5. Fluxo de corrente:

A corrente de soldagem aquece a área de soldagem até a temperatura de fusão dos materiais comprimidos pelos eletrodos. Quanto maior a corrente utilizada, maior será a área aquecida e maior será ponto de solda. A correta corrente de soldagem está compreendida entre os limites de aceitação e limites de respingos ou expulsão de metal fundido (VECCHIO, 1956).

O limite de aceitação está diretamente ligado ao diâmetro mínimo dos pontos. Se a corrente ficar aquém do limite de aceitação da qualidade, não será alcançado o diâmetro mínimo que é aproximadamente cinco vezes a raiz quadrada da espessura da chapa mais fina (MACHADO, 1996).

O limite de expulsão representa o limite superior para a corrente utilizada. A corrente acima desse limite resultará em expulsão acima do normal durante a sua execução.

A corrente de soldagem dentre os demais parâmetros utilizados no processo, tende a ser a mais crítica, quando é levado em consideração que a mesma atua elevada ao quadrado no processo (tabela 3.5) (MACHADO, 1996). Flutuações na corrente, derivadas de oscilações de tensões de rede e alterações na impedância do circuito quando utilizado tensões de corrente alternada, pode diminuir a qualidade e causar uma descontinuidade na junta. Correntes e tempos utilizados em soldagem por pontos de chapa de aço ao carbono, são demonstrados na figura 3.24 (MACHADO, 1996).

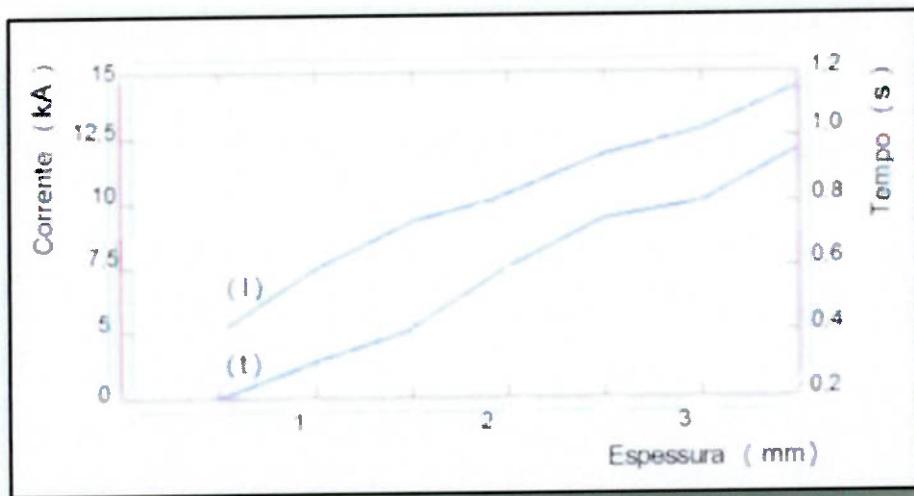


Figura 3.24 - Corrente (I) e tempo (t) de soldagem para diferentes espessuras de chapas de aço ao carbono. Adaptado de (MACHADO, 1996).

No geral, é a penetração ou profundidade em que o ponto se estende nas peças o principal responsável pela resistência da junta soldada. Vinte por cento da espessura é o mínimo aceitável (MACHADO, 1996).

A expulsão é um importante fenômeno que pode ser observado frequentemente durante o processo de soldagem por resistência. É uma projeção de metal fundido durante a formação do ponto de solda. Ela envolve perda de metal do ponto de solda líquido, o qual frequentemente resulta em redução das forças de soldagem. A probabilidade de expulsão de material não é somente função da corrente de soldagem, mas também do tempo e pressão. Uma prática comum, para determinar as tabelas de soldagem é encontrar o limite da corrente de expulsão de material, fixando os valores de pressão e tempo de soldagem. Os níveis de corrente de expulsão são definidos com os níveis de corrente identificados através de procedimentos de ajuste de correntes e estabilidade de níveis de corrente de expulsão. O exemplo de curva de soldabilidade na figura 3.25 mostra a relação entre a qualidade do ponto de solda e os parâmetros de soldagem, tempo, corrente e pressão. Neste caso a pressão é mantida fixa e varia-se a corrente e o tempo de soldagem.

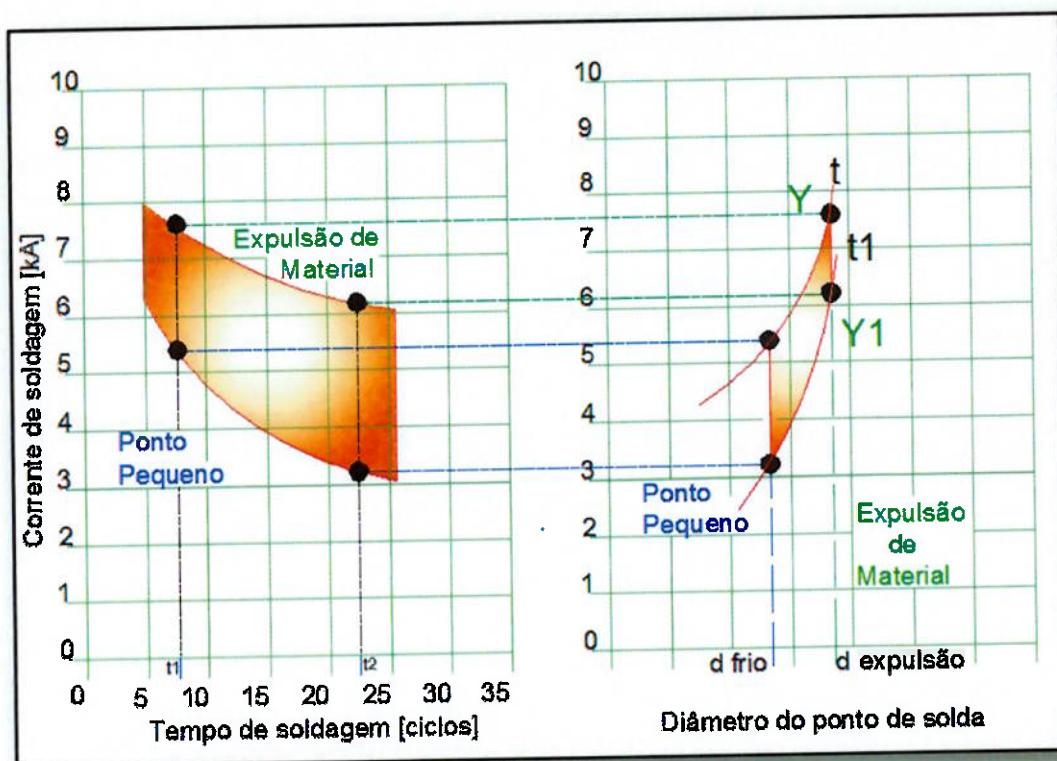


Figura 3.25 - Gráfico de soldabilidade (*lobe curve*). Adaptado de (RUIZ, 2005).

Para uma dada força de eletrodo, há um limite superior de densidade de corrente sobre o qual indentações e expulsão de material ocorrem nas superfícies de uma ou mais chapas, dando origem a soldas de baixa qualidade. A resistência máxima das soldas é obtida pela soldagem em densidade de corrente logo abaixo do valor no qual ocorre expulsão (INTERMACHINERY, 2003, VOGLER, 2003). À medida que a densidade de corrente aumenta, o tempo de soldagem deve ser diminuído suficientemente para produzir uma solda sem que haja aquecimento das superfícies de contato dos eletrodos.

A faixa aceitável de corrente de soldagem, ou seja, à distância entre as duas curvas é usualmente uma medida de soldabilidade dos aços. Dessa forma, quanto maior a distância entre as duas curvas, ou seja, quanto maior a faixa de corrente de soldagem, maior será a soldabilidade do material. A parte superior da Figura 25 ilustra esquematicamente o diâmetro do ponto de solda versus corrente de soldagem num determinado tempo de soldagem. À medida que a corrente de soldagem aumenta o diâmetro do ponto de solda também aumenta,

até e na maioria dos casos, além do nível da corrente de soldagem responsável pela expulsão de material. As especificações geralmente estabelecem um diâmetro mínimo aceitável para a formação do ponto de solda, como ilustrado na parte superior da figura 3.25 e indicam que pontos de solda produzidos com expulsão são inaceitáveis, independentemente do seu diâmetro. A condutibilidade térmica do aço é de aproximadamente 12% da condutibilidade térmica do cobre, portanto, se uma corrente de soldagem suficiente for usada na soldagem de aço com eletrodos à base de cobre, o calor gerado ao longo da interface entre as chapas será conduzido para longe da zona de solda mais lentamente do que o calor gerado nas pontas dos eletrodos é conduzido para sua direção longitudinal. Assim, a interface entre as chapas atinge primeiramente a temperatura de fusão e uma solda é produzida nesta interface.

3.3.6. A grandeza tempo na soldagem.

Soldagem por pontos depende da resistência do metal base e quantidade de fluxo de corrente para gerar calor para produzir o ponto de solda. O fator tempo é responsável para controlar os milhares de amperes que são necessários para a execução de uma solda. Tais valores que atravessam uma resistência elevada irá gerar muito calor em um curto espaço de tempo. O controle do fluxo de corrente é essencial (MILLER WELDS). O tempo da energia de soldagem determina o calor total, desde que resistência, corrente e pressão permaneçam constantes (MACHADO, 1996). O processo de soldagem por pontos tem diferentes etapas e o tempo de cada uma tem que ser rigorosamente controlada, mesmo que dure uma fração de segundos. O tempo utilizado é medido em ciclos ou milissegundos (SENAI, 2013). Condições de soldagem variam de processo para processo. Considerando as variáveis utilizando como referência seu diagrama de tempo. Como diz o nome, diagrama de tempo mostra as principais variações de um processo de soldagem num determinado período ou tempo (CHULOSHNIKOV, 1978).

3.3.7. Ciclo de soldagem:

Além do tempo de soldagem, existem outros elementos de tempo numa sequência completa de soldagem, das quais a necessidade de controle também são muito importantes para a solda a ponto por resistência ser realizada, esses elementos, como representado na figura 3.26, são classificados da seguinte maneira em um ciclo completo (BAM SOLDAS):

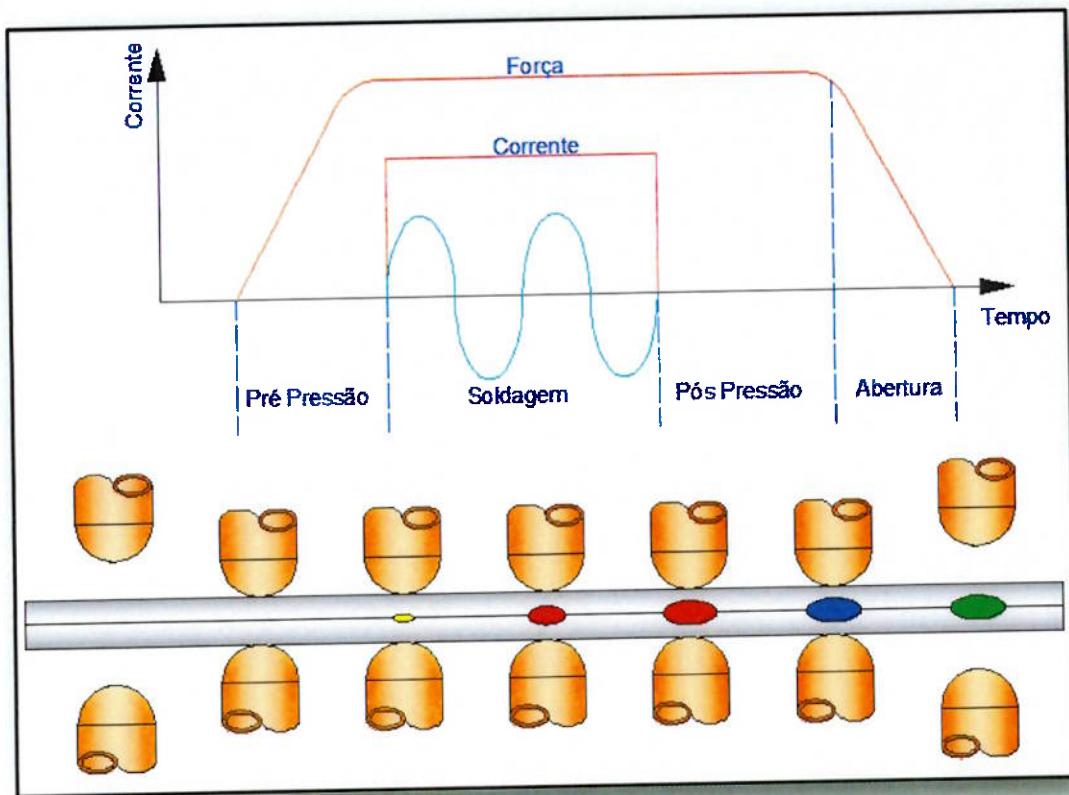


Figura 3.26 - Sequência do Ciclo de Soldagem. Adaptado de (RAUTARUUKKI CORPORATION, 2014).

3.3.7.1. Pré-pressão:

Tempo em que os eletrodos ficam pressionando as chapas a serem soldadas, compreendido entre o início da operação e início da passagem da corrente elétrica (ALVARENGA, 1993). Esse tempo é necessário para haja compressão adequado para perfeito assentamento entre as chapas a serem soldadas (MACHADO, 1996).

3.3.7.2. Tempo de soldagem:

Tempo em que há a passagem da corrente elétrica através das chapas a serem soldadas. É nesse intervalo em que a corrente circula e ocorre a fusão, formando o ponto (ALVARENGA, 1993).

3.3.7.3. Pós-pressão:

Também chamado de tempo de resfriamento ou manutenção, onde as chapas soldadas continuam sendo pressionadas após a corrente ser interrompida até a completa solidificação do metal do ponto (MACHADO, 1996).

3.3.7.4. Tempo de pausa:

Tempo de abertura dos eletrodos, onde o sistema eletromecânico ou pneumático realiza o recuo dos braços ou hastes. Quando o equipamento é programado para trabalho em série, o ciclo se repetirá enquanto o comando “start” estiver acionado (MACHADO, 1996).

3.3.8. Equipamento de soldagem por pontos:

As duas principais funções de uma máquina de soldagem por pontos são pressionar e aquecer as chapas que estão sendo soldadas. Podem ser móveis ou fixas, terem acionamento eletropneumático, mecânico, hidráulico ou elétrico, terem transformador de tensão e corrente acoplado à pinça ou suspenso interligado por cabos e a corrente de operação ser CA ou CC (VECCHIO, 1956).

A construção típica de uma máquina de soldagem por pontos consiste em um cilindro pneumático fixado a uma estrutura normalmente confeccionada em alumínio (para alívio de peso, quando manuais ou pinças utilizadas em manipuladores robóticos), acoplado em uma haste ou braço. Na outra extremidade da haste ou braço é fixado o porta eletrodo com o respectivo eletrodo. O eletrodo oposto é suportado por um braço ou suporte fixo (ou móvel

também), porém eletricamente isolado (BAM SOLDAS). Em um punho de manipulação estão fixados os comandos start que inicia o ciclo de soldagem, o comando de retração que abre ou fecha os braços para maior abertura dos braços, necessário para permitir a passagem por obstruções, tais como componentes de dispositivos ou partes de uma carroceria, de modo a ter acesso à área que irá receber a soldagem e o comando de seleção dos diferentes programas estabelecidos para soldagem com espessuras diferentes inerentes ao processo (BAM SOLDAS).

Quando a máquina de soldagem é manual, encontrada em grande escala na indústria automobilística, a mesma é suspensa por balancins mecânicos com sistemas de molas ou balancins pneumáticos que aliviam o peso do equipamento, adequando naturalmente à altura do operador, proporcionando mais conforto e qualidade à soldagem. O transformador de corrente elétrica também é suspenso e fixado a trilhos por roldanas para facilitar a aproximação da pinça na região correta de soldagem, figura 3.27. Quando a máquina se soldagem é fixa, conhecida como estacionária, a peça a ser soldada é levada até ela manualmente ou por manipuladores robóticos, como mostrado na figura 3.28 (BAM SOLDAS).

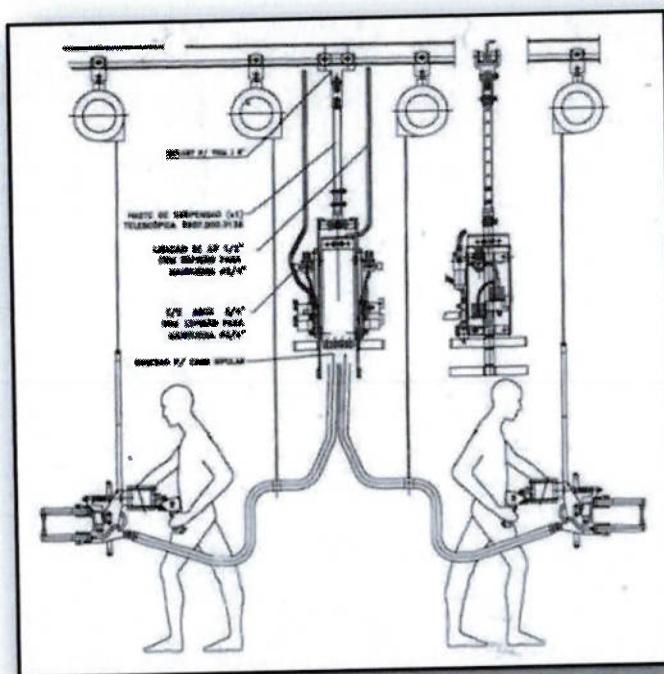


Figura 3.27 - Pinça manual de soldagem por pontos (BUCHER, 2006).

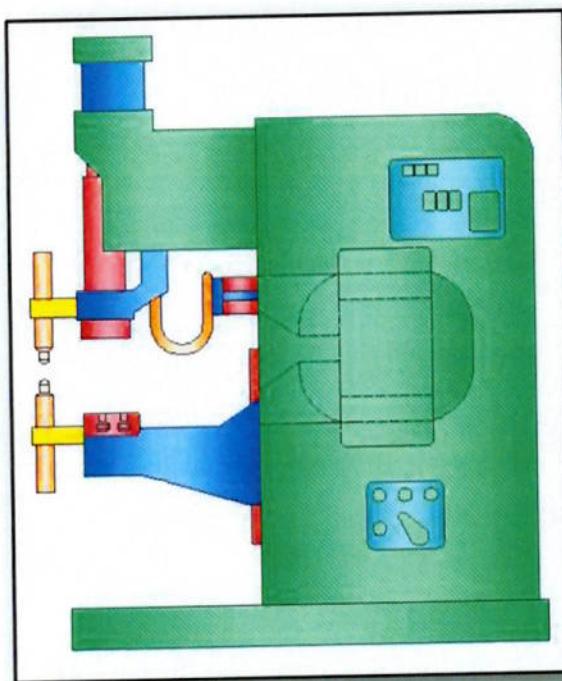


Figura 3.28 - Pinça Estacionária de Soldagem por Pontos. Adaptado de (RAUTARUUKKI CORPORATION, 2014).

3.3.9. Circuito elétrico:

Constituído na maioria das vezes por equipamento de energia direta, que empregam alta corrente e baixa tensão, transformadas da baixa corrente (alternada) e alta tensão da rede. A escolha entre um equipamento monofásico ou trifásico dependerá de diversos fatores, como custos (equipamento; manutenção; operacional), capacidade de produção, fator de potência e equilíbrio entre as fases da rede (MACHADO, 1996).

3.3.9.1. Equipamento monofásico:

Equipamento de soldagem constituído de transformador que possui apenas uma espira na sua bobina primária. Devido ao baixo custo e manutenção reduzida, os transformadores de corrente alternada (CA) são os mais utilizados na indústria, porém possuem baixo fator de potência e alta demanda de energia elétrica, aproximadamente o dobro de um transformador trifásico

similar. Com controles adequados, podem alcançar desempenho semelhante aos trifásicos.

Para diminuir perdas devidas à impedância no circuito secundário, é empregada a corrente contínua (CC). Esse equipamento retifica em onda completa a corrente através de um diodo de silício. Comparado ao Transformador de corrente alternada (CA), possui menor demanda de potência, pois possui fator de potência de cerca de 90%, o triplo de vezes da outra. Sendo assim, mesmo que a resistência no circuito seja maior, a demanda de potência será pequena, permitindo uma redução nas dimensões do transformador (MACHADO, 1996).

3.3.9.2. Equipamento trifásico:

Os transformadores trifásicos podem ser de dois tipos: retificador e o conversor de frequência. O retificador é muito similar aos equipamentos monofásicos, porém com o transformador ligado aos diodos de silício. O transformador do conversor de frequência possui três espiras no primário, cada uma delas conectada a uma fase da rede, sendo que existem dois sistemas: (a) de meia onda, em que a corrente proveniente de cada fase, ou por dois ignitrons (nos modelos mais antigos), ou por um retificador controlado de silício; (b) e o de onda completa (MACHADO, 1996). As tabelas 3.3 e 3.4 apresentam características das fontes de potência para ambos os grupos e capacidade de soldagem, envolvendo o comprimento da haste (braço) (MACHADO, 1996).

Tabela 3.3 - Características das fontes de potência de corrente contínua (“SCR”) para soldagem por pontos, com alimentação monofásica de onda completa. Adaptado de (MACHADO, 1996).

Potência* (kVA)	Corrente no Secundário (RMS)-(A)	Força do Eletrodo (kN)	Comprimento dos Braços do Eletrodo (mm)	Capacidade-espessura do Material Min/Max (mm)		
				Aço ao Carbono	Alumínio	Aço Inoxidável
50	27000	4,5	750 a 1100	0,4/2,0	0,4/0,8	0,5/1,1
		5,7	750 a 990	0,4/2,4	0,4/0,8	0,5/1,3
		7,1	750	0,4/2,8	0,4/0,8	0,5/1,3
75	40000	10,1	750	0,5/3,6	0,5/1,6	0,6/0,2
		13,5	750 a 1200	0,5/4,7	0,5/1,6	0,6/2,8
		18,0	750 a 900	0,5/6,3	0,5/1,6	0,6/3,6
125	54000	13,5	750 a 1380	0,8/4,7	0,6/2,0	0,8/2,8
		22,5	750 a 1100	0,8/7,9	0,8/2,0	0,8/4,0
		34,2	750	0,8/9,5	0,8/2,0	0,8/5,6
250	80000	28,3	750 a 1380	1,0/8,7	0,8/3,2	1,0/5,6
		34,2	750 a 1380	1,0/9,5	0,8/3,2	1,0/6,3
		40,9	750 a 900	1,0/11,1	1,0/3,2	1,0/9,5

* 90% Fator de Potência.

Tabela 3.4 - Características das fontes de potência de corrente contínua (“SCR”) para soldagem por pontos, Com alimentação trifásica de meia onda. Adaptado de (MACHADO, 1996).

Potência* (kVA)	Corrente no Secundário (RMS)-(A)	Força do Eletrodo (kN)	Comprimento dos Braços do Eletrodo (mm)	Capacidade-espessura do Material Min/Max (mm)		
				Aço ao Carbono	Alumínio	Aço Inoxidável
75	32000	4,5	450 a 1100	0,4/2,0	0,4/1,0	0,5/1,1
		5,7	450 a 900	0,4/2,4	0,4/1,0	0,5/1,3
		10,1	450	0,4/3,2	0,4/1,0	0,5/1,8
150	64000	13,5	1100 a 1400	0,8/4,7	0,6/3,2	0,8/2,8
		22,5	450 a 1100	0,8/7,9	0,8/3,2	0,8/4,0
		34,2	450 a 750	0,8/9,5	0,8/3,2	0,8/5,6
250	96000	28,3	1100 a 1380	1,0/8,7	0,8/4,7	1,0/5,6
		34,2	900 a 1380	1,0/9,5	0,8/4,7	1,0/6,3
		40,9	600 a 900	1,0/11,1	1,0/4,7	1,0/9,5

* 85% Fator de Potência.

Considerando como exemplo um equipamento de soldagem por pontos de corrente alternada, ele é composto por circuito secundário, contator e sistema de controle.

Círculo secundário consiste em pinça de soldagem e condutores, que são:

- Eletrodos e porta eletrodos.
- Porta eletrodos.
- Braços ou hastas inferior e superior.
- Condutores (suportes).
- Condutores flexíveis (tranças).
- Cabos de potência.

De construção simples, os braços e suportes são confeccionados em barras ou chapas de cobre ou bronze, condutores flexíveis ou tranças são feitas a partir de folhas finas de cobre. O conjunto é interligado ao transformador por eletro condutor flexível refrigerado por água devido ao calor gerado pelas altas correntes de soldagem (MILLER WELDS).

O circuito primário abrange a linha de alimentação, o transformador de corrente, constituído por uma bobina primária e uma bobina secundária, que é também refrigerado por água. O controle do processo de soldagem é realizado pelo controlador, que controla o funcionamento mecânico da pinça, como abertura, fechamento e retração, inicia a corrente para o transformador e controla seu fluxo. Na figura 3.29, é mostrado um esquema elétrico de uma pinça de soldagem.

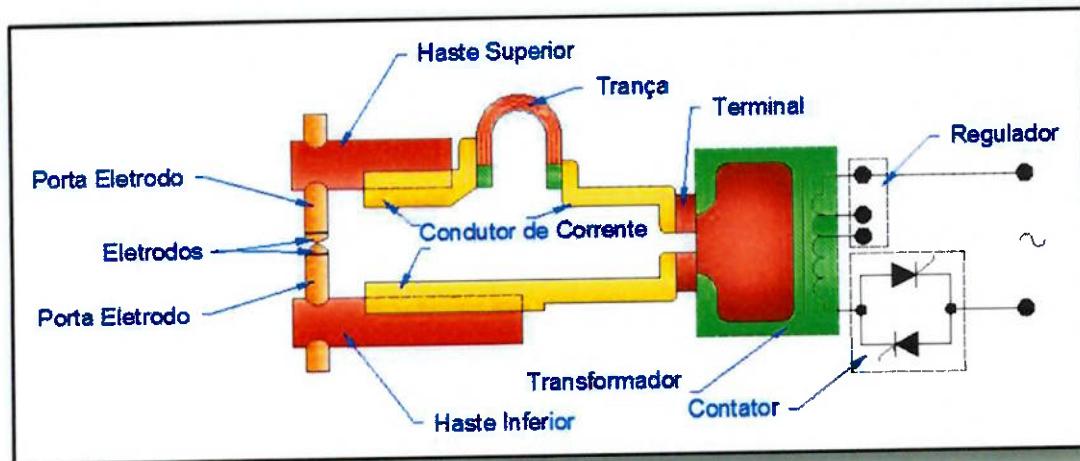


Figura 3.29 - Esquema elétrico de uma pinça. Alimentação, potência, controle e secundário. Adaptado de (CHULOSHNIKOV, 1978).

Normalmente, equipamentos de soldagem por pontos utilizam transformadores de corrente alternada (CA). Porém, é cada vez mais comum o uso de equipamentos com transformadores de corrente contínua (CC), devido a diversas vantagens já mencionadas (CHULOSHNIKOV, 1978).

3.3.9.3. Ciclo de trabalho:

A vida útil do equipamento está diretamente ligada ao seu ciclo de trabalho. O ciclo de trabalho expressa a porcentagem de tempo que a potência (em kVA) pode ser fornecida em um minuto de operação.

O fabricante geralmente indica potência máxima de trabalho do equipamento (baseado na característica do transformador) para um ciclo de 50% (ou 30 segundos em cada 1 minuto) (MACHADO, 1996).

O ciclo de trabalho pode ser calculado através da seguinte equação da figura 3.30.

$C \cdot P^2 = C_f \cdot P_f^2$	
C, C_f	Ciclos de trabalho a ser determinado e fornecido pelo fabricante, respectivamente em (%)
P, P_f	Potências que se deseja operar e fornecida pelo fabricante (relativa ao C_f), respectivamente (kVA).

Figura 3.30 - Equação de cálculo de potência para ciclo de trabalho. Adaptado de (MACHADO, 1996).

Onde: C, C_f = ciclos de trabalho a ser determinado e fornecido pelo fabricante, respectivamente em (%);

P, P_f = potências que se deseja operar e fornecida pelo fabricante (relativa ao C_f), respectivamente (kVA). Tomando como exemplo um transformador que possa operar com 75 kVA a 50% do ciclo de trabalho (Informação fornecida pelo fabricante do equipamento) e se deseja saber qual a potência disponível (máxima) em um novo ciclo de trabalho de 30%, usa-se a equação da tabela 3.7, então:

$$P = (C_f \cdot P_f^2 / C)^{1/2} \rightarrow P = (50 \cdot 75^2 / 30)^{1/2} \rightarrow 96,8 \text{ kVA}$$

3.3.9.4. Corrente de soldagem:

A corrente no secundário de um transformador, mesmo em um circuito monofásico simples, como mostrado na figura 3.31, é dada pela seguinte equação, mostrado na figura 3.32 (MACHADO, 1996).

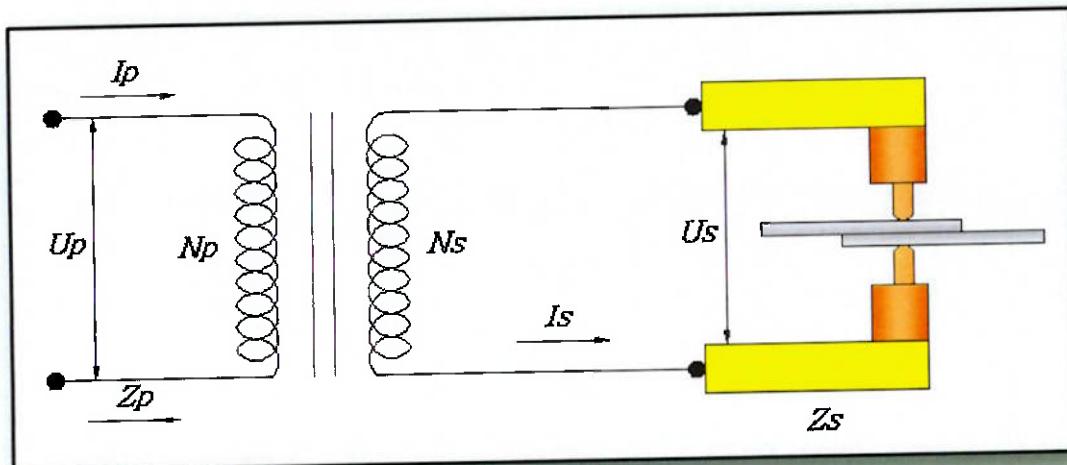


Figura 3.31 - Circuito elétrico (monofásico) esquemático para soldagem por resistência. Adaptado de (MACHADO, 1996).

$$I_s = I_p \cdot U_p / U_s \text{ (A)}$$

I_p, I_s Corrente no primário e secundário respectivamente.

U_p, U_s Tensões no primário e secundário respectivamente.

Figura 3.32 - Equação da corrente do secundário. Adaptado de (MACHADO, 1996).

3.3.10. Eletrodos para soldagem por pontos:

Os eletrodos de uma máquina de soldagem por pontos realizam vários trabalhos. Eles pressionam as peças, fazem circular corrente elétrica e conduzem calor resfriando o ponto (CHULOSHNIKOV, 1978). O formato e tamanho do eletrodo assim como o desenho da sua face tem relação direta

com a qualidade das soldas assim como a velocidade da soldagem. Dentre todos os componentes do equipamento, é o de maior importância. Como mostrado na figura 3.33, existem diversos formatos de eletrodos, que são projetados para diferentes espessuras, posição de soldagem e acesso.



Figura 3.33 - Diversos tipos de eletrodos utilizados na indústria (autoria própria).

Para tarefas tão severas, o material do eletrodo deve ter boa condutividade elétrica e térmica, tais características devem se diferenciar significativamente dos materiais soldados. Os materiais dos eletrodos não podem formar ligas com o material de origem, caso particular quando se solda chapas galvanizadas e o zinco tende a criar vínculo com o cobre. Por estas razões, o cobre não ligado não é um material de eletrodo apropriado. Os eletrodos devem aguentar a força de compressão durante a soldagem, devem então ser confeccionada com material de dureza elevada que suportem impactos sofridos na soldagem (RAUTARUUKKI CORPORATION, 2014).

Refrigeração adequada dos eletrodos deve ser assegurada na soldagem de chapas metálicas galvanizadas para assegurar forma e características de condutividade térmica e elétrica originais. A dificuldade de se manter o bom desempenho do eletrodo deve aos grandes gradientes de temperatura e forças de compressivas que estão sujeitos. Como consequência, alterações na

geometria das pontas do eletrodo são constantes, que leva ao desgaste e a alteração do seu formato (ZHANG, et al., 2006) (NAKAMURA, 2012).

A forma e a composição do eletrodo são determinadas de acordo com os materiais a serem soldados, podem ser de cobre – cromo, cobre-cromo/zircônio, cobre-cádmio e cobre-berilo. São tratados termicamente para atingirem características necessárias, como:

- Condutibilidade térmica e elétrica elevadas.
- Resistência mecânica elevada.
- Fraca tendência para formar ligas com o material a ser soldado.
- Resfriamento seguro das pontas dos eletrodos.
- Alto ponto de amolecimento, temperatura na qual um período de tempo determinado, o material perde grande parte da sua dureza (BRACARENCE).

A classificação dos materiais utilizados para a confecção de eletrodos é realizada pela RWMA, *Resistance Welder Manufacturers Association*, que os divide em classes, tabela 3.5. Os eletrodos mais utilizados são os das classes 1, 2, 3 e 20 por apresentarem as melhores combinações de condutibilidade térmica e elétrica e resistência ao desgaste (RWMA, 1989).

Tabela 3.5 - Classificação de eletrodos de soldagem por pontos. Adaptado de (RWMA, 1989).

GRUPO	CLASSE	DUREZA (HBR Min.)	CONDUTIVIDADE (%IACS Min.)	MATERIAL DO ELETRODO	MATERIAL A SER SOLDADO
A	CLASSE 1	70	80	COBRE-ZIRCÔNIO	
A	CLASSE 2	75	75	COBRE-CROMO	Ligas de Al, ligas de Mg, materiais revestidos (galvanizados), latão e bronze. Aços laminados a frio e a quente. Aços inoxidáveis, latão e bronze de baixa condutividade e soldagem de aços galvanizados.
A	CLASSE 3	90	45	COBRE-COBALTO-BERÍLIO-NIQUEL	Aços inoxidáveis, latão e bronze de baixa condutividade e soldagem de aços galvanizados.
A	CLASSE 4	33	20		Materiais de alta resistência como aços inoxidáveis, aços níquel cromo.
A	CLASSE 5	88	12		
B	CLASSE 10	72	45	COBRE-TUNGSTÊNIO	
B	CLASSE 11	94	40	COBRE-TUNGSTÊNIO	Material altamente condutor como ligas de Cu e Ag, eletro conformação, eletro forjamento. Materiais pouco condutores como os aços inoxidáveis, onde altas forças devem ser aplicadas.
B	CLASSE 12	98	35	COBRE-TUNGSTÊNIO	
B	CLASSE 13	69	30	TUNGSTÊNIO	
B	CLASSE 14	85	30	MOLIBDÊNIO	
C	CLASSE 20	75	75	MATERIAIS ESPECIAIS Cu Al ₂ O ₃	Metais com revestimento metálico como aços galvanizados, aços doces e aços baixo carbono.

Abaixo estão descritas os mais importantes aspectos das classes de interesse para soldagem por resistência elétrica. Eletrodos com ligas à base de cobre (Grupo A da RWMA), classes de 1 a 3 e eletrodos em metais refratários (Grupo B da RWMA), que são materiais produzidos por metalurgia do pó, excelentes quando as condições de trabalho são severas, pois os mesmos apresentam alta resistência à deformação. Os eletrodos das classes 10 e 12 são empregados em soldagens por projeção e insertos, utilizados em situações que exigem eletrodos de distintos materiais para equilibrar o calor gerado nas peças, ou por grande diferença entre espessuras das mesmas, ou devido às suas distintas condutividade térmicas e elétricas, como na soldagem de cobre em aço (MACHADO, 1996).

Classe 1: Composição química nominal de 1% de cádmio e o restante cobre, não tratado termicamente. A sua resistência mecânica é obtida por trabalho a frio, que mantém sua condutibilidade térmica e elétrica inalterada. São utilizados na soldagem de ligas de alumínio, ligas de magnésio, materiais revestidos, latão e bronze.

Classe 2: Composta por materiais de propriedades mecânicas mais altas e condutibilidade térmica e elétrica mais baixa que os eletrodos da classe 1. Possui composição química nominal de 0,8% cromo e o restante cobre. São utilizados na soldagem de aços de alta resistência, aços níquel cromo, latão e bronze de baixa condutividade.

Classe 3: Composta por materiais de mais baixa condutividade térmica e elétrica que os eletrodos das classes 1 e classe 2, porém com propriedades mecânicas superiores. Composição química nominal de 0,5% berílio; 1,0% níquel; 1,0% cobalto e o restante de cobre. Utilizados na soldagem de metais de alta resistência como aços inoxidáveis e cromo-níquel por possuir alta resistência ao desgaste.

Classe 10: Composto cobre-tungstênio, com alto ponto de fusão; dureza de 72 HRB; resistência à compressão mínima de 931 N/mm²; condutividade elétrica de 35% AISC.

Classe 11: Composto por 58% de tungstênio em volume no cobre; dureza de 94 HRB; resistência à compressão mínima de 1103 N/mm²; condutividade elétrica de 28% AISC.

Classe 12: Composto cobre-tungstênio; dureza de 98 HRB; resistência à compressão mínima de 1172 N/mm²; condutividade elétrica de 27% AISC.

Classe 13: Tungstênio puro; dureza 69 HRA; resistência à compressão mínima de 1379 N/mm² condutividade elétrica de 30% AISC.

Classe 14: Molibdênio puro; dureza de 85 HRB; resistência à compressão mínima não especificada; condutividade elétrica de 30% AISC (MACHADO, 1996).

Classe 20: Composta por materiais mais resistentes às altas taxas de calor e pressão, quando comparados aos eletrodos das classes 1 e 2. Usados na soldagem de aços com revestimento metálico como aços galvanizados, aço doce e aços de baixo carbono (RWMA, 1989).

Eletrodos de Cu-Cr (1% Cr), Cu-Cr-Zr (1% Cr; 0,25% Zr) e Cu-Zr (0,15% Zr) são formados por ligas endurecidas por precipitação, que adquirem tais propriedades através de elementos de liga que promovem no envelhecimento em certas condições de temperatura e tempo a formação de finos precipitados. A exposição a altas temperaturas por longo período de tempo permite que os precipitados coalesçam reduzindo a resistência mecânica devido ao superenvelhecimento. As temperaturas atingidas durante a soldagem são suficientes para reduzir a fração volumétrica dos precipitados. A condutividade elétrica destes tipos de eletrodos está na faixa de 80% a 90% IACS (*International Annealing Copper Standard*) (BATISTA, 2011).

As ligas de cobre endurecidas por precipitação passam por um procedimento complexo de tratamento térmico

3.3.11. Formato do eletrodo.

A densidade de corrente é a corrente elétrica que circula pela área da face do eletrodo e é a responsável pela distribuição e intensidade do calor gerado durante a soldagem. É o formato da face do eletrodo que determina a densidade de corrente que passa pelo eletrodo até atingir a peça. Então, quanto maior a condutividade elétrica de um determinado material, menor deve ser a área da face do eletrodo, permitindo assim maior concentração da densidade de corrente facilitando o processo de soldagem (RWMA, 1989).

Quando há um aumento não controlado da área de contato do eletrodo com a peça, diminui consideravelmente a densidade da corrente a pressão aplicada. As faces dos eletrodos devem estar sempre alinhadas, tanto entre si e entre as peças (MACHADO, 1996).

Os eletrodos possuem formatos e diâmetros diversos para as mais específicas aplicações. A RWMA padronizou os tamanhos dos eletrodos e tipos de faces, como apresentado na figura 3.34 (MACHADO, 1996).

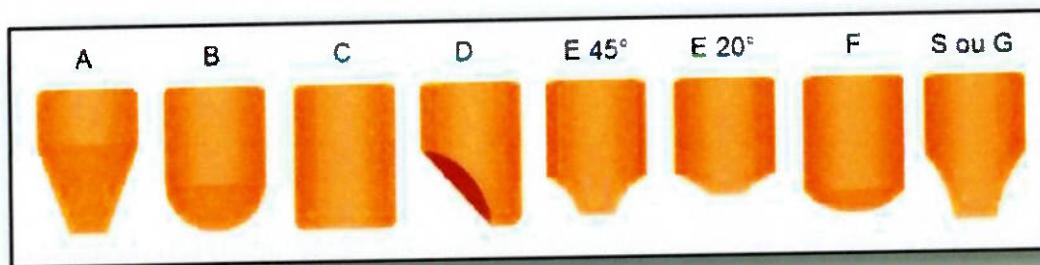


Figura 3.34 - Formatos mais comuns de eletrodos utilizados na soldagem por pontos. Adaptado de (BATISTA, 2011).

O eletrodo de soldagem por pontos possui quatro características geométricas que conferem à soldagem qualidade e bom aspecto visual:

- Face – A parte que mantém contato com a peça, é a mais importante do eletrodo porque determina o valor da densidade da corrente que é aplicada na execução do ponto de solda. Determina a pressão utilizada para atingir a força mínima necessária para a realização do ponto.
- Corpo: Deve possuir área, massa ou espessura suficiente para suportar a força aplicada nas peças e conduzir a corrente de soldagem.
- Conexão: É a forma que possui para ser fixado ao porta eletrodo, pode ser cônico ou rosqueado.
- Cavidade para refrigeração: É a parte interna do eletrodo que está conectado ao porta eletrodo. É oca e serve para a circulação de água para a refrigeração do eletrodo (AURES).

Equações foram desenvolvidas para estimar aproximadamente o diâmetro (D) da face mais conveniente para o eletrodo, que é diretamente relacionada com a espessura da peça a ser soldada. As faces de contato dos eletrodos com a peça devem ser aproximadamente 1,6 mm maior que o ponto de solda (WEINER, et al., 1992).

3.3.12. Tamanho do ponto:

O tamanho do ponto de solda deve ser proporcional à espessura da chapa que está sendo soldada, sendo assim, quanto maior a espessura da chapa, maior é o diâmetro do ponto de solda. Um ponto de solda pode ser feito de qualquer tamanho racional, dependendo do equipamento e de sua potência,

ele poderá ser grande ou pequeno. Por sensatez, um ponto de solda maior que o necessário deve ser evitado pelo desperdício de potência. Por outro lado, se o diâmetro do ponto de solda for pequeno demais, sua resistência não suportaria e não seria consistente com a resistência da própria chapa que está sendo soldada (BAM SOLDAS).

Os diâmetros dos pontos são tabelados para as diversas espessuras de chapas. Valores definidos empiricamente ou por experiência. Porém, há uma regra básica e simples para a determinação do diâmetro do ponto de solda que funciona bem. A figura 3.35 mostra as maneiras para determinação do ponto de solda e também como é especificado o diâmetro da face de contato do eletrodo (BAM SOLDAS).

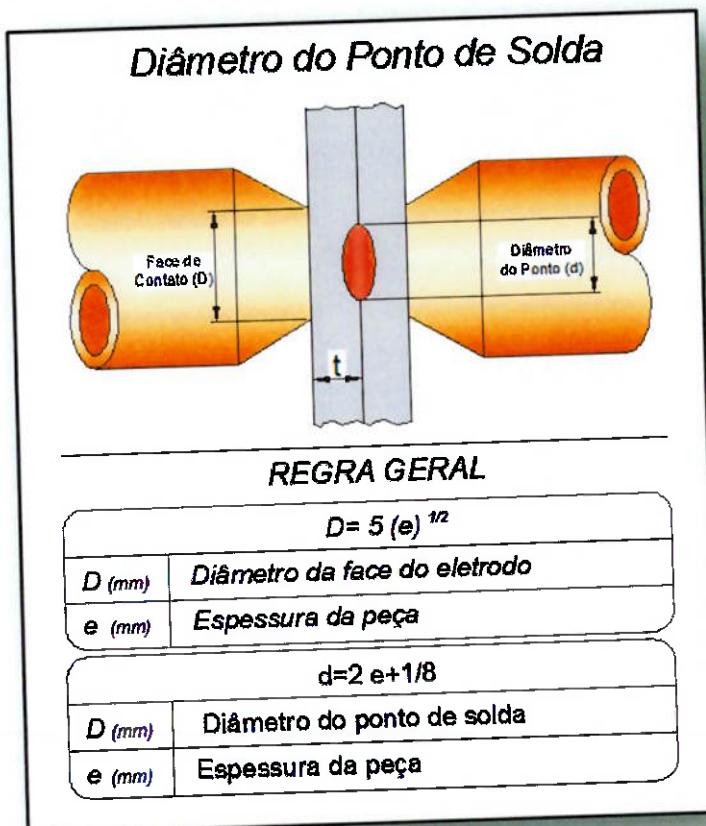


Figura 3.35 - Determinação do diâmetro do ponto de solda e diâmetro da face de contato. Adaptado de (BAM SOLDAS).

3.3.13. Critérios de aceitação do ponto de solda:

Para uso prático, requisitos facilmente mensuráveis de qualidade da solda são quantificados, principalmente sob a forma de tabelas. Muitas das normas e recomendações são desenvolvidas por empresas, como as indústrias automotivas. Organizações profissionais como a *American Welding Society* (AWS) e Internacional Organização de Normalização (ISO) também contribuem para uma parte significativa dos padrões. Por causa das diferenças drásticas no design, compreensão e percepção da qualidade de solda, produção e ambiente de teste, os fabricantes de automóveis e outros tendem a ter necessidades muito diferentes sobre a qualidade da solda. Os requisitos de tamanhos de ponto de solda são significativamente diferentes. Para a mesma espessura, o maior tamanho de solda necessária pode ser mais do que a do menor. Mas, em geral, eles estão compreendidos entre $3\sqrt{t}$ e $6\sqrt{t}$. A maior parte está localizada entre $4\sqrt{t}$ e $5\sqrt{t}$, e muitos tamanhos nominais de solda são definidos nesta faixa ao determinar a janela operacional (ZHANG, et al., 2006).

3.3.14. Refrigeração dos eletrodos:

Durante a operação de soldagem, altas correntes, grandes forças compressivas e altas temperaturas (em torno de 900°C) são atingidas na superfície de contato do eletrodo/chapa, como mostrado na figura 3.36 (AURES). Grande parte do desgaste do eletrodo é devido às altas temperaturas de trabalho e a permanência nas peças durante o resfriamento (MACHADO, 1996).

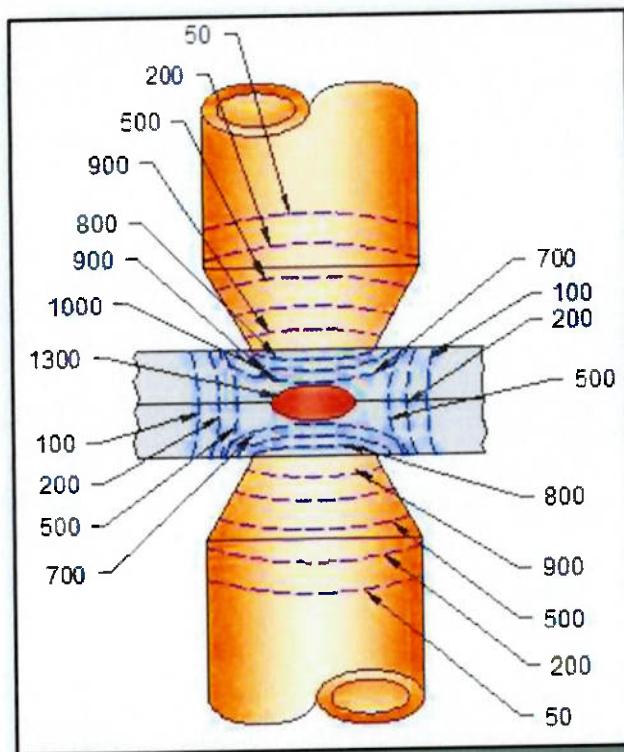


Figura 3.36 - Temperaturas instantâneas estimadas de soldagem por pontos em graus célsius no instante da finalização da soldagem. Adaptado de (AURES).

Após a interrupção da corrente elétrica, o ponto de solda é resfriado pelo próprio eletrodo, durante o ciclo de pós-pressão (resfriamento ou manutenção). A dissipação de calor é realizada em grande parte pelo eletrodo, que é refrigerado através de um sistema de passagem de água pressurizada. Recomenda-se para uma refrigeração ideal dos eletrodos e de todo o equipamento, um fluxo de água de no mínimo 4 l/min a uma temperatura de no máximo 25°C, levando em consideração soldagem de chapas finas (menos de 3 mm de espessura) e sem revestimento (FUKAMIZU, 2014). Em soldagens de chapas mais espessas ou revestidas, o fluxo de água utilizado no processo deve ser maior, de 6 a 7 l/min. Em alguns casos, a adoção de sistemas de refrigeração da água faz-se necessário para manter a temperatura da água em padrões aceitáveis para manter a integridade da solda e também dos equipamentos, como mostrado na figura 3.37 (AURES).



Figura 3.37 - Sistema de circuito fechado de refrigeração de água de resfriamento UMAG MECALOR (autoria própria).

A instalação do circuito hidráulico pode ser feita em circuito fechado ou aberto, sendo recomendada uma pressão mínima de 2 kg/cm², a área de permutação de 50 cm² por quilo de material (MARIMAX).

Além do resfriamento necessário dos eletrodos e do ponto de solda, o sistema de refrigeração mantém o circuito secundário a níveis toleráveis, assim como todos os demais componentes do equipamento, como tiristores, transformador de corrente, cabos de potência, braços e hastes, diminuindo perdas por aquecimento e a oxidação das emendas e áreas de contato (MILLER WELDS).

O resfriamento correto dos eletrodos tem grande importância na execução das soldas e no tempo de vida útil dessas. A água deve ser levada tão perto quanto possível da ponta dos eletrodos, aproximadamente 12 mm da ponta. Periodicamente, se faz necessária uma vistoria nos eletrodos, pois, com o regime de trabalho estes sofrem desgaste e é necessário que a forma correta seja mantida, para obtermos uma solda sempre uniforme. As pontas dos eletrodos devem estar com o formato correto e limpo (BRACARENCE).

A figura 3.38 apresenta claramente a circulação correta da água, que é sempre no sentido do tubo central, normalmente confeccionado em metais não ferrosos como latão, cobre ou mesmo de ligas poliméricas, para o suporte do eletrodo.

Essa montagem garante que a região oposta do eletrodo que apresenta maior regime de calor seja resfriada devidamente. A figura 3.38 mostra o sentido de circulação correta da água e a figura 3.39 a montagem adequada do tubo, que não raramente é montada de maneira equivocada no dia a dia. Tais equívocos resultam no excessivo desgaste do eletrodo, além de comprometer a qualidade do ponto de solda. Como regra, a ponta do tubo de resfriamento deve ficar aproximadamente de 4,0 ou 6,5 mm de distância da parede interna do eletrodo, garantindo assim a correta circulação da água e melhor troca de calor. Quando o tubo é montado muito próximo ao eletrodo, essa correta circulação da água é bloqueada ou quando muito abaixo do limite, ocorre uma mistura precoce entre água quente e fria, proporcionando a formação de uma bolsa de vapor impedindo a correta troca de calor com o eletrodo.

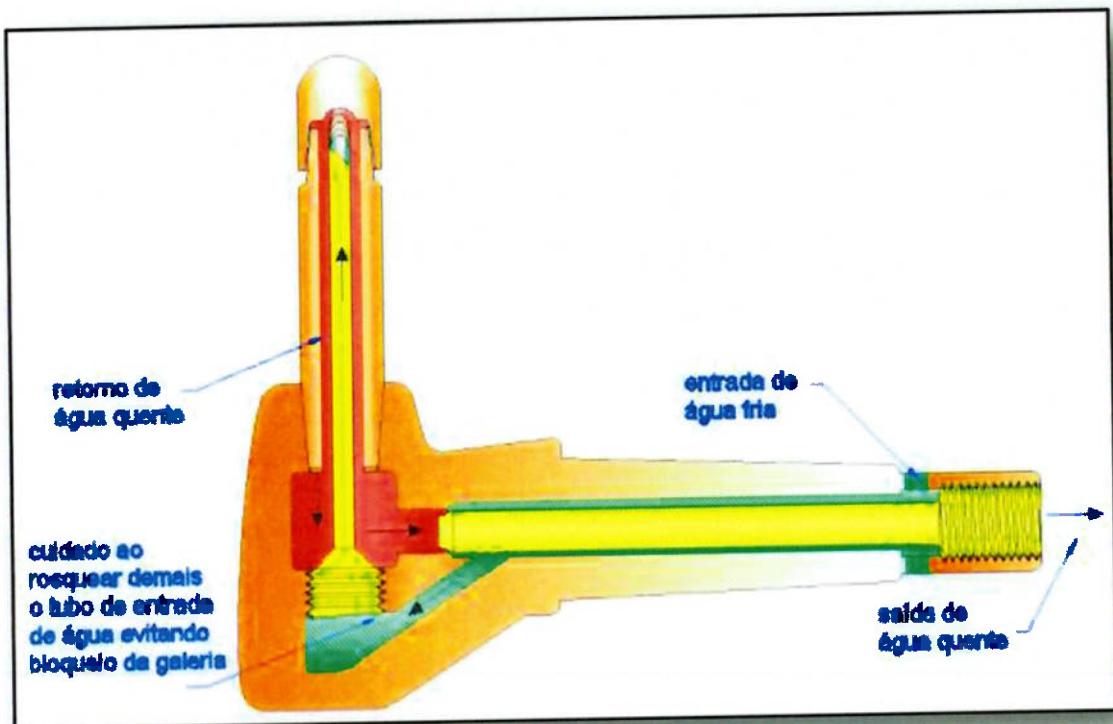


Figura 3.38 - Circulação correta da água em um porta eletrodo (autoria própria).

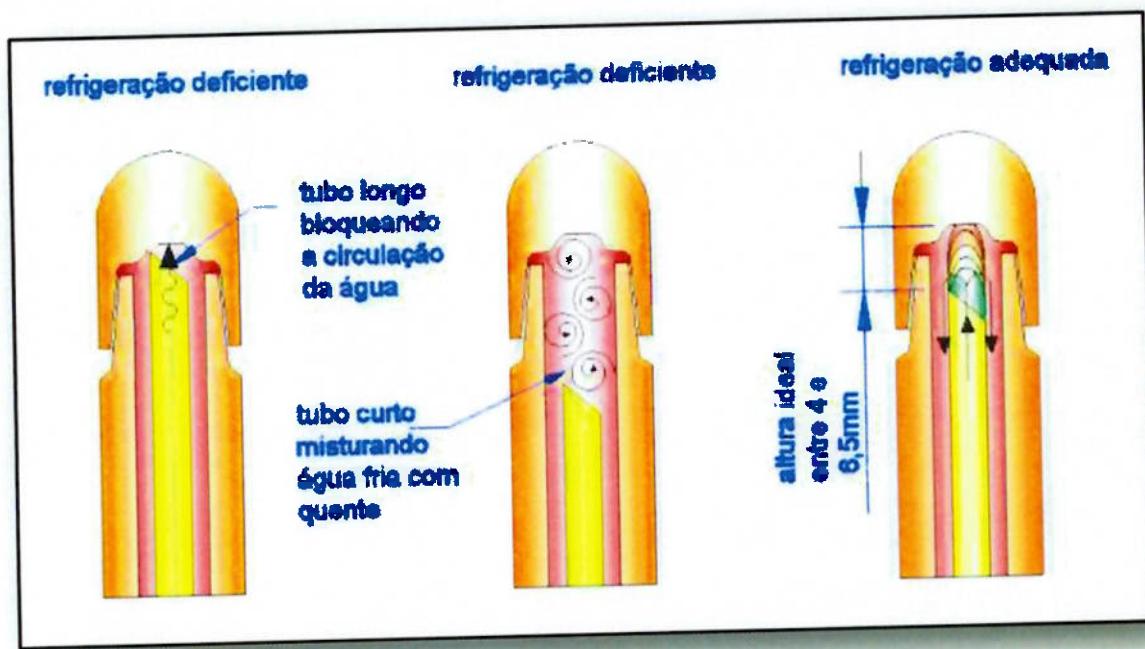


Figura 3.39 - Montagem Correta do Tubo de Refrigeração Interno (autoria própria).

3.3.15. Desgaste dos eletrodos:

Alterações na geometria das faces dos eletrodos com o aumento da área de contato é resultado direto do desgaste natural durante a sua vida útil. Esse aumento de área acarretará na diminuição da densidade superficial da corrente, diminuindo assim o rendimento do processo (VENCEGUERRA, 2012). Por outro lado, uma recuperação indevida da ponta, poderá diminuir demais a área de contato, ocasionando o aumento da densidade superficial de corrente, ocasionando o sobreaquecimento do eletrodo diminuindo a sua vida útil (WEINER, et al., 1992). A figura 3.40 mostra o eletrodo com características normais e desgastado.



Figura 3.40 - Efeito do desgaste do eletrodo na superfície de contato. Adaptado de (WEINER, et al., 1992).

3.3.16. Fresagem dos eletrodos:

A fresagem dos eletrodos é um procedimento utilizado para recuperar o perfil original do eletrodo após a execução de alguns pontos de solda. A importância da fresagem está no fato de restaurar a face de contato do eletrodo e eliminar o latão ou zinco, formado nas ligações com a superfície do metal soldado (BRANCO, 2004).

A figura 3.41 mostra as operações de fresagem, que podem ser realizadas de maneira automática, em estações robotizadas e automáticas, semiautomáticas ou manuais, quando o equipamento de soldagem é manual.



Figura 3.41 - Fresagem automática e manual (autoria própria).

A fresagem manual com lima, prática muito utilizada no passado, deve-se ser evitado pela dificuldade de alcançar a forma ideal do eletrodo, podendo resultar num ponto de solda com qualidade duvidosa e diminuição da vida útil do eletrodo (BATISTA, 2011).

A substituição do eletrodo não deve ser realizada para minimizar o problema do desgaste, afinal o eletrodo está diretamente ligado ao custo de produção. Trocas indevidas geram paradas de produção e em alguns casos, os eletrodos não foram utilizados até o seu limite (BRANCO, 2004).

3.3.17. Equilíbrio térmico:

Não há nenhum problema particular de equilíbrio térmico quando os metais que estão sendo soldados possuam espessura, características metalúrgicas e térmicas iguais. Neste caso, o equilíbrio térmico é automaticamente corrigido com a utilização de eletrodos de igual diâmetro, tipo, etc. O equilíbrio térmico pode ser definido com as condições de soldagem em que as zonas de fusão das peças a serem unidas são submetidas ao calor e a pressão (MILLER WELDS).

A soldagem entre materiais diferentes é possível desde que seja considerado o equilíbrio térmico na interface, de forma que a soldagem se divida em partes aproximadamente iguais nas peças. Deve ser gerada mais energia no lado do material que possuir maiores condutividade térmica e elétrica, ou, em materiais com tais características físicas similares, naquele que fundir com temperaturas mais altas (MACHADO, 1996).

Em materiais onde a diferença de condutividade não seja muito grande, seguintes técnicas são empregadas no lado da peça mais condutiva:

- a) O eletrodo deve possuir uma menor área de contato;
- b) A face de contato do eletrodo deve ser confeccionada de material que possua alta resistividade, de preferência eletrodos das Classes 11 ou 12 do Grupo B da RWMA;
- c) A peça deve ser revestida com uma camada fina de um material que possua maior resistividade;
- d) A peça deve ser mais espessa (MACHADO, 1996).

No caso de materiais iguais com espessuras diferentes, o eletrodo menor deve ser colocado em contato com a peça mais fina. Para peças com condutibilidade diferentes de mesma espessura, o eletrodo menor deve ficar em contato com a peça de maior condutividade. A figura 3.42 mostra essa combinação de eletrodos (WEINER, et al., 1992).

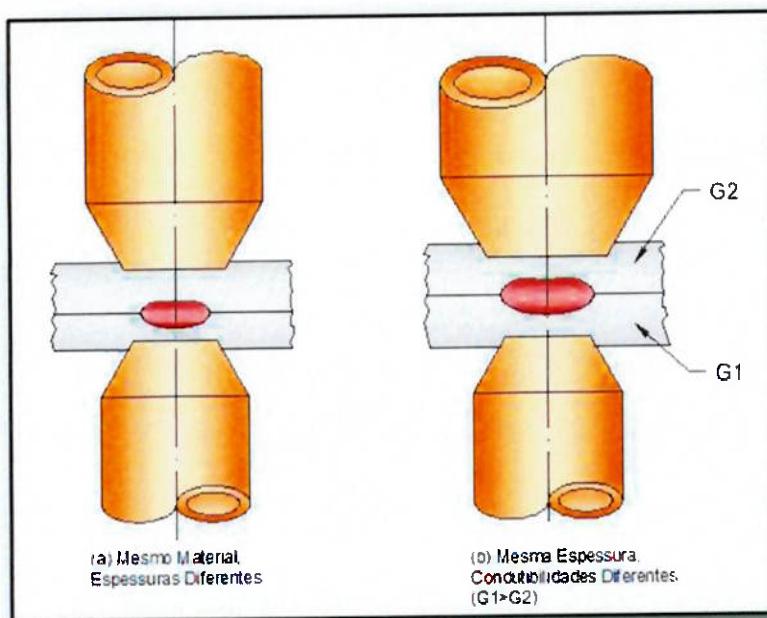


Figura 3.42 - Diâmetro do eletrodo em função da soldagem de metais de espessura ou condutividade diferentes. Adaptado de (WEINER, et al., 1992).

Para calcular as áreas de contato, utiliza-se a seguinte relação mostrada na tabela 3.6 (WEINER, et al., 1992):

Tabela 3.6 - Calculo para determinar a área de contato de eletrodos utilizados para soldagem de metais dissimilares. Adaptado de (WEINER, et al., 1992).

$\frac{G1 \cdot A1}{e1} = \frac{G2 \cdot A2}{e1} = \frac{Gn \cdot An}{en}$	
$G1, G2, \dots$	Condutibilidade elétrica das peças
$A1, A2, \dots$	Área de contato dos eletrodos
$e1, e2, \dots$	Espessura das peças

3.3.18. Aços galvanizados:

Na indústria automobilística o assunto "Corrosão" está entre vários outros, um dos que mais consome tempo e investimento em estudos e pesquisas no intuito de minimizar a sua ação. E é no aço onde tais pesquisas e investimentos são direcionados, pois é o aço o material mais utilizado na indústria por possuir excelentes propriedades mecânicas como tenacidade, ductibilidade, formabilidade, soldabilidade, além de ser abundante, possuir ótimas propriedades ferromagnéticas, reciclagem e baixo custo, porém suscetível à corrosão em presença de umidade e a oxidação em temperaturas elevadas (BREPOHL, 2013). Com o passar dos anos, vários métodos de proteção do aço foram desenvolvidos, tais como adição de elementos de liga ao aço, mudança do ambiente por meio de ionização ou utilização de inibidores, controle do potencial eletroquímico pela aplicação de correntes anódicas ou catódicas e por aplicação de elementos orgânicos ou metálicos. A galvanização, que consiste na aplicação de revestimentos metálicos de zinco e de ligas de zinco, é a mais utilizada (CONI, 2004). Existe uma grande variedade de revestimentos galvanizados empregados na indústria automotiva. Esses revestimentos metálicos, conforme mostrado na tabela 3.7, são aplicados em chapas de aço de maneira contínua por imersão a quente e eletrodeposição (BATISTA, 2011).

Tabela 3.7 - Resumo dos principais tipos de revestimentos metálicos utilizados na indústria automotiva. Adaptado de (BATISTA, 2011).

Processo de Revestimento	Tipo de Revestimento	Designação	Peso do Revestimento (g/m ²)	Espessura do revestimento (μm)
Imersão a Quente	Zinco	Galvanizado	60 - 120	8 - 17
	Zinco-Ferro	Galvannealed	40 - 70	6 - 10
Eletrodeposição	Zinco	Eletrogalvanizado	60 - 90	8 - 13
	Zinco-Níquel	Eletrogalvanizado Zinco-Níquel	20 - 50	3 - 7

3.3.18.1. Revestimento contínuo por imersão a quente:

Galvanização por imersão a quente (HDG – *hot-dip galvanizing*) consiste na aplicação de um revestimento fundido na superfície de uma chapa de aço em um processo contínuo (BNDES, 2000). A bobina de chapa de aço laminada a frio é desenrolada progressivamente atravessando um banho de metal fundido, normalmente zinco a 450°C, a uma velocidade de 183 m por minuto. Quando imerso no metal fundido, a chapa de aço reage com o metal fundido ligando o revestimento à superfície da chapa. À medida que a chapa emerge do banho fundido, derruba o excesso de metal líquido. Uma secagem a gás controla a espessura do revestimento (IMF, 2011).

O processo se resume em entrada, limpeza, recozimento, deposição de zinco e sessão de saída. O início do processo começa em aparar a ponta da nova bobina e solda-la à extremidade da última bobina que se encontra no final do processo. Após a soldagem, a chapa é encaminhada para um processo de limpeza que garante a aderência do revestimento, eliminando qualquer resquício de sujeira. Após a limpeza, a chapa é recozida para alcançar características mecânicas desejadas (resistência e conformação), como alívio de tensões adquiridas no processo de laminação a frio. A chapa é aquecida a altas temperaturas em um forno de ambiente inerte (hidrogênio e nitrogênio), para evitar possíveis formações de óxidos superficiais que possam prejudicar a deposição do zinco fundido sobre a superfície (BREPOHL, 2013). Ao atingir o banho de metal fundido de revestimento, o metal passa ao redor de um cilindro submerso e então sai verticalmente do banho, recebendo jatos de ar comprimido que além de secar o controla a espessura do metal fundido (IMF, 2011).

O revestimento é resfriado e solidificado a tempo de atingir o próximo cilindro, é necessário à solidificação total para evitar a transferência de revestimento para o cilindro. Para que isso ocorra de maneira correta, normalmente as linhas de processo de revestimento são altas e longas, em linhas modernas chegam a mais de 60 m de altura.

Ao chegar à parte final do processo, a tira de aço já a uma temperatura ambiente, passa pelo laminador de encruamento, pelo nivelador de tensão, por um tratamento químico e finalmente é lubrificada e rebochinada (IMF, 2011).

3.3.18.2. Galvanização por eletrodeposição (EG):

Eletrogalvanização (EG – electrogalvanizing) ou galvanização por eletrodeposição é um processo de tratamento de superfície que consiste em transferir o zinco sobre uma chapa de aço, através da redução química ou eletrolítica.

O processo consiste em um metal que transfere íons para outra superfície, ambas imersas em um substrato contendo sais de zinco e eletrodo de zinco através da eletrólise. O metal que é revestido sofre redução e é ligado ao polo negativo de uma fonte de corrente contínua, o cátodo. O metal que sofre a oxidação é ligado ao polo positivo da fonte, o ânodo. A utilização de uma fonte externa de corrente contínua é necessário para ocorrer a deposição dos elétrons, pois as reações eletrolíticas não são espontâneas (IMF, 2011).

A utilização da corrente elétrica é fundamental no processo eletrolítico. A corrente alternada que é recebida da rede de transmissão de energia elétrica é transformada em corrente contínua através de retificadores de corrente. Assim é possível a realização da eletrólise, tendo assim o polo positivo conectado ao metal que fornecerá os íons e o polo negativo ao metal que será revestido (QUALINOX, 2014).

3.3.19. Soldagem de aços galvanizados:

A resistência de contato é fator predominante para a vida útil do eletrodo e a condição da superfície do metal tem relação direta para isso. Se a resistência de contato for baixa, a corrente de soldagem deverá ser maior, com geração de calor e alterações metalúrgicas na interface do eletrodo (ZHANG, et al., 20012). Na soldagem de chapas de aço galvanizado por imersão a quente, a resistência de contato é menor do que em aços não revestidos devido à alta condutividade elétrica do revestimento de zinco (AURES). A maior influência

no desgaste do eletrodo está relacionada à presença de zinco livre na interface do eletrodo e chapa (ZHANG, et al., 20012). O motivo é causado pela reação entre o cobre do eletrodo e o zinco do revestimento, levando à formação de ligas na face do eletrodo. A fusão do zinco que ocorre na interface eletrodo chapa reage com o cobre da face do eletrodo formando uma camada fina de latão, mostrado na figura 3.43. Além disso, uma parte de zinco oxida e fica depositado na face do eletrodo.



Figura 3.43 - Formação de latão na superfície da chapa durante a soldagem de cabines de caminhões (autoria própria).

Outra característica da soldagem de aços revestidos com zinco está na interface chapa/chapa. Durante a soldagem o zinco fundido se desloca da zona de solda formando um anel que circunda a o ponto de solda. Esse anel desvia parte da corrente de soldagem, exigindo assim maiores correntes para a realização do ponto de solda. Os dois processos modificam a características elétricas e a geometria original da superfície de contato dos eletrodos (BATISTA, 2011). Então, para produzir pontos de solda com diâmetros adequados, tempos e densidade de correntes devem ser relativamente mais elevados quando comparados aos de aços não revestidos (AURES).

3.3.20. Configurações de juntas:

A junta soldada é definida como uma montagem onde os componentes são unidos por solda (RWMA, 1989). No caso da soldagem por pontos, duas ou mais chapas são sobrepostas na região que será soldada, tendo como característica principal a necessidade da junta ser configurada para ter acesso por ambos os lados. Geralmente não é possível a realização da soldagem em regiões fechadas (EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION, 2012). A figura 3.44 apresenta algumas configurações de juntas para a realização da soldagem por pontos.

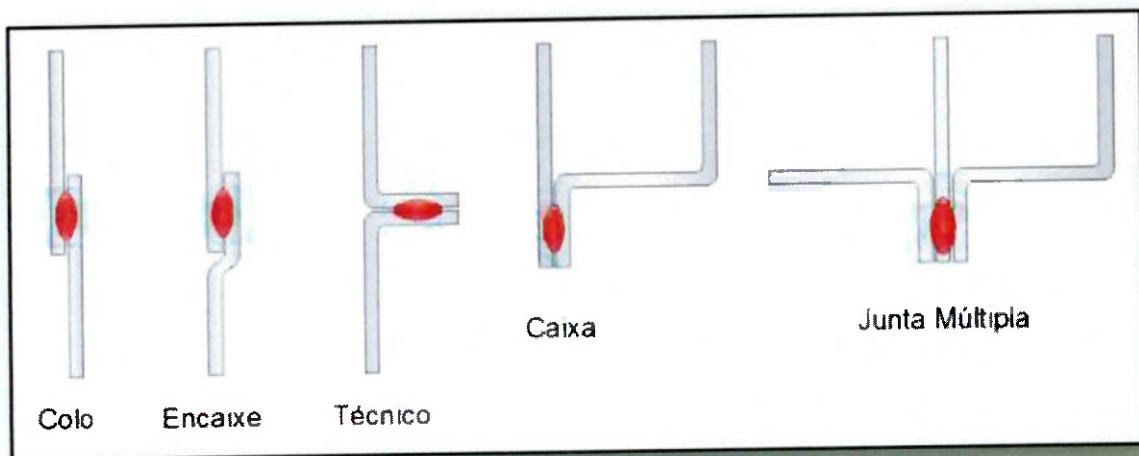


Figura 3.44 - Configurações de juntas para soldagem por pontos. Adaptado de (EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION, 2012).

Com a finalidade de minimizar as soldagem de bordas (arestas) e a expulsão de material fundido, as chapas sobrepostas devem possuir largura suficiente para proporcionar uma largura plana e mais larga que o diâmetro do ponto de solda. Além disso, acessibilidade coerente ao equipamento utilizado para evitar contato do eletrodo ou porta eletrodo nas partes metálicas evitando assim desvios de corrente (EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION, 2012). A figura 3.45 mostra um exemplo de flange ideal para a soldagem por pontos.

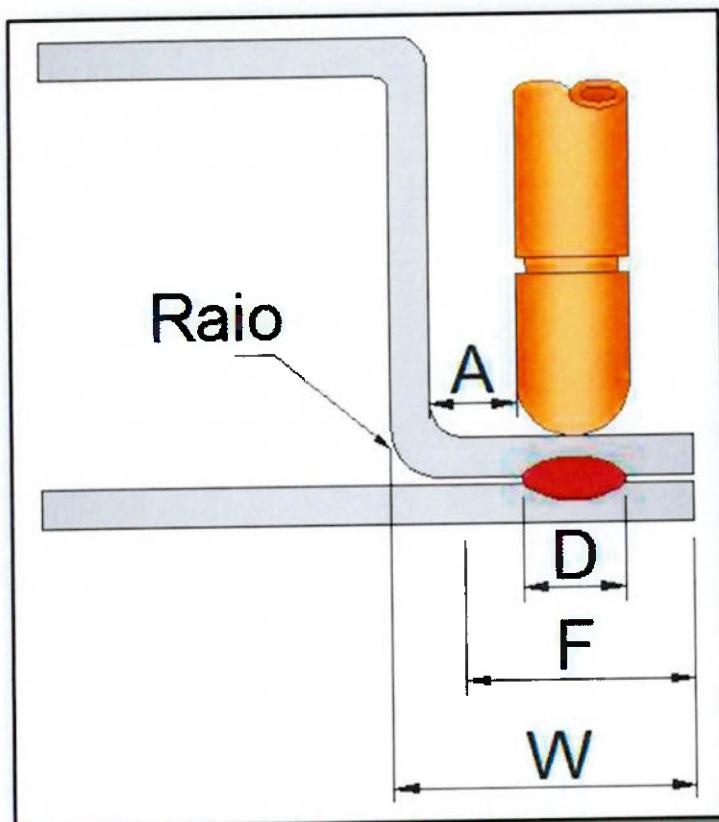


Figura 3.45 - Montagem de flange típica para soldagem por pontos. Adaptado de (EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION, 2012).

Onde:

A: não deve haver interferência entre a chapa metálica e o eletrodo;

D: diâmetro do ponto de solda;

F: é a dimensão plana da chapa a ser soldada. Deve ser maior que o diâmetro do ponto de solda;

W: é a largura total das chapas sobrepostas, que inclui um desconto para a formação de raio.

3.3.21. Fatores que afetam a qualidade:

Diversos fatores podem afetar a qualidade de um ponto de solda, como propriedades dos materiais a serem soldados, características da superfície de contato, geometria e dimensões dos eletrodos, projetam de junção das peças, condições dos eletrodos, parâmetros de soldagem inadequados, configuração

e condição do equipamento de soldagem, que determina a força de fechamento, o tempo e a corrente de soldagem, além do fator humano (KOÇAK, 2003).

A qualidade da solda está diretamente ligada à sua aplicação, devem atender requisitos mínimos de uma especificação em particular (aviões e veículos espaciais) ou normas mais satisfatórias que permitem uma faixa mais ampla de defeitos, como ocorrem em componentes automotivos (RUIZ, 2005).

A experiência mostra que uma pequena alteração em qualquer variável é suficiente para realizar uma soldagem inaceitável, podendo comprometer as propriedades mínimas de resistência mecânica e resistência ao impacto, além da possibilidade de não atingir o formato e aspecto visual ideal da lentalha, detalhe de grande importância na indústria automobilística, quando o ponto de solda está localizado em uma região visível, como é mostrado na figura 3.46.

Os fatores mais importantes da qualidade são: aparência superficial, diâmetro do ponto de solda, penetração (indentação), resistência e ductibilidade, expulsão de material, separação das chapas, descontinuidades internas e consistência do ponto de solda (RUIZ, 2005). Classificados como internos e externos, defeitos ou descontinuidades são monitorados por um sistema de controle de qualidade, que podem ser realizados a olho nu, ou identificados através de dispositivos especiais ou por seccionamento da solda (ZHANG, et al., 20012).

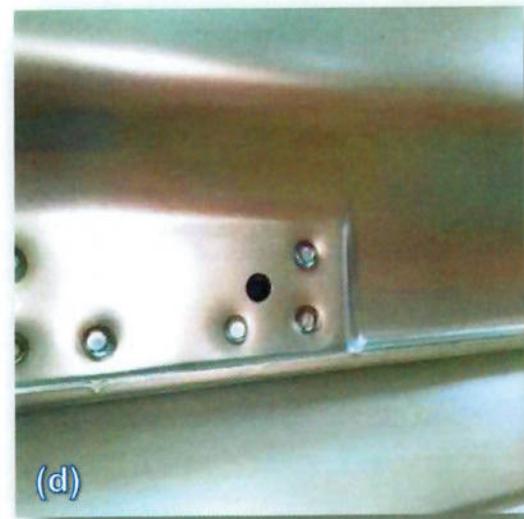
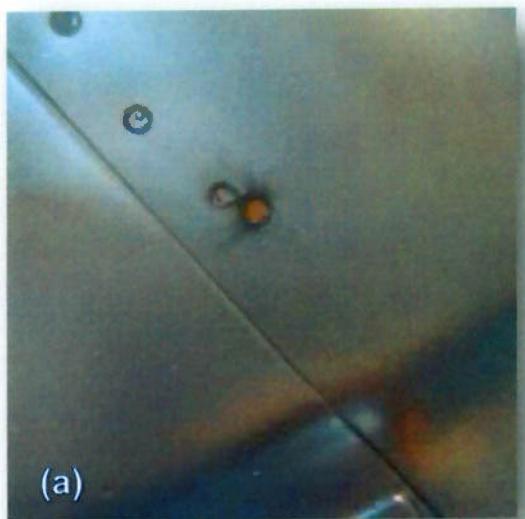


Figura 3.46 - Exemplos de diversos defeitos ou falhas que ocorrem no processo de soldagem por pontos; (a) perfuração da chapa; (b) soldagem na borda da chapa; (c) expulsão de material; indentação excessiva ou “ponto profundo (autoria própria).

3.3.22. Descontinuidades externas:

Descontinuidades externas são normalmente identificadas em inspeções visuais, realizadas pelo próprio operador de modo contínuo ou pelo inspetor de qualidade através de lotes de amostragem (ZHANG, et al., 20012). Não deve ser o único método utilizado por ser pouco preciso, porém estabelece o início

do processo analítico da qualidade (BATISTA, 2011). Além do aspecto inadequado, diversos defeitos podem ser revelados por essa inspeção. A maioria das descontinuidades externas é encontrada na AWS D8. 7: *Recommended Practices for Automotive Weld Quality: Resistance Spot Welding* (ZHANG, et al., 20012).

3.3.22.1. Soldagem próxima da borda da chapa:

A figura 3.47 apresenta um ponto de solda que foi feito na borda da chapa, ou seja, no momento do fechamento da pinça de soldagem, parte da face do eletrodo no momento da soldagem ficou próxima ou fora da borda da chapa ocasionando a expulsão de material (ZHANG, et al., 20012). Essa descontinuidade ocorre devido à chapa de sobreposição com dimensão insuficiente para uma soldagem de qualidade, normalmente determinado erroneamente no projeto para economia de material. Falhas de estampagem, fixação incorreta da chapa, desalinhamento do porta eletrodo, posicionamento inadequado da pinça de soldagem por parte do operador ou mesmo um posicionamento incorreto da pinça de soldagem ao programar o robô manipulador.



Figura 3.47 - Soldagem de borda (autoria própria).

3.3.22.2. Corrente de desvio:

A figura 3.48 mostra exemplo de pontos de solda próximo demais, quando o primeiro ou o segundo ponto de solda é realizado em um local diferente do estipulado.

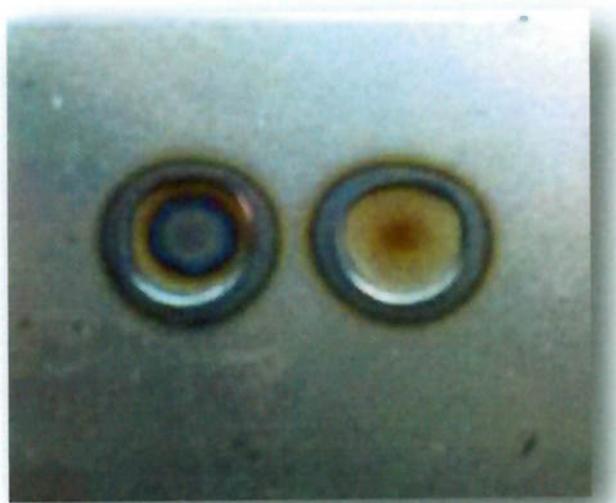


Figura 3.48 - Soldagem próxima demais (autoria própria).

Pontos realizados próximos demais não são caracterizados como problemas quando tal distância está dentro da tolerância especificada. Tal prática deve ser evitada quando desvios acentuados resultam em soldagens sobrepostas ou próximas umas das outras. A corrente utilizada para a soldagem do segundo ponto não será o suficiente para realizar uma soldagem de qualidade, devido ao efeito do desvio de corrente. Como mostrado na figura 3.48, o ponto de solda da direita apresenta diâmetro e profundidade menor que o da esquerda. Isso ocorre devido a menor calor gerado pela corrente de soldagem mais baixa, influenciada pela resistência elétrica menor do ponto realizado anteriormente, levando em consideração que a mesma programação de soldagem foi utilizada para realizar os pontos consecutivos. Como resultado, a integridade da estrutura soldada pode ser comprometida (ZHANG, et al., 20012). A figura 3.49 mostra a representação do efeito dos pontos de solda apresentado na figura 3.48.

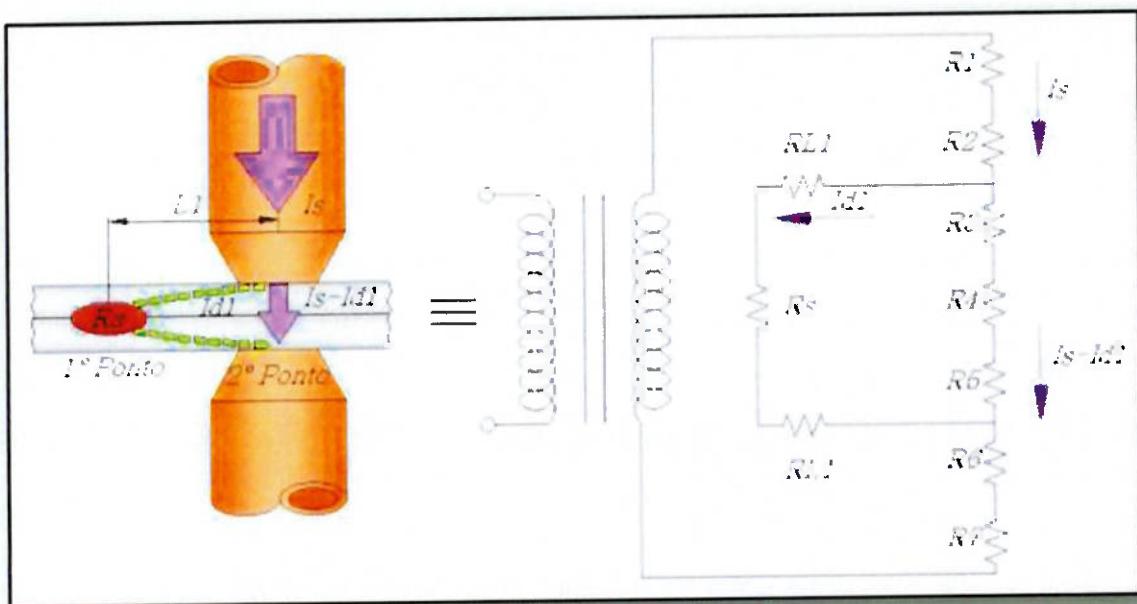


Figura 3 49 - Corrente de desvio com dois pontos de Solda. Adaptado de (BATISTA, 2011).

3.3.22.3. Indentação excessiva e solda fraca:

Indentação é forma circular de baixo relevo do ponto de solda formado pela força aplicada pelos eletrodos durante a soldagem. É o indicador direto da existência da solda e por ela que se quantifica a profundidade do ponto (ZHANG, et al., 20012).

A indentação excessiva ocorre quando um eletrodo com uma área superficial pequena é empregado com pressão e densidade de corrente excessivamente altas, que além de prejudicar o aspecto da superfície da chapa, compromete a resistência mecânica da solda (AURES).

A profundidade mínima de fusão deve ser de 10 a 20% da espessura da chapa mais fina, abaixo desse valor a solda é classificada como “solda fraca”, pois o calor gerado foi muito baixo. Variações de corrente de soldagem, força aplicada pelos eletrodos e tempo de soldagem causam alterações indesejáveis na resistência da solda fraca, que em muitos casos, não há formação do ponto de solda.

A profundidade de fusão não deve ultrapassar 80% da espessura da chapa mais fina para não resultar indentação excessiva e expulsão de material (RUIZ,

2005). Além de causar uma impressão duvidosa quando exposta em regiões visíveis de um automóvel, por exemplo, a indentação excessiva ocasiona uma ligação fraca da solda e as chapas, devido à redução da espessura da chapa próxima da reentrância da parede (ZHANG, et al., 20012). As figuras 3.50(a) e (b) mostram soldagens com indentação excessiva e solda fria.

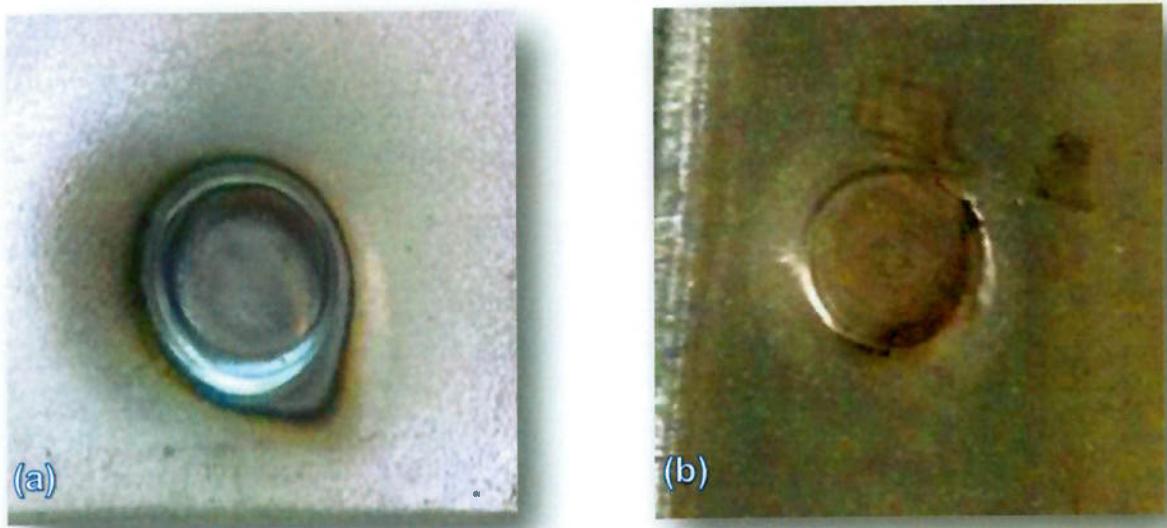


Figura 3.50 - Indentação excessiva e solda fria (autoria própria).

3.3.22.4. Expulsão de material:

Expulsão é a perda de metal fundido, resultado pelo excesso de calor geralmente causado pelo excesso de corrente e força de fechamento insuficiente combinado com alinhamento incorreto dos eletrodos (RUIZ, 2005). A expulsão frequentemente é associada com outras descontinuidades, como porosidade interna excessiva, devido à perda de metal líquido (ZHANG, et al., 20012). As soldagens com expulsão são facilmente identificadas por inspeção visual do conjunto soldado através de traços característicos de metal injetado, seja pela interface eletrodo com a chapa ou pela interface chapa com chapa, a figura 3.51 mostra soldagens com expulsão de material (ZHANG, et al., 20012).



Figura 3.51 - Exemplos de soldagens com expulsão de material (autoria própria).

3.3.23. Descontinuidades internas:

Descontinuidades internas são aquelas que não afetam a resistência à fadiga do metal se estiverem localizadas inteiramente na porção central da solda, em contrapartida, é importante que não ocorram defeitos na periferia da solda onde as tensões de carregamento são concentradas. Tais descontinuidades possuem características particulares como poros, trincas, cavidades e em

alguns casos, inclusões metálicas. Quanto mais espessa a chapa, maior será a probabilidade de formação de pequenas cavidades no centro do ponto de solda. Tais cavidades serão mais pronunciadas em uns metais que em outros, devido a diferenças na força exercida pelos eletrodos no metal quente (RUIZ, 2005). Não são tão prejudiciais em condições normais, porém quando resulta em expulsão de metal fundido como mostrado na figura 3.52, diminui a área fundida e nesse caso, a cavidade torna-se prejudicial (RUIZ, 2005).

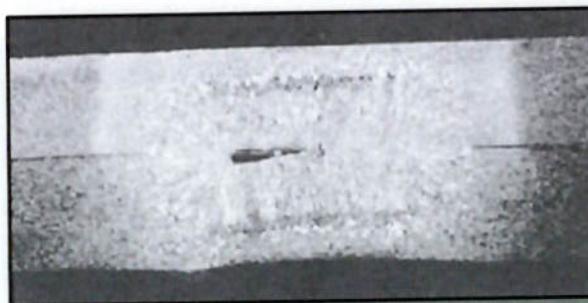


Figura 3.52 - Grande cavidade após expulsão de metal (ZHANG, et al., 2006).

Indentação excessiva também pode gerar separação excessiva, como mostrado na figura 3.53. Tal fenômeno pode ser evitado ao escolher corretamente parâmetros e configurações de soldagem adequadas, para atingir penetração e resistência suficiente (ZHANG, et al., 2006).

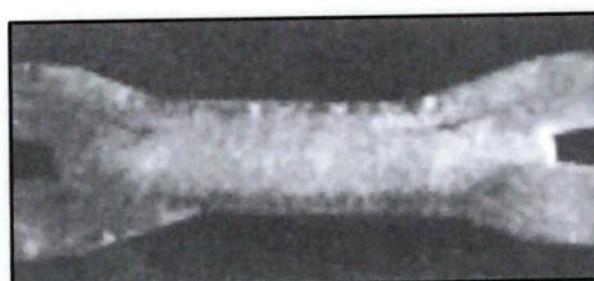


Figura 3.53 - Separação excessiva (ZHANG, et al., 2006).

Aquecimento excessivo e localizado pode iniciar a formação de buracos, associado com a formação de “bigodes” metálicos finos próximos a sua borda, figura 3.54. Chamados de “burn-through”, tais buracos reduzem a resistência mecânica do ponto devido à perda de metal pelo derretimento da superfície. Por se esperar baixa resistência, intervenção rápida se faz necessário. Os eletrodos utilizados nessas soldagens tendem a deteriorar-se rapidamente (ZHANG, et al., 2006).

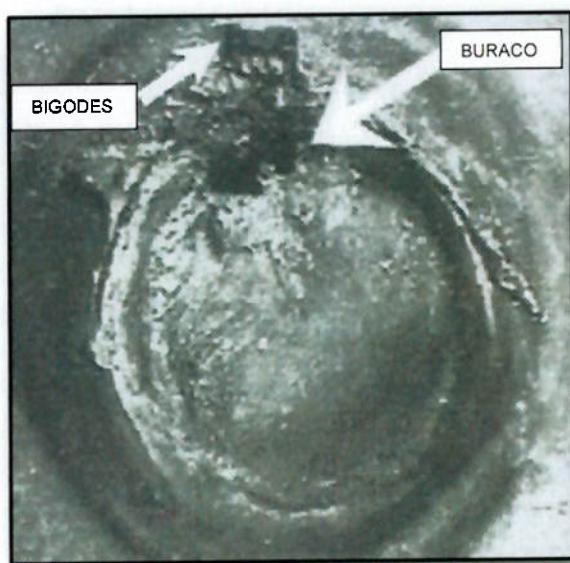


Figura 3.54 - Buracos e “bigodes” na superfície de um ponto de solda (ZHANG, et al., 2006).

A norma DIN 8524 de 1979 apresenta de forma detalhada e prática uma tabela com a maioria dos defeitos citados, assim como as causas e soluções para os mesmos, como mostrado na tabela 3.8 (RUIZ, 2005).

Tabela 3.8 - Tipos de defeitos e causas na soldagem por pontos. Adaptado de (RUIZ, 2005).

CAUSA	PARÂMETROS			CONDIÇÕES DO ELETRODO			PEÇA SOLDADA		OBS:	
	DEFEITO	CORRENTE	TEMPO	FORÇA	DIÂMETRO & PONTA	SUPERFÍCIE	MATERIAL E RESFRIAM.	SUPERFÍCIE	AJUSTE	
RESISTÊNCIA INSUFICIENTE	REDUZIDA	CURTO	ELEVADA	MUITO GROSSO E PONTA ROMBUDA	PONTA SUJA OU DEFORMADA			SUJA	RUIM	
EXPULSÃO INTERNA	ELEVADA		REDUZIDA					SUJA	RUIM	CORRENTE DE SOLDAGEM NÃO ADEQUADO, TEMPO DE AJUSTE INSUFICIENTE
EXPULSÃO EXTERNA		LONGO			SUJA	RESFRIAM. INSUFICIENTE, MAT. INADEQUADO	SUJA OU REVESTIDA	RUIM		INÉRCIA ALTA NO SISTEMA DE FORÇA
PROFUNDA INDENTAÇÃO DO ELETRODO OU EXAGERADA DESCOLORAÇÃO DO PONTO	ELEVADA	LONGO	REDUZIDA	MUITO FINO OU PONTA AGUDA		RESFRIAM. INSUFICIENTE				
DIÂMETRO PEQUENO DA INDENTAÇÃO DO ELETRODO	REDUZIDA	LONGO	ELEVADA	MUITO FINO				SUJA		
DIÂMETRO GRANDE DA INDENTAÇÃO DO ELETRODO	ELEVADA	LONGO	REDUZIDA	MUITO FINO				SUJA		
DESVIO DE FORMA DO PONTO			REDUZIDA	PONTA DEFORMADA				SUJA	RUIM	POSICIONAMENTO DE SALINHAMENTO DOS ELETRODOS
FORMAÇÃO DE LIGA NO ELETRODO OU NA PEÇA	ELEVADA	LONGO	REDUZIDA	MUITO FINO	SUJA	RESFRIAM. INSUFICIENTE, MAT. INADEQUADO	SUJA OU REVESTIDA			TEMPO INSUFICIENTE/INÉRCIA ALTA NO SISTEMA DE FORÇA
TRINCAS NA ZAC	ELEVADA	LONGO	REDUZIDA			RESFRIAM. EXAGERADO				TAXA DE RESFRIAMENTO ELEVADA
CAVIDADES OU POROS NO INTERIOR DO PONTO	ELEVADA	LONGO	REDUZIDA	MUITO FINO		RESFRIAM. EXAGERADO				CONFIGURAÇÃO DE CORRENTE E FORÇA INADEQUADOS
ABERTURA DA CHAPA JUNTO AO PONTO	ELEVADA	LONGO	REDUZIDA					RUIM		

3.4. Considerações finais:

Quando o tema é a indústria automobilística, onde a estética e a segurança são itens fundamentais para a confiabilidade do produto final, o processo de soldagem por pontos que aparenta ser um processo operacional simples, apresenta na realidade como complexo e árduo. Condições de soldagem ideais ao longo do processo produtivo encontram diferentes barreiras técnicas que vai

da diferença de espessura das chapas utilizadas, posicionamento e proximidade com bordas de chapas, quantidade de chapas e seus revestimentos diversos, tipos de equipamentos assim como eletrodos de formatos diversos, materiais e ligas diferentes. Tais barreiras técnicas associadas a parâmetros inadequados contribuem para uma formação irregular do ponto de solda, expulsão de material ou fusão insuficiente do metal, resultando em soldagem sem qualidade e com baixa resistência mecânica.

Muitos estudos e pesquisas são realizados para o aprimoramento do processo, assim como a utilização em diferentes tipos de metais. Mesmo com a concorrência de outros tipos de processos para a produção em alta escala e soldagem em chapas de espessuras pequenas, o processo de soldagem por pontos será ainda muito utilizado na indústria.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Características dos corpos de provas e eletrodos utilizados nos experimentos:

4.1.1. Eletrodos segundo especificações da RWMA:

Os eletrodos utilizados para a soldagem dos corpos de prova são da classe 1 fabricados em cobre zircônio (Cu 99,7%; Zr 0,2%; impureza máxima 0,1%), estampado, endurecido à frio. As figuras 4.1 e 4.2 mostram os tipos de eletrodos utilizados. Tabela 4.1 apresenta a sua composição conforme RWMA.

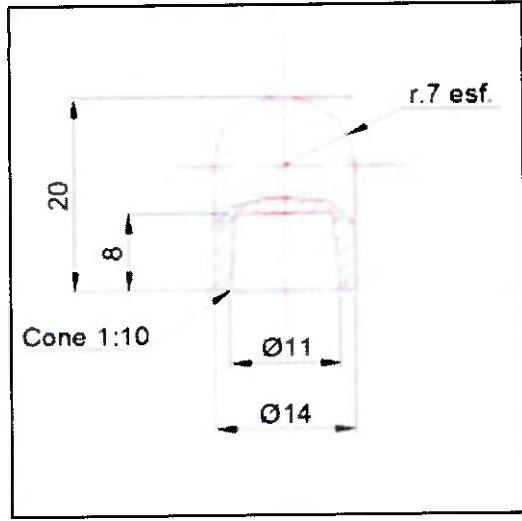


Figura 4.1 - Eletrodo esférico de 14 mm de diâmetro.

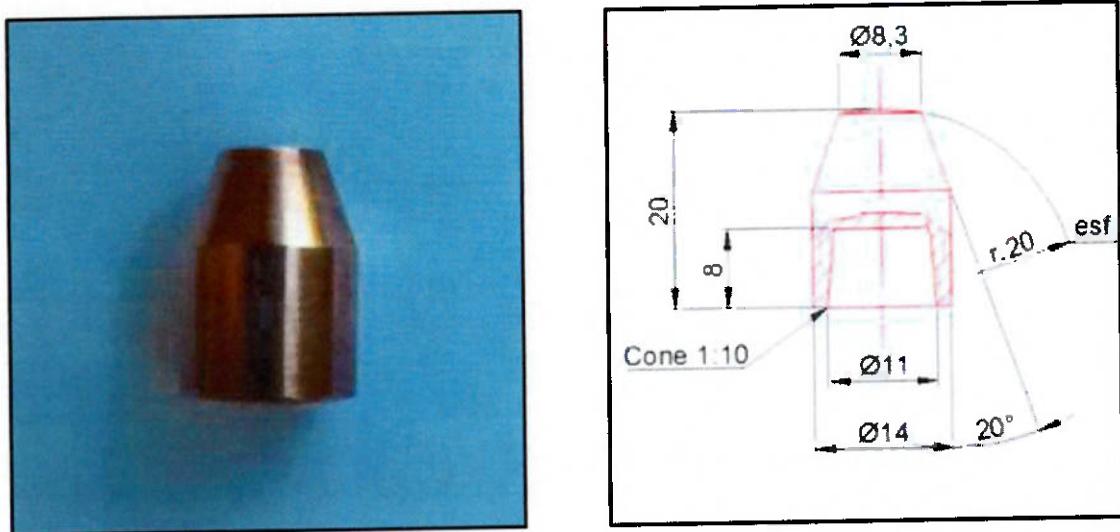


Figura 4.2 - Eletrodo cônico truncado de 14 mm de diâmetro.

Tabela 4.1 - Especificações do eletrodo conforme RWMA. Adaptado de (RWMA, 1989).

GRUPO	CLASSE DIN 44759	DUREZA (HBR Min.)	CONDUTIVIDADE (%IACS Min.)	MATERIAL DO ELETRODO	TEMPERATURA DE AMOLECIMENTO (°C)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (N/mm ²)
A	CLASSE 1	70/73	80/85%	COBRE - ZIRCÔNIO	475	530

MATERIAL A SER SOLDADO

Ligas de Al, ligas de Mg, materiais revestidos (galvanizados), latão e bronze.
 Aços laminados a frio e a quente. Aços inoxidáveis, latão e bronze de baixa condutividade e soldagem de aços galvanizados.
 Materiais de alta resistência como aços inoxidáveis, aços níquel cromo.

4.1.2. Chapa de aço galvanizada:

Material utilizado como corpo de prova para comparação de soldabilidade com eletrodos de diferentes geometrias foi o aço DC04 (1.0338) - EN10130 com 1.20 mm de espessura.

Processo de galvanização por eletrólise, que ocorre pela transferência de zinco sobre a chapa de aço. Através da deposição do zinco em substrato aquoso contendo sais de zinco, por meio de influência de um campo elétrico. A tabela 4.2 mostra as propriedades mecânicas e químicas do material.

Tabela 4.2 - Composição química e propriedades mecânicas da chapa de aço.

SIGLA	REVESTIMENTO	LIMITE DE ESCOAMEN.	ALONGAM.	LIMITE DE RESISTÊNCIA	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% peso)				
					C	Si	Mn	P	S
EN10130	Galvanizado	220	40	350	0,08	0,02	0,4	0,030	0,03

As dimensões dos corpos de prova foram baseadas conforme norma EN ISO 14273, de acordo com a espessura de 1,20mm, como mostrado nas figura 4.3 e 4.4.

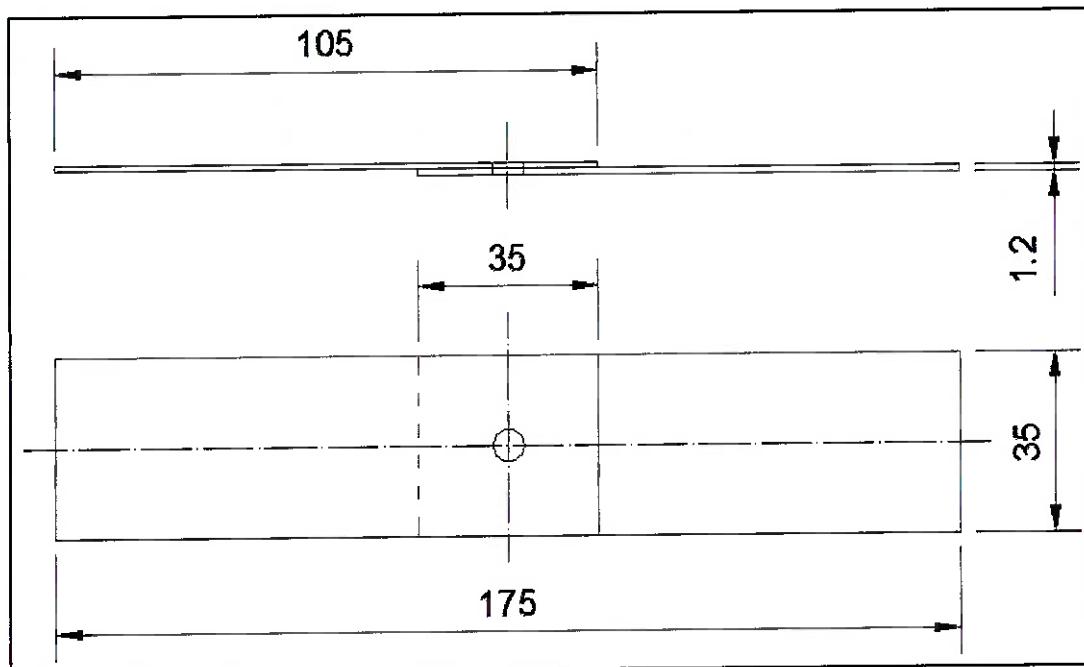
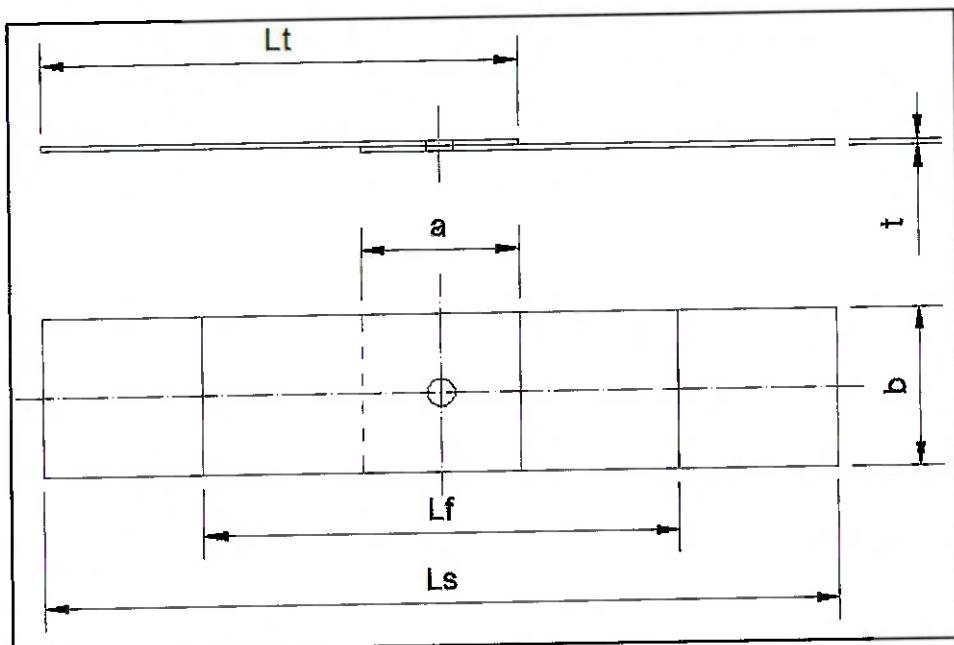


Figura 4.3 - Dimensões finais dos corpos de prova conforme a espessura da chapa.



DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA CONFORME NORMA EN ISO 14273

t (espessura - mm)	a	b	Ls	Lf	Lt
0,5 a 1,5	35	45	175	95	105
1,5 a 3,0	46	60	130	105	138
3,0 a 5,0	60	90	260	120	160
5,0 a 7,5	80	120	300	140	190
7,5 a 10	100	150	320	160	210

Figura 4.4 - Dimensões dos corpos de prova conforme Norma EN ISO 14273.

Para a definição da janela operacional (diagrama de soldabilidade), foram utilizados 84 pares de chapas galvanizadas de 110 mm x 35 mm x 1,20 mm, devidamente fixadas em suporte adaptado isolado com placas de Celeron, evitando assim qualquer tipo de desvio ou fuga de corrente, conforme mostrado na figura 4.5. Para realizar a “quebra” das soldas para a realização das medições dos pontos, as chapas utilizadas foram confeccionadas para facilitar

a fixação ao torno de bancada e encaixe na alavanca construída para tal finalidade, as figuras 4.6 e 4.7 mostram detalhes das chapas e da alavanca.



Figura 4.5 - Chapas utilizadas para a definição do diagrama de soldabilidade fixadas em suporte adaptado e isolado.

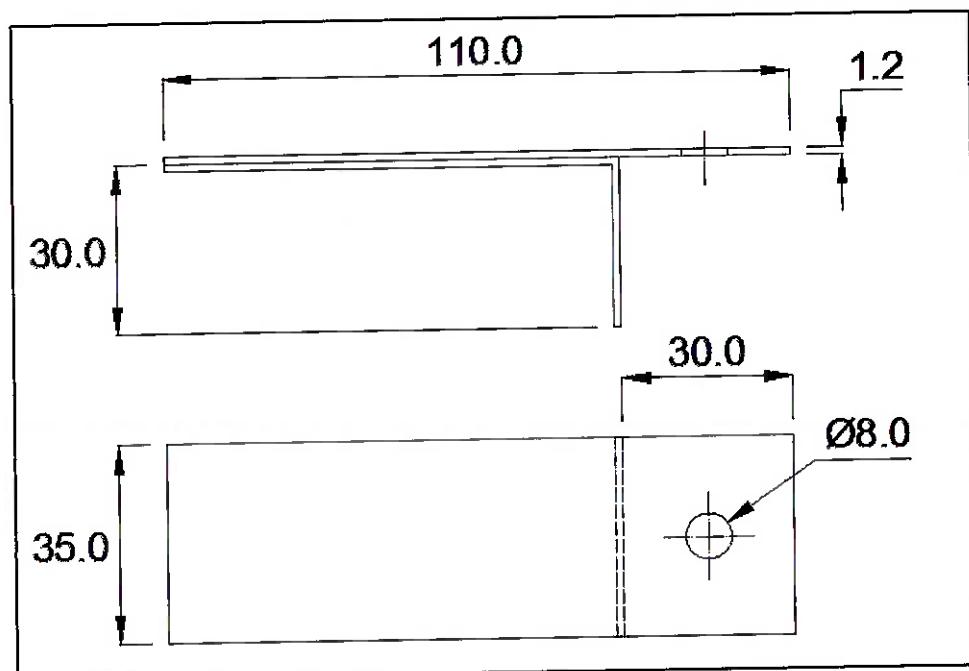


Figura 4.6 - Desenvolvimento das chapas para testes de arrancamento para determinação das janelas operacionais.

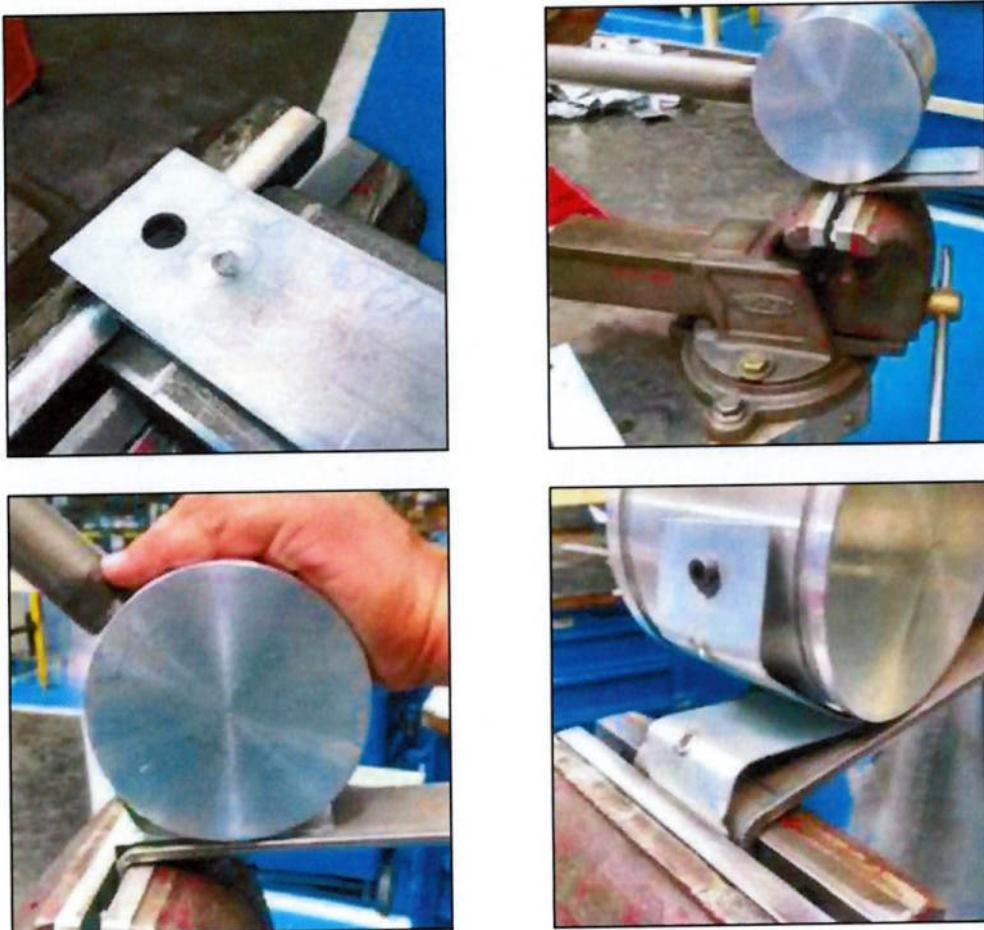


Figura 4.7 - Teste de arrancamento utilizado para determinação das janelas operacionais.

4.2. Equipamento de soldagem:

Para a realização das soldagens, tanto para os corpos de provas quanto para a elaboração dos diagramas de soldabilidade, foi utilizado uma pinça pneumática de soldagem tipo "C", mostrado na figura 4.8, desenvolvida pela CMW Automotiva Ltda. modelo C472, com capacidade de até 3800 N de força de fechamento dos eletrodos, refrigerada por fluxo de água gelada de aproximadamente 5,5 l/min, incorporada com transformador de soldagem da marca FASE modelo J-60-10-5,4-400-TM de CA e de 60 Hz, controlador *Medar* modelo 3015/T93300 com potência nominal de 95 kVA.



Figura 4.8 - Pinça pneumática de corrente alternada de soldagem por pontos utilizada nos testes.

O controle de acionamento pneumático e a movimentação da pinça para os testes de fadiga dos eletrodos e elaboração do diagrama de soldabilidade, foi realizado através de um manipulador robótico industrial ABB IRB 6640. Uma rotina para movimentação da pinça e soldagem das chapas foi desenvolvido especialmente para os ensaios, como mostrado na figura 4.9.



Figura 4.9 - Detalhe do robô manipulador ABB (a) e interface de programação e controle do robô *flex pendente* (b), utilizados para realização dos ensaios de soldagem.

4.3. Equipamentos de calibração:

O equipamento de soldagem passou por processo de calibração em todos os passos do experimento. Para a definição do diagrama de soldabilidade e para a soldagem dos corpos de provas foi utilizado um dinamômetro digital da Adis

Development, com capacidade de carga de 1360 kg, como mostrado na figura 4.10.

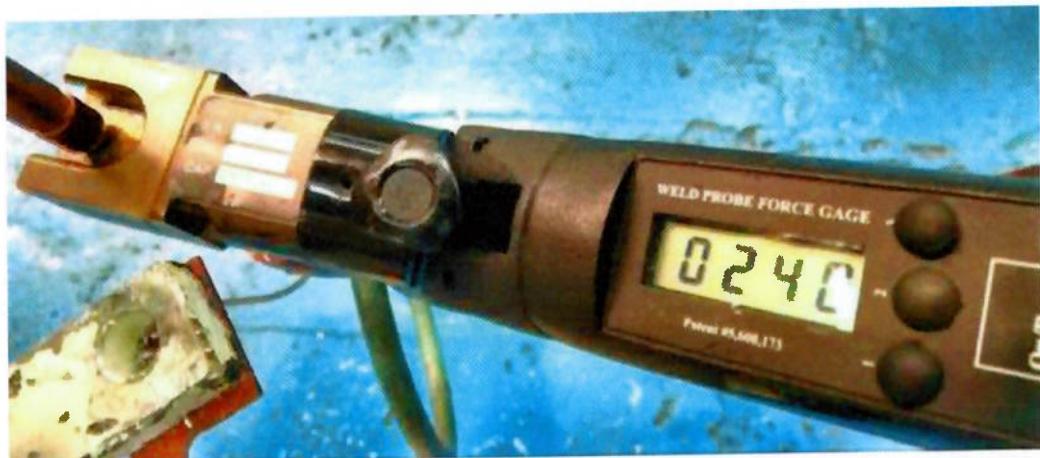


Figura 4.10 - Dinamômetro digital para verificação e calibração de força utilizada nos testes.

Para calibração e captura das grandezas de corrente de soldagem, foi utilizada uma bobina de Rogowski do tipo flexível, acoplada a uma interface de sinal Welder Tester Miyachi MM 315A, mostrado na figura 4.11.



Figura 4.11 - Bobina flexível Rogowski.

Para a medição do tempo e corrente de soldagem, utilizou-se interface de análise de parâmetros APSR-WS1 da Welding Science acoplado a um notebook Dell, mostrado na figura 4.12.



Figura 4.12- Analisador de corrente e tempo acoplado em Netbook Dell.

A tabela 4.3 apresenta um descritivo com os equipamentos utilizados para a definição e monitoramento dos parâmetros.

Tabela 4.3 - Descritivo dos equipamentos de calibração.

ITEM	EQUIPAMENTOS	DESCRÍÇÃO
1	Computador	Netbook Dell
2	Equipamento de leitura de corrente	Welder Tester Miyachi MM 315A
3	Calibrador de tempo e corrente	APSR-WS1 Welding Science
4	Dinamômetro digital	Adis Development cap.1360 kg

4.4. Determinação do diâmetro mínimo da seção ponto de solda d_L :

Para a definição do diâmetro mínimo do ponto de solda d_L , que vem a ser o diâmetro da área do plano de junção das partes dos componentes, que foram fundidos na soldagem e possuem características diferentes do metal de base pela sua microestrutura, é utilizado valores da norma, conforme figura 4.13 e tabela 4.4.

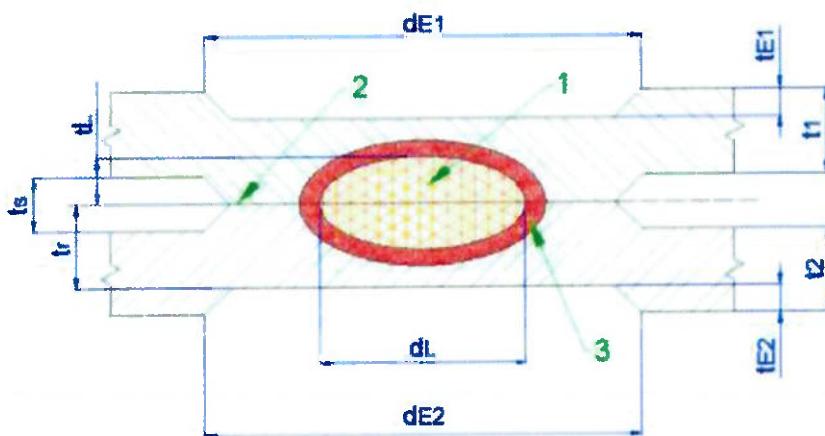


Tabela 4.4 - Dimensões e força mínima de tração conforme a norma.

Espessura mínima da chapa t_1 mm	Diâmetro da seção lenticular $d_L \text{min.} \geq 3,5\sqrt{t_1}$ mm	Diâmetro do ponto $d_p \text{min.} = 1,15 d_L \text{min}$ mm	Força mínima de tração de cisalhamento $F_{min.}$ kN
0,50	2,50	2,90	1,20
0,60	2,70	3,10	1,50
0,70	2,90	3,30	1,90
0,80	3,10	3,60	2,30
0,90	3,30	3,80	2,70
1,00	3,50	4,00	3,20
1,20	3,83	4,41	4,00
1,25	3,90	4,50	4,20
1,50	4,30	4,90	5,10
1,75	4,60	5,30	6,10
2,00	5,00	5,70	7,20
2,25	5,30	6,00	8,30
2,50	5,50	6,40	10,60
2,75	5,80	6,70	11,50
3,00	6,10	7,00	12,40
3,50	6,50	7,50	15,00
4,00	7,00	8,00	18,50

De acordo com a norma, o diâmetro da seção do ponto será:

$$d_L \text{min.} \geq 3,5\sqrt{t_1}$$

Para chapas de 1,20 mm utilizadas nos testes, o diâmetro mínimo da seção do ponto deverá ser de 4,41 mm e a força mínima de tração de cisalhamento é de aproximadamente 4,0 kN.

A medição do diâmetro mínimo d_L é realizada através de macrografias, como mostrado na figura 4.14.

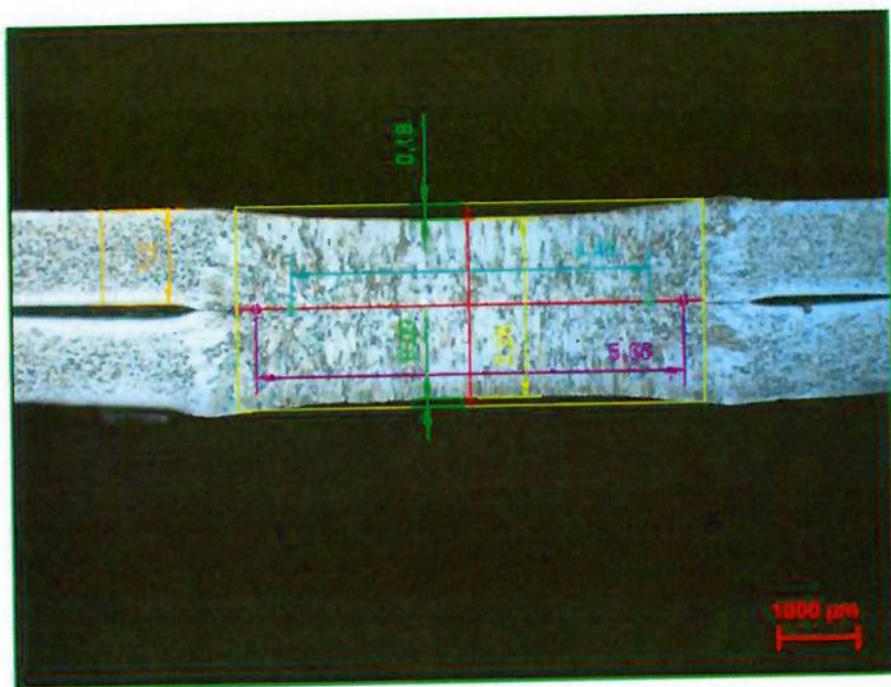


Figura 4.14 - Medições realizadas em macrografia do corpo de prova.

4.4.1. Determinação do diâmetro mínimo do ponto no ensaio de arrancamento (d_p):

O diâmetro do ponto d_p é o diâmetro médio da superfície de ruptura no plano de junção das partes do componente, sem a apresentação de zona de aderência, no caso de ruptura do plano de junção ou na ruptura por cisalhamento.

Apos os ensaios de arrancamento e de cisalhamento por tração, aprova-se ou não o ponto de solda. São realizadas medições do eixo principal e do eixo secundário (d_1 e d_2) da protuberância com o auxílio de um paquímetro, sendo a segunda medição de d_2 defasada em 90° , o valor médio é determinado a partir das duas medições, obtido pela equação:

$$d_p = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

A figura 4.15 demonstra a determinação do diâmetro do ponto d_p após os ensaios de arrancamento e de cisalhamento por tração e algumas condições encontradas após os ensaios.

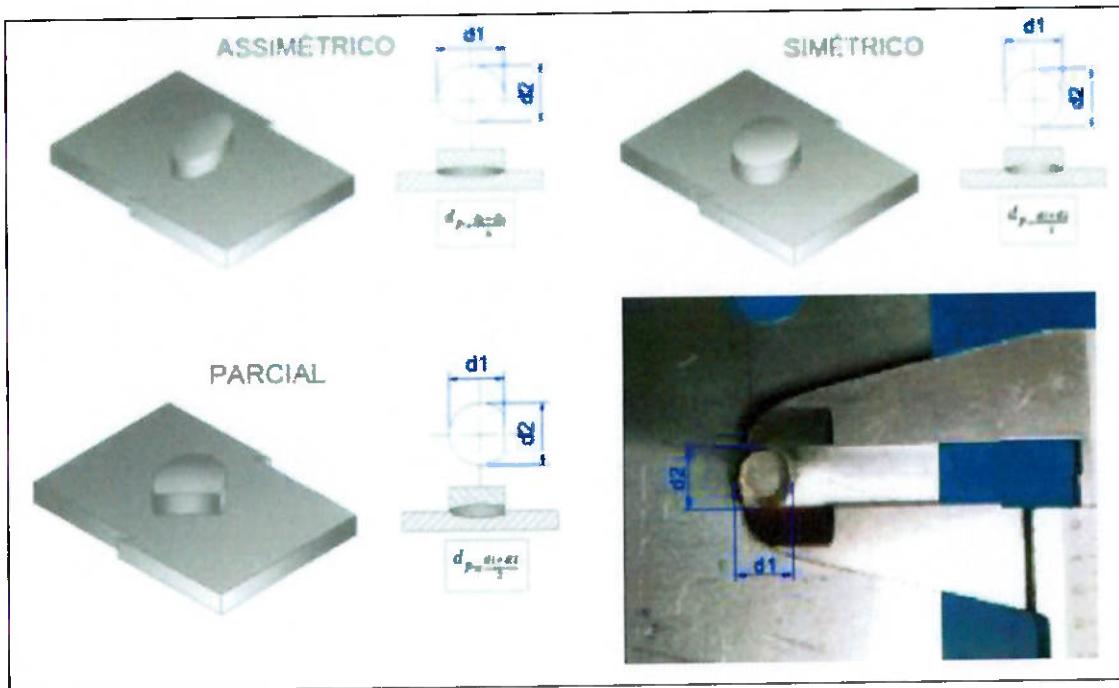


Figura 4.15 - Determinação do diâmetro do ponto d_p .

De acordo com a tabela 4.4, o diâmetro mínimo do ponto conforme norma será:

$$d_{p\min} \geq 1,15 d_{L\min}$$

Portanto para as chapas de 1,20 mm utilizadas nos ensaios, o diâmetro do ponto deverá ser de 4,41 mm.

4.5. Determinação dos parâmetros otimizados de soldagem através do diagrama de soldabilidade ou janela operacional:

Diagrama de soldabilidade ou janela operacional é uma área que comprehende os parâmetros de soldagem ideais para uma soldagem de qualidade. A janela operacional é configurada em função da corrente e tempo de soldagem para uma determinada força fixa. A janela operacional está situada entre os limites mínimos de corrente elétrica, resultando pontos mal soldados e pequenos e limites máximos de corrente, caracterizados pela expulsão de material.

Para a determinação dos diagramas de soldabilidade para cada conjunto de eletrodos, a força foi fixada em 290 kgf, de acordo com a RWMA, tempo de soldagem de 150ms (6 ciclos) à 350ms (21 ciclos) e corrente de soldagem de

8500A a 12500A. O primeiro teste foi realizado com uma corrente de 8500A e 150 ms. A cada ponto de solda concluído, era realizado o arrancamento do mesmo para a verificação do diâmetro mínimo. O limite mínimo da corrente de soldagem foi determinado aumentando gradualmente a corrente em intervalos de 500A, até que pelo menos três corpos de prova apresentassem o menor ponto de solda atingível, igual ou acima do valor especificado no teste de arrancamento conforme a norma. A partir dessa fase, foi acrescentado 200A para a determinação do limite mínimo da corrente de soldagem.

A partir desse ponto, foi acrescido gradualmente 500A até a primeira condição de expulsão de material. Esse ponto menos 200A é considerado o ponto de corrente máxima de soldagem, na qual não ocorre mais expulsão.

O mesmo procedimento foi repetido em tempos acrescidos de 50 ms, do ponto mínimo até a expulsão de material, utilizando todas as correntes de soldagem mencionadas. A figura 4.16 mostra um exemplo do diagrama de soldabilidade utilizado no ensaio.

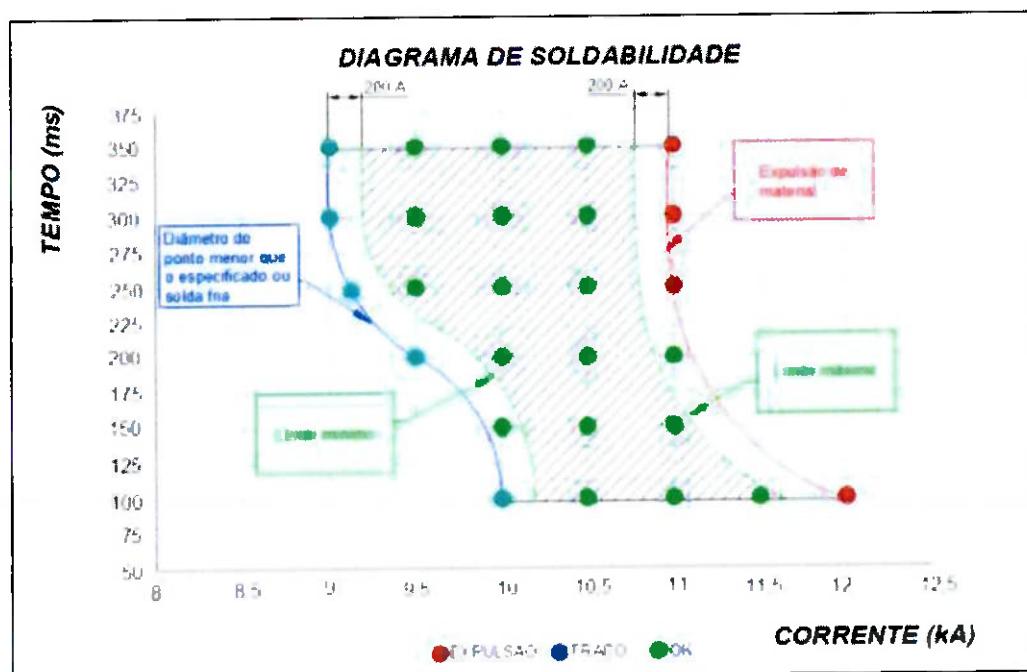


Figura 4.16 - Diagrama de soldabilidade ou “janela operacional” utilizada para determinação de limites mínimos e máximos de corrente de soldagem.

4.6. Chapas de trabalho para testes de rendimento dos eletrodos:

As soldagens necessárias para a realização do ensaio de rendimento dos eletrodos foram feitas em chapas de aço galvanizado de 325 x 250 x 1,2mm de espessura, mesma especificação das chapas utilizadas para os corpos de prova do ensaio, como mostrado na figura 4.17. As chapas suportaram 100 pontos de solda cada e foram dimensionadas para que cada ponto de solda fosse realizado um do lado do outro respeitando a distância mínima de segurança, que pela norma para a espessura de 1,2 mm é de 22 mm (7/8"), como mostrado na figura 4.18, evitando-se assim a corrente de desvio.



Figura 4.17 - Chapa utilizada no teste de rendimento dos eletrodos.

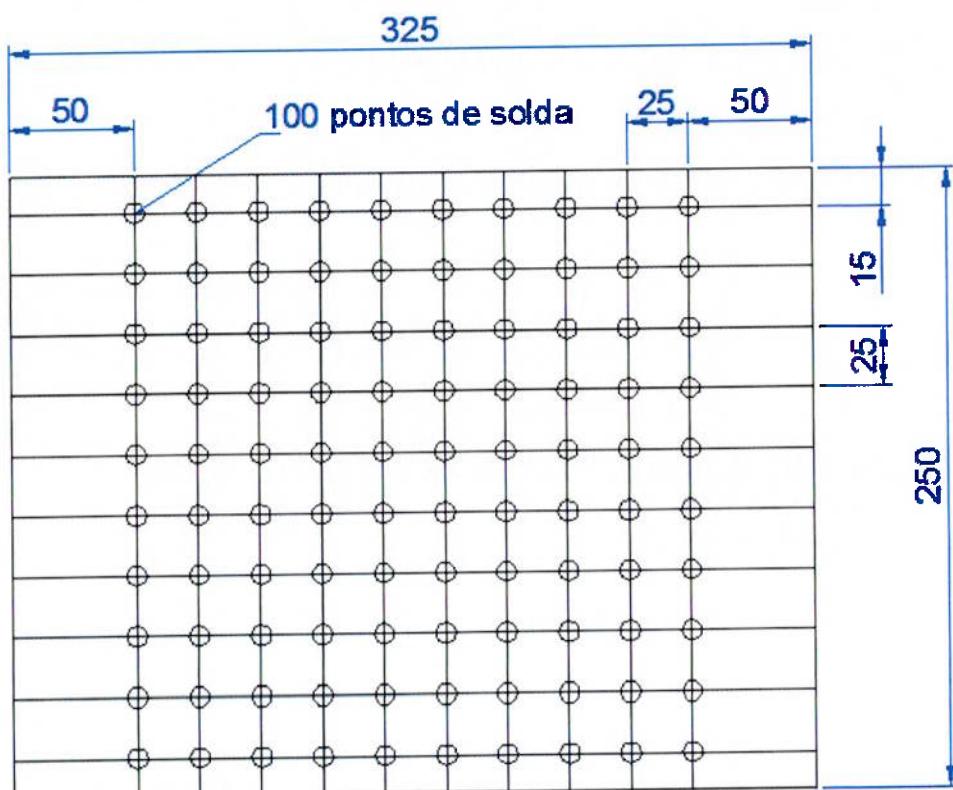


Figura 4.18 - Distâncias entre os pontos de solda realizados nos testes de rendimento dos eletrodos.

4.7. Parâmetros de soldagem utilizados:

Os parâmetros de soldagem mais adequados foram obtidos com a plotagem de dados dos diagramas de soldabilidade, assim como o ponto de solda ideal para a chapa utilizada nos ensaios, os valores utilizados para cada tipo de eletrodo são mostrados nas tabelas 4.5 e 4.6.

Tabela 4.5 - Parâmetros de soldagem utilizados nos ensaios para eletrodo de geometria esférica.

PARÂMETROS PARA SOLDAGEM COM ELETRODO ESFÉRICO DE Ø14mm						
CORRENTE DE SOLDAGEM	TEMPO DE SOLDAGEM	FORÇA APLICADA	PRÉ-PRESSÃO	PÓS-PRESSÃO	TEMPO DE QUEIMA DE Zn	CORRENTE DE QUEIMA DE Zn
10100 A	200 ms	290 kgf	150 ms	150 ms	120 ms	4000 A

Tabela 4.6 - Parâmetros de soldagem utilizados nos ensaios para eletrodos de geometria cônica.

PARÂMETROS PARA SOLDAGEM COM ELETRODO DE CONE TRUNCADO DE Ø14mm						
CORRENTE DE SOLDAGEM	TEMPO DE SOLDAGEM	FORÇA APLICADA	PRÉ-PRESSÃO	PÓS-PRESSÃO	TEMPO DE QUEIMA DE Zn	CORRENTE DE QUEIMA DE Zn
10200 A	250 ms	290 kgf	150 ms	150 ms	150 ms	5000 A

4.8. Ensaios realizados para comparação dos eletrodos cônicos e esféricos:

Para os testes de desgaste e rendimento de cada par de eletrodos foi realizado teste de arrancamento em 84 pares de corpos de provas específicos para a determinação dos diagramas de soldabilidade, sendo 42 pares para eletrodos de geometria cônica e 42 pares para geometria esférica, como mostrado na figura 4.19. Definido os parâmetros de soldagem adequados, iniciou-se os testes de rendimento, onde a cada 50 pontos de solda, corpos de prova normalizados eram separados para ensaios de cisalhamento, ensaios de macrografia, ensaios de ultrassom e verificação dimensional dos pontos de solda.



Figura 4.19 - Corpos de prova realizados nos ensaios.

4.8.1. Determinação da densidade de corrente de soldagem:

Foi utilizado o método de impressão com papel carbono para obter diâmetros das faces dos eletrodos, assim como as condições gerais da área de contato nos diferentes números de soldagens. Com as informações das impressões, realizadas com auxílio de folhas de papel carbono, cartolina e folha de sulfite, a densidade de corrente foi calculada através da área da face do eletrodo desgastado. O valor de área encontrado é o cociente da corrente de soldagem utilizada. A figura 4.20 apresenta medição da região desgastada do eletrodo.

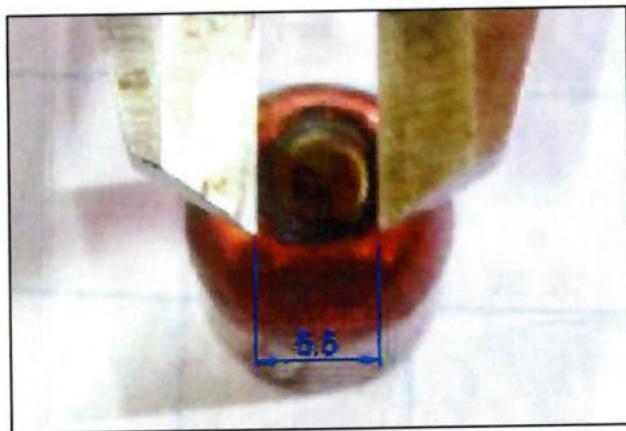


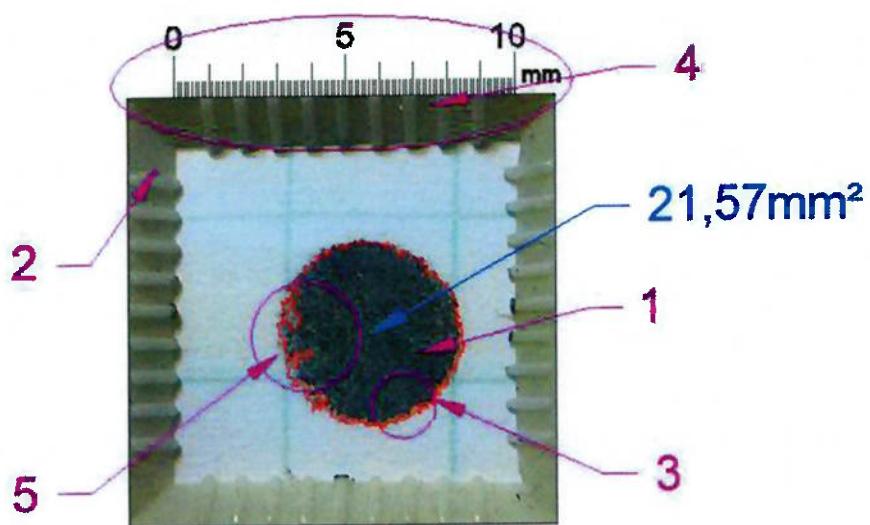
Figura 4.20 - Diâmetro da região desgastada do eletrodo.

Pelo método de impressão por folha de carbono, obtém-se a geometria correta e detalha com maior precisão os detalhes das irregularidades que se formam na face de contato do eletrodo. A figura 4.21 mostra impressões realizadas pelo método de impressão por folha de carbono.



Figura 4.21 - Impressões realizadas com auxílio de folha de papel carbono para dimensionamento de área da face do eletrodo.

Com auxílio de lente de aumento de 10x de um contador de fios, dispositivo utilizado na indústria têxtil e indústria de papeis e celulose para cálculo da gramatura da superfície de tecidos e de papeis, as impressões foram ampliadas e fotografadas. Tendo como objetivo facilitar e aumentar a precisão do cálculo da área da face do eletrodo, as imagens foram transferidas para o software AutoCAD®, mantendo a escala real da impressão. A partir dessa etapa foi possível realizar a vetorização do contorno da impressão obtendo o valor da área automaticamente. A figura 4.22 detalha uma das impressões vetorizadas no AutoCAD®.



1	Impressão da face de contato do eletrodo.
2	Lente conta fios com aumento de 10x.
3	Vectorização do contorno da impressão da face do eletrodo.
4	Base do conta-fios com 1 cm ² com graduação de 1 mm.
5	Detalhes de desgaste da face do eletrodo.

Figura 4.22 - Detalhe da impressão da face do eletrodo vetorizada no AutoCAD® (autoria própria).

4.8.2. Medição do desgaste dos eletrodos:

A cada 50 pontos de solda, a superfície desgastada dos eletrodos superiores e inferiores foram medidos com paquímetro e fotografados com auxílio do contador de fios com lente de aumento de 10x, adaptado a uma câmera digital. As imagens dos eletrodos foram transferidas para o software AutoCAD® mantendo a escala dimensional real dos eletrodos usando a base graduada do contador de fios como referência. A partir daí, foi possível realizar a vetorização das imagens no AutoCAD® e realizar as medições das áreas desgastadas com

maior precisão. A figura 4.23 mostra exemplo de uma imagem vetorizada da face do eletrodo.

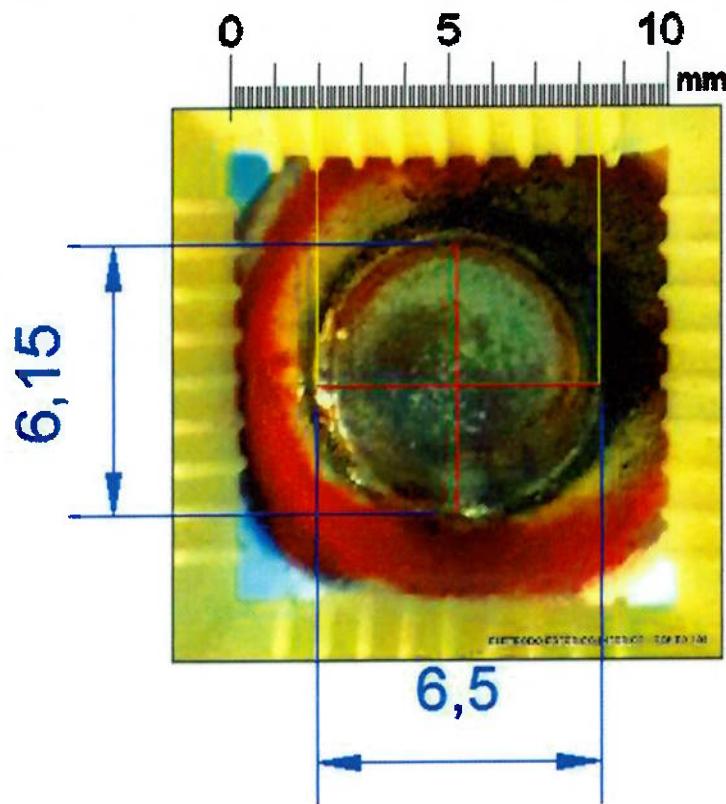


Figura 4.23 - Detalhe de imagem da face do eletrodo vetorizada no AutoCAD®

O método utilizado, mesmo que simples, garantiu uma medição precisa e eliminou a necessidade de sacar os eletrodos do equipamento de soldagem, tendo os mesmos na mesma posição até o final do procedimento.

4.8.3. Ensaio por ultrassom:

Todos os corpos de prova foram submetidos a ensaios por ultrassom para análise da integridade das soldas e verificação de espessura. Foi utilizado um sistema de teste ultrassônico USLT 2000 com software dedicado *Krautkramer*. As figuras 4.24 e 4.25 mostram detalhes do equipamento e da interface.

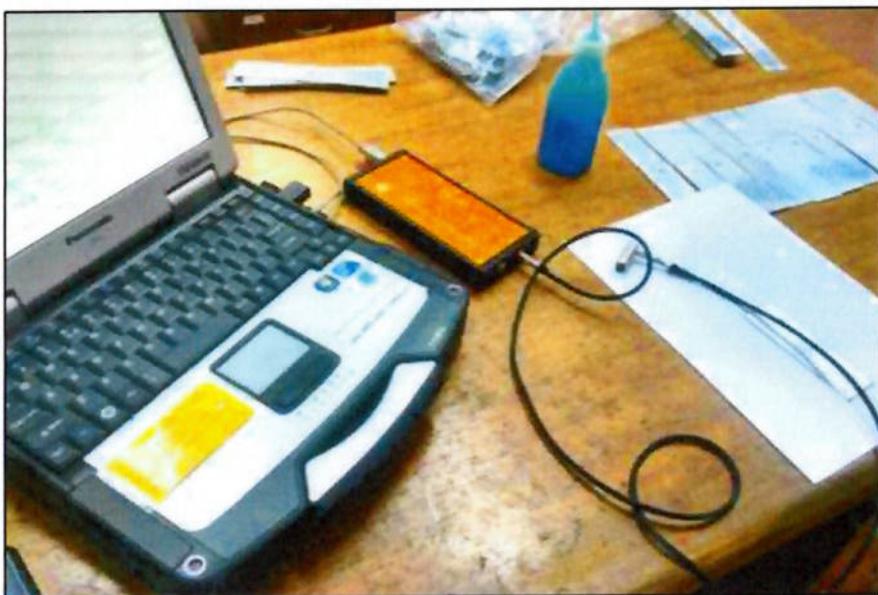


Figura 4.24 - Equipamento ultrassônico utilizado nos testes não destrutivos.

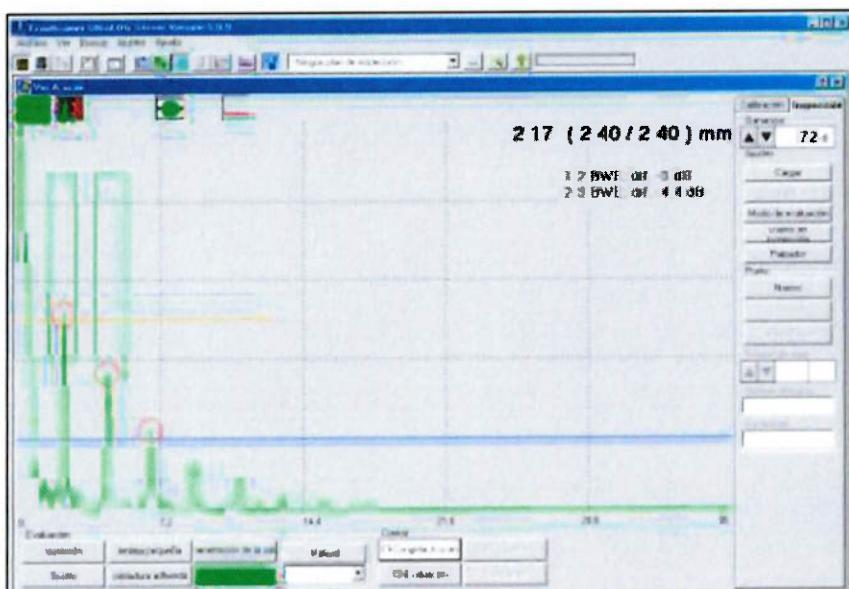


Figura 4.25 - Interface do software do ensaio por ultrassom.

4.8.4. Ensaio de tração:

Ensaio mecânico destrutivo realizado em equipamento de tração Emic DL20000 com capacidade de carga de 200 kN a uma velocidade de 500 mm/min com utilização de extensometria de 2 canais.

Nos testes foram gerados gráficos pelo software Tesc versão 3.03, a fim de observar as forças máximas atingidas pelos pontos de solda antes de seu rompimento, mostrado na figura 4.26.

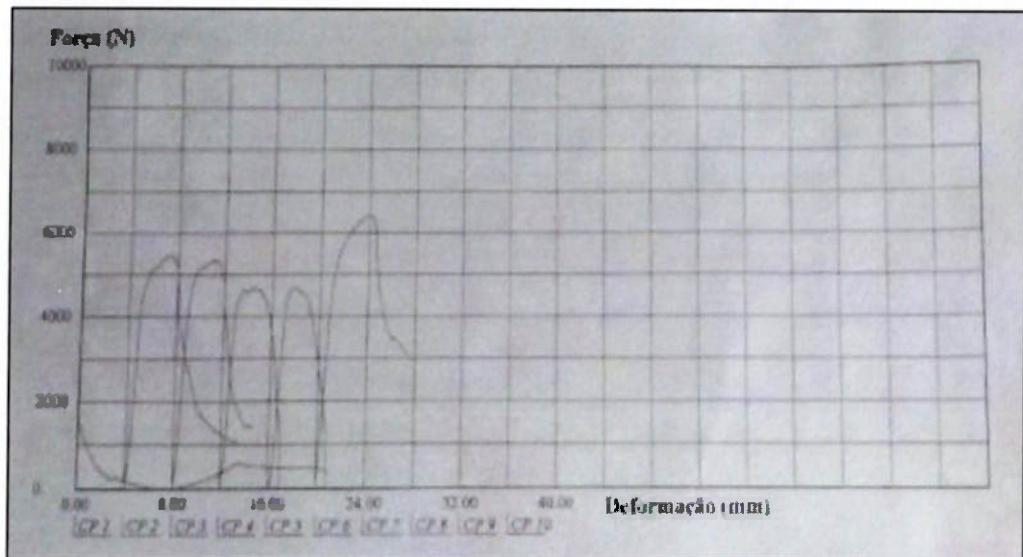


Figura 4.26 - Gráfico gerado pelo equipamento de tração.

Os corpos de prova submetidos ao ensaio de tração são mostrados na figura 4.27.



Figura 4.27 - Corpos de prova submetidos ao ensaio de tração.

4.8.5. Ensaio de arrancamento para os corpos de prova com os parâmetros otimizados de soldagem:

Ensaio de arrancamento foi utilizado para determinar a qualidade do ponto de solda. De baixo custo e de fácil execução é muito usado no chão de fábrica para testes de controle de qualidade. Os testes foram executados conforme a norma, os corpos de prova preparados conforme a norma EM ISO 14273, mostrados na figura 4.3 e dimensionados conforme figura 4.15. A figura 4.28 mostra detalhes dos ensaios.



Figura 4.28 - Sequencia do ensaio por arrancamento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

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

O diagrama de soldabilidade foi realizado levando-se em conta o diâmetro do ponto de solda e a força mínima da junta após o teste de arrancamento. As tabelas 5.1 e 5.2 apresentam os dados de corrente de soldagem, tempos de soldagem e diâmetros dos pontos de solda das chapas utilizando os eletrodos cônicos e esféricos.

Tabela 5.1 - Dados dos parâmetros utilizados para elaboração do diagrama de soldabilidade do aço com eletrodo de geometria esférica.

ELETRODO ESFÉRICO 14 mm							
CORRENTE A	TEMPO ms	CONDIÇÃO	DIÂMETRO mm	CORRENTE A	TEMPO ms	CONDIÇÃO	DIÂMETRO mm
10,0	50	FRACO	4,30	9,0	200	FRACO	4,35
10,5	50	OK	5,55	10,0	200	OK	6,60
11,0	50	OK	5,55	10,5	200	OK	7,05
12,0	50	EXPULSÃO	5,75	11,0	200	EXPULSÃO	6,60
9,5	50	FRACO	3,05	12,0	200	EXPULSÃO	7,15
11,5	50	OK	5,60	9,5	200	OK	5,00
12,5	50	EXPULSÃO	5,80	11,5	200	EXPULSÃO	6,75
10,0	100	OK	5,85	9,0	250	FRACO	4,40
10,5	100	OK	5,90	10,0	250	OK	6,95
11,0	100	OK	5,90	10,5	250	OK	7,05
12,0	100	EXPULSÃO	5,95	11,0	250	EXPULSÃO	6,80
9,5	100	FRACO	3,80	12,0	250	EXPULSÃO	7,10
11,5	100	EXPULSÃO	6,70	9,5	250	OK	5,00
12,5	100	EXPULSÃO	6,20	11,5	250	EXPULSÃO	6,90
9,0	150	FRACO	4,25	11,0	300	EXPULSÃO	7,60
10,0	150	OK	5,95	9,0	300	FRACO	4,40
10,5	150	OK	6,90	10,0	300	OK	5,85
11,0	150	OK	6,25	10,5	300	OK	7,55
12,0	150	EXPULSÃO	6,75	12,0	300	EXPULSÃO	7,55
9,5	150	FRACO	3,95	9,5	300	OK	4,20
11,5	150	EXPULSÃO	6,25	11,5	300	EXPULSÃO	7,10

Tabela 5.2 - Dados dos parâmetros utilizados para elaboração do diagrama de soldabilidade do aço com eletrodo de geometria cônica.

ELETRODO CÔNICO 14 mm							
CORRENTE A	TEMPO ms	CONDIÇÃO	DIÂMETRO mm	CORRENTE A	TEMPO ms	CONDIÇÃO	DIÂMETRO mm
12,5	50	EXPULSÃO	6,75	11,5	200	EXPULSÃO	7,40
9,5	50	FRACO	3,85	8,5	200	FRACO	4,15
10	50	FRACO	4,35	9	200	FRACO	4,40
10,5	50	OK	6,35	10	200	OK	6,75
11	50	OK	6,40	10,5	200	OK	7,05
12	50	OK	6,45	11	200	OK	7,20
11,5	50	OK	6,45	9,5	200	OK	6,30
9	100	FRACO	3,90	11,5	250	EXPULSÃO	7,55
9,5	100	FRACO	4,20	8,5	250	FRACO	4,20
10	100	FRACO	4,40	9	250	FRACO	4,35
10,5	100	OK	6,70	10	250	OK	7,05
11	100	OK	6,75	10,5	250	OK	7,15
11,5	100	OK	7,40	11	250	OK	7,45
12	100	EXPULSÃO	6,75	9,5	250	OK	6,55
12	150	EXPULSÃO	6,95	11,5	300	EXPULSÃO	7,70
11,5	150	EXPULSÃO	7,40	8,5	300	FRACO	4,25
9	150	FRACO	4,15	9	300	FRACO	4,40
10	150	OK	6,80	10	300	OK	7,30
10,5	150	OK	6,90	10,5	300	OK	7,35
11	150	OK	7,05	11	300	OK	7,35
9,5	150	FRACO	4,15	9,5	300	OK	6,45

Com a realização da plotagem dos dados de diâmetro dos pontos de solda nos diagramas de soldabilidade, nota-se que o diâmetro do ponto para limite mínimo e diâmetro do ponto para limite máximo estabilizou com tempo de 200ms ou 12 ciclos para os eletrodos de geometria esférica e 216ms ou 13 ciclos para os eletrodos de geometria cônica. Para eletrodos de geometria esférica, para o tempo de 200ms, as correntes de soldagem máximas e mínimas ficaram entre 9600A e 10800A. Para eletrodos de geometria cônica, tais correntes ficaram entre 9100A e 11100A. Os parâmetros para o experimento foram localizados a partir do maior grau de liberdade, ou seja, onde ocorre a estabilização do diâmetro do ponto, como

mostrado nas figuras 5.1, para eletrodos esféricos e figura 5.2, para eletrodos cônicos.

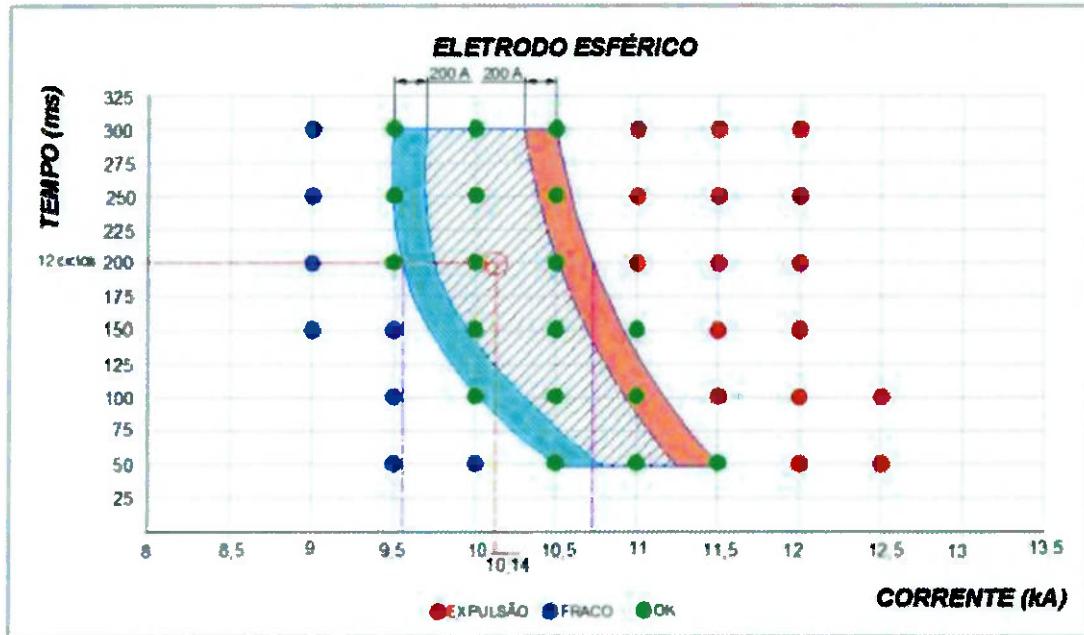


Figura 5.1 - Diagrama de soldabilidade para eletrodo de geometria esférica.

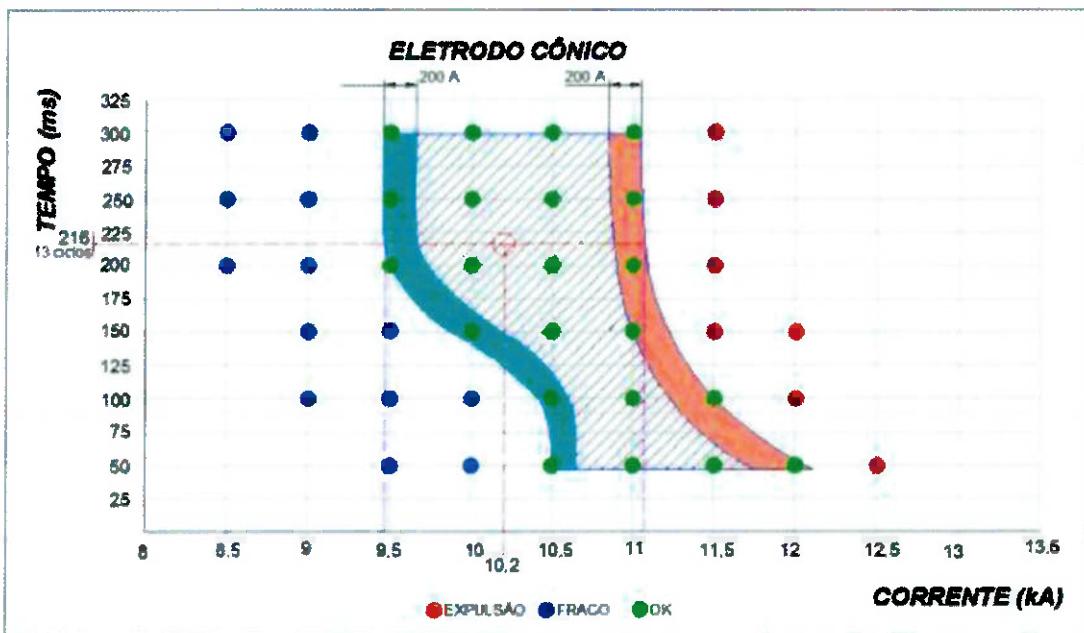


Figura 5.2 - Diagrama de soldabilidade para eletrodo de geometria cônica.

Apesar da densidade de corrente ser maior no eletrodo esférico, no estudo observa-se que a formação do ponto de solda conforme a norma começa com

correntes de soldagem elevadas, quando comparado com o eletrodo cônic. Este fato é devido a menor área de contato do eletrodo esférico. Ainda nas figuras 5.1 e 5.2 pode-se observar que a janela operacional do eletrodo esférico é mais estreita que a do eletrodo cônic, no que se refere à linha de medida máxima, onde é limitada pela expulsão de material. Tal fenômeno pode ser explicado pela maior área da face de contato do eletrodo cônic permitindo dessa maneira uma melhor contenção de material líquido.

Portanto, os parâmetros considerados ideais para a determinação de pontos de solda com qualidade são apresentados na tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Parâmetros ideais encontrados com auxílio dos diagramas de soldabilidade e utilizados na soldagem dos corpos de prova.

GEOMETRIA DO ELETRODO	CORRENTE	TEMPO		FORÇA
		A	ms	
ESFÉRICO	10140	200	12	290
CÔNICO	10200	216	13	290

5.2. Dimensões dos pontos de solda:

A figura 5.3, esquematizada as dimensões dos pontos de solda e a tabela 5.4 apresentam os dados obtidos:

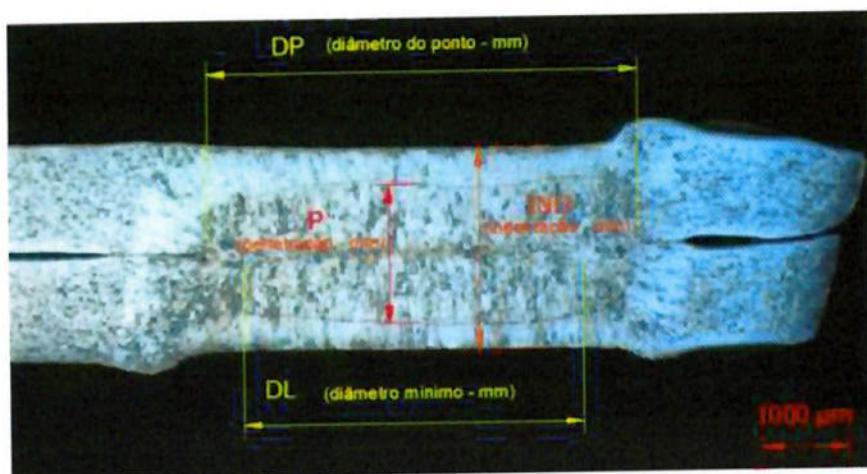


Figura 5.3 - Medições realizadas em uma macrografia de um ponto de solda.

Tabela 5.4 - Dimensões dos pontos de solda.

ELETRODO	TESTE	DP (mm)	DL (mm)	IND (mm)	TRAÇÃO (N)
ESFÉRICO	050	5,25	4,75	2,15	6220
	100	5,00	4,5	2,15	5443
	150	5,25			
	200	5,30	4,40	2,20	5339
	250	4,90			
	300	5,80	5,60	2,31	4693
	350	4,95			
	400	5,45	5,00	2,40	4725
	450	6,25			
	500	6,00	5,70	2,25	6403
CÔNICO	050	6,95	5,80	2,15	6996
	100	6,75	5,30	2,25	6070
	150	6,30			
	200	6,35	5,10	2,30	5894
	250	5,85			
	300	3,95	1,33	2,40	4725
	350	3,45			
	400	3,25	PONTO COLADO	PONTO COLADO	1984
	450	PONTO COLADO			
	500	PONTO COLADO	PONTO COLADO	PONTO COLADO	PONTO COLADO

5.3. Deformação dos eletrodos de acordo com a quantidade de pontos de solda:

O aumento do diâmetro das faces dos eletrodos aumenta consideravelmente com o aumento do número de pontos, consequentemente a densidade de corrente diminui na mesma proporção. As figuras 5.4 a 5.14 mostram a evolução das deformações dos eletrodos esféricos assim como o aumento progressivo da área da face de contato entre o ponto de solda 1 e o ponto de solda 500.

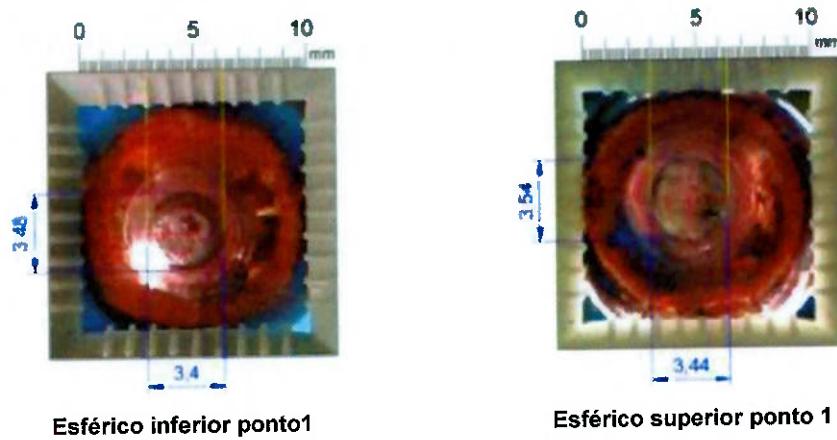


Figura 5.4 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos esféricos superior e inferior – ponto de solda 1.

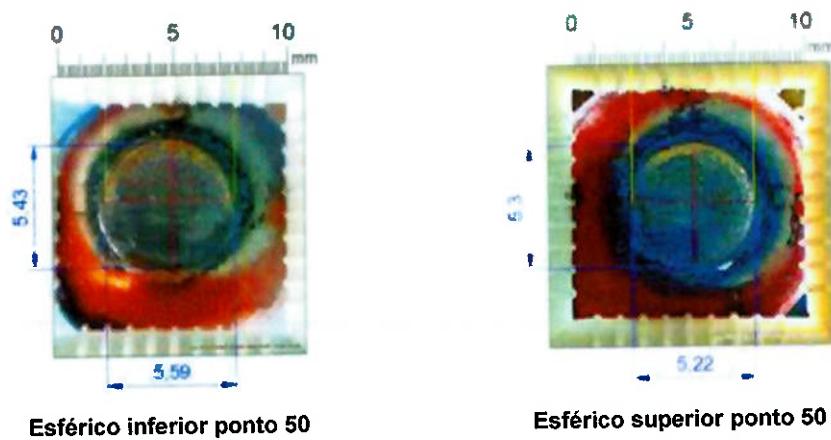


Figura 5.5 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos esféricos superior e inferior – ponto de solda 50.

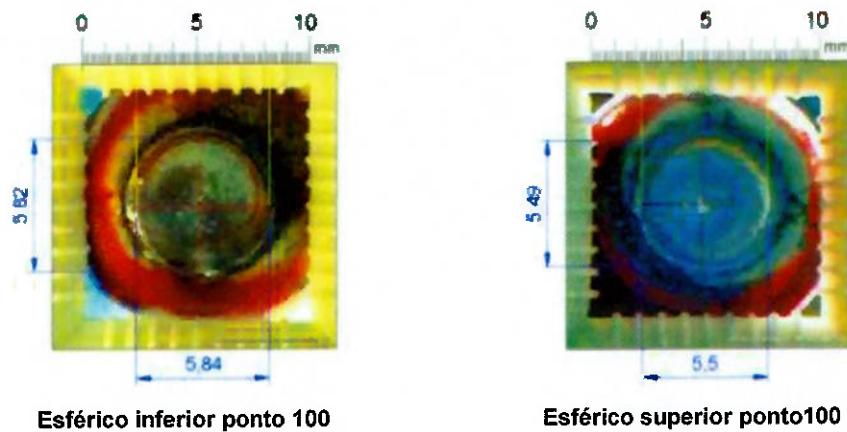


Figura 5.6 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos esféricos superior e inferior – ponto de solda 100.

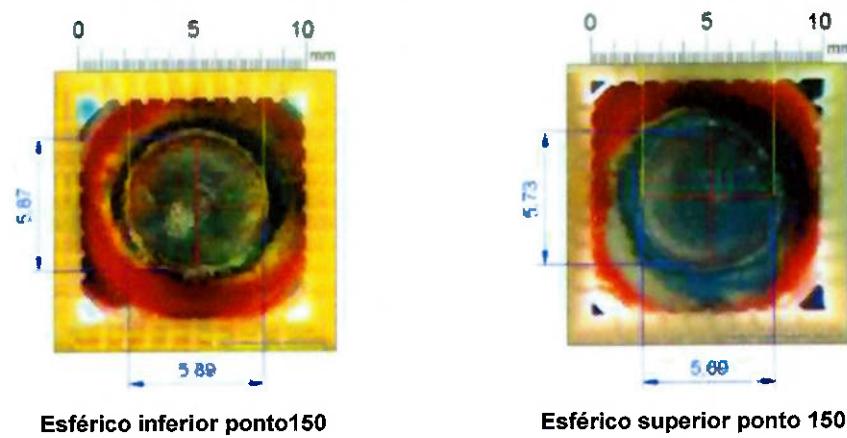


Figura 5.7 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos esféricos superior e inferior – ponto de solda 150.

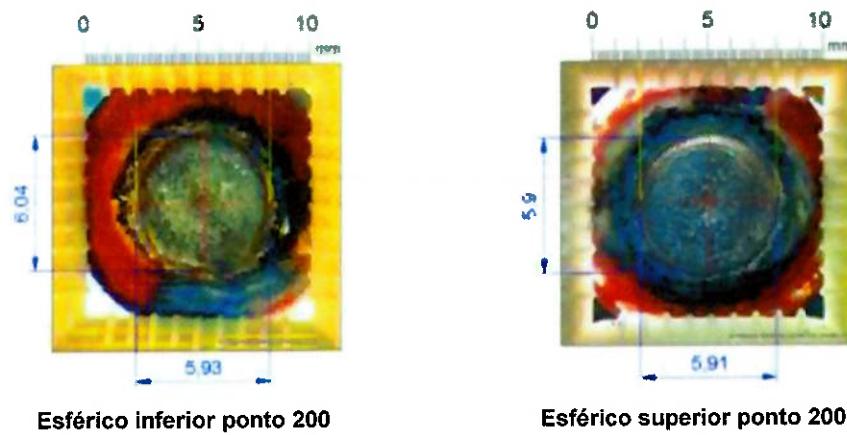


Figura 5.8 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos esféricos superior e inferior – ponto de solda 200.

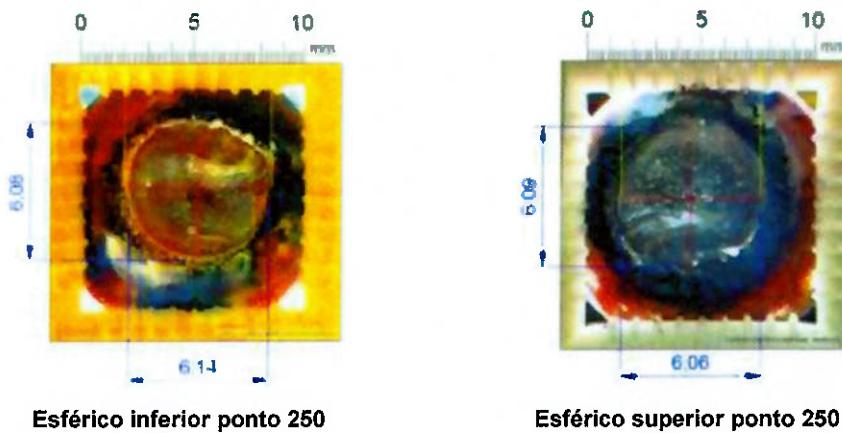


Figura 5.9 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos esféricos superior e inferior – ponto de solda 250.

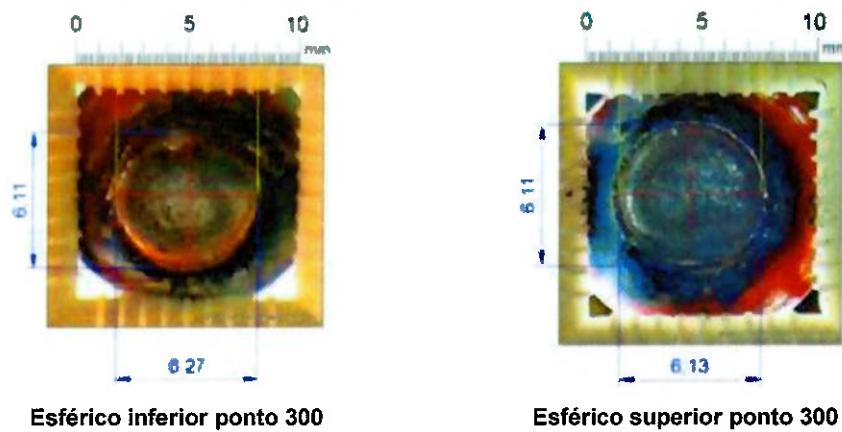


Figura 5.10 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos esféricos superior e inferior – ponto de solda 300.

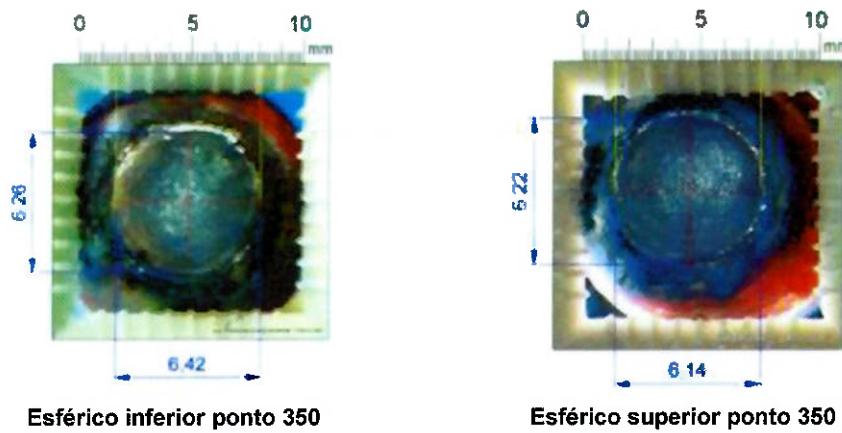


Figura 5.11 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos esféricos superior e inferior – ponto de solda 350.

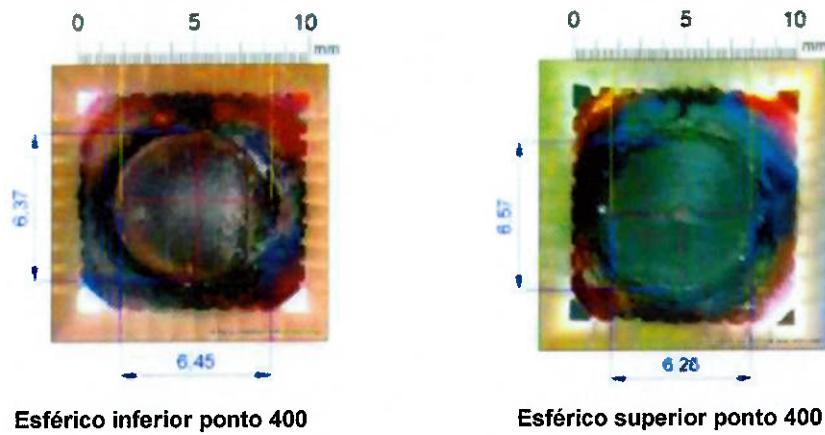


Figura 5.12 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos esféricos superior e inferior – ponto de solda 400.

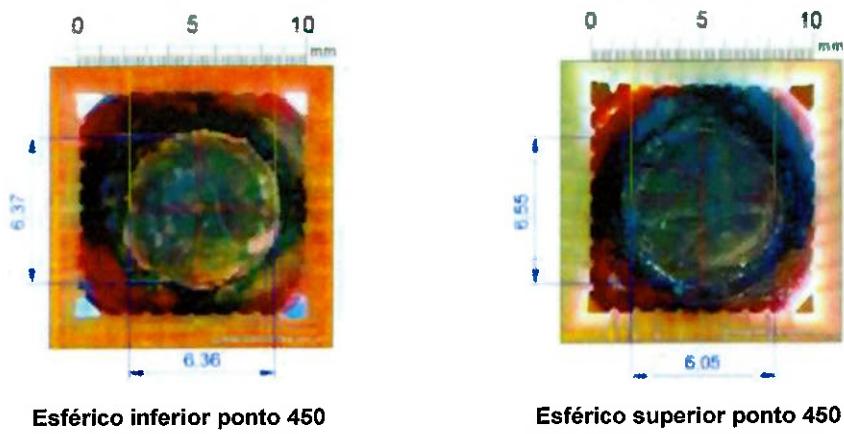


Figura 5.13 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos esféricos superior e inferior – ponto de solda 450.

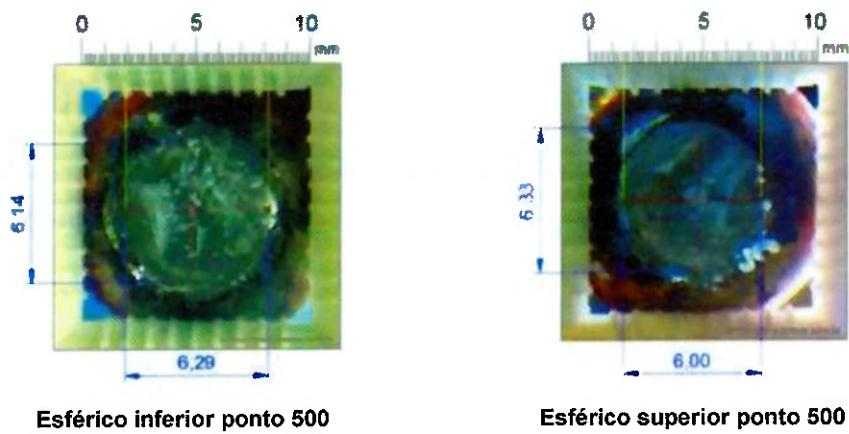


Figura 5.14 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos esféricos superior e inferior – ponto de solda 500.

A cada 50 pontos de solda, as faces dos eletrodos foram fotografadas e medidas para a possibilidade de análise da influência dos fatores nos indicadores dos resultados do processo. Foi estudado áreas das faces dos eletrodos, densidade de corrente e diâmetro do ponto de solda, em relação ao tipo de eletrodo e desgaste. As figuras 5.15 a 5.25 mostram a evolução das deformações dos eletrodos cônicos superiores e inferiores, assim como o aumento progressivo da área da face de contato entre o ponto de solda 1 e o ponto de solda 500.

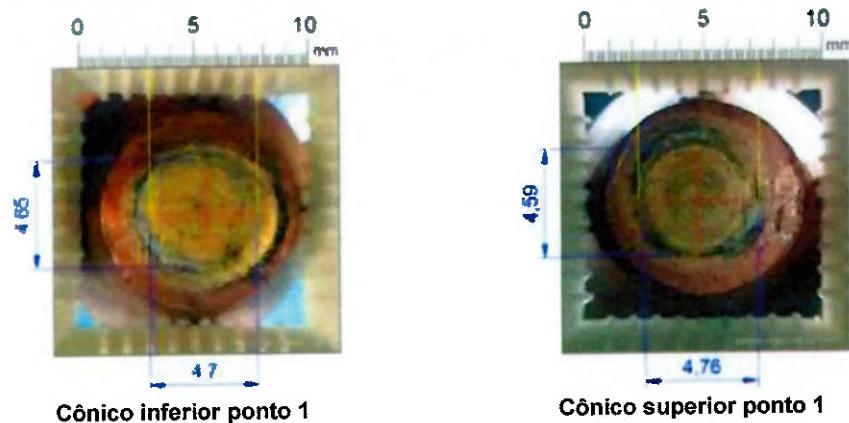


Figura 5.15 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos cônicos superior e inferior – ponto de solda 1.

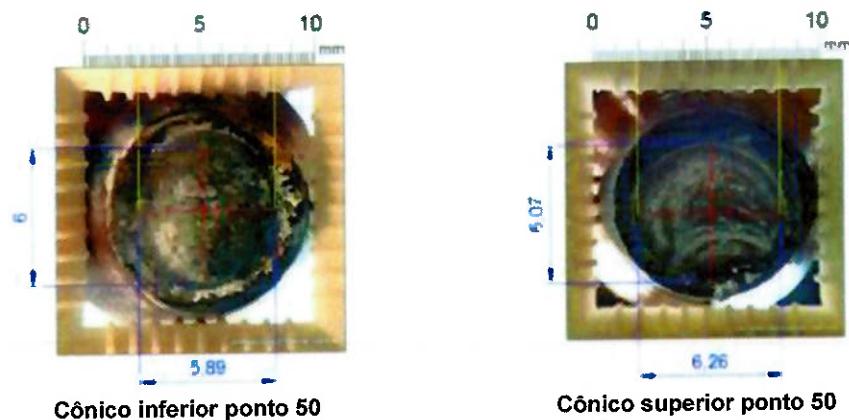


Figura 5.16 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos cônicos superior e inferior – ponto de solda 50.

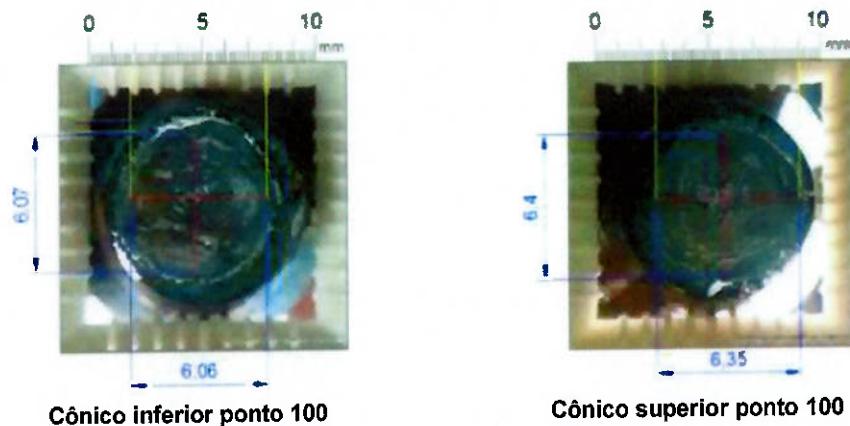


Figura 5.17 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos cônicos superior e inferior – ponto de solda 100.

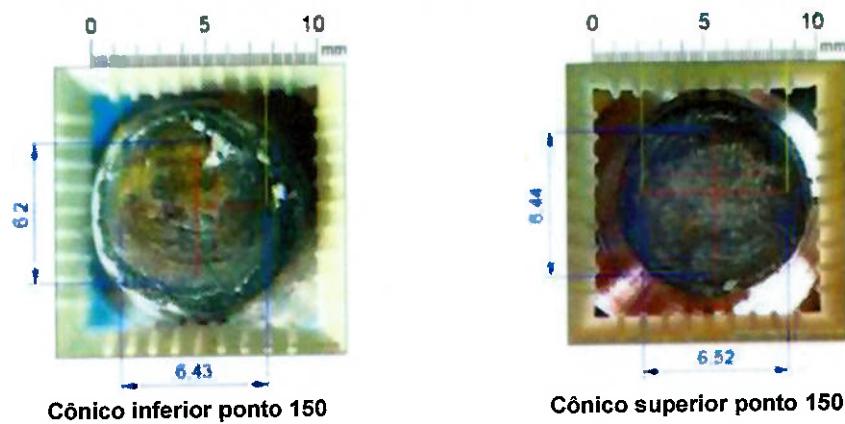


Figura 5.18 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos cônicos superior e inferior – ponto de solda 150.

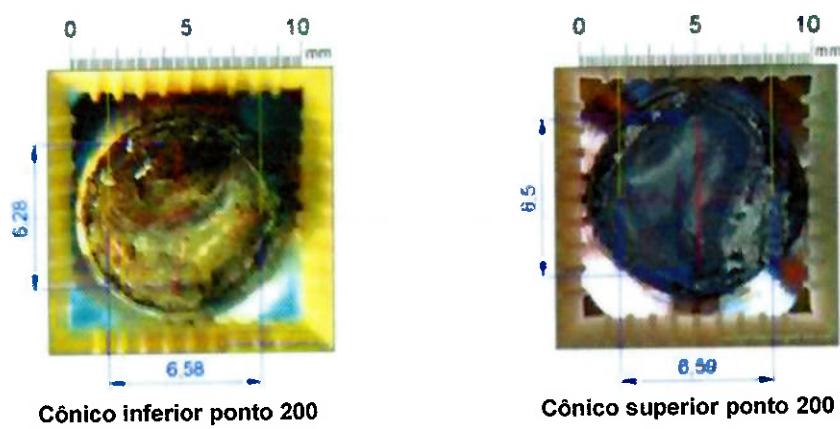


Figura 5.19 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos cônicos superior e inferior – ponto de solda 200.

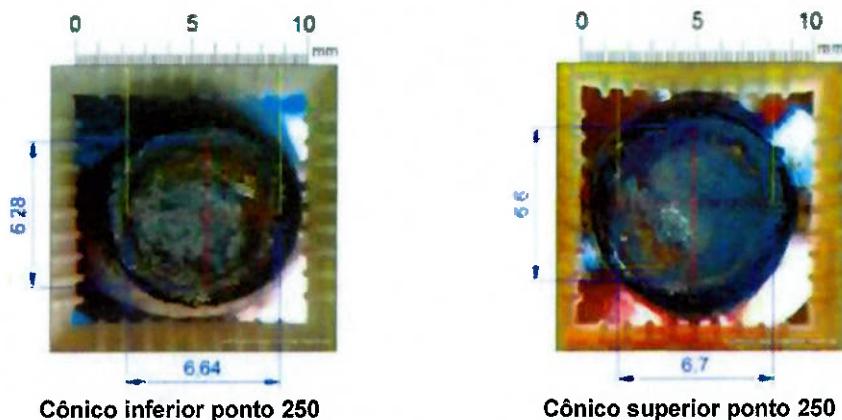


Figura 5.20 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos cônicos superior e inferior – ponto de solda 250.

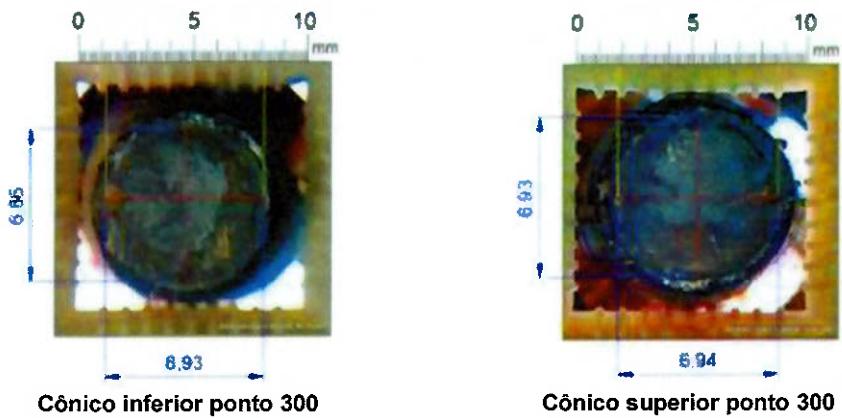


Figura 5.21 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos cônicos superior e inferior – ponto de solda 300.

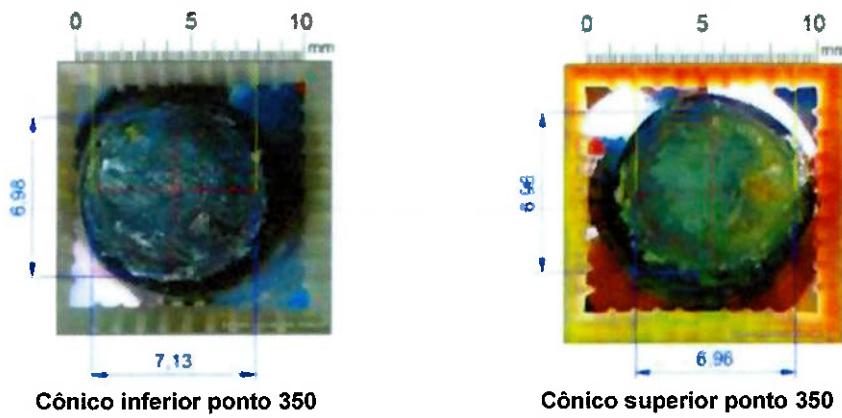


Figura 5.22 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos cônicos superior e inferior – ponto de solda 350.

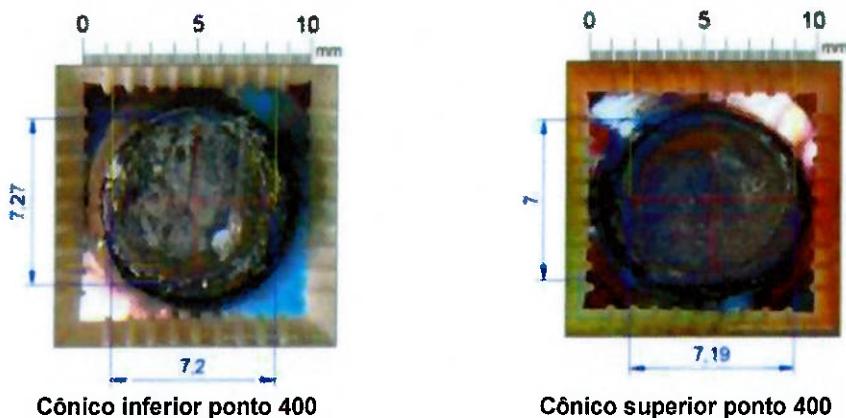


Figura 5.23 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos cônicos superior e inferior – ponto de solda 400.

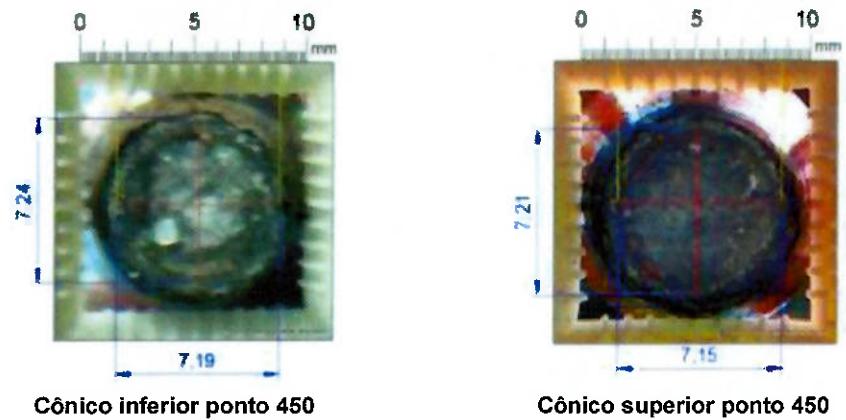


Figura 5.24 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos cônicos superior e inferior – ponto de solda 450.

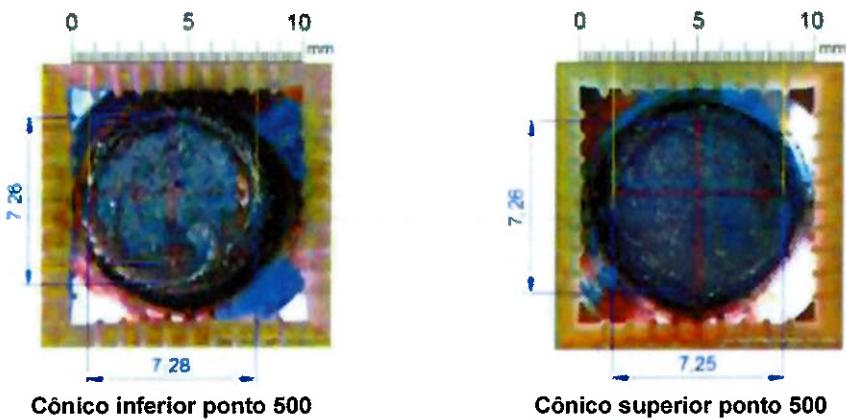


Figura 5.25 - Evolução das deformações nas faces dos eletrodos cônicos superior e inferior – ponto de solda 500.

As tabelas 5.5 e 5.6 apresentam os resultados obtidos nos testes de rendimento dos eletrodos esféricos e cônicos, respectivamente. Com os dados foram plotados os gráficos de número de pontos de solda versus a área da face do eletrodo desgastada (mm^2).

Analizando os dados obtidos nos testes apresentados na tabela 5.5, é possível notar que a taxa média de deformação da face do eletrodo esférico a cada 50 pontos de solda é de aproximadamente $2,6\text{mm}^2$.

Tabela 5.5 - Número de pontos versus área da face de contato do eletrodo inferior e superior esférico.

Número de pontos	1	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Face do eletrodo inferior (mm^2)	9,28	23,80	26,68	27,14	28,09	29,30	30,08	31,55	32,25	31,80	30,32
Face do eletrodo superior (mm^2)	9,56	21,67	23,68	25,59	27,37	28,97	29,40	29,98	32,30	31,16	29,80

Pode-se notar na tabela 5.6 que, a taxa média de deformação da face do eletrodo de geometria côncica a cada 50 pontos de solda é de aproximadamente $2,0\text{mm}^2$.

Tabela 5.6 - Número de pontos versus área da face de contato do eletrodo inferior e superior cônicos.

Número de pontos	1	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Face do eletrodo inferior (mm^2)	17,13	27,74	28,87	31,30	32,45	32,75	36,24	39,07	41,09	40,86	41,48
Face do eletrodo superior (mm^2)	17,14	29,83	31,90	32,96	33,62	34,71	37,75	38,02	39,51	40,46	41,32

A figura 5.26 gerada pelos dados das tabelas 5.5 e 5.6 mostra o desempenho dos eletrodos superior e inferior para cada tipo de geometria. É possível

constatar que as faces dos eletrodos cônicos, superior e inferior, apresentam deformação maior que os eletrodos de geometria esférica em função do número de pontos executados. Esse fato ocorre devido ao eletrodo de geometria cônica possuir diâmetro inicial maior que o eletrodo esférico.

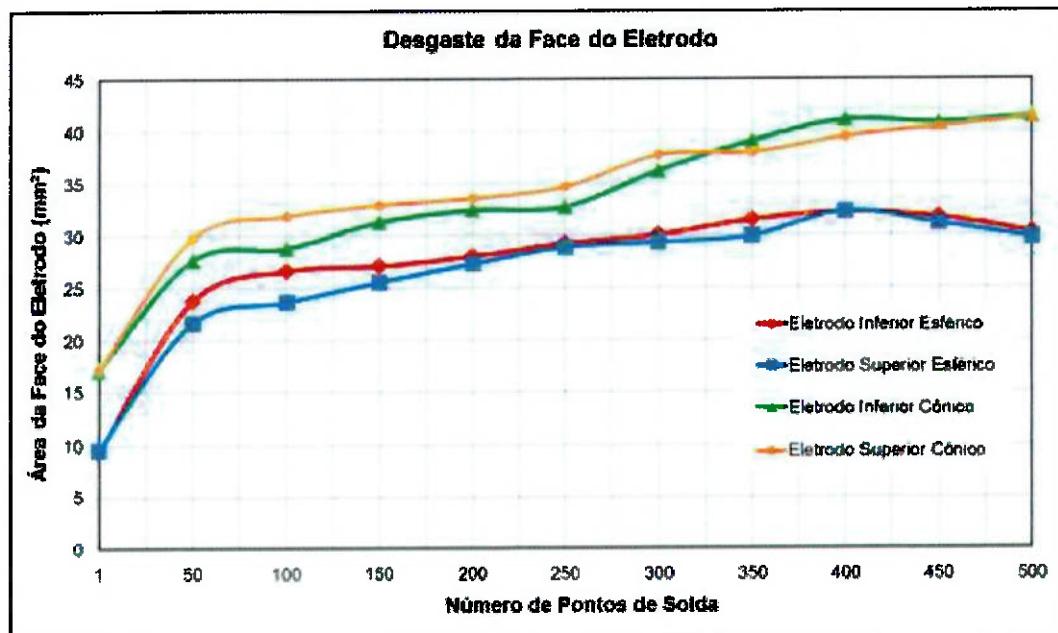


Figura 5.26 - Variações das áreas das faces dos eletrodos superiores e inferiores esféricos e cônicos versus número de pontos de solda.

A tabela 5.7 mostra os valores dos diâmetros médios dos pontos de solda (mm). Com os dados foi plotado o gráfico de número de pontos de solda versus diâmetro médio do ponto de solda, executados com eletrodos de geometria cônica e esférica.

Tabela 5.7 - Número de pontos de solda versus diâmetro médio dos pontos de solda realizados com eletrodos de geometria cônica e esférica.

Número de pontos	1	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Diâmetro médio do ponto Eletrodo Esférico (mm)	4,9	5,25	5,00	5,25	5,30	4,90	5,80	4,95	5,45	6,25	6,00
Diâmetro médio do ponto Eletrodo Cônico (mm)	6,90	6,95	6,75	6,30	6,35	5,85	3,95	3,45	3,25	-	-

A figura 5.27 gerada pelos dados da tabela 5.7, mostra o desempenho dos eletrodos esféricos e cônicos com relação à formação do diâmetro mínimo dos pontos de solda, conforme a norma. O eletrodo cônicos mesmo apresentando maior deformação na face de contato que o eletrodo esférico, atinge maior desempenho na soldagem, porém ao executar 286 pontos de solda aproximadamente, o valor do diâmetro mínimo do ponto de solda de 4,41mm é atingido, ficando com qualidade comprometida e abaixo do especificado pela norma. Esse fato é devido ao aumento limite da área da face de contato do eletrodo, com redução significativa da força de contato eletrodo/chapa.

Nota-se também que o eletrodo esférico, além de ter menor deformação na face, apresenta maior desempenho na soldagem.

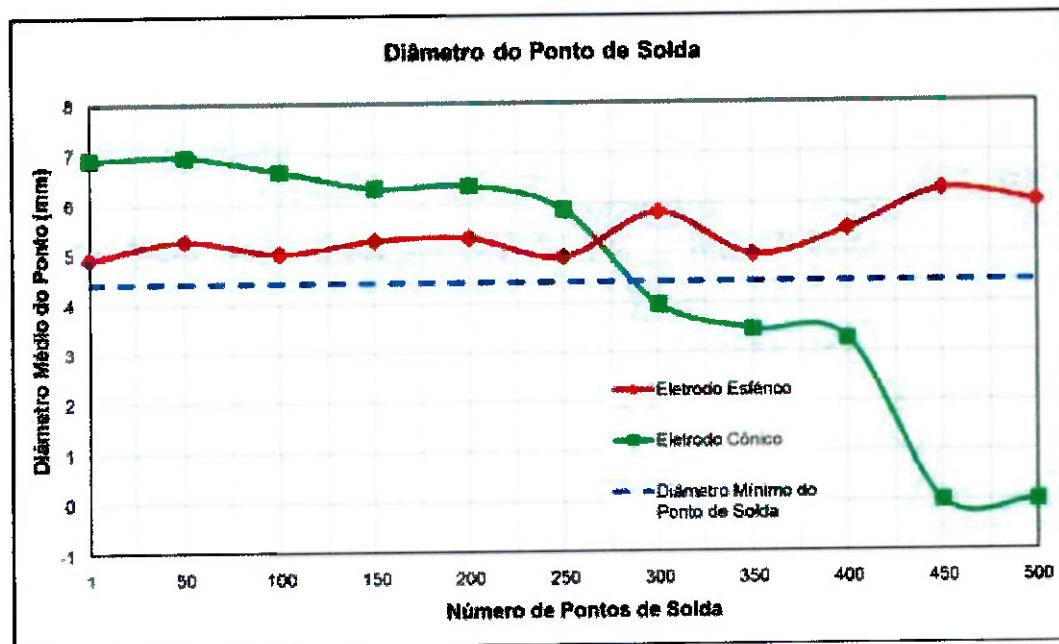


Figura 5.27 - Variação do diâmetro médio do ponto de solda versus número de pontos de solda.

Como mostrado na figura 5.27, é possível notar pequenas variações na alteração do diâmetro do eletrodo esférico, mantendo uma tendência estável até 250 pontos de solda, onde a partir daí, ocorre aumento gradual do diâmetro até o final do ensaio.

5.4. Indentação:

A tabela 5.8 mostra os valores das profundidades das indentações dos pontos de solda realizados pelos eletrodos de geometria esférica e geometria cônica respectivamente. Com os dados foi plotado o gráfico número de pontos de solda versus a profundidade de indentação (mm).

Tabela 5.8 - Número de pontos de solda versus profundidade de indentação (eletrodo esférico e cônico).

Número de pontos	1	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Profundidade de indentação eletrodo esférico (mm)	0,30	0,25	0,25	0,23	0,20	0,25	0,09	0,08	0,01	0,05	0,15
Profundidade de indentação eletrodo cônico (mm)	0,28	0,25	0,15	0,15	0,10	0,07	0,01	0,01	-	-	-

E possível notar redução da profundidade da indentação tanto no eletrodo esférico quanto no eletrodo cônico, conforme o aumento do número de pontos de solda, como representado na figura 5.28. O resultado obtido está diretamente relacionado com a diminuição do calor na interface eletrodo/chapa pela diminuição da densidade de corrente devido o aumento da área da face de contato.

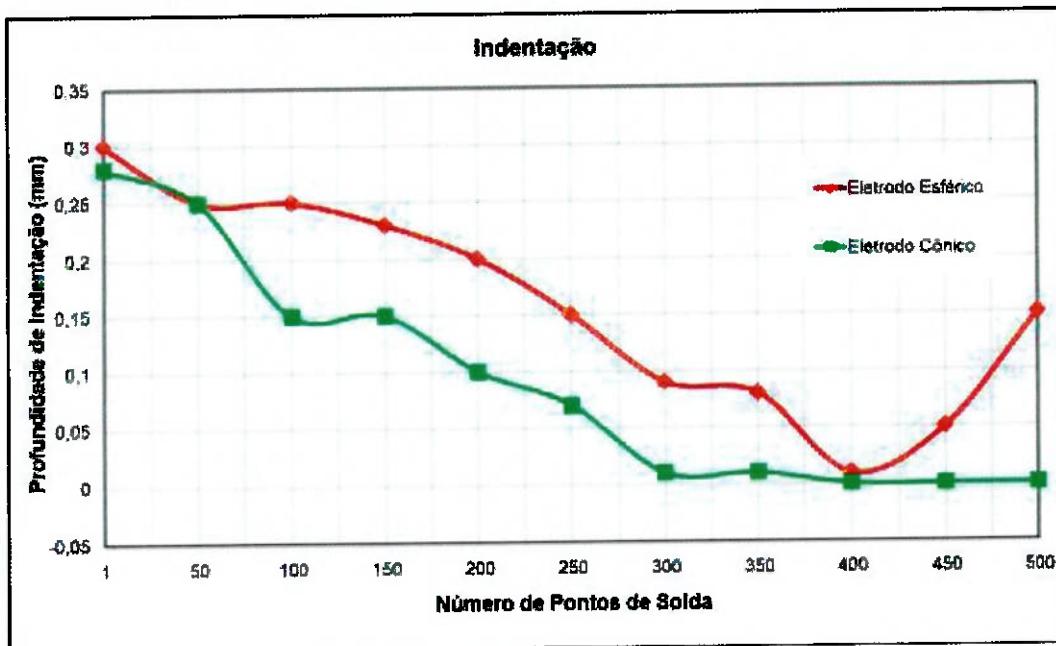


Figura 5.28 - Variação da profundidade da indentação versus número de pontos de solda.

O resultado favorável ao eletrodo esférico está na configuração inicial de sua geometria da face de contato, menor que a do eletrodo cônico. Com face de contato menor, a geração de calor irá apresentar-se maior e centralizada. Por esse motivo, a densidade de corrente no eletrodo esférico é maior se comparada ao eletrodo cônico, devido a menor área de contato eletrodo/chapa e por consequência, maior profundidade de indentação.

Podemos notar na figura 5.28 que com aproximadamente 400 pontos ocorre uma redução brusca na profundidade de indentação na soldagem realizada com o eletrodo esférico, este fato está relacionado com a excessiva deformação da face de contato do eletrodo, reduzindo a pressão entre eletrodo/chapa. Após os 400 pontos de solda, houve um pequeno aumento na profundidade de indentação. Devido à assimetria da face de contato do eletrodo, ocorreu uma diminuição da área de contato e consequentemente uma melhora subjetiva na qualidade do ponto de solda.

5.5. Densidade de corrente:

Inversamente proporcional ao aumento da área de contato da face do eletrodo, a redução da densidade de corrente ocorre com o aumento de

números de pontos de solda realizados devido às deformações da face do eletrodo. Com o valor da área da face de contato dos eletrodos, foi possível quantificar a densidade de corrente aplicada na soldagem a cada 50 pontos de solda. A tabela 5.9 mostra os valores obtidos nos testes realizados.

Tabela 5. 9 - Número de pontos de solda versus densidade de corrente (face de contato desgastado eletrodos esférico e cônicos).

Número de pontos de solda	1	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Densidade de corrente eletrodo esférico (A/mm ²)	1076	446	403	385	366	348	341	330	314	322	337
Densidade de corrente eletrodo cônicos (A/mm ²)	595	354	336	317	309	302	276	265	253	251	246

Com os dados obtidos foi possível plotar o gráfico de número de pontos de solda versus densidade de corrente (A/mm²), mostrado na figura 5.29.

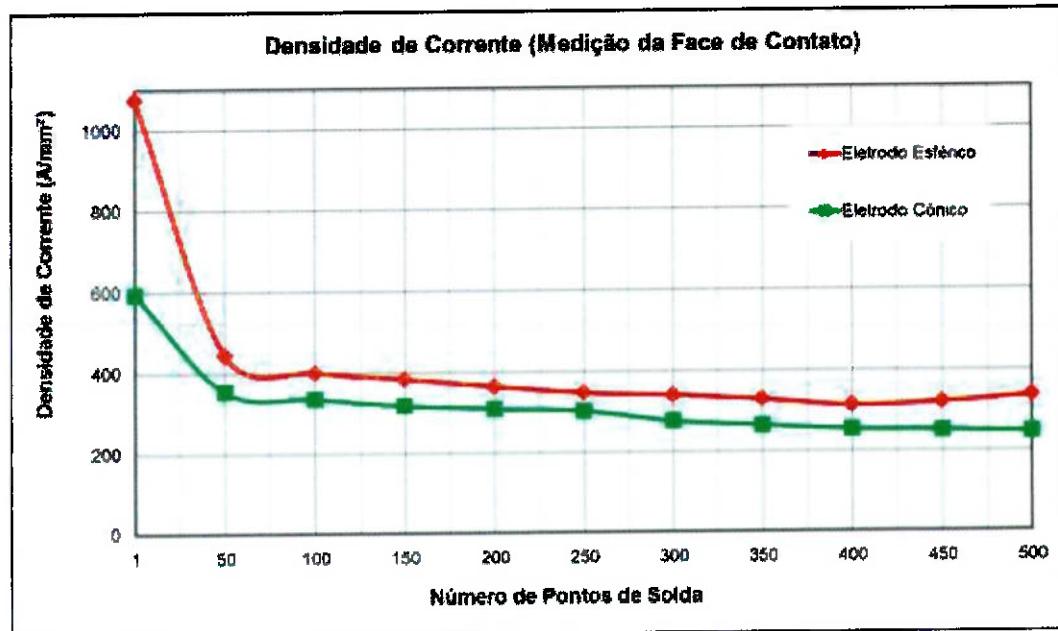


Figura 5. 29 - Gráfico número de pontos de solda versus densidade de corrente (face de contato desgastado dos eletrodos esférico e cônicos).

De modo geral, é possível observar a diminuição da densidade de corrente nos dois tipos de eletrodos, fenômeno que ocorre devido ao desgaste da face de contato do eletrodo. Com o progressivo desgaste no decorrer da soldagem, aumenta o diâmetro da face do eletrodo.

É possível notar pelo gráfico da figura 5.29 que a densidade de corrente na face do eletrodo esférico sempre é superior comparado ao eletrodo cônico. Este fato está relacionado ao diâmetro inicial do eletrodo esférico ser menor que o do eletrodo cônico, assim como o formato da sua geometria, que proporciona transferência de calor de maneira homogênea e centralizada, garantindo desempenho mais satisfatório que o eletrodo cônico.

5.6. Densidade de corrente (técnica de impressão de carbono):

Foi realizado também o dimensionamento da densidade de corrente através do método de impressão de carbono das faces dos eletrodos esféricos e cônicos a fim de comparar com a densidade de corrente das faces de contato dos eletrodos. As figuras 5.30 a 5.33 mostram a evolução da densidade de corrente dos eletrodos esféricos através do método de impressão por folha de carbono entre o ponto de solda 1 e o ponto de solda 500.

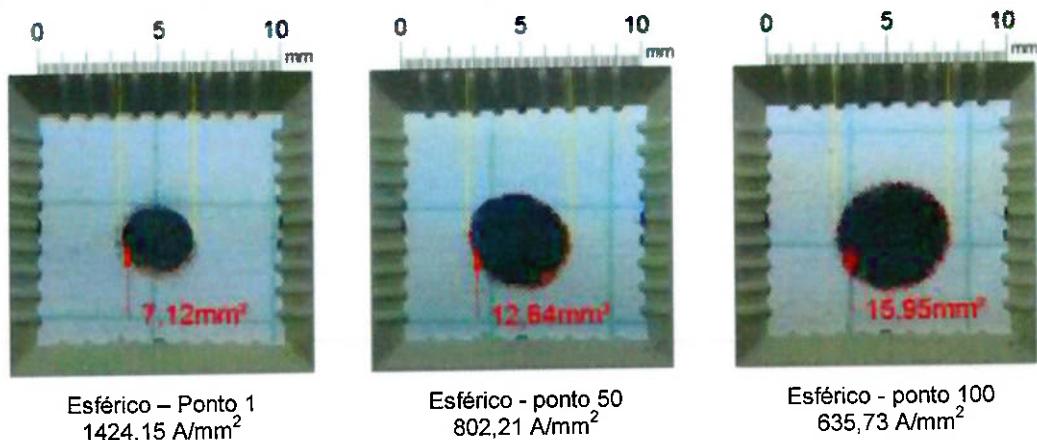


Figura 5.30 - Evolução da densidade de corrente eletrodo esférico - ponto de solda 1, 50 e 150.

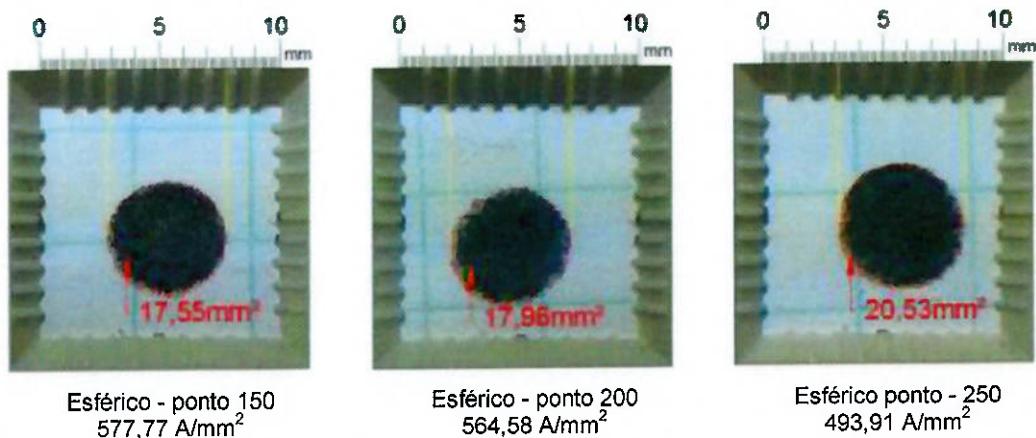


Figura 5.31 - Evolução da densidade de corrente eletrodo esférico - ponto de solda 150, 200 e 250.

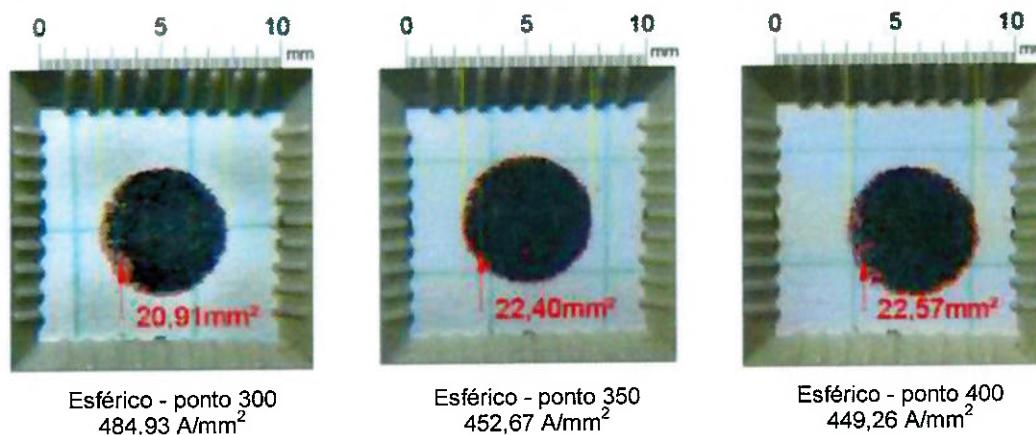


Figura 5.32 - Evolução da densidade de corrente eletrodo esférico - ponto de solda 300, 350 e 400.

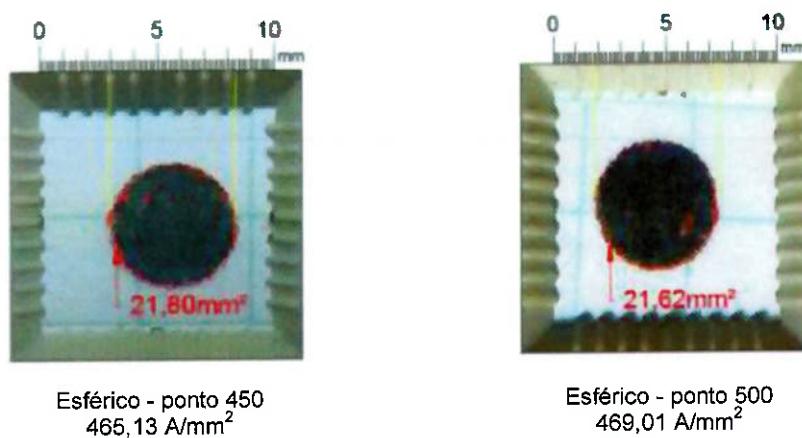


Figura 5.33 - Evolução da densidade de corrente eletrodo esférico - ponto de solda 450 e ponto de solda 500

A cada 50 pontos de solda foram realizados impressões das faces dos eletrodos utilizando a técnica da folha de carbono. As figuras 5.34 a 5.37 mostram a evolução da densidade de corrente do eletrodo cônicos entre o ponto 1 e o ponto 500.

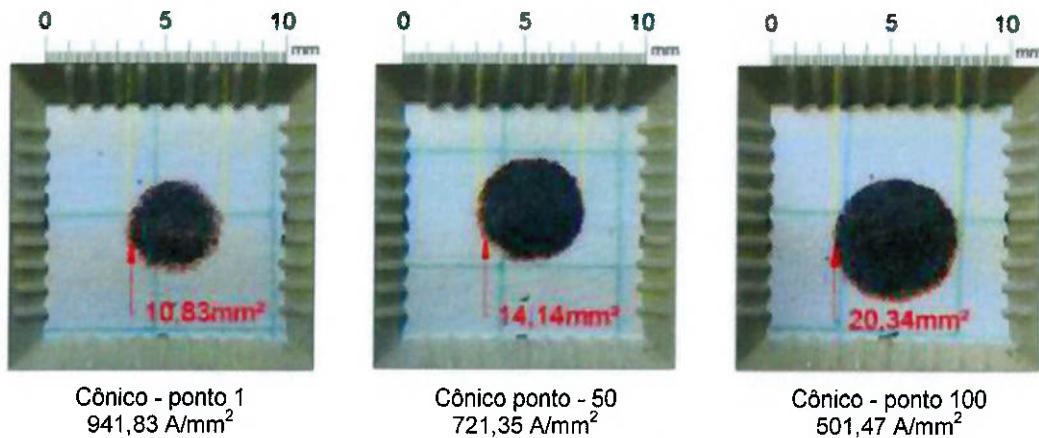


Figura 5.34 - Evolução da densidade de corrente eletrodo cônicos - ponto de solda - 1, 50 e 100.

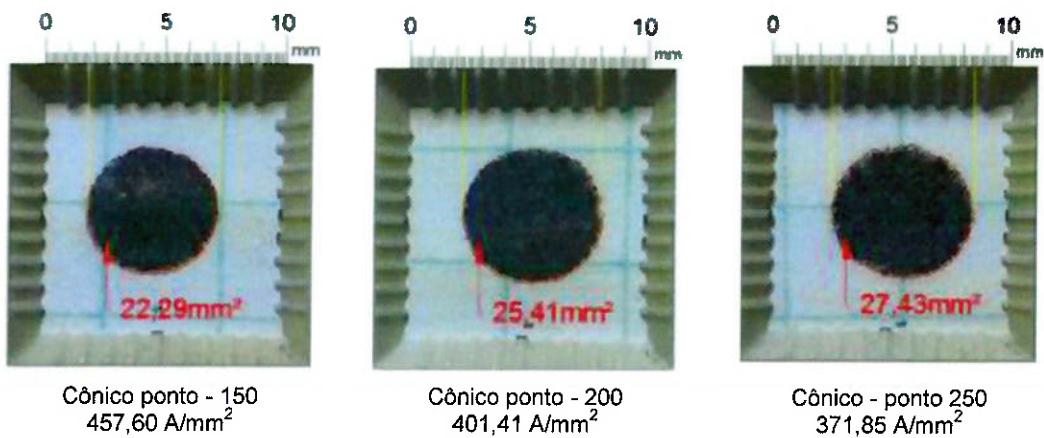


Figura 5.35 - Evolução da densidade de corrente eletrodo cônicos - ponto de solda 150, 200 e 250.

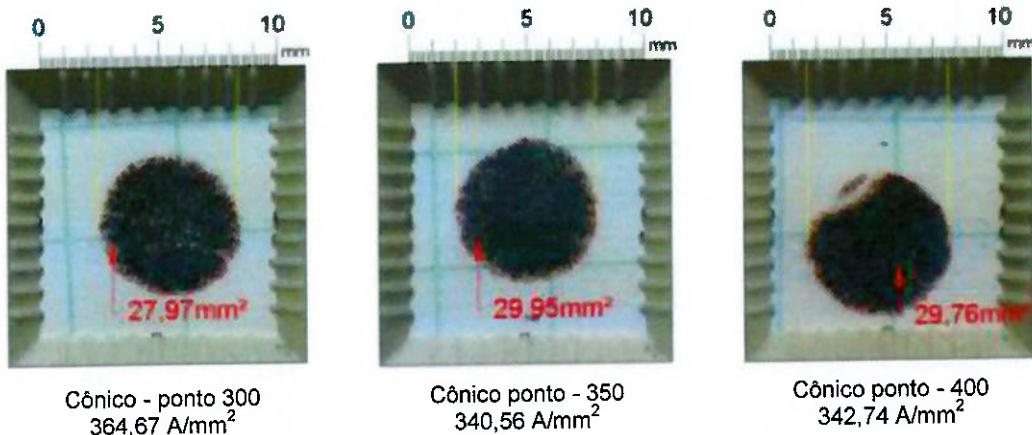


Figura 5.36 - Evolução da densidade de corrente eletrodo cônicoo - ponto de solda 300, 350 e 400.

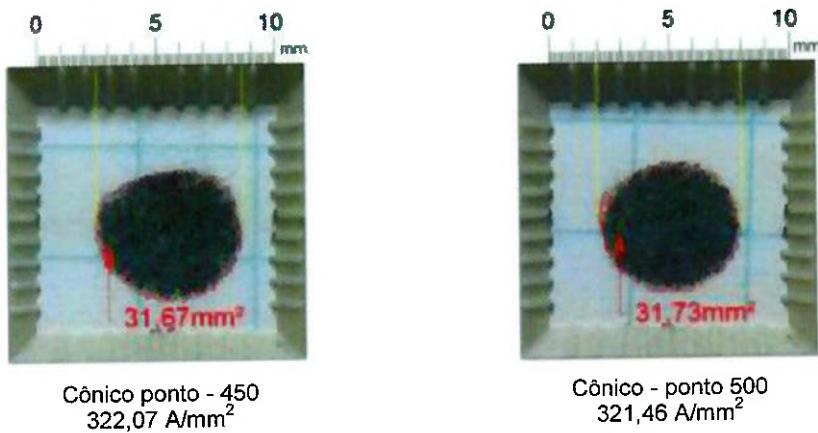


Figura 5.37 - Evolução da densidade de corrente eletrodo cônicoo - ponto de solda 450 e ponto de solda 500.

As impressões realizadas possibilitaram obter os diâmetros das faces dos eletrodos e verificar instantaneamente as condições das faces nos diferentes números de pontos de solda. A tabela 5.10 mostra os resultados obtidos com a técnica de impressão por folha de carbono, realizados com os eletrodos esféricos e cônicos, respectivamente.

Tabela 5.10 - Número de pontos de solda versus densidade de corrente (eletrodo esférico e cônicos).

Número de pontos de solda	1	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Densidade de corrente eletrodo esférico (A/mm ²)	1424	802	635	577	564	493	485	452	449	465	469
Densidade de corrente eletrodo cônicos (A/mm ²)	941	721	501	457	401	371	364	340	342	322	321

Com os dados foi plotado o gráfico de número de pontos de solda versus densidade de corrente (A/mm²), conforme mostra a figura 5.38.

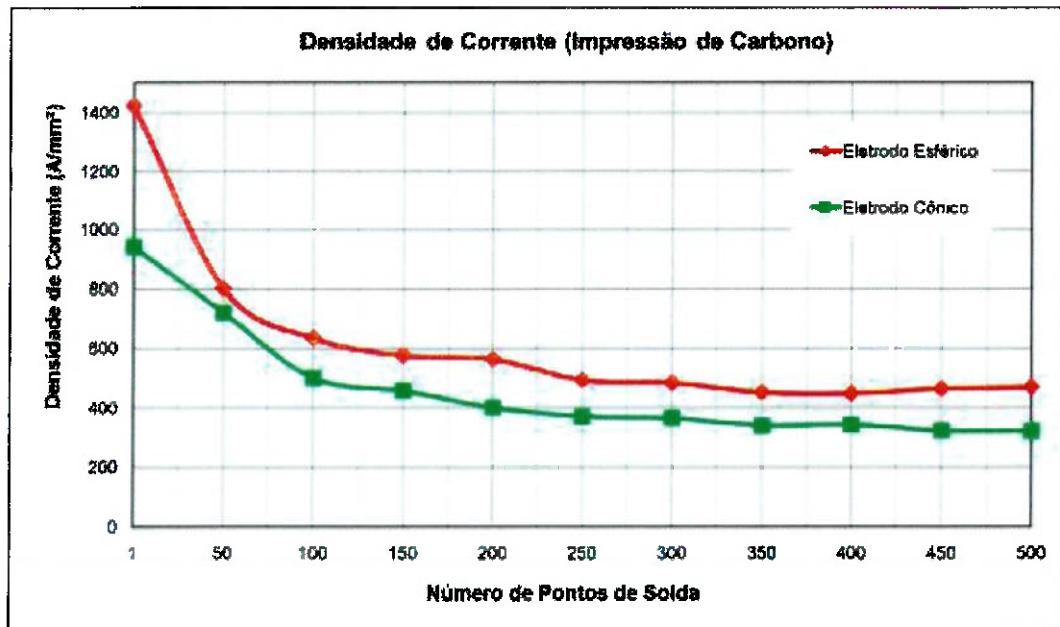


Figura 5.38 - Número de pontos de solda versus densidade de corrente (eletrodo esférico e cônicos).

É possível notar que os valores da densidade de corrente obtidos com a técnica de impressão de carbono utilizando eletrodos cônicos e eletrodos esféricos foram relativamente diferentes aos valores encontrados com o

procedimento usual, que é a medição das faces de contato desgastadas dos eletrodos com paquímetro. Devem-se considerar diferentes condições das superfícies do corpo de prova e da folha de papel com a folha de carbono no momento da coleta dos dados. Temos também possíveis variações ou erros nas medições da face de contato do eletrodo utilizando o paquímetro, que podem ser caracterizados por erro de posicionamento do instrumento na região medida, falha na interpretação da leitura ou até erro de paralaxe. Porém o objetivo do uso da técnica de impressão de carbono é constatar a condição da superfície da face de contato do eletrodo em tempo real, como variações na geometria, vazios ou sulcos e incrustações de zinco, decorrente do calor gerado no processo.

Mesmo com diferentes valores de densidade de corrente obtidos nas duas técnicas utilizadas, ao observar os gráficos das figuras 5.29 e 5.28 é possível notar semelhante tendência nas curvas de desgaste das faces dos eletrodos. As tabelas 5.11 e 5.12 apresentam os valores das variações do desgaste das faces dos eletrodos esférico e cônico a cada 50 pontos de solda, utilizando as técnicas de medição da face de contato e impressão de folha de carbono.

Tabela 5. 11 – Comparação dos valores das taxas de redução de densidade de corrente utilizando as técnicas de medição da face de contato e impressão de folha de carbono versus número de pontos de solda (eletrodo esférico).

Número de pontos de solda	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Medição da face de contato										
<i>A/mm²</i> <i>pontos</i>	12,61	0,87	0,36	0,38	0,35	0,14	0,23	0,31	0,16	0,30
Impressão de folha de carbono										
<i>A/mm²</i> <i>pontos</i>	12,44	3,34	1,16	0,26	1,42	0,18	0,64	0,06	0,32	0,08

Tabela 5. 12 - Comparação dos valores das taxas de redução de densidade de corrente utilizando as técnicas de medição da face de contato e impressão de folha de carbono versus número de pontos de solda (eletrodo cônicoo).

Número de pontos de solda	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Medição da face de contato										
A/mm^2 pontos	4,82	0,37	0,36	0,17	0,13	0,53	0,22	0,23	0,04	0,09
Impressão de folha de carbono										
A/mm^2 pontos	4,4	4,4	0,88	1,12	0,60	0,14	0,48	-0,04	0,40	0,02

Com os dados obtidos foram plotados os gráficos das comparações das curvas de desgaste das faces de contato dos eletrodos esférico e cônicoo utilizando as técnicas da medição da face de contato e impressão da folha de carbono versus o número de pontos de solda, mostrado nas figuras 5.39 e 5.40.

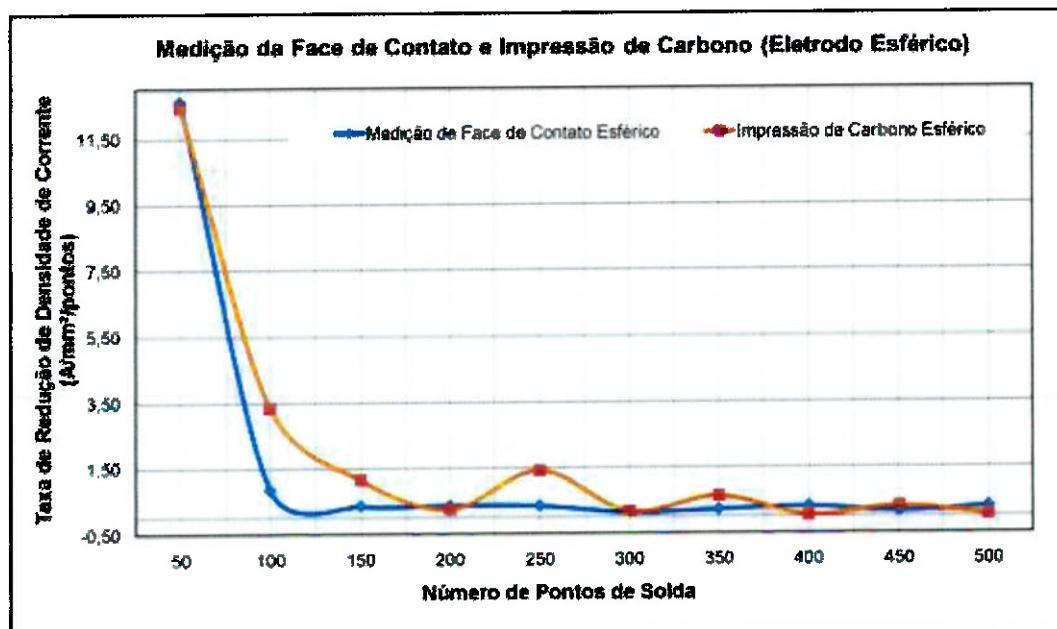


Figura 5. 39 - Densidade de corrente por medição da face de contato do eletrodo e impressão por folha de carbono versus número de pontos de solda (eletrodo esférico).

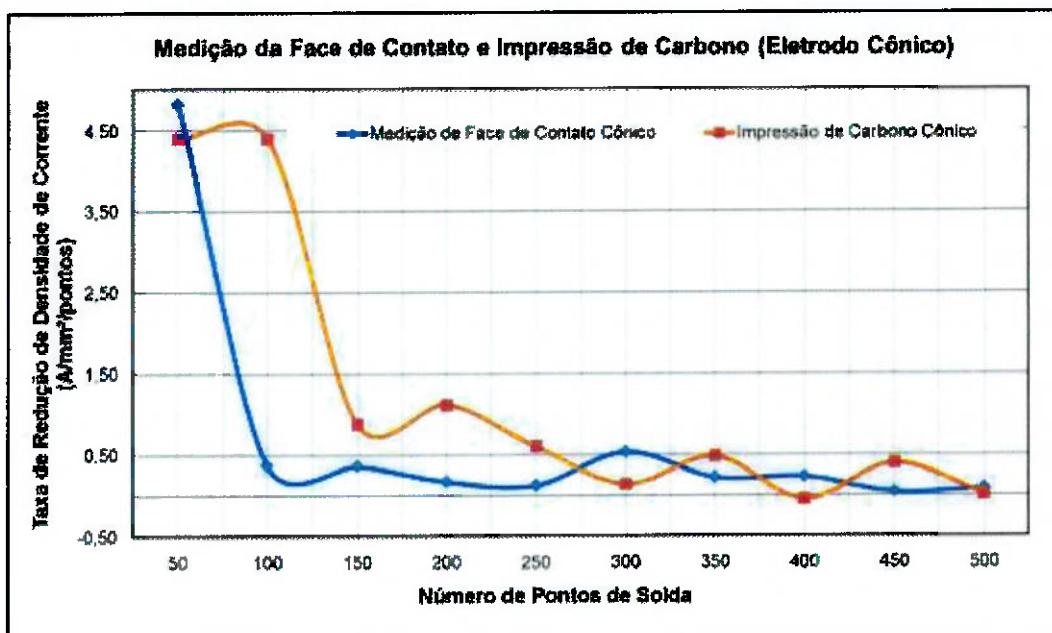


Figura 5. 40 - Densidade de corrente por medição da face de contato do eletrodo e impressão por folha de carbono versus número de pontos de solda (eletrodo cônico).

É possível notar que nos dois ensaios utilizados, as curvas de redução de densidade de corrente ou aumento da deformação das faces dos eletrodos possuem características semelhantes, as taxas de deformação se equiparam ao longo do ensaio de rendimento dos eletrodos. É visível que nos primeiros 50 pontos de solda realizados a taxa de redução da densidade de corrente é bem acentuada, em torno de $12,61 \text{ A/mm}^2$ por ponto de solda realizado para o eletrodo esférico e $4,82 \text{ A/mm}^2$ por ponto de solda realizado para o eletrodo cônico. Tal redução na densidade de corrente ou aumento na deformação das faces dos eletrodos ocorre devido ao diâmetro reduzido das faces dos eletrodos no início dos ensaios, mais agressivo no eletrodo esférico. A partir do centésimo ponto de solda é perceptível o equilíbrio na redução das taxas de deformação das faces dos eletrodos nas duas técnicas utilizadas.

Como mostrado nas figuras 5.39 e 5.40, pode-se considerar válida a utilização das duas técnicas apresentadas para obtenção da densidade de corrente, pois as curvas de desgaste relativo demonstram semelhanças ao longo do ensaio.

5.7. Ensaio de tração:

A tabela 5.11 apresenta os resultados obtidos nos testes de cisalhamento a cada 100 pontos de solda realizados com eletrodo esférico e cônicos.

Tabela 5.13 - Força de cisalhamento versus número de pontos de solda.

Número de pontos de solda	50	100	200	300	400	500
Ensaio de tração eletrodo esférico (kN)	6,22	5,44	5,34	4,69	4,72	6,4
Ensaio de Tração eletrodo cônicos (kN)	6,69	6,07	5,89	4,72	1,98	0

Com os dados obtidos, foi plotado o gráfico força de cisalhamento em kN versus a quantidade de pontos de solda realizados com eletrodos esférico e cônicos, conforme mostra a figura 5.39.

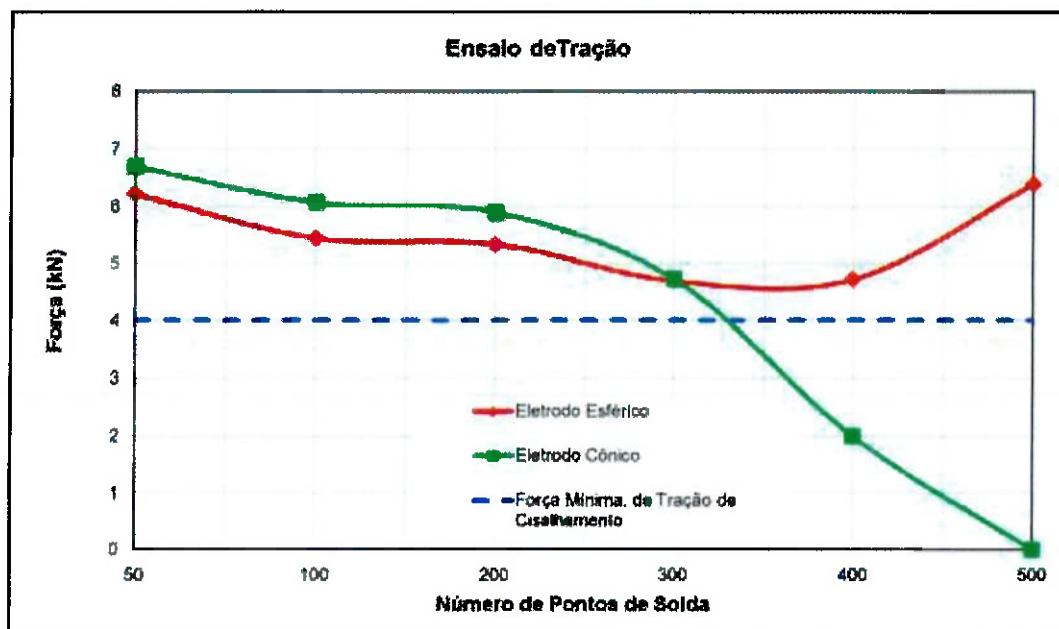


Figura 5.41 - Gráfico de força de cisalhamento versus número de pontos de solda realizados com eletrodos esférico e cônicos.

Pode-se observar que a força de cisalhamento dos pontos de solda realizados com o eletrodo cônicos possui uma tendência de queda desde o início dos testes, porém a partir do ponto de solda 330 aproximadamente, atinge o limite mínimo de tração de cisalhamento que é de 4kN. Entretanto a soldagem realizada com o eletrodo esférico apresenta curva de queda de eficiência mais suave, nunca atingindo o limite mínimo de tração até o final do ensaio. Esse fato se deve à maior deformação na face de contato do eletrodo cônicos, ou seja, quanto maior a deformação na face de contato menor será a simetria de contato entre os eletrodos e a peça e também menor densidade de corrente. Tais fatos fazem com que o diâmetro do ponto de solda fique menor e como consequência a redução da força de cisalhamento.

6. CONCLUSÕES

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

1. A janela operacional do eletrodo esférico apresentou-se menor que a janela operacional do eletrodo cônico, este fato está diretamente relacionada à geometria do eletrodo, principalmente no limite mínimo da janela operacional.
2. Os diâmetros dos pontos de solda obtidos com o eletrodo cônico através dos ensaios de tração tiveram uma diminuição da taxa do diâmetro do ponto até aproximadamente 270 pontos de solda. Observou-se que a partir desse instante, o eletrodo cônico foi o que apresentou maior instabilidade. Pode-se concluir que a redução do diâmetro do ponto de solda está relacionada com as maiores deformações ocorrida no experimento.
3. O eletrodo esférico teve 54% de vida útil maior que o eletrodo cônico. Esse fato é devido as maiores taxas de deformações na área de contato do eletrodo cônico.
4. A profundidade de indentação foi menor nos pontos de solda realizados com eletrodo cônico. Isto está relacionado com menor pressão de contato devido à maior área deformada.
5. Nos ensaios de tração as soldas realizadas com eletrodo esférico apresentaram conformidade com a norma 34% maior quando comparado ao eletrodo cônico. Isto é devido a maior diâmetro do ponto de solda encontrado após 300 pontos aproximadamente.
6. Ambas as técnicas utilizadas neste trabalho para medição da área de contato dos eletrodos para a determinação da densidade de corrente se apresentaram válidas.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS:

1. Comparação de vida útil de eletrodos de geometria diferentes no processo de soldagem utilizando fresagem das faces de contato no decorrer do processo.
2. Realizar estudo de variação de diâmetro de contato da face do eletrodo com a finalidade de determinar a força ideal de contato para estabilidade do processo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION Alueurope [Online] // www.alueurope.com. - European Aluminium Association, 2012. - 04 de Abril de 2013. - <http://www.alueurope.eu/wp-content/uploads/2012/01/AAM-Joining-2-Resistance-welding.pdf>.

ALVARENGA Solon Ávila A solda por resistência [Livro]. - Porto Alegre : Sagra-DC Luzzatto, 1993. - 85-241-0420-1.

ASM INTERNATIONAL ASM Handbook - Welding Brazing and Soldering [Livro]. - Washington : LIBRARY OF CONGRESS CATALOGING-IN-PUBLICATION DATA, 1983. - Vol. Vol.6. - 0-87170-377-7.

AURES José Enrique MZUsinagem [Online] // mzusinagem.com.br. - 12 de Março de 2014 . - <http://www.mzusinagem.com.br/especificacoes/o-que-e-solda-ponto/>.

BAM SOLDAS BamSoldas [Online] // bamsoldas.com.br. - 03 de 03 de 2014. - <http://www.bamsoldas.com.br/informativos/cursodesolda.pdf>.

BATISTA Márcio Aula de Soldagem por Resistência do Curso de Especialização de Engenharia de Soldagem // Notas de Aula. - São Paulo : [s.n.], 2014.

BATISTA Marcio Estudo comparativo da soldabilidade de chapas para a indústria automobilística utilizando dois equipamentos de soldagem a ponto por resistência.. - São Paulo : [s.n.], 2011.

BNDES Mineração e Metalurgia [Online] // Site BNDES. - BNDES, Setembro de 2000. - 25 de Março de 2014. - http://www.bnDES.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bnDES_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/setorial/is_g3_38.pdf.

BRACARENCE Alexandre Queiroz <ftp://ftp.demec.ufmg.br> [Online] // Demec. - 18 de Abril de 2014. - ftp://ftp.demec.ufmg.br/rss/ProcessosSoldagem_Pos/TEXTOS/07TextoRW.pdf.

BRANCO Hideraldo Luiz Osório Avaliação de Capas de Eletrodos Utilizadas na Soldagem por Resistência de Chapas Galvanizadas Automotivas. - Curitiba : [s.n.], 2004.

BRANCO Renato Mecânica Industrial [Online] // www.mecanicaindustrial.com.br. - 03 de Novembro de 2013. - <http://www.mecanicaindustrial.com.br/conteudo/622-soldagem-por-projacao>.

BREPOHL Danielle Cristina Caracterização das Camadas Formadas no Processo de Galvanização à Quente Sobre uma Chapa de Aço Livre de Inteirstíciais. // Caracterização das Camadas Formadas no Processo de

Galvanização à Quente Sobre uma Chapa de Aço Livre de Interstícias.. - Curitiba : [s.n.], 2013.

BSI Group Our History [Online] // The British Standards Institution. - 2014. - 8 de agosto de 2014. - <http://www.bsigroup.com/en-GB/about-bsi/our-history/>.

BUCHER Serra Diagrama de instalação Omegoa 160 kVA Serra Bucher // Diagrama de instalação Omegoa 160 kVA Serra Bucher. - São Bernardo do Campo : [s.n.], 2006.

CEMSA [www.cemsa.it](http://www.cemsa.it/nuovo/ing/pro.html) [Online] // www.cemsa.it. - 2013. - 22 de Dezembro de 2013. - <http://www.cemsa.it/nuovo/ing/pro.html>.

CHEW Victor Experimental designs in industry a symposium held november 5-9 sponsored by mathematics division, air force office of scientific research, air research and development command. [Livro]. - 1956.

CHULOSHNIKOV P. L. Resistance Welding [Livro]. - Moskow : MIR Publishers, 1978.

CONI Nicodemos Henrique Estudo da Propriedades Mecânicas do Aço Zincado por Imersão à Quente e Galvalume Produzidos na CSN-PR // Estudo da Propriedades Mecânicas do Aço Zincado por Imersão à Quente e Galvalume Produzidos na CSN-PR. - Curitiba : [s.n.], 2004.

FUKAMIZU André Setsuo A Influência da Refrigeração do Eletrodo na Soldagem a Ponto por Resistência em Chapas de Aço Carbono com Revestimento de Zinco. - São Palo : [s.n.], 2014.

GIECK Kurt Manual de Fórmulas Técnicas [Livro]. - Heilbronn : Hemus Editora Ltda. - 85-289-0171-8.

HIRSCH Roger B. e LEIBOVITZ Ronald Influence of water temperature and flow on electrode life. [Online] // www.unitrol-electronics.com. - Unitrol Electronics, Inc.. - 20 de Janeiro de 2015. - <http://www.unitrol-electronics.com/assets/docs/tech-papers/electrode.PDF>.

IMF Portal da Galvanização [Online] // <http://www.icz.org.br>. - ProdWeb, Janeiro de 2011. - 04 de 05 de 2014. - http://www.icz.org.br/upfiles/arquivos/GalvInfoNotes/GalvInfoNote_2_1.pdf.

INFOSOLDA Infosolda [Online] // www.infosolda.com.br. - 2014. - 24 de Fevereiro de 2014. - <http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/185-soldagem-por-resistencia-tipos-de-soldagem-por-resistencia.html>.

ISHIKAWA KAORU What is total quality control ? The Japanese way [Livro]. - Englewood Cliffs : Prentice - Hall, INC, 1985.

JACOBI Luciane Flores, SOUZA Adriano Mendonça e PEREIRA João Eduardo Gráfico de controle de regressão aplicado na monitoração de processos [Artigo] // Revista Produção. - 2002. - 1 : Vol. 12.

KOÇAK Okan Okay Defect Assessment of Spot Welds By Indi // Defect Assessment of Spot Welds By Indi. - Ankara : [s.n.], 2003.

MACHADO Ivan Guerra Soldagem e Técnicas Conexas: Processos [Livro]. - Porto Alegre : [s.n.], 1996.

MARIMAX Apostila Solda por Resistência [Online] // www.marimax.com.br. - 5 de 10 de 2003.

MARQUES Prof .Paulo J. Modenesi e Prof. Paulo Villani Soldagem 1, Introdução aos Processos de Soldagem // Notas de Aulas. - Belo Horizonte : [s.n.], 2006.

MILLER WELDS Miller Welds [Online] // millerwelds.com. - 4 de Outubro de 2013. - <https://www.millerwelds.com/pdf/Resistance.pdf>.

MOLENDÀ Carlos Henrique [et al.] Scielo [Online] // scielo.br. - 23 de Janeiro de 2014. - http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-92242010000400008&script=sci_arttext#fig1.

NAKAMURA Edson Luiz Estudo Comparativo Entre Dois Eletrodos de Materiais Diferentes na Soldagem a Ponto por Resistência.. - São Paulo : [s.n.], 2012.

NIED BY H. A. The Finite Element Modeling of the [Online] // www.aws.org. - AWS, Julho de 1983. - 01 de Abril de 2014. - http://www.aws.org/wj/supplement/WJ_1984_04_s123.pdf.

QUALINOX Qualinox [Online] // qualinox.com.br. - Qualinox, 2014. - 25 de Julho de 2014. - <http://www.qualinox.com.br/zincagem-eletrol%EDtica.htm>.

RAUTARUUKKI CORPORATION www.ruukki.com [Online]. - 2014. - 05 de Fevereiro de 2014. - <http://www.ruukki.com/~/media/Files/Steel-products/Cold-rolled-metal-colour-coated-instructions/Ruukki-Resistance-welding-manual.pdf>.

RUIZ Douglas Criado Contribuição ao desenvolvimento de processo de soldagem e montagem de carrocerias automotivas. // Contribuição ao desenvolvimento de processo de soldagem e montagem de carrocerias automotivas.. - São Paulo : [s.n.], 2005.

RWMA Resistance welder manufacturers association [Livro]. - U.S.A : [s.n.], 1989.

SENAI Soldagem [Livro]. - São Paulo : SENAI - SP Editora, 2013.

VECCHIO E. J. DEL Resistance Welding Manual [Livro]. - Philadelphia : Resistance Welder Manufacturers Association, 1956.

VENCEGUERRA Leandro Cardoso O COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA DINÂMICA COM RELAÇÃO À DEFORMAÇÃO DO ELETRODO NA SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA // O COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA DINÂMICA COM RELAÇÃO À

DEFORMAÇÃO DO ELETRODO NA SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA. - São Paulo : [s.n.], 2012.

WEINER Emílio, BRANDI Sérgio Duarte e MELLO Fábio Homem Soldagem Processos e Metalurgia [Livro]. - São Paulo : Edgard Blücher LTDA, 1992.

ZHANG Hongyan e SENKARA Jacek Resistance Welding, Fundamentals and Applications - Second Edition [Livro]. - Boca Raton : CRC Press Taylor & Francis Group, 20012. - 978-1-4398-5371-9.

ZHANG Hongyan e SENKARA Jacek Resistance Welding, Fundamentals and Applications [Livro]. - Boca Raton : CRC Press Taylor & Francis Group, 2006. - 0-203-49752.