MÁRCIO BATISTA

**ESTUDO COMPARATIVO DA SOLDABILIDADE
DE CHAPAS PARA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA
UTILIZANDO DOIS EQUIPAMENTOS DE
SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA.**

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

São Paulo

2011

MÁRCIO BATISTA

**ESTUDO COMPARATIVO DA SOLDABILIDADE
DE CHAPAS PARA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA
UTILIZANDO DOIS EQUIPAMENTOS DE
SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA.**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Engenharia

Área de concentração:
Engenharia Metalúrgica e de
Materiais

Orientador:
Professor Dr. Sérgio Duarte Brandi

São Paulo

2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Batista, Márcio

Estudo comparativo da soldabilidade de chapas para indústria automotiva utilizando dois equipamentos de soldagem a ponto por resistência / M. Batista. -- ed.rev. -- São Paulo, 2011. 194 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1. Soldagem 2. Soldagem a ponto por resistência 3. Soldagem: aços carbono 4. Indústria automotiva I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II. t.

*“Penso noventa e nove vezes e nada descubro;
deixo de pensar, mergulho em profundo silêncio
e eis que a verdade me é revelada.”*

Albert Einstein.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, a meus pais Antonio Batista (in memorian) e Encarnacion Batista, aos meus irmãos Marcelo e Karine.

AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar;

Ao professor Dr. Sérgio Duarte Brandi, por ter me orientado nesta árdua tarefa;

A toda minha família pelo seu amor, carinho e dedicação;

Ao meu amigo Valdir Furlanetto da Welding Science pela ajuda nos experimentos;

Aos meus amigos da Poli - Metalurgia: Flávio, Dany, Erick, Daniel, Julian entre muitos outros;

Aos meus colegas de trabalho pela ajuda e incentivo para a execução deste trabalho, em especial a Daniela, Guilherme, Salvador, Valdomiro, Anderson Panten, Ronaldo, Ileke e Rafael;

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

RESUMO

A soldagem a ponto por resistência é o processo mais usado na montagem de estruturas, tais como: automóveis, caminhões, aviões, vagões de trem, etc. Como exemplo, na montagem das carrocerias de automóveis são necessários em média 5.000 pontos de solda. Segundo a ANFAVEA a produção em 2010 no Brasil ultrapassou 3,5 milhões de automóveis, ou seja, aproximadamente 17,5 bilhões de pontos de solda por ano. Estes fatos evidenciam a importância deste processo de soldagem na montagem de carroceria devido a sua eficiência, rapidez e facilidade na automação. Além disso, o comportamento da soldagem a ponto por resistência é extremamente importante para a qualidade de toda a estrutura soldada. O presente trabalho será voltado para a avaliação e estudo da soldabilidade de chapas de aço de 0,8 mm, revestidas e não revestidas com zinco, na indústria automotiva, comparando-se dois equipamentos de soldagem com dois tipos de corrente de soldagem: corrente alternada (CA) e corrente contínua de média frequência (CC). Foram feitos diagramas de soldabilidade: corrente (kA) x tempo (ms) com força constante e corrente (kA) x força (kgf) com tempo (s) de soldagem constante e localizada suas respectivas áreas comuns. Em seguida foram feitos diagramas em terceira dimensão (3D) com os três principais parâmetros (força, corrente e tempo) e localizado um ponto otimizado. Posteriormente foram analisadas, nos pontos otimizados, as dimensões geométricas do ponto através da macrografia, a resistência mecânica com ensaio de tração e, durante a soldagem, a resistência dinâmica e a energia elétrica dinâmica. Foram seguidos como requisitos técnicos para qualificação de soldagem conforme norma. Os resultados mostraram que, a soldagem em CC apresentou-se melhor em chapas sem revestimento se comparada com a soldagem em CA. E a soldagem em CA apresentou-se melhor em chapas com revestimento de zinco se comparada com a soldagem em CC. A queima do revestimento de zinco e a rugosidade superficial das chapas não afetaram a formação do ponto de solda. As durezas nas regiões da ZAC e no ponto de solda apresentaram-se maiores em chapas sem revestimento. Todos os pontos

de solda com os parâmetros otimizados, encontrados pelo método apresentado neste trabalho, foram aprovados conforme norma.

ABSTRACT

Resistance spot welding is highly used in the structures assembly, such as: cars, trucks, planes, trains, etc. For example, 5.000 weld spots are necessary in an auto-body assembly. According to ANFAVEA, Brazilian production in 2010 overtook 3.5 millions of cars, in order words, around 17,5 billions weld spot per year. This fact evidences the importance of this welding process due to its efficiency, rapidity and easiness in the automation. Moreover, the resistance spot welding behavior is highly important for all the welded structure quality. This work aimed to study the weldability of zinc non-coated and zinc coated steel sheets of 0,8 mm thickness for automotive industry, comparing two welding equipments with two kinds of current: alternating current (AC) and medium frequency direct current (DC). The weld lobes are presented: current (kA) x time (s) with constant force (kgf) and current (kA) x force (kgf) with constant welding time. After, lobes in third dimension (3D) with the three main parameters were done (force, current and time) and located the great point. Afterwards, the great points were characterized using, optic metallografy, mechanical resistance with tensile-shear test and, during welding, the dynamic resistance and dynamic energy. The describe techniques were followed as technical requisites according to the standard. The results showed that the welding in DC presented better performance in uncoated sheets when compared to the AC welding. And the AC welding presented better performance in zinc coated sheets when compared to DC welding. Zinc coating burning and sheets surface roughness did not affect the spot weld formation. The hardness in the HAZ regions and in the spot weld was higher in uncoated sheets. All spot welds with the optimized parameters, found by the method presented in this work, were approved according to the standard.

LISTA DE FIGURAS:

Figura 3.1- Dispositivo de soldagem por resistência elétrica, patenteado por Thomson em 1891 [4].....	5
Figura 3.2- Esquema do processo de soldagem por projeção [8].....	7
Figura 3.3- Esquema do processo de soldagem a topo [8].....	8
Figura 3.4- Esquema do processo de soldagem por costura [8].....	9
Figura 3.5- Formação do ponto de solda [12].....	10
Figura 3.6- Resistências elétricas entre os eletrodos [14].....	14
Figura 3.7- Distribuição da temperatura no processo de soldagem a ponto por resistência [2].....	17
Figura 3.8 – Área que define a superfície da resistência de contato [13].....	18
Figura 3.9 – Representação da superfície metálica [2].....	18
Figura 3.10 - Correlação entre Resistência de contato e pressão do eletrodo [7].....	19
Figura 3.11- Esquema dos principais estágios da resistência dinâmica durante a formação do ponto de solda [Adaptado referência [20]].....	21
Figura 3.12- Curva de resistência dinâmica esquemática com os parâmetros importantes para a soldagem (a). Em (b) efeito do aumento da corrente na curva da resistência dinâmica e em (c) efeito da diferença da resistividade do material na curva da resistência dinâmica [20].....	23
Figura 3.13- Expansão térmica da liga Al-Mg e Fe puro [10].....	24
Figura 3.14 - Forças atuantes no ponto de solda [10].....	25
Figura 3.15 – Deslocamento do eletrodo durante a soldagem [10].....	26
Figura 3.16 - Esquema da seqüência da soldagem a ponto [13].....	27
Figura 3.17 - Diagrama dos tempos de fechamento dos eletrodos (pré-pressão) e estabilização da força (pressão) [13].....	28
Figura 3.18 – O diagrama de soldagem com os tempos de resfriamento [13].	31
Figura 3.19 – Ensaaios com tempos de pré-pressão de 20 ciclos e 50 ciclos [13].....	32
Figura 3.20 – Ensaaios com forças de 2000N e 3200N [13].....	33
Figura 3.21 – Ensaaios com tempos de corrente de 8 ciclos e 16ciclos [13].....	34
Figura 3.22 - Distribuição da temperatura durante a soldagem no eletrodo. Ref. [26].....	41
Figura 3.23- Principais formatos padronizados de eletrodo. Ref. [13].....	41
Figura 3.24- Aumento da área de contato com a deformação da ponta do eletrodo. Ref. [13].....	43
Figura 3.25 – Exemplo de curva de compensação de corrente (stepper). Ref. [13].....	44
Figura 3.26- Equipamentos para fresagem de eletrodo. Ref. [13].....	45
Figura 3.27 – Distância do tubo interno de água para correta refrigeração do eletrodo. (a) ref.[12]; (b) ref.[13]. Tubo de refrigeração rígido e flexível.....	46
Figura 3.28 - Diagrama de Soldabilidade [14].....	48
Figura 3.29- Transformação metalúrgica e distribuição da temperatura em soldagem a ponto [1].....	49

Figura 3.30 – Esquema da estrutura do ponto conforme a velocidade de resfriamento. Boa refrigeração (a); Rápida refrigeração (b); Lenta refrigeração (c) [10].....	51
Figura 3.31- Ensaios não destrutivos mais utilizados: Raios X (a); Partículas magnéticas (b); Ultra-som (c) e Líquidos penetrantes (d) [29].....	54
Figura 3.32- Ilustração dos métodos de ensaio por ultra-som: Transparência (a) e Reflexão [29].....	56
Figura 3.33 – Ensaio por arrancamento (A); ensaio por tração (B); ensaio por torção (C) [13].....	57
Figura 3.34 – Curva força x deslocamento, falha no material base (A) e (B) [31].....	58
Figura 3.35 – Curva força x deslocamento; destacamento (C); rasgamento (D); cisalhamento (E) [31].....	59
Figura 3.36- Corrente de desvio com dois pontos de solda [13].....	61
Figura 3.37- Corrente de desvio com três pontos de solda [13].....	62
Figura 3.38- Desvio de corrente pelo contato entre a pinça e a peça [13].....	62
Figura 3.39- Profundidade criada na superfície da chapa soldada pela pressão do eletrodo durante a soldagem [13].....	63
Figura 3.40 - Área de contato do eletrodo em relação à espessura da chapa [13].....	64
Figura 3.41 – Exemplo de ponto de solda assimétrico, causado pela definição incorreta da área de contato dos eletrodos [13].....	65
Figura 3.42– Exemplos de situações mais comuns de desalinhamento de eletrodos [13].....	66
Figura 3.43- Exemplos de posicionamentos incorretos dos eletrodos na peça [13].....	67
Figura 3.44 Força de compressão do eletrodo x força do núcleo (a); desalinhamento do eletrodo (b) e distribuição da pressão em função do desalinhamento do eletrodo (c) [10].....	68
Figura 3.45- Exemplos de máquinas usadas em soldagem a ponto: Pinça de solda manual com transformador acoplado (a); Pinça de solda manual com transformador suspenso (b); Pinça para robô (c) e Máquina estacionária (d) [12].....	69
Figura 3.46 Representação elétrica da máquina monofásica CA [12].....	70
Figura 3.47 Formas de onda características no conversor CA [12].....	71
Figura 3.48 Representação elétrica da máquina trifásica CC [12].....	72
Figura 3.49 Representação elétrica da máquina MFDC [12].....	73
Figura 3.50 (a) Comportamento das correntes CC e CA; (b) Comportamento da geração de calor em CC e CA, respectivamente [14].....	74
Figura 4.1- Dimensões dos corpos de prova de acordo com a EN ISO 14273 [33].....	75
Figura 4.2- Dimensões do corpo-de-prova de acordo com a norma EN ISO 14273 e espessura de 0.8mm.....	76
Figura 4.3- Exemplo de diagrama de soldabilidade executado no experimento: (a) Tempo versus corrente com força constante; (b) Força versus corrente com tempo constante.....	78
Figura 4.4- Exemplo da determinação dos limites mínimos e máximos de correntes de soldagem para os diagramas de soldabilidade durante os experimentos.....	78

Figura 4.5- Exemplo do volume resultante do encontro das áreas comuns (tempo versus corrente e força versus corrente).....	79
Figura 4.6 - Exemplo do corte transversal (corte C-C) na região de maior área do volume e o ponto (parâmetros) de maior grau de liberdade.....	80
Figura 4.7- Dimensões do ponto de solda de acordo com a norma VW 01105-1: 2007-03 [30].....	81
Figura 4.8- Exemplo de medições do ponto de solda executado no experimento por ensaio de macrografia.....	82
Figura 4.9- Determinação do diâmetro do ponto d_p após os ensaios de arrancamento e de tração.....	83
Figura 4.10- Testes de tração de cisalhamento executados nos experimentos.	84
Figura 4.11- Gráfico gerado pelo equipamento de tração para obtenção da força máxima atingida no teste.....	85
Figura 4.12- Adaptação no porta-eletrodo com ponta de prova diferencial para medir a tensão durante a soldagem.....	86
Figura 4.13- Foto dos equipamentos utilizados para medições da tensão e corrente durante os experimentos.....	87
Figura 4.14 – Esquema das ligações dos sensores e instrumentos de medição usados nos experimentos.....	88
Figura 4.15- Planilha Excel TM usada para o cálculo da resistência dinâmica...	88
Figura 4.16- Corrente de solda (verde) em fase com a tensão entre eletrodos (azul).....	89
Figura 4.17- Corrente de solda (verde) e a tensão entre eletrodos (laranja)....	89
Figura 4.18- Dinamômetro utilizado nos experimentos para calibração das forças entre os eletrodos.....	91
Figura 4.19- Equipamento de soldagem utilizado para realização dos experimentos, de CA e CC de média frequência (Pinça “C” da marca During).	92
Figura 4.20- Eletrodos de CuZr (0,15 Zr) utilizados nos experimentos.....	93
Figura 4.21- Desenho esquemático da rugosidade R_z , altura das irregularidades dos 10 pontos [37].....	93
Figura 4.22 – Pontos utilizados para medição de dureza (Vickers).....	94
Figura 5.1 -Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA e CC com chapas sem revestimento (Zn), com força constante de 180 kgf.....	96
Figura 5.2 -Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA e CC com chapas sem revestimento (Zn), com força constante de 230 kgf.....	97
Figura 5.3 -Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA e CC com chapas sem revestimento (Zn), com força constante de 280 kgf.....	98
Figura 5.4 -Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA e CC com chapas sem revestimento (Zn), com força constante de 330 kgf.....	99
Figura 5.5- Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA e CC com chapas sem revestimento (Zn).....	102
Figura 5.6- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA e CC de chapas sem revestimento (Zn), com tempo constante de 100 ms.....	104
Figura 5.7- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA e CC de chapas sem revestimento (Zn), com tempo constante de 150 ms.....	105
Figura 5.8- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA e CC de chapas sem revestimento (Zn), com tempo constante de 200 ms.....	106
Figura 5.9- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA e CC de chapas sem revestimento (Zn), com tempo constante de 250 ms.....	107

Figura 5.10- Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA e CC com chapas sem revestimento (Zn).....	110
Figura 5.11- Diagramas de soldabilidade em terceira dimensão (força, tempo e corrente) CA e CC com chapas sem revestimento (Zn).....	112
Figura 5.12 - Vistas frontais dos volumes dos diagramas de soldabilidade em CC e CA e os cortes (B-B e D-D).....	114
Figura 5.13- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA e CC com chapas revestidas (Zn), com força constante de 180 kgf.....	116
Figura 5.14- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA e CC com chapas revestidas (Zn), com força constante de 230 kgf.....	117
Figura 5.15- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA e CC com chapas revestidas (Zn), com força constante de 280 kgf.....	118
Figura 5.16- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA e CC com chapas revestidas (Zn), com força constante de 330 kgf.....	119
Figura 5.17- Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA e CC com chapas revestidas (Zn).....	121
Figura 5.18- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA e CC de chapas revestidas (Zn), com tempo constante de 100 ms.....	123
Figura 5.19- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA e CC de chapas revestidas (Zn), com tempo constante de 150 ms.....	124
Figura 5.20- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA e CC de chapas revestidas (Zn), com tempo constante de 200 ms.....	125
Figura 5.21- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA e CC de chapas revestidas (Zn), com tempo constante de 250 ms.....	126
Figura 5.22- Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA e CC com chapas revestidas (Zn).....	128
Figura 5.23 - Diagramas de soldabilidade em terceira dimensão (força, tempo e corrente) CA e CC com chapas revestidas (Zn).....	130
Figura 5.24- Vistas frontais dos volumes dos diagramas de soldabilidade em CC e CA com chapas revestidas com Zn e os cortes (A-A e C-C).....	131
Figura 5.25- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn), com força constante de 180 kgf....	133
Figura 5.26- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn), com força constante de 230 kgf....	134
Figura 5.27- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn), com força constante de 280 kgf....	135
Figura 5.28- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn), com força constante de 330 kgf....	136
Figura 5.29- Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn).....	138
Figura 5.30- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn), com tempo constante de 100ms...	140
Figura 5.31- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn), com tempo constante de 150ms...	141
Figura 5.32- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn), com tempo constante de 200ms...	142
Figura 5.33- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn), com tempo constante de 250ms...	143
Figura 5.34- Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn).....	145

Figura 5.35- Diagramas de soldabilidade em terceira dimensão (força, tempo e corrente) CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn).....	147
Figura 5.36- Vistas frontais dos volumes dos diagramas de soldabilidade em CA com revestimento e sem revestimento de Zn e os cortes (C-C) e (D-D)..	149
Figura 5.37- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn), com força constante de 180 kgf....	151
Figura 5.38- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn), com força constante de 230 kgf....	152
Figura 5.39- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn), com força constante de 280 kgf....	153
Figura 5.40- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn), com força constante de 330 kgf....	154
Figura 5.41- Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn).....	156
Figura 5.42- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn), com tempo constante de 100 ms..	158
Figura 5.43- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn), com tempo constante de 150 ms..	159
Figura 5.44- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn), com tempo constante de 200 ms..	160
Figura 5.45- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn), com tempo constante de 250 ms..	161
Figura 5.46- Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn).....	163
Figura 5.47- Diagramas de soldabilidade em terceira dimensão (força, tempo e corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn).....	165
Figura 5.48- Vistas frontais dos volumes dos diagramas de soldabilidade em CC com revestimento e sem revestimento de Zn e os cortes (A-A) e (B-B)..	166
Figura 5.49 - Resistências e energias dinâmicas dos pontos otimizados na soldagem em CA e CC de chapas sem revestimento.....	168
Figura 5.50 - Resistências e energias dinâmicas dos pontos otimizados na soldagem em CA e CC de chapas revestidas com Zn.....	170
Figura 5.51 – Desenho esquemático da queima do Zn (estágios 2 e 3 do gráfico da resistência dinâmica da figura 5.50).....	171
Figura 5.52 - Resistências e energias dinâmicas dos pontos otimizados na soldagem em CA de chapas revestidas com Zn e não revestidas.....	172
Figura 5.53 - Resistências e energias dinâmicas dos pontos otimizados na soldagem em CC de chapas revestidas com Zn e não revestidas.....	174
Figura 5.54- Exemplo das rugosidades superficiais dentro e fora da linha de ação da força entre os eletrodos.....	176
Figura 5.55- Gráfico da resistência elétrica de contato versus rugosidade superficial (Rz) dentro do ponto (força constante de 260kgf), de chapas revestidas com Zn e sem revestimento.....	177
Figura 5.56- Dimensões dos pontos de solda otimizados coletados através das macrografias.....	179
Figura 5.57 – Dimensões das macrografias (a); fotos e gráficos dos ensaios por tração (b); dos pontos ótimos na soldagem em CA e CC em chapas sem revestimento.....	180

Figura 5.58- Dimensões das macrografias (a) e os gráficos das resistências mecânicas (b) dos pontos ótimos na soldagem em CA e CC em chapas com revestimento de Zn.....	182
Figura 5.59 – Dimensões das macrografias (a) e os gráficos das resistências mecânicas (b) dos pontos ótimos na soldagem em CA em chapas com revestimento de Zn e sem revestimento.....	184
Figura 5.60 – Dimensões das macrografias (a) e os gráficos das resistências mecânicas (b) dos pontos ótimos na soldagem em CC em chapas com revestimento de Zn e sem revestimento.....	185
Figura 5.61 – Gráfico das micros-durezas (Vickers HV) em diferentes regiões no ponto de solda, em chapas revestidas com Zn e sem revestimento.....	187

LISTA DE TABELAS:

Tabela 3.1- Resistividade de alguns condutores e isolantes [13].....	12
Tabela 3.2- Coeficiente de temperatura de alguns materiais [13].....	14
Tabela 3.3 – Resumo dos principais tipos de revestimento galvanizado utilizados em operações da indústria automotiva [22].....	35
Tabela 3.4 – Características dos materiais dos eletrodos conforme a classificação da RWMA [25].....	42
Tabela 3.5 - Utilização e principais características dos eletrodos da fig. 3.21 [12].....	47
Tabela 3.6 – Especificação da água para refrigeração [27].....	53
Tabela 3.7 - Itens básicos para a inspeção visual da soldagem a ponto [13]..	57
Tabela 4.1 - Valores encontrados das propriedades mecânicas das chapas sem revestimento usadas nos experimentos.....	76
Tabela 4.2 - Valores encontrados nas análises das propriedades mecânicas das chapas com revestimento usadas nos experimentos.....	76
Tabela 4.3- Equipamentos usados nas medições de tensão e corrente.....	87
Tabela 4.4 – Características técnicas dos equipamentos de soldagem utilizados nos experimentos.....	92
Tabela 5.1 - Áreas dos diagramas de soldabilidade com força constante entre CA e CC com chapas sem revestimento e as respectivas áreas comuns resultantes.....	100
Tabela 5.2 - Áreas dos diagramas de soldabilidade com tempo constante entre CA e CC com chapas sem revestimento e as respectivas áreas comuns resultantes.....	103
Tabela 5.3 - Áreas dos diagramas de soldabilidade com força constante entre CA e CC com chapas revestidas (Zn) e as respectivas áreas comuns resultantes.....	108
Tabela 5.4 - Áreas dos diagramas de soldabilidade com tempo constante entre CA e CC com chapas revestidas (Zn) e as respectivas áreas comuns resultantes.....	111
Tabela 5.5 - Áreas dos diagramas de soldabilidade com força constante em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn) e as respectivas áreas comuns resultantes.....	120
Tabela 5.6 - Áreas dos diagramas de soldabilidade com tempo constante em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn) e as respectivas áreas comuns resultantes.....	122
Tabela 5.7 - Áreas dos diagramas de soldabilidade com força constante em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn) e as respectivas áreas comuns resultantes.....	127
Tabela 5.8 - Áreas dos diagramas de soldabilidade com tempo constante em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn) e as respectivas áreas comuns resultantes.....	129
Tabela 5.9 – Desvio padrão (S) e coeficiente de variação (C.V) com forças constantes entre CA com chapas revestidas com Zn e sem revestimento.....	137
Tabela 5.10 - Áreas dos diagramas de soldabilidade com força constante em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn) e as respectivas áreas comuns resultantes.....	139

Tabela 5.11 – Desvio padrão (S) e coeficiente de variação (C.V) com tempos constantes entre CA com chapas revestidas com Zn e sem revestimento.....	144
Tabela 5.12 - Áreas dos diagramas de soldabilidade com tempo constante em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn) e as respectivas áreas comuns resultantes.....	146
Tabela 5.13 – Desvio padrão (S) e coeficiente de variação (C.V) com forças constantes entre CC com chapas revestidas com Zn e sem revestimento.....	155
Tabela 5.14- Áreas dos diagramas de soldabilidade com força constante em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn) e as respectivas áreas comuns resultantes.....	157
Tabela 5.15 – Desvio padrão (S) e coeficiente de variação (C.V) com tempos constantes entre CC com chapas revestidas com Zn e sem revestimento.....	162
Tabela 5.16 - Áreas dos diagramas de soldabilidade com tempo constante em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn) e as respectivas áreas comuns resultantes.....	164
Tabela 5.17 - Comparação das rugosidades superficiais fora e dentro do ponto de chapas revestidas com Zn e sem revestimento.....	178
Tabela 5.18 - Média (X), desvio padrão (S) e coeficiente de variação dos diâmetros dos pontos durante os experimentos.....	178
Tabela 5.19 - Comparação das resistências elétricas de contato dentro do ponto em chapas revestidas com Zn e sem revestimento.....	178

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS:

CA:	Corrente Alternada.
CC:	Corrente contínua.
Cp:	Porcentagem da área metálica condutora em contato.
IACS:	International Annealing Copper Standard.
E_s :	Energia Elétrica dinâmica entre eletrodos.
I_s :	Corrente instantânea de soldagem.
$I_{s\text{ RMS}}$:	Corrente de soldagem eficaz.
ppm:	Partes Por Milhão.
RMS:	Root Mean Square.
$V_{el\text{ RMS}}$:	Tensão eficaz entre os eletrodos.
v_{el} :	Tensão instantânea entre os eletrodos.
ZAC:	Zona Afetada pelo Calor.
3D	Terceira Dimensão.
A/D	Analógico/Digital

LISTA DE SÍMBOLOS:

$\rho:$	Resistividade do material à temperatura θ °C.
ρ_0	Resistividade do material a temperatura ambiente.
$\alpha:$	Constante do material (coeficiente de temperatura °C ⁻¹).
$\theta:$	Temperatura de trabalho.
$\theta_0:$	Temperatura ambiente °C.

SUMÁRIO:

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA:.....	1
2. OBJETIVO:.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:.....	4
3.1 História da Soldagem por Resistência elétrica:.....	4
3.1.1 Soldagem por resistência elétrica:.....	6
3.2 Principais tipos de soldagem por resistência elétrica:.....	6
3.2.1 Soldagem por projeção:.....	6
3.2.2 Soldagem a topo:.....	7
3.2.3 Soldagem por costura:.....	8
3.3 Soldagem a ponto por resistência elétrica:.....	9
3.3.1 Vantagens da Soldagem a ponto por Resistência:.....	10
3.3.2 Desvantagens da Soldagem a Ponto por Resistência:.....	11
3.4 Fundamentos do processo de soldagem a ponto por resistência:.....	11
3.4.1 Resistência elétrica:.....	11
3.4.2 Resistividade (2ª lei de ohm):.....	12
3.4.3 Resistências elétricas no processo de soldagem a ponto por resistência.....	14
3.4.4 Geração de calor:.....	15
3.4.5 Resistências de contato:.....	17
3.4.6 Resistência dinâmica de contato:.....	20
3.4.7 Expansão térmica:.....	24
3.5- Sequência da soldagem a ponto por resistência:.....	26
3.6 - Parâmetros de soldagem:.....	27
3.6.1- Tempos de pré-pressão e pressão:.....	28
3.6.2 Força dos eletrodos:.....	29
3.6.3 Tempo de soldagem:.....	29
3.6.4 Corrente de soldagem:.....	30
3.6.5 Tempo de resfriamento:.....	30
3.7 – Influência dos parâmetros no processo:.....	31
3.7.1 - Efeitos dos tempos de pré-pressão e pressão:.....	31
3.7.2 Efeitos da força dos eletrodos:.....	32
3.7.3 Efeitos dos tempos de soldagem:.....	33
3.7.4 Efeito do tempo de resfriamento:.....	35
3.8 Aços galvanizados na indústria automotiva:.....	35
3.8.1 Processo de galvanização por imersão a quente:.....	36
3.8.2 Processo de galvanização por eletrodeposição:.....	37
3.8.3 Soldabilidade das chapas revestidas e sem revestimento:.....	37
3.9 Eletrodo para soldagem a ponto por resistência:.....	38
3.9.1 Características necessárias ao material para o eletrodo:.....	38
3.9.2 Formato do eletrodo:.....	41
3.9.3 Compensação do desgaste dos eletrodos (stepper):.....	43
3.9.4- Fresagem dos eletrodos:.....	44
3.10 Refrigeração dos eletrodos:.....	45

3.11 Diagrama de soldabilidade:.....	47
3.12 Transformação metalúrgica na soldagem a ponto por resistência:.....	48
3.13 Métodos de controle de qualidade da solda:.....	52
3.13.1 Inspeção visual:.....	52
3.13.2 Ensaio não destrutivos:.....	54
3.13.2.1 Ensaio por ultra-som:.....	55
3.13.3 Ensaio destrutivos:.....	56
3.13.4 Ensaio metalográficos:.....	60
3.13.4.1 Macrografia:.....	60
3.13.4.2 Micrografia:.....	61
3.14 Problemas operacionais:.....	61
3.14.1 Corrente de desvio:.....	61
3.14.2 Indentação:.....	63
3.14.3 Distribuição da corrente:.....	64
3.14.4 Desalinhamento do eletrodo:.....	65
3.14.5 Expulsão de material:.....	67
3.15 Equipamentos de soldagem a ponto por resistência:.....	68
3.15.1 Máquina monofásica CA:.....	70
3.15.2 Máquina trifásica CC:.....	71
3.15.3 Máquina inversora de média frequência (MFDC):.....	72
3.15.4 Comparação da geração de calor entre o equipamento de CA e o equipamento de CC:.....	73
3.16 Comentários finais:.....	74
4. MATERIAIS E MÉTODOS:.....	75
4.1 Características dos corpos-de-prova usados nos experimentos:.....	75
4.2 Critérios de aceitação do ponto de solda:.....	77
4.2.1 Determinação dos diagramas de soldabilidade:.....	77
4.2.2 Determinação do diâmetro mínimo da seção do ponto d_L :.....	81
4.2.3 Determinação do diâmetro mínimo do ponto de solda (d_p):.....	82
4.2.4 Determinação da força mínima do ponto de solda ($F_{min.}$):.....	84
4.3 Medições da Tensão, Corrente e da Resistência Dinâmica durante a soldagem:.....	86
4.3.1 Cálculo das resistências dinâmicas:.....	89
4.4 Cálculo da Energia Elétrica Dinâmica:.....	90
4.5 Monitoramento das forças de soldagem:.....	91
4.6 Equipamentos de soldagem:.....	92
4.7 Eletrodos utilizados nos experimentos:.....	92
4.8 Análise da resistência elétrica de contato versus rugosidade superficial das chapas:.....	93
4.9 Perfil de dureza:.....	94
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO:.....	95
5.1 Diagramas de soldabilidade em CA e CC com chapas sem revestimento (Zn):.....	95
5.1.1 Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA e CC com chapas sem revestimento (Zn):.....	95
5.1.1.1 Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA e CC com chapas sem revestimento (Zn):.....	101

5.1.2 Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA e CC de chapas sem revestimento (Zn):.....	103
5.1.2.1 Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA e CC com chapas sem revestimento (Zn):.....	109
5.1.3 Diagramas de soldabilidade em terceira dimensão (força, tempo e corrente) CA e CC com chapas sem revestimento (Zn):.....	111
5.2 Diagramas de soldabilidade em CA e CC com chapas revestidas (Zn):.....	115
5.2.1 Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA e CC com chapas revestidas (Zn):.....	115
5.2.1.1 Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA e CC com chapas revestidas (Zn):.....	121
5.2.2 Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA e CC de chapas revestidas (Zn):.....	122
5.2.2.1 Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA e CC com chapas revestidas (Zn):.....	127
5.2.3 Diagramas de soldabilidade em terceira dimensão (força, tempo e corrente) CA e CC com chapas sem revestimento (Zn):.....	129
5.3 Diagramas de soldabilidade em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn):.....	132
5.3.1 Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn):.....	132
5.3.1.1 Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn):....	138
5.3.2 Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn):.....	139
5.3.2.1 Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn):....	145
5.3.3 Diagramas de soldabilidade em terceira dimensão (força, tempo e corrente) CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn):.....	146
5.4 Diagramas de soldabilidade em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn):.....	150
5.4.1 Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn):.....	150
5.4.1.1 Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn):....	156
5.4.2 Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn):.....	157
5.4.2.1 Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn):....	163
5.4.3 Diagramas de soldabilidade em terceira dimensão (força, tempo e corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn):.....	164
5.5 Análises da resistência e energia dinâmica dos pontos ótimos:.....	167
5.5.1 Resistência e energia dinâmica do ponto ótimo em soldagem com CA e CC de chapas sem revestimento:.....	167
5.5.2 Resistência e energia dinâmica do ponto ótimo em soldagem com CA e CC de chapas com revestimento (Zn):.....	169

5.5.3 Resistência e energia dinâmica do ponto ótimo em soldagem com CA em chapas revestidas e não revestidas (Zn):.....	172
5.5.4 Resistência e energia dinâmica do ponto ótimo em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn):.....	173
5.6 Análise da correlação entre resistência elétrica de contato versus rugosidade superficial de chapas com revestimento de Zn e chapas sem revestimento:.....	175
5.7 Dimensões (macrografia) e resistência mecânica (ensaio de tração) do ponto ótimo:.....	179
5.7.1 Comparação das dimensões e resistência mecânica do ponto ótimo em CA e CC sem revestimento:.....	179
5.7.2 Comparação das dimensões e resistência mecânica do ponto ótimo em CA e CC com revestimento de Zn:.....	181
5.7.3 Comparação das dimensões e resistência mecânica do ponto ótimo em CA com revestimento de Zn e sem revestimento:.....	183
5.7.4 Comparação das dimensões e resistência mecânica do ponto ótimo em CC com revestimento de Zn e sem revestimento:.....	185
5.8 Comparação das micros-durezas dos pontos de solda em chapas revestidas com Zn e sem revestimento:.....	186
6. CONCLUSÕES:.....	188
SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS:.....	191
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:.....	192

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA:

“Denomina-se soldagem ao processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. A solda é o resultado deste processo” [1].

A soldagem por resistência elétrica compreende um grupo de processos no qual a união de peças metálicas é produzida em superfícies sobrepostas ou em contato topo a topo, pelo calor gerado na junta através de resistência à passagem de corrente elétrica (efeito Joule) e pela aplicação de pressão [2].

A soldagem a ponto por resistência elétrica envolve a aplicação da corrente elétrica pelo eletrodo que concentra a corrente e pressão na área da soldagem. O ponto de solda no metal é produzido entre as duas chapas e entre os eletrodos [3].

Uma carroceria de veículo requer milhares de pontos de solda, usando sistemas robóticos a fim de que as uniões possam ser feitas em poucos segundos. O tempo mínimo de soldagem e a habilidade mínima do operador são as principais vantagens deste processo. A principal desvantagem é a necessidade dos eletrodos terem acessibilidade em ambos os lados da peça a ser soldada [3].

Os eletrodos usados na soldagem a ponto não somente conduzem a corrente para as peças a serem soldadas, mas também transmitem a força e dissipam o calor da zona de solda. Os eletrodos são tipicamente feitos de liga de cobre e refrigerados com água [3].

Um ponto de solda leva menos que um segundo para ser feito, como por exemplo, uma união de duas chapas de aço de 1,6 mm de espessura os parâmetros de solda ficam aproximadamente em 12KA (corrente alternada) e 4 V e requer um tempo de solda de 15 ciclos ou 0,25 s [3].

O equipamento básico usado na soldagem a ponto por resistência consiste de um circuito elétrico, equipamento de controle e um sistema de aplicação de força.

O sistema elétrico consiste de uma fonte de energia, conexões e eletrodos. As fontes de energia elétrica podem fornecer corrente contínua ou alternada. As máquinas de corrente alternada (CA) são alimentadas pela rede

monofásica em tensão alternada gerando a corrente de soldagem em CA. As máquinas inversoras de média frequência de corrente contínua (CC) são alimentadas pela rede trifásica em CA, produzindo corrente contínua na soldagem [2].

A formação de um ponto de solda e o seu comportamento durante a soldagem, em geral, são diretamente dependentes de vários fatores. Dentre os mais relevantes incluem-se: o sistema de soldagem a ponto e a interação destes fatores, como os materiais, eletrodos, equipamentos, desenho da junta, planejamento de e condições de soldagem.

Os revestimentos metálicos das chapas de aço a serem soldadas possuem diferentes propriedades físicas e elétricas em comparação com chapas de aços baixo carbono. É de se esperar que a formação do ponto e seu comportamento durante a soldagem sejam diferentes quando este ponto for efetuado sobre chapa de aço não revestido e sobre chapa com revestimento metálico.

Dentro deste contexto, a soldagem de chapas de aço não revestidas e revestidas com Zn utilizando equipamentos com CA e CC de média frequência, deve ser estudada e desenvolvida. Envolvem tanto as propriedades e a soldabilidade, assim como qualidade, custo, produtividade, viabilidade e facilidade de execução, sempre em atendimento as normas aplicáveis. Isto justifica o estudo da soldabilidade para que sejam observadas quais as melhores condições de soldagem para as respectivas chapas e equipamentos citados, visando à qualificação da soldagem conforme norma.

Portanto, o presente trabalho será voltado para a avaliação e o estudo da soldabilidade de chapas de aço para indústria automotiva revestidas e não revestidas, comparando-se com dois equipamentos de soldagem a ponto, utilizando CA e CC de média frequência.

As variáveis estudadas: foram à força, a corrente e o tempo de soldagem. A partir destas variações foram determinadas: a geometria, propriedade mecânica de tração, a resistência dinâmica e a energia dinâmica do ponto de solda, a fim de compreender os fenômenos que ocorrem durante a soldagem, mas também o atendimento aos requisitos mínimos de norma para a qualificação de um procedimento de soldagem.

2. OBJETIVO:

Este trabalho tem por objetivo estudar a soldabilidade de chapas de aço com espessura de 0,8 mm, revestidas e não revestidas com zinco, para indústria automotiva, comparando-se dois equipamentos de soldagem a ponto, que utilizam corrente de soldagem alternada (CA) e corrente contínua de média frequência (CC), visando à qualificação aos requisitos mínimos da norma.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:

3.1 História da Soldagem por Resistência Elétrica:

O físico inglês James Prescott Joule (1818-1889) que era filho de Benjamin Joule (1784-1858), um rico cervejeiro, foi educado em casa, em Salford, até 1834 quando foi enviado, com seu irmão Benjamim, para estudar com John Dalton na Sociedade Literária e Filosófica de Manchester. Os dois só receberam educação por dois anos em aritmética e geometria, até que Dalton foi forçado a se aposentar devido a um acidente vascular cerebral. Entretanto, a influência de Dalton deixou marcas duradouras assim como a de seus associados, o químico William Henry e os engenheiros de Manchester Peter Ewart e Eaton Hodgkinson. Joule foi posteriormente tutelado por John Davies. Fascinado por eletricidade, ele e seu irmão faziam experiências dando choques elétricos em si e nos empregados da família [4].

Joule tornou-se o gerente da fábrica de cerveja e tinha um papel ativo até a venda do negócio em 1854. A ciência era um hobby, mas ele logo começou a investigar a viabilidade da substituição do motor a vapor da cervejaria pelo recém inventado motor elétrico. Em 1838, seus primeiros artigos científicos sobre a electricidade foram contribuições para *Annals of Electricity*, a revista científica fundada e conduzida por William Sturgeon. Joule em 1840 descobriu e publicou a lei que relaciona a corrente elétrica e a resistência do condutor ao calor transmitido, que ficou mundialmente conhecido como a Lei de Joule [4]. Em 1856 Joule acidentalmente realiza uma soldagem por resistência elétrica em fios de aço [5].

E finalmente duas décadas depois em 1877 o engenheiro elétrico e inventor inglês Elihu Thomson (1853-1937) que foi um dos fundadores das maiores companhias de eletricidade nos Estados Unidos, Reino Unido e França [5], estuda e sistematiza a soldagem por resistência elétrica com auxílio de pressão mecânica. Thomson é considerado pai da soldagem por resistência, a primeira patente foi em março de 1886, seguida por 150 outras; o campo de utilização era especificamente de fios metálicos [5].

A figura 3.1 apresenta o desenho de uma das primeiras patentes de soldagem por resistência com auxílio de pressão mecânica, feita por Thomson em 1891 [4].

(No Model.)

4 Sheets—Sheet 1.

E. THOMSON.
METHOD OF ELECTRIC WELDING.

No. 451,345.

Patented Apr. 28, 1891.

ATTEST:
J. Hurdle
Wm. H. Bapel

INVENTOR:
Elihu Thomson
By *H. C. Townsend*
Attorney

Figura 3.1 - Dispositivo de soldagem por resistência elétrica, patenteado por Thomson em 1891 [4].

3.1.1 Soldagem por resistência elétrica:

A junção das peças na soldagem por resistência elétrica é feita através da geração de calor, devida a passagem de corrente elétrica, e da aplicação de pressão. Durante o processo, as peças aquecem-se e ocorre a fusão localizada no ponto de contato na superfície de separação entre ambas [1].

A soldagem por resistência é um dos métodos mais utilizados para unir metais, pois serve para variadas espessuras, formas e tipos de materiais, além de que o equipamento, com pequenas modificações, pode ser adaptado para soldar várias peças diferentes [6].

Utiliza-se a soldagem por resistência nas indústrias de automóvel, de eletroeletrônicos, na fabricação de eletrodomésticos, de tubulações, de equipamento ferroviário e esportivo, entre outras [6].

3.2 Principais tipos de soldagem por resistência elétrica:

Os processos de soldagem por resistência elétrica mais utilizados são:

- Soldagem a ponto.
- Soldagem por projeção.
- Soldagem por costura.
- Soldagem de topo.

Estes quatro processos são extremamente utilizados em juntas metálicas com espessuras até 5mm [7].

3.2.1 Soldagem por projeção:

Nessa variação executa-se a soldagem de peças com protuberâncias em chapas, popularmente chamadas de soldagem por projeção. Utiliza-se quando as espessuras dos materiais são muito diferentes, quando uma das partes possui forma específica, ou pela necessidade de precisão de

posicionamento da peça em relação à outra. Uma das peças possui saliência no material, determinando a quantidade de massa que será fundida. Essa saliência pode ser formada no processo de estampagem do produto (mais comum), ou outro processo que imprima aumento de material em determinada região do produto. A fusão ocorrerá, então, no local em que a saliência estiver em contato com a outra peça, não dependendo do formato ou posição dos eletrodos, porém seu alinhamento e distância de contato até o local da saliência são muito importantes para o correto funcionamento do processo [8]. A figura 3.2 ilustra esse tipo de soldagem.

Figura 3.2 - Esquema do processo de soldagem por projeção [8].

3.2.2 Soldagem a topo:

Aplica-se a corrente elétrica através das peças que estão sobre pressão, ocorrendo o aquecimento da área de contato até a fusão. As peças são presas nos mordentes (eletrodos) que estão ligados eletricamente aos terminais do secundário do transformador. Um dos mordentes é fixo no corpo da máquina e o outro está instalado em mesa móvel responsável pela movimentação da peça e aplicação da força de contato entre as peças. A força de fixação das peças deve ser suficiente para assegurar boa passagem de corrente e impedir o

deslizamento quando submetida à força da compressão [8]. A figura 3.3 ilustra essa variação do processo.

Figura 3.3- Esquema do processo de soldagem a topo [8].

3.2.3 Soldagem por costura:

A solda por costura pode ser entendida como aquela efetuada por pontos em seqüência, em que os eletrodos são substituídos por discos. Aplica-se esse tipo de soldagem em produtos que necessitam união contínua. Durante a soldagem os discos giram e são percorridos pela corrente de solda, devendo-se manter o contato permanente com a peça a ser soldada até o final da solda, sempre aplicando força entre os eletrodos. A figura 3.4 ilustra esse tipo de soldagem, cada novo ponto de solda representa a inserção de caminho alternativo para a passagem de corrente, reduzindo-se substancialmente a corrente na região entre os eletrodos. Isto requer o incremento gradual do valor

da corrente até que a resistência paralela se estabilize, quando se mantém o valor da corrente [8].

Figura 3.4- Esquema do processo de soldagem por costura [8].

3.3 Soldagem a ponto por resistência elétrica:

Por meio da circulação da corrente elétrica entre os eletrodos de contato com as peças, é gerada, por efeito Joule, uma quantidade de calor na resistência de contato entre as superfícies, provocando a elevação de temperatura e iniciando a fusão dos metais [9]. Como ilustra a figura 3.5, os eletrodos aplicam força entre as peças e a massa metálica que está se fundindo fica sob pressão, evitando sua expulsão pela superfície de contato [10].

A soldagem a ponto por resistência pode ser executada manualmente, por robô ou por máquina estacionária. Pontos de solda similares com mesmas propriedades podem ser obtidos com altas velocidades de produção controlando automaticamente a corrente, força dos eletrodos e o tempo de soldagem. A baixa tensão e a alta intensidade de corrente elétrica para o processo de soldagem são obtidos pelos transformadores e a pressão exercida pelos eletrodos é obtida por dispositivos, que podem ser mecânicos, pneumáticos ou hidráulicos [11].

Figura 3.5- Formação do ponto de solda [12].

3.3.1 Vantagens da Soldagem a ponto por Resistência:

As maiores vantagens da soldagem por resistência a ponto são a alta velocidade e a facilidade de automação com alta taxa de produção; em muitas operações é um processo econômico, devido a ser mais rápido do que os processos a arco elétrico e com maçarico, além de requerer menor habilidade de execução [6].

A soldagem por pontos em aços utiliza uma intensidade de corrente de 5.000 a 20.000 e tensão de 3 a 20 V. Esses valores podem ser maiores para metais que possuem alta condutividade térmica como ligas de alumínio e cobre. Embora seja mais comum a união de duas chapas de mesma composição química e espessura o processo pode ser utilizado para a união de mais de duas chapas, as quais podem ter composição química e espessuras diferentes [6].

3.3.2 Desvantagens da Soldagem a Ponto por Resistência:

A soldagem por pontos apresenta algumas limitações em comparação com a soldagem a arco elétrico com junta de topo, a sobreposição da junta aumenta o peso e o custo do material utilizado; os custos do equipamento são geralmente maiores do que os custos do equipamento para soldagem a arco elétrico; a soldagem por pontos tem menor resistência à tração e à fadiga [6].

3.4 Fundamentos do processo de soldagem a ponto por resistência:

Dois contatos elétricos, denominados eletrodos, são ligados a uma fonte de tensão elétrica e posicionados ortogonalmente na área onde é necessário formar o ponto de união entre as chapas.

A área de contato entre as chapas forma uma resistência elétrica que, ao ser atravessado por uma corrente elétrica, produz calor e aumenta a temperatura até os materiais alcançarem o ponto de fusão [13].

3.4.1 Resistência elétrica:

A dificuldade ou oposição da passagem das cargas elétricas em um meio condutor é denominada de resistência elétrica. Esta dificuldade deve-se ao choque entre os elétrons que estão sendo deslocados e os átomos que compõem o condutor. Para vencer estas colisões é necessário que exista uma diferença de potencial entre as extremidades do condutor.

No sistema internacional de medidas a resistência elétrica é medida em Ohms (Ω), em homenagem ao matemático alemão George Simon Ohm (1787-1854) [13], como expressa a razão:

$$1\text{Ohm} = \frac{1\text{Volt}}{1\text{Ampère}} \quad (1)$$

3.4.2 Resistividade (2ª lei de Ohm):

Alguns materiais possuem uma fraca ligação dos elétrons ao núcleo do átomo, permitindo que eles fiquem livres, possibilitando o fluxo de elétrons ordenados, partindo de uma diferença de potencial. Estes materiais são classificados como condutores. De forma inversa, outros materiais têm uma forte ligação dos elétrons ao núcleo dificultando o fluxo de elétrons. Estes são classificados como isolantes [13].

A resistência que os condutores impõem á corrente elétrica depende do material que os constituem do comprimento, secção transversal e temperatura. Esta relação, ou lei física, foi descoberta por Ohm e é representada pela equação:

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (2)$$

Onde:

R = Resistência do condutor ρ = Resistividade do material

l = Comprimento s = Secção transversal

Segue abaixo a tabela 3.1, que mostra a resistividade de alguns materiais condutores e isolantes.

Tabela 3.1- Resistividade de alguns condutores e isolantes a 20°C[13].

Material	Resistividade ρ (Ω m)	Classificação
Prata	1.6×10^{-8}	Condutor
Cobre	1.7×10^{-8}	Condutor
Ouro	2.4×10^{-8}	Condutor
Alumínio	2.7×10^{-8}	Condutor
Zinco	5.9×10^{-8}	Condutor
Ferro	1.0×10^{-7}	Condutor
Tungstênio	$4,9 \times 10^{-5}$	Condutor
Madeira	$10^6 \sim 10^7$	Isolante
Acrílico	$> 10^{13}$	Isolante
Plástico	$> 10^{14}$	Isolante

A resistividade de um material altera com a temperatura devido ao aumento da agitação atômica no condutor. Isto faz com que os elétrons livres tenham um maior número de colisões, dificultando o fluxo ordenado [13].

A relação que expressa a variação da resistividade com a temperatura está representada na equação:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(\theta - \theta_0)] \quad (3)$$

Onde:

ρ = Resistividade do material à temperatura θ °C

ρ_0 = Resistividade do material a temperatura ambiente

α = Constante do material (coeficiente de temperatura °C⁻¹)

θ = Temperatura de trabalho

θ_0 = Temperatura ambiente

Para um condutor de comprimento e secção definidos (não variável), a resistência em função da temperatura é expressa pela equação:

$$R = R_0 [1 + \alpha(\theta - \theta_0)] \quad (4)$$

Onde:

R = Resistência à temperatura θ °C

R_0 = Resistência à temperatura ambiente

α = Constante do material (coeficiente de temperatura °C⁻¹)

θ = Temperatura de trabalho °C

θ_0 = Temperatura ambiente °C

A tabela 3.2 mostra o coeficiente de temperatura (α) de alguns materiais.

Tabela 3.2- Coeficiente de temperatura de alguns materiais [13].

Material	Coeficiente α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Prata	$3,8 \times 10^{-3}$
Cobre	$3,9 \times 10^{-3}$
Alumínio	$3,9 \times 10^{-3}$
Ferro	$1,0 \times 10^{-3}$
Tungstênio	$4,5 \times 10^{-3}$

3.4.3 Resistências elétricas no processo de soldagem a ponto por resistência:

O circuito secundário de uma máquina de soldagem a ponto e as chapas sobrepostas a serem soldadas constituem numa série de resistências, como mostra a figura 3.6.

Figura 3.6- Resistências elétricas entre os eletrodos [14].

A somatória das resistências da corrente elétrica em todo o seu percurso altera sua magnitude. Existem na realidade pelo menos cinco resistências conectadas em série, que produzem o aquecimento da junta, cuja soma das resistências está expressa na equação abaixo [15]:

$$R = R_{\text{eletrodo-peçaA}} + R_A + R_{\text{solda}} + R_B + R_{\text{eletrodo-peçaB}} \quad (5)$$

A mais importante resistência requerida para formação da solda esta localizada na interface das chapas a serem soldadas (R_{solda}). A magnitude desta resistência depende das condições da superfície do metal de base e do tamanho, força e perfil da face de contato do eletrodo. Isto é um ponto importante para geração de calor, porém as superfícies de contato dos eletrodos não alcançam a temperatura de fusão durante a passagem da corrente, devido à alta condutividade térmica dos eletrodos e pelo fato que eles são geralmente refrigerados com água [15].

A resistência R na equação (5) é influenciada pela pressão de soldagem e pelo efeito da resistência de contato da interface entre as peças. As peças a serem soldadas devem ser firmemente fixadas para habilitar a passagem da corrente. Se a força do eletrodo aumentar será necessário aumentar a corrente para compensar a diminuição da resistência elétrica [15].

As resistências oferecidas à passagem de corrente pelas peças são muito inferiores às resistências oferecidas pelas superfícies de contato, podendo normalmente ser desprezadas [16].

3.4.4 Geração de calor:

O calor exigido pelo processo de soldagem a ponto é produzido pela resistência elétrica de contato entre as peças a serem soldadas, apresentadas na figura 3.5. Devido ao pequeno valor desta resistência, são exigidas

correntes relativamente altas para desenvolver calor necessário para a soldagem [17].

A magnitude do calor gerado depende de três fatores:

- Corrente de soldagem (Amperes).
- Conjunto de resistências elétricas (Ohms).
- Intervalo de tempo de passagem de corrente (segundos).

A energia térmica total desprendida neste processo pode ser calculada pela lei de Joule [16], como expresso na equação :

$$Q = k \int_0^t R(t).I^2 .dt \quad (6)$$

Onde:

Q = Calor gerado (cal).

R = Conjunto de resistência elétrica (Ohms).

t = Intervalo de tempo de passagem de corrente (segundos).

I = Corrente de soldagem (Amperes).

k= 1/4,185.

Como mostra a figura 3.6, o calor é requerido apenas nas interfaces dos metais bases e o calor gerado nos outros locais devem ser minimizados. Já que a maior resistência está localizada na interface entre as chapas, o calor é rapidamente desenvolvido nesse local [3].

Quando as condições de soldagem são adequadamente controladas, a temperatura de soldagem é primeiramente alcançada na interface entre as chapas. Durante o período de aquecimento, a região fundida cresce e se torna contínua para formar o ponto de solda [3].

Após cerca de 20% do tempo de soldagem ter transcorrido, o gradiente térmico é representado pela curva à esquerda na figura 3.7. A curva à direita representa o gradiente térmico no final do tempo de soldagem [18].

Figura 3.7- Distribuição da temperatura no processo de soldagem a ponto por resistência [18].

3.4.5 Resistências de contato:

Pode ser explicado como sendo a irregularidade da superfície dos condutores que provocam micro contatos diminuindo a secção transversal por onde circula a corrente elétrica. Como ilustra a figura 3.8 a força aplicada para estabelecer o contato entre os condutores e a área da secção transversal define o valor da resistência [13].

Figura 3.8 – Área que define a superfície da resistência de contato [13].

A causa dos grandes valores das resistências elétricas nas superfícies de contato é a existência de um filme óxido e impurezas (não condutoras) entre as peças e os eletrodos, conforme mostra a figura 3.9. Em consequência haverá somente uma pequena área condutora em contato, levando a uma elevada intensidade de corrente, devido à diminuição de área. [16].

- A-Metal não afetado.
- B-Metal afetado
- C-Camada de óxido
- D-Água e oxigênio adsorvidos.
- E-Gordura
- F-Partículas de poeira

Figura 3.9 – Representação da superfície metálica [2].

As resistências de contato são usualmente de 50-100 Ω , sendo porém, de 20 Ω para o alumínio. A variação de resistência de contato com a pressão é em função do estado superficial das peças a serem soldadas [7], como pode ser visto na figura 3.10.

Figura 3.10 Correlação entre Resistência de contato e pressão do eletrodo [7].

Cálculos teóricos, complementados por fatores de correções experimentais, levaram à seguinte equação [5]:

$$R = \frac{0,85 \cdot \rho \cdot \sqrt{Y}}{\sqrt{\pi n C_p}} \quad (7)$$

Onde:

R=Resistência de contato. ($\mu \Omega$)

Y=Limite de escoamento. (Kgf / m²)

C_p =porcentagem da área metálica condutora em contato.

ρ = Resistividade do material. ($\Omega \cdot m$)

n= números de pontos por unidade de área.

A fórmula acima pode ser aplicada com razoável exatidão para metais ferrosos e pressões da ordem de 0,3 a 0,8 do limite de escoamento (Y). Para pressões da ordem ou ultrapassando o limite de escoamento, a equação (7) não é válida, a condutividade aumenta de forma aproximadamente linear com a

pressão [5]. A equação (7) não é válida para o alumínio devido provavelmente à camada de óxido de alumínio [16].

3.4.6 Resistência dinâmica de contato:

A resistência elétrica de contato é responsável pelo aquecimento por efeito Joule e consequentemente a formação do ponto de solda durante o processo de soldagem em chapas de aço. A resistência elétrica de contato muda rapidamente durante o período de soldagem, portanto, é de natureza dinâmica. Por muitos anos, a resistência dinâmica de contato tem sido analisada para compreender a evolução do ponto de solda. Em tempos recentes a resistência dinâmica de contato está sendo usada como parâmetro de qualidade [19].

Geralmente os trabalhos publicados, indicam que os efeitos da pressão e temperatura na resistência dinâmica de contato são cruciais para descrever com precisão o início e crescimento do ponto de solda [19].

O fator chave na abordagem é que a resistência elétrica de contato depende da topografia de superfície, propriedades termo-físicas, rugosidade da superfície de contato, resistência mecânica e a resistividade do material a ser soldado [19]. Na figura 3.11 ilustram-se os principais estágios da resistência dinâmica durante a formação do ponto de solda. Com base na figura tem-se [20]:

- **Estágio I** = fragmentação de óxidos ou contaminações superficiais e colapso da rugosidade superficial nas interfaces das chapas.
- **Estágio II** = contato metal-metal = aquecimento concentrado na interface entre as duas chapas = resistência elétrica diminui com o aumento das áreas de contato e a resistividade aumenta com a temperatura = a competição entre estes dois mecanismos define o ponto 'α'.
- **Estágio III** = aumenta a resistividade com o aumento da temperatura; transição para o estágio IV na inflexão da curva (IC) = começa a fusão.

- **Estágio IV** = fusão por três mecanismos:

- Temperatura do material continua aumentando, aumentando a resistividade;

- Fusão na interface aumenta a área da seção transversal, diminuindo a resistência elétrica;

- A resistência mecânica do material diminui com o aumento da temperatura = colapso mecânico reduz a resistência; ponto 'β' indica início do crescimento do ponto.

- **Estágio V** = ponto cresce e pode ocorrer o colapso mecânico e a expulsão.

Figura 3.11- Esquema dos principais estágios da resistência dinâmica durante a formação do ponto de solda [adaptado da referência [20].

A curva da resistência dinâmica é função de [20]: tempo de soldagem; força do eletrodo; corrente de soldagem e das propriedades físicas do material que será soldado.

A figura 3.12 apresenta esquematicamente o efeito do aumento da corrente e da diferença de resistividade elétrica no posicionamento da curva.

A figura 3.12(a) mostra parâmetros característicos para comparação entre duas curvas.

A figura 3.12(b) mostra o aumento da corrente de soldagem, mantendo-se os outros parâmetros de soldagem constante. Com o aumento da corrente, o ponto ' α ' é deslocado para tempos um pouco menores. Isto mostra que o tempo de compensação entre a diminuição da resistência de contato e o aumento da resistividade com a temperatura. Da mesma maneira, o ponto de inflexão da curva 'IC' também se desloca para tempos menores, porém com valores de resistências dinâmicas praticamente iguais. Os pontos ' β ' mantêm a mesma resistência dinâmica e tempos menores também. Isto mostra que o tempo para início da formação do ponto é diminuído para correntes maiores. O tempo de término do ponto também é menor para a corrente maior.

Figura 3.12- Curva de resistência dinâmica esquemática com os parâmetros importantes para a soldagem (a). Em (b) efeito do aumento da corrente na curva da resistência dinâmica e em (c) efeito da diferença da resistividade do material na curva da resistência dinâmica [20].

A figura 3.12(c) mostra a alteração da resistência dinâmica com o aumento da resistividade dos materiais que serão soldados. O aumento da resistividade tem efeito comparável com o aumento da corrente. As diferenças estão nas diferenças das resistências dinâmicas nos pontos ' α ', IC e ' β ' com o aumento da resistividade.

3.4.7 Expansão térmica:

A magnitude de expansão térmica é diferente para cada material, como mostra a figura 3.13, causando uma força de expansão térmica durante determinado espaço de tempo que está limitado ao tipo de material e espessura; a fase sólida e líquida do metal expande com o calor, o aquecimento do líquido produz maior volume do que a expansão no estado sólido [10].

Figura 3.13- Expansão térmica da liga Al-Mg e Fe puro [10].

Entre as chapas e os eletrodos durante o processo não é permitida a expansão térmica livremente [10], devido à força aplicada pelos eletrodos (F_{eletrodo}), conforme ilustra a figura 3.14.

A força F_{eletrodo} é contraposta pela força do material líquido do ponto (F_{ponto}), que é gerada pela pressão causada pelo aumento de volume do ponto líquido e pela força gerada na interface entre as superfícies sólidas das chapas ($F_{\text{interface}}$). Existe uma região circular, no formato de um halo, na interface entre as chapas onde ocorre a soldagem por difusão. Esta região soldada gera uma força que impede a separação das chapas. Na prática esta força é muito menor que as outras duas e pode ser desprezada. Esta força é necessária para manter o contato térmico e elétrico nas interfaces. A grande expansão térmica necessita de grande força do eletrodo e freqüentemente resultam em largas e profundas indentações [10].

Figura 3.14 - Forças atuantes no ponto de solda [10].

Na figura 3.15 mostra o deslocamento do eletrodo durante a expansão térmica do aço na soldagem, que está representada em três regiões [10]:

- Região I: A corrente é aplicada e o metal é aquecido.
- Região II: Com aproximadamente três ciclos de aquecimento o deslocamento dos eletrodos apresentam um súbito aumento, devido à fusão entre as chapas; o metal no estado líquido apresenta uma expansão de volume maior que no estado sólido.
- Região III: Após a interrupção da corrente elétrica as chapas se resfriam e se contraem, mantida a força do eletrodo.

Figura 3.15 - Deslocamento do eletrodo durante a soldagem [10].

3.5 Seqüências da soldagem a ponto por resistência:

A figura 3.16 apresenta o esquema da seqüência da soldagem a ponto por resistência. O tempo de pré-pressão (a) é o tempo necessário para o fechamento da pinça de soldagem. Após o fechamento da pinça de soldagem, é necessário um tempo de pressão (b) para estabilizar a força entre os eletrodos, antes da passagem da corrente. Com a força estabilizada a corrente pode ser liberada para realização da soldagem (c). Após o término da passagem da corrente, é necessário um tempo para o resfriamento da fusão dos materiais (d). E para finalizar a seqüência de soldagem, recuam-se os eletrodos para liberar a peça soldada (e).

Figura 3.16 - Esquema da seqüência da soldagem a ponto [13].

A corrente de soldagem deve passar pelos eletrodos que exercem pressão constante sobre as peças sobrepostas. Na seqüência da operação deve-se primeiro desenvolver calor suficiente para obter um volume desejado de metal no estado líquido [21]. Este metal é resfriado sobre pressão dos eletrodos até obter uma resistência adequada para unir as chapas sobrepostas.

A densidade da corrente e a pressão não devem ser de magnitude muito elevada para que o metal fundido não seja expelido para fora da zona de soldagem. A duração da corrente de soldagem deve ser suficientemente pequena para prevenir excessivo aquecimento nas faces dos eletrodos [21].

A figura 3.15 mostra o esquema da seqüência da soldagem a ponto por resistência.

3.6 Parâmetros de Soldagem:

Para controlar a quantidade de calor gerada na transformação de energia elétrica em térmica, nos materiais que serão fundidos, torna-se

necessário definir parâmetros ao processo. Baseado na equação (6) da energia elétrica, as principais grandezas envolvidas no processo são [13]:

- **Força:** Força dos eletrodos para contenção das chapas sobrepostas.
- **Tempo de Soldagem:** Tempo que a corrente circula por entre as resistências de contato.
- **Corrente Elétrica:** Corrente que atravessa a resistência de contato entre os materiais.

3.6.1 Tempos de pré-pressão e pressão:

O tempo de pré-pressão é determinado pelo tempo que o cilindro leva para movimentar os braços e fechar o circuito secundário (tempo para fechar a pinça) [13].

O tempo de pressão ocorre após o fechamento da pinça, que pode ser definido como o tempo que a pinça leva para estabilizar a força de compressão entre as chapas [13].

Estes tempos são dependentes da velocidade de acionamento do cilindro. A figura 3.17 ilustra o diagrama dos tempos de fechamento dos eletrodos (pré-pressão) e estabilização da força (pressão) [13].

Figura 3.17 - Diagrama dos tempos de fechamento dos eletrodos (pré-pressão) e estabilização da força (pressão) [13].

Os tempos de soldagem podem ser otimizados diminuindo-se o tempo de pré-pressão. Isto pode ser realizado apenas aumentando a velocidade de fechamento da pinça de soldagem. O exemplo da figura 3.17 mostra uma redução de 7 ciclos ou 117 ms por ponto de solda, com os mesmos parâmetros de soldagem.

3.6.2 Força dos eletrodos:

A pressão de soldagem é produzida pela força externa aplicada pelos eletrodos sobre as juntas e influencia o valor da resistência total por meio das resistências de contato das interfaces das peças; as peças a serem soldadas devem ser fixadas na região onde fará a solda, para garantir a passagem de corrente. Um aumento na pressão resulta numa diminuição da resistência das interfaces e do calor; desse modo, a corrente elétrica ou tempo devem ser aumentados para compensar a queda da resistência [6].

3.6.3 Tempo de soldagem:

O tempo de soldagem determina o calor total desde que os outros parâmetros permaneçam constantes. A taxa de aquecimento deve provocar uma adequada resistência da junta soldada e os eletrodos não devem sofrer aquecimento excessivo para evitar sua deterioração. As perdas do calor são geralmente por condução, tanto no eletrodo quanto no metal de base, na região que circunda o eletrodo, e muito pouco por radiação. As perdas aumentam com o aumento do tempo de soldagem e da temperatura do metal, e não podem ser controladas no equipamento, embora tenham valores fixos mantendo-se todos os parâmetros de soldagem e os materiais constantes [6].

3.6.4 Corrente de soldagem:

A corrente de soldagem tem maior influencia do que todos os outros fatores. A corrente alternada ou a corrente contínua podem ser utilizadas na soldagem por pontos.

A corrente é fornecida pela rede de alimentação passando pelo circuito primário do transformador e, em seguida, pelo circuito secundário chegando até a peça a ser soldada [3].

A corrente contínua é utilizada em aplicações que requerem alta intensidade de corrente e também para reduzir as perdas no circuito secundário [6].

Em relação às variações de intensidade de corrente, a densidade da corrente pode variar na interface da solda. Um aumento do diâmetro do eletrodo ou da dimensão projetada da solda diminui a densidade de corrente e o calor de soldagem, o que pode causar um significativo decréscimo nas propriedades mecânicas da solda. Densidade de corrente excessiva causa expulsão do metal fundido, resultando em vazios internos, trincas na solda e propriedades mecânicas ruins [6].

3.6.5 Tempo de resfriamento:

Após término da passagem da corrente, o eletrodo deve ainda manter a pressão nas peças até que a solda tenha resfriado suficientemente [5].

O tempo de resfriamento é necessário para que as temperaturas dos materiais fundidos atinjam um valor mínimo para que não ocorra o desprendimento das peças quando a pinça for aberta. Este tempo também faz parte dos parâmetros do processo. Pode-se programar um tempo de resfriamento após a finalização da corrente de solda, fazendo com que a pinça continue fechada, ou utilizar o próprio tempo de resposta do cilindro, na inversão do movimento do pistão na operação de abertura da pinça [13]; como mostra a figura 3.18.

Figura 3.18 - O diagrama de soldagem com os tempos de resfriamento [13].

3.7 – Influência dos parâmetros no processo:

Os parâmetros têm influência direta na fusão dos materiais e não devem ser alterados para a correção de problemas do processo ou da máquina. Seus comportamentos são peculiares para cada variação do processo e devem ser analisados independentemente [13].

3.7.1 - Efeitos dos tempos de pré-pressão e pressão:

A variação dos tempos de fechamento dos eletrodos e estabilização da força de compressão implica na mudança da resistência de contato e alteração da energia térmica do ponto. Iniciar a corrente de solda sem que a força esteja estabilizada faz com que a resistência de contato esteja em um valor maior que o definido provocando aumento da massa de material fundido e eventuais projeções de material. Isto não permite que o parâmetro trabalhe com valor estável [13].

Os resultados obtidos de um ensaio variando-se somente o tempo de fechamento dos eletrodos resultaram na formação dos pontos de solda mostrado na figura 3.19.

Figura 3.19 Ensaios com tempos de pressão de 20 ciclos e 50 ciclos [13].

3.7.2 Efeitos da força dos eletrodos:

A força aplicada no eletrodo possui em cada parte do ciclo, função diferente [5]. No aquecimento as forças dos eletrodos devem ser suficientes para pressionar as peças a serem soldadas uma contra a outra e possibilitar a passagem de corrente pela região a ser soldada, sem expulsão de material. Durante a soldagem, a força dos eletrodos deve ser suficiente para que o material aquecido escoe plasticamente e forme uma ligação metálica nas rugosidades das chapas. Na pós-pressão, após o término da passagem da corrente, o eletrodo deve ainda manter a pressão até que a solda tenha resfriado suficientemente para garantir a sanidade do ponto.

A força de compressão, na soldagem a ponto, define, junto com o formato da ponta do eletrodo, a resistência de contato entre as chapas. A variação da força afeta a resistência de contato da seguinte forma [13]:

- **Aumento da força** $\Rightarrow$ diminuição da resistência de contato.
- **Diminuição da força** $\Rightarrow$ aumento da resistência de contato.

Mantendo-se a corrente e o tempo de solda e aumentando-se a força de compressão, o valor da energia diminui, já que a resistência de contato é reduzida.

Diminuindo-se a força e mantendo-se a corrente e o tempo de solda, o valor da energia aumenta, já que a resistência de contato é elevada. A partir da equação (6) conclui-se que com o aumento da força do eletrodo, a resistência de contato diminui e, conseqüentemente, a quantidade de calor é diminuída [13].

Os resultados obtidos experimentalmente variando-se somente a força de compressão resultaram na formação dos pontos de solda mostrados na figura 3.20.

Figura 3.20 - Ensaio com forças de 2000N e 3200N [13].

3.7.3 Efeitos dos tempos de soldagem:

A alteração do tempo na soldagem tem dois efeitos distintos no ponto de solda. O primeiro efeito pode ser deduzido a partir das equações (6)

concluindo-se que com o aumento do tempo de soldagem a energia de soldagem aumenta, mantendo-se a corrente de soldagem e a resistência constantes.

O segundo efeito está relacionado com o fluxo de calor que flui por unidade de tempo e depende exclusivamente do material. Transferir calor às chapas num tempo menor que o tempo de dissipação do fluxo de calor significa que a energia é elevada e provoca expulsão de material. Por outro lado, transferir uma quantidade de calor num tempo muito maior que o tempo necessário para a dissipação da energia, indica que a energia é baixa, diminui o tamanho do ponto e aumenta a zona afetada pelo calor [13]. A figura 3.21 mostra dois pontos de solda com variação somente do tempo de passagem de corrente, mostrando a influência do primeiro efeito somente.

Figura 3.21- Ensaio com tempos de corrente de soldagem de 8 ciclos e 16 ciclos [13].

Quando o tempo de soldagem for longo haverá um aumento de metal fundido e, por consequência, expulsão de material; microsoldagens do eletrodo na superfície da chapa numa escala microscópica e também mudanças na microestrutura das chapas, aumentando a zona afetada pelo calor (ZAC) [21].

3.7.4 Efeito do tempo de resfriamento:

Após a aplicação da corrente o calor é dissipado pelos eletrodos, uma vez que eles permanecem por um curto período de tempo para resfriamento da solda. O tempo de compressão final é necessário para permitir a solidificação do ponto de solda. Não deve permanecer por muito tempo para que o calor do ponto de solda não seja conduzido para os eletrodos. Quando a soldagem é realizada com chapas de aço galvanizado, é recomendado um tempo mais longo na compressão final [10].

3.8 Aços galvanizados na indústria automotiva:

Nos últimos anos, projetistas das indústrias têm exigido a inclusão de uma quantidade crescente de aço com revestimento de Zn em veículos, objetivando, principalmente, a garantia de resistência à corrosão [22].

Existe uma ampla variedade de revestimentos galvanizados (revestimentos metálicos de zinco e de ligas de zinco) que está sendo empregada na indústria automotiva. Estes revestimentos metálicos, conforme mostra a tabela 3.3, são aplicados em chapas de aço através diversos processos, sendo os processos mais empregados na indústria automotiva [22]:

- Imersão a quente;
- Eletrodeposição.

Tabela 3.3 – Resumo dos principais tipos de revestimento galvanizado utilizados em operações da indústria automotiva [22].

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

Enquanto os aços galvanizados por imersão a quente (Zn) são empregados em certas aplicações automotivas desde os anos 60, estes produtos estão sendo submetidos à melhoria contínua ao longo dos anos. Esta melhoria tem sido tão significativa que, hoje em dia, eles podem mesmo ser utilizados em partes da carroceria, consideradas de exposição superficial crítica quanto à corrosão. Entretanto, estes materiais são normalmente utilizados em componentes semi-expostos ou totalmente escondidos, como por exemplo, o assoalho do veículo [22].

Cerca de 15 anos atrás, os produtos galvanizados por imersão a quente, chamados de “galvannealed” (Zn-Fe), foram, pela primeira vez, amplamente aplicados na indústria automotiva. Hoje em dia, estes materiais são empregados em partes expostas da carroceria como pára-lamas, dentre outras [22].

3.8.1 Processo de galvanização por imersão a quente:

Consiste basicamente em mergulhar peças de ferro ou aço em zinco líquido à temperatura de 450 °C. Quando mergulhado no banho de galvanização as peças reagem imediatamente formando uma camada de intermetálico de ferro e zinco [23].

A parte mais importante da galvanização ocorre neste período inicial. Após a reação entre o Fe e o Zn diminuir de intensidade, a espessura do revestimento não aumenta significativamente, mesmo que a peça fique por um período maior de tempo no banho de zinco líquido [23].

Quando a peça é removida do banho, uma porção de zinco fundido é removida por arraste formando uma camada de zinco sobre a camada de intermetálicos de ferro e zinco já formadas. O tempo normal de imersão no processo é de 1 ou 2 minutos. O controle de espessura se dá por meio da velocidade da passagem do aço no banho quente [23].

A galvanização por imersão a quente tem mais aderência, resistência a abrasão, maior uniformidade do revestimento e custo mais elevado se comparado a galvanização por eletrodeposição [23].

3.8.2 Processo de galvanização por eletrodeposição:

É um processo eletrolítico no qual o zinco é transferido de um ânodo para uma chapa de aço negativamente carregada e é aplicada uma camada de zinco em apenas umas das faces da chapa de aço, podendo-se controlar a espessura do revestimento por modelo matemático [23].

A corrente elétrica é uma das principais matérias-primas do processo eletrolítico. Porém, antes de entrar no processo ela é convertida de corrente alternada em corrente contínua com o uso de retificadores. Com a transformação em corrente contínua é possível separar a parte positiva e negativa da corrente. Na parte negativa da corrente são colocadas as chapas a serem beneficiadas. Na parte positiva é colocado o metal, que fornecerá os íons para solução eletrolítica [23].

A galvanização eletrolítica tem superfícies mais lisas e brilhantes, menor camada de revestimento e custo mais baixo se comparada à galvanização por imersão a quente [23].

3.8.3 Soldabilidade das chapas revestidas e sem revestimento:

Durante a formação de uma solda em uma chapa revestida com Zn, ocorre a fusão do Zn do revestimento na interface chapa-chapa. Este material se desloca da zona de solda para formar um anel de Zn que circunda a solda. Este anel acaba desviando parte da corrente, fazendo com que menos corrente esteja disponível para a formação da lente de solda. Deste modo, exige-se uma quantidade de corrente maior para soldar aços revestidos [24].

Outro mecanismo envolve a fusão do revestimento na interface eletrodo-chapa, o zinco fundido reage com o Cu da face do eletrodo formando uma fina camada de latão. Além disso, uma parte o zinco é oxidada e depositada na face de contato dos eletrodos. Estes dois processos agem de forma a modificar as características elétricas e a topografia da superfície de contato dos eletrodos. À medida que o processo de soldagem avança, a uma corrente de soldagem constante, a face dos eletrodos se desgasta e apresenta cavidades, aumentando, desta forma, o seu diâmetro que, por sua vez,

promove a redução da densidade de corrente até o momento onde nenhum ponto de solda é mais formado [24].

Por outro lado, estes problemas não ocorrem na soldagem de aços não revestidos. Além disso, a interação química entre a superfície do eletrodo e a superfície da chapa, que promove o desgaste acelerado de sua superfície de contato, é mínima [24].

Sendo assim, pode-se dizer que a soldagem de aço revestido com Zn é muito mais complexa do que a soldagem de aços não revestidos. Sob o ponto de vista de soldabilidade, correntes de soldagem mais elevadas, janela operacional mais estreita e vida útil de eletrodo mais curta são parâmetros característicos para a soldagem a ponto destes materiais [24].

Chapas eletrogalvanizadas tendem a serem mais soldáveis que chapas por imersão a quente. O motivo é que os revestimentos eletrogalvanizados apresentam espessuras mais finas e mais uniformes. As chapas eletrogalvanizadas com menos que 20 g/m^2 podem ser soldadas da mesma forma de chapas sem revestimentos [3].

3.9 Eletrodos para soldagem a ponto por resistência:

Eletrodo é o componente da máquina de soldagem responsável pela transferência da corrente elétrica para as chapas. Delimita a área de contato, a densidade de corrente e auxilia no resfriamento do ponto de solda. Entre todos os componentes da máquina, é a parte mais importante, pois faz a interface do sistema com as peças [13].

3.9.1 Características necessárias ao material para o eletrodo:

Os eletrodos trabalham sob condições extremamente desfavoráveis de pressão, temperatura e devem possuir propriedades mecânicas, térmicas e elétricas bastante elevadas [13].

As principais características dos materiais necessárias ao bom desempenho das funções do eletrodo são as seguintes [5]:

- Alta condutividade elétrica: devido a passagem da corrente elétrica elevada, para evitar perdas e superaquecimento dos eletrodos. A resistência de contato eletrodo-peça é muito influenciado pela condição elétrica do eletrodo.

- Alta condutividade térmica: para melhor conduzir calor gerado principalmente nos pontos de contato eletrodo-peça.

- Elevada dureza e resistência ao desgaste a elevadas temperaturas: a fim do eletrodo não se gastar e deformar, mantendo a forma original.

- Elevada resistência ao amolecimento a temperaturas elevadas: o eletrodo, pela sua própria função, trabalha em temperaturas elevadas, o amolecimento devido ao efeito da temperatura diminuirá a vida útil do eletrodo, devendo por isto o material ser resistente ao amolecimento após submetido longos tempos a temperaturas elevadas.

- Pequena tendência para formar liga com material a ser soldado a fim de evitar que o material fique aderido ao eletrodo.

Os eletrodos à base de cobre estão classificados segundo a Resistance Welder Manufacturers Association (RWMA) em 3 classes [25] :

- (a) Classe 1: É composta de materiais não tratáveis termicamente e endurecidos por trabalho a frio, que não afeta as altas condutividade térmica e elétrica;

- (b) Classe 2: É composta por materiais com propriedades mecânicas mais altas e condutividades elétrica e térmica mais baixas em relação aos eletrodos da Classe 1. As propriedades mecânicas e físicas requeridas são conseguidas por tratamento térmico ou por uma combinação de tratamento térmico e trabalho a frio. Os eletrodos da Classe 2 são os mais utilizados e podem se adequar a uma ampla faixa de metais e condições;

- (c) Classe 20: É composta por materiais com capacidade de resistir a altas taxas de calor e pressão quando comparado com os materiais das classes 1 e 2. São fabricados utilizando cobre e material refratário.

A Tabela 3.4 mostra as características dos materiais de fabricação dos eletrodos conforme a classificação da RWMA [25].

Tabela 3.4 – Características dos materiais dos eletrodos conforme a classificação da RWMA [25].

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

Os eletrodos de Cu/Cr (1% Cr), Cu/Cr/Zr (1% Cr; 0,25% Zr) e CuZr (0,15% Zr) são formados por ligas endurecidas por precipitação. Estas ligas adquirem tais propriedades através da adição de elementos de liga que promovem, no envelhecimento em certas condições de tempo e temperatura, a formação de finos precipitados. A exposição a altas temperaturas por períodos maiores de tempo permite que os precipitados coalesçam, reduzindo a resistência mecânica devido ao superenvelhecimento. As temperaturas atingidas durante a soldagem por resistência são suficientes para reduzir a fração volumétrica dos precipitados. A condutividade elétrica destes tipos de eletrodo está na faixa de 80% a 90% IACS (International Annealing Copper Standard) [22].

Análises térmicas das capas de eletrodos durante o processo de soldagem indicam que a temperatura na face do eletrodo varia entre 700 e 900°C. A figura 3.22 mostra a distribuição da temperatura ao longo da capa do eletrodo, utilizando uma corrente de soldagem de 21 kA e um tempo de soldagem de 165 ms [26].

Figura 3.22- Distribuição da temperatura no eletrodo durante a soldagem [26].

3.9.2 Formato do eletrodo:

O formato do eletrodo depende do tipo de pinça, posicionamento do ponto, espessura, composição e revestimento do produto, força e corrente de soldagem e ângulo de ataque [13]. A maioria das empresas produtoras de eletrodos fornece modelos padronizados, destacando-se os da figura 3.23.

Figura 3.23- Principais formatos padronizados de eletrodo [13].

Na tabela 3.5 descreve-se a utilização e principais características dos eletrodos da figura 3.23.

Tabela 3.5 - Utilização e principais características dos eletrodos da fig. 3.23 [13].

Formato	Utilização	Comentários
A	Eletrodo de uso geral. Excelente quando estão em perfeito alinhamento e usados em pinças de acionamento com força axial (tipo C), não bom para máquinas com força radial (tipo X).	O melhor formato para afiação e soldagem com eletrodos grandes tipo B ou F. Rápido tempo de troca e preparação. Não tolera erros de posicionamento, deve ter posicionamento bem preciso. Boa vida útil (amassamento demorado). Baixa indentação. Muito complicado para alinhar em máquinas tipo X, por causa do acionamento radial.
B	Uso geral quando chapas têm pouco ou nenhum de revestimento. Limitados na espessura do material, (2,5mm chapa mais espessa). Indicado para máquinas manuais.	Amassamento ligeiramente mais demorado que do formato A. Tende a acumular zinco mais facilmente. Facilmente afiado. Fácil posicionamento. Tolerar erros de posicionamento. Alta indentação inicial.
C	Uso específico. Usado como eletrodo de back. Em chapas de diferentes espessuras (uma espessa e outra fina) é usado na chapa de maior espessura. Indicado em máquinas automáticas ou robôs	Geralmente permanece frio. Longa vida útil (amassamento muito demorado). Não permite afiação.
D	Uso específico. Indicado em soldagem de bordas, pequenas áreas de acesso, ou perto de superfícies curvas.	O alinhamento deve ser muito preciso e cuidadoso. Troca demorada. Não permite afiação. Amassamento rápido.
E	Eletrodo de uso geral. Excelente quando estão em perfeito alinhamento e usados em pinças de acionamento com força axial (tipo C), não bom para máquinas com força radial (tipo X). Recomendado para máquinas automáticas, robô, algumas manuais, em conjunto com <i>back</i> de cobre.	Limitado para uso em alguns modelos e acessos de máquinas manuais. Rápido tempo de troca e preparação. Tolerar pequenos erros de posicionamento, deve ter posicionamento preciso. Média vida útil (amassamento normal). Baixa indentação. Muito complicado para alinhar em máquinas tipo X, por causa do acionamento radial.
F	Uso específico. Bom para uso em chapas de grande espessura (maior que 2,5mm). Indicado para máquinas manuais, ou automáticas. Usado em conjunto com outros formatos com bom assentamento.	Afiação deve ser precisa. Pode gerar erros de distribuição de calor (descentralização do ponto). Amassamento demorado, boa vida útil. Baixa indentação.
G	Uso geral.	Não permite afiação
S	Uso geral. Ajuda a reduzir aderência dos eletrodos em chapas galvanizadas.	Não permite afiação

De maneira geral, considera-se que as faces de contato dos eletrodos com a peça devam ser de aproximadamente 1,6mm maior do que o diâmetro do ponto de solda, o qual pode ser calculado pelas relações [1]:

$$d = 5\sqrt{S} \quad (8)$$

d = diâmetro do ponto de solda

S = espessura da chapa

3.9.3 Compensação do desgaste dos eletrodos (stepper):

Pelo efeito do desgaste da ponta do eletrodo, devido à variação da área de contato alterar com o quadrado do diâmetro do eletrodo, vai haver grande aumento da área de contato entre o eletrodo e a peça [5], conforme mostra a figura 3.24. Com o aumento da área de contato, a resistência elétrica entre as chapas diminui, fazendo com que o calor transmitido seja cada vez menor. Por outro lado, o aumento da área de contato determina um volume maior de material que deverá ser fundido, já que a penetração (altura do ponto) deve ser mantida num valor mínimo, implicando que o calor deva ser gradualmente elevado a cada ponto de solda [13].

Figura 3.24- Aumento da área de contato com a deformação da ponta do eletrodo [13].

Sabendo-se destes fatos o acréscimo da corrente de solda é essencial para manter a qualidade do ponto de solda, a figura 3.25 mostra um exemplo esquemático da curva de compensação de corrente de soldagem.

Figura 3.25- Exemplo esquemático de curva de compensação de corrente (stepper) [13].

3.9.4 Fresagem dos eletrodos:

A fresagem dos eletrodos é importante para manter ou retornar ao seu formato original. A frequência da fresagem independe da utilização da função de compensação de desgaste do eletrodo (stepper), sendo maior quando não se utiliza este procedimento [13].

Existem algumas formas de efetuar esta operação, pode ser feita automaticamente, em estações robotizadas ou automáticas, semi-automática ou manual para soldagem com pinças manuais, como mostra a figura 3.26.

A utilização de fresagem manual com lima deve ser evitada, pois dificilmente consegue-se formar o eletrodo a sua condição original, o que poderia acarretar sérios problemas para o ponto de solda [13].

Fresadora semi-automática

Fresadora automática

Fresadora manual

**Fresadora manual
pneumática**

Figura 3.26- Equipamentos para fresagem de eletrodo [13].

3.10 Refrigeração dos eletrodos:

Os eletrodos são refrigerados a água, que é conduzida por um tubo até certa distância da extremidade do eletrodo, retornando depois pela secção externa ao tubo e interna do eletrodo [16]. A refrigeração é o aspecto mais importante para a manutenção do eletrodo e deve ser constantemente verificada. A correta refrigeração promove aos eletrodos [13]:

- Longa vida útil.
- Confiabilidade na soldagem.
- Estabilidade na soldagem.

- Ponto de solda dentro das especificações.
- Não marca ou deforma a peça.
- Não permite aderir na peça.
- Garante a aplicação correta da compensação de desgaste (stepper).

Na soldagem a ponto os eletrodos são responsáveis pela área de formação do ponto. Assim, a variação da distância do tubo de entrada de água implica na alteração da área de refrigeração, podendo comprometer a soldagem até a sua falha ou acarretando a expulsão de material. Consequentemente, a distância do tubo interno de água é fundamental para a correta refrigeração do eletrodo, além do alinhamento e ângulo de corte da ponta do tubo de refrigeração [13].

A figura 3.27(a) mostra a posição correta para o tubo de refrigeração. É recomendado que o tubo seja de metal, podendo ser rígido ou flexível, como mostra a figura 3.27(b).

(a)

(b)

Figura 3.27- Distância do tubo interno de água para correta refrigeração do eletrodo. (a) [12]; (b) [13]. Tubo de refrigeração rígido e flexível.

A água é fator fundamental para a refrigeração e, portanto, deve estar dentro das especificações do fabricante da máquina. A função desta especificação é de manter a qualidade do equipamento e garantir a correta taxa de transferência térmica, além de impedir a formação de depósitos sólidos no interior dos tubos de refrigeração [27]. A tabela 3.6 apresenta a especificação convencional da água de refrigeração, conforme fabricantes de equipamentos de soldagem a ponto por resistência [27]:

Tabela 3.6 – Especificação da água para refrigeração [27].

Especificação da água para refrigeração.	
pH	7,0 a 9,0
Cloro	Max. 20 ppm (Partes Por Milhão)
Nitrato	Máx. 10 ppm
Sulfato	Máx. 100 ppm
Sólidos não abrasivos	Máx. 100 ppm
Carbonato de Cálcio	Máx. 250 ppm
Resistividade elétrica	> 2000 ohms/cm; 25°C

3.11 Diagrama de soldabilidade:

Os diagramas de soldabilidade podem ser produzidos em função da corrente e tempo de soldagem. Eles indicam as combinações de corrente e tempo para alcançar uma solda aceitável. Um esquema de diagrama de soldabilidade é mostrado na figura 3.28, o qual tem duas linhas indicando as regiões de corrente máxima e mínima. A mínima corrente, num determinado tempo de soldagem, corresponde ao requisito mínimo aceitável para o ponto de solda, geralmente em termos de tamanho do ponto [15]. A maioria das normas empregadas na indústria automotiva sugerem um tamanho mínimo aceitável de 3,5 a 5 vezes a raiz quadrada da espessura da chapa.

A máxima corrente corresponde à ocorrência de expulsão de material, ocasionalmente, a corrente correspondente para um tamanho nominal de solda é também incluído no diagrama como uma referência para seleção de

parâmetro. A região da diferença entre a máxima e a mínima corrente representa a janela operacional [10].

Figura 3.28 - Diagrama de Soldabilidade [14].

A determinação da corrente máxima é relacionada com a detecção da expulsão. Existem muitos fatores aleatórios que dificultam a determinação deste limite de corrente, tal como ajuste entre as peças, desalinhamento dos eletrodos, condições de superfície, etc [10].

Uma janela operacional larga é benéfica na prática de soldagem. Em outras palavras, um pequeno desvio do valor de corrente escolhido, que é bastante comum, devido aos efeitos aleatórios de soldagem, não afetaria significativamente a qualidade de solda, dando maior flexibilidade dos parâmetros de soldagem [10].

3.12 Metalurgia da soldagem a ponto por resistência:

Conforme se observa na figura 3.29, cada uma das regiões numeradas representa um tipo de transformação de fase em função da distribuição de temperatura [1].

Figura 3.29- Transformação metalúrgica e distribuição da temperatura em soldagem a ponto [1].

A região 1 representa o metal-base, não afetada. Na região 2 a temperatura está acima da A_1 e abaixo da A_3 e é a zona onde se forma ferrita e austenita no aquecimento, podendo produzir, no resfriamento, ferrita, perlita e/ou martensita, dependendo da velocidade de resfriamento e da composição do aço. Na região 3, a temperatura está acima da A_3 , poderá haver homogeneização dos grãos de austenita e/ou crescimento dos grãos, dependendo do tempo e da temperatura atingidos nesta região. Se o metal-base estiver encruado, poderá ocorrer também recristalização. Na região 4, devido as temperaturas mais elevadas, as transformações de fase são mais prováveis de ocorrer de uma maneira similar às condições de equilíbrio; nesta temperatura a difusividade dos elementos de liga é maior. A região 5 representa a zona fundida, onde o aço está no estado líquido, com a formação

de estrutura bruta de fusão após a solidificação do ponto de solda, formando grãos colunares e grãos equiaxiais. A região 6 representa o centro do ponto, mostrando a forma da região de solidificação do último líquido, que é aproximadamente de um elipsóide.

A figura 3.30 apresenta a estrutura bruta de fusão dos pontos de solda conforme a velocidade de resfriamento [10].

A formação de diferentes microestruturas de fundição, incluindo dendritas, estruturas colunares e estruturas celulares, é determinada pela composição química e pela transferência de calor através da interface líquido-sólido. A solidificação inicia quando o ponto de solda líquido alcança a temperatura liquidus da liga e há uma dissipação de calor para a chapa sólida e para o eletrodo. Os grãos da zona parcialmente fundida servirão como núcleos para crescimento de futuros grãos sólidos. Um superesfriamento constitucional em uma distância longa a partir da interface sólido/líquido resulta em grãos colunares em uma direção aproximadamente normal a linha de fusão [10].

O restante do metal fundido no centro do ponto solidifica por último e forma grãos equiaxiais devido ao aumento na região superresfriada constitucionalmente. Dependendo dos parâmetros de soldagem e outras condições, várias microestruturas podem ser formadas no ponto de solda. O cenário ideal é quando ocorre a solidificação de uma maneira uniforme de todos os lados ao redor do sólido, em ambos os eletrodos e direções das chapas, como mostra a figura 3.30a. As trincas ou vazios, se criados, tendem a serem fechados na solidificação do último líquido. Quando o resfriamento não está de acordo, quando são usados parâmetros de soldagem impróprios ou quando existem barreiras térmicas indesejáveis entre o eletrodo e a peça, pode resultar em trincas ou vazios, especialmente quando há um grande volume de contração de solidificação. A figura 3.30b apresenta um ponto com grãos colunares crescendo na direção a partir dos eletrodos, da parte superior à inferior e grãos equiaxiais relativamente pequenos no centro do ponto. Isto pode acontecer quando os eletrodos são super-resfriados. Como a taxa de solidificação é mais rápida na direção vertical, a última porção de líquido fica localizada perto da interface original das chapas. Esta falta de volume pode criar facilmente trincas nas interfaces das chapas [10]. Por causa das taxas de solidificação serem significativamente mais baixas na direção longitudinal da

chapa, a última parte do líquido a solidificar assume uma forma alongada, relativamente paralela à face do eletrodo, ficando muito próximo da periferia do ponto de solda. Por este motivo podem aparecer trincas e vazios na zona fundida (ponto de solda) [10].

Quando o resfriamento dos eletrodos é impedido, assim como quando os eletrodos são revestidos ou a área de contato eletrodo/chapa é pequena, a maior parte do calor é conduzida para fora através das chapas de metal. Por isso, a última porção do líquido solidificado assume uma forma alongada, relativamente perpendicular à face do eletrodo, ao redor do centro do ponto de soldagem, como mostrado na fig. 3.30c. Devido ao pequeno volume de líquido, trincas e porosidades se formam com freqüência no centro do ponto, na área dos grãos equiaxiais. Estas trincas se propagam muito frequentemente do centro às margens do ponto [10].

Figura 3.30 – Esquema da estrutura do ponto conforme a velocidade de resfriamento. Boa refrigeração (a); Rápida refrigeração (b); Lenta refrigeração (c) [10].

3.13 Métodos de controle de qualidade da solda:

Cada empresa utiliza seus próprios procedimentos para avaliação da qualidade da solda, testando o produto soldado e quantificando os resultados, para a definição do critério de aprovação da soldagem executada. De forma geral os procedimentos de avaliação podem ser divididos em inspeção visual, ensaios não destrutivos e ensaios destrutivos, todos visando à qualificação da soldagem realizada [13].

A resistência da junta soldada a ponto é geralmente relacionada às características físicas: dimensões do ponto de solda, profundidade de indentação, extensão da ZAC e propriedades do material. O ponto de solda tem sido extensivamente relacionado com a resistência da junta [28].

A simulação computacional demonstrou que a medida da extensão da ZAC tem um papel importante na análise da resistência da solda devido a altas concentrações de tensões dentro e ao redor da mesma [28].

3.13.1 Inspeção visual:

A inspeção visual pode ser feita pelo operador de forma contínua ou por um inspetor de qualidade através de lotes amostrais. A inspeção visual contínua deve ter poucos itens de observação, porém bem definidos para a correta qualificação do ponto de solda. É um método muito usado, porém não muito preciso, mas que estabelece o início do processo analítico da qualidade, e não deve ser o único método usado [13]. A tabela 3.7 mostra os itens básicos para o exame visual da soldagem.

Tabela 3.7 - Itens básicos para a inspeção visual da soldagem a ponto [13].

INSPECIONAR	POSSÍVEIS PROBLEMAS	POSSÍVEIS CAUSAS
<p>Coloração da superfície da área fundida:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Superfície sem alteração de cor (ponto claro) ou sem marca de aquecimento da superfície de contato com os eletrodos. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Baixa temperatura ocasionando diminuição da área de fusão. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Aumento da força entre eletrodos. ✓ Diminuição da corrente ou tempo de solda. ✓ Desgaste ou fim de vida útil dos eletrodos. ✓ Erro na curva do stepper. ✓ Produto fora da especificação dimensional ou físico química. ✓ Fuga de corrente na máquina. ✓ Controlador programado para sem solda. ✓ Eletrodo fora de especificação.
<p>Coloração da superfície da área fundida e luz emitida:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Superfície escura além da área de fusão dos materiais. Área em torno do ponto fica marcada pela alteração da temperatura do material. ✓ Grande quantidade de luz gerada na área de contato dos eletrodos com o produto ou na superfície de fusão. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alta temperatura de fusão, aumentando a zona afetada pelo calor (ZAC), ocasionando grande endentação e dependendo do material, fragiliza a ZAC, gera trincas, contamina a superfície com o material do eletrodo e outras implicações metalúrgicas. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Elevação no tempo ou na corrente de soldagem. ✓ Falha na refrigeração dos eletrodos. ✓ Produto fora da especificação dimensional ou físico química.
<p>Expulsão de material.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alta temperatura de fusão com retirada de material (respingo), ocasionando vazios na zona de fusão, rebarbas na superfície da área de contato, aumento da endentação, contamina a superfície com o material do eletrodo e outras implicações metalúrgicas. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Elevação na corrente de solda. ✓ Diminuição da força de contato entre os eletrodos. ✓ Falha na refrigeração dos eletrodos. ✓ Produto fora da especificação dimensional ou físico química. ✓ Folgas no sistema de acionamento dos eletrodos. ✓ Desalinhamento dos eletrodos. ✓ Assentamento ruim das chapas. ✓ Material contaminado com impurezas. ✓ Eletrodo fora de especificação.
<p>Geometria da área fundida:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Área de fusão ovalada. ✓ Amassamento irregular do produto. As partes do produto fundem diferentemente. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alteração da área de contato ocasionando diminuição da área de fusão. ✓ Projeção de material. ✓ Aumento da indentação 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alteração da força entre eletrodos. ✓ Desgaste ou fim de vida útil dos eletrodos. ✓ Produto fora da especificação dimensional ou físico química. ✓ Eletrodo fora de especificação. ✓ Folgas no sistema de acionamento dos eletrodos. ✓ Desalinhamento dos eletrodos.

3.13.2 Ensaios não destrutivos:

Os ensaios não destrutivos são ensaios que , quando realizados sobre peças semi-acabadas, não prejudicam nem interferem com o futuro das mesmas. Em outras palavras, são ensaios que não deixam vestígios de sua utilização na peça ensaiada [29].

Estudos mostram que 90% das falhas mecânicas em componentes metálicos se dão por fadiga. A resistência dos metais à fadiga é drasticamente reduzida pelas descontinuidades presentes nos mesmos. Os ensaios não destrutivos permitem a inspeção contínua ao longo da vida útil de uma determinada peça, apontando o momento exato de sua substituição antes mesmo de sua ruptura em serviço.

A figura 3.31 mostra os ensaios não destrutivos mais utilizados [29].

Figura 3.31- Ensaios não destrutivos mais utilizados: Raios X (a); Partículas magnéticas (b); Ultra-som (c) e Líquidos penetrantes (d) [29].

3.13.2.1 Ensaio por ultra-som:

O ultra-som é um ensaio bastante utilizado para a avaliação ou a inspeção da qualidade de vários componentes das indústrias aeroespacial, automotiva, petroquímica, química e outras. Para os ensaios de materiais por ultra-som são aplicados, geralmente, dois métodos de ensaio diferentes e que se completam: o método de transparência, utilizando-se vibrações constantes ultra-sônicas e o método de reflexão, utilizando-se pulsos ultra-sônicos, conforme mostra a figura 3.32. A escolha de um ou de outro método depende do formato da peça e da natureza do tipo de defeito a ser detectado. As aplicações recomendáveis para cada método são as seguintes [29]:

- para o método da transparência: chapas e placas de metal, barras e perfis metálicos (através da seção transversal), peças pequenas, localização da área do defeito, determinação do tamanho do defeito e em ensaios contínuos e automatizados, como apresenta a figura 3.32a.

- para o método de reflexão: barras e perfis metálicos (através do eixo longitudinal), peças grandes forjadas ou fundidas, peças pequenas na localização da área do defeito e na determinação da profundidade do defeito, como mostra a figura 3.32b. O método por reflexão é o mais utilizado na indústria automotiva para qualificação da soldagem a ponto por resistência.

Tanto em um método como no outro, quanto maior a frequência de vibração, menor é o tamanho do defeito possível de ser detectado. Por outro lado, quanto maior a frequência, maior a absorção do sinal pelo material (atenuação acústica) [29].

Figura 3.32- Ilustração dos métodos de ensaio por ultra-som: Penetração (a) e Reflexão (b) [29].

3.13.3 Ensaios destrutivos:

Estes testes devem começar utilizando corpos de prova que contenham todas as características do produto a ser soldado, sendo muito comum a utilização de partes do próprio produto. Cada empresa tem sua especificação

para os testes na verificação da qualidade dos pontos de solda. As forças de rompimento definidas dependem dos materiais e da utilização que cada empresa define para seu produto [13].

Conforme mostra a figura 3.33, os ensaios mais utilizados para verificação da qualidade do ponto de solda são:

- Ensaio por tração (cisalhamento).
- Ensaio por arrancamento.
- Ensaio por torção.

Figura 3.33- Ensaio por arrancamento (A); ensaio por tração (cisalhamento) (B); ensaio por torção (C) [13].

As forças de rompimento definidas dependem dos materiais e da utilização que cada empresa define para seu produto. A carga tolerável para o ensaio de arrancamento é apenas 20% da força mínima de tração e pode ser realizado facilmente usando uma pequena bancada de trabalho junto à produção.

Os ensaios de tração e torção devem ser realizados em laboratório e possuem valores de força bem definidos, sendo estes testes realizados por máquinas destinadas para este fim [13]. Nos ensaios de torção, a carga tolerável é 60% da força máxima de tração.

Buscando comparar os procedimentos já consolidados na fabricação de corpos de prova, estudou-se experimentalmente o efeito dos parâmetros geométricos como o comprimento, a largura, a espessura das chapas, o diâmetro do ponto e dos parâmetros dimensionais como a sobreposição [30].

Estes parâmetros foram variados na fabricação de vários corpos de

prova que foram submetidos a testes de tração (cisalhamento). Nestes ensaios podem ser observados cinco modos de falhas [30]. Observou-se que um dos parâmetros mais influentes nas medições de força, da deformação e do modo de falha obtidos nos testes é a largura do corpo de prova, de forma a especificar as dimensões críticas para os testes de cisalhamento em espécies soldados a ponto [30].

O modo de falha apresentado na figura 3.34-A é indesejável, do ponto de vista do estudo do comportamento do ponto de solda, pois representa apenas o modo de falha do material base, cuja curva poderia ser obtida em um ensaio de tração comum. Em outras palavras, a resistência do ponto é superior a resistência da seção transversal do metal base e deve ter ocorrido algum erro no cálculo da seção transversal da chapa que está sendo soldada. A mesma observação cabe para o resultado ilustrado na figura 3.34-B. O corpo de prova falha parcialmente no material base e parcialmente na periferia da solda.

Figura 3.34- Curva da força x deslocamento mostrando a falha no material de base (A) e (B) [30].

Em geral, os modos de falha nas figuras 3.34-A e 3.34-B são observados em corpos de prova muito estreitos. Estes dois tipos de falha são também indesejáveis, pois, não permitem obter um valor quantitativo da resistência da solda.

Os modos de falha observados nas figuras 3.35-C, 3.35-D e 3.35-E são os que ocorrem por destacamento do ponto, do rasgamento do material base em torno do ponto e pela falha na interface, respectivamente. Nestes três casos a qualidade do ponto de solda pôde ser verificada, e estes modos de falha fornecem um indicativo da propriedade do ponto de solda.

Figura 3.35- Curva força x deslocamento; destacamento (C); rasgamento (D); cisalhamento (E) [30].

No modo C ocorreu a falha no ponto para pequenas forças, mostrando que o ponto estava com dimensões pequenas. No modo D a falha começou na interface entre o ponto de solda e a chapa e pode ser devido a um ponto com uma grande indentação ou com uma ZAC menos dura. No modo E a falha ocorreu no ponto de solda, com arrancamento de uma pequena área da chapa, equivalente as dimensões do ponto.

3.13.4 Ensaios metalográficos:

A interpretação do exame metalográfico compreende a análise das estruturas e fases presentes e suas propriedades envolvendo, portanto toda a metalurgia da soldagem. Na zona fundida do ponto de solda, por exemplo, resulta uma estrutura bruta de fusão, cujas propriedades vão depender de sua composição, do processo de solidificação e das transformações no estado sólido verificadas durante e após o resfriamento. Alterações nas propriedades mecânicas do metal de base, além da zona afetada pelo calor, podem ocorrer pelo desenvolvimento de tensões residuais, como resultado de deformações em outras regiões durante os ciclos térmicos [16].

3.13.4.1 Macrografia:

O exame macrográfico, realizado sobre uma ou várias secções da região em estudo, permite uma visão de conjunto das estruturas presentes. A macrografia é realizada sobre superfície polida utilizando-se um ataque intenso por reativo adequado. São reveladas zonas afetadas pelo calor, variações de composição, estruturas dendríticas, segregação, porosidade, inclusões de escória, dimensionamento, etc [16].

3.13.4.2 Micrografia:

É o exame de superfície finamente polida e atacada, observada com aumento da ordem de 100 vezes ou mais. Com essas ampliações já é possível distinguir alguns constituintes e fases presentes. O reconhecimento dos microconstituintes e fases permitem a análise das propriedades da estrutura a partir das propriedades das fases e sua distribuição [16].

Com base na microestrutura, nos diagramas de equilíbrio e nos diagramas TTT ou CRC, pode-se reconstituir as seqüências de transformação pelas quais passou o material e estabelecer as modificações encontradas [16].

3.14 Problemas operacionais na soldagem a ponto:

3.14.1 Corrente de desvio:

Um ponto realizado subsequente ao primeiro terá uma corrente menor quanto menor for a distância entre eles. Este efeito deve-se ao desvio da corrente pelo ponto anterior, pois eletricamente a chapa superior está ligada à chapa inferior, através do ponto de solda, formando uma resistência paralela, como mostra a figura 3.36. Isto implica que o segundo ponto será menor (diâmetro e penetração) que o primeiro [13].

Figura 3.36- Corrente de desvio com dois pontos de solda [13].

Um terceiro ponto, subseqüente ao segundo, terá o acréscimo de mais uma resistência paralela, fazendo com que a corrente seja desviada por dois caminhos, como mostra a figura 3.37. O aumento da distância do primeiro ponto ao terceiro implica que a corrente de desvio no primeiro ponto será menor que no segundo [13].

Figura 3.37- Corrente de desvio com três pontos de solda [13].

Figura 3.38 - Desvio de corrente pelo contato entre a pinça e a peça [13].

A falta de isolamento da pinça ou dispositivo também pode causar um desvio de corrente decorrente do circuito paralelo formado, conforme mostra a figura 3.38. A diminuição da corrente no ponto de solda diminui seu tamanho [13].

3.14.2 Indentação:

É uma profundidade criada na superfície da chapa soldada pela pressão do eletrodo durante a soldagem, como mostra a figura 3.39.

Figura 3.39- Profundidade criada na superfície da chapa soldada pela pressão do eletrodo durante a soldagem [13].

A indentação é muito difícil de eliminar, a menos que use eletrodos e procedimentos especiais, porém é permitida na maioria dos casos, dependendo das especificações das normas empregadas. Em algumas normas a indentação é aceitável até 30% da espessura das chapas soldadas. A indentação excessiva em alguns pontos na indústria automotiva não é permitida, considerando-se as implicações estéticas da superfície acabada da estrutura montada e a capacidade de resistir às cargas dinâmicas. Se a superfície de solda do produto estiver exposta, a profundidade da indentação poderá causar uma impressão desfavorável para o consumidor [10].

Em muitos casos a indentação pode causar uma ligação fraca entre as chapas soldadas devido à redução de espessura na área do ponto de solda. A expulsão de material está freqüentemente associada a uma indentação mais

profunda. A indentação excessiva também pode causar separação entre as chapas soldadas. A tensão residual, que é o resultado da interação termomecânica, pode resultar em falha por fadiga, freqüentemente associada ao grau de distorção e indentação do ponto de solda. Escolhendo-se corretamente os parâmetros de soldagem, a indentação pode ser controlada para alcançar uma penetração e força suficientes para a aplicação desejada [10].

3.14.3 Distribuição da corrente:

A corrente deve circular de forma que o aquecimento seja distribuído homogeneamente no volume de material que será fundido. Esta região depende fundamentalmente do formato dos eletrodos. Para chapas de mesma espessura os eletrodos devem produzir a mesma área de contato. Em situações onde as chapas possuem espessuras diferentes, os eletrodos devem ter áreas de contato que atendam a solicitação de distribuição uniforme de calor. Para isto é necessário que o eletrodo de maior área esteja em contato com a chapa de maior espessura [13], conforme mostra a figura 3.40.

Figura 3.40 - Área de contato do eletrodo em relação a espessura da chapa [13].

A definição incorreta da área de contato dos eletrodos causa deformação na região fundida, ocasionando excesso de indentação e redução

na resistência mecânica da solda. O ponto fica caracterizado como assimétrico causando instabilidade na qualidade do ponto e pouca confiança do ponto [13], como mostra a figura 3.41.

Figura 3.41- Exemplo de ponto de solda assimétrico, causado pela definição incorreta da área de contato dos eletrodos [13].

3.14.4 Desalinhamento do eletrodo:

O alinhamento dos eletrodos deve sempre ser observado independentemente da troca ou tempo de uso, pois ele pode alterar a área do ponto formado, reduzindo ou distorcendo a sua geometria. Podem ocorrer os seguintes problemas no desalinhamento dos eletrodos para a solda a ponto [13]:

- Distorção da geometria do ponto de solda.
- Redução da área fundida do ponto causando baixa resistência mecânica.
- Aumento da indentação.
- Expulsão de material.
- Desgaste prematuro dos eletrodos.
- Pontos com aspecto queimado.

- Deformação da peça.
- Erro na compensação de desgaste do eletrodo (stepper).

A figura 3.42 mostra as situações mais comuns de desalinhamento de eletrodos e seus efeitos na geometria do ponto.

Figura 3.42- Exemplos de situações mais comuns de desalinhamento de eletrodos [13].

A posição dos eletrodos no produto é outro aspecto importantíssimo para que o ponto de solda apresente correta geometria, a falta de perpendicularidade dos eletrodos na peça pode produzir projeção de material diminuindo a vida útil dos eletrodos [13]. A figura 3.43 representa posicionamentos incorretos dos eletrodos na peça.

Figura 3.43 - Exemplos de posicionamentos incorretos dos eletrodos na peça [13].

3.14.5 Expulsão de material:

Por definição a soldagem por resistência não tem adição de material, portanto, não deve ser retirado material dos metais de base líquidos durante a soldagem. Por expulsão entende-se a perda de material líquido da região da solda. O excesso de calor gerado no ponto de solda é o principal fator de expulsão de material [13]. A falta de força de compressão entre eletrodos e seu desalinhamento não consegue manter a pressão interna do ponto abrindo as chapas e projetando material [10], como mostram as figuras 3.44(a), (b) e (c).

Quando os eletrodos estão alinhados, a pressão dos eletrodos em relação ao núcleo do ponto no estado líquido durante a soldagem será uniforme em todo o perímetro do ponto. Com a pressão uniforme ao redor do ponto e as forças dos eletrodos maiores que as forças do núcleo do ponto não ocorrerá expulsão de material, como mostra a figura 3.44 (a). Em contrapartida se os eletrodos estiverem desalinhados ocorrerá um desbalanceamento da pressão ao redor do ponto. E poderá ocorrer expulsão de material onde a pressão estiver menor, como apresenta a figura 3.44(b) e (c). Devido que nestas regiões com pressões menores as forças do núcleo pela expansão térmica poderão superar as forças dos eletrodos.

Força do núcleo (F_N) < Força do Eletrodo (F_E) = Sem expulsão

Força do núcleo (F_N) > Força do Eletrodo (F_E) = Expulsão

Figura 3.44- Força de compressão do eletrodo x força do núcleo (a); desalinhamento do eletrodo (b) e distribuição da pressão em função do desalinhamento do eletrodo (c) [10].

3.15 Equipamentos de soldagem a ponto por resistência:

Podem-se classificar as máquinas de solda quanto ao modo de operação (móvel ou fixa), localização do transformador (acoplado à pinça, ou não) e quanto à corrente aplicada no ponto de solda (CA ou CC). As máquinas usadas na soldagem a ponto são móveis com transformador acoplado conforme mostra a figura 3.45(a) ou com transformador suspenso 3.45(b) e são denominadas por pinça ou alicate [31]. São movimentadas até a peça para a realização da soldagem de forma manual ou por robôs, conforme mostra a figura 3.45(c).

A máquina fixa, como apresenta a figura 3.45(d), denominada de estacionária [32], é muito utilizada em indústrias de autopeças, em que a peça é movimentada manualmente ou por robôs até a máquina para a realização da soldagem.

3.15.1 Máquina monofásica CA:

É alimentada pela rede monofásica em tensão alternada assim como em carga. O formato da onda na corrente de soldagem é senoidal. A figura 3.46 representa o esquema elétrico simplificado da máquina monofásica CA. Na entrada encontram-se os tiristores responsáveis pelo recortamento da tensão aplicada ao primário do transformador, tornando possível a variação do valor eficaz da tensão e do tempo de solda (tempo da tensão presente no primário). Os tiristores são controlados pelo bloco comando de solda e o conjunto completo é denominado de conversor de solda [33].

O transformador é do tipo redutor com tensões máximas de saída entre 3,5 V a 14,5 V (transformadores com potências entre 15 kVA e 300 kVA) para valores máximos de corrente entre os eletrodos (9,6 kA a 51,4 kA) limitada pela carga imposta ao secundário (269 $\mu\Omega$ a 364 $\mu\Omega$) [33].

Figura 3.46- Representação elétrica da máquina monofásica CA [12].

Para o controle do tempo e corrente de solda o “comando de solda” varia o ângulo de disparo α dos tiristores, alterando-se dessa forma a tensão eficaz no primário $v_p(x)$ e por conseqüência a corrente de primário $i_p(x)$, conforme mostra a figura 3.47. Assim a tensão de secundário $v_s(x)$ pode aumentar ou diminuir alterando a corrente entre os eletrodos $i_s(x)$, aumentando ou diminuindo a quantidade de calor no ponto de solda, fundindo um volume maior ou menor de material. Outra forma de se obter a variação da quantidade de

calor na solda é alterando o tempo de circulação da corrente, que é determinado pela quantidade de ciclos da tensão de primário [33].

Figura 3.47- Formas de onda características no conversor CA [12].

3.15.2 Máquina trifásica CC:

A máquina trifásica CC é alimentada pela rede trifásica e fornece à carga tensão contínua. A figura 3.48 representa o esquema elétrico simplificado da máquina trifásica CC. Como as máquinas CC são mecanicamente semelhantes às máquinas de CA, as faixas de operação (corrente de solda, potência e impedância de carga) são semelhantes [34].

Essa máquina é composta basicamente por três máquinas monofásicas com três transformadores independentes, cujos secundários são retificados e ligados em paralelo, alimentando a carga [34].

Figura 3.48- Representação elétrica da máquina trifásica CC [12].

3.15.3 Máquina inversora de média frequência (MFDC):

A máquina inversora de média frequência é alimentada pela rede trifásica, fornecendo corrente contínua à carga. O circuito elétrico equivalente simplificado é mostrado na figura 3.49. De concepção diferente dos anteriores, esse equipamento possui retificador trifásico na entrada e filtro de alisamento de tensão que produz tensão contínua.

A variação da tensão de primário é feita por modulação de largura de pulsos, que converte a tensão de saída do filtro V_{dc} em tensão alternada V_{conv} com frequência na faixa de 1000 Hz a 1200 Hz, na saída do transformador é montado o retificador. Novamente o conjunto mecânico é semelhante ao usado nas máquinas CA, portanto, os níveis máximos de corrente entre os eletrodos e os valores da carga imposta ao secundário são, respectivamente, próximos [35].

Figura 3.49- Representação elétrica da máquina MFDC [12].

3.15.4 Comparação da geração de calor entre o equipamento de CA e o equipamento de CC:

Os gráficos da figura 3.50 mostram uma comparação das curvas de geração de calor entre o equipamento de soldagem com corrente alternada (CA) e corrente contínua de média frequência (CC). A maior produção de calor é observada na junta soldada com o equipamento de soldagem com CC. Por esta razão, o comportamento da resistência em função do tempo é diferente para os dois equipamentos [36]. A forma de ondas da CC permite um empenho mais eficaz do calor, com o aumento constante da corrente o calor concentra-se mais na zona de solda, permitindo correntes de soldagem menores em comparação com a soldagem em CA [13].

Figura 3.50- (a) Comportamento das correntes CC e CA; (b) Comportamento da geração de calor em CC e CA, respectivamente [14].

3.16 Comentários finais:

A soldagem a ponto é um processo que envolve diversas áreas do conhecimento para atingir o ponto ótimo segundo uma norma específica. Em alguns casos, como na indústria automotiva, esta especificação técnica pode ser associada também a fatores estéticos, que tornam a otimização do processo ainda mais complexa.

Esta busca pelo ponto de soldagem ótimo começa pelo tipo de aço, espessuras das chapas que serão soldadas, revestimento ou não das chapas, geometria do ponto, propriedades mecânicas do ponto, geometria do eletrodo, material do eletrodo, parâmetros de soldagem, tipo de equipamento de soldagem, entre outros fatores.

4. MATERIAIS E MÉTODOS:

4.1 Características dos corpos-de-prova usados nos experimentos:

Chapas de aço sem revestimento e revestidas com Zn pelo processo de imersão a quente com espessura de 0,8 mm foram sobrepostas e soldadas com equipamentos de soldagem em CA e CC de média frequência. As dimensões dos corpos-de-prova foram baseadas conforme norma EN ISO 14273, como mostra a figura 4.1.

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

Figura 4.1- Dimensões dos corpos de prova de acordo com a EN ISO 14273 [32].

As dimensões dos corpos-de-prova especificadas pela norma EN ISO 14273 de acordo com sua espessura utilizadas neste trabalho estão mostradas na figura 4.2.

Figura 4.2- Dimensões do corpo-de-prova de acordo com a norma EN ISO 14273 e espessura de 0.8mm.

As propriedades mecânicas das chapas (sem e com revestimento de zinco) empregadas neste experimento estão mostradas nas tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 - Valores encontrados das propriedades mecânicas das chapas sem revestimento usadas nos experimentos.

Valores das propriedades mecânicas (chapa sem revestimento).	
Limite de escoamento	180N/mm ²
Limite de Resistência	315N/mm ²
Alongamento	42 %

Tabela 4.2 - Valores encontrados nas análises das propriedades mecânicas das chapas com revestimento de zinco usadas nos experimentos.

Valores das propriedades mecânicas (chapa com revestimento).	
Limite de escoamento	188N/mm ²
Limite de Resistência	299N/mm ²
Alongamento	43 %

4.2 Critérios de aceitação do ponto de solda:

4.2.1 Determinação dos diagramas de soldabilidade:

Para determinação dos diagramas de tempo versus corrente foi fixada a força entre eletrodos em 180, 230, 280 e 330 kgf, variando-se, para cada força, o tempo em 100, 150, 200 e 250ms e a corrente de soldagem entre 4,3kA a 8,5 kA. No caso do equipamento com CA, o valor é o valor máximo da corrente. Neste caso deve-se trabalhar com o valor 'RMS' da corrente, calculada conforme mostra a integral da equação 10.

Para determinação dos diagramas de força versus corrente foi fixada o tempo em 100, 150, 200 e 250ms, variando-se, para cada tempo, a força em 180, 230, 280 e 330kgf e a corrente de soldagem entre 4,3kA a 8,5 kA. A figura 4.3 apresenta um exemplo dos diagramas de tempo versus corrente e força versus corrente, respectivamente.

O limite mínimo da corrente de soldagem foi determinado aumentando-se gradualmente a corrente em intervalos de 100 A, até que, pelo menos três amostras apresentassem o menor diâmetro do ponto atingível, igual ou acima do valor mínimo especificado no teste de arrancamento de acordo com a norma. A partir deste ponto foi acrescentado 200A para a determinação final do limite mínimo da corrente de soldagem, conforme apresenta a figura 4.4.

A partir deste ponto (corrente de soldagem mínima) a corrente foi aumentada gradualmente em intervalos de 100 A até a ocorrência de expulsão de material. Este ponto menos 200A foi considerado como sendo o de nível de corrente máxima abaixo do qual não ocorre expulsão de material, conforme mostra a figura 4.4.

Depois da determinação dos diagramas de soldabilidade foram efetuados para os quatro parâmetros do limite mínimo e máximo seis corpos de prova por parâmetro, que foram utilizados nos seguintes ensaios: três para tração, três para macrografia. Os valores dos diâmetros e dos ensaios de tração foram plotados nos gráficos, conforme apresenta o exemplo a figura 4.3.

Após a determinação dos diagramas de soldabilidade de tempo versus corrente (CA e CC) e força versus corrente (CA e CC) com chapas revestidas e

não revestidas, foram elaborados diagramas com suas respectivas áreas comuns.

Figura 4.3- Exemplo de diagrama de soldabilidade executado no experimento: (a) Tempo versus corrente com força constante; (b) Força versus corrente com tempo constante.

Figura 4.4- Exemplo da determinação dos limites mínimos e máximos de correntes de soldagem para os diagramas de soldabilidade durante os experimentos.

Em seguida, foram projetados em terceira dimensão os volumes resultantes dos encontros das áreas comuns (tempo versus corrente e força versus corrente). A figura 4.5 mostra um exemplo do volume resultante do encontro das áreas comuns.

Figura 4.5- Exemplo do volume resultante do encontro das áreas comuns (tempo versus corrente e força versus corrente).

Com o volume projetado, foi executado um corte transversal na região de maior área. Após o corte feito, foi determinado nesta área um ponto de maior grau de liberdade. Este ponto determinou os parâmetros utilizados para as medições da resistência dinâmica, dimensões geométricas (macrografia) e propriedade mecânica (ensaio de tração) do ponto de solda. Para depois ser comparados e analisados com os outros pontos de solda encontrados com estes mesmos procedimentos. Foram feitos as seguintes análises e comparações:

CA - Chapas sem Zn	CA - Chapas com Zn	CA - Chapas sem Zn	CC - Chapas sem Zn
CC - Chapas sem Zn	CC - Chapas com Zn	CA - Chapas com Zn	CC - Chapas com Zn

A figura 4.6 mostra um exemplo do corte transversal (corte C-C) na região de maior área do volume e o ponto (parâmetros) de maior grau de liberdade.

Figura 4.6 - Exemplo do corte transversal (corte C-C) na região de maior área do volume e o ponto (parâmetros) de maior grau de liberdade.

Todos os gráficos de diagrama de soldabilidade deste trabalho foram gerados pelo programa de computador chamado CATIA-V5, utilizado para projetos industriais em 3D.

4.2.2 Determinação do diâmetro mínimo da seção do ponto d_L :

Como diâmetro da seção do ponto d_L é válido o diâmetro da área no plano da junção (vertical ao plano de união) das partes dos componentes, que foram fundidos no processo de soldagem e se diferenciam do material base pela sua microestrutura, de acordo com a norma, como mostra a figura 4.7.

- 1- Seção do ponto de solda.
- 2- Plano de Junção
- 3- Zona afetada pelo calor (ZAC).

Espessura mínima de chapa t_1 mm	Diâmetro da seção lentiforme $d_{L \text{ min.}} \geq 3,5 \sqrt{t_1}$ mm	Diâmetro do ponto $d_{p \text{ min.}} = 1,15 d_{L \text{ min.}}$ mm	Força mínima de tração de cisalhamento $F_{\text{min.}}$ kN
0,5	2,5	2,9	1,2
0,6 ¹⁾	2,7	3,1	1,5
0,7	2,9	3,3	1,9
0,8	3,1	3,6	2,3
0,9 ¹⁾	3,3	3,8	2,7
1,0	3,5	4,0	3,2
1,25 ¹⁾	3,9	4,5	4,2
1,5	4,3	4,9	5,1
1,75 ¹⁾	4,6	5,3	6,1
2,0	5,0	5,7	7,2
2,25 ¹⁾	5,3	6,0	8,3
2,5	5,5	6,4	10,6
2,75 ¹⁾	5,8	6,7	11,5
3,0	6,1	7,0	12,4
3,5	6,5	7,5	15,0
4,0	7,0	8,0	18,5

Figura 4.7- Dimensões do ponto de solda de acordo com a norma.

A medição do diâmetro da seção do ponto d_L no plano da junção foi executada por meio de macrografias, conforme mostra o exemplo da figura 4.8.

De acordo com a tabela da figura 4.7, o diâmetro da seção do ponto é:

$$d_{L \text{ mín.}} > 3,5 \sqrt{t_1}$$

Desta forma, segundo a norma para chapas revestidas e não revestidas de espessura de 0,8mm, o diâmetro mínimo da seção do ponto é de 3,1mm.

Figura 4.8- Exemplo de medições do ponto de solda executado no experimento por ensaio de macrografia.

4.2.3 Determinação do diâmetro mínimo do ponto de solda (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 no plano de junção ou na ruptura por cisalhamento.

Na determinação do diâmetro do ponto foi determinado o eixo principal e o eixo secundário d_1 e d_2 da protuberância com o auxílio de um paquímetro (2ª

medição defasada em 90°) e o valor médio foi determinado a partir das duas medições.

A figura 4.9 apresenta a determinação do diâmetro do ponto d_p após os ensaios de arrancamento e de cisalhamento por tração e algumas configurações possíveis após o rompimento.

Figura 4.9- Determinação do diâmetro do ponto d_p após os ensaios de arrancamento e de tração.

Conforme apresenta a tabela da figura 4.7, o diâmetro mínimo do ponto após os ensaios de arrancamento e de tração é: $d_p = 1,15 d_L$.

Sendo assim, conforme a norma para chapas revestidas e não revestidas de espessura de 0,8mm o diâmetro mínimo do ponto é de 3,6mm.

4.2.4 Determinação da força mínima do ponto de solda ($F_{min.}$):

A determinação da força máxima obtida no ensaio de tração foi comparada com a força mínima através do teste de tração de cisalhamento. O equipamento utilizado foi o modelo K-500/2000MP fabricado pela KRATOS, como mostra a figura 4.10.

Figura 4.10- Testes de tração de cisalhamento executados nos experimentos.

Nestes testes foram gerados gráficos, pelo programa do equipamento de tração, a fim de observar as forças máximas atingidas pelos pontos de solda antes do seu rompimento, como apresenta a figura 4.11.

A força mínima que está especificada na tabela da figura 4.7 está relacionada com a espessura da chapa. Sendo assim, conforme a norma para chapas revestidas e não revestidas de espessura de 0,8mm a força mínima é de 230kgf. Os valores obtidos experimentalmente foram comparados com a força mínima especificada pela norma.

FORÇA MÁXIMA kgf	LIMITE DE RESISTÊNCIA kgf/mm ²	ALONGAMENTO %
451,00	6,26	13,15

Figura 4.11- Gráfico gerado pelo equipamento de tração para obtenção da força máxima atingida no teste.

4.3 Medições da Tensão, Corrente, Resistência de contato e da Resistência Dinâmica durante a soldagem:

Para obter as grandezas de tensão foi usado um osciloscópio digital com ponta de prova diferencial e para capturar as grandezas da corrente foi utilizada uma bobina de Rogowski do tipo flexível, com a integração do sinal da bobina executada no Weld Tester Miyachi MM315. A figura 4.12 mostra a adaptação no porta-eletrodo com ponta de prova diferencial para medir a tensão durante a soldagem.

A resistência dinâmica foi monitorada por um programa de tratamento de dados desenvolvido pela empresa Welding Science, a fim de observar e comparar o comportamento da resistência dinâmica e a energia dinâmica durante a soldagem dos pontos. Estes pontos de solda foram determinados pelo maior grau de liberdade nos volumes dos diagramas de soldabilidade, considerados pontos ótimos.

Figura 4.12- Adaptação no porta-eletrodo com ponta de prova diferencial para medir a tensão durante a soldagem.

A tabela 4.3 descreve os equipamentos usados nas medições de tensão e corrente, durante os experimentos.

Tabela 4.3- Equipamentos usados nas medições de tensão e corrente.

Equipamento	Descrição
1 - Osciloscópio - TiePie HS4	DSO, 4 canais diferenciais, 20MHz, Memória.
2 - Computador - Asus EEEPC	Windows XP
3 - Equip. Leitura da Corrente	Weld Test Miyachi - MM315
4 - Sensor para captura da corrente	Bobina de Rogowski do tipo flexível

A figura 4.13 mostra os equipamentos descritos na tabela 4.3, para medições da tensão e corrente durante os experimentos.

Figura 4.13- Foto dos equipamentos utilizados para medições da tensão e corrente durante os experimentos.

Os sinais capturados pelos conversores A/D do osciloscópio foi transmitido pela USB ao computador para posterior tratamento matemático.

A figura 4.14 apresenta o esquema das ligações dos sensores e instrumentos de medição utilizados nos experimentos.

4.3.1 Cálculo das resistências dinâmicas:

Para o cálculo da resistência dinâmica foram usadas a tensão e corrente eficaz (RMS) de cada semi ciclo, tanto para corrente alternada em 60Hz, como para corrente contínua originada em inversor de 1kHz, pois, a indutância entre eletrodos é desprezível, como observa-se na figura 4.16 para corrente alternada e figura 4.17 para corrente contínua, apresentada nos experimentos. Adicionalmente também foi calculada a energia elétrica dinâmica.

Figura 4.16- Corrente de soldagem (verde) em fase com a tensão entre eletrodos (azul).

Figura 4.17- Corrente de solda (verde) e a tensão entre eletrodos (laranja).

As equações 9, 10 e 11 definem os cálculos usados para resistência dinâmica:

$$V_{el\ RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_{el}^2(t) dt} \quad (9)$$

$$I_{s\ RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_s^2(t) dt} \quad (10)$$

$$R_{din} = \frac{V_{el\ rms}}{I_{s\ rms}} \quad (11)$$

Onde:

R_{din} = Resistência dinâmica.

$V_{el\ RMS}$ = Tensão eficaz (RMS) entre os eletrodos.

$I_{s\ RMS}$ = Corrente de solda eficaz (RMS).

v_{el} = Tensão instantânea entre os eletrodos.

i_s = Corrente instantânea de solda.

T = Período.

4.4 Cálculo da Energia Elétrica Dinâmica:

A energia elétrica dinâmica durante a soldagem que é transformada em calor pode ser determinada pela equação 13. As equações 12 e 13 definem os cálculos usados para energia elétrica dinâmica:

$$P_s = \frac{1}{T} \int_0^T v_{el}(t) i_s(t) dt \quad (12)$$

$$E_s = P_s . T \quad (13)$$

Onde:

P_s = Potencia Ativa entre eletrodos (Watts).

E_s = Energia Elétrica dinâmica entre eletrodos. (Joule).

T = Período.

4.5 Monitoramento das forças de soldagem:

Para cada mudança de parâmetro de soldagem, as forças entre os eletrodos foram calibradas e monitoradas por um dinamômetro digital da Adis Development, com capacidade até 1330 daN. A figura 4.18 mostra a dinamômetro utilizado nos experimentos para calibração das forças durante as mudanças de parâmetros.

Figura 4.18- Dinamômetro utilizado nos experimentos para calibração das forças entre os eletrodos.

4.6 Equipamentos de soldagem:

Foram utilizados nos experimentos dois equipamentos da marca Düring, utilizando CA e CC de média frequência, para a realização da soldagem. Apesar dos experimentos utilizarem dois equipamentos, pode-se notar que a figura 4.19 mostra apenas um equipamento de soldagem, isto é devido às características e dimensões externas dos dois equipamentos (CA e CC) serem iguais. O sistema de força e movimentação dos eletrodos é pneumático para ambos os equipamentos. A tabela 4.4 apresenta as características técnicas dos equipamentos de soldagem utilizada nos experimentos.

Figura 4.19- Equipamento de soldagem utilizado para realização dos experimentos, de CA e CC de média frequência (Pinça “C” da marca Düring).

Tabela 4.4 – Características técnicas dos equipamentos de soldagem utilizados nos experimentos.

	Transformador	Frequência	Força Máx.entre os eletrodos
Equipamento de CA	60 kVA	60 Hz	380 kgf
Equipamento de CC	56kVA	1000 Hz	380 kgf

4.7 Eletrodos utilizados nos experimentos:

Os eletrodos utilizados nos experimentos são da classe 1 segundo RWMA e fabricados de cobre - zircônio (0,15% Zr) endurecido por trabalho a frio com dureza de 70 HB e 90% de condutividade IACS. A cada 40 pontos de solda os eletrodos eram substituídos por novos. As pontas dos eletrodos

apresentam um raio esférico de 16 mm. A figura 4.20 mostra os eletrodos utilizados nos experimentos.

Figura 4.20- Eletrodos de CuZr (0,15% Zr) utilizados nos experimentos.

4.8 Análise da resistência elétrica de contato versus rugosidade superficial das chapas:

Para a análise da correlação entre resistência de contato e rugosidade superficial das chapas foi utilizado no experimento um rugosímetro, que se baseia na altura da irregularidade dos dez pontos (R_z), conforme mostra a figura 4.21. A rugosidade R_z é definida como a diferença entre o valor médio das ordenadas dos cinco pontos mais salientes e valor médio das ordenadas dos cinco pontos mais reentrantes medidas a partir de uma linha média, não interceptando o perfil, e no comprimento de amostragem [37].

Figura 4.21- Desenho esquemático da rugosidade R_z , altura das irregularidades dos 10 pontos [37].

4.9 Perfil de dureza:

Foi realizado o levantamento do perfil de dureza tanto da solda dos experimentos quanto do material de base, a fim de verificar a variação desta entre as diferentes regiões da junta soldada. Foram analisados os perfis de dureza Vickers (HV) nos pontos de solda em chapas revestidas com Zn e sem revestimento. Os pontos de medição de dureza foram executados de no mínimo 3 pontos por região, conforme mostra a figura 4.22.

Figura 4.22 – Pontos utilizados para medição de dureza (Vickers).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

5.1 Diagramas de soldabilidade em CA e CC com chapas sem revestimento de zinco:

Neste item serão mostradas as comparações entre os diagramas de soldabilidade 'tempo versus corrente' e 'força versus corrente' na soldagem empregando corrente alternada (CA) e corrente contínua (CC) em chapas finas sem revestimento de zinco, para aplicação na indústria automotiva. Os diagramas de soldabilidade foram obtidos levando-se em conta o diâmetro do ponto e a força mínima da junta após ensaio de cisalhamento. Nos pontos dos diagramas de soldabilidade estão representados o diâmetro do ponto em mm e a força mínima em kgf, respectivamente. Por exemplo, para o gráfico 5.1(a), no parâmetro de aproximadamente 6 kA e 150 ms, os dados mostrados como (3,57;419) indicam um ponto de 3,57 mm de diâmetro e a força do ensaio de tração de 419 kgf, valores médios de três corpos-de-prova.

5.1.1 Diagramas de soldabilidade 'tempo versus corrente' em CA e CC com chapas sem revestimento de zinco:

As figuras 5.1 a 5.4, a seguir, mostram as comparações entre os diagramas de soldabilidade 'tempo versus corrente', na soldagem em CA e CC com chapas sem revestimento de Zn. Para a determinação dos diagramas de soldabilidade foram pré-estabelecidas forças constantes de 180, 230, 280 e 330 kgf.

Figura 5.1 - Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA (a) e CC (b) com chapas sem revestimento (Zn), com força constante de 180 kgf.

Gráfico CA (chapas sem Zn)
F=230kgf

Gráfico CC (chapas sem Zn)
F=230kgf

Figura 5.2 - Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA (a) e CC (b) com chapas sem revestimento (Zn), com força constante de 230 kgf.

Gráfico CA (chapas sem Zn)
F=280kgf

Gráfico CC (chapas sem Zn)
F=280kgf

Figura 5.3 - Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA (a) e CC (b) com chapas sem revestimento (Zn), com força constante de 280 kgf.

Figura 5.4 - Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA (a) e CC (b) com chapas sem revestimento (Zn), com força constante de 330 kgf.

A tabela 5.1 apresenta o desvio padrão (S) entre os valores das correntes para tempos constantes, tomando-se os valores em CA e o em CC.

Pode-se notar na tabela 5.1 que os diagramas de soldabilidade em CA apresentam-se deslocados em regiões com valores de corrente de soldagem no máximo 17% maiores no coeficiente de variação (C.V) em comparação aos diagramas de CC. Estes resultados estão relacionados à maior eficiência na geração de calor da soldagem em CC.

Tabela 5.1 – Desvio padrão (S) e coeficiente de variação (C.V) com forças constantes entre CA e CC em chapas sem revestimento.

Tempo(ms)	Força = 180 kgf		Força = 230 kgf		Força = 280 kgf		Força = 330 kgf	
	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)
100	0,687	11,7	0,502	8,3	0,540	9,6	1,073	17,0
150	0,640	12,1	0,374	6,5	0,458	7,8	0,830	13,3
200	0,640	12,8	0,300	5,4	0,355	6,0	0,687	11,1
250	0,640	13,0	0,269	4,9	0,300	5,4	0,502	8,1

Ainda, pela análise da tabela 5.1, é possível notar também que quanto maior o tempo de soldagem menor o desvio padrão. Uma possível explicação para este fenômeno é que a quantidade de calor gerado pelo efeito Joule na soldagem em CA e CC se aproximam em magnitudes quanto maior for o parâmetro tempo.

Observa-se também que as áreas dos diagramas de soldabilidade em CC apresentam-se em média 29% maiores se comparadas aos diagramas de CA. Este fato mostra um comportamento mais estável da soldagem em CC em chapas sem revestimento se comparada com a soldagem em CA.

Em relação aos diâmetros dos pontos apresentados nos limites mínimos e máximos de correntes nos diagramas de CA e CC. Observa-se que na soldagem em CC os diâmetros dos pontos apresentam-se em média maiores 0,3% nos limites mínimos e 1,3% maiores nos limites máximos. Uma possível explicação para esta diferença é que apesar dos diagramas de soldabilidade CA apresentar valores de corrente de limites mínimos e máximos maiores em comparação aos limites mínimos e máximos em CC, estas

magnitudes de correntes maiores em CA não são suficientes para compensar a eficiência na geração de calor na soldagem em CC.

Nota-se também que o diâmetro do ponto em CC se estabiliza em 200ms e o ponto em CA se estabiliza em 250ms. A causa para este fenômeno é que com a maior eficiência na geração de calor na soldagem em CC, o ponto de fusão na interface das chapas atinge as mesmas magnitudes em tempos menores.

Em relação aos valores das forças dos testes de tração de cisalhamento para os pontos de solda nos limites mínimos e máximos de corrente. Nota-se que as forças de tração em CC apresentaram-se em média 6,4% maiores nos limites mínimos e 0,5% maiores nos limites máximos. Isto se deve ao valor ligeiramente maior encontrado nas médias dos diâmetros dos pontos na soldagem em CC.

5.1.1.1 Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA e CC com chapas sem revestimento (Zn):

A figura 5.5 apresenta a comparação entre as áreas comuns resultantes dos diagramas de soldabilidade com força constante de 180, 230, 280 e 330 kgf, na soldagem em CA e CC em chapas sem revestimento.

Nota-se que a área comum dos diagramas de soldabilidade em CC apresenta-se 28,5% maior se comparada com a área comum dos diagramas de soldabilidade em CA. Este resultado está relacionado com as maiores áreas e os menores deslocamentos (eixo da corrente) apresentados nos diagramas de soldabilidade em CC. Portanto, é possível notar que a soldagem em CC é mais eficiente e menos sensível as mudanças do parâmetro força, se comparadas com a soldagem em CA em chapas sem revestimento.

Ainda, pela análise da figura 5.5, é possível notar também que o diagrama de soldabilidade resultante em CA apresenta-se deslocado numa região em média com magnitudes de correntes 21,6% maiores se comparado com o diagrama de soldabilidade resultante em CC. Este resultado está relacionado à maior eficiência em CC em gerar calor nas mesmas condições e parâmetros em comparação a soldagem em CA.

Figura 5.5- Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA (a) e CC (b) com chapas sem revestimento (Zn).

A tabela 5.2 mostra as áreas dos diagramas de soldabilidade com força constante entre CA e CC com chapas sem revestimento e as respectivas áreas comuns resultantes.

Tabela 5.2 - Áreas dos diagramas de soldabilidade com força constante entre CA e CC com chapas sem revestimento e as respectivas áreas comuns resultantes, em unidades arbitrária (u.a).

	Área (u.a)				
Força (kgf)	180	230	280	330	Área comum
CA sem Zn	181,8	451,3	429,2	375,1	135,1
CC sem Zn	443,4	322,4	574,2	688,2	189,3

5.1.2 Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA e CC de chapas sem revestimento (Zn)

As figuras 5.6 a 5.9 mostram as comparações entre os diagramas de soldabilidade (força versus corrente) na soldagem em CA e CC com chapas sem revestimento (Zn). Para a determinação dos diagramas de soldabilidade foi pré-estabelecida um tempo constante de 100, 150, 200 e 250 ms.

Figura 5.6- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA (a) e CC (b) de chapas sem revestimento (Zn), com tempo constante de 100 ms.

Figura 5.7- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA (a) e CC (b) de chapas sem revestimento (Zn), com tempo constante de 150 ms.

Figura 5.8- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA (a) e CC (b) de chapas sem revestimento (Zn), com tempo constante de 200 ms.

Figura 5.9- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA (a) e CC (b) de chapas sem revestimento (Zn), com tempo constante de 250 ms.

Observa-se na tabela 5.3 que os diagramas de soldabilidade em CA apresentam-se deslocados em regiões com valores de corrente de soldagem no máximo 17% maiores no coeficiente de variação em comparação aos diagramas de CC. Estes resultados estão relacionados à maior eficiência na geração de calor da soldagem em CC.

Tabela 5.3 – Desvio padrão (S) e coeficiente de variação (C.V) com tempos constantes entre CA e CC em chapas sem revestimento.

Força (kgf)	Tempo = 100 ms		Tempo = 150 ms		Tempo = 200 ms		Tempo = 250 ms	
	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)
180	0,687	11,7	0,640	12,1	0,640	12,8	0,640	13,0
230	0,502	8,3	0,374	6,5	0,300	5,4	0,269	4,9
280	0,594	9,6	0,458	7,9	0,335	6,0	0,300	5,4
330	1,073	17,0	0,830	13,4	0,687	11,1	0,502	8,1

Ainda, pela análise da tabela 5.3, é possível notar também que quanto maior a força maior o desvio padrão. Uma possível explicação para este fenômeno é que a área da passagem da corrente aumenta com o aumento da força. Este fato faz com que a densidade de corrente diminua na interface das chapas, como a eficiência em gerar calor em CC é maior que em CA o desvio padrão aumenta com o aumento da força.

Nota-se também que as áreas dos diagramas de soldabilidade em CC apresentam-se em média 28,9% maiores se comparadas as áreas dos diagramas de CA. Este fato apresenta um comportamento mais estável da soldagem em CC em chapas sem revestimento se comparada com a soldagem em CA.

Em relação aos diâmetros dos pontos apresentados nos limites mínimos e máximos de correntes nos diagramas de CA e CC. Pode-se observar que na soldagem em CC os diâmetros dos pontos de solda apresentam-se em média 3,8% menores nos limites mínimos e 1,9% maiores nos limites máximos. Nota-se que apesar da maior eficiência em gerar calor na soldagem em CC, esta eficiência não foi suficiente para compensar as magnitudes maiores de corrente na soldagem em CA nos limites mínimos.

Em relação aos valores das forças dos testes de tração de cisalhamento para os pontos de solda nos limites mínimos e máximos em corrente CA e CC. Pode-se observar que na soldagem em CC as forças dos ensaios de tração

apresentam-se em média menor 1% nos limites mínimos e 4,7% maiores nos limites máximos. Isto se deve ao valor maior encontrado nas médias dos diâmetros dos pontos em CA nos limites mínimos de correntes e ao valor maior encontrado nas médias dos diâmetros dos pontos em CC nos limites máximos de correntes.

5.1.2.1 Áreas comuns dos diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA e CC com chapas sem revestimento (Zn):

A figura 5.10 apresenta a comparação entre as áreas comuns resultantes dos diagramas de soldabilidade com tempo constante de 100, 150, 200 e 250 ms, na soldagem em CA e CC em chapas sem revestimento.

Figura 5.10- Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA (a) e CC (b) com chapas sem revestimento (Zn).

Observa-se que a área comum dos diagramas de soldabilidade em CC apresenta-se 67% maior se comparada com a área comum dos diagramas de soldabilidade em CA. Este resultado está relacionado com as maiores áreas e os menores deslocamentos apresentados nos diagramas de soldabilidade em CC, portanto, é possível notar que a soldagem em CC foi mais eficiente e menos sensível às mudanças do parâmetro tempo, se comparadas com a soldagem em CA em chapas sem revestimento.

É possível observar também que o diagrama de soldabilidade resultante em CA apresenta-se deslocado numa região em média com magnitudes de correntes 20,3% maiores se comparado com o diagrama de soldabilidade resultante em CC. Este resultado está relacionado à maior eficiência na soldagem em CC em gerar calor nas mesmas condições e parâmetros em comparação a soldagem em CA em chapas sem revestimentos. A tabela 5.4 mostra as áreas dos diagramas de soldabilidade com tempo constante entre CA e CC com chapas sem revestimento e as respectivas áreas comuns resultantes.

Tabela 5.4 - Áreas dos diagramas de soldabilidade com tempo constante entre CA e CC com chapas sem revestimento e as respectivas áreas comuns resultantes.

	Área (u.a)				
Tempo (ms)	100	150	200	250	Área comum
CA sem Zn	299,5	337,5	363,8	373,3	117,1
CC sem Zn	482,3	483,1	499,7	468,1	356,1

5.1.3 Diagramas de soldabilidade em terceira dimensão (força, tempo e corrente) CA e CC com chapas sem revestimento (Zn):

Na figura 5.11 apresenta a comparação dos volumes dos diagramas de soldabilidade em 3D em CA e CC com chapas sem Zn. Gerados a partir das áreas resultantes de tempo versus corrente e força versus corrente, com a finalidade de integrar os três parâmetros de soldagem (força, tempo e corrente) a fim de determinar um parâmetro otimizado, ou seja, o ponto ótimo para ambos os volumes.

Gráfico CA (chapas sem Zn)

$$V = 1439,1 \text{ u.a}$$

Gráfico CC (chapas sem Zn)

$$V = 4263,7 \text{ u.a}$$

Figura 5.11- Diagramas de soldabilidade em terceira dimensão (força, tempo e corrente) CA (a) e CC (b) com chapas sem revestimento (Zn).

Pode-se observar que o volume do diagrama de soldabilidade em CC apresenta-se 66,2% maior se comparado ao volume do diagrama de soldabilidade em CA. Esta diferença está relacionada com o fato das áreas resultantes tanto de força versus corrente como tempo versus correntes em CC apresentarem-se maiores se comparadas com CA, devido à maior eficiência na geração de calor da soldagem em CC.

Na figura 5.12 apresenta as vistas frontais dos volumes dos diagramas de soldabilidade em CC e CA e também apresenta os cortes (B-B e D-D), gerados nas maiores áreas encontradas nos respectivos volumes. Após os cortes feitos, localiza-se um ponto de maior grau de liberdade dentro das áreas, para a determinação dos parâmetros otimizados.

CORTE B-B/CORTE D-D

Figura 5.12 - Vistas frontais dos volumes dos diagramas de soldabilidade em CC e CA e os cortes (B-B e D-D).

Nota-se que a área do corte B-B do volume do diagrama de soldabilidade em CC, apresenta-se 71% maior se comparada com o corte D-D do volume do diagrama de soldabilidade em CA. Este resultado está relacionado com o maior volume do diagrama de soldabilidade em CC, devido à maior eficiência na geração de calor da soldagem em CC.

Os parâmetros otimizados encontrados (corte B-B) para a soldagem em CC em chapas sem Zn foram: Força: 250 kgf; tempo: 125 ms e corrente: 6 kA.

Os parâmetros otimizados encontrados (corte D-D) para a soldagem em CA em chapas sem Zn foram: Força: 260 kgf; tempo: 11 ciclos (183 ms) e corrente: 7 kA.

5.2 Diagramas de soldabilidade em CA e CC com chapas revestidas (Zn):

As figuras 5.13 a 5.24 mostram as comparações entre os diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) e (força versus corrente) em CA e CC com chapas revestidas com Zn.

5.2.1 Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA e CC com chapas revestidas (Zn):

As figuras 5.13 a 5.16 mostram as comparações entre os diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA e CC com chapas revestidas com Zn. Para a determinação dos diagramas de soldabilidade foi pré-estabelecida um tempo constante de 100, 150, 200 e 250 ms.

Figura 5.13- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA (a) e CC (b) com chapas revestidas (Zn), com força constante de 180 kgf.

Figura 5.14- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA (a) e CC (b) com chapas revestidas (Zn), com força constante de 230 kgf.

Figura 5.15- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA (a) e CC (b) com chapas revestidas (Zn), com força constante de 280 kgf.

Figura 5.16- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA (a) e CC (b) com chapas revestidas (Zn), com força constante de 330 kgf.

Pode-se observar na tabela 5.5 que os diagramas de soldabilidade em CA apresentam-se deslocados em regiões com valores de corrente de soldagem no máximo 14% maiores no coeficiente de variação em comparação aos diagramas de CC.

Tabela 5.5 – Desvio padrão (S) e coeficiente de variação (C.V) com forças constantes entre CA e CC em chapas revestidas com Zn.

Tempo(ms)	Força = 180 kgf		Força = 230 kgf		Força = 280 kgf		Força = 330 kgf	
	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)
100	0,734	12,0	0,594	9,2	0,640	9,5	0,687	9,8
150	0,734	13,1	0,640	10,3	0,640	9,8	0,734	10,9
200	0,734	13,8	0,547	9,1	0,594	9,5	0,782	11,9
250	0,734	14,0	0,502	8,5	0,687	11,1	0,734	11,4

Nota-se também que as áreas dos diagramas de soldabilidade em CC apresentam-se em média 32,8% maiores se comparadas aos diagramas de CA. Estes resultados estão relacionados à maior eficiência na geração de calor da soldagem em CC.

Em relação aos diâmetros dos pontos apresentados nos limites mínimos e máximos de correntes nos diagramas de CA e CC. Nota-se que nos diagramas de soldabilidade que em CC os diâmetros dos pontos apresentam-se em média maiores 0,6% nos limites mínimos e 0,8% maiores nos limites máximos. Uma possível explicação para esta diferença é que apesar da CA apresentar valores de corrente de limites mínimos e máximos maiores em comparação aos limites mínimos e máximos em CC, estas magnitudes de correntes maiores em CA não são suficientes para compensar a eficiência na geração de calor na soldagem em CC, para estes níveis de corrente.

Observa-se também que o diâmetro do ponto em CC se estabiliza em 200ms e o ponto em CA se estabiliza em 250ms. A causa para este fenômeno é a maior eficiência na geração de calor em CC, o ponto de fusão na interface das chapas atinge as mesmas magnitudes em tempos menores.

Em relação aos valores das forças dos testes de tração de cisalhamento para os pontos de solda nos limites mínimos e máximos em corrente CA e CC. Pode-se observar que em CC as forças dos ensaios de tração apresentam-se em média maiores 0,2% nos limites mínimos e 3,4% maiores nos limites máximos. Isto se deve aos valores ligeiramente maiores encontrados nas médias dos diâmetros dos pontos em corrente CC.

5.2.1.1 Áreas comuns dos diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA e CC com chapas revestidas (Zn):

A figura 5.17 apresenta a comparação entre as áreas comuns resultantes dos diagramas de soldabilidade com força constante de 180, 230, 280 e 330 kgf em CA e CC em chapas com revestimento de Zn.

Figura 5.17- Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA (a) e CC (b) com chapas revestidas (Zn).

Observa-se que apesar dos diagramas de soldabilidade em CA apresentarem as menores áreas, nota-se que a área comum dos diagramas de soldabilidade em CA apresenta-se 52,5% maior se comparada com a área comum dos diagramas de soldabilidade em CC. Este fato está relacionado com o comportamento na soldagem em CA que apresentou menor sensibilidade na mudança do parâmetro força em seus diagramas de soldabilidade se comparadas com a soldagem em CC. Este fato é devido que individualmente os diagramas em CA apresentaram menores deslocamentos, no eixo da corrente, se comparadas aos diagramas de CC.

Ainda, pela análise da figura 5.17, é possível notar também que o diagrama de soldabilidade resultante em CA apresenta-se deslocado numa região em média com magnitudes de correntes 18,4% maiores se comparado com o diagrama de soldabilidade resultante em CC. Este resultado está relacionado à maior eficiência em CC em gerar calor nas mesmas condições e parâmetros em comparação a soldagem em CA. A tabela 5.6 mostra as áreas dos diagramas de soldabilidade com força constante entre CA e CC com chapas revestidas de Zn e as respectivas áreas comuns resultantes.

Tabela 5.6 - Áreas dos diagramas de soldabilidade com força constante entre CA e CC com chapas revestidas (Zn) e as respectivas áreas comuns resultantes.

	Área (u.a)				
Força (kgf)	180	230	280	330	Área comum
CA com Zn	224,2	393,6	344,9	314,9	188,1
CC com Zn	425,9	374,8	502,4	599,8	89,3

5.2.2 Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA e CC de chapas revestidas (Zn):

As figuras 5.18 a 5.21 mostram as comparações entre os diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA e CC com chapas revestidas (Zn). Para a determinação dos diagramas de soldabilidade foi pré-estabelecida um tempo constante de 100, 150, 200 e 250 ms.

Figura 5.18- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA (a) e CC (b) de chapas revestidas (Zn), com tempo constante de 100 ms.

Figura 5.19- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA (a) e CC (b) de chapas revestidas (Zn), com tempo constante de 150 ms.

Gráfico CA (chapas com Zn)
t=200ms

Gráfico CC (chapas com Zn)
t=200ms

Figura 5.20- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA (a) e CC (b) de chapas revestidas (Zn), com tempo constante de 200 ms.

Figura 5.21- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA (a) e CC (b) de chapas revestidas (Zn), com tempo constante de 250 ms.

Pode-se notar na tabela 5.7 que os diagramas de soldabilidade em CA apresentam-se deslocados em regiões com valores de corrente de soldagem no máximo 14% maiores no coeficiente de variação em comparação aos diagramas de CC.

Tabela 5.7 – Desvio padrão (S) e coeficiente de variação (C.V) com tempos constantes entre CA e CC em chapas revestidas com Zn.

Força (kgf)	Tempo = 100 ms		Tempo = 150 ms		Tempo = 200 ms		Tempo = 250 ms	
	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)
180	0,700	12,0	0,734	13,1	0,734	13,8	0,734	14,0
230	0,594	9,2	0,640	10,3	0,547	9,1	0,502	8,6
280	0,640	9,5	0,640	9,8	0,594	9,5	0,687	11,1
330	0,687	9,8	0,734	10,9	0,782	11,9	0,734	11,5

Nota-se também que as áreas dos diagramas de soldabilidade em CC apresentam-se em média 25,7% maiores se comparadas aos diagramas de CA. Estes resultados estão relacionados à maior eficiência na geração de calor da soldagem em CC.

Em relação aos diâmetros dos pontos apresentados nos limites mínimos e máximos de correntes nos diagramas de CA e CC. Pode-se observar que em CC os diâmetros dos pontos apresentam-se em média 0,3% maiores nos limites mínimos e 0,3% menores nos limites máximos. Nota-se que apesar da maior eficiência em gerar calor em CC os diâmetros dos pontos apresentaram-se na média com aproximadamente as mesmas dimensões. Em relação aos valores das forças dos testes de tração de cisalhamento para os pontos de solda nos limites mínimos e máximos em corrente CA e CC. Pode-se observar que em CC as forças dos ensaios de tração apresentam-se em média maior 0,7% nos limites mínimos e 3,6% menores nos limites máximos. Isto se deve ao valor maior encontrado nas médias dos diâmetros dos pontos em CC nos limites mínimos de correntes e ao valor maior encontrado nas médias dos diâmetros dos pontos em CA nos limites máximos de correntes.

5.2.2.1 Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA e CC com chapas revestidas (Zn):

A figura 5.22 apresenta a comparação entre as áreas comuns resultantes dos diagramas de soldabilidade com tempo constante de 100, 150, 200 e 250 ms em CA e CC em chapas revestidas com Zn.

Figura 5.22- Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA (a) e CC (b) com chapas revestidas (Zn).

Nota-se que a área comum dos diagramas de soldabilidade em CC apresenta-se 33,5% maior se comparada com a área comum dos diagramas de soldabilidade em CA. Este resultado está relacionado com as maiores áreas e os menores deslocamentos apresentados nos diagramas de soldabilidade em

CC, portanto, é possível notar que a soldagem em CC apresentou-se com mais eficiente e com menor sensibilidade às mudanças do parâmetro tempo, se comparadas com a soldagem em CA com chapas revestidas com Zn.

É possível notar também que o diagrama de soldabilidade resultante em CA apresenta-se deslocado numa região com magnitudes de correntes 18,7% maiores se comparado com o diagrama de soldabilidade resultante em CC. Este resultado está relacionado à maior eficiência em CC em gerar calor nas mesmas condições e parâmetros em comparação a soldagem em CA. A tabela 5.8 mostra as áreas dos diagramas de soldabilidade com tempo constante entre CA e CC com chapas com revestimento de Zn e as respectivas áreas comuns resultantes.

Tabela 5.8 - Áreas dos diagramas de soldabilidade com tempo constante entre CA e CC com chapas revestidas (Zn) e as respectivas áreas comuns resultantes.

	Área (u.a)				
Tempo (ms)	100	150	200	250	Área comum
CA com Zn	284,5	312,7	375,7	388,1	203,9
CC com Zn	447,3	445,5	463,4	476,3	306,5

5.2.3 Diagramas de soldabilidade em terceira dimensão (força, tempo e corrente) CA e CC com chapas sem revestimento (Zn):

Na figura 5.23 apresenta a comparação dos volumes dos diagramas de soldabilidade em 3D em CA e CC com chapas revestidas com Zn. Gerados a partir das áreas resultantes de tempo versus corrente e força versus corrente, com a finalidade de integrar os três parâmetros de soldagem (força, tempo e corrente) a fim de determinar um parâmetro otimizado, ou seja, o ponto ótimo para ambos os volumes.

Figura 5.23 - Diagramas de soldabilidade em terceira dimensão (força, tempo e corrente) CA (a) e CC (b) com chapas revestidas (Zn).

Pode-se observar que o volume do diagrama de soldabilidade em CA apresenta-se 57,2% maior se comparado ao volume do diagrama de soldabilidade em CC. Esta diferença está relacionada com o fato das áreas resultantes tanto de força versus corrente como tempo versus correntes em CA apresentarem-se com menores deslocamentos nos diagramas de soldabilidade

nos eixos das correntes. Este fato é devido que em CA a soldagem apresentou-se com menor sensibilidade nas mudanças de parâmetros se comparadas com a soldagem em CC em chapas revestidas de Zn.

Na figura 5.24 apresenta as vistas frontais dos volumes dos diagramas de soldabilidade em CC e CA e também apresenta os cortes (A-A e C-C), gerados nas maiores áreas encontradas nos respectivos volumes. Após os cortes feitos, localiza-se um ponto de maior grau de liberdade dentro das áreas, para a determinação dos parâmetros otimizados.

Figura 5.24- Vistas frontais dos volumes dos diagramas de soldabilidade em CC e CA com chapas revestidas com Zn e os cortes (A-A e C-C).

Nota-se que a área do corte C-C do volume do diagrama de soldabilidade em CA, apresenta-se 28% maior se comparada com o corte A-A do volume do diagrama de soldabilidade em CC. Este resultado está relacionado com o maior volume do diagrama de soldabilidade em CA, devido à menor sensibilidade nas mudanças de parâmetros se comparadas com a soldagem em CC em chapas revestidas com Zn.

Os parâmetros otimizados encontrados (corte A-A) para a soldagem em CC em chapas revestidas com Zn foram: Força: 270 kgf; tempo: 110 ms e corrente: 6,6 kA.

Os parâmetros otimizados encontrados (corte C-C) para a soldagem em CA em chapas revestidas com Zn foram: Força: 260 kgf; tempo: 10 ciclos (167 ms) e corrente: 7,4 kA.

5.3 Diagramas de soldabilidade em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn):

As figuras 5.25 a 5.36 mostram as comparações entre os diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) e (força versus corrente) em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn).

5.3.1 Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn):

As figuras 5.25 a 5.28 mostram as comparações entre os diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA com chapas revestidas e não revestidas com Zn. Para a determinação dos diagramas de soldabilidade foi pré-estabelecida uma força constante de 180, 230, 280 e 330 kgf.

Figura 5.25- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA com chapas sem revestimento (a) e revestidas com zinco (b), com força constante de 180 kgf.

Gráfico CA (chapas sem Zn)
F=230kgf

Gráfico CA (chapas com Zn)
F=230kgf

Figura 5.26- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA com chapas sem revestimento (a) e revestidas com zinco (b), com força constante de 230 kgf.

Gráfico CA (chapas sem Zn)
F=280kgf

Gráfico CA (chapas com Zn)
F=280kgf

Figura 5.27- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA com chapas sem revestimento (a) e revestidas com zinco (b), com força constante de 280 kgf.

Gráfico CA (chapas sem Zn)
F=330kgf

Gráfico CA (chapas com Zn)
F=330kgf

Figura 5.28- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA com chapas sem revestimento (a) e revestidas com zinco (b), com força constante de 330 kgf.

Pode-se notar na tabela 5.9 que os diagramas de soldabilidade em CA com chapas revestidas com Zn apresentam-se deslocados em regiões com valores de corrente de soldagem 9,5% maiores em comparação aos diagramas de CA com chapas sem revestimento.

Tabela 5.9 – Desvio padrão (S) e coeficiente de variação (C.V) com forças constantes entre CA com chapas revestidas com Zn e sem revestimento.

	Força = 180 kgf		Força = 230 kgf		Força = 280 kgf		Força = 330 kgf	
Tempo(ms)	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)
100	0,269	4,0	0,335	4,9	0,374	5,3	0,245	3,2
150	0,300	4,9	0,458	7,1	0,502	7,5	0,300	4,1
200	0,300	5,1	0,458	7,5	0,547	8,6	0,335	4,7
250	0,300	5,2	0,415	6,9	0,593	9,5	0,335	4,8

Este fato é devido o revestimento de Zn ter menor resistência a passagem da corrente. Necessitando, portanto maiores níveis de corrente para realizar a soldagem com os mesmos parâmetros fixados. Observa-se também que as áreas dos diagramas de soldabilidade em CA em chapas sem revestimento apresentam-se em média 11% maiores se comparadas aos diagramas de CA em chapas com revestimento de Zn.

Em relação aos diâmetros dos pontos apresentados nos limites mínimos e máximos de correntes nos diagramas de CA em chapas com e sem revestimento de Zn. Pode-se observar que na soldagem em CA com revestimento de Zn os diâmetros dos pontos apresentam-se em média maiores 3% nos limites mínimos e 2,8% menores nos limites máximos. Nota-se que apesar da soldagem em CA com revestimento necessitar de maiores níveis de corrente os diâmetros dos pontos apresentaram-se em média com aproximadamente mesmas dimensões.

Em relação aos valores das forças dos testes de tração de cisalhamento para os pontos de solda nos limites mínimos e máximos de corrente. Nota-se que as forças de tração em CA com chapas sem revestimento de Zn apresentaram-se em média 9,7% maiores nos limites mínimos e 17,8% maiores nos limites máximos. Este fato está relacionado com a maior dureza apresentada na região da ZAC em chapas sem revestimento.

5.3.1.1 Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn):

A figura 5.29 apresenta a comparação entre as áreas comuns resultantes dos diagramas de soldabilidade com força constante de 180, 230, 280 e 330 kgf em CA com chapas revestidas e não revestidas de Zn.

Figura 5.29- Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) com chapas sem revestimento (a) e revestidas com zinco (b).

Observa-se que a área comum dos diagramas de soldabilidade em CA com chapas revestidas de Zn apresenta-se 11% maior se comparada com a área comum dos diagramas de soldabilidade em CA sem revestimento. Portanto, é possível notar que a soldagem em CA com revestimento apresenta-se com menor sensibilidade as mudanças do parâmetro força, se comparadas com a soldagem em CA em chapas não revestidas de Zn, com os mesmos parâmetros.

Ainda, pela análise da figura 5.29, é possível observar também que o diagrama de soldabilidade resultante em CA com chapas revestidas com Zn apresenta-se deslocado numa região com magnitudes de correntes 5.4% maiores se comparado com o diagrama de soldabilidade resultante em CA em chapas não revestidas. Este resultado está relacionado com o revestimento de Zn ter menor resistência a passagem da corrente. Necessitando portanto de maiores níveis de corrente para realizar a soldagem com os mesmos parâmetros. A tabela 5.10 mostra as áreas dos diagramas de soldabilidade com força constante entre CA com chapas revestidas e não revestidas com Zn e as respectivas áreas comuns resultantes.

Tabela 5.10 - Áreas dos diagramas de soldabilidade com força constante em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn) e as respectivas áreas comuns resultantes.

	Área (u.a)				
Força (kgf)	180	230	280	330	Área comum
CA sem Zn	181,8	451,3	429,2	375,1	135,1
CA com Zn	224,2	393,6	344,9	314,9	188,1

5.3.2 Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn):

As figuras 5.30 a 5.33 mostram as comparações entre os diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA com chapas revestidas e não revestidas com Zn. Para a determinação dos diagramas de soldabilidade foi pré-estabelecida um tempo constante de 100, 150, 200 e 250 ms.

Figura 5.30- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA com chapas sem revestimento (a) e revestidas com zinco (b), com tempo constante de 100 ms.

Figura 5.31- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA com chapas sem revestimento (a) e revestidas com zinco (b), com tempo constante de 150 ms.

Figura 5.32- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA com chapas sem revestimento (a) e revestidas com zinco (b), com tempo constante de 200 ms.

Figura 5.33- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA com chapas sem revestimento (a) e revestidas com zinco (b), com tempo constante de 250 ms.

Pode-se notar na tabela 5.11 que os diagramas de soldabilidade em CA com chapas com revestimento de Zn apresentam-se deslocados em regiões com valores de corrente de soldagem no máximo 9,5% maiores no coeficiente de variação em comparação aos diagramas de CA sem revestimento.

Tabela 5.11 – Desvio padrão (S) e coeficiente de variação (C.V) com tempos constantes entre CA com chapas revestidas com Zn e sem revestimento.

	Tempo = 100 ms		Tempo = 150 ms		Tempo = 200 ms		Tempo = 250 ms	
Força (kgf)	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)
180	0,269	4,0	0,300	4,9	0,300	5,1	0,300	5,2
230	0,335	4,9	0,458	7,1	0,458	7,1	0,415	6,9
280	0,374	5,3	0,502	7,5	0,547	8,7	0,593	9,5
330	0,245	3,2	0,300	4,1	0,335	4,7	0,335	4,8

Este resultado está relacionado com o revestimento de Zn ter menor resistência a passagem da corrente. Necessitando, portanto de maiores níveis de corrente para realizar a soldagem com os mesmos parâmetros. Nota-se também que as áreas dos diagramas de soldabilidade em CA com chapas sem revestimento apresentam-se apenas em média 1,3% maiores se comparadas aos diagramas de CA com chapas revestidas de Zn. Pode-se notar um comportamento similar durante a soldagem em CA em chapas revestidas com Zn e sem revestimento, com os mesmos parâmetros.

Em relação aos diâmetros dos pontos apresentados nos limites mínimos e máximos de correntes nos diagramas de CA em chapas com e sem revestimento de Zn. Pode-se observar que na soldagem em CA com revestimento de Zn os diâmetros dos pontos apresentam-se em média maiores 0,3% nos limites mínimos e 2,5% menores nos limites máximos. Nota-se que apesar da soldagem em CA com revestimento necessitar de maiores níveis de corrente os diâmetros dos pontos apresentaram-se em média com aproximadamente mesmas dimensões.

Em relação aos valores das forças dos testes de tração de cisalhamento para os pontos de solda nos limites mínimos e máximos de corrente. Observa-se que as forças de tração em CA com chapas sem revestimento de Zn apresentaram-se em média 16,4% maiores nos limites mínimos e 13,4%

maiores nos limites máximos. Este fato está relacionado com a maior dureza apresentada na região da ZAC em chapas sem revestimento.

5.3.2.1 Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn):

A figura 5.34 apresenta a comparação entre as áreas comuns resultantes dos diagramas de soldabilidade com tempo constante de 100, 150, 200 e 250 ms em CA com chapas revestidas e não revestidas de Zn.

Figura 5.34- Áreas comuns dos diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CA com chapas sem revestimento (a) e revestidas com zinco (b).

Nota-se que a área comum dos diagramas de soldabilidade em CA com chapas com revestimento de Zn apresenta-se 42,5% maior se comparada com a área comum dos diagramas de soldabilidade em CA sem revestimento. Portanto, a soldagem em CA com revestimento de Zn apresenta-se com menor sensibilidade as mudanças do tempo, se comparadas com a soldagem em CA em chapas não revestidas de Zn, com os mesmos parâmetros.

Ainda, pela análise da figura 5.34, é possível observar também que o diagrama de soldabilidade resultante em CA com chapas revestidas com Zn apresenta-se deslocado numa região com magnitudes de correntes 6,2% maiores se comparado com o diagrama de soldabilidade resultante em CA em chapas não revestidas. Este resultado está relacionado com o revestimento de Zn ter menor resistência a passagem da corrente. Necessitando, portanto de maiores níveis de corrente para realizar a soldagem com os mesmos parâmetros. A tabela 5.12 mostra as áreas dos diagramas de soldabilidade com tempo constante entre CA com chapas revestidas e não revestidas com Zn e as respectivas áreas comuns resultantes.

Tabela 5.12 - Áreas dos diagramas de soldabilidade com tempo constante em CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn) e as respectivas áreas comuns resultantes.

	Área (u.a)				
Tempo (ms)	100	150	200	250	Área comum
CA sem Zn	299,5	337,5	363,8	373,3	117,1
CA com Zn	284,5	312,7	375,7	388,1	203,9

5.3.3 Diagramas de soldabilidade em terceira dimensão (força, tempo e corrente) CA com chapas revestidas e não revestidas (Zn):

Na figura 5.35 apresenta a comparação dos volumes dos diagramas de soldabilidade em 3D em CA com chapas revestidas e não revestidas de Zn. Gerados a partir das áreas resultantes de tempo versus corrente e força versus corrente, com a finalidade de integrar os três parâmetros de soldagem (força,

tempo e corrente) a fim de determinar um parâmetro otimizado, ou seja, o ponto ótimo para ambos os volumes.

V= 1439,1 u.a

V= 3484,1 u.a

Figura 5.35- Diagramas de soldabilidade em terceira dimensão (força, tempo e corrente) em CA com chapas sem revestimento (a) e revestidas com zinco (b).

Pode-se observar que o volume do diagrama de soldabilidade em CA em chapas com revestimento de Zn apresenta-se 58,7% maior se comparado

ao volume do diagrama de soldabilidade em CA em chapas não revestidas. Esta diferença está relacionada com o fato das áreas resultantes tanto de força versus corrente como tempo versus correntes em CA em chapas com Zn apresentaram-se com menores deslocamentos nos diagramas de soldabilidade nos eixos das correntes. Este fato é devido que na soldagem em CA com chapas revestidas com Zn apresenta-se com menor sensibilidade nas mudanças de parâmetros se comparadas com a soldagem em CA sem revestimento de Zn.

Na figura 5.36 apresenta as vistas frontais dos volumes dos diagramas de soldabilidade em CA com revestimento e sem revestimento de Zn. E também apresenta os cortes (C-C) e (D-D), gerados nas maiores áreas encontradas nos respectivos volumes. Após os cortes feitos, localiza-se um ponto de maior grau de liberdade dentro das áreas, para a determinação dos parâmetros otimizados.

Figura 5.36- Vistas frontais dos volumes dos diagramas de soldabilidade em CA com revestimento e sem revestimento de Zn e os cortes (C-C) e (D-D).

Nota-se que a área do corte C-C do volume do diagrama de soldabilidade com CA em chapas revestidas com Zn, apresenta-se 53,7% maior se comparada com o corte D-D do volume do diagrama de soldabilidade com CA em chapas não revestidas. Este resultado está relacionado com o maior volume do diagrama de soldabilidade com CA em chapas revestidas de Zn, devido sua à menor sensibilidade nas mudanças de parâmetros se comparadas com a soldagem em CA em chapas não revestidas.

Os parâmetros otimizados encontrados (corte C-C) para a soldagem em CA em chapas revestidas com Zn foram: Força de 260 kgf; tempo: 10 ciclos (167 ms) e corrente: 7,4 kA.

Os parâmetros otimizados encontrados (corte D-D) para a soldagem em CA em chapas sem Zn foram: Força: 260 kgf; tempo: 11 ciclos (183 ms) e corrente: 7,0 kA.

5.4 Diagramas de soldabilidade em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn):

As figuras 5.37 a 5.48 mostram as comparações entre os diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) e (força versus corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn).

5.4.1 Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn):

As figuras 5.37 a 5.40 mostram as comparações entre os diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas com Zn. Para a determinação dos diagramas de soldabilidade foi pré-estabelecida uma força constante de 180, 230, 280 e 330 kgf

Gráfico CC (chapas sem Zn)
F=180kgf

Gráfico CC (chapas com Zn)
F=180kgf

Figura 5.37- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CC com chapas sem revestimento (a) e revestidas com zinco (b), com tempo constante de 180 kgf.

Gráfico CC (chapas sem Zn)
F=230kgf

Gráfico CC (chapas com Zn)
F=230kgf

Figura 5.38- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CC com chapas sem revestimento (a) e revestidas com zinco (b), com tempo constante de 230 kgf.

Gráfico CC (chapas sem Zn)
F=280kgf

Gráfico CC (chapas com Zn)
F=280kgf

Figura 5.39- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CC com chapas sem revestimento (a) e revestidas com zinco (b), com tempo constante de 280 kgf.

Gráfico CC (chapas sem Zn)
F=330kgf

Gráfico CC (chapas com Zn)
F=330kgf

Figura 5.40- Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CC com chapas sem revestimento (a) e revestidas com zinco (b), com tempo constante de 330 kgf.

Pode-se observar na tabela 5.13 que os diagramas de soldabilidade em CC com chapas revestidas com Zn apresentam-se deslocados em regiões com valores de corrente de soldagem no máximo 9,4% maiores no coeficiente de variação em comparação aos diagramas de CC com chapas sem revestimento.

Tabela 5.13 – Desvio padrão (S) e coeficiente de variação (C.V) com forças constantes entre CC com chapas revestidas com Zn e sem revestimento.

Tempo(ms)	Força = 180 kgf		Força = 230 kgf		Força = 280 kgf		Força = 330 kgf	
	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)
100	0,120	3,7	0,269	4,6	0,374	5,8	0,547	9,4
150	0,245	5,1	0,245	4,4	0,269	4,4	0,374	6,5
200	0,245	5,4	0,245	4,5	0,229	3,9	0,269	4,7
250	0,245	5,6	0,229	4,2	0,245	4,3	0,223	3,9

Este fato é devido que o revestimento de Zn ter menor resistência a passagem da corrente. Necessitando, portanto maiores níveis de corrente para realizar a soldagem com os mesmos parâmetros. Nota-se também que as áreas dos diagramas de soldabilidade em CC em chapas sem revestimento apresentam-se em média 6,2% maiores se comparadas aos diagramas de CC em chapas com revestimento de Zn.

Em relação aos diâmetros dos pontos apresentados nos limites mínimos e máximos de correntes nos diagramas de CC em chapas com e sem revestimento de Zn. Pode-se observar que na soldagem em CC com revestimento de Zn os diâmetros dos pontos apresentam-se em média maiores 3% nos limites mínimos e 3,4% menores nos limites máximos. Nota-se que apesar da soldagem em CC com revestimento necessitar de maiores níveis de corrente os diâmetros dos pontos apresentaram-se em média com aproximadamente mesmas dimensões.

Em relação aos valores das forças dos testes de tração de cisalhamento para os pontos de solda nos limites mínimos e máximos de corrente. Observa-se que as forças de tração em CC com chapas sem revestimento de Zn apresentaram-se em média 15,4% maiores nos limites mínimos e 10,3% maiores nos limites máximos. Este fato está relacionado com a maior dureza apresentada na região da ZAC em chapas sem revestimento.

5.4.1.1 Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn):

A figura 5.41 apresenta a comparação entre as áreas comuns resultantes dos diagramas de soldabilidade com força constante de 180, 230, 280 e 330 kgf em CA com chapas revestidas e não revestidas de Zn.

Figura 5.41- Áreas comuns dos diagramas de soldabilidade (tempo versus corrente) em CC com chapas sem revestimento (a) e revestidas com zinco (b).

Nota-se que a área comum dos diagramas de soldabilidade em CC com chapas não revestidas de Zn apresenta-se 52,8% maior se comparada com a área comum dos diagramas de soldabilidade em CC com revestimento. Portanto, é possível observar que a soldagem em CC sem revestimento apresenta-se com menor sensibilidade as mudanças de força, se comparadas com a soldagem em CC em chapas não revestidas de Zn, com os mesmos parâmetros.

Ainda, pela análise da figura 5.41, é possível notar também que o diagrama de soldabilidade resultante em CC com chapas revestidas com Zn apresenta-se deslocado numa região com magnitudes de correntes 9,2% maiores se comparado com o diagrama de soldabilidade resultante em CC em chapas não revestidas. Este resultado está relacionado com o revestimento de Zn ter menor resistência a passagem da corrente. Necessitando portanto, de maiores níveis de corrente para realizar a soldagem com os mesmos parâmetros.

A tabela 5.14 mostra as áreas dos diagramas de soldabilidade com força constante entre CC com chapas revestidas e não revestidas com Zn e as respectivas áreas comuns resultantes.

Tabela 5.14- Áreas dos diagramas de soldabilidade com força constante em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn) e as respectivas áreas comuns resultantes.

	Área (u.a)				
Força (kgf)	180	230	280	330	Área comum
CC sem Zn	443,4	322,4	574,2	688,2	189,3
CC com Zn	425,9	374,8	502,4	599,8	89,3

5.4.2 Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn):

As figuras 5.42 a 5.45 mostram as comparações entre os diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas com Zn. Para a determinação dos diagramas de soldabilidade foi pré-estabelecida um tempo constante de 100, 150, 200 e 250 ms.

Figura 5.42- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CC com chapas sem revestimento (a) e revestidas com zinco (b), com tempo constante de 100 ms.

Figura 5.43- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CC com chapas sem revestimento (a) e revestidas com zinco (b), com tempo constante de 150 ms.

Figura 5.44- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CC com chapas sem revestimento (a) e revestidas com zinco (b), com tempo constante de 200 ms.

Figura 5.45- Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CC com chapas sem revestimento (a) e revestidas com zinco (b), com tempo constante de 250 ms.

Pode-se observar na tabela 5.15 que os diagramas de soldabilidade em CC com chapas com revestimento de Zn apresentam-se deslocados em regiões com valores de corrente de soldagem no máximo 9,4% maiores no coeficiente de variação em comparação aos diagramas de CC sem revestimento.

Tabela 5.15 – Desvio padrão (S) e coeficiente de variação (C.V) com tempos constantes entre CC com chapas revestidas com Zn e sem revestimento.

Força (kgf)	Tempo = 100 ms		Tempo = 150 ms		Tempo = 200 ms		Tempo = 250 ms	
	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)	S (kA)	C.V (%)
180	0,120	3,7	0,245	5,1	0,245	5,4	0,245	5,6
230	0,269	4,6	0,245	4,4	0,245	4,5	0,229	4,2
280	0,374	5,8	0,269	4,5	0,229	3,9	0,245	4,3
330	0,547	9,4	0,374	6,5	0,269	4,7	0,223	3,9

Nota-se também que as áreas dos diagramas de soldabilidade em CC com chapas sem revestimento apresentam-se em média 5,2% maiores se comparadas aos diagramas de CC com chapas revestidas de Zn. Este resultado está relacionado com o revestimento de Zn ter menor resistência a passagem da corrente. Necessitando portanto, de maiores níveis de corrente para realizar a soldagem com os mesmos parâmetros.

Em relação aos diâmetros dos pontos apresentados nos limites mínimos e máximos de correntes nos diagramas de CC em chapas com e sem revestimento de Zn. Pode-se observar que na soldagem em CC com revestimento de Zn os diâmetros dos pontos apresentam-se em média maiores 4,3% nos limites mínimos e 4,8% menores nos limites máximos.

Em relação aos valores das forças dos testes de tração de cisalhamento para os pontos de solda nos limites mínimos e máximos de corrente. Nota-se que as forças de tração em CA com chapas sem revestimento de Zn apresentaram-se em média 15% maiores nos limites mínimos e 20,7% maiores nos limites máximos. Este fato está relacionado com a maior dureza apresentada na região da ZAC em chapas sem revestimento.

5.4.2.1 Áreas comuns dos Diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn):

A figura 5.46 apresenta a comparação entre as áreas comuns resultantes dos diagramas de soldabilidade com tempo constante de 100, 150, 200 e 250 ms em CC com chapas revestidas e não revestidas de Zn.

Figura 5.46- Áreas comuns dos diagramas de soldabilidade (força versus corrente) em CC com chapas sem revestimento (a) e revestidas com zinco (b).

Observa-se que a área comum dos diagramas de soldabilidade em CC com chapas sem revestimento de Zn apresenta-se 14% maior se comparada com a área comum dos diagramas de soldabilidade em CC com revestimento. Portanto, a soldagem em CC sem revestimento de Zn apresenta-se com menor sensibilidade as mudanças do tempo, se comparadas com a soldagem em CC em chapas revestidas de Zn, com os mesmos parâmetros.

Ainda, pela análise da figura 5.46, é possível notar também que o diagrama de soldabilidade resultante em CA com chapas revestidas com Zn apresenta-se deslocado numa região com magnitudes de correntes 7,7% maiores se comparado com o diagrama de soldabilidade resultante em CC em chapas não revestidas. Este resultado está relacionado com o revestimento de Zn ter menor resistência a passagem da corrente. Necessitando, portanto de maiores níveis de corrente para realizar a soldagem com os mesmos parâmetros.

A tabela 5.16 mostra as áreas dos diagramas de soldabilidade com tempo constante entre CC com chapas revestidas e não revestidas com Zn e as respectivas áreas comuns resultantes.

Tabela 5.16 - Áreas dos diagramas de soldabilidade com tempo constante em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn) e as respectivas áreas comuns resultantes.

	Área (u.a)				
Tempo (ms)	100	150	200	250	Área comum
CC sem Zn	482,3	483,1	499,7	468,1	356,1
CC com Zn	447,3	445,5	463,4	476,3	306,5

5.4.3 Diagramas de soldabilidade em terceira dimensão (força, tempo e corrente) em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn):

Na figura 5.47 apresenta a comparação dos volumes dos diagramas de soldabilidade em 3D em CC com chapas revestidas e não revestidas de Zn.

Gerados a partir das áreas resultantes de tempo versus corrente e força versus corrente, com a finalidade de integrar os três parâmetros de soldagem

(força, tempo e corrente) a fim de determinar um parâmetro otimizado, ou seja, o ponto ótimo para ambos os volumes.

Figura 5.47- Diagramas de soldabilidade em terceira dimensão (força, tempo e corrente) em CC com chapas sem revestimento (a) e revestidas com zinco (b).

Pode-se observar que o volume do diagrama de soldabilidade em CC em chapas sem revestimento de Zn apresenta-se 65% maior se comparado ao volume do diagrama de soldabilidade em CC em chapas revestidas. Esta

diferença está relacionada com o fato das áreas resultantes tanto de força versus corrente como tempo versus correntes em CA em chapas com Zn apresentarem-se com menores deslocamentos nos diagramas de soldabilidade nos eixos das correntes. Este fato é devido que na soldagem em CC com chapas não revestidas com Zn apresenta-se com menor sensibilidade nas mudanças de parâmetros se comparadas com a soldagem em CC com revestimento de Zn.

Figura 5.48- Vistas frontais dos volumes dos diagramas de soldabilidade em CC com revestimento e sem revestimento de Zn e os cortes (A-A) e (B-B).

Na figura 5.48 apresenta as vistas frontais dos volumes dos diagramas de soldabilidade em CC com revestimento e sem revestimento de Zn. E também apresenta os cortes (A-A) e (B-B), gerados nas maiores áreas encontradas nos respectivos volumes. Após os cortes feitos, localiza-se um ponto de maior grau de liberdade dentro das áreas, para a determinação dos parâmetros otimizados.

Nota-se que a área do corte B-B do volume do diagrama de soldabilidade com CC em chapas não revestidas com Zn, apresenta-se 55,3% maior se comparada com o corte A-A do volume do diagrama de soldabilidade com CC em chapas revestidas. Este resultado está relacionado com o maior volume do diagrama de soldabilidade com CC em chapas não revestidas, devido sua menor sensibilidade nas mudanças de parâmetros se comparadas com a soldagem em CC em chapas revestidas.

Os parâmetros otimizados encontrados (corte A-A) para a soldagem em CC em chapas revestidas com Zn foram: Força de 270 kgf; tempo: 110 ms e corrente: 6,6 kA.

Os parâmetros otimizados encontrados (corte B-B) para a soldagem em CC em chapas sem Zn foram: Força: 250 kgf; tempo: 125 ms e corrente: 6,0 kA.

5.5 Análises das resistências e energias dinâmicas dos pontos ótimos:

5.5.1 Resistências e energias dinâmicas dos pontos ótimos em soldagem com CA e CC em chapas sem revestimento:

A partir dos cortes B-B e D-D foi encontrado o ponto ótimo para as soldagens das chapas não revestidas. Nestes pontos foram medidas as resistências dinâmicas para as duas condições. A figura 5.49 apresenta a comparação entre as resistências e energias dinâmicas dos pontos otimizados na soldagem com CA e CC em chapas sem revestimentos, bem como a tabela com os valores otimizados dos parâmetros de soldagem.

(a)

(b)

	Força	Tempo	Corrente
CA sem Zn (Corte D-D)	260 kgf	11 ciclos (183,3ms)	7kA
CC sem Zn (Corte B-B)	250 kgf	125 ms	6kA

Figura 5.49 – Resistências (a) e energias (b) dinâmicas dos pontos otimizados na soldagem em CA e CC de chapas sem revestimento.

Na figura 5.49 pode-se observar nas curvas de resistência dinâmica que os pontos ' α ' (1) estão no mesmo tempo, com o valor da resistência dinâmica maior para CA do que para CC. Da mesma maneira, os pontos ' β ' (2) estão praticamente no mesmo tempo, porém com resistência dinâmica maior para o equipamento de soldagem em CC. Isto significa que a energia gerada pelo efeito Joule é maior neste equipamento, produzindo um ponto em tempo menor. Da mesma maneira, a potência necessária para produzir o ponto é menor no equipamento de corrente CC, do que no equipamento de corrente alternada, indicando que, para este equipamento, a eficiência de geração de calor pelo efeito Joule é maior.

5.5.2 Resistências e energias dinâmicas dos pontos ótimos em soldagem com CA e CC de chapas com revestimento (Zn):

A partir dos cortes A-A e C-C foi encontrado o ponto ótimo para as soldagens das chapas não revestidas. Nestes pontos foram medidas as resistências dinâmicas para as duas condições. A figura 5.50 apresenta a comparação entre as resistências e energias dinâmicas dos pontos otimizados na soldagem com CA e CC de chapas com revestimento de Zn, bem como a tabela com os valores otimizados dos parâmetros de soldagem.

Na figura 5.50 pode-se observar nas curvas de resistência dinâmica que os pontos ' α ' estão praticamente no mesmo tempo, com os valores das resistências dinâmicas praticamente iguais. Da mesma maneira, os pontos ' β ' estão praticamente no mesmo tempo, porém com resistência dinâmica maior para o equipamento de soldagem em CC. Nesta figura é interessante observar que existem dois pontos de máximo (2) e dois pontos de mínimo (3), que ocorrem praticamente em tempos iguais. Isto mostra que ocorre primeiro a fusão e vaporização do Zn antes da fusão do aço, para um tempo de 17 ms. Estes resultados estão de acordo com a figura 3.12, uma vez que o Zn apresenta uma menor resistividade que o Fe.

	Força	Tempo	Corrente
CA com Zn (Corte C-C)	260 kgf	10 ciclos (166,7ms)	7,4kA
CC com Zn (Corte A-A)	270 kgf	110 ms	6,6kA

Figura 5.50 – Resistências (a) e energias (b) dinâmicas dos pontos otimizados na soldagem em CA e CC de chapas revestidas com Zn.

A figura 5.51 ilustra a queima do Zn, representado nos estágios 2 e 3, mostrado no gráfico de resistência dinâmica. Observa-se no desenho esquemático que o revestimento de Zn preenche toda a rugosidade do material. Este preenchimento nos vales e picos da rugosidade do material de base não permite uma deformação por completo da rugosidade. Após a queima do Zn, os picos e vales da rugosidade do material de base se encontram e acontece o colapso das rugosidades. Este colapso aumenta a área de contato diminuindo a resistência dinâmica, como mostra o gráfico da figura 5.50. Nota-se também que a queima do Zn durante o processo de soldagem, não afeta a formação do ponto de solda.

Em relação à comparação dos valores das energias dinâmicas dos pontos otimizados em CA e CC. Nota-se que a energia dinâmica total durante a soldagem em CC apresenta-se 30,5% menor se comparada com a energia dinâmica total do ponto otimizado em CA. Este resultado está relacionado com a maior eficiência em gerar calor na soldagem em CC se comparada à soldagem em CA.

Figura 5.51 – Desenho esquemático da queima do Zn (estágios 2 e 3 do gráfico da resistência dinâmica da figura 5.50).

5.5.3 Resistências e energias dinâmicas dos pontos ótimos em soldagem com CA em chapas revestidas e não revestidas (Zn):

A figura 5.52 apresenta a comparação entre as resistências e energias dinâmicas dos pontos otimizados na soldagem com CA de chapas sem revestimentos e revestidas com Zn bem como a tabela com os valores otimizados dos parâmetros de soldagem.

	Força	Tempo	Corrente
CA sem Zn (Corte D-D)	260 kgf	11 ciclos	7 kA
CA com Zn (Corte C-C)	260 kgf	10 ciclos	7,4 kA

Figura 5.52 – Resistências (a) e energias (b) dinâmicas dos pontos otimizados na soldagem em CA de chapas revestidas com Zn e não revestidas.

Pode-se observar na figura 5.52 que a resistência dinâmica durante a soldagem em CA em chapas sem revestimento apresenta-se maior se comparada com a resistência dinâmica em CA em chapas revestidas com Zn. Este resultado está relacionado com o fato do revestimento de Zn ter menor resistência a passagem da corrente, necessitando portanto, de correntes mais elevadas para compensar a menor resistência elétrica do revestimento de Zn. É possível notar também que a formação do ponto de solda em CA com chapas revestidas de Zn começa em tempos maiores, aproximadamente um ciclo e meio, após a formação do ponto em chapas não revestidas, conforme mostra os estágios 1 e 2 da figura 5.52. Este fato está relacionado com a queima do Zn durante o processo de soldagem.

Em relação à comparação dos valores das energias dinâmicas dos pontos otimizados em CA de chapa revestidas de Zn e não revestidas. Nota-se que a energia dinâmica total durante a soldagem em CA de chapas não revestidas apresenta-se 31% maior se comparada com a energia dinâmica total do ponto otimizado em CA com chapas revestidas com Zn. Este resultado está relacionado com a maior eficiência em gerar calor na soldagem em CA com chapas não revestidas de Zn. Isto é devido a resistência à passagem da corrente, que é menor nas interfaces das chapas revestidas com Zn. Este fato faz com que o efeito Joule nas interfaces das chapas com revestimento de Zn seja de magnitude menor em comparação a soldagem em chapas não revestidas.

5.5.4 Resistências e energias dinâmicas dos pontos ótimos em CC com chapas revestidas e não revestidas (Zn):

A figura 5.53 apresenta a comparação entre as resistências e energias dinâmicas dos pontos otimizados na soldagem com CC de chapas sem revestimentos e revestidas com Zn, bem como a tabela com os valores otimizados dos parâmetros de soldagem.

	Força	Tempo	Corrente
CC sem Zn (Corte B-B)	250 kgf	125 ms	6 kA
CC com Zn (Corte A-A)	270 kgf	110 ms	6,6 kA

Figura 5.53 – Resistências (a) e energias (b) dinâmicas dos pontos otimizados na soldagem em CC de chapas revestidas com Zn e não revestidas.

Pode-se observar que a resistência dinâmica durante a soldagem em CC em chapas sem revestimento apresenta-se em média 29,8% maior se comparada com a resistências dinâmica em CC em chapas revestidas com Zn. Este resultado está relacionado com o fato do revestimento de Zn ter menor resistência a passagem da corrente. Necessitando portanto, de maiores níveis de correntes para compensar a menor resitência elétrica do revestimento de Zn. É possível notar também que a formação do ponto de solda em CC com chapas revestidas de Zn começa com maior magnitude de tempo, com aproximadamente um ciclo e meio após a formação do ponto em chapas não revestidas, conforme mostram os estágios 1 e 2 da figura 5.53. Este fato está relacionado com a queima do Zn durante o processo de soldagem.

Em relação a comparação dos valores das energias dinâmicas dos pontos otimizados em CC de chapa revestidas de Zn e não revestidas. Nota-se que a energia dinâmica total durante a soldagem em CC de chapas não revestidas apresenta-se 18,6% maior se comparada com a energia dinâmica total do ponto otimizado em CA com chapas revestidas com Zn. Este resultado está relacionado com a maior eficiência em gerar calor na soldagem em CC com chapas não revestidas de Zn. Isto é devido que nas interfaces das chapas revestidas com Zn a resistência a passagem da corrente é menor. Este fato faz com que o efeito Joule nas interfaces das chapas com revestimento de Zn seja de magnitude menor em comparação a soldagem em chapas não revestidas.

5.6 Análise da correlação entre resistência elétrica de contato versus rugosidade superficial de chapas com revestimento de Zn e chapas sem revestimento:

A título de comparação foi medida a resistência de contato aplicando-se uma força constante de 260 kgf entre os eletrodos em chapas sem revestimentos e revestidas com Zn, para verificar as diferenças entre as duas condições. Para tanto foram medidas as rugosidades superficiais no local do ponto, das faces em contato com o eletrodo e em contato entre si. Os resultados estão apresentados na figura 5.54.

Na figura 5.54, nota-se que as rugosidades na linha de ação da força entre os eletrodos apresentam-se menores se comparada com as rugosidades fora da linha de ação da força. Este fato é devido ao colapso dos picos da rugosidade nestas regiões.

Figura 5.54- Exemplo das rugosidades superficiais dentro e fora da linha de ação da força entre os eletrodos (força de fechamento dos eletrodos de 260 kgf).

A figura 5.55 apresenta o gráfico da resistência elétrica de contato versus rugosidade superficial dentro do ponto (força constante de 260kgf) em chapas revestidas com Zn e sem revestimento.

Figura 5.55- Gráfico da resistência elétrica de contato versus rugosidade superficial (R_z) dentro do ponto (força constante de 260kgf), de chapas revestidas com Zn e sem revestimento.

Pode-se observar no gráfico da figura 5.55 que a resistência elétrica de contato aumenta com o aumento da rugosidade superficial dentro do ponto. Este fato é devido à dificuldade da passagem da corrente elétrica que, com o aumento da rugosidade, diminuem os micros contatos elétricos.

A tabela 5.17 apresenta a comparação das rugosidades superficiais fora e dentro do ponto de chapas revestidas com Zn e sem revestimento. Nota-se que as médias ($\bar{X}$) das rugosidades superficiais das chapas com revestimento de Zn fora e dentro do ponto, apresentam-se maiores se comparadas com as médias das rugosidades superficiais fora e dentro do ponto em chapas sem revestimento. Apesar disso, as rugosidades superficiais tanto fora como dentro do ponto apresentam um coeficiente de variação (C.V) e desvio padrão (S) maior em chapas sem revestimento.

Tabela 5.17 - Comparação das rugosidades superficiais fora e dentro do ponto de chapas revestidas com Zn e sem revestimento.

	Rugosidade Fora do Ponto Rz (μm)		Rugosidade Dentro do Ponto Rz (μm)	
	Chapas sem Zn	Chapas com Zn	Chapas sem Zn	Chapas com Zn
X	3,526 μm	4,066 μm	3,156 μm	3,374 μm
S	0,475 μm	0,3626 μm	0,549 μm	0,504 μm
C.V	13,5 %	8,9 %	17,4 %	14,9 %

Ainda pela análise da tabela 5.17, mostra um coeficiente de variação da rugosidade dentro do ponto em chapas sem revestimento 2,5% maiores se comparadas com chapas revestidas com Zn. Apesar deste fato, os diâmetros dos pontos em chapas sem revestimento durante os experimentos apresentaram um coeficiente de variação de apenas 0,35% maior se comparadas com chapas com revestimento de Zn, conforme mostra a tabela 5.18.

Tabela 5.18 - Média (X), desvio padrão (S) e coeficiente de variação dos diâmetros dos pontos durante os experimentos.

	Diâmetros dos Pontos	
	Chapas sem Zn	Chapas com Zn
X	3,84 mm	3,78 mm
S	0,45 mm	0,43 mm
C.V	11,72 %	11,37 %

A tabela 5.19 mostra a comparação das resistências elétricas de contato dentro do ponto em chapas revestidas com Zn e sem revestimento. Observa-se que a média (X) da resistência elétrica de contato em chapas sem revestimento apresenta-se 52% maior se comparada com a média da resistência elétrica de contato em chapas não revestidas. Este fato está relacionado com a menor resistência a passagem da corrente elétrica no revestimento de Zn.

Tabela 5.19 - Comparação das resistências elétricas de contato dentro do ponto em chapas revestidas com Zn e sem revestimento.

	Resistência de Contato ($\mu\Omega$)	
	Chapas sem Zn	Chapas com Zn
X	229,37 $\mu\Omega$	109,87 $\mu\Omega$
S	25,28 $\mu\Omega$	5,16 $\mu\Omega$
C.V.	11 %	4,69 %

Ainda pela análise da tabela 5.19, é possível observar que o coeficiente de variação (C.V) e o desvio padrão (S) da resistência elétrica de contato em

chapas sem revestimento, apresenta-se maior se comparada com chapas revestidas com Zn. Este resultado está relacionado com os coeficientes de variação de rugosidade maiores observadas em chapas sem revestimento, tanto fora como dentro do ponto.

5.7 Dimensões (macrografia) e resistência mecânica (ensaio de tração) do ponto ótimo:

De acordo com a norma o diâmetro mínimo para o ponto de solda ser aprovado para a espessura de chapa de 0,8mm é de 3,1mm e a força mínima para o ensaio de tração é de 230kgf. A figura 5.56 apresenta as dimensões dos pontos de solda otimizados coletados através das macrografias.

Figura 5.56- Dimensões dos pontos de solda otimizados coletados através das macrografias.

5.7.1 Comparação das dimensões e resistência mecânica do ponto ótimo em CA e CC sem revestimento:

A figura 5.57 apresenta as dimensões coletadas através de macrografias e os gráficos das resistências mecânicas feita por ensaios de tração dos pontos otimizados, na soldagem em CA e CC com chapas sem revestimento.

	d (mm)	p (mm)	ind. (mm)	Tração (kgf)	Parâmetros de Soldagem		
					F (kgf)	t (ms)	I (kA)
CA sem Zn	4,5	0,9	1,2	496	260	183,3	7.0
CC sem Zn	3,7	1,1	1,3	448	250	125	6.0

(a)

(b)

Figura 5.57 – Dimensões das macrografias (a); fotos e gráficos dos ensaios por tração (b); dos pontos ótimos na soldagem em CA e CC em chapas sem revestimento.

Pode-se observar que na soldagem em CA em chapas sem revestimento, o diâmetro do ponto de solda apresenta-se maior se comparado com o diâmetro de soldagem em CC em chapas sem revestimento. Estes resultados estão relacionados com a maior corrente de soldagem do ponto otimizado em CA. Nota-se que apesar da soldagem em CC ter maior eficiência em gerar calor se comparada com a soldagem em CA, este fato não foi o suficiente para superar a magnitude da energia dinâmica da soldagem do ponto otimizado em CA em chapas sem revestimento.

Nota-se também, que a força do ensaio de tração e o alongamento na soldagem em CA em chapas sem revestimento apresenta-se maior se comparada com a soldagem em CC em chapas sem revestimento. A explicação para este fato é que o diâmetro do ponto otimizado em CA apresenta-se maior em comparação ao ponto otimizado na soldagem em CC em chapas sem revestimento.

5.7.2 Comparação das dimensões e resistência mecânica do ponto ótimo em CA e CC com revestimento de Zn:

A figura 5.58 apresenta as dimensões coletadas através de macrografias e os gráficos das resistências mecânicas feita por ensaios de tração dos pontos otimizados, na soldagem em CA e CC em chapas com revestimento de Zn.

Pode-se observar que na soldagem em CA em chapas com revestimento de Zn, o diâmetro do ponto de solda apresenta-se maior se comparadas com a soldagem em CC em chapas com revestimento de Zn. Estes resultados estão relacionados com a maior corrente de soldagem do ponto otimizado em CA. Nota-se que apesar da soldagem em CC ter maior eficiência em gerar calor se comparada com a soldagem em CA, este fato não foi o suficiente para compensar a maior magnitude da energia dinâmica de soldagem do ponto otimizado em CA em chapas com revestimento de Zn.

	d (mm)	p (mm)	ind. (mm)	Tração (kgf)	Parâmetros de Soldagem		
					F (kgf)	t (ms)	I (kA)
CA com Zn	4,1	0,95	1,2	364	260	166,7	7,4
CC com Zn	3,5	0,9	1,2	346	270	110	6,6

(a)

(b)

Figura 5.58- Dimensões das macrografias (a) e os gráficos das resistências mecânicas (b) dos pontos ótimos na soldagem em CA e CC em chapas com revestimento de Zn.

Nota-se também, que a força do ensaio de tração e o alongamento na soldagem em CA em chapas com revestimento de Zn apresenta-se maior se comparada com a soldagem em CC em chapas com revestimento de Zn. A explicação para este fato é que o diâmetro do ponto otimizado em CA apresenta-se maior em comparação ao ponto otimizado na soldagem em CC em chapas sem revestimento.

5.7.3 Comparação das dimensões e resistência mecânica do ponto ótimo em CA com revestimento de Zn e sem revestimento:

A figura 5.59 apresenta as dimensões coletadas através de macrografias e os gráficos das resistências mecânicas feita por ensaios de tração dos pontos otimizados, na soldagem em CA em chapas revestidas e não revestidas com Zn.

Pode-se observar que na soldagem em CA em chapas sem revestimento, o diâmetro do ponto de solda apresenta-se maior se comparado com a soldagem em CA em chapas com revestimento de Zn. Nota-se também, que a força do ensaio de tração e o alongamento na soldagem em CA em chapas sem revestimento apresenta-se maior se comparada com a soldagem em CA em chapas com revestimento de Zn. A explicação para este fato é que o diâmetro do ponto otimizado na soldagem em CA sem revestimento apresenta-se maior em comparação ao ponto otimizado na soldagem em CA em chapas revestidas com Zn, devido o revestimento de Zn ter menor resistência a passagem da corrente elétrica. Além deste fato, a dureza na ZAC em chapas sem revestimento apresentaram-se com maiores durezas se comparadas com chapas revestidas com Zn.

	d (mm)	p (mm)	ind. (mm)	Tração (kgf)	Parâmetros de Soldagem		
					F (kgf)	t (ms)	I (kA)
CA com Zn	4,1	0,95	1,2	364	260	166,7	7,4
CA sem Zn	4,5	0,9	1,2	496	260	183,3	7,0

(a)

(b)

Figura 5.59 – Dimensões das macrografias (a) e os gráficos das resistências mecânicas (b) dos pontos ótimos na soldagem em CA em chapas com revestimento de Zn e sem revestimento.

5.7.4 Comparação das dimensões e resistência mecânica do ponto ótimo em CC com revestimento de Zn e sem revestimento:

A figura 5.60 apresenta as dimensões coletadas através de macrografias e os gráficos das resistências mecânicas feita por ensaios de tração dos pontos otimizados, na soldagem em CC em chapas revestidas e não revestidas com Zn.

Figura 5.60 – Dimensões das macrografias (a) e os gráficos das resistências mecânicas (b) dos pontos ótimos na soldagem em CC em chapas com revestimento de Zn e sem revestimento.

Pode-se observar que na soldagem em CC em chapas sem revestimento, o diâmetro do ponto de solda apresenta-se maior se comparada com a soldagem em CC em chapas com revestimento de Zn. Nota-se também, que a força do ensaio de tração e o alongamento na soldagem em CC em chapas sem revestimento apresenta-se maior se comparada com a soldagem em CC em chapas com revestimento de Zn. A explicação para este fato é que o diâmetro do ponto otimizado na soldagem em CC sem revestimento apresenta-se maior em comparação ao ponto otimizado na soldagem em CA em chapas revestidas com Zn, devido o revestimento de Zn ter menor resistência a passagem da corrente elétrica. Além deste fato, a dureza na ZAC em chapas sem revestimento apresentaram-se com maiores durezas se comparadas com chapas revestidas com Zn.

5.8 Comparação das micro-durezas dos pontos de solda em chapas revestidas com Zn e sem revestimento:

A figura 5.61 apresenta a distribuição da micro-dureza Vickers (HV) em diferentes regiões no ponto de solda, em chapas revestidas com Zn e sem revestimento.

Pode-se observar que as micro-durezas no ponto de solda em chapas sem revestimento e revestidas com Zn, apresentam um gradiente de distribuição decrescente do centro do ponto de solda ao material de base. Nota-se que na região do material de base em chapas sem revestimento apresenta-se em média 20,4% maior se comparadas com chapas revestidas com Zn. Na região afetada pelo calor (ZAC) em chapas sem revestimento apresenta-se em média 38,2% maior se comparadas com chapas revestidas com Zn. É possível notar também que a dureza no ponto de solda, na região da massa fundida, em chapas sem revestimento, apresenta-se em média 51,3% maior em comparação com o ponto de solda em chapas revestidas com Zn.

Figura 5.61 – Gráfico das micro-durezas (Vickers HV) em diferentes regiões no ponto de solda, em chapas revestidas com Zn e sem revestimento.

6. CONCLUSÕES:

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

1. Os valores de correntes na soldagem em chapas revestidas e não revestidas com Zn, apresentaram-se menores em CC, nas mesmas condições e parâmetros se comparadas à soldagem em CA, pode-se concluir que a soldagem em CC é mais eficiente na geração de calor.
2. Os diagramas de soldabilidade tanto em CA quanto em CC, apresentaram-se deslocados em regiões com valores maiores de correntes de soldagem em chapas com revestimento de Zn, quando comparadas com chapas não revestidas. Pode-se concluir que é devido a menor resistência a passagem da corrente elétrica do Zn (menor resistividade).
3. As áreas dos diagramas de soldabilidade em chapas não revestidas e revestidas, tanto em força constante como em tempo constante e também no volume resultante, apresentaram-se maiores em CC, exceto para o diagrama de soldabilidade para força constante e chapa revestida com Zn. Com isto é possível concluir que, no geral, a soldagem em CC é mais eficiente e com maior flexibilidade no ajuste dos parâmetros de soldagem se comparadas com a soldagem em CA.
4. O volume do diagrama de soldabilidade (3D) em chapas não revestidas foi maior para o equipamento de soldagem em CC. Por outro lado, os resultados das chapas revestidas com Zn mostraram um volume maior na soldagem em CA. É possível concluir que a soldagem em chapas não revestidas em CC e a soldagem com CA em chapas revestidas com Zn são menos sensíveis as mudanças dos parâmetros de soldagem quando comparadas com os outros equipamentos.
5. Em geral, os diâmetros dos pontos de solda em CC apresentaram-se ligeiramente maiores em comparação aos diâmetros em CA, pode-se concluir que é devido à maior eficiência em gerar calor quando comparada a CA.

6. Os limites de resistência à tração apresentaram-se maiores em chapas sem revestimento, tanto na soldagem em CA quanto na soldagem em CC. Este fato está relacionado com as maiores durezas encontradas na ZAC dos pontos de solda em chapas sem revestimento.
7. A resistência dinâmica durante a queima do revestimento de Zn apresentou uma pequena diminuição num curto período de tempo, aproximadamente meio ciclo, tanto na soldagem em CA quanto na soldagem em CC. Pode-se concluir que é devido a presença, e posterior vaporização do Zn, que possui uma resistividade menor que a do ferro. Durante a soldagem das chapas revestidas, os picos e vales da rugosidade do material de base somente se encontram e acontece o colapso das rugosidades, após a vaporização do Zn. Este colapso aumenta a área de contato diminuindo a resistência dinâmica. A presença do Zn reduz o tempo total de soldagem, tanto em CC como em CA. Pode-se concluir também que a queima do Zn não afeta a formação do ponto de solda.
8. As resistências dinâmicas e energias dinâmicas em chapas com revestimento de Zn apresentam-se menores se comparadas com chapas sem revestimento, tanto na soldagem em CA quanto na soldagem em CC. Pode-se concluir que é devido a menor resistividade a passagem da corrente nas interfaces das chapas revestidas com Zn.
9. A resistência elétrica de contato aumenta com o aumento da rugosidade superficial dentro do ponto, pode-se concluir que com o aumento da rugosidade, os microcontatos elétricos diminuem, dificultando a passagem da corrente elétrica.
10. O coeficiente de variação da rugosidade superficial dentro do ponto em chapas sem revestimento mostrou-se maior se comparado com chapas revestidas com Zn. Apesar deste fato, os diâmetros dos pontos, tanto na soldagem em CA quanto na soldagem em CC apresentaram-se em média pouca diferença, apesar das diferenças de rugosidades encontradas em chapas revestidas com Zn e chapas não revestidas dentro do ponto. Pode-se concluir que estas diferenças de magnitudes de rugosidades não afetam a formação do ponto de solda.

11. Os pontos de solda com os parâmetros otimizados apresentaram-se maiores quando a energia dinâmica apresentou-se maior, pode-se concluir que quanto maior a quantidade de calor na zona de solda maior será a massa fundida.
12. Todos os pontos de solda com os parâmetros otimizados foram aprovados conforme requisitos técnicas para qualificação de soldagem conforme norma. Pode-se concluir que a metodologia apresentada neste trabalho para a determinação dos parâmetros otimizados é eficiente.

SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS:

1. Estudar a influência da camada de Zn nas propriedades mecânicas e microestruturas formadas no metal de solda.
2. Estudar a influência da composição química do material de base nas propriedades mecânicas e microestruturas formadas no metal de solda.
3. Verificar a confiabilidade dos parâmetros de soldagem através dos diagramas de soldabilidade em 3D.
4. Estudar a queima da camada de Zn durante o processo de soldagem através da resistência dinâmica.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. BRANDI, S.D. Classificação dos processos de soldagem. In: WAINER, E. *et al.* Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1992. p.1-8.
2. MARQUES, P. V.; MODENESI, J. Q.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 362 p.
3. JENNEY, C.L. (Editor), O'BRIEN, A. (Editor) – “AWS Welding Handbook, Vol. 1 - Welding Science and Technology”, 9º Ed. American Welding Society, EUA, 2001. 918 p.
4. WIKIPEDIA. Elihu Thomson. Disponível em:
http://en.wikipedia.org/wiki/Elihu_Thomson. Acesso em: 17 Fev. 2010.
5. BRANDI, S.D. Soldagem por resistência. In: WAINER, E. *et al.* Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1992. p.217-242.
6. ZIEDAS, S; TATINI, I. Coleção Tecnologia SENAI: Soldagem. São Paulo: SENAI, 1997. 553 p.
7. HOULDCROFT, P.T. Welding Process Technology; Cambridge University Press, 1ª ed., England, 1979. 363 p.
8. METALÚRGICA MARIMAX. Apostila de soldagem. Disponível em:
<http://www.marimax.com.br/>. Acesso em: 23 Fev. 2010.
9. KEARNS, W.H. Welding Handbook: Resistance and Solid-State Welding and Other Joining Processes. Miami: American Welding Society, 1984.
10. ZHANG, H; SENKARA, J. Resistance Welding: Fundamentals and Applications. 1. ed. London: Taylor & Francis, 2006. 431 p.
11. ASLANLAR, S. *et al.* Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromed steel sheets in electrical resistance spot welding. Journal Material and Design, Turkey, v. 28, p. 2-7, Dec. 2007.
12. FURLANETTO, V. Proposta e validação experimental de um modelo para máquina de solda a ponto CA. USP, 2005. 88 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- 13 WELDING SCIENCE. Manual de treinamento de soldagem por resistência. São Paulo, 2009. 82 p.

14. BRANDI, S. D.; BATISTA, M. Comparação entre dois equipamentos de soldagem a ponto por resistência utilizados na indústria automotiva. In: Congresso Nacional de Soldagem, 36º. 2010, Recife – Associação Brasileira de Soldagem, 2010. 17 p.
15. ASLANLAR, S. The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry. Journal Materials and Design, Turkey, v.27, p.125-131, Nov. 2006.
16. EDWARDS, E. R. Inspection of Welded . Welding Brazing and Soldering. Metals Handbook, Vol. 6, 10º Ed. American Society of Metals, 1998. p. 2602-2688.
17. NEVILLE, T. W. Resistance Spot Welding. Welding Brazing and Soldering. Metals Handbook, Vol. 6, 10º Ed. American Society of Metals, 1998. p. 693-729.
18. WELDING Process. Welding Handbook. Vol. 2, 8º Ed. American Welding Society, Miami, 1998.
19. SHOME, M. Effect of dynamic contact resistances on advanced high strength steels under medium frequency DC spot welding conditions. Science and Technology of Welding and Joining, India, v. 14, n .6, p.533-541, Dec. 2008.
20. DICKINSON, D. W.; FRANKLIN. J.E.; STANYA, A. Characterization of Spot Welding Behavior by Dynamic Electrical Parameter Monitoring Welding Research Council, New York, v. 59, n.6, p. 170-176, June 1980.
21. ASLANLAR, S. *et al.* Welding time effect on mechanical of automotive sheets in electrical resistance spot welding. Journal Materials and Design, Turkey, v.29, p.1427-1431, Oct. 2007.
22. INTERMACHINERY. Soldagem a ponto por resistência. São Paulo, 2002. 25 p.
23. MINERAÇÃO E METALURGIA. Agregando Qualidade: Aços Galvanizados. Setembro, Nº 38, Área de Operações Industriais 2, Gerência Setorial 3, Editoração: GESIS/AO2, 2000.
24. NIPPERT. A comparison of the Resistance Spot Weldability of Bare, Hot-Dipped, Galvannealed, and Electrogalvanized DQSK Sheels, SAE nº 880280, Feb. 1988.

25. RWMA- Resistance Welder Manufactures Association. Resistance Welding Manual. U.S.A., 4th ED., Nov., 443 p.
26. YEUNG, K. S.; HORNTON, P. H. Transient Thermal Analysis of Spot Welding Electrodes. *Welding Journal*, Jan. 1999. p. 1 – 6.
27. MEDAR COMÉRCIO E SERVIÇOS. Treinamento Básico do Processo de Soldagem por Resistência. São Paulo, 2004.
28. ZHOU, M.; ZHANG, H.; HU, J. Relationships between Quality and Attributes of spot welds. *Welding Journal*, p. 72 – 77, April/ 2003.
29. GARCIA, A.; SPIM, J.A; SANTOS, C, A. Ensaio dos Materiais. Campinas: LTC, 1999. 247 p.
30. ZHOU, M.; HU, S.; ZHANG, H. Critical specimen sizes for tensile-shear testing of steel sheets: Strength measurement of spot welds depends both weld quality and testing specimens. *Welding Journal*, American welding Society, p.305s-313s, set. 1999.
31. ADIS INDÚSTRIA E COMÉRCIO. Catálogos de Máquinas de Solda. São Paulo, 2007.
32. METALÚRGICA MARIMAX. Catálogos de Máquinas de Solda. São Paulo, 2005.
33. MANJUNATH, T.C. *et al.* Simulation, Design, Implementation and Control of a Welding Process Using Micro-controller. In: Asian Control Conference IEEE, 5^o. 2004, Maharashtra, Índia. p. 828-836.
34. ROMAN MANUFACTURING INC. Testing Three Phase DC Power Supplies for Transformer or Diode Failure. Revision 1. Grand Rapids, USA, 1998.
35. DOEBBELIN, R. *et al.* Sources of electromagnetic disturbances in resistance welding inverter topologies and effective reduction techniques. In: Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, CEEM, 2000, Shanghai, China.
36. FENG, E. *et al.* Energy consumption in AC and DC resistance spot welding. In: Sheet Metal Welding Conference XI, Washington, 2004.p.12.
37. RUFFINO, R, T. Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1997. 295 p.