

HIDERALDO LUIZ OSORIO BRANCO

**AVALIAÇÃO DE CAPAS DE ELETRODOS UTILIZADAS NA
SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA DE CHAPAS GALVANIZADAS
AUTOMOTIVAS.**

CURITIBA

2004

HIDERALDO LUIZ OSORIO BRANCO

**AVALIAÇÃO DE CAPAS DE ELETRODOS UTILIZADAS NA
SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA DE CHAPAS GALVANIZADAS
AUTOMOTIVAS.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Okimoto

Curitiba

2004

Branco, Hideraldo Luiz Osorio
Avaliação de capas de eletrodos utilizadas na soldagem por
resistência de chapas galvanizadas automotivas / Hideraldo Luiz
Osorio Branco. — Curitiba, 2004.
xiv, 113 f.: il.; graf., tab.

Orientador: Paulo César Okimoto
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Setor de
Tecnologia

1. Eletrodo de cobre – Soldagem – Aço galvanizado. I. Okimoto,
Paulo César. II. Título.

CDD 20 671.5213

Dedico este trabalho aos meus pais e avós.

AGRADECIMENTOS

A Deus todo poderoso.

A minha família pelo incentivo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo César Okimoto, pela orientação e pela qualidade nas informações recebidas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica pelo apoio recebido.

Ao Laboratório de Soldagem, Laboratório de Materiais – Lamats e o LACTEC onde este trabalho foi realizado.

As empresas Tecnowelding, Intermachinery, Gestamp e Metalúrgica NL pelo fornecimento de material para a realização deste trabalho.

E por fim, a todos os amigos que me acompanharam e me acompanham neste grande projeto.

Todos receberam dois grandes dons: sua mente e seu tempo. Cabe a você fazer o que quiser com ambos.

Robert Kiyosaki
Sharon Lechter

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURA.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xi
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS GERAIS DO TRABALHO.....	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1 Máquinas de Solda a Ponto.....	19
3.2 Princípio de Operação do Processo de Soldagem por Resistência.....	20
3.3 Geração de Calor.....	24
3.4 Efeito dos Parâmetros de Soldagem na Geração de Calor.....	28
3.4.1 Efeito da corrente de soldagem.....	28
3.4.2 Efeito do tempo de soldagem.....	30
3.4.2.1 Tempo de pré-pressão.....	31
3.4.2.2 Tempo de subida.....	32
3.4.2.3 Tempo de soldagem.....	32
3.4.2.4 Tempo de descida.....	33
3.4.2.5 Tempo de pós-pressão.....	33
3.4.2.6 Intervalo.....	33
3.4.3 Efeito da força de soldagem.....	34
3.5 Outros Fatores que Afetam a Geração de Calor.....	36
3.5.1 Influência das condições superficiais do material base.....	36
3.5.2 Influência do revestimento do material base.....	36
3.5.3 Influência dos eletrodos.....	38
3.5.4 Dissipação de calor.....	38
3.6 Materiais e Processo de Fabricação das Capas de Eletrodo.....	39
3.7 Desgaste dos Eletrodos.....	46
3.7.1 Troca de eletrodos.....	50

3.7.2	Curvas de corrente.....	50
3.7.3	Fresagem dos eletrodos.....	51
3.7.4	Utilização de limas.....	52
3.8	Processo de Fresagem de Eletrodos.....	52
3.8.1	Vantagem de fresar o eletrodo.....	53
3.8.2	Formas de fresagem.....	53
3.8.2.1	Fresagem lateral.....	54
3.8.2.2	Fresagem de topo e lateral.....	54
3.8.3	Tipos de fresagem.....	55
3.8.3.1	Fresagem manual.....	55
3.8.3.2	Fresagem automática.....	56
3.8.3.3	Fresagem off-line.....	57
3.8.4	Intervalo de fresagem.....	57
3.8.5	Defeitos provenientes do processo de fresagem.....	58
3.9	Parametrização de Máquinas de Solda a Resistência.....	60
3.9.1	Procedimento de parametrização.....	60
3.9.2	Programas de soldagem.....	60
3.9.2.1	Corrente de soldagem.....	62
3.9.2.2	Tempo de subida.....	62
3.9.2.3	Tempo de soldagem.....	62
3.9.2.4	Tempo de pós-pressão.....	63
3.9.2.5	Força de eletrodo.....	63
3.9.2.6	Velocidade de soldagem.....	64
3.9.3	Desenho do eletrodo.....	64
3.9.4	Alinhamento do eletrodo.....	64
3.9.5	Derivações de corrente.....	66
3.9.5.1	Distância entre os pontos de solda.....	66
3.9.5.2	Fugas de corrente.....	67
3.9.6	Refrigeração dos eletrodos.....	68
3.9.7	Limpeza dos eletrodos.....	69

4. METODOLOGIA E PLANO DE TRABALHO.....	70
4.1 Soldagem dos Corpos de Prova.....	70
4.2 Capas de Eletrodos.....	71
4.3 Máquina de Solda.....	72
4.4 Equipamento de Calibração.....	73
4.5 Parâmetros de Soldagem.....	74
4.6 Determinação do Diâmetro do Ponto de Solda.....	75
4.7 Teste de Desempenho das Capas de Eletrodo.....	76
4.8 Testes para Determinar a Dureza das Capas de Eletrodo após a Fresagem.....	76
4.9 Testes para Determinar o Intervalo de Fresagem das Capas de Eletrodos	78
4.10 Testes de Recozimento Isotérmico.....	79
4.11 Procedimentos Metalográfico e Macrográfico.....	79
4.12 Análise.....	80
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	81
5.1 Testes de Desempenho das Capas de Eletrodo.....	81
5.2 Teste de Recozimento Isotérmico.....	85
5.3 Análise Visual e Macrografias.....	86
5.4 Teste de Fresagem.....	97
5.4.1 Testes para determinar a dureza das capas de eletrodo após a fresagem.....	97
5.4.2 Testes para determinar o intervalo de fresagem das capas de eletrodos.....	101
6. CONCLUSÕES.....	107
7. TRABALHOS FUTUROS.....	109
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Máquinas de solda a ponto.....	19
Figura 02: Circuito elétrico típico de solda a ponto.....	20
Figura 03: Ciclo de soldagem.....	22
Figura 04: Ponto de solda.....	22
Figura 05: Expulsão de material.....	24
Figura 06: Representação esquemática das resistências no secundário de uma máquina de soldagem por resistência.....	25
Figura 07: Gradiente de temperatura de uma solda a ponto.....	26
Figura 08: Curva de soldabilidade.....	29
Figura 09: Tempos de soldagem.....	31
Figura 10: Comparação da resistência de contato em função da força.....	35
Figura 11: Ilustração de superfícies de contato das chapas.....	35
Figura 12: Ponto de fusão e ebulição do zinco e do aço galvanizado.....	37
Figura 13: Dissipação de calor durante solda a ponto para o metal circundante e eletrodos.....	38
Figura 14: Matriz de cobre com precipitados coerentes.....	41
Figura 15: Formação de precipitados incoerentes com a matriz de cobre.....	42
Figura 16: Precipitados com contorno de grosseiros.....	43
Figura 17: Processo de fabricação de ligas de cobre livre de oxigênio.....	44
Figura 18: Processo de fabricação do CuAl_2O_3	45
Figura 19: Micro-estrutura do CuAl_2O_3 antes da exposição à alta temperatura e após 800°C (ampliação 33x).....	46
Figura 20: Distribuição de temperatura ($^\circ\text{C}$) ao longo da capa de eletrodo.....	48
Figura 21: Distribuição de temperatura em $t= 0,2\text{ s}$, capa de eletrodo com cratera.....	49
Figura 22: Distribuição de temperatura em $t= 0,2\text{ s}$, eletrodo sem cratera.....	49
Figura 23: Curva ou step de corrente.....	50
Figura 24: Curva de corrente combinada com fresagens.....	51
Figura 25: Fresagem lateral.....	54

Figura 26: Fresagem de topo e lateral.....	55
Figura 27: Fresagem com fresador manual mecânico.....	56
Figura 28: Fresa elétrica para pinça de solda de robô.....	56
Figura 29: Fresador off-line.....	57
Figura 30: Efeito da incorreta fresagem do eletrodo.....	59
Figura 31: Capa de eletrodo tipo cone truncado.....	64
Figura 32: Formas de alinhamento e desalinhamento.....	65
Figura 33: Não paralelismo dos centros de contato das capas de eletrodo com a chapa.....	66
Figura 34: Distância entre os pontos de solda.....	67
Figura 35: Fugas de corrente.....	68
Figura 36: Posicionamento correto do tubo defletor.....	69
Figura 37: Posicionamento incorreto do tubo defletor.....	69
Figura 38: Dimensões da chapa de trabalho.....	71
Figura 39: Capa de eletrodo.....	71
Figura 40: Máquina de solda a ponto.....	73
Figura 41: Medidor de corrente.....	74
Figura 42: Medidor de pressão.....	74
Figura 43: Teste de arrancamento, copos de prova e determinação do diâmetro Médio.....	75
Figura 44: Perfil de Dureza.....	77
Figura 45: Variação do diâmetro médio do ponto de solda.....	81
Figura 46: Variação do diâmetro da ponta do eletrodo inferior x N ^o pontos.....	82
Figura 47: Variação do diâmetro da ponta do eletrodo superior x N ^o pontos.....	82
Figura 48: Perfil de dureza na seção transversal das capas de eletrodo após testes de soldagem.....	83
Figura 49: Variação da corrente de soldagem.....	84
Figura 50: Teste de dureza x temperatura de recozimento	85
Figura 51: Perfis da face das capas de eletrodos após os testes realizados.....	87
Figura 52: Formação da camada de latão pelo processo de difusão, ao longo da superfície da capa de eletrodo D.....	88

Figura 53: Regiões na ponta da capa de eletrodo.....	89
Figura 54: Composição química na região A.....	90
Figura 55: Composição química na região B.....	90
Figura 56: Composição química na região C.....	91
Figura 57: Composição química na região D.....	91
Figura 58: Pontos soldados com a capa de eletrodo A.....	93
Figura 59: Pontos soldados com a capa de eletrodo B.....	94
Figura 60: Pontos soldados com a capa de eletrodo C.....	95
Figura 61: Pontos soldados com a capa de eletrodo D.....	96
Figura 62: Diâmetro mínimo do ponto de solda.....	102
Figura 63: Capa de eletrodo com crateras na face.....	103
Figura 64: Rebarbas causadas pelas crateras na face da capa de eletrodo.....	103
Figura 65: Capa de eletrodo grudada na chapa.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Característica dos eletrodos segundo RWMA.....	40
Tabela 02: Frequência de fresagem em função do tipo de material.....	58
Tabela 03: Tabela orientativa de parâmetros de soldagem para chapas galvanizadas.....	61
Tabela 04: Composição química das capas de eletrodo utilizadas nos testes.....	72
Tabela 05: Composição química nas quatro regiões da capa de eletrodo.....	89
Tabela 06: Perfis de dureza da capa A (superior).....	97
Tabela 07: Diâmetros das faces das capas de eletrodos superiores e diâmetro médio dos pontos de solda X Intervalo de fresagem.....	98
Tabela 08: Perfis de dureza da capa B.....	99
Tabela 09: Perfis de dureza da capa C.....	99
Tabela 10: Perfis de dureza da capa D.....	100
Tabela 11: Intervalos de fresagem.....	104

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

Al ₂ O ₃	Alumina
AWS	American Welding Society
CD	Camada de difusão
cm ³	Centímetro Cúbico
Cr	Cromo
Cu	Cobre
°C	Grau Celsius
D _{máx}	Diâmetro máximo do ponto de solda
D _{médio}	Diâmetro médio do ponto de solda
D _{min}	Diâmetro mínimo do ponto de solda
D _{ponto}	Diâmetro do ponto de solda
EDS	Energy Dispersion Spectroscopy
Fe	Ferro
°F	Grau Fahrenheit
g	Grama
H	Calor
HB	Hardness Brinell
HV	Hardness Vickers
I	Corrente elétrica
I.A.C.S.	International Annealing Copper Standard
I _{ges}	Corrente total de soldagem
I _N	Corrente que flui para o segundo ponto
I _s	Corrente de soldagem
kA	Kilo amper
kg	Kilo grama
kgf	Kilo grama força
L	Distância entre pontos de solda
l	Litros
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura

min	Minutos
ms	Milisegundos
m ²	Metro Quadrado
N	Newton
nm	Nano metro
Pts	Pontos
R	Resistência
Rc	Resistência de contato
RWMA	Resistance Welder Manufacturers Association
S	Espessura da chapa mais fina em mm
s	Segundos
t	Tempo de soldagem
Zn	Zinco
Zr	Zircônio

RESUMO

A soldagem por resistência de chapas galvanizadas tem inúmeras aplicações por aliar rapidez, produtividade, qualidade e baixo custo. Existem, entretanto, peculiaridades neste processo de soldagem de chapas galvanizadas que podem ocasionar problemas na qualidade da solda na chapa e redução na produtividade da capa de eletrodo, tais como diminuição do diâmetro do ponto soldado, falta de pontos, pontos com respingos, indentação, pontos furados e a formação de latão na superfície de contato da capa de eletrodo, devido à presença da camada de zinco (Zn) na chapa. Neste trabalho foi avaliado o comportamento de 4 diferentes tipos de capas de eletrodo utilizados na soldagem por resistência –CuCrZr, CuZr e CuAl_2O_3 – durante a soldagem de chapas galvanizadas automotivas. Avaliou-se o desgaste das capas de eletrodo, a produtividade, a variação de dureza devido ao aquecimento, influência da fresagem na qualidade dos pontos de solda e a macroestrutura ao final dos testes. Os resultados mostram que as distintas capas de eletrodos apresentam desempenho diferenciado.

ABSTRACT

The resistance welding for galvanized steel has innumerable applications for uniting rapidity, productivity, quality and low cost. There are, however, some specifications in this process of galvanized plate welding that can cause problems in the quality of the weld in the plate and reduction in the productivity of the electrode cap, such as reduction of the diameter of the welded point, pierced lack of points, points with ridges, over deep and the brass formation in the faying surface of the electrode cap, due to presence of the zinc (Zn) cap in the plate. This work was evaluated the behavior of 4 different types of used caps of electrode in the welding for resistance - CuCrZr, CuZr and CuAl₂O₃ - during the automotive galvanized plate welding. The wear of the electrodes caps, the variation of hardness due heating, influence of dresser in the spot welding quality and the macrostructurally in the end of welding test had been. The results show that the distinct electrodes caps present different performance.

1 INTRODUÇÃO

Soldagem por resistência é o principal processo de união de chapas metálicas na maioria das indústrias, entre elas: a automotiva, de aplicação e indústria aeroespacial. Tendo sido inventada por Elihu Thomson em 1877, que aplicou esse processo de soldagem para unir fios de cobre. Logo percebeu que esta técnica poderia ser usada para a soldagem de outros materiais. A soldagem por resistência tem crescido enormemente desde a primeira chapa automotiva soldada, a qual foi introduzida em 1933. Tornou-se o processo predominante na montagem das carrocerias automotivas, com uma média de 4500 pontos soldados em cada carro (AGASHE, 2003, AWS, 1997, VOGLER, 2003).

Na fabricação de automóveis, uma parte muito interessante é a montagem das carrocerias. Partindo-se de chapas de aço (galvanizadas ou não), faz-se uma conformação mecânica das diversas partes – lateral, teto, assoalho, portas, capôs, pára-lamas, etc, seguindo-se da soldagem. O processo de soldagem mais utilizado para montar as carrocerias é conhecido como solda a ponto, devido ao seu baixo custo, boa qualidade, aquecimento localizado resultando numa baixa distorção.

Soldagem a ponto é uma subclassificação da soldagem por resistência elétrica. E é um processo de soldagem no qual a união dos metais é realizada na região sobreposta onde o calor é gerado. O Calor gerado é resultante da resistência do material à passagem de corrente elétrica em um intervalo de tempo determinado. A união ocorre pela fusão e solidificação do material no ponto de solda. Uma força é sempre aplicada pelos eletrodos, antes, durante e após a aplicação da corrente para restringir a área de contato da solda nas superfícies sobrepostas. As superfícies em contato, na região de concentração de corrente são aquecidas por um curto pulso de baixa tensão e alta corrente, para formar uma região fundida de metal de solda, que recebe o nome de ponto de solda (EAGAR, 1992, INTERMACHINERY, 2003, REU, 1997, SCHARFF, 1990).

Os eletrodos desempenham um papel fundamental na geração de calor durante o processo de soldagem a resistência. Os eletrodos podem estar sob

forma de capas, pontas arredondadas, discos, rolos, mas todos eles desempenham a mesma função, que é de conduzir a corrente até o material, aplicar a força necessária e dissipar o calor gerado durante o processo de soldagem.

Durante o processo de soldagem por resistência, o valor da corrente de soldagem pode ser de vários ampéres (5 a 20 kA), a força ser de vários Newtons (1,5 a 8,0 kN) e a temperatura na superfície de contato do eletrodo / chapa chega a 900° C (DONG, 1995, INTERMACHINERY, 2003, YEUNG, 1999).

Para se atingir os melhores resultados em qualquer operação de soldagem a ponto, é necessário utilizar os eletrodos adequados para a aplicação. A seleção da liga é importante já que pode influenciar no balanço de calor ou mesmo reduzir o desgaste da face de contato do eletrodo. O diâmetro e o perfil da face de contato do eletrodo também devem ser considerados, pois controlam a pressão de soldagem e a densidade de corrente, que devem estar dentro de uma faixa aceitável para a obtenção de resultados satisfatórios. Uma geometria incorreta da face de contato do eletrodo resultaria em uma marcação excessiva da superfície ou um formato irregular do ponto de solda.

Cada um dos eletrodos é fabricado usando um número de ligas diferentes ou processo de fabricação diferente, com o objetivo de fornecer a melhor combinação de propriedades elétricas e mecânicas para uma operação de soldagem.

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

Além dos parâmetros de soldagem influenciarem no desgaste do eletrodo, a formação de ligas entre o material do eletrodo e o metal de trabalho aumenta intensamente a velocidade de desgaste da face do eletrodo. O desgaste é especialmente rápido quando eletrodos à base de cobre são utilizados na soldagem de aços revestidos com Zinco (Zn), já que este prontamente se difunde no eletrodo, formando ligas com o Cobre (Cu) (INTERMACHINERY, 2003).

Quando é buscado na literatura convencional (AWS, 1997, MACHADO, 1996, SCHARFF, 1990 e WAINER, 1992) informações sobre capas de eletrodo utilizadas na soldagem por resistência, verifica-se que as mesmas não apresentam dados atuais sobre os materiais, processos de fabricação e estudos sobre desgaste de capas que são utilizadas atualmente para soldagem de chapas galvanizadas automotivas. GUGEL ET AL (1994) avaliou o desgaste de capas de eletrodos Cu-Zr na soldagem de chapas galvanizadas, entretanto o foco era a soldabilidade das diferentes chapas e não o eletrodo. Há ainda a literatura divulgada pelos fabricantes de capas de eletrodos, CRAGGS (2002) e INTERMACHINERY (2002), que trazem o que o mercado utiliza, entretanto as informações sobre desgaste são vagas e pouco precisas.

2 OBJETIVOS GERAIS DO TRABALHO

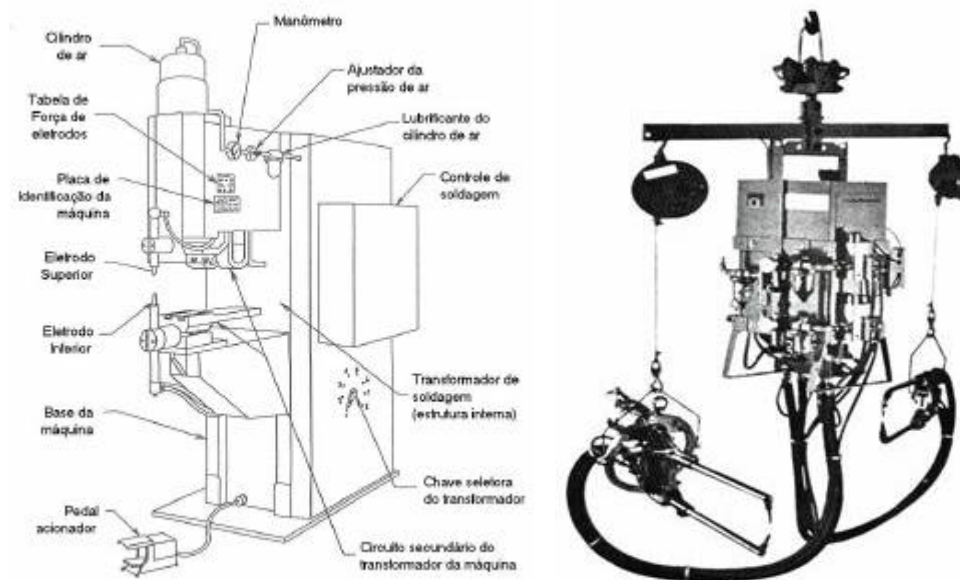
Neste trabalho pretende-se avaliar o comportamento de quatro diferentes tipos de capas de eletrodo utilizados na soldagem por resistência, durante a soldagem de chapas galvanizadas automotivas. As capas de eletrodo utilizam as seguintes ligas de cobre – CuCrZr, CuZr e CuAl₂O₃.

Será avaliado o desgaste das capas de eletrodo, a produtividade, a qualidade dos pontos soldados, variação da dureza das capas de eletrodo após os testes de soldagem, influência da fresagem na queda de dureza das capas de eletrodo e na formação dos pontos de solda, a macroestrutura das capas de eletrodos e dos pontos soldados.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Máquinas de Solda a Ponto

O equipamento utilizado para realizar os pontos de solda é chamado de máquina de solda a ponto. Podendo ser estacionária, como mostrado na Figura 01a, ou pode ser uma máquina de solda a ponto suspensa, também chamado de pinça de solda, como mostrado na Figura 01 b. A forma construtiva dos dois tipos da máquinas de solda são diferentes porém, o funcionamento é semelhante e obedecem os mesmos padrões de regulação.



a: Máquina estacionária.

b: Máquina suspensa.

Figura 01: Máquinas de solda a ponto.

As máquinas utilizadas em soldagem por resistência são compostas por três elementos básicos: Circuito de controle, sistema mecânico e circuito elétrico (INTERMACHINERY, 2003).

O circuito de controle é responsável pelo controle da soldagem, que fornece as seguintes funções principais: inicializar ou cessar a corrente de soldagem para o transformador, controlar a magnitude da corrente de soldagem e liberar o mecanismo de força do eletrodo no tempo adequado.

O sistema mecânico é composto por meios hidráulicos, pneumáticos, magnéticos ou mecânicos e são responsáveis pela aplicação da força do eletrodo. O sistema mecânico de uma máquina de solda a ponto deve garantir que a velocidade de aproximação dos eletrodos seja rápida, porém controlada, de forma a evitar que as faces de contato dos eletrodos sejam danificadas por pancadas repetitivas.

O circuito elétrico é composto de um transformador e um circuito secundário. O circuito secundário inclui os eletrodos que conduzem a corrente de soldagem até o material e o próprio material, como na Figura 02 (CRAGGS, 2002, INTERMACHINERY, 2003).

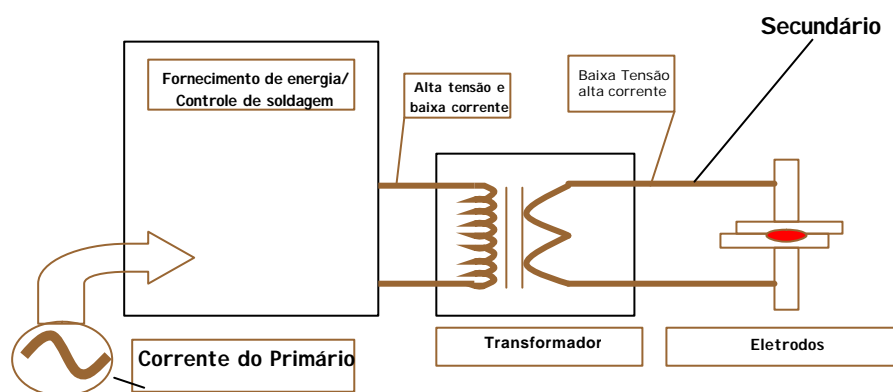


Figura 02: Circuito elétrico típico de solda a ponto.

3.2 Princípio de Operação do Processo de Soldagem por Resistência

O princípio da soldagem por resistência é bastante simples, combinando-se a aplicação de calor e pressão para se produzir um ponto de solda (CHIEN, 2002). A preocupação na soldagem por resistência é a aplicação adequada de seus princípios.

O termo “Soldagem por Resistência” é proveniente de uma propriedade elétrica, chamada resistência, que dificulta a passagem do fluxo da corrente de elétrica no metal a ser soldado, promovendo a geração de calor. Esta resistência ao fluxo de corrente é a fonte geradora de calor na soldagem por resistência. Para realizar uma solda a ponto, que é uma sub-classificação de soldagem por resistência, duas chapas ou mais, são colocadas sobrepostas, como na Figura 03, sendo pressionadas por eletrodos para garantir um bom contato elétrico (AWS, 1997, INTERMACHINERY, 2003, SCHARFF, 1990).

A Figura 03, mostra a seqüência básica de um ciclo de soldagem a ponto (VOLKSWAGEN, 2000). Sendo F_E a força de soldagem e I a corrente de soldagem. O tempo compreendido entre as fases 1 e 6 chama-se tempo de soldagem. Na etapa 1, os eletrodos iniciam o processo de descida para que as chapas seja pressionadas. As chapas devem ser pressionadas de tal forma que ocorra um bom assentamento e evite problemas como expulsão de metal fundido da zona de solda, este processo ocorre na etapa 2. Na etapa 3, os eletrodos são mantidos sobre pressão e a corrente de soldagem é liberada, inicia-se então o processo de formação do ponto de solda. Na etapa 4, o ponto de solda já formado, a corrente de soldagem é desligada, porém os eletrodos são mantidos sobre pressão para que o ponto de solda solidifique sob pressão. Após a solidificação do ponto de solda, a força de soldagem aplicada pelos eletrodos é desligada até a abertura total dos eletrodos, esse processo ocorre nas etapas 5 e 6.

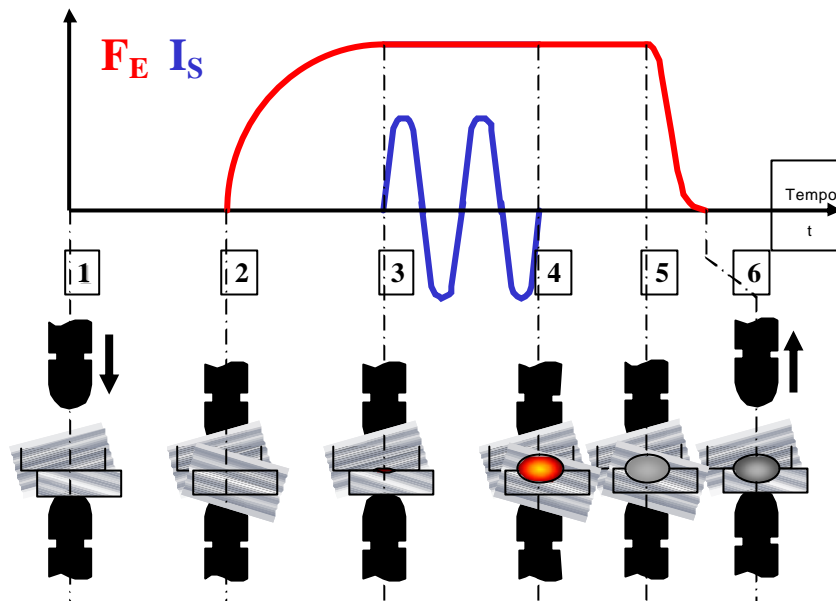


Figura 03: Ciclo de soldagem.

Após a conclusão do ciclo de soldagem, um ponto de solda deverá ter sido formado, como mostrado na Figura 04. O ponto de solda e a região da solda devem ter algumas características. Tais como apresentar um diâmetro mínimo especificado por norma, bem como uma profundidade de penetração na área soldada. A indentação é a uma impressão deixada pelos eletrodos na chapa durante o processo de soldagem, sendo desejável que ela seja a mínima possível (AGASHE, 2003, ZHOU, 2003).

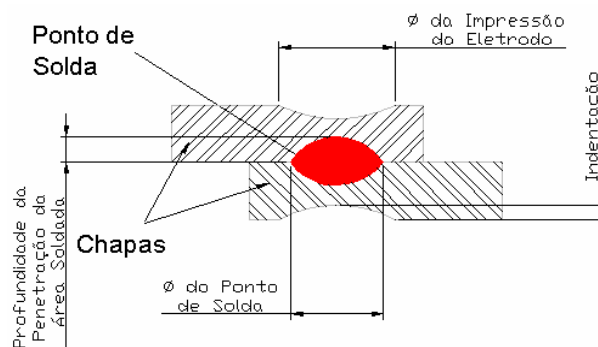
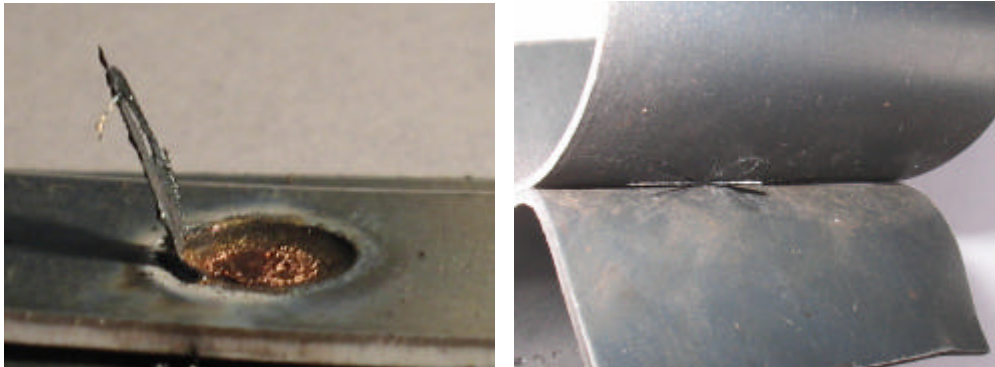


Figura 04: Ponto de solda.

A solda a ponto envolve uma aplicação coordenada de corrente elétrica e força de eletrodo de magnitudes e durações próprias. A corrente de soldagem deve passar pelos eletrodos e chapas, aquecendo-as até fundir a região entre os eletrodos, para formar o ponto de solda. A corrente de soldagem é então desligada e o ponto de solda se solidifica, formando uma união metálica sólida entre as chapas (AWS, 1997, INTERMACHINERY, 2003).

A seqüência de operações deve primeiro desenvolver calor suficiente para transformar um volume confinado de metal para o estado líquido. Esse metal é, então, resfriado, enquanto sob pressão dos eletrodos, até que tenha resistência adequada para manter as partes unidas. A densidade de corrente, que é a quantidade de corrente de soldagem que passa pela área de contato do eletrodo, e a força dos eletrodos, devem ser tais que um ponto de solda seja formado, mas não tão altas que o metal possa ser expelido da zona de fundida. O tempo de aplicação da corrente de soldagem não deve ser muito longo para evitar um aquecimento excessivo da superfície do eletrodo. Tal aquecimento pode provocar adesão entre o material base e o eletrodo, expulsão de material na superfície de contato do eletrodo com a chapa e / ou entre as chapas, fusão da chapa na superfície, reduzindo assim, a vida útil dos eletrodos e comprometendo a qualidade dos pontos de solda (AWS, 1997).

A Figura 05 mostra a expulsão de material que ocorre durante o processo de soldagem. A expulsão é uma forte projeção de material fundido da região da solda, ocorrendo na face de contato do eletrodo e a chapa, Figura 05 a, ou em alguma camada na superfície de contato entre as chapas, Figura 05 b. Sendo causada pela falta de retenção do material fundido se expandindo entre as faces das capas de eletrodo, a expulsão excessiva é indesejável e as projeções provenientes da solidificação da expulsão que ultrapassam a circunferência do ponto de solda são chamadas de rebarbas.



a: Expulsão na superfície.

b: Expulsão interfacial.

Figura 05: Expulsão de material.

3.3 Geração de Calor

O Calor requerido para o processo de soldagem por resistência é produzido pela resistência do material base à passagem da corrente elétrica, denominado efeito Joule. Devido ao curto caminho da corrente elétrica no material base e ao limitado tempo de soldagem, correntes de soldagem relativamente altas são necessárias para desenvolver o calor de soldagem adequado. A geração de calor no local da solda resulta da ação combinada de três parâmetros (AWS, 1997, CHO, 2003, REU, 1997, SCHARFF, 1990):

- 1 – Corrente elétrica;
- 2 – Resistência Ôhmica da junta a ser soldada;
- 3 – Tempo de aplicação da corrente de soldagem.

Esses três fatores afetam a geração de calor, que é expresso pela equação:

$$H = I^2 R t \quad (1)$$

onde:

- H = Calor gerado em Joules;
- I = Corrente elétrica em Ampères;
- R = Resistência em ohms;
- t = Tempo de duração da corrente em segundos.

Parte do calor é utilizado para gerar a solda e parte é perdida por condução, convecção e radiação para o material de base e eletrodo. A magnitude destas perdas é geralmente desconhecida (AWS, 1997).

A corrente de soldagem será a mesma em todas as partes do circuito independentemente da resistência instantânea em qualquer local do circuito, mas o calor gerado será diretamente proporcional à resistência naquele ponto (AWS, 1997).

A Figura 06 mostra esquematicamente que o secundário da máquina de soldagem apresenta uma série de resistências desde o transformador de soldagem até à interface entre as duas chapas de metal a serem soldadas. A maior resistência R está na interface dos materiais a serem soldados, seguido da resistência do material base. Todas as outras resistências devem ser muito pequenas (CRAGGS, 2002, INTERMACHINERY, 2003).

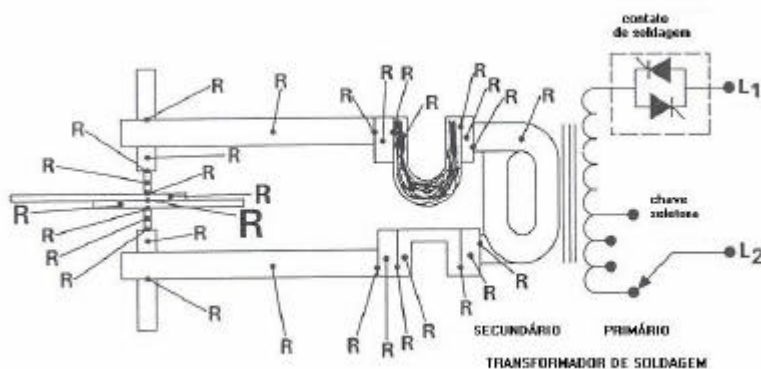


Figura 06: Representação esquemática das resistências no secundário de uma máquina de soldagem por resistência.

Desta forma, o calor gerado na superfície de contato das peças é maior do que em qualquer outro ponto localizado no circuito secundário e, durante a primeira parte do intervalo de tempo de soldagem, ele é responsável pela geração de calor na região de solda.

O calor gerado no restante do circuito secundário é perdido e dissipado por radiação, convecção ou condução, sendo auxiliados pela refrigeração à água, que previne a fusão na interface eletrodo / chapa.

Na região de contato eletrodo / chapa existem 7 resistências conectadas em série, as quais são responsáveis pela distribuição da temperatura, como é mostrado esquematicamente na Figura 07 (AWS, 1997, EAGAR, 1992, INTERMACHINERY, 2003, REU, 1997, YEUNG, 1999):

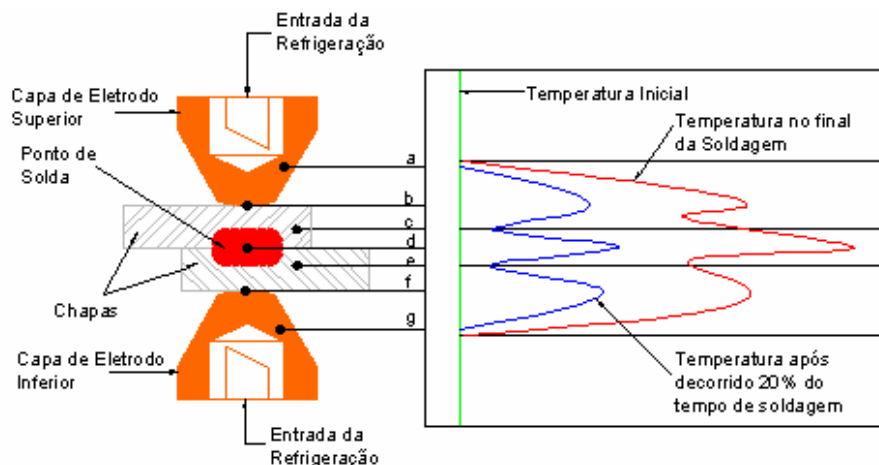


Figura 07: Gradiente de temperatura de uma solda a ponto.

- a – Resistência elétrica do material do eletrodo superior;
- b – Resistência de contato entre eletrodo superior e chapa superior;
- c - Resistência elétrica do material da chapa superior;
- d – Resistência de contato entre chapas superior e inferior (superfícies sobrepostas);
- e - Resistência elétrica do material da chapa inferior;
- f – Resistência de contato entre chapa inferior e eletrodo inferior;
- g - Resistência elétrica do material do eletrodo inferior.

A resistência no ponto d , interface de contato das duas chapas, local onde o ponto de solda deve ser formado, é o ponto de mais alta resistência e, portanto, o ponto de maior geração de calor. A magnitude da resistência no ponto d depende da condição da superfície do metal base e do eletrodo, do tamanho e do perfil das extremidades da face do eletrodo e da força do eletrodo (a resistência é inversamente proporcional à força de contato). Este é um ponto de alta geração de calor, mas a superfície externa do metal não atinge sua temperatura de fusão durante a passagem de corrente devido à alta condutibilidade térmica dos eletrodos (a e g) e são usualmente refrigerados a água;

O calor é gerado nos sete pontos de resistência, sendo sua intensidade dependente da resistência à passagem da corrente de soldagem. Entretanto, é interessante que o calor se concentre apenas na interface do metal base, devendo-se minimizar o calor gerado nos outros locais. Já que a maior resistência está localizada em d , o calor é mais rapidamente desenvolvido nesse local (INTERMACHINERY, 2003).

Após cerca de 20% do tempo de soldagem ter transcorrido, o gradiente térmico é representado pela curva à esquerda na Figura 07. A curva à direita representa o gradiente térmico no final do tempo de soldagem (INTERMACHINERY, 2003).

Quando as condições de soldagem são adequadamente controladas, a temperatura de soldagem é primeiramente alcançada em locais perto de d , na interface entre as chapas. Durante o período de aquecimento, a região fundida cresce e se torna contínua para formar o ponto de solda. Os gradientes térmicos, mostrados na Figura 07 também são afetados pela condutibilidade térmica relativa da chapa e dos eletrodos, diâmetro da face de contato dos eletrodos, forma e velocidade de resfriamento dos eletrodos (INTERMACHINERY, 2003).

3.4 Efeito dos Parâmetros de Soldagem na Geração de Calor

O controle bem-sucedido da solda ponto é feito com a regulagem de três parâmetros:

- 1 – Corrente;
- 2 – Tempo;
- 3 – Pressão.

A seguir será apresentado como estes parâmetros afetam a qualidade do ponto de solda.

3.4.1 Efeito da corrente de soldagem

Na Equação 1, a corrente de soldagem tem um efeito muito maior na geração de calor do que a resistência ou o tempo, devido a sua influência quadrática. Sendo assim, é uma importante variável a ser controlada.

As variações na magnitude da corrente podem afetar a densidade de corrente na interface da solda. Existe um limite inferior para a densidade de corrente abaixo do qual a fusão não ocorre. Calor suficiente deve ser gerado para compensar as perdas, por condução, para o metal base adjacente e os eletrodos. Existe, também, um limite superior para a densidade de corrente de soldagem. Se esta for muito alta, a espessura total das chapas entre os eletrodos é aquecida até a região plástica quando a zona de solda atingir a temperatura de fusão, e os eletrodos penetram profundamente nas chapas. Isto realmente ocorre quando a corrente é alta o suficiente para produzir expulsão de material da zona fundida e / ou na interface chapa / eletrodo. O resultado é uma vida útil baixa do eletrodo e soldas com baixa qualidade (INTERMACHINERY, 2003).

A expulsão é um importante fenômeno que pode ser observado freqüentemente durante o processo de solda por resistência. É uma projeção de metal fundido durante a formação do ponto de solda. Ela envolve perda de metal do ponto de solda líquido, o qual freqüentemente resulta em redução das forças de soldagem. A probabilidade de expulsão de material não é somente função da

corrente de soldagem, mas também do tempo e pressão. Uma prática comum, para determinar as tabelas de soldagem é encontrar o limite da corrente de expulsão de material, fixando os valores de pressão e tempo de soldagem. Os níveis de corrente de expulsão são definidos com os níveis de corrente identificados através de procedimentos de ajuste de correntes e estabilidade de níveis de corrente de expulsão. O exemplo de curva de soldabilidade na Figura 08, mostra a relação entre a qualidade da solda e os parâmetros de soldagem, tempo, corrente e pressão. Neste caso a pressão é mantida fixa e varia-se a corrente e o tempo de soldagem (EDISON, 1999, INTERMACHINERY, 2003, LI, 2001, SENKARA, 2004, VOGLER, 2003, ZANG, 2002).



Figura 08: Curva de soldabilidade.

Para uma dada força de eletrodo, há um limite superior de densidade de corrente sobre o qual indentações e expulsão de material ocorrem nas superfícies de uma ou mais chapas, dando origem a soldas de baixa qualidade. A resistência máxima das soldas é obtida pela soldagem em densidade de corrente logo abaixo do valor no qual ocorre expulsão (INTERMACHINERY, 2003, VOGLER, 2003).

À medida que a densidade de corrente aumenta, o tempo de solda deve ser diminuído suficientemente para produzir uma solda sem que haja aquecimento das superfícies de contato dos eletrodos.

A faixa aceitável de corrente de soldagem, ou seja, à distância entre as duas curvas é usualmente uma medida de soldabilidade dos aços. Dessa forma,

quanto maior for a distância entre as duas curvas, ou seja, quanto maior for a faixa de corrente de soldagem, maior será a soldabilidade do material. A parte superior da Figura 08 ilustra esquematicamente o diâmetro do ponto de solda versus corrente de soldagem num determinado tempo de soldagem. À medida que a corrente de soldagem aumenta, o diâmetro do ponto de solda também aumenta, até, e na maioria dos casos, além do nível da corrente de soldagem responsável pela expulsão de material. As especificações geralmente estabelecem um diâmetro mínimo aceitável para a formação do ponto de solda, como ilustrado na parte superior da Figura 08 e indicam que pontos de solda produzidos com expulsão são inaceitáveis, independentemente do seu diâmetro (INTERMACHINERY, 2003).

A condutibilidade térmica do aço é cerca de 12% da do cobre, portanto, se uma corrente de soldagem suficiente for usada na soldagem de aço com eletrodos à base de cobre, o calor gerado ao longo da interface entre as chapas (ponto *d* na Figura 07) será conduzido para longe da zona de solda mais lentamente do que o calor gerado nas pontas dos eletrodos (pontos *b* e *f* na Figura 07) é conduzido para sua direção longitudinal (pontos *a* e *g* na Figura 07). Assim, a interface entre as chapas atinge primeiramente a temperatura de fusão e uma solda é produzida nesta interface (INTERMACHINERY, 2003).

3.4.2 Efeito do tempo de soldagem

O efeito do tempo de soldagem na distribuição de temperatura nas chapas e eletrodos durante a soldagem a ponto é mostrado através das duas curvas na Figura 07. A curva à esquerda, representa a temperatura em cada região após cerca de 20% do tempo de soldagem ter sido atingido e mostra que o aumento da temperatura nas superfícies sobrepostas das chapas (ponto *d*), durante este período, é proporcionalmente mais baixo do que em outras regiões em relação ao aumento da temperatura durante o tempo de soldagem restante (INTERMACHINERY, 2003).

Pela Equação 1 em 3.3, observa-se que, mantendo-se a resistência total constante, a quantidade de calor gerado em qualquer parte do circuito é

proporcional ao tempo de soldagem e ao quadrado da corrente de soldagem. O tempo requerido para obtenção de um diâmetro adequado de ponto de solda pode ser diminuído até um valor limite, independente de quanto a corrente de soldagem é aumentada. Quando o calor é gerado muito rapidamente nas três superfícies de contato (pontos *b*, *d* e *f* na Figura 07), trincas e expulsão de metal nestas superfícies podem ocorrer (INTERMACHINERY, 2003).

A taxa de geração de calor deve ser tal que soldas com resistência mecânica adequada sejam produzidas sem aquecimento excessivo dos eletrodos e a sua conseqüente deterioração.

O processo de solda ponto normalmente tem diferentes etapas. O tempo de cada etapa deve ser precisamente controlado mesmo que cada um dure apenas uma fração de segundo. O tempo usado é medido em ciclos ou em milissegundos. A Figura 09 mostra os tempos de soldagem para a realização de um ponto de solda (AWS, 1997, BLAKELEY, 2000, INTERMACHINERY, 2003, ROBERT, 1998):

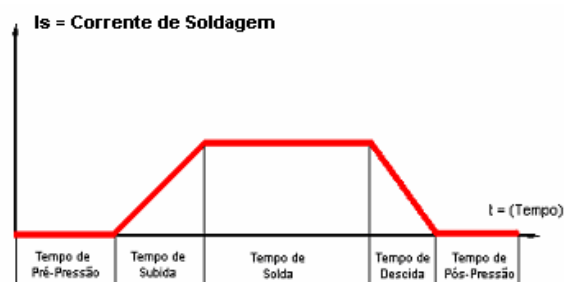


Figura 09: Tempos de soldagem.

3.4.2.1 Tempo de pré-pressão

É a etapa do início do ciclo de solda, antes de se liberar a corrente de soldagem, na qual as faces dos eletrodos pressionam as chapas a serem soldadas. As chapas são mantidas sob pressão, para assegurar a força adequada no momento em que a corrente de soldagem se inicia. A duração da pré-pressão deve ser longa o suficiente para unir as peças e permitir que a força do eletrodo se estabilize. Se o assentamento das peças for ruim, será necessário um aumento no

tempo de pré-pressão para compensar. Quando os eletrodos começam a fechar e pressionar as peças, demora algum tempo para o cilindro pneumático da máquina de solda parar de se mover e a força estabilizar no valor desejado. Este tempo de estabilização depende da geometria das peças e equipamentos que estão sendo usados.

Se o tempo de pré-pressão for curto, e a corrente de soldagem for aplicada antes da força ser estabilizada, vários fenômenos são possíveis de ocorrer:

- Expulsão de material na superfície, resultando em um desgaste prematuro do eletrodo;
- A força do eletrodo pode não ser suficiente para conter a expansão do ponto de solda, resultando numa expulsão interfacial;
- A corrente de soldagem é liberada antes que os eletrodos se fechem, causando arcos ou fagulhas de solda.

3.4.2.2 Tempo de subida

É o tempo entre o início da liberação da corrente de soldagem, até o momento em que ela atinge o seu valor nominal programado para a soldagem. Durante o tempo de subida, ocorre o primeiro consumo de energia para pré-aquecer o material a soldar ou para preparar a solda propriamente dita.

3.4.2.3 Tempo de soldagem

Esta etapa é logo após o tempo de subida, quando a corrente elétrica flui através das peças durante o tempo de soldagem. Neste momento a corrente de soldagem aquece e funde o material no ponto de contato entre as chapas formando o ponto de solda.

Quando o tempo de soldagem é muito longo ocorrem alta indentação, excessiva expulsão de material, e o eletrodo pode aderir na peça. No pior dos casos produz fusão na superfície de contato eletrodo / chapa, onde o metal entre

os eletrodos é completamente fundido, produzindo um buraco nas partes a serem soldadas. Os eletrodos penetram através do metal fundido e pode ocorrer contrato entre eles.

Quando o tempo de soldagem é muito curto, resultará na formação de um pequeno ponto de solda. No pior dos casos resultará na falta de solda.

3.4.2.4 Tempo de descida

Durante este período de tempo a corrente de soldagem aplicada para gerar o ponto de solda é reduzida gradativamente. Estando a rampa de descida ativada durante a programação, o consumo de corrente diminui pouco a pouco durante o período de tempo definido partindo da potência nominal até atingir seu valor final.

3.4.2.5 Tempo de pós-pressão

Nesta etapa os eletrodos estão ainda em contato com as peças sob pressão, depois que a corrente de solda já parou.

O tempo de pós-pressão permite que o ponto de solda solidifique antes que os eletrodo sejam removidos. Se os eletrodos são removidos antes que o processo de solidificação seja completado, o ponto de solda pode ser puxado, separando-se da chapa, e resultando num ponto de solda com diâmetro de ponto pequeno ou numa solda sem fusão. Pode ocorrer a formação de fagulhas de solda se a corrente ainda estiver fluindo enquanto os eletrodos são removidos.

3.4.2.6 Intervalo

É uma etapa de tempo antes que comece o próximo ciclo de soldagem, durante a qual os eletrodos não estão em contato com as peças. Isto permite que os braços da máquina se posicionem para a próxima solda. Este período só tem significado para o modo de operação de pontos em série.

Cabe salientar, que nem todos os controladores de solda têm capacidade para executar todos estes tempos durante o processo de soldagem.

3.4.3 Efeito da força de soldagem

A força é aplicada antes, durante e após a aplicação da corrente de soldagem, com o objetivo de manter a continuidade da corrente elétrica e produzir pontos de solda livres de defeitos. As chapas a serem soldadas devem ser mantidas perfeitamente unidas no local onde será obtido o ponto de solda para permitir que a corrente de soldagem flua de maneira adequada (FENG ET AL, 1998, INTERMACHINERY, 2003, SCHARFF, 1990).

A força do eletrodo afeta a resistência de contato (R_c) elétrico como mostrado na Figura 10, e esta tem efeito dominante na formação do ponto de solda. A resistência R na equação 1, é influenciada pela força de soldagem através de seu efeito na resistência de contato da interface entre as chapas. As superfícies das chapas a serem soldadas, em escala microscópica, são compostas por uma série de picos e vales como mostrado na Figura 11. Quando elas são submetidas à baixa força de eletrodo, o contato real na interface chapa / chapa será apenas nos picos, correspondendo a uma pequena porcentagem da área. Portanto, a resistência de contato será alta. À medida que a força de eletrodo aumenta, os pontos altos sofrem uma deformação e a área de contato na interface chapa / chapa aumenta, decrescendo, assim, a resistência de contato. Na maioria das aplicações, o material do eletrodo possui menor dureza do que as chapas. Conseqüentemente, uma aplicação adequada da força do eletrodo produzirá melhor contato nas interfaces eletrodo / chapa do que na interface chapa / chapa (BLAKELEY, 200, FENG ET AL, 1998, INTERMACHINERY, 2003, SCHARFF, 1990).

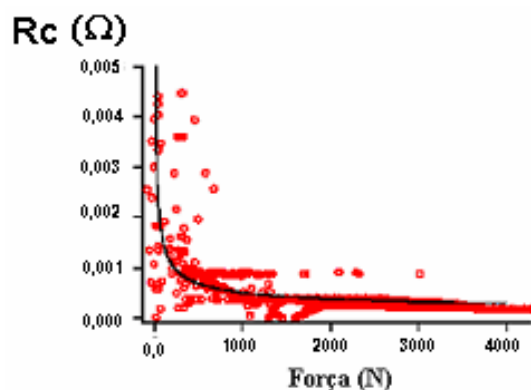


Figura 10: Comparação da resistência de contato em função da força.

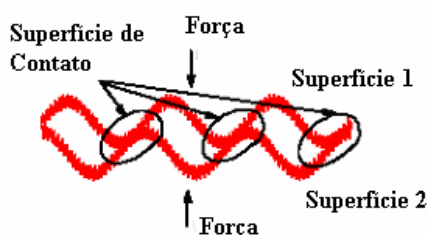


Figura 11: Ilustração de superfícies de contato das chapas.

Ao aumentar a força de soldagem, a corrente de soldagem também deverá ser aumentada até um valor limite. O efeito no calor total gerado, entretanto, pode ser inverso. À medida que a força aumenta, a resistência de contato e o calor gerado na interface diminuem (INTERMACHINERY, 2003, SCHARFF, 1990).

A força do eletrodo deve ser suficiente para conter o metal fundido dentro dos parâmetros dimensionais da face do eletrodo. Se a força for baixa, pode ocorrer expulsão de material na superfície externa da chapa, expulsão de material na interface chapa / chapa e desgaste prematuro do eletrodo. Quando a força é muito alta a resistência de contato na superfície dos dois metais será baixa, reduzindo assim o calor gerado nesta área. Com isso, os pontos de solda formados com alta força do eletrodo, tipicamente exibirão indentação excessiva na superfície externa da chapa, pontos de solda com diâmetro abaixo do especificado ou até mesmo a falta de fusão (HIRSCH).

3.5 Outros Fatores que Afetam a Geração de Calor

3.5.1 Influência das condições superficiais do material base

A condição da superfície das chapas a serem soldadas influencia na geração de calor porque a resistência de contato é afetada por óxidos, sujeira, óleo e outros contaminantes na superfície. Propriedades mais uniformes da solda são obtidas quando as superfícies são limpas. Tais contaminantes podem ainda permanecer aderidos na face do eletrodo, causando rápida deterioração do mesmo (INTERMACHINERY, 2003, VOGLER, 2003).

Para a produção de soldas de alta qualidade, a resistência de contato da superfície das chapas que está em contato com os eletrodos (regiões *b* e *f* na Figura 07) deve ser mínima (INTERMACHINERY, 2003).

A sujeira do material ou os contaminantes da superfície podem ter alta resistência elétrica. Isto normalmente é uma condição incompatível na peça de trabalho e pode produzir variações no processo de soldagem, tais como, expulsão de material, pontos de solda não circulares, pontos de solda com diâmetro abaixo do especificado, eletrodo aderindo na chapa e falta de fusão.

3.5.2 Influência do revestimento do material base

A resistividade elétrica de um metal influencia diretamente no aquecimento por resistência durante soldagem. Em metais de alta condutibilidade térmica tais como Cobre, pouco calor é desenvolvido mesmo sob altas densidades de corrente. A pequena quantidade de calor gerado é rapidamente transmitida para dentro do material circundante e para os eletrodos.

A composição de um metal determina seu calor específico, temperatura de fusão, calor latente de fusão e condutibilidade térmica. Estas propriedades governam a quantidade de calor requerida para fundir o metal e produzir uma solda (INTERMACHINERY, 2003).

Técnicas de soldagem têm sido utilizadas com sucesso na soldagem de aço revestido com zinco. O principal problema apresentado quando da tentativa de se soldar aço galvanizado está no ponto de fusão dos dois metais, zinco e aço, que são significativamente diferentes. Além disso, o ponto de ebulição do zinco é menor que o ponto de fusão do aço. Ao soldar aço galvanizado, a temperatura do zinco será elevada acima do seu ponto de ebulição, fato que promoverá a sua evaporação. Uma representação esquemática do ponto de fusão e ebulição do zinco e do aço galvanizado é feita na Figura 12 (INTERMACHINERY, 2003).

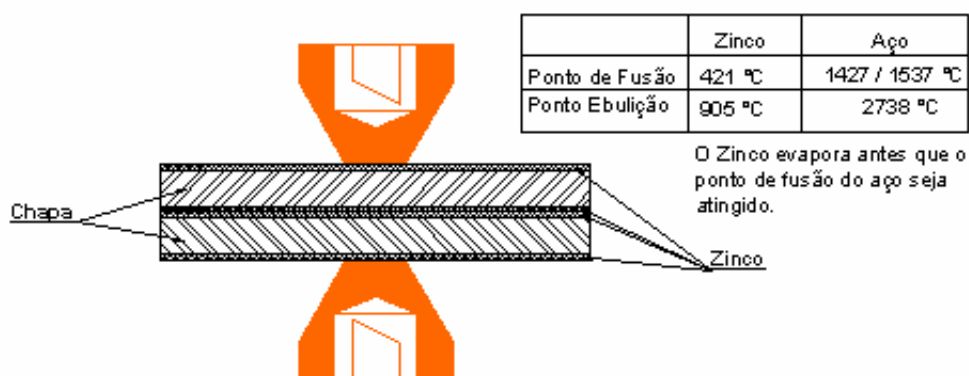


Figura 12: Ponto de fusão e ebulição do zinco e do aço galvanizado.

No caso específico de chapas galvanizadas, uma remoção do revestimento de zinco poderá ocorrer como conseqüência da temperatura atingida na interface eletrodo / chapa, já que o ponto de fusão do zinco é 419 °C, sendo ainda favorecida pela força dos eletrodos na superfície da chapa.

Devido ao fato das resistências de contato serem mais baixas nos aços galvanizados, para se produzir diâmetros satisfatórios de pontos de solda, tempos e níveis de corrente de soldagem são necessariamente mais altos, quando comparados aos aços não revestidos.

A soldabilidade das chapas galvanizadas é conhecida como sendo inferior àquela das chapas de aço sem revestimento. Isto é devido à reação entre o cobre do eletrodo e o zinco do revestimento levando à formação de ligas na face do eletrodo, como será visto na seção 3.7. Isto resulta em consumo excessivo do

eletrodo e, conseqüentemente, em uma diminuição da sua vida útil (INTERMACHINERY, 2003).

3.5.3 Influência dos eletrodos

Os eletrodos são elementos condutores de eletricidade, sendo fabricados de ligas de cobre. Eles desempenham um papel vital na geração de calor, porque conduzem a corrente de soldagem até o material, transferem a pressão necessária para unir as chapas e auxiliam na refrigeração da região de solda. No caso de solda a ponto, a área de contato do eletrodo controla amplamente o diâmetro resultante do ponto de solda e a densidade de corrente de soldagem. Os eletrodos devem ter boa condutibilidade elétrica, mas eles devem também ter resistência mecânica e dureza adequada para resistir a deformação causada por aplicações repetidas e altas solicitações térmicas (INTERMACHINERY, 2003, REU, 1998, RWMA, 2002, SCHARFF, 1990).

3.5.4 Dissipação de calor

Durante a soldagem, o calor é perdido por condução para o metal base adjacente e eletrodos como mostrado na Figura 13. A dissipação de calor continua em taxas variáveis durante a aplicação da corrente e depois, até que a solda tenha se resfriado completamente (INTERMACHINERY, 2003).

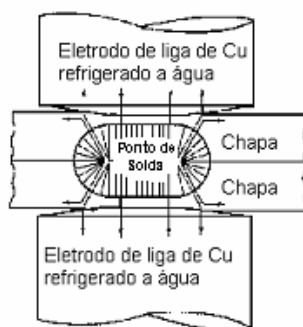


Figura 13: Dissipação de calor durante solda a ponto para o metal circundante e eletrodos.

Se os eletrodos permanecerem em contato com o material após a corrente de soldagem ter cessado, eles rapidamente resfriam o ponto de solda. A taxa de dissipação de calor no metal base circundante decresce com tempos de soldagem mais longos porque um volume maior de metal base terá sido aquecido (INTERMACHINERY, 2003).

Se os eletrodos forem removidos da solda rapidamente após a corrente de soldagem ter cessado, problemas podem aparecer. Com chapas finas, este procedimento pode causar empenamento da região de solda. Com chapas espessas, o tempo deve ser suficiente para resfriar e solidificar o ponto de solda enquanto sob pressão. É melhor, no entanto, ter os eletrodos em contato com o material até que a solda se resfrie completamente de modo que tenha resistência suficiente para resistir ao carregamento imposto quando a força de eletrodo for liberada.

3.6 Materiais e Processo de Fabricação das Capas de Eletrodo

As capas de eletrodo são um dos componentes mais importantes nos processos de solda a ponto. A qualidade final do ponto de solda depende muito do estado da capa de eletrodo durante o processo de soldagem. Para que isso ocorra, os materiais das capas de eletrodos utilizadas em solda a ponto devem ter condutividades elétrica e térmica suficientemente altas e resistência de contato suficientemente baixa para prevenir o aquecimento excessivo da superfície das chapas e diminuir a velocidade de formação de liga de cobre entre o material do eletrodo com o revestimento da chapa. Devem possuir ainda, resistência mecânica suficientemente alta para resistir à deformação em elevadas pressões e temperaturas de operação, transmitir a força de soldagem às chapas, dissipar rapidamente o calor da zona de solda e não aderir na peça (INTERMACHINERY, 2002).

Os eletrodos à base de cobre estão classificados segundo a Resistance Welder Manufacturers Association (RWMA) em 3 classes (RWMA, 2002):

- (a) Classe 1: É composta de materiais não tratáveis termicamente e endurecidos por trabalho a frio, que não afeta as altas condutibilidades térmica e elétrica;
- (b) Classe 2: É composta por materiais com propriedades mecânicas mais altas e condutibilidades 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 01 mostra as características dos materiais de fabricação dos eletrodos conforme a classificação da RWMA (Resistance Welder Manufacturers Association) (CRAGGS, 2002, RWMA, 2002).

Tabela 01: Característica dos eletrodos segundo RWMA.

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 em solução que é envelhecida em certas condições de tempo e temperatura, promovendo a formação de finos precipitados. A exposição a altas temperaturas por períodos maiores de tempo permite que os precipitados cresçam, reduzindo a resistência devido ao super envelhecimento. As temperaturas atingidas durante a soldagem por resistência são suficientes para destruir a estrutura dos precipitados. A condutibilidade elétrica destes tipos de eletrodo está na faixa de 80% a 90% IACS (International Annealing Copper Standard) (INTERMACHINERY, 2002).

As ligas de cobre endurecidas por precipitação passam por um procedimento complexo de tratamento térmico como descrito abaixo:

1ª Etapa: Tratamento térmico de solubilização na temperatura aproximada de 1000°C . Nesta temperatura os átomos de cromo e zircônio estão distribuídos aleatoriamente na matriz de cobre (INTERMACHINERY, 2002).

2ª Etapa: Têmpera em água. Entre 400°C e 700°C , os átomos de cromo e zircônio tem uma tendência a formar precipitados na matriz de cobre como mostrado na Figura 14, mas o resfriamento é muito rápido para que a precipitação ocorra: o resultado é uma solução sólida supersaturada. A resistência desta estrutura é um pouco mais alta do que aquela do cobre puro e os átomos de cromo e zircônio diminuem a condutividade elétrica (INTERMACHINERY, 2002).

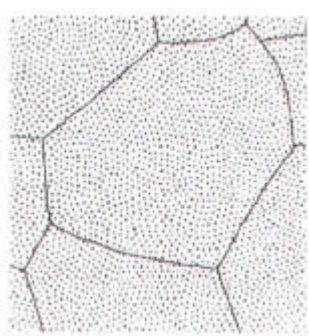


Figura 14: Matriz de cobre com precipitados coerentes.

3ª Etapa: Envelhecimento (tratamento térmico a temperaturas médias) abaixo de 500°C para formar precipitados incoerentes com a matriz de cobre, como mostrado na Figura 15. Esta união imperfeita provoca tensões ao redor dos precipitados e é esta tensão que é a responsável pela alta resistência mecânica destas ligas. Um outro resultado do processo de envelhecimento é o aumento da condutividade elétrica, já que o número de átomos de cromo e zircônio na matriz de cobre diminui pela precipitação (INTERMACHINERY, 2002).

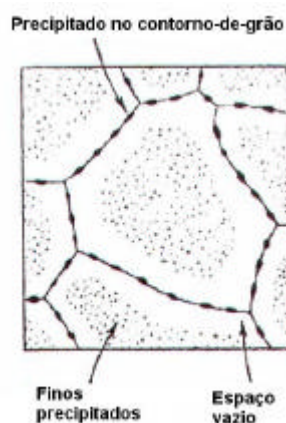


Figura 15: Formação de precipitados incoerentes com a matriz de cobre.

4ª Etapa: Trabalho a frio adicional aumenta a resistência. Esse trabalho adicional é extrusão, trefilação e estampagem a frio para obtenção do formato final da capa de eletrodo.

O que foi descrito acima não pode ser considerado caso o material seja exposto a temperaturas prolongadas acima de 500°C , já que as propriedades progressivamente passam para uma condição de recozimento com precipitados com contornos de grão grosseiros, em outras palavras, melhora mecanicamente um pouco em relação ao cobre puro, mas com condutividade elétrica ruim. A Figura 16 mostra esses precipitados com contornos de grãos grosseiros (INTERMACHINERY, 2002).



Figura 16: Precipitados com contorno de grãos grosseiros.

Algumas ligas de cobre podem ser produzidas com cobre livre de oxigênio. Estas ligas não apresentam partículas de óxido, são produzidas sem o uso de agentes químicos desoxidantes, não apresentando em sua composição química resíduos de agentes desoxidantes, como o fósforo. O cobre livre de oxigênio, apresenta melhores condições para os trabalhos de conformação a frio que ocorre com as capas de eletrodo. O cobre sendo isento de oxigênio, e portanto, não suscetível à fragilização pelo hidrogênio, possui resistência mecânica mais elevada em relação as ligas de cobre que contém oxigênio, particularmente no que diz respeito á resistência ao recozimento. A vantagem de se utilizar as ligas de cobre livre de oxigênio é que elas apresentam uma condutibilidade elétrica maior que as outras ligas, cerca de 90 a 95% IACS (INFOMET – 1998).

A Figura 17 mostra esquematicamente o processo de fabricação das ligas de cobre livre de oxigênio. Uma liga de cobre com alta pureza é mantida em fusão sob uma camada de carvão, posteriormente o metal líquido é protegido de um contato atmosférico após a fusão por um gás inerte, seja nitrogênio ou argônio. Na seqüência o metal líquido é moldado em tarugos que são adequados em

comprimentos para o processo de extrusão (CRAGGS, 2002, INTERMACHINERY, 2002).

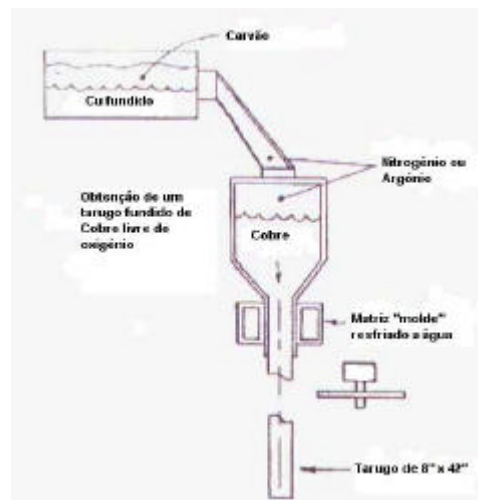


Figura 17: Processo de fabricação de ligas de cobre livre de oxigênio.

Existem ainda as ligas de CuAl_2O_3 de “Cobre endurecido por dispersão” (DSC), um membro da família dos “Compostos Metálicos da Matriz” (MMC) que inclui outras inovações de alta tecnologia tais como Alumínio com partículas reforçadas para aplicações aeroespaciais e ferro fundido vermicular reforçado para blocos fundidos de motor (CRAGGS, 2002, INTERMACHINERY, 2002, RWMA, 2002).

Ligas convencionais são combinações de elementos metálicos que interagem um com outro, por exemplo, ligas Alumínio – Zinco formarão intermetálicos de partículas de AlZn que servem para distorcer a estrutura metalúrgica e com isso fornecer a rigidez necessária. MMC's são diferenciados das ligas convencionais já que elas são uma mistura de elementos metálicos e não-metálicos, tecnicamente elas não são ligas, mas “Compósitos” (CRAGGS, 2002, INTERMACHINERY, 2002, RWMA, 2002).

As capas de eletrodo fabricadas com CuAl_2O_3 são um compósito endurecido por dispersão, sendo a matriz o cobre com adições de partículas de

Al_2O_3 , RWMA Classe 20, (DSC) AL-60, contendo 1,1% Al_2O_3 (CRAGGS, 2002, INTERMACHINERY, 2002, RWMA, 2002).

O princípio básico de produção do CuAl_2O_3 é a substituição dos elementos metálicos por uma cerâmica, um elemento ou um composto com excepcional estabilidade em alta temperatura.

O processo de fabricação desta capa é bastante interessante, envolvendo a fusão de uma liga Cu-Al, seguida de atomização para oxidação seletiva do Al. Obtém-se um pó contendo partículas de cobre (Cu) e Al_2O_3 , que é extrudado e trefilado até as dimensões finais. O tamanho das partículas de Al_2O_3 é 3 a 12 nm, com espaçamento entre partículas de 30 a 100 nm, o que acarreta uma densidade entre $10^{16} - 10^{17}$ partículas / cm^3 . Com essas características de fabricação, o Al_2O_3 ancora os contornos de grão do cobre, limitando seu tamanho. A restrição de crescimento dos grãos favorece a manutenção da dureza a quente. A Figura 18 ilustra o processo de fabricação do CuAl_2O_3 (CRAGGS, 2002, INTERMACHINERY, 2002).

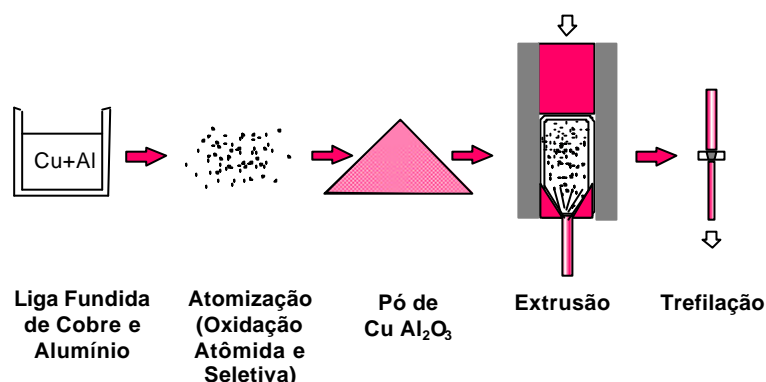
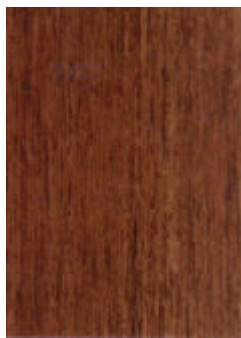


Figura 18: Processo de fabricação do CuAl_2O_3 .

Como o Al_2O_3 não se dispersa em um banho fundido, o tamanho de partículas de Al_2O_3 deve ser pequeno suficiente para não se tornar uma inclusão, que causaria defeitos (CRAGGS, 2002, INTERMACHINERY, 2002).

Sendo o Al_2O_3 inerte, estável até 2300°C e não reagindo com a matriz de cobre, as partículas de Al_2O_3 não tendem a coalescer nas temperaturas obtidas

durante o processo de soldagem por resistência e, portanto, a capa de eletrodo não perde suas propriedades a altas temperaturas. A Figura 19a mostra a micro estrutura do CuAl_2O_3 antes da exposição à alta temperatura e a Figura 19 b, após o aquecimento a 800°C , indicando que não apresenta nenhuma mudança, sem perdas de propriedades (CRAGGS, 2002, INTERMACHINERY, 2002).



a: Antes do aquecimento.



b: Após 800°C .

Figura 19: Micro-estrutura do CuAl_2O_3 antes da exposição à alta temperatura e após 800°C (ampliação 33x).

3.7 Desgaste dos Eletrodos

O processo de soldagem por resistência envolve complicadas interações entre as propriedades físicas e metalúrgicas da chapa metálica, revestimento da chapa, materiais do eletrodo e os parâmetros de soldagem. Devido a essas interações, ou seja, exposição do eletrodo a altas temperaturas, altas pressões, faz com que o eletrodo sofra alterações nas suas características originais, formando crateras na face de contato e aumento do diâmetro da face do eletrodo, pois entre 50 e 100 pontos de solda o eletrodo perde dureza. A estas mudanças nas características originais do eletrodo chama-se de desgaste do eletrodo (INTERMACHINERY, 2003, JOINING, 1997, REU, 1997).

Um outro problema inerente à soldagem de aços galvanizados com eletrodos de cobre é que, após a soldagem de 50 pontos de solda aproximadamente, ocorre a formação de uma camada de difusão (camada de latão) na face dos eletrodos (REU, 1997). A solda a ponto consiste em unir metais

através da aplicação de pressão e calor, o que favorece a formação de latão. Infelizmente, latão tem uma resistência maior ao fluxo de corrente elétrica do que o cobre dos eletrodos, fazendo com que um calor excessivo seja gerado nessa região, superaquecendo e recozendo o cobre do eletrodo, podendo resultar também no grudamento do eletrodo na chapa. Desta forma, o cobre com dureza menor se deforma numa taxa maior, fazendo com que o diâmetro do eletrodo aumente, reduzindo, assim, a densidade de corrente atuante para formar o ponto de solda. O que se deve fazer é aumentar a corrente para que a mesma densidade seja mantida. Isso provoca mais deformação na face do eletrodo devido ao aumento de calor e este ciclo se segue até que o eletrodo esteja completamente desgastado (INTERMACHINERY, 2003, REU, 1997).

A aplicação de soldagem pulsada pode ser uma das formas para minimizar os problemas de desgaste de eletrodos na soldagem de chapas galvanizadas. A técnica de soldagem pulsada é a aplicação de um pulso de corrente para interromper o fluxo de corrente de soldagem e reaplicá-lo novamente uma ou mais vezes sem a liberação da força de soldagem. O primeiro pulso de corrente de soldagem pode ser selecionado de tal forma a fornecer calor suficiente para fundir o zinco, sem criar uma quantidade excessiva de óxido. Após um curto intervalo de resfriamento, o próximo pulso será suficiente para efetuar uma solda satisfatória, aço / aço. O resultado é uma boa solda e uma vida útil de eletrodo mais longa. A expulsão de metal da região da solda pode ser reduzida a zero com a utilização da soldagem pulsada (INTEMACHINERY, 2003, TECNOWELDING, 2004).

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 20 mostra a distribuição de temperatura ao longo da capa de eletrodo, utilizando uma corrente de soldagem de 21 kA e um tempo de soldagem de 165 ms (YEUNG, 1999).



Figura 20: Distribuição de temperatura (°C) ao longo da capa de eletrodo.

Dong, Kimchi e Holmes (1995) observaram uma alta distribuição de densidade de corrente, na borda das crateras formadas na face do eletrodo. As crateras são as depressões que aparecem na face dos eletrodos. Essa afirmação é baseada em observações de termografias, onde a temperatura na região da cratera é entre 982 e 1093°C quando comparada com a temperatura de 871°C em um eletrodo sem cratera, como mostram as Figuras 21 e 22. Embora o processo de formação do ponto de solda não seja afetado no estágio inicial de formação da cratera, a borda da cratera sendo aquecida a uma temperatura mais alta, tende a desenvolver um fluxo plástico mais facilmente que numa região sem crateras. Como resultado a cratera tende a acelerar o processo de desgaste do eletrodo. As Figuras 21 e 22 mostram as termografias realizadas em eletrodos com e sem crateras.

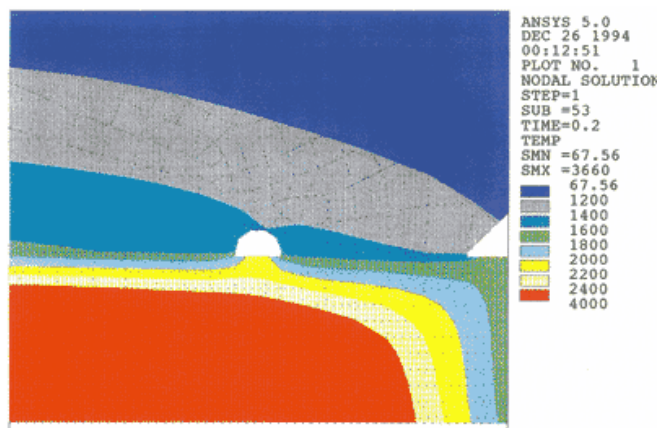


Figura 21: Distribuição de temperatura (°F) em $t= 0,2$ s, eletrodo com cratera.

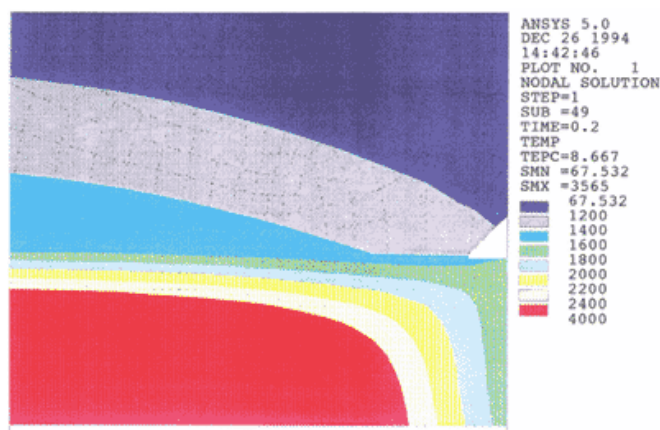


Figura 22: Distribuição de temperatura (°F) em $t= 0,2$ s, eletrodo sem cratera.

Com o desgaste do eletrodo, a densidade de corrente de soldagem diminui em função do aumento da área da face do eletrodo e com isso começam a ocorrer problemas na qualidade do ponto de solda. Para não deixar que os problemas provenientes do desgaste do eletrodo afetem a qualidade da solda, existem alguns procedimentos que devem ser executados, dentre eles podemos destacar: Trocar o eletrodo, trabalhar com curvas de correntes para compensar o aumento da área e contaminação da face do eletrodo e a fresagem dos eletrodos.

Vários procedimentos utilizados para minimizar os problemas provenientes do desgaste das capas de eletrodos, durante a soldagem de chapas galvanizadas são descritos a seguir.

3.7.1 Troca de eletrodos

A troca de eletrodos é a prática menos utilizada para minimizar o problema do desgaste. Pois o eletrodo influencia diretamente no custo de produção e produtividade da linha de soldagem. Quando realiza-se a troca dos eletrodos, é necessário que a linha de produção seja parada e, em alguns casos, os eletrodos não foram utilizados até seu limite.

3.7.2 Curvas de corrente

As curvas de corrente ou steps de corrente são utilizados nos processos de soldagem a ponto, para determinar o decurso da subida de corrente de soldagem (I_s) como indicado na Figura 23. O valor da corrente de soldagem (I_s) aumenta com o aumento do número de pontos de solda. Esse procedimento é adotado para compensar o aumento no diâmetro da face do eletrodo, e conseqüente diminuição da densidade de corrente.

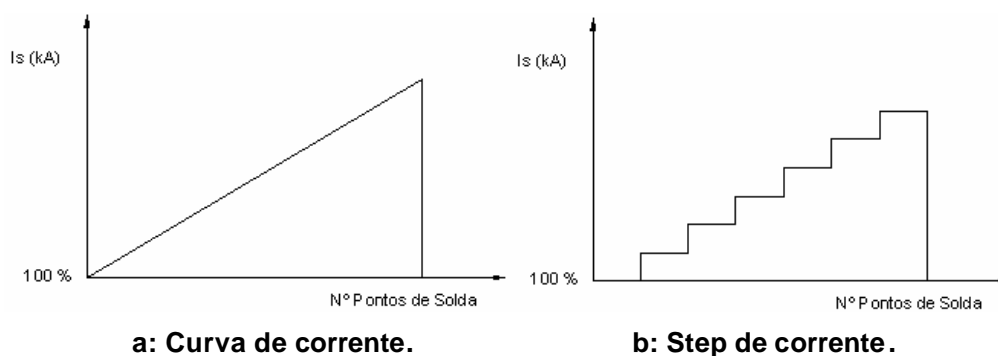


Figura 23: Curva e step de corrente.

Existem 3 fatores que influenciam na programação das curvas de corrente (ROBERT, 1998):

- 01 – O número de pontos por degrau, ou seja, a quantidade de pontos que a máquina irá executar antes que a corrente seja aumentada;
- 02- Qual o valor de subida de corrente (corrente em % em relação ao valor inicial) por degrau;
- 03 – Os valores de corrente são absolutos e em kilo Ampéres (kA) por degrau.

Quando o eletrodo atinge um certo nível de desgaste, somente a aplicação das curvas de corrente não são suficientes para garantir a qualidade dos pontos de solda, pois os níveis de correntes de soldagem tornam-se muito altos, e o processo de desgaste dos eletrodos começa a acelerar. Pode-se então, combinar as curvas de corrente com fresagem dos eletrodos como indicado na Figura 24. Com esta programação preestabelece a quantidade de fresagens do eletrodo até se atingir o seu desgaste máximo. Assim aumenta-se a duração do eletrodo e assegura-se a qualidade dos pontos de solda.

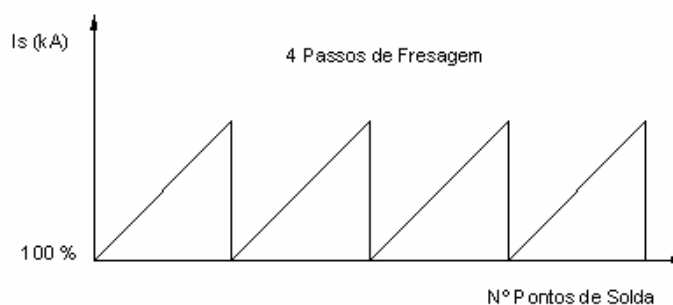


Figura 24: Curva de corrente combinada com fresagens.

3.7.3 Fresagem dos eletrodos

A fresagem de eletrodos é a prática mais recomendada e usada pelas empresas. A fresagem é um processo de usinagem rápido e eficiente utilizado para recuperar o perfil original do eletrodo após alguns pontos de solda. A

fresagem dos eletrodos é uma necessidade, provocada basicamente por dois fatores:

- Formação de latão na face de soldagem do eletrodo;
- Aumento da área da face do eletrodo.

Para realizar a fresagem dos eletrodos é necessário a utilização de uma ferramenta chamada fresador de eletrodos. Com ele é possível fresar a face do eletrodo e com isso manter o perfil original, podendo-se ainda ajustar os parâmetros de soldagem.

3.7.4 Utilização de limas

Algumas empresas utilizam um outro procedimento para a minimizar os problemas decorrentes do desgaste dos eletrodos, que é a utilização de uma lima para limpar a face do eletrodo e recuperar o diâmetro original da face. A utilização de lima para fazer a limpeza deve ser evitada. Ela deforma o perfil do eletrodo, não mantendo sempre o mesmo perfil, e com isso modifica os parâmetros do processo de soldagem. Pois nem sempre ela consegue manter o mesmo diâmetro e o paralelismo das as faces.

Esta é uma economia que vai sair caro, pois podem exigir retrabalho das peças, pontos soltos, indentação excessiva. A forma do eletrodo após sofrer um retrabalho deve permanecer sempre próxima a de um eletrodo novo, e isso não é possível com a lima (TECNOWELDING, 2004, VOLKSWAGEN, 2000).

3.8 Processo de Fresagem de Eletrodos

Para atingir uma qualidade constante do ponto de solda, faz-se necessário a limpeza de todos os eletrodos em intervalos regulares. Isso envolve todos os tipos de máquinas de solda a ponto: Pinças manuais, pinças de robôs e máquinas estacionárias.

Os fresadores são utilizados para fazer a limpeza dos eletrodos de qualquer diâmetro e forma da face. Para serem eficientes, devem limpar os eletrodos entre 3 e 5 segundos, de preferência sem obstrução da produção.

Os eletrodos superiores e inferiores devem ser limpos com a máquina na posição fechada, sob uma carga de 0,5 a 1,5 kN, para que no final da soldagem os pontos de solda sejam concêntricos (ETS, 2000).

3.8.1 Vantagem de fresar o eletrodo

Em solda a ponto, a fresagem de eletrodos apresenta as seguintes vantagens (REU, 1997, TECNOWELDING, 2004):

- Reduz o desperdício de eletrodos;
- Reduz o tempo de troca dos eletrodos;
- Aumenta a produtividade;
- Os parâmetros de soldagem serão mais constantes (Força, Corrente, Tempo e os parâmetros do circuito de refrigeração);
- Transformadores menores;
- Economia de energia;
- Aumento do número dos pontos de solda, comparados com os pares de eletrodos sem fresagem;
- Redução da parada de máquina para troca de eletrodos;
- Menos consumo de eletrodo.

3.8.2 Formas de fresagem

São duas as formas de fresagem. A fresagem lateral e a fresagem de topo e lateral. Ambas são corretas, mas com diferentes influências na soldagem e nos parâmetros de fresagem (TECNOWELDING, 2004).

3.8.2.1 Fresagem lateral

O material é removido somente na lateral do eletrodo, restaurando o diâmetro da face do eletrodo, deixando a face de contato contaminada, com indicado na Figura 25. Usado principalmente em soldagem de chapas sem revestimento e em alguns casos em chapas zincadas, de maneira a recuperar apenas o diâmetro dos pontos de solda (TECNOWELDING, 2004).

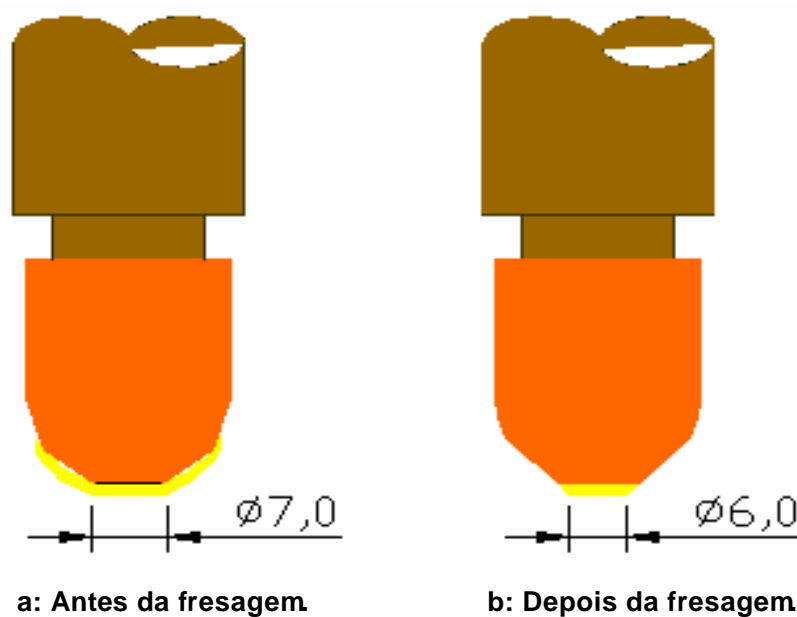
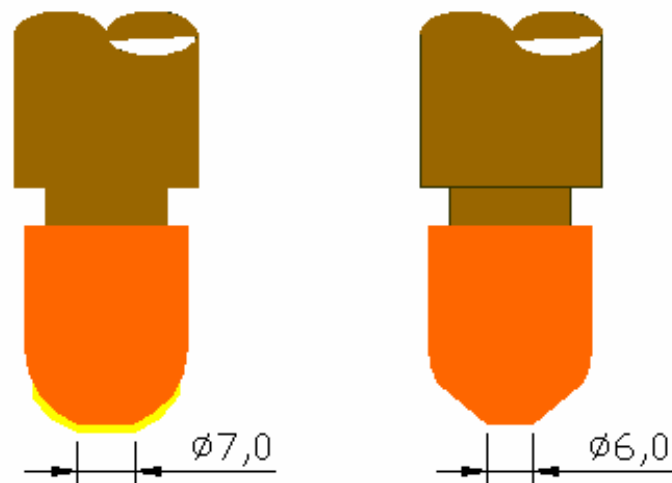


Figura 25: Fresagem lateral.

3.8.2.2 Fresagem de topo e lateral

O material é removido na face e na lateral do eletrodo, restaurando o diâmetro, e limpando a face, a qual fica em contato com a chapa, trazendo de volta o material original do eletrodo, conforme indicado na Figura 26. Usado principalmente em chapas de dupla zincagem e chapas de alumínio, para recuperar o diâmetro do ponto de solda e remover a camada de latão (Cu + Zn) que formam durante a soldagem na face do eletrodo. Com este tipo de fresagem o incremento de corrente é ausente ou é reduzido ao mínimo (< 10%) (TECNOWELDING, 2004).



a: Antes da fresagem

b: Depois da fresagem

Figura 26: Fresagem de topo e lateral.

3.8.3 Tipos de fresagem

A fresagem de eletrodos pode ser de três tipos: fresagem manual, fresagem automática e fresagem off-line.

3.8.3.1 Fresagem manual

Na fresagem manual, o fresador pode ser mecânico, pneumático ou elétrico. Este tipo de fresagem melhorará o ciclo de soldagem, porém haverá perda de produtividade, pois a linha de produção estará parada. A fresagem manual pode ser feita depois de cada ciclo de soldagem ou em intervalos programados, dependendo do desgaste dos eletrodos. A fresagem leva aproximadamente 3 a 5 segundos. A Figura 27 mostra uma forma de fresagem manual (TECNOWELDING, 2004).



Figura 27: Fresagem com fresador manual mecânico.

3.8.3.2 Fresagem automática

Em uma fresagem automática, o fresador é montado na linha onde ele pode ser acessado pelo robô de solda como mostrado na Figura 28. O robô é programado para fresar (sem parar a linha) no intervalo de soldagem das peças. Mantendo a linha em movimento, maximizando a eficiência e os custos são minimizados porque os eletrodos mantêm uma geometria apropriada para soldas eficientes.

A fresagem pode ser feita depois de cada ciclo de trabalho, depois do segundo ciclo de trabalho, etc. Isso depende de como os pontos de solda são feitos em cada ciclo. A fresagem leva aproximadamente 1 a 2 segundos, e é executada enquanto a peça de trabalho está sendo carregada, descarregada ou transportada. Manutenções apropriadas na geometria do eletrodo minimizam perdas de tempo na produção, otimizam custos e aumenta a eficiência das soldas (TECNOWELDING, 2004).



Figura 28: Fresa elétrica para pinça de solda de robô.

3.8.3.3 Fresagem off-line

A fresagem off-line é outra forma de recuperar a forma original da face do eletrodo após a soldagem. A fresagem off-line pode se ser realizada em um dispositivo desenvolvido especialmente para este fim, chamado fresador off-line mostrado na Figura 29, ou pode ser realizada em um torno. A fresagem off-line é utilizada para reduzir os custos com os eletrodos, porém há perda de produtividade na linha, uma vez que há a necessidade de parar a máquina de soldagem para realizar a troca dos eletrodos (TECNOWELDING, 2004).

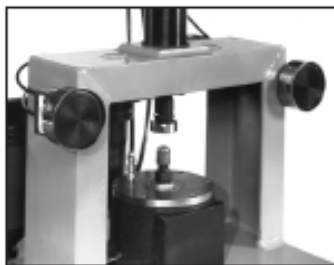


Figura 29: Fresador off-line.

3.8.4 Intervalos de fresagem

O intervalo dos ciclos de fresagem é difícil de ser definido, porque está ligado a alguns fatores: Material utilizado, tipo de revestimento, espessura do material, grau de limpeza da chapa, tipo do eletrodo, etc. A Tabela 02 apresenta valores orientativos para os intervalos de fresagem dos eletrodos em relação ao tipo e revestimento do material que está sendo soldado (TECNOWELDING, 2004).

Tabela 02: Frequência de fresagem em função do tipo de material.

	Tipo de Material		
	Não Zincada	Duas Faces Zincadas	Alumínio
Nº de pontos de solda entre duas fresagens. Verificar: - Espessura da Chapa. - Dimensão do Eletrodo. - Grau de limpeza da chapa.	200 a 800 pontos	50 a 400 pontos	15 a 75 pontos

3.8.5 Defeitos provenientes do processo de fresagem

Cuidados especiais na fresagem manual devem ser tomados, pois a incorreta fresagem pode resultar em um número de condições defeituosas, tais como:

- Não paralelismo entre as faces.
- Diâmetro errado da face do eletrodo.
- Limpeza insuficiente do material.

A Figura 30 abaixo mostra estas condições.

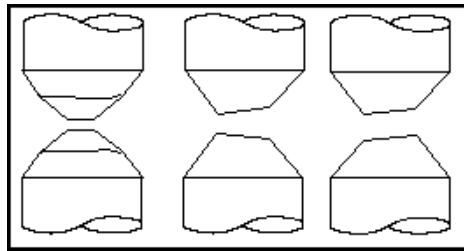


Figura 30: Efeito da incorreta fresagem do eletrodo.

Os problemas provocados pela incorreta fresagem do eletrodo resultam em vários defeitos de soldagem, que afetam a qualidade, custo e manutenção dos eletrodos. Os defeitos que podem ocorrer devido à incorreta fresagem são (TECNOWELDING, 2004):

- Solda com baixa resistência mecânica;
- Trincas e Crateras na face do eletrodo;
- Excessiva indentação;
- Expulsão de material na interface chapa / eletrodo;
- Fusão na interface chapa / eletrodo;
- Falta de solda;
- Ponto de solda não circular;
- Grudamento do eletrodo na chapa;
- Pontos de solda com diâmetro pequeno;
- Indentação de solda desigual;
- Necessidade de inspeção visual na face do eletrodo depois da fresagem.

3.9 Parametrização de Máquinas de Solda a Resistência

3.9.1 Procedimento de parametrização

O procedimento de parametrização de máquinas de solda consiste em introduzir no controle de solda, os parâmetros de soldagem necessários para realizar soldas que atendam as especificações da engenharia para um tamanho mínimo de um ponto de solda e padrões de qualidade quanto ao aspecto visual.

Além de introduzir os parâmetro de soldagem no controlador de solda, o procedimento de parametrização de máquinas também inclui a verificação de alguns itens da máquina que podem gerar problemas durante o processo de soldagem. Esta verificação consiste em medir a vazão da água de refrigeração que passará pelos eletrodos, alinhamentos dos eletrodos, verificação se há fugas de corrente quando for realizar os pontos de solda. Procedese então a execução de alguns pontos de solda em corpos de prova com as mesmas espessuras das chapas que serão soldadas, e através do teste de arrancamento verificar-se o diâmetro do ponto de solda e também o aspecto visual da solda.

3.9.2 Programas de soldagem

Os programas de soldagem devem ser considerados como um guia, a fim de estabelecer um ponto de partida para a soldagem a ponto de aços galvanizados, mas este guia pode ser modificado dependendo da aplicação particular a que se destina.

Os programas de soldagem devem evitar que a corrente de soldagem seja liberada antes da força dos eletrodos ser a suficiente para pressionar as chapas. O sistema de pressão da máquina tem que apresentar tal dinamismo que oscilações de pressão pelo deslocamento de eletrodos possam ser interceptados. O tempo de solda deve ser o mais curto possível para evitar um super aquecimento dos eletrodos e conseqüentemente o seu desgaste prematuro (REU, 1997, TECNOWELDING, 2004).

Um bom começo no desenvolvimento de procedimentos de soldagem é usar um dos que já estão desenvolvidos. Estes podem vir das especificações da corporação (Empresa), procedimentos AWS (American Welding Society) ou procedimentos publicados pela RWMA (Resistance Welder Manufacturers Association). Estes procedimentos podem ser usados como referência. É necessário realizar testes para medir o diâmetro do ponto de solda e verificar se o tamanho é aceitável.

A seleção de ajustes dos parâmetros de soldagem estão apresentado na Tabela 03. Estes valores devem ser usados como valores orientativos no início do processo de parametrização (INTERMACHINERY, 2003, REU, 1997, TECNOWELDING, 2004).

Tabela 03: Tabela orientativa de parâmetros de soldagem para chapas galvanizadas.

Espessura da Chapa (S) mm	Força do Eletrodo (kN)	Tempo de Soldagem (ms)	Corrente de Soldagem (kA)	Diâmetro Mínimo do Ponto de Solda (mm)
0,5	1,8	120	8 – 9	3,0
0,8	2,5	160	10 – 11	3,8
1,0	3,0	200	11 – 12	4,2
1,2	3,5	240	12 – 14	4,6
1,5	4,5	320	14 – 16	5,1
2,0	6,0	400	16 – 18	5,9
2,5	8,0	560	18 – 20	6,6

Os valores da Tabela 03 são adequados para aços galvanizados com peso de revestimento comercial igual ou inferior a 400 g/m². Para camadas mais espessas (maior peso de revestimento), é necessário um incremento na corrente de soldagem ou no tempo de soldagem (REU, 1997 ,TECNOWELDING, 2004).

3.9.2.1 Corrente de soldagem

Para a soldagem de aços galvanizados, recomenda-se a utilização de correntes mais altas do que aquelas empregadas na soldagem de aços sem revestimento e de mesma espessura do material base. Estas correntes mais altas são necessárias devido à baixa resistência de contato do revestimento de zinco. A necessidade de correntes mais altas implica na utilização de transformadores mais robustos bem como em um sistema de resfriamento mais eficiente para evitar superaquecimento do transformador (INTERMACHINERY, 2003, TECNOWELDING, 2004).

3.9.2.2 Tempo de subida

Um certo tempo é necessário para deslocar o zinco das interfaces da chapa antes que a formação do ponto solda se inicie no metal de base. Este tempo entre o início do fluxo da corrente e o início da formação do ponto de solda chama-se de tempo de subida, e é muito mais longo para aços galvanizados do que para aços sem revestimento.

Para se obter uma vida útil do eletrodo otimizada, é necessário que haja um balanço entre corrente de soldagem e os tempos de soldagem. Condições de tempos de soldagem curto, e alta corrente ou tempos de soldagem longo e baixa corrente pode resultar em uma vida útil menor. Conseqüentemente, melhores resultados podem ser obtidos mediante utilização de valores intermediários tanto de corrente quanto de tempos de soldagem (INTERMACHINERY, 2003, TECNOWELDING, 2004).

3.9.2.3 Tempo de soldagem

Tempos de soldagem muito curtos levam a um aquecimento excessivo da zona de solda fazendo com que o zinco se evapore da superfície, expondo o metal base e permitindo o início do processo corrosivo. Tempos de soldagem

longos minimizam este efeito, mas neste caso, é provável que ocorra a aderência da face do eletrodo na chapa e um rápido desgaste do eletrodo (INTERMACHINERY, 2003, TECNOWELDING, 2004).

3.9.2.4 Tempo de pós-pressão

O tempo de pós-pressão exerce uma influência no resfriamento e, por conseqüência, na vida útil dos eletrodos. A solução para evitar estes inconvenientes é empregar valores de tempo de pós-pressão suficientes para permitir que o zinco se solidifique sob a pressão do eletrodo e garantir sua aderência ao aço. O contato entre as chapas aquecidas e os eletrodos não deve ser mantido por um tempo acima do mínimo requerido para a solidificação do ponto de solda de forma que a superfície de trabalho do eletrodo possa se resfriar antes de iniciar o próximo ciclo de soldagem (INTERMACHINERY, 2003, TECNOWELDING, 2004).

3.9.2.5 Força de eletrodo

Algumas empresas recomendam o emprego de uma alta força de eletrodo para soldar aço galvanizado, mas outros afirmam que valores de tais amplitudes são desnecessárias. Acredita-se que uma alta força seja necessária para expulsar o zinco da zona de metal fundido, necessitando em contrapartida de altos valores correntes, o que reduz a vida útil dos eletrodos.

Por outro lado, força de eletrodo muito alta resulta em excessiva indentação, enquanto a camada de zinco que protege a superfície externa é quase que completamente expulsa.

Existe uma tolerância razoavelmente ampla para os valores recomendados de força de eletrodo sem que haja uma influência significativa na qualidade de solda e durabilidade dos eletrodos. Esta faixa deve ser especificada nas aplicações individuais (INTERMACHINERY, 2003, TECNOWELDING, 2004).

3.9.2.6 Velocidade de soldagem

Quanto maior a velocidade de soldagem, menor é o tempo entre soldas e menor é o tempo para resfriamento dos eletrodos. Velocidades moderadas de até 50 soldas por minuto são favoráveis para garantir a durabilidade dos eletrodos (INTERMACHINERY, 2003, TECNOWELDING, 2004).

3.9.3 Desenho do eletrodo

A forma da face de contato do eletrodo é muito importante, mas o diâmetro do corpo do eletrodo deve permitir livre circulação da água, garantindo, desta forma, um resfriamento adequado da face do eletrodo. Faces com forma esférica não são consideradas satisfatórias já que a absorção do zinco altera a área de contato de forma significativa, decrescendo a densidade de corrente na zona de solda até um nível onde a fusão não pode ser mais obtida com os ajustes iniciais de soldagem (INTERMACHINERY, 2003, RWMA, 2002, TECNOWELDING, 2004).

Um perfil de eletrodo do tipo cone truncado é recomendado, sendo que o ângulo de inclinação do cone deve ser de aproximadamente 30° para um bom desempenho. A Figura 31 mostra uma capa de eletrodo tipo cone truncado (INTERMACHINERY, 2003, RWMA, 2002, TECNOWELDING, 2004).



Figura 31: Capa de eletrodo tipo cone truncado.

3.9.4 Alinhamento do eletrodo

Os eletrodos devem ser alinhados durante o processo de parametrização das máquinas de solda a ponto, pois um desalinhamento produz

características desfavoráveis no processo e na qualidade da solda. O uso de eletrodos com face plana faz com que o seu alinhamento seja otimizado para valores ótimos de tamanho do ponto de solda e desempenho de soldagem. Quando as forças dos eletrodos são aplicadas corretamente, as faces de contato nos dois eletrodos devem se encaixar nos planos horizontal e vertical. O diâmetro da face de contato deve ser ajustado à espessura da chapa (TANG ET AL, 2003, TECNOWELDING, 2004).

Os desalinhamentos axiais ou angulares podem causar irregularidades na forma e redução do tamanho do ponto de solda, devido a uma distribuição assimétrica de força e corrente de soldagem. Os desalinhamentos ocorrem quando as faces de contato superior e inferior não são paralelas ou os centros de contatos superior e inferior não é coincidente (LI, 2001, TANG ET AL, 2003, TECNOWELDING, 2004).

A Figura 32 mostra os tipos de desalinhamentos, e a Figura 33 mostra o não paralelismo dos centros de contato das capas de eletrodos com a peça a ser soldada.

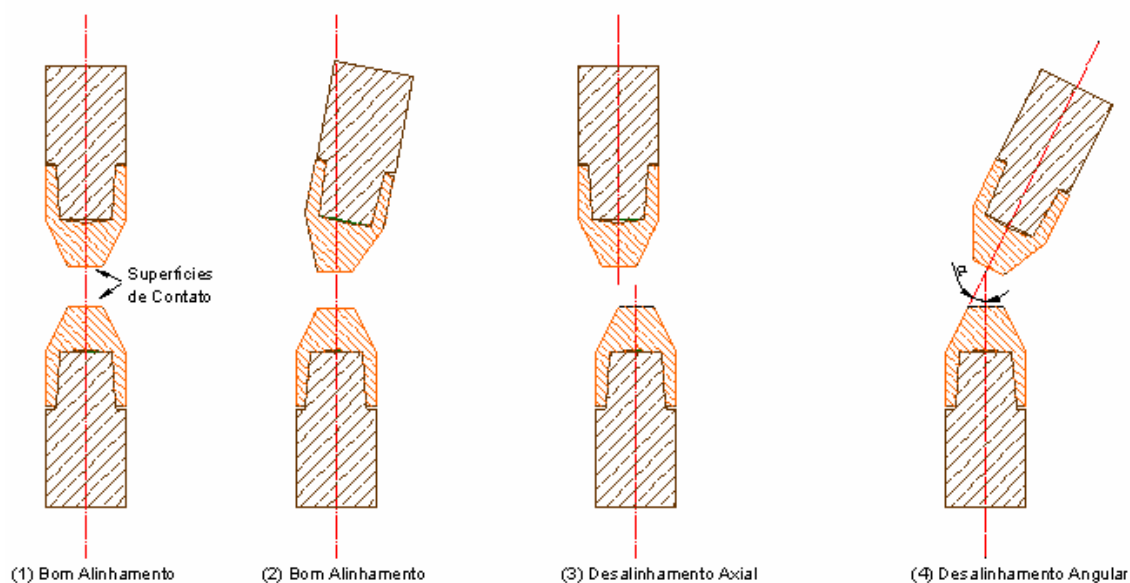


Figura 32: Formas de alinhamento e desalinhamento.

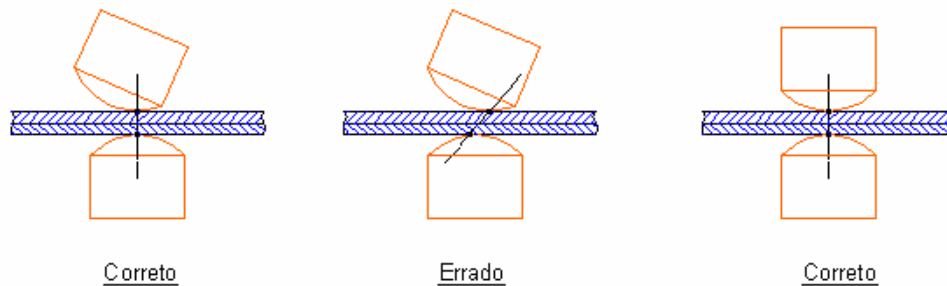


Figura 33: Não paralelismo dos centros de contato das capas de eletrodo com a chapa.

3.9.5 Derivações de corrente

As derivações são um desvio de parte da corrente de soldagem, pelo contato de algum componente do circuito secundário da máquina de solda com o dispositivo de soldagem ou, um desvio de parte da corrente de soldagem que passa por um ponto de solda realizado muito próximo.

3.9.5.1 Distância entre os pontos de solda

Existe uma distância mínima (e) entre os pontos de solda que deve ser respeitada, conforme indicado na Equação 2 (MACHADO, 1996). Se os pontos de solda ficarem muito próximos, então uma parte da corrente total de soldagem (I_{ges}) flui pelos pontos ao redor, como mostrado na Figura 34. A corrente que flui para o segundo ponto (I_2) e não contribui para a soldagem. A corrente de soldagem atuante no segundo ponto (I_s) será menor em relação ao valor programado como expresso na Equação 3. O ponto na seqüência terá, então, um diâmetro menor quando os dados da programação forem constantes. Para se obter o mesmo diâmetro do ponto de solda, é preciso intensificar a corrente de soldagem para o segundo ponto quando a distância mínima não puder ser respeitada (REU, 1997, TECNOWELDING, 2004).

I_{ges} = Corrente total de soldagem;
 I_s = Corrente total atuante no ponto;
 I_N = Corrente que flui para o segundo ponto;
 L = Distância dos pontos;
 S = Espessura da chapa mais fina em mm;

$$L = (14 \times s_2 + 3) \times (s_1 + s_2)^{1/3} \text{ mm} \quad (2)$$

$$I_s = I_{ges} - I_N \quad (3)$$

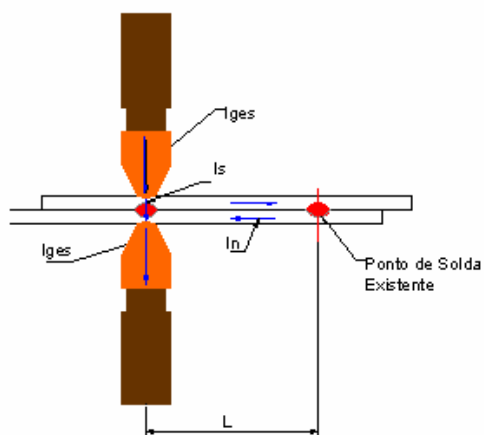


Figura 34: Distância entre os pontos de solda.

3.9.5.2 Fugas de corrente

As imprecisões das peças (defeitos de estamparia), geometria desfavorável das peças (acesso desfavorável ao local do ponto), contato do braço da máquina ou porta eletrodo com o dispositivo de soldagem ou peça causam as derivações (fugas de corrente), conforme indicado na Figura 35. Parte da corrente de soldagem é desviada pela peça ou dispositivo, podendo ocasionar problemas

de pontos soltos ou pontos de solda com o diâmetro menor que o especificado. Para evitar que isto ocorra, usam-se fitas de isolamento para braços, porta eletrodos isolados com celeron e até mesmo uma mudança na configuração da máquina ou dispositivo pode ser necessárias para minimizar os problemas com fugas de corrente (REU, 1997, TECNOWELDING, 2004).

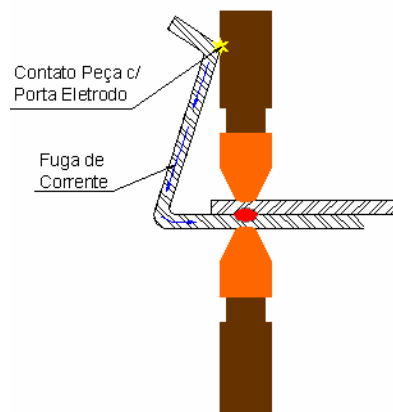


Figura 35: Fugas de corrente.

3.9.6 Refrigeração dos eletrodos

A alta intensidade de corrente utilizada na soldagem de aços galvanizados pode resultar em um superaquecimento dos eletrodos caso o resfriamento seja inadequado. O superaquecimento do material do eletrodo à base de cobre faz com que a dureza da liga diminua e, por esta razão, um processo de deformação da face de contato do eletrodo inicia a uma taxa acelerada. Além disso, o zinco se combina mais rapidamente com o cobre do eletrodo, formando uma liga, à medida que a temperatura aumenta (REU, 1997, TECNOWELDING, 2004).

A vazão de água recomendada para os eletrodos superior e inferior variam geralmente de 4 a 6 litros por minuto, e a distância da face de contato do eletrodo até o furo interno de água não deve ser superior 12 mm como mostrado

na Figura 36. Contanto que o fluxo da água de resfriamento dos eletrodos, seja adequada para resfriar os eletrodos a valores próximos à temperatura ambiente entre duas soldas sucessivas (TECNOWELDING, 2004).

O tubo defletor deve ser cortado diagonalmente e se posicionar 3 a 5 mm da base do furo interno da capa de eletrodo para se ter um fluxo de água necessário para o resfriamento da capa de eletrodo. As Figuras 36 e 37 ilustram esta montagem do tubo defletor.

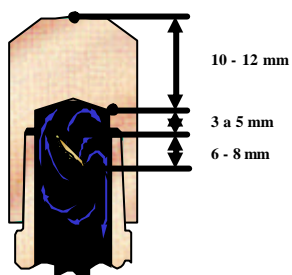


Figura 36: Posicionamento correto do tubo defletor.

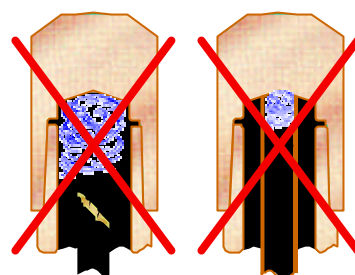


Figura 37: Posicionamento incorreto do tubo defletor.

3.9.7 Limpeza dos eletrodos

Para restabelecer o perfil original do eletrodo e / ou limpar a face do eletrodo contaminada pelo zinco da chapa, é recomendado realizar um dos processos de fresagem descritos na seção 3.7.3 e 3.8.

4 METODOLOGIA E PLANO DE TRABALHO

4.1 Soldagem dos Corpos de Prova

Os pontos de solda foram realizados utilizando duas chapas galvanizadas com dimensões de 50 x 200 mm, conforme mostra do na Figura 38. A primeira chapa tem a especificação XES G 10/10 (Normas Renault 11-00-214/C; 11-04-805/E; 02-30-402/-C e 32-00-019/--B), com espessura da chapa 0,67 mm e revestimento mínimo de Zn de 10,0 μm , processo de revestimento por imersão. A segunda chapa tem a especificação st06 G 10/10 (Normas DIN EN 10413; VW50111 e ST06Z100MB) com espessura da chapa 1,0 mm e revestimento de Zn de 6 a 12 μm , processo de revestimento por imersão. Para a realização dos pontos de solda, as chapas foram sobrepostas, sendo que a chapa superior foi a chapa com espessura de 0,67 mm.

O espaçamento entre os pontos de solda para chapas com espessuras iguais é dado pela fórmula $L = (14 \times s_2 + 3) \times (s_1 + s_2)^{1/3}$ (mm), onde "L" é a distância mínima entre os pontos de solda e "s" é a espessura das chapas a serem soldadas. Na soldagem de chapas com diferentes espessuras, sendo $s_1 > s_2$. Para a configuração de espessura das chapas existentes, 0,67 e 1,00 mm, a distância mínima (L) entre os pontos de solda, é de 14,7 mm como mostrado na Figura 38 (MACHADO, 1996).

A distância mínima que os pontos de solda devem ficar da borda da peça, para espessuras iguais ou diferentes ($s_1 > s_2$), é dado pela expressão: $B = [13 \times (s_2)^{1/2} \times (s_1 / s_2)^{1/3}] / 2$. Para a configuração de chapas que temos neste estudo, a distância (B) que os pontos de solda devem ficar da borda da chapa é de 6 mm como mostrado na Figura 38 (MACHADO, 1996).

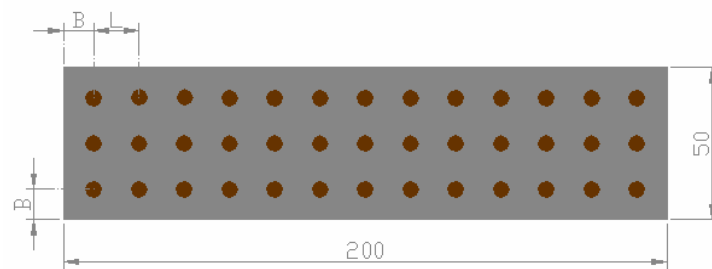


Figura 38: Dimensões da chapa de trabalho.

4.2 Capas de Eletrodos

As capas de eletrodos escolhidas para os testes estão especificadas na Tabela 04. Todas as capas de eletrodos são do tipo cone truncado, fêmeas com cone interno 1:10, diâmetro da face de 6 mm, altura de 20 mm, diâmetro do corpo de 16 mm e uma inclinação de 30° como indicado na Figura 39.

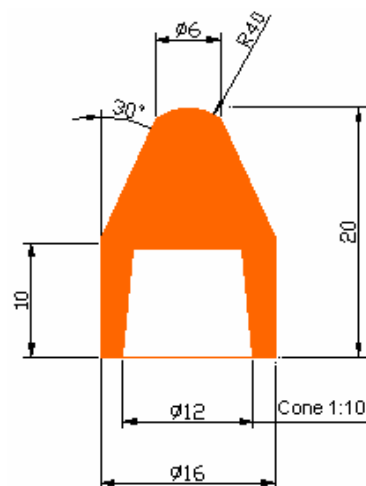


Figura 39: Capa de eletrodo.

Tabela 04: Composição química das capas de eletrodo utilizadas nos testes.

Capa	Composição	% Elementos	Processo Fabricação
A	CuZr	0.15 – 0.20 % Zr	Estampado a Frio
B	CuCrZr	1%Cr; 0,25%Zr	Usinado
C	CuZr	0.15 – 0.20 % Zr	Estampado a Frio
D	CuAl ₂ O ₃	1.1% Al ₂ O ₃	Estampado a Frio

As ligas das capas de eletrodo A, B e C são endurecidas por precipitação. As capas de eletrodo A e C são RWMA classe 1 (CuZr), porém a capa C é uma liga livre de oxigênio. A capa B é RWMA classe 2. A capa de eletrodo D é um compósito endurecido por dispersão, RWMA Classe 20 (CRAGGS, 2002, INERMACHINERY, 2002, RWMA, 2002).

4.3 Máquina de Solda

Para realizar os pontos de solda, foi utilizada uma máquina de solda a ponto estacionária marca Siegel de 20 KVA, refrigerada a água, 5 taps de regulagem da potência da máquina, corrente alternada, com acionamento pneumático por pedal, conforme mostrado na Figura 40.

Foram ajustados os cabos e mangueiras de ar e água da máquina, deixando-os sem dobras e vazamentos. Os braços e porta eletrodos foram alinhados e apertados para resistir às pressões exercidas pelo cilindro de ar e também não apresentarem alta resistência à passagem da corrente elétrica (TANG ET AL, 2003).



Figura 40: Máquina de solda a ponto.

4.4 Equipamento de Calibração

A máquina de solda a ponto passou por um processo de calibração dos parâmetros de soldagem (Tempo, Corrente e Pressão). Para a medição do tempo e corrente de soldagem, foi utilizando medidor de corrente Miyachi MM-315A com toróide, e range de corrente de 1,00 – 49,9 kA, como mostrado na Figura 41 Para realizar a medição de pressão foi utilizado um dinamômetro digital Miyachi MM 601 A, com célula de carga e range de 20 – 950 kg, como mostrado na Figura 42.

O processo de calibração consiste em regular na máquina os valores de tempo, corrente e pressão de soldagem. Colocou-se uma chapa de cobre entre os eletrodos e executa um ponto de solda, e como auxílio dos equipamentos de medição de pressão, tempo e corrente, verificam-se quais são valores de tempo de soldagem, corrente de soldagem e força entre os eletrodos para um determinado ajuste realizado.



Figura 41: Medidor de corrente.



Figura 42: Medidor de pressão.

4.5 Parâmetros de Soldagem

Os parâmetros de solda foram escolhidos de forma a atender o critério do diâmetro mínimo do ponto de solda, além de evitar defeitos como soldas com diâmetro do ponto menor que o especificado pela norma, ponto deslocado, indentação, queima da superfície da chapa, fusão da superfície e grudamento das capas de eletrodos na superfície da chapa. Para obter os melhores parâmetros de soldagem, foram seguidos os procedimentos descritos pela Intermachinery, 2003, Réu, 1997 e Tecnowelding, 2004, e foram definidos os seguintes parâmetros de soldagem:

- Corrente de soldagem: 6,00 kA.
- Tempo de soldagem: 400 ms.
- Força entre as capas de eletrodos: 56 kgf.
- Vazão total de água para refrigeração: 9 l/min.
- Velocidade de soldagem: 40 pontos de solda por minuto

Os parâmetros foram mantidos constantes durante todos os ensaios, e aplicados para todas as capas de eletrodos, porém a corrente de soldagem foi monitorada a cada 50 pontos de solda, objetivando avaliar o desempenho das diferentes capas em condições semelhantes de operação.

4.6 Determinação do Diâmetro do Ponto de Solda

A integridade do ponto de solda foi medida através do teste de arrancamento, como mostrado na Figura 43a. O teste de arrancamento foi realizado em corpos de prova com as dimensões de 0.67x16x50 mm com 1.00x16x50 mm como mostrado na Figura 43b. O diâmetro médio do ponto de solda é determinado pela equação ($D_{\text{médio}} = (D_{\text{máx}} + D_{\text{min}})/2$), e a forma de medi-lo é mostrado nas Figuras 43c, 43d, 43e e 43f (DONG, 1995, JOINING, 1997, INTERMACHINERY, 2003, REU, 1997).

No caso da soldagem de chapas de diferentes espessuras, normas industriais [VW 01105-1] estabelecem que o ponto de solda deve possuir um diâmetro mínimo calculado pela seguinte expressão: $D_{\text{ponto}} = 4,2 \times S^{1/2}$, onde D_{ponto} é o diâmetro mínimo do ponto de solda e S é a espessura da chapa mais fina a ser soldada. Desta forma, para este estudo, será utilizado $D_{\text{ponto}} = 3,44$ mm.

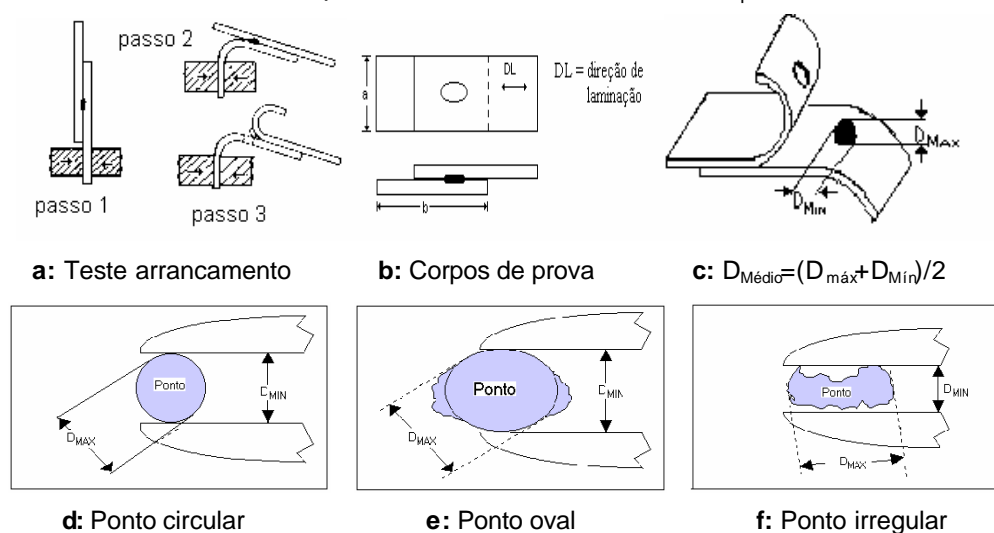


Figura 43: Teste de arrancamento, corpos de prova e determinação do diâmetro médio.

4.7 Testes de Desempenho das Capas de Eletrodo

Nos testes de soldagem, para avaliar a produtividade e o desgaste das capas de eletrodos, foram realizados testes de arrancamento a cada 100 pontos de solda. Para verificar como as capas de eletrodos eram degradadas ao longo das soldagens realizadas, as faces dos eletrodos foram fotografadas no mesmo intervalo de 100 pontos de solda. Foi medido o diâmetro médio do ponto de solda conforme procedimento descrito no item 4.6, até que fosse atingido um valor inferior ou próximo do diâmetro mínimo de 3,44mm. Foram ainda controlados o diâmetro da face da capa de eletrodo superior e inferior, utilizando esse resultado como medida de desgaste.

A soldagem para o teste de arrancamento foi realizado em corpos de provas de 0.67 x 16 x 50 mm com 1 x 16 x 50 mm (INTERMACHINERY, 2003, TECNOWELDING, 2004)

4.8 Testes para Determinar a Dureza das Capas de Eletrodo após a Fresagem

Para realizar os testes de fresagem foram utilizados cinco pares de cada capa de eletrodo. O intervalo de fresagem foi arbitrado como sendo a cada 120 pontos de solda, para todas as capas de eletrodos. Visando verificar como a dureza variava em função do aquecimento e da fresagem, foi realizado 120 pontos de solda para todos os pares e todos os modelos de capas de eletrodo. Após a soldagem de 120 pontos, os 4 pares restantes de cada modelo de capa de eletrodo foram fresados, e realizado mais 120 pontos de solda. Esse procedimento foi feito até completar 600 pontos de solda, sendo que, a cada 120 pontos de solda era retirado um par de cada modelo de capa de eletrodo e fresado o restante dos pares.

Após a parametrização da máquina de solda, alguns testes preliminares foram realizados e foi definido que todas as capas de eletrodo soldariam como os mesmos parâmetros como descrito abaixo:

- Corrente de soldagem: 6,00 kA
- Tempo de soldagem: 400 ms
- Força entre as capas de eletrodos: 56 kgf
- Vazão total de água para refrigeração: 9 l/min
- Velocidade de soldagem: 40 pontos de solda por minuto

Em cada fresagem foi retirado 0,15 mm de material na face da capa de eletrodo para que ficasse isento de crateras e sem a camada de latão, mantendo também o diâmetro de 6mm na face da capa de eletrodo.

A forma de fresagem utilizada para recuperar o perfil da capa de eletrodo foi a fresagem de topo e lateral (TECNOWELDING, 2004). E o tipo de fresagem utilizada foi a fresagem off-line. A fresagem foi realizada em um torno Nardini MS 175.

As amostras fresadas tiveram seu perfil de dureza determinado em um durômetro Tukon, modelo MO, com indentador Vickers, e uma carga de 300 gramas. Foram traçados três perfis de dureza ao longo da seção transversal da capa de eletrodo, sendo que à distância de cada perfil foi de 2,0 mm e a distância de cada indentação foi de 150 μm como indicado na Figura 44. A primeira indentação foi logo abaixo da camada de latão formada na ponta do eletrodo.

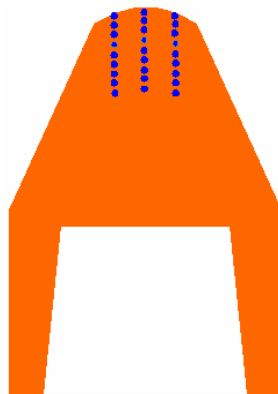


Figura 44: Perfil de Dureza.

4.9 Testes para determinar o Intervalo de Fresagem das Capas de Eletrodos

Para realizar os testes de fresagem foi utilizado um par de cada capa de eletrodo. A cada 40 pontos de solda foi verificado o diâmetro do ponto de solda pelo teste de arrancamento, e durante a soldagem foi avaliado o aspecto visual externo do ponto de solda, para que estivesse isento de rebarbas provocado pelas crateras formadas na face da capa de eletrodo, e também durante a soldagem a capa de eletrodo não poderia grudar na chapa. Quando fosse detectado algum dos defeitos descritos acima, a soldagem era interrompida para que a capa de eletrodo fosse fresada. Este procedimento foi executado durante 3 intervalos de fresagem para que fosse possível avaliar o comportamento de cada capa de eletrodo.

Foi considerado como o intervalo ideal para a fresagem, o final do intervalo de 40 pontos de solda anterior ao que ocorreu o defeito.

Após a parametrização da máquina de solda, alguns testes preliminares foram realizados e foi definido que todas as capas de eletrodo soldariam como os mesmos parâmetros como descrito abaixo:

- Corrente de soldagem: 6,00 kA
- Tempo de soldagem: 400 ms
- Força entre as capas de eletrodos: 56 kgf
- Vazão total de água para refrigeração: 9 l/min
- Velocidade de soldagem: 40 pontos de solda por minuto

Em cada fresagem foi retirado 0,20 mm de material na face da capa de eletrodo para que o eletrodo ficasse isento de crateras e sem a camada de latão, mantendo também o diâmetro de 6mm na ponta da capa de eletrodo.

A forma de fresagem utilizada para recuperar o perfil do eletrodo foi a fresagem de topo e lateral. E o tipo de fresagem utilizada foi a fresagem off-line (TECNOWELDING, 2004). A fresagem foi realizada em um torno Nardini MS 175.

4.10 Testes de Recozimento Isotérmico

Análises térmicas realizadas por Yeung e Thornton (1999) mostraram que as regiões próximas da região de contato da face da capa de eletrodo com a chapa atingem temperaturas entre 700 a 900°C. Visando verificar como a dureza das capas dos eletrodos varia em função do aquecimento, foram realizados recozimentos isotérmicos das capas de eletrodo a 700°C, 800°C e 900°C, por um período de 10 minutos em cada temperatura. Estas amostras recozidas tiveram sua dureza determinada em um durômetro Tukon, modelo MO, com indentador Vickers, e uma carga de 200 gramas.

4.11 Procedimentos Metalográfico e Macrográfico

Após corte na seção transversal, as amostras das capas de eletrodo A, B, C e D que realizaram a soldagem de pontos de solda e as que foram recozidas isotermicamente, foram preparadas para exame metalográfico através de embutimento a quente em baquelite, seguido de lixamento com lixas de grana 180, 320, 400, 600 e 1200. O procedimento de lixamento iniciou com a lixa de menor grana e terminava com a de maior grana seguido de polimento com alumina 1 μ m.

As amostras das chapas com pontos soldados foram preparadas para o exame metalográfico através de embutimento em resina de poliéster a frio, seguido de lixamento com lixas de grana 180, 320, 400, 600 e 1200. O procedimento de lixamento iniciou com a lixa de menor grana e terminava com a de maior grana seguido de polimento com alumina 1 μ m. O ataque químico foi realizado em solução de 60 ml de ácido nítrico (pureza 65%) e 140 ml de água destilada. O tempo de ataque das amostras foi de aproximadamente 5 segundos.

4.12 Análise

Após o polimento as amostras das capas de eletrodo foram analisadas por microscopia ótica e lupas, de forma a caracterizar a microestrutura ao longo da seção transversal das capas de eletrodo, além de avaliar a formação de crateras e camada de latão na face da capa de eletrodo.

Foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca Philips, modelo XL 30, para observar a camada de latão formada na face da capa de eletrodo e realizar análises semi-quantitativa da composição química destas camadas, empregando-se a técnica de espectroscopia por dispersão de energia (EDS-Energy Dispersion Spectroscopy). Através da análise semi-quantitativa permitiu identificar os elementos de liga presente nas camadas formadas na face das capas de eletrodos.

Os pontos de solda foram analisados em lupa, de forma a caracterizar a macroestrutura ao longo da seção transversal do ponto soldado, de forma a caracterizar a formação de defeitos ao longo da região soldada, bem como na superfície externa das chapas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Testes de Desempenho das Capas de Eletrodo

A Figura 45 mostra a variação do diâmetro médio do ponto de solda obtido através do teste de arrancamento, em função do número de pontos de cada capa de eletrodo durante o processo de soldagem. O diâmetro médio do ponto no início do teste foi próximo de 5mm para todas as capas, mas no decorrer dos testes foram observadas diferenças consideráveis. A capa D mostrou-se significativamente superior às demais, capaz de soldar 1100 pontos sem ter ainda atingido o diâmetro mínimo do ponto de solda de 3,44 mm. A capa C também apresentou bons resultados, tendo atingido 800 pontos. O pior resultado ocorreu com a capa A com 400 pontos e diâmetro médio do ponto abaixo do mínimo. Interessante notar que as capas A e C apresentam a mesma composição química e o mesmo processo de fabricação, porém os resultados são muito diferentes quanto ao número de pontos atingido. A possível razão para esta diferença é que a capa C requer o uso de cobre livre de oxigênio, o que favorece a manutenção da dureza a quente em relação a capa A.

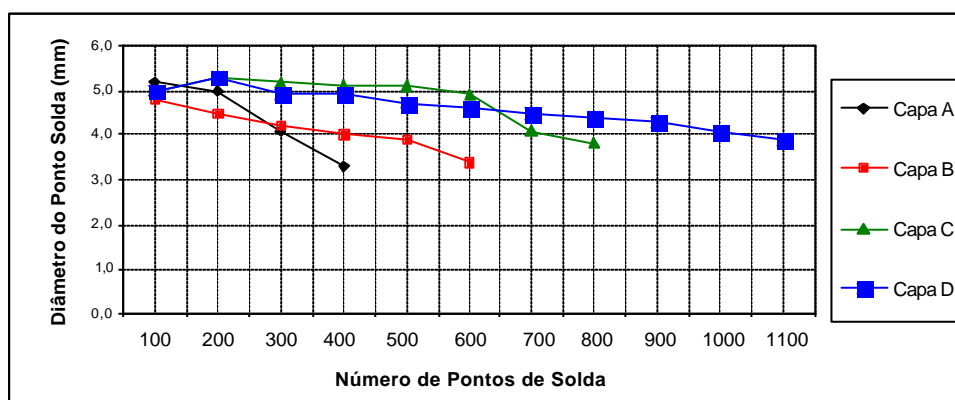


Figura 45: Variação do diâmetro médio do ponto de solda.

As medidas de desgaste das capas podem ser vistas nas Figuras 46 e 47, que mostram o crescimento do diâmetro da face da capa de eletrodo inferior e superior respectivamente em função do número de pontos de solda executados.

Nota-se que as capas D e C apresentam os menores desgastes e conseqüentemente uma produtividade maior, com variação de apenas 0,6 mm / 1100 pontos e 0,6 mm / 800 pontos respectivamente. Os piores resultados foram para as capas B e A, com 1,0 mm / 600 pontos e 0,6 mm / 400 pontos respectivamente.

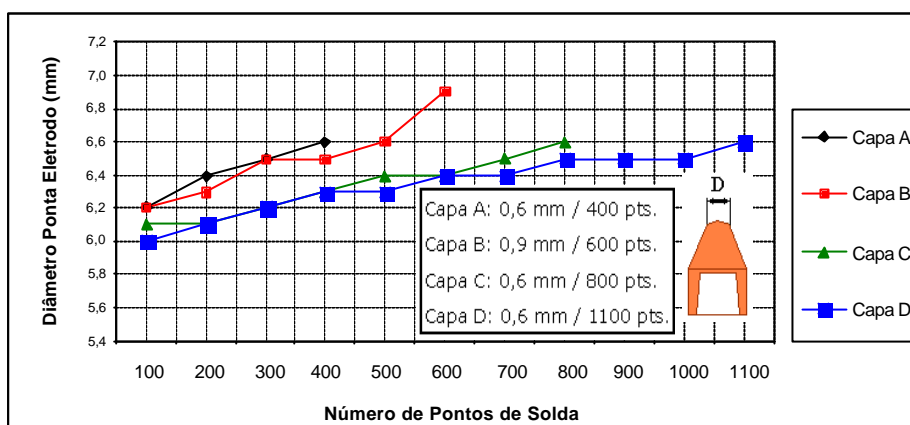


Figura 46: Variação do diâmetro da face do eletrodo inferior x N° pontos.

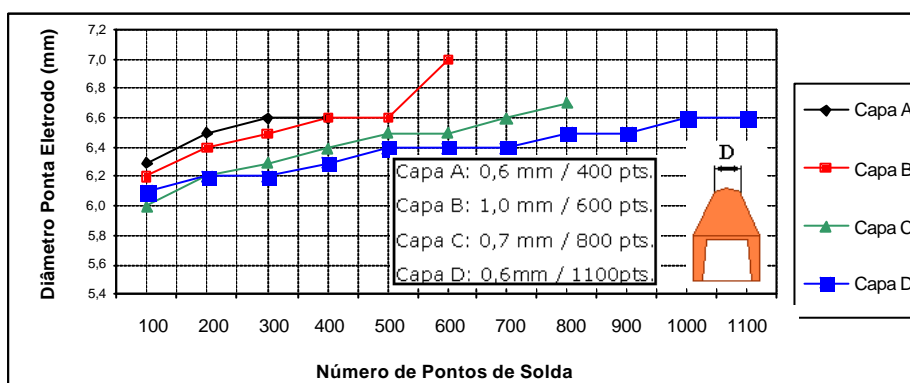


Figura 47: Variação do diâmetro da face do eletrodo superior x N° pontos.

A Figura 48 mostra um perfil de dureza ao longo da seção transversal das capas de eletrodo após a realização dos testes de soldagem. A região onde houve a formação da camada de latão (CD) apresenta uma elevada dureza. As capas A, B, C e D tem uma dureza de 231 HV, 261 HV, 297 HV e 341 HV, respectivamente, na camada de latão (CD). Abaixo da camada de latão

(região 0,0) há uma queda da dureza das capas de eletrodo em relação a dureza antes de iniciar o processo de soldagem. A capa A teve uma queda de dureza de 115 HV para 61 HV, a capa B de 157 HV para 83 HV, a capa C de 155 HV para 70 HV e a capa D de 178 HV para 167 HV. As capas A, B e C começaram a estabilizar os seus valores de dureza a partir de 1,5 mm abaixo da camada de latão, enquanto a capa D teve uma queda de apenas 11 HV em relação a sua dureza original, e mantendo sua dureza ao longo do perfil da capa.

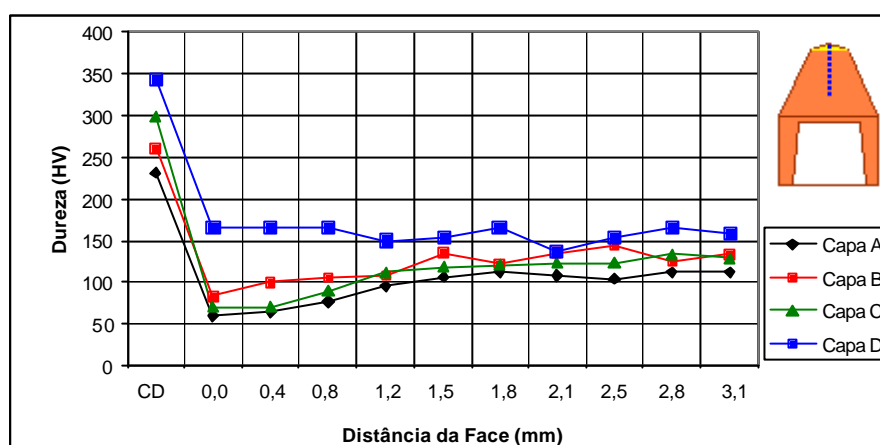


Figura 48: Perfil de dureza na seção transversal das capas de eletrodo após testes de soldagem.

Os resultados do diâmetro médio do ponto de solda e do diâmetro das faces das capas de eletrodo mostram uma relação entre desgaste e a quantidade de pontos soldados. À medida que a capa se desgasta, a densidade de corrente e a pressão sobre as chapas diminuem, devido ao aumento do diâmetro da face da capa de eletrodo, que está diretamente associado com a perda de dureza. Assim suas condições iniciais de soldagem são alteradas, acarretando variações na qualidade e na medida do diâmetro médio do ponto de solda. O desgaste e a perda de dureza da capa de eletrodo passam a ser variáveis importantes na manutenção da qualidade da soldagem e vida útil dos eletrodos.

A Figura 49 mostra a variação da corrente de soldagem a cada 50 pontos durante o teste de desempenho das capas de eletrodo em relação ao valor

de 6,0 kA parametrizado no início do teste. Nota-se que os valores da corrente de soldagem variam periodicamente à medida que os pontos de solda vão sendo realizados, dando saltos para cima, e voltando a cair novamente, e assim sucessivamente.

O comportamento da corrente não foi uniforme durante o teste de soldagem. Segundo GUEDES, GONÇALVES & SCOTTI (2004), isto ocorre porque à medida que os pontos de solda vão sendo realizados, vão se acumulando óxidos, resíduos de zinco e/ou ligas de zinco na ponta da capa de eletrodo e estes se desprendem periodicamente, possivelmente no momento que se dá picos de corrente pela diminuição da resistência da passagem de corrente de soldagem pela capa de eletrodo. Este comportamento foi observado para os quatro modelos de capas de eletrodo durante os testes de soldagem.

Em termos práticos, estas variações na corrente de soldagem não afetam a qualidade do ponto de solda. Quando ocorre a parametrização, há um limite de aproximadamente $\pm 5\%$ de tolerância para a variação da corrente de soldagem nominal que é regulada nos controladores de solda. E esta tolerância permite que o diâmetro dos pontos de solda obtidos durante o intervalo em que a corrente variou, estejam acima do diâmetro mínimo que é 3,44 mm.

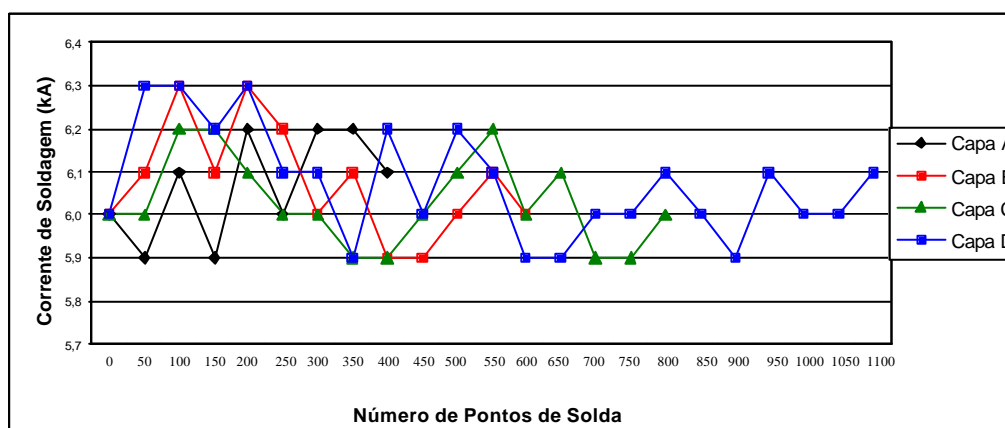


Figura 49: Variação da corrente de soldagem.

5.2 Teste de Recozimento Isotérmico

A Figura 50 mostra a variação da dureza das capas de eletrodo em função dos recozimentos isotérmicos realizados a 700, 800 e 900°C, comparativamente com a capa no estado como recebido. Os resultados são normais, com queda de dureza à medida que se aumenta a temperatura de recozimento. Nota-se que a capa D apresenta uma queda de dureza muito pequena, comparativamente às demais capas. Este resultado pode ser atribuído à natureza do material. A capa D é uma liga endurecida por dispersão, onde não há reação entre o cobre (Cu) e o Al_2O_3 , logo a queda na dureza só ocorrerá quando houver crescimento de grão. Como as partículas de Al_2O_3 tendem a barrar este crescimento, a dureza se mantém mesmo a elevadas temperaturas. No caso das capas A, B e C, a queda na dureza pode ocorrer devido a recristalização dos grãos deformados plasticamente e/ou do coalescimento ou dissolução de precipitados. Isto ocorre a temperaturas relativamente baixas, o que explica as diferenças observadas.

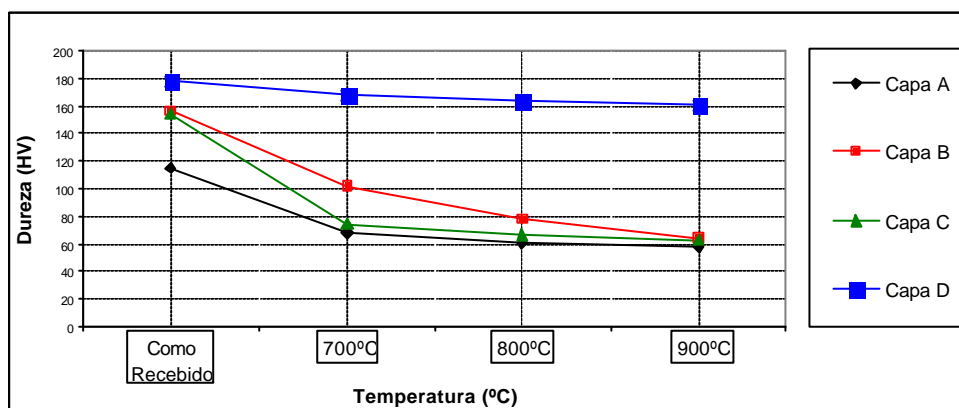


Figura 50: Teste de dureza x temperatura de recozimento.

Ao analisar os dados conjuntos de dureza após o recozimento e desgaste, nota-se que quanto maior a retenção da dureza em função da temperatura, menor é o desgaste observado. Este resultado pode ser considerado normal, pois como o aquecimento ocorre mais acentuadamente na região de

contato da face da capa de eletrodo com a chapa, a manutenção da dureza nesta região dificulta sua deformação plástica, retardando o desgaste e conseqüentemente aumentando a vida útil da capa. Chega-se, portanto, a conclusão que a retenção da dureza a elevada temperatura tem um papel fundamental na produtividade das capas de eletrodo.

5.3 Análise Visual e Macrografias

Durante o processo de soldagem por resistência, os eletrodos são submetidos a altas tensões compressivas e elevadas temperaturas (INTERMACHINERY, 2003, JOINING, 1997, REU, 1997). Nestas condições, o zinco do revestimento com temperatura de fusão mais baixa, reage com a capa de eletrodo, tendendo a formar latão. Além disso, freqüentemente ocorre a formação de crateras na face da capa de eletrodo, degradando a sua face de contato (INTERMACHINERY, 2003).

A Figura 51 mostra os perfis das capas na região da face de contato com a chapa galvanizada após a realização dos testes de desempenho das capas de eletrodo. Nota-se que em todas as capas houve um desgaste com formação de crateras e de uma camada de difusão ao longo do perfil da face da capa de eletrodo. A camada de difusão é melhor visualizada nas macrografias mostradas na Figura 52, sendo contínua inclusive na região da cratera. A cratera em si possui uma camada de latão, sobre a qual observa-se uma camada mais clara, rica em zinco (Zn), e acima desta um material aprisionado. A composição química destas regiões será apresentada com maior detalhamento nas Figuras 53, 54, 55, 56 e 57 e na Tabela 05.

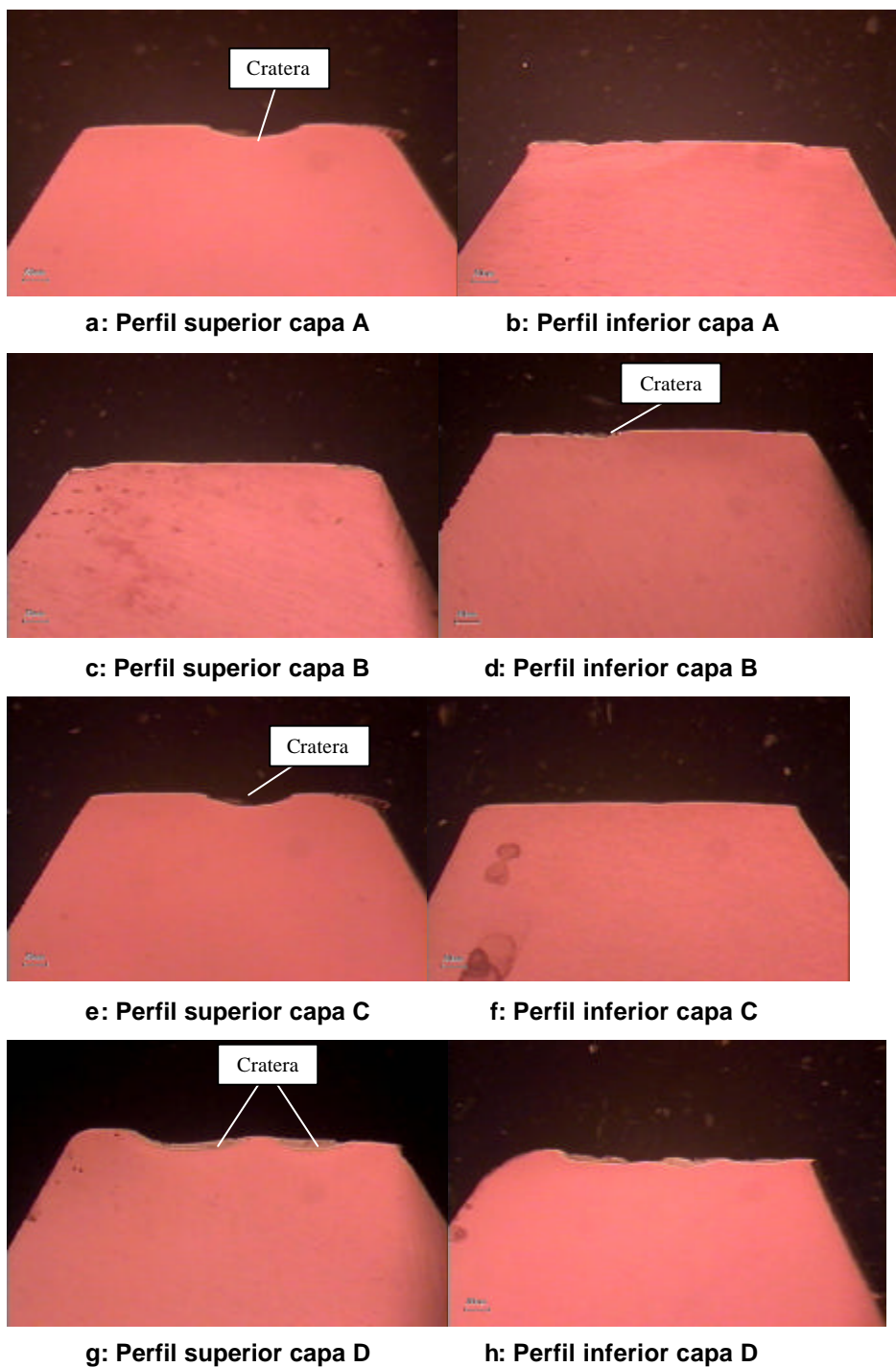


Figura 51: Perfis da face das capas de eletrodos após os testes realizados.

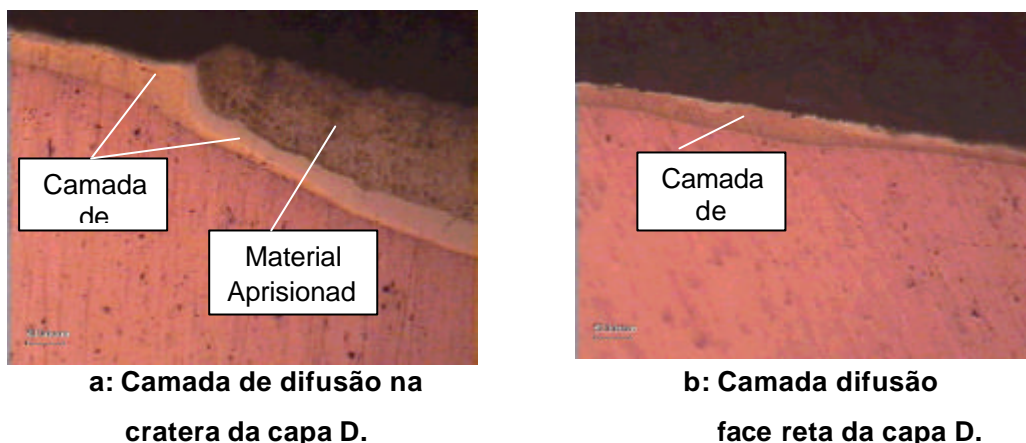


Figura 52: Formação da camada de latão pelo processo de difusão, ao longo da superfície da capa de eletrodo D.

Através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), foram estudadas as quatro regiões distintas na face da capa de eletrodo na região da cratera, como indicado na Figura 53. Através de análise semi-quantitativa e empregando-se a técnica de espectroscopia por dispersão de energia (EDS – Energy Dispersion Spectroscopy), avaliou-se a composição química destas quatro regiões. A tabela 05 mostra a porcentagem de cada elemento nas quatro regiões.

A região A, é a região da cratera que possui um material aprisionado, contendo uma grande concentração de Zinco (Zn) e Ferro (Fe), porém a concentração de Cobre (Cu) é baixa, como mostrado na Figura 54. Isto deve-se ao fato de ser a camada que fica em contato direto com a chapa, aprisionando o material que tende a ser expelido durante a soldagem.

Na região B, a concentração de Zinco (Zn) ainda é alta, porém há uma diminuição na concentração de Ferro (Fe) e um aumento na concentração de Cobre (Cu), conforme mostrado na Figura 55. Isto poderia estar associado a maior rapidez com que os átomos de Zn se difundiram na direção da capa de eletrodo mais rapidamente que o átomo de Fe.

A região C é composta por Zinco (Zn) e Cobre (Cu), e nesta região não há a presença de Ferro (Fe), como indicado na Figura 56. Esta região seria a camada de latão propriamente dita, composta somente por Cobre (Cu) e Zinco (Zn), com a coloração correspondente.

Já na região D, é a região que contém na sua totalidade Cobre (Cu), ou seja, é a composição química da própria capa de eletrodo, como mostrado na Figura 57.

A espessura da camada de latão variou entre 10 a 50 μ m, sendo esta espessura de 10 a 20 μ m na região da cratera e de 20 a 50 μ m nas demais regiões.

Tabela 05: Composição química nas quatro regiões da capa de eletrodo.

	Cobre (%)	Zinco (%)	Ferro (%)	Oxigênio (%)
Região A	5,24	83,07	10,04	1,65
Região B	25,25	67,75	7,00	---
Região C	52,99	47,01	---	---
Região D	100,00	---	---	---

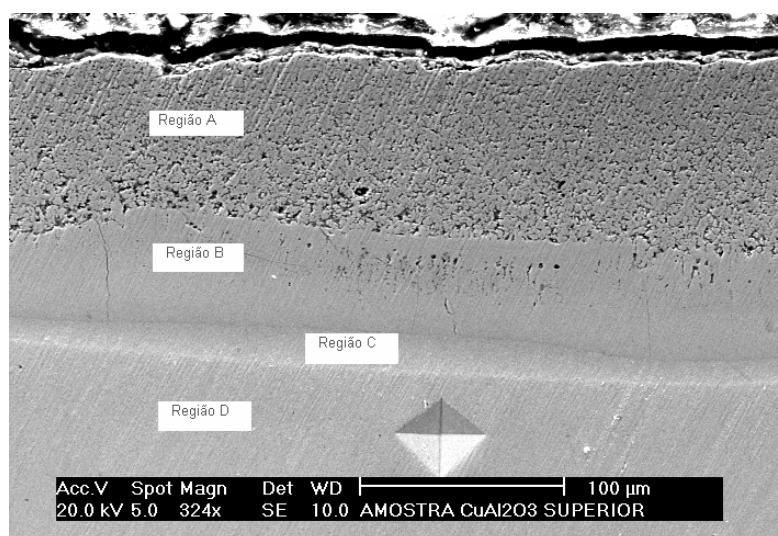


Figura 53: Regiões na face da capa de eletrodo.

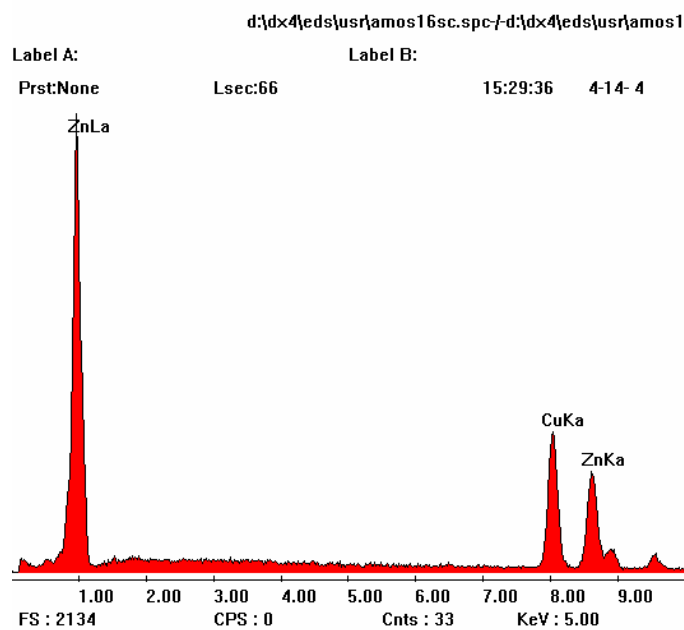


Figura 56: Composição química na região C.

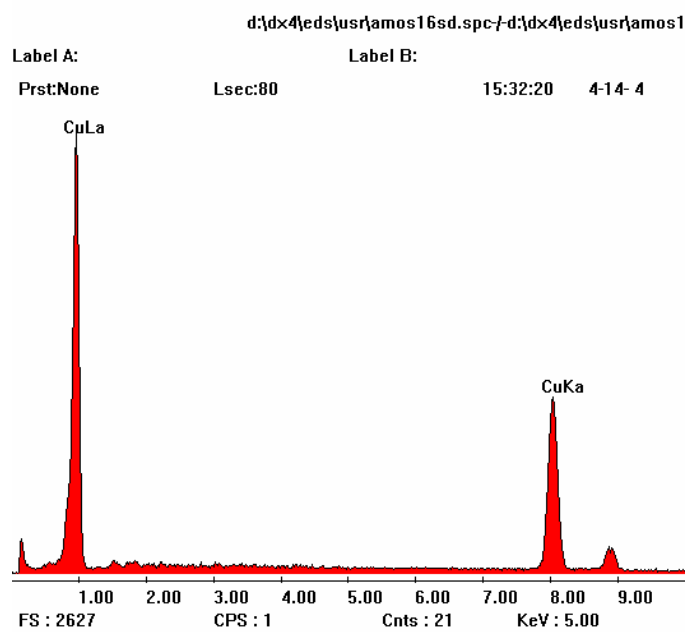


Figura 57: Composição química na região D.

Nas Figuras 58, 59, 60 e 61 abaixo serão mostrados a evolução do desgaste na face das capas de eletrodos durante os testes de desempenho das capas de eletrodo, o aspecto visual do ponto soldado, a qualidade do ponto de solda após o teste de arrancamento e a macrografia destes pontos de solda.

Nas capas de eletrodo, as crateras começam a aparecer a partir de 300 pontos de solda e aparecem como ilhas. A extensão das crateras aumenta rapidamente a partir de seu aparecimento, atingindo uma extensão relativamente grande da área de contato, à medida que o número de pontos de solda aumenta progressivamente. O aumento das crateras foi estudado por Dong, Kimchi e Holmes (1995), e é influenciada por uma alta distribuição de densidade de corrente na borda da cratera a partir do seu aparecimento.

A presença das crateras na face das capas dos eletrodos faz com que as chapas soldadas com estas capas passem a deixar marcas no ponto de solda, com o formato igual ao das crateras. Isto afeta o acabamento do ponto, que passa a ter uma superfície irregular. Apesar disto, o teste de arrancamento mostrou que as regiões marcadas pelas crateras permanecem soldadas no ponto resultante, conforme pode ser visto nas Figuras 59 e 61.

FUKUMOTO ET AL (2003) observou que a formação de pequenas crateras inicialmente ocorre próximo da periferia da face de contato da capa de eletrodo, e aumentam a profundidade e o diâmetro, formando crateras maiores por combinarem com outras pequenas crateras.

Fica ainda aparente que o desgaste da capa de eletrodo, medido pelo aumento do diâmetro da face implica na redução do diâmetro médio no teste de arrancamento. Este resultado mostra a importância na manutenção periódica da geometria da capa de eletrodo, através de fresamento, para recuperação das suas dimensões originais.

À medida que o número de pontos vai aumentando, as indentações nas chapas vão diminuindo e com isso também vão diminuindo a altura dos pontos de solda e o seu diâmetro, até chegar no limite de não ocorrer fusão ou o ponto estar abaixo do seu valor mínimo, conforme mostrado nas figuras 58, 59, 60 e 61.

A presença de poros no interior dos pontos de solda foi detectada nas macrografias realizadas. Infelizmente este tipo de defeito não pode detectado pelo teste de arrancamento, razão pela qual não se pode utilizar este único teste para garantir a qualidade do ponto de solda.

A presença dos poros no interior da solda foi estudada por GEAN ET AL (1999), o qual relata que o aparecimento dos poros é conseqüência da redução da pressão exercida pelos eletrodos nas chapas. Essa redução de pressão é afetada pelo aumento da área da face de contato das capas de eletrodos, que ocorre durante o processo de soldagem.

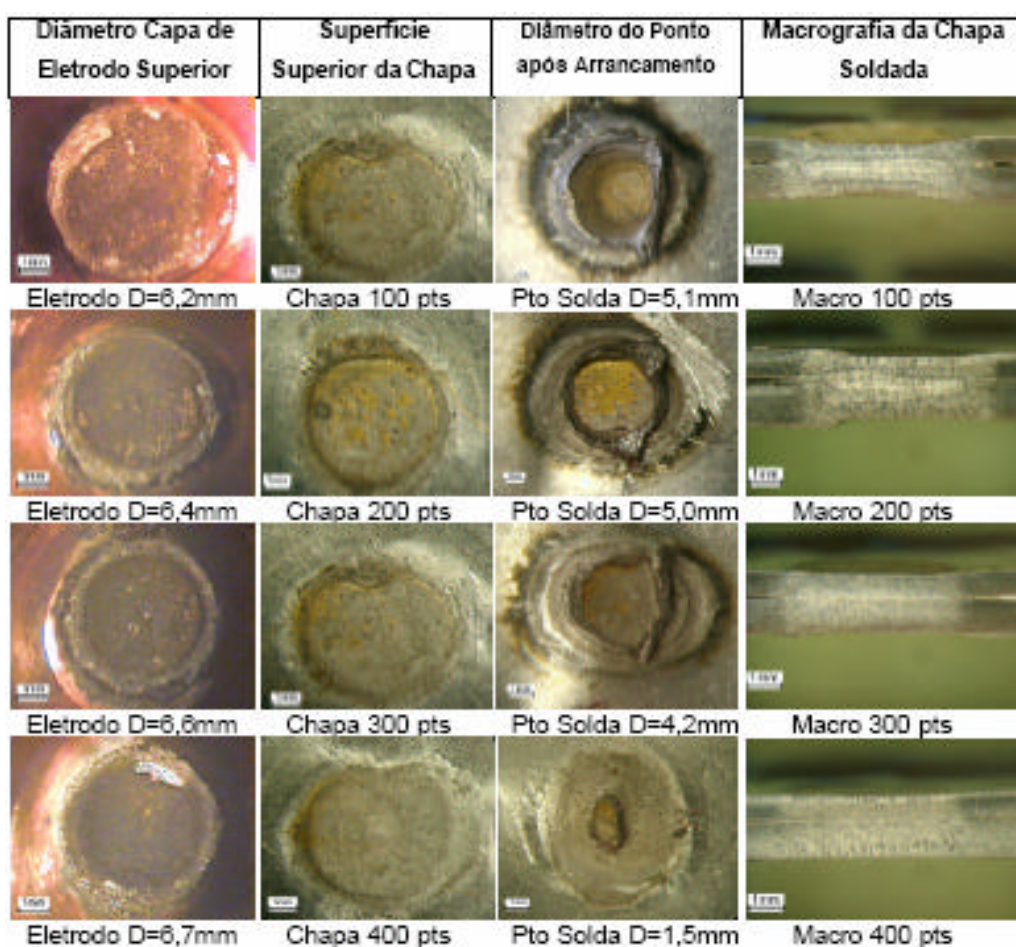


Figura 58: Pontos soldados com a capa de eletrodo A.

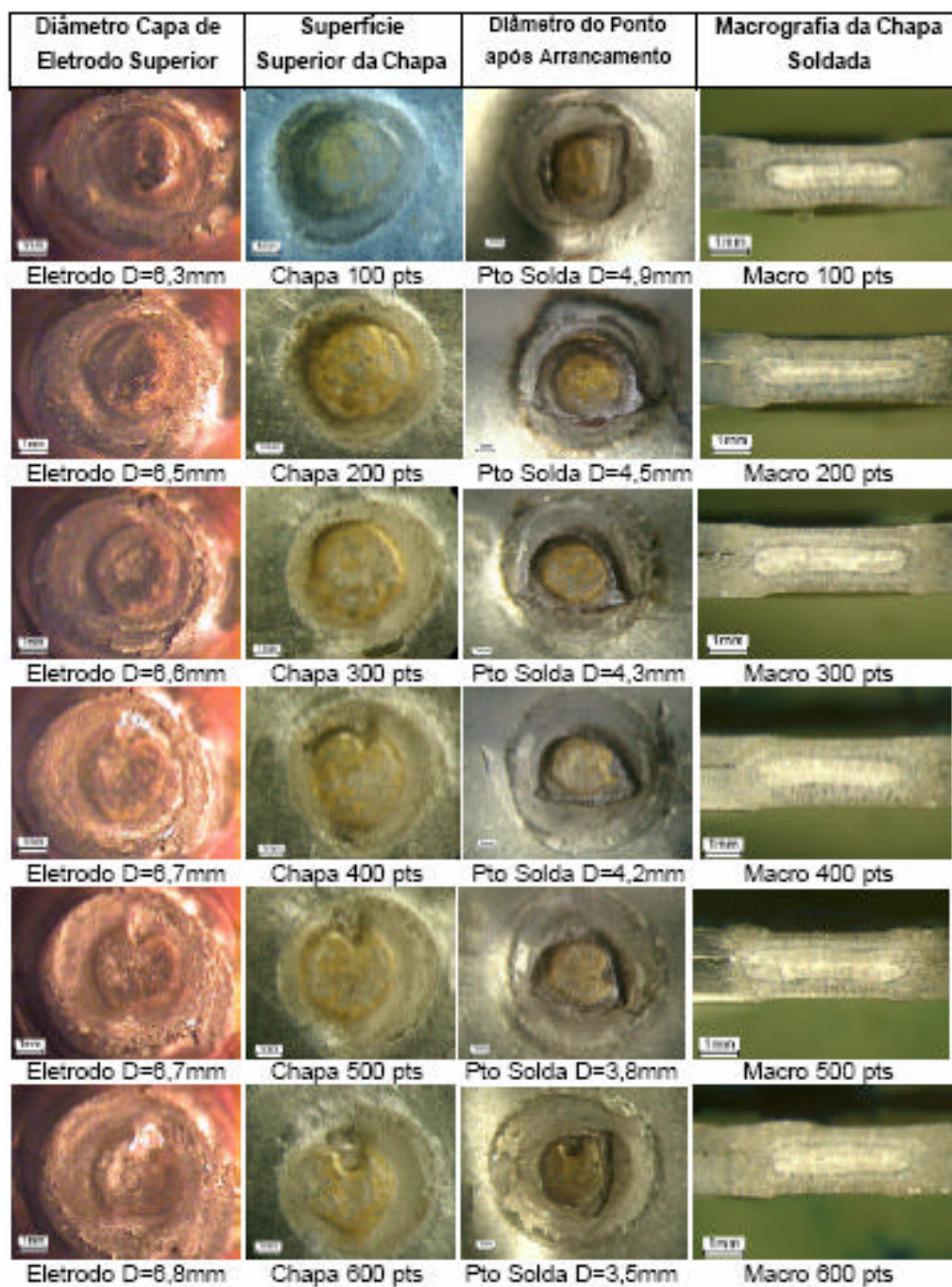


Figura 59: Pontos soldados com a capa de eletrodo B.

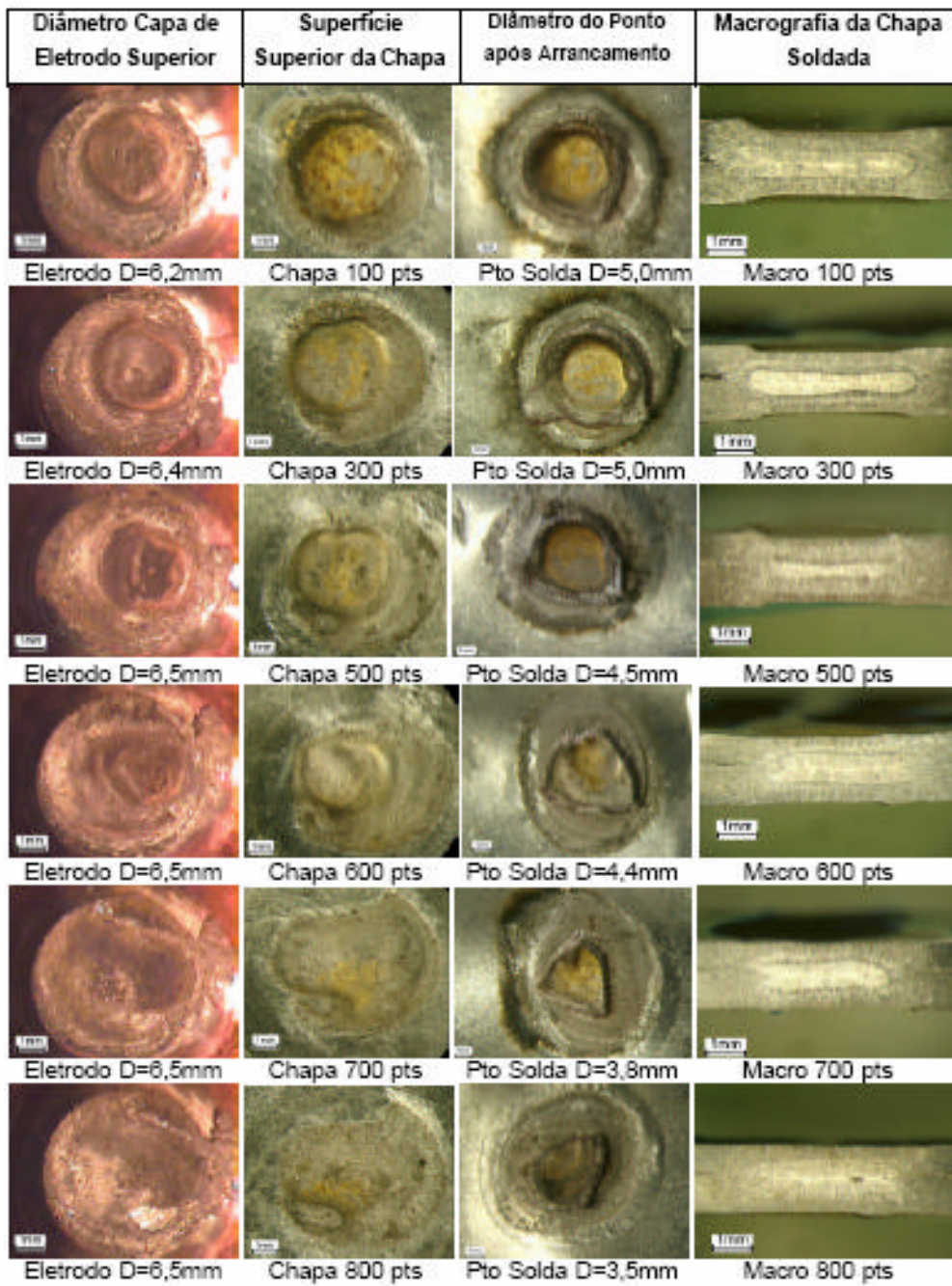


Figura 60: Pontos soldados com a capa de eletrodo C.


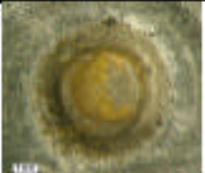


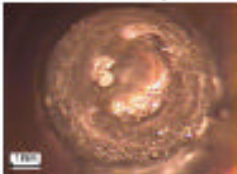
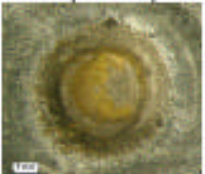

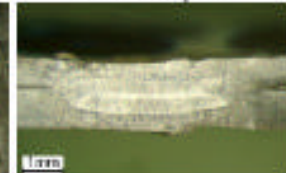
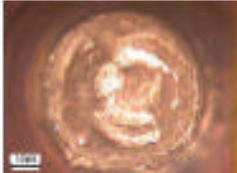



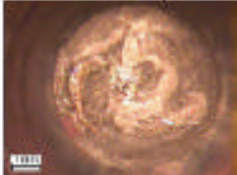


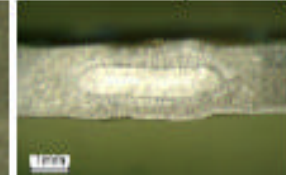
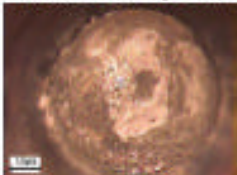





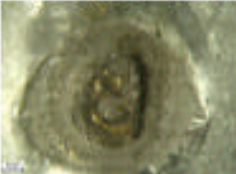
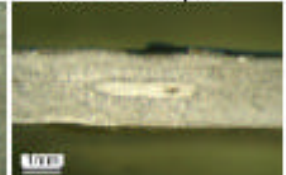
Diâmetro Capa de Eletrodo Superior	Superfície Superior da Chapa	Diâmetro do Ponto após Arrancamento	Macrografia da Chapa Soldada
 Eletrodo D=6,0mm	 Chapa 100 pts	 Pto Solda D=4,8mm	 Macro 100 pts
 Eletrodo D=6,0mm	 Chapa 300 pts	 Pto Solda D=4,7mm	 Macro 300 pts
 Eletrodo D=6,1mm	 Chapa 500 pts	 Pto Solda D=4,4mm	 Macro 500 pts
 Eletrodo D=6,2mm	 Chapa 700 pts	 Pto Solda D=4,4mm	 Macro 700 pts
 Eletrodo D=6,2mm	 Chapa 900 pts	 Pto Solda D=4,0mm	 Macro 900 pts
 Eletrodo D=6,3mm	 Chapa 1100 pts	 Pto Solda D=3,5mm	 Macro 1100 pts

Figura 61: Pontos soldados com a capa de eletrodo D.

5.4 Testes de Fresagem

5.4.1 Testes para determinar a dureza das capas de eletrodo após a fresagem

A Tabela 06 mostra a variação do perfil de dureza da capa A, durante os intervalos de fresagem de 120 pontos. Os resultados mostram uma acentuada queda no valor da dureza após o primeiro intervalo de fresagem de 120 pontos, uma vez que a dureza inicial da capa A é 115 HV. Este resultado confirma os testes realizados pela REU (1997), que aponta uma queda de dureza dos eletrodos entre 50 e 100 pontos de solda.

Tabela 06: Perfis de dureza da capa A.

Distância (mm)	Dureza (HV)				
	120 Pts	240 Pts	360 Pts	480 Pts	600 Pts
Camada Difusão (CD)	235	235	235	235	235
0,00	50	57	51	63	62
0,15	56	63	61	68	64
0,30	57	63	61	65	67
0,45	56	63	61	65	69
0,60	59	71	62	65	70
0,75	61	81	66	82	83
0,90	62	92	72	92	98
1,05	73	104	97	106	112
1,20	98	112	110	112	109
1,35	100	116	107	113	115
1,50	100	115	113	115	116

Os valores de dureza atingidos após o primeiro intervalo de fresagem tem pouca variação em relação aos valores da primeira fresagem. Isto deve-se a dois fatores: 1) a dureza cai logo após a camada de latão, permanecendo baixa até uma distância de 1,2 mm; 2) a camada de material retirada durante a fresagem é de apenas 0,15 mm, fazendo com que o reinício da soldagem seja realizada com a capa de eletrodo na região de baixa dureza. Analisando o comportamento da dureza durante os intervalos de fresagem, percebe-se que a dureza começou a estabilizar a uma distância de 1,20 mm da ponta do eletrodo.

A Tabela 07, apresenta os valores dos diâmetros das faces das capas de eletrodos superiores e do diâmetro médio dos pontos de solda ao final de cada intervalo de fresagem.

Tabela 07: Diâmetros das faces das capas de eletrodos superiores e diâmetro médio dos pontos de solda X Intervalo de fresagem.

	120 Pontos		240 Pontos		360 Pontos		480 Pontos		600 Pontos	
	Diâmetro Face do Eletrodo	Diâmetro do Ponto de Solda	Diâmetro Face do Eletrodo	Diâmetro do Ponto de Solda	Diâmetro Face do Eletrodo	Diâmetro do Ponto de Solda	Diâmetro Face do Eletrodo	Diâmetro do Ponto de Solda	Diâmetro Face do Eletrodo	Diâmetro do Ponto de Solda
Capa A	6,4	4,9	6,5	4,6	6,6	4,5	6,6	4,5	6,6	4,5
Capa B	6,3	5,2	6,3	4,7	6,4	4,7	6,4	4,6	6,4	4,5
Capa C	6,1	5,1	6,2	4,7	6,2	4,7	6,2	4,7	6,2	4,6
Capa D	6,0	5,2	6,1	5,1	6,1	5,0	6,1	5,0	6,1	5,0

A queda de dureza durante o primeiro intervalo de fresagem da capa A, teve influência direta no aumento do diâmetro da face da capa de eletrodo. Após o primeiro intervalo de soldagem, o diâmetro da face capa A foi de 6,4 mm e para os outros intervalos houve um aumento do diâmetro até atingir 6,6 mm. O crescimento do diâmetro da face da capa de eletrodo influenciou também no diâmetro médio do ponto de solda, que após a primeira soldagem diminuiu seu valor de 4,9 para 4,5 mm no último intervalo de fresagem. A diminuição no diâmetro médio do ponto de solda, foi ocasionado pelo aumento do diâmetro da face da capa de eletrodo, acarretando uma diminuição da densidade de corrente, como explicado na seção 3.7.

As capas B e C também apresentaram uma queda de dureza em relação a dureza original da capa ao longo do perfil, como mostrado nas Tabelas 08 e 09. Essa queda de dureza, também levaram a um aumento no diâmetro da face da capa do eletrodo e com isso numa diminuição nos valores dos diâmetros dos pontos de solda durante o intervalo de fresagem, como mostrados na Tabela 07.

Tabela 08: Perfis de dureza da capa B.

Distância (mm)	Dureza (HV)				
	120 Pts	240 Pts	360 Pts	480 Pts	600 Pts
CD	234	234	234	234	234
0,00	61	66	77	100	78
0,15	81	80	92	98	89
0,30	91	100	100	102	102
0,45	106	104	109	109	109
0,60	113	106	123	126	130
0,75	123	112	134	134	134
0,90	132	126	134	126	124
1,05	136	134	138	146	134
1,20	140	136	142	142	142
1,35	142	142	142	126	136
1,50	144	140	146	151	136

Tabela 09: Perfis de dureza da capa C.

Distância (mm)	Dureza (HV)				
	120 Pts	240 Pts	360 Pts	480 Pts	600 Pts
CD	230	230	230	230	230
0,00	61	67	60	87	74
0,15	61	74	70	80	75
0,30	65	81	69	77	72
0,45	63	98	74	83	79
0,60	75	118	90	104	97
0,75	109	118	110	119	116
0,90	118	121	119	116	124
1,05	115	126	128	121	121
1,20	121	132	126	132	128
1,35	124	132	126	123	132
1,50	124	132	136	126	130

As capas A e C apresentam a mesma composição química e o mesmo processo de fabricação, porém a capa C apresentou uma dureza maior na mesma região da capa de eletrodo, um crescimento menor na face da capa de eletrodo e o ponto de solda obtido no final do intervalo de fresagem foi ligeiramente maior em relação a capa A.

Essa diferença deve-se a fato da capa C ser produzida com cobre livre de oxigênio, apresentando maior resistência ao recozimento e, como consequência, menor perda de dureza em relação a capa A (INFOMET, 1998).

Apesar da fresagem ser utilizada para fazer a limpeza e recuperar o diâmetro da face da capa de eletrodo, ela não recupera as propriedades mecânicas da capa de eletrodo, garantindo a manutenção do diâmetro da face da capa de eletrodo e o diâmetro do ponto de solda no final dos intervalos de fresagem (TECNOWELDING, 2004). Pois, após a primeira fresagem, o eletrodo inicia a soldagem numa faixa de dureza baixa e o aumento do diâmetro da face ocorre mais rápido que durante o primeiro intervalo de soldagem. Essa característica foi observada para as capas A, B e C.

A Tabela 10 mostra os perfis de dureza da capa D (CuAl_2O_3). Interessante notar que a maior queda de dureza na capa D ocorreu praticamente na região 0,0 mm, ou seja, logo abaixo da camada de latão formada na face da capa de eletrodo. Nas outras regiões o valor de dureza ficou aproximadamente 10% abaixo da sua dureza original que é 178 HV.

A manutenção da dureza durante os intervalos de fresagem da capa D, teve influência direta na manutenção do diâmetro da face da capa do eletrodo, ou seja, houve uma variação de apenas 0,1 mm ao longo dos quatro intervalos de fresagem, e isso resultou na manutenção do diâmetro do ponto de solda, com valores acima de 5,0mm, conforme mostrados na tabela 07.

Tabela 10: Perfis de dureza da capa D.

Distância (mm)	Dureza (HV)				
	120 Pts	240 Pts	360 Pts	480 Pts	600 Pts
CD	230	230	230	230	230
0,00	148	148	148	138	138
0,15	161	156	161	158	151
0,30	158	166	161	156	161
0,45	169	151	166	169	153
0,60	163	156	166	169	161
0,75	161	163	163	169	156
0,90	166	156	166	174	161
1,05	166	156	166	174	163
1,20	163	161	169	174	166
1,35	166	166	169	177	169
1,50	166	151	171	177	169

A manutenção da dureza da capa D durante a soldagem e conseqüente manutenção do diâmetro do ponto de solda, está associada a sua composição química e ao processo de fabricação. O Al_2O_3 ancora os contornos de grão do cobre, limitando seu tamanho. A restrição de crescimento dos grãos favorece a manutenção da dureza a quente. Sendo o Al_2O_3 inerte, estável até $2300^{\circ}C$ e não reagindo com a matriz de cobre, as partículas de Al_2O_3 não tendem a coalescer nas temperaturas obtidas durante o processo de soldagem por resistência e, portanto, a capa de eletrodo não perde suas propriedades a altas temperaturas (CRAGGS, 2002, INTERMACHINERY, 2002).

5.4.2 Testes para determinar o intervalo de fresagem das capas de eletrodos

Os dados apresentados anteriormente mostram que as capas de eletrodo apresentam resultados diferenciados quanto à qualidade dos pontos de solda para o mesmo intervalo de fresagem e os mesmos parâmetros de soldagem. E indicam, também, que os intervalos de fresagem podem ser diferentes, uma vez que o desgaste para os quatro tipos de capas de eletrodo também é diferente.

Como apresentado pela Tecnowelding (2004) e Reu (1997), e constatado nos resultados dos testes anteriormente comentados, a função da fresagem é fazer a limpeza da capa de eletrodo e recuperar o seu perfil original, uma vez que as características de dureza são perdidas após entre 50 e 100 pontos de solda. Para recuperar as características iniciais de dureza, seria necessário retirar muito material da capa de eletrodo (acima de 1,5 mm para as capas A, B e C). Esta prática não é recomendada, pois acarretaria um consumo excessivo de eletrodo. Também, após poucos pontos de solda, a dureza cairia novamente, havendo a necessidade de nova fresagem com grande retirada de material e assim a vida do eletrodo também seria muito curta.

A deformação da face da capa de eletrodo, formação de crateras, sujeira e a contaminação pelo revestimento da chapa afetam a qualidade do ponto de solda e a produtividade do eletrodo, com exceção se as faces das capas dos eletrodos forem limpas e o seu perfil retornado ao que era no início da soldagem.

Considerando que a qualidade dos pontos de solda está associada a manutenção do diâmetro do ponto de solda e aspectos visuais (expulsão de material, rebarbas, indentação excessiva e grudamento de eletrodo na chapa), foram realizados testes de soldagem com as diferentes capas de eletrodo, até que o ponto de solda obtido apresentasse problemas de qualidade. Em função deste procedimento observou-se que as diferentes capas de eletrodos apresentaram intervalos de fresagens diferentes, em função dos motivos que recomendavam a nova fresagem. Três motivos foram considerados para que o teste de soldagem fosse interrompido e ocorresse a fresagem da capa de eletrodo:

Motivo 01: Após o teste de arrancamento, o ponto de solda atingiu o diâmetro mínimo (3,44 mm). A Figura 62 compara um ponto de solda com diâmetro médio abaixo do diâmetro mínimo (2,7mm) em relação a um ponto de solda com diâmetro médio de 5,0 mm.



a: $D_{\text{médio}} = 5,00\text{mm}$ b: $D_{\text{médio}} = 2,7\text{mm}$

Figura 62: Diâmetro mínimo do ponto de solda.

Motivo 02: Houve formação de rebarba na parte externa da chapa, causada pela cratera formada na face da capa de eletrodo. A Figura 63 mostra a cratera formada na face da capa de eletrodo e a Figura 64 mostra a rebarba formada na parte externa da chapa na região onde ocorreu o ponto de solda.



Figura 63: Capa de eletrodo com crateras na face.

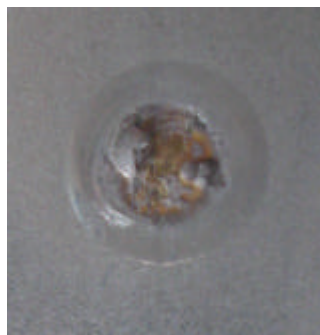


Figura 64: Rebarbas causadas pelas crateras na face da capa de eletrodo.

Motivo 03: A capa de eletrodo estava grudando na chapa. A Figura 65 mostra a capa de eletrodo grudada na chapa após a abertura dos braços de solda.

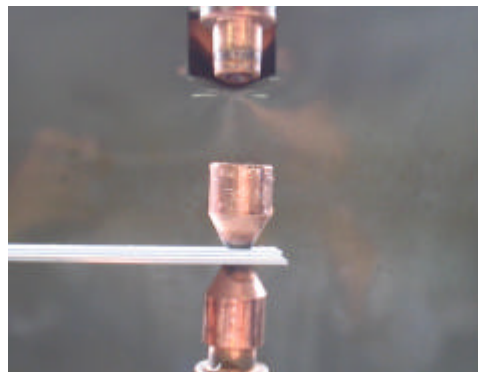


Figura 65: Capa de eletrodo grudada na chapa.

O grudamento dos eletrodos na chapa é o resultado da formação da camada de latão na face da capa de eletrodo, pois, a soldagem de materiais com revestimento de zinco favorecem a formação de latão. A camada de latão formada tem uma resistência maior ao fluxo de corrente elétrica do que o cobre das capas de eletrodos, fazendo com que um calor excessivo seja gerado nessa região, superaquecendo e recozendo o cobre do eletrodo, podendo resultar no grudamento da capa de eletrodo na chapa (INTERMACHINERY, 2003, REU, 1997). O grudamento da capa de eletrodo é um fator negativo, pois além de ocorrer o vazamento da água de refrigeração, em estações automáticas o robô pode continuar soldando, e se não houver um controle que detecte a saída da capa de eletrodo do porta eletrodo, o robô continuará soldando, afetando assim a qualidade da solda e gerando retrabalho.

A Tabela 11 mostra os resultados dos testes de fresagem para as diferentes capas de eletrodo, desde a primeira soldagem até a 3ª fresagem, onde são mostrados o diâmetro do ponto de solda (Dpto), a quantidade de pontos de solda (Nº Pts) no final do intervalo de soldagem e o motivo que recomendava a realização de nova fresagem.

Tabela 11: Intervalos de fresagem.

Capa de Eletrodo	1ª Soldagem			1ª Fresagem			2ª Fresagem			3ª Fresagem		
	Nº Pts	Dpto (mm)	Motivo da Fresagem	Nº Pts	Dpto. (mm)	Motivo da Fresagem	Nº Pts	Dpto. (mm)	Motivo da Fresagem	Nº Pts	Dpto. (mm)	Motivo da Fresagem
Capa A	300	4,0	Motivo 01	280	4,2	Motivo 03	250	4,1	Motivo 01	250	4,1	Motivo 01
Capa B	400	4,4	Motivo 02	250	4,1	Motivo 02	250	4,1	Motivo 02	250	4,1	Motivo 02
Capa C	700	4,2	Motivo 01 e 03	350	4,0	Motivo 03	350	4,0	Motivo 03	350	4,0	Motivo 03
Capa D	450	4,1	Motivo 02	400	4,1	Motivo 02	400	4,1	Motivo 02	400	4,1	Motivo 02

Como descrito no procedimento na seção 4.9, o intervalo ideal para a realização da fresagem foi definido como sendo o final do intervalo de 40 pontos de solda anterior ao que ocorreu o problema que afetou a qualidade e que recomendava a fresagem.

As distintas capas de eletrodos apresentaram comportamento e intervalos de fresagem diferentes. Inicialmente constatou-se que a necessidade da

primeira fresagem ocorre com um número maior de pontos soldados, conforme mostrados na Tabela 11. Este resultado estaria relacionado com o fato da condição inicial da capa de eletrodo possuir maior dureza em relação a condição após a primeira fresagem.

Os diferentes intervalos de fresagem está relacionado com a capacidade das capas reterem a dureza a quente, ocasionando um menor crescimento no diâmetro da face da capa de eletrodo e conseqüentemente a manutenção no diâmetro do ponto de solda.

A capa A soldou 300 pontos de solda na primeira soldagem e depois trabalhou-se com intervalos de fresagem de 250 até atingir o diâmetro mínimo do ponto de solda.

A capa B soldou 400 pontos de solda na primeira soldagem e depois trabalhou-se com intervalos de fresagem de 250, sendo que a soldagem foi interrompida porque havia formação de rebarbas na parte externa da chapa, na região onde o ponto de solda era formado. Isto decorre do aparecimento das crateras na face da capa de eletrodo.

Interessante notar que a capa C realizou 700 pontos de solda durante a primeira soldagem e depois os intervalos de fresagem foram de 350 pontos de solda, não podendo mais ser utilizada porque a capa de eletrodo grudava na chapa e saía do porta eletrodo. A maior produtividade da capa C em relação a capa A, que apresenta a mesma liga, está associada a ausência de oxigênio, o que garante uma maior resistência ao recozimento e conseqüentemente um menor desgaste (INFOMET, 1998).

A capa D apresentou o melhor intervalo de fresagem, que foi de 400 pontos de solda. Porém, a soldagem foi interrompida porque as crateras formadas na face da capa de eletrodo estavam formando rebarbas na parte externa da capa de eletrodo. No início da soldagem com a capa D, verificou-se uma excessiva expulsão de material, caracterizando que os níveis de corrente estavam acima dos necessários para obter um ponto de solda aceitável. Como apresentado por Edison (1999), Intermachinery (2003), Li (2001), Senkara (2004) e Vogler (2003), os altos níveis de corrente ou altos tempos de soldagem causaram a expulsão de

material e aceleraram o processo de formação das crateras nesta capa de eletrodo, indicando que os níveis de corrente ou tempo de soldagem poderiam ser menores que os utilizados. Porém não foi possível fazer estes ajustes na máquina, uma vez que os ajustes não permitiam com de correntes ou tempos de soldagem menores ajustados na máquina fosse possível obter pontos de solda com qualidades, ou intervalos de fresagem maiores que 80 pontos de solda.

O melhor desempenho da capa D comparado com as outras capas está relacionado com sua capacidade de manter a dureza a quente. Esta característica pode ser verificada nos testes de recozimento isotérmicos e conseqüentemente comprovada nos testes de produtividade e fresagem das capas de eletrodo, pois apresentou os melhores resultados em relação a número de pontos soldados, qualidade do ponto de solda e os maiores intervalos de fresagem.

6 CONCLUSÕES

Os resultados dos testes de soldagem mostram que as distintas capas de eletrodo apresentam um desempenho diferenciado durante o processo de solda a ponto, utilizando os mesmos parâmetros de soldagem e as mesmas espessuras de chapas. Tendo como base os ensaios realizados, conclui-se que:

- As condições a que ficam expostas as capas durante a soldagem de chapas galvanizadas promovem o seu desgaste, com formação de crateras e uma camada contínua de latão na superfície e nas crateras formadas na ponta da capa de eletrodo. As crateras causam impressões no ponto de solda e foi observado em todas as capas;
- Após o aparecimento das crateras, os pontos de solda tendem a serem formados sob a área delimitada pelas crateras formadas;
- As crateras começam a surgir aproximadamente a partir de 300 pontos de solda e neste momento o seu crescimento é acelerado com o aumento do número de pontos de solda;
- As diferentes capas de eletrodo apresentaram desgaste diferenciado ao longo da soldagem, que está associado a retenção da dureza a quente. Este desgaste diferenciado acarretou uma variação do número de pontos de solda até se atingir o diâmetro mínimo do ponto de solda;
- As capas D (Cu-Al₂O₃) e C (Cu-Zr – classe 1) apresentaram os melhores resultados de soldagem quanto o número de pontos que estas capas conseguem soldar antes de atingirem um diâmetro mínimo do ponto de solda;

- O melhor resultado da capa C em relação a capa A, que apresenta a mesma classe e liga, está associado a ausência do oxigênio durante o processo de fabricação, melhorando a resistência ao recozimento e, conseqüentemente, aumentando a produtividade da capa por gerar um menor desgaste;
- O melhor desempenho da capa D deve-se a sua maior resistência ao desgaste, que depende da capacidade de manter a dureza durante o aquecimento sofrido na soldagem, sendo isto atribuído ao endurecimento por dispersão;
- A qualidade dos pontos de solda depende de vários fatores: diâmetro do ponto de solda, aspecto visual (indentação, rebarbas, expulsão de material, fusão na superfície), e a ausência de defeitos internos como poros e trincas, os quais não são detectados pelo teste de arrancamento;
- O processo de fresagem é um procedimento importante para manter a qualidade do ponto de solda e aumentar a produtividade das capas de eletrodo, pois recupera a geometria do perfil e faz a limpeza da face das capas de eletrodo retirando as crateras e a camada de latão formada durante o processo de solda a ponto de chapas galvanizadas;
- As capas de eletrodo apresentaram diferentes intervalos de fresagem, pois por vários motivos a qualidade do ponto de solda foi afetada;
- O primeiro intervalo de soldagem é maior, pois a dureza inicial da capa de eletrodo é maior neste intervalo que após a primeira fresagem;
- Após a primeira fresagem, os intervalos de fresagem tendem a serem iguais até o final do ciclo de soldagem;

7 TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos através deste estudo não têm a pretensão de encerrar o assunto. Esta pesquisa buscou apresentar qualidade e clareza nos resultados, como o objetivo de trazer uma contribuição para que futuros pesquisadores possam pesquisar com maior profundidade o assunto de soldagem por resistência.

Contudo, pode-se sugerir alguns temas que surgiram no decorrer desta pesquisa e que, por não ser o objetivo principal, recomenda-se para novas pesquisas.

- ◆ Avaliação do desgaste das capas de eletrodo na soldagem de chapas de alumínio.

- ◆ Avaliação do desgaste das capas de eletrodo na soldagem de aços inoxidáveis.

- ◆ Influência do step de corrente no desgaste das capas de eletrodo.

- ◆ Influência da combinação de step de corrente e fresagem no desgaste das capas de eletrodo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agashe, S.; Zhang, H. Selection of Schedules Based on Heat Balance in Resistance Spot Welding. **Welding Journal**, Jul. 2003, p. 179 S – 183S.

AWS – American Welding Society, **Jefferson`s Welding Enciclopedia**. 18th Edition. Miami: 1997. p. 430.

Blakeley, P. Resistance Spot Welding – at Maximum Speed. **Welding & Metal Fabrication**, Sep. 2000, 2 p.

Chien, C. S.; Jr, E. Kannatey-Asibu. Investigation of Monitoring Systems for Resistance Spot Welding. **Welding Journal**, Sep. 2002, p. 195S – 199S.

Cho, Y.; Rhee, S. Experimental Study of Nugget Formation in Resistance Spot Welding. **Welding Journal**, Aug. 2003, p. 195 S – 201 S.

Craggs, James, **Nippert Presentation**. 2002, CD-ROM.

Dong, P.; Kimchi, M.; and Holmes, S. "Finite Element Modeling of Electrode Wear Mechanisms". **Auto/Steel Partnership Technical Report No. AZ-017-03**, April, 1995.

Edison Welding Institute. **Operating Procedures for Conducting the A/SP DOE of Coated Steels**. Draft No. 10, Jul. 1999, p. 01 – 22.

Eagar, Thomas W. **Resistance Welding: A fast, Inexpensive and Deceptively Simple Process**. 3rd International Conference on Trends in Welding Research. Gatlinburg, Tennessee, USA: June 1992, p 341 – 351.

ETS. **Manual de Dressagem ETS**. 2000, 20 p.

Feng, Z.; Babu, S.S.; Santela, M. L.; Riemer, B. W.; Gould, J. E. **An Incrementally Coupled Electrical- Thermal – Mechanical Model For Resistance Spot Welding**. p. 1 – 6, 5th International Conference on Trends in Welding Research, Pine Mountains, GA, Jun 1998, 6 p.

Fukumoto, S.; Lum, I.; Biro, E.; Brommer, D. R.; Zhou, Y. Effects of Electrode Degradation on Electrode Life in Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy 5182. **Welding Journal**, November 2003, p. 307S – 312S.

Gean, A; Westgate, S. A.; Kucza, J. C.; Herstron, J. C. Static and Fatigue Behavior of Spot Welded 5182-0 Aluminum Alloy Sheet. **Welding Journal**, March 1999, p.80S – 86S.

Guedes, J.B.P., Gonçalves, R.A. & Scotti. A., Avaliação de Desgaste de Eletrodos em Solda a Ponto por Resistência de Chapas Galvanizadas, XXX Consolda – Congresso Nacional de Soldagem, ABS, 13 a 15 de Setembro de 2004, Rio de Janeiro, RJ, 12 p.

Gugel, M. D.; White, C.L; Kimchi, M; Picket, K. "Mechanisms of Electrode Wear During Resistance Spot Welding Hot-Dipped Galvanized Steel". **A/SP Technical Report**, Auto/Steel Partnership, March 25, 1994.

Hirsch, Roger B.; Leibovitz, R. **The Effects of Tip Force on Weld Quality and Electrode Life**. Unitrol Electronics, Inc. Northbrook, IL, USA: p. 1 – 8,

INFOMET. Disponível em: <http://www.infomet.com.br/cu_capitulo01.php>. Acesso em 30 out. 2004.

Intermachinery Comércio Ltda. **Manual de Treinamento do ZTrode e Nitrode**. 2002, 33p

Intermachinery Comércio Ltda. **I Seminário de Solda a Ponto**. São Paulo: 2003, CD-ROM.

Joining Technologies. **Resistance Spot Welding Electrode Wear on Galvannealed Steels**. Sept. 1997. 29 p.

Joining Technologies. **Weld Quality Test Method Manual**. Oct. 1997. 40 p.

Li, W.; Cheng, S.; Hu, S. Jack; Shriver, J. Statistical Investigation on Resistance Spot Welding Quality Using a Two-State, Sliding-Level Experiment. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, vol 123, Aug 2001, p. 513 – 520.

Machado, Ivan Guerra. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre: Ed. Pelo Autor, 1996. 477p.

REU Schweisstechnik GmbH – Recycling Entwicklungs Unternehmen. **Grundlagen der Widerstandsschweisstechnik**. 1997, 336 p.

Robert Bosch GmbH. **Bos-5010 Instruções de Operação e Programação**. 1998, 115 p.

RWMA - Resistance Welder Manufacturers Association. **Eletrodos e Ferramentas Utilizadas no Processo de Soldagem por Resistência Elétrica**. 2002. p. 1 – 13.

Scharff, Robert; Caruso, Dave. **Complete Automotive Welding Metals and Plastic**. Delmar Publishers Inc. 1990.

Senkara, J.; Zhang, H.; Hu, S.J. Expulsion Prediction in Resistance Spot Welding. **Welding Journal**, April 2004, p 123S – 132S.

Tang, H.; Hou, W.; Hu, S.J.; Zhang, H. Y.; Feng, Z; Kimchi, M. Influence of Welding Machine Mechanical Characteristics on the Resistance Spot Welding Process and Weld Quality. **Welding Journal**, May. 2003, p. 116 S – 124 S.

Tecnowelding Comércio Ltda. **Fundamentos do Processo de Soldagem a Resistência**. 2004, 70 p.

Vogler, M.; Sheppard, S. Electrical Contact Resistance under High Loads and Elevated Temperatures. **Welding Journal**, June 2003.

Volkswagen AG. **VW 01105-1**: Winderstandspunktschweissen: Konstruktion, berechnung Prozesssicherung Umbeschichtete und beschichtete Stahlbleche. 2003.

Volkswagen do Brasil Ltda. **Soldagem por Resistência a Ponto**. 2000, 25 p.

Zhang, H.; Hu, S. Jack; Senkara, J.; Cheng, S. A Statistical Analysis of Expulsion Limits in Resistance Spot Welding. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, vol 122, Aug. 2002, p 501 – 510.

Zhou, M; Zhang, H.; Hu, S. J. Relationships Between Quality and Attributes of Spot Welds. **Welding Journal**, April 2003, p. 72S – 77S.

Wainer, Emílio, Mello; Fábio D. H. de.; Brandi, Sérgio Duarte. **Soldagem Processos e Metalurgia**. São Paulo: Edgar Blüchcher, 1992, p.21.

Yeung, K. S.; hornton,P. H. Transient Thermal Analysis of Spot Welding Electrodes. **Welding Journal**, Jan. 1999, p.1S – 6S.