

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Soldagem a Ponto Por Resistência Elétrica de Juntas de
Chapa/Chapa e Chapa/Tubo de Aço Baixo Carbono com
Diferentes Composições Químicas, Espessuras e
Revestimentos**

Autor : Astrid Damasco
Orientador: Itamar Ferreira

01/95

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SECÃO CIRCULANTE

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR ASTRID DAMASCO
E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 21/02/1995

Itamar
ORIENTADOR

0101973

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica de Juntas
de Chapa/Chapa e Chapa/Tubo de Aço de Baixo
Carbono com Diferentes Composições Químicas,
Espessuras e Revestimentos**

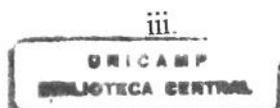
Autor : Astrid Damasco
Orientador: Itamar Ferreira

Curso: Engenharia Mecânica.
Área de concentração: Materiais e Processos

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 1995
S.P. - Brasil



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	I/UNICAMP
D 18	
V.	Ex.
TOMBO BC/	43702
PROC.	16-392101
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREC.º	RS 11,00
DATA	09/02/01
N.º CPD	

CM-00153249-7

FICHA CATALOGRAFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA CENTRAL - UNICAMP

Damasco, Astrid

D18s Soldagem a ponto por resistencia eletrica de juntas de chapa / chapa e chapa / tubo de aco baixo carbono, com diferentes composicoes quimicas, espessuras e revestimentos / Astrid Damasco. - - Campinas, SP : [s.n.], 1994.

Orientador : Itamar Ferreira.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecanica.

1. Solda e soldagem. 2. Soldas eletricas. 3. Tubos. 4. Chapas de aco. I. Ferreira, Itamar. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecanica. III. Titulo.

FACULDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Tese de: Doutorado

Título da Tese : SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA DE
JUNTAS DE CHAPA/CHAPA E DE CHAPA/TUBO DE AÇO
BAIXO CARBONO, COM DIFERENTES COMPOSIÇÕES
ESPESSURAS E REVESTIMENTOS.

Autora: Astrid Damasco

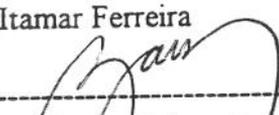
Orientador: Prof. Dr. Itamar Ferreira

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

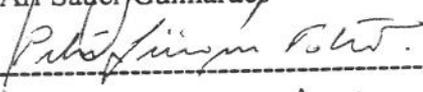
Aprovado por:



Prof. Dr. Itamar Ferreira



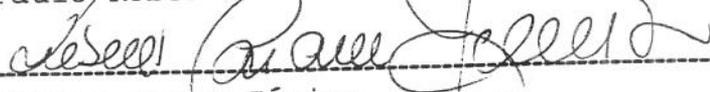
Prof. Dr. Ari Sauer Guimarães



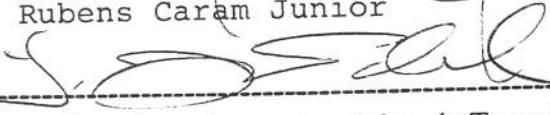
Prof. Dr. Peter Jurgen Tatsch



Prof. Dr. Paulo Roberto Mei



Prof. Dr. Rubens Caram Júnior



Eng. Mestre, Superintendente de Adm. de Tecnologia da CSN.- Yelson Duboc do
Natal.

Dedicatória:

Dedico este trabalho ao meu querido esposo Marco Antonio Silveira e aos meus filhos Rafael, Leticia e Pedro.

Agradecimentos:

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

- Ao Prof. Dr. Itamar Ferreira pela orientação da tese.
- Às empresas Mercedes Benz do Brasil (unidade de Campinas) e Companhia Siderúrgica Nacional pela inestimável colaboração, inclusive permitindo que toda a parte experimental deste trabalho fosse realizada em suas dependências.
- Ao CNPq pela concessão da bolsa de doutorado.
- Ao Eng. Mestre Yelson Duboc do Natal pelas discussões esclarecedoras.
- Ao Sr. Domingos Ferronato, pelo apoio oferecido.
- À todos os técnicos da CSN e da M.B.B. pelos serviços prestados.
- À todos os amigos de UNICAMP .
- À todos os omitidos que tornaram possível a realização deste trabalho.

RESUMO

DAMASCO, A. Soldagem a ponto por resistência elétrica de juntas de chapa/chapa e de chapa/tubo de aço baixo carbono, com diferentes composições químicas, espessuras e revestimentos. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1995. Tese Doutorado.

A motivação deste trabalho surgiu do fato da indústria automobilística usar em larga escala o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica para a produção de juntas de chapa/chapa e de chapa/tubo com diferentes espessuras, revestimentos e composição química, sendo que ainda há uma série de dificuldades práticas associadas a algumas combinações chapa-tubo-revestimentos e, inclusive, com poucos dados disponíveis na bibliografia especializada. Foi feito, neste trabalho, a caracterização e análise do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica para juntas de chapa sobre chapa e de chapa sobre tubo constituídas de aço baixo carbono, com diferentes composição química, espessura e revestimento. Para tanto, foram utilizadas chapas de aço ASTM 1005, de 0,95 mm de espessura, zincadas e tubos de aço ASTM 1023, de seção quadrada 30X30 mm², com espessuras de 1,5 mm, 2,0 mm e 3,0mm, todos fosfatizados. Com esses materiais foram obtidas juntas de chapa/chapa e chapa/tubo com diferentes combinações de espessuras (0,95/1,5 mm; 0,95/2,0 mm e 0,95/3,0 mm) e revestimentos (zinco/fosfato; zinco/zinco e decapados). As juntas de interesse foram submetidas ao processo de soldagem a ponto por resistência, cujos parâmetros de processo foram previamente determinados com base na chapa mais fina (0,95 mm de espessura), de modo a se obter intervalos de corrente de soldagem para cada combinação de espessura e revestimento. Os parâmetros de processo estudados foram corrente de soldagem, tipo de eletrodos e força entre eletrodos. As juntas obtidas foram analisadas quanto aos seus aspectos externos (identação, deformação e expulsão), aspectos internos (macroestrutura, diâmetro de lente, penetração, vazios e trincas), propriedades mecânicas (resistência à tração axial e torque máximo) e modo de fratura macroscópica. Para as juntas de chapa/chapa foram obtidos intervalos de soldagem maiores que 2,0 kA, garantindo ampla faixa de soldabilidade, para as diferentes combinações de espessuras de chapas e dos revestimentos de chapas estudados. Também foi possível obter intervalos de soldagem maiores que 2,0 kA para as juntas de chapa/tubo, com tubos de 2,0 mm e 3,0 mm de espessura nas diferentes combinações de revestimentos estudadas. A soldagem em tubos de 1,5 mm de espessura foi viabilizada através do desenvolvimento de quatro diferentes processos, sendo que todos os quatro resultaram em intervalos de soldagem acima do valor mínimo de 1,0 kA, a partir do qual um processo de soldagem a ponto por resistência elétrica é considerado viável. Esses processos envolvem a utilização de alguns dispositivos desenvolvidos pela autora, e que levaram a valores razoavelmente altos de carga de tração e de torque máximo. Em alguns casos, os pontos de solda obtidos apresentaram vazios no interior da lente de solda ou trincas na superfície da chapa de 0,95 mm. Contudo, todos os pontos obtidos dentro dos intervalos de soldagem apresentaram valores de carga de tração máxima e de torque máximo maiores que o mínimo prescrito na literatura especializada.

Palavras Chave:

Solda a ponto por resistência, Aço, Revestimento, Chapa, Tubo.

ABSTRACT

DAMASCO, A. Resistance spot welding of low-carbon steel for sheet/sheet and sheet/tube joints, with different composition, thickness, and coating. Doctoral Thesis. Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, SP, 1994.

The motivation for this work came from the fact of the automobile industry uses on a large-scale the resistance spot welding of low-carbon steel of sheet/sheet and sheet/tube joints, with different composition, thickness, and coating, and there are a few information on these complex joints in the bibliography. A characterization and analysis of the resistance spot welding process for sheet/sheet and sheet/tube joints of low-carbon steel, with different composition, thickness, and coating has been conducted. For that, ASTM 1005 steel zinc coated sheet, 0.95 mm thick, and ASTM 1023 steel square tube, 30x30 mm², 1.5, 2.0, and 3.0 mm thick, in a phosphorised condition have been utilized, for obtaining sheet/sheet and sheet/tube joints with different thickness combination (0.95/1.5 mm; 0.95/2.0 mm; 0.95/3.0 mm), and coating (zinc/phosphate; zinc/zinc; and uncoated). The joints were welded by using the welding parameters obtained from the thinnest sheet (0.95 mm thick) in order to obtain welding electric current intervals for each thickness and coating combinations. The welding electric current, type of electrode, and welding force have been studied. The joints have been analysed from the following points of view: external aspects (indentation, deformation, and expulsion); inner aspects (macrostructure, nugget, diameter, penetration, shrinkage void, and cracks); mechanical properties (ultimate tensile load and maximum torsional moment), and macroscopic fracture mode. It was observed electric current welding intervals greater than 2.0 kA for all sheet/sheet joints, that means wide weldability for different combinations in sheet thickness and coating. It was possible to observe also current welding intervals greater than 2.0 kA for sheet/tube joints, 2.0 and 3.0 mm thick for all coating conditions. On the other hand, it was possible to obtain good welds in 1.5 mm thick tube only by using four different processes, and as a result of these, it was also possible to obtain current welding intervals greater than the minimal value 1.0 kA. Some of the fixtures used in these four processes were developed by the author. In some case, there were shrinkage voids in the nugget or cracks from 0.95 mm thick sheet surface. Therefore, all nugget obtained in the current welding intervals presented ultimate tensile load and maximum torsional greater than the minimal value recommended in the bibliography.

Key Words

Resistance spot welding, Steel, Coating, Sheet, Tube.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	
LISTA DE TABELAS.....	
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos.....	2
2. PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA	
2.1. Histórico.....	3
2.2. O Processo de Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica.....	5
2.3. Fenômeno de Geração de Calor por Efeito Joule.....	8
2.4. Resistências Elétricas na Soldagem a Ponto.....	9
2.5. Formação da Lente de Solda.....	13
3. PRINCIPAIS PARÂMETROS DE SOLDAGEM	
3.1. Eletrodo.....	26
3.1.1. Material do Eletrodo.....	27
3.1.2. Geometria do Eletrodo.....	29
3.2. Corrente de Soldagem.....	34
3.3. Força entre Eletrodos.....	35
3.4. Tempo de Solda.....	36
3.5. Inter-relação entre Parâmetros de Soldagem - Gráfico de Soldabilidade.....	39
4. CARACTERÍSTICAS DE REVESTIMENTO E SOLDAGEM DE CHAPA DE AÇO BAIXO CARBONO ZINCADO E FOSFATIZADO	
4.1. Aço de Baixo Carbono Zincado.....	44
4.2. Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica de Chapa Zincada Comum.....	47
4.3. Aço de Baixo Carbono Fosfatizado.....	49
4.4. Soldagem de Materiais com Diferentes Espessura, Composição Química e Revestimento....	53
5. CONTROLE DE QUALIDADE DA SOLDA A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA	
5.1. Aspectos Gerais.....	55
5.2. Análises Externas dos Pontos de Solda.....	56
5.3. Análises Internas dos Pontos de Solda.....	60
5.4. Ensaios Mecânicos	63
5.5. Fratura dos Pontos de Solda.....	68
6. MATERIAIS E MÉTODOS	
6.1. Materiais.....	72
6.1.1. Caracterização dos Substratos.....	73
6.1.2. Caracterização dos Revestimentos.....	75
6.1.2.1. Chapa de Aço Zincada e Tubo de Aço Zincado.....	75
6.1.2.2. Tubo de Aço Fosfatizado.....	78
6.1.2.3. Chapa e Tubo de Aço Decapados.....	79
6.2. Equipamento de Soldagem e Instrumentos de Controle.....	80
6.2.1. Máquina de Soldagem.....	80

F. Influência de um Suporte não Condutor no Interior do Tubo e do Local da Solda com Eletrodo Cone Truncado e Esférico.....	156
G. Influência da Força Entre Eletrodos e Local da Solda com Eletrodo Cone Truncado e Esférico.....	165
H. Influência de Suporte Condutor no Interior do Tubo com Eletrodo Esférico....	172
I. Influência do Percorso da Corrente no Tubo com Eletrodo Superior Cone Truncado e Inferior Peça em "U"	179
J. Influência do Percorso da Corrente no Tubo com Eletrodo Superior Esférico e Inferior Peça em "U"	185
L. Influência do Revestimento da Junta Chapa/Tubo com Eletrodo Cone Truncado.....	192
M. Influência de um Suporte Condutor no Interior do Tubo Para Junta Revestida de Zinco.....	195
7.3.4. Comparação dos Resultados de Soldagem de Tubos de 1,5 mm de Espessura.....	201
7.3.5. Comparação dos Resultados de Soldagem de Tubos de 2,0 mm de Espessura.....	207
7.3.6. Comparação dos Resultados de Soldagem das Três Espessuras de Tubos, Obtidos com Parâmetros Iniciais.....	212
7.3.7. Comparação dos Resultados de Soldagem de Tubos das Três Espessuras, Obtidos com e sem Suporte Condutor no Interior dos Tubos e Par de Eletrodo 12/16 e Solda no Centro.....	222
8. CONCLUSÕES.....	227
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	230

LISTA DE FIGURAS

2.1 Representação esquemática de uma máquina de soldagem a ponto	6
2.2 Representação esquemática das fases de operação da soldagem a ponto	7
2.3 Condutor contínuo percorrido por uma corrente elétrica	8
2.4 Esquema das resistências elétricas na solda a ponto	10
2.5 Esquema do estado térmico de um ponto de solda	14
2.6 Convecção na lente de solda	15
2.7 Características elétricas com registro dinâmico durante a soldagem a ponto	19
2.8 Curvas teóricas para o comportamento da resistência dinâmica	20
2.9 Perfil térmico de um ponto de solda	22
2.10 Formação do ponto de solda com indentação	23
2.11 Contração e dilatação térmica da lente de solda	24
2.12 Esquema dos sinais de emissão acústica na soldagem	24
2.13 Sinais de ultra-som na inspeção de solda a ponto	25
3.1 Comportamento de dureza X temperatura para vários tipos de eletrodos	29
3.2 Padrões das formas das pontas dos eletrodos	30
3.3 Esquema das geometrias pimple e pimple modificada	32
3.4 Esquema de um tipo de eletrodo com rotação no eixo axial	33
3.5 Comportamento do fluxo de corrente de solda em aços	35
3.6 Relação entre diâmetro do ponto de solda e tempo de solda	38
3.7 Esquema de um gráfico de soldabilidade	40
3.8 Esquema de um gráfico de soldabilidade comum (GSC) e otimizado (GSO)	43
5.1 Esquema metalográfico de uma lente de solda	56
5.2 Esquema de expulsão	58
5.3 Esquema de lente de solda assimétrica	61
5.4 Esquema dos corpos de prova para ensaio tração cisalhante	63
5.5 Esquema dos corpos de prova para ensaio tração	64
5.6 Resultados de ensaios mecânicos em soldas de aço com 1,0 mm de espessura	67
5.7 Ruptura do ponto de solda	69
6.1 Esquema da retirada dos corpos de provas das chapas para análise do revestimento	76
6.2 Esquema da retirada dos corpos de prova dos tubos para análise do revestimento	77

6.3 Esquema dos corpos de prova das chapas para soldas	82
6.4 Esquema dos corpos de prova dos tubos para soldas	83
6.5 Esquema das juntas soldadas	84
6.6 Peça de cobre utilizada como eletrodo inferior	89
7.1 Microestrutura das chapas de aço utilizadas	96
7.2 Microestrutura dos tubos de aço utilizados	97
7.3 Micrografia das revestimentos de zinco	100
7.4 Micrografia do revestimento de fosfato	101
7.5 Metalografia soldas chapas 0,95/1,5 mm e 0,95/2,0 mm, ele. 5/16, F 2800 N, t=15c	104
7.6 Metalografia soldas chapas 0,95/3,0 mm, ele. 5/16, F 2800 N, t=15c	105
7.7 Tração x corrente de solda de juntas chapa/chapa com eletrodo 5/16 mm	108
7.8 Torque x corrente de solda de juntas chapa/chapa com eletrodo 5/16 mm	109
7.9 Metalografia soldas chapas 0,95/1,5 mm e 0,95/2,0 mm, ele.12/16, F 2800 N, t=15c	113
7.10 Metalografia soldas chapas 0,95/3,0 mm, ele. 12/16, F 2800 N, t=15c	114
7.11 Tração x corrente de solda de juntas chapa/chapa com eletrodo 12/16 mm	115
7.12 Torque x corrente de solda de juntas chapa/chapa com eletrodo 12/16 mm	116
7.13 Metalografia soldas chapas 0,95/2,0 mm: a)zincadas b) decapadas	131
7.14 Tração x corrente de solda de juntas chapa/chapa com revestimentos	136
7.15 Torque x corrente de solda de juntas chapa/chapa com revestimentos	137
7.16 Metalografia soldas chapa/tubo 0,95/2,0 mm: a) centro b) borda , ele 5/16 mm	141
7.17 Metalografia soldas chapa/tubo 0,95/3,0 mm: a) centro b) borda, ele 5/16 mm	142
7.18 Tração x corrente solda de juntas chapa/tubo, ponto centro ou borda, 5/16	146
7.19 Torque x corrente solda de juntas chapa/tubo, ponto centro ou borda, 5/16	147
7.20 Metalografia soldas chapa/tubo 0,95/2,0 mm: a) centro b) borda , ele 12/16 mm	150
7.21 Metalografia soldas chapa/tubo 0,95/3,0 mm: a) centro b) borda , ele 12/16 mm	151
7.22 Tração x corrente solda de juntas chapa/tubo, ponto centro ou borda, 12/16	154
7.23 Torque x corrente solda de juntas chapa/tubo, ponto centro ou borda, 12/16	155
7.24 Metalografia soldas chapa/tubo 0,95/1,5 mm: a) centro b) borda , ele 5/16 mm	159
7.25 Metalografia soldas chapa/tubo 0,95/1,5 mm: a) centro b) borda , ele 12/16 mm	160
7.26 Tração x corrente solda de chapa/tubo, ponto centro ou borda, 5/16 e 12/16	162
7.27 Torque x corrente solda de chapa/tubo, ponto centro ou borda, 5/16 e 12/16	163
7.28 Metalografia soldas chapa/tubo 0,95/1,5 mm, centro ou borda, 5/16 mm, F = 800N	167

7.29 Metalografia soldas chapa/tubo 0,95/1,5 mm, centro ou borda, 12/16 mm, F= 800N	168
7.30 Tração x corrente solda de chapa/tubo, ponto centro ou borda, 5/16 e 12/16	170
7.31 Torque x corrente solda de chapa/tubo, ponto centro ou borda, 5/16 e 12/16	171
7.32 Metalografia soldas chapa/tubo de 0,95/1,5 mm, 0,95/2,0 mm, condutor no tubo	174
7.33 Metalografia soldas chapa/tubo de 0,95/3,0 mm, condutor no tubo	175
7.34 Tração x corrente solda de chapa/tubo, tubos 1,5; 2 e 3 mm, condutor no tubo	177
7.35 Torque x corrente solda de chapa/tubo, tubos 1,5; 2 e 3 mm, condutor no tubo	178
7.36 Metalografia soldas de 0,95/1,5 mm, 0,95/2,0 mm, eletrodo 5/ condutor U tubo	181
7.37 Tração x corrente solda de chapa/tubo, de 1,5 e 2 mm, eletrodo 5/ condutor U tubo	183
7.38 Torque x corrente solda de chapa/tubo, de 1,5 e 2 mm, eletrodo 5/ condutor U tubo	184
7.39 Metalografia soldas de 0,95/1,5 mm, 0,95/2,0 mm, eletrodo 12/ condutor U tubo	187
7.40 Metalografia soldas de 0,95/2,0 mm, eletrodo 12/ condutor U tubo	188
7.41 Tração x corrente solda de chapa/tubo de 1,5 e 2 mm, eletrodo 12/condutor U tubo	190
7.42 Torque x corrente solda chapa/tubo de 1,5 e 2 mm, eletrodo 12/condutor U tubo	191
7.43 Metalografia solda chapa/tubo 0,95/2,0 mm, zincado, decapado, eletrodo 5/16	197
7.44 Metalografia solda chapa/tubo 0,95/2,0 mm, zincado, eletrodo 12/16 + condutor	198
7.45 Tração x corrente solda chapa/tubo, 0,95/2,0 mm, com diferentes revestimentos	199
7.46 Torque x corrente solda chapa/tubo, 0,95/2,0 mm, com diferentes revestimentos	200

LISTA DE TABELAS

3.1	Resumo das propriedades mecânicas e elétricas das ligas de eletrodos	28
4.1	Especificação das chapas de aço zincadas	45
4.2	Tipos de revestimentos iguais	45
4.3	Tipos de revestimentos diferenciados	46
4.4	Camadas que compõem o revestimento	47
4.5	Classificação da camada de fosfato	52
6.1	Materiais utilizados	72
7.1	Características dos aços utilizados	94
7.2	Características da microestrutura dos aços	95
7.3	Características das camadas de zinco	99
7.4	Características do revestimento de fosfato	99
7.5	Soldagem de chapas 0,95/1,5 mm, eletrodo 5/16 mm, F = 2800 N, t = 15c.	102
7.6	Soldagem de chapas 0,95/2,0 mm, eletrodo 5/16 mm, F = 2800 N, t = 15c	103
7.7	Soldagem de chapas 0,95/3,0 mm, eletrodo 5/16 mm, F = 2800 N, t = 15c	103
7.8	Soldagem de chapas 0,95/1,5 mm, eletrodo 12/16 mm, F = 2800 N, t = 15c.	110
7.9	Soldagem de chapas 0,95/2,0 mm, eletrodo 12/16 mm, F = 2800 N, t = 15c	110
7.10	Soldagem de chapas 0,95/3,0 mm, eletrodo 12/16 mm, F = 2800 N, t = 15c	111
7.11	Comparação dos valores de cargas de tração e torção	118
7.12	Soldagem de chapas 0,95/2,0 mm, zincadas, ele. 5/16 mm, F = 2800 N, t = 15c	130
7.13	Soldagem de chapas 0,95/2,0 mm, decapadas, ele. 5/16 mm, F = 2800 N, t = 15c	130
7.14	Soldagem chapa/tubo 0,95/2,0 mm, no centro tubo, 5/16, F = 2800 N, t=15c	139
7.15	Soldagem chapa/tubo 0,95/2,0 mm, na borda tubo, 5/16, F = 2800 N, t=15c	139
7.16	Soldagem chapa/tubo 0,95/3,0 mm, no centro tubo, 5/16, F = 2800 N, t=15c	140
7.17	Soldagem chapa/tubo 0,95/3,0 mm, na borda tubo, 5/16, F = 2800 N, t=15c	140
7.18	Soldagem chapa/tubo 0,95/2,0 mm, no centro tubo, ele. 12/16, F = 2800 N, t=15c	148
7.19	Soldagem chapa/tubo 0,95/2,0 mm, na borda tubo, ele. 12/16, F = 2800 N, t=15c	149

7.20 Soldagem chapa/tubo 0,95/3,0 mm, no centro tubo, ele. 12/16, F = 2800 N, t=15c	149
7.21 Soldagem chapa/tubo 0,95/3,0 mm, na borda tubo, ele. 12/16, F = 2800 N, t=15c	149
7.22 Soldagem chapa/tubo 0,95/1,5 mm, centro tubo, ele. 5/16, F = 2800 N, t=15c	157
7.23 Soldagem chapa/tubo 0,95/1,5 mm, borda tubo, ele. 5/16, F = 2800 N, t=15c	157
7.24 Soldagem chapa/tubo 0,95/1,5 mm, centro tubo, ele. 12/16, F = 2800 N, t=15c	157
7.25 Soldagem chapa/tubo 0,95/1,5 mm, borda tubo, ele. 12/16, F = 2800 N, t=15c	158
7.26 Soldagem chapa/tubo 0,95/1,5 mm, centro tubo, ele. 5/16, F = 800 N, t=15c	165
7.27 Soldagem chapa/tubo 0,95/1,5 mm, borda tubo, ele. 5/16, F = 800 N, t=15c	165
7.28 Soldagem chapa/tubo 0,95/1,5 mm, centro tubo, ele. 12/16, F = 800 N, t=15c	166
7.29 Soldagem chapa/tubo 0,95/1,5 mm, borda tubo, ele. 12/16, F = 800 N, t=15c	166
7.30 Soldagem chapa/tubo 0,95/1,5 mm, ele. 12/16, F=2800N, condutor interior tubo	173
7.31 Soldagem chapa/tubo 0,95/2,0 mm, ele. 12/16, F=2800N, condutor interior tubo	173
7.32 Soldagem chapa/tubo 0,95/3,0 mm, ele. 12/16, F=2800N, condutor interior tubo	173
7.33 Soldagem chapa/tubo 0,95/1,5 mm, eletrodo 5/ condutor U tubo	180
7.34 Soldagem chapa/tubo 0,95/2,0 mm, eletrodo 5/ condutor U tubo	180
7.35 Soldagem chapa/tubo 0,95/1,5 mm, eletrodo 12/ condutor U tubo, centro	185
7.36 Soldagem chapa/tubo 0,95/1,5 mm, eletrodo 12/ condutor U tubo, borda	186
7.37 Soldagem chapa/tubo 0,95/2,0 mm, eletrodo 12/ condutor U tubo, centro	186
7.38 Soldagem chapa/tubo 0,95/2,0 mm, eletrodo 12/ condutor U tubo, borda	186
7.39 Soldagem chapa/tubo 0,95/2,0 mm, zincado, eletrodo 5/16	192
7.40 Soldagem chapa/tubo 0,95/2,0 mm, decapado, eletrodo 5/16	193
7.41 Soldagem chapa/tubo 0,95/2,0 mm, zincado, eletrodo 12/16 + condutor	196
7.42 Comparação da soldagem de chapa/tubo 0,95/1,5 mm	201
7.43 Comparação da soldagem de chapa/tubo 0,95/2,0 mm	208
7.44 Comparação da soldagem de chapa/tubo para as três espessuras de tubo	213
7.45 Comparação soldagem chapa/tubo, p/ três espessuras de tubo, com e sem condutor	223

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem por resistência elétrica foi descoberto no final do século passado por Elihu Thomson, onde se destaca o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, que vem sendo largamente utilizado pelas indústrias automobilísticas em todo o mundo.

A solda a ponto foi inicialmente indicada para soldagem de chapas de aço de até 6,0 mm de espessura, uma vez que acima dessa espessura a energia requerida é tão alta que o processo torna-se economicamente inviável. Pode ainda ser utilizado para soldagem de chapas de diferentes espessuras desde que guarde a proporção máxima de 1:5, e com algumas modificações no processo.

O processo de soldagem a ponto por resistência elétrica conta com vasta publicação. Contudo, as informações sobre soldagem de chapas de espessuras diferentes, composições químicas diferentes e revestimentos diferentes na mesma junta são menos frequentes, assim como são escassas as informações sobre a utilização desse processo para soldagem de chapa sobre tubo de aço estrutural, sendo esse tipo de junta frequentemente utilizada pela indústria automobilística.

Neste trabalho procurou-se caracterizar o processo de solda a ponto por resistência elétrica para juntas de chapa sobre chapa e chapa sobre tubo, de aço baixo carbono, com diferentes espessuras, composição química e revestimento. A combinação destes fatores resulta em uma complexidade tal, que faz-se necessário um estudo amplo para que se conheça as influências dos diversos parâmetros de processo relacionados.

1.1 - OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é caracterizar e desenvolver o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica de juntas de chapa/chapa e chapa/tubo constituídas de aço de baixo carbono, com diferentes espessuras, revestimento e composição química. Para caracterizar o processo em estudo, o requisito fundamental é obter um intervalo de soldagem para as juntas chapa/chapa e chapa/tubo com diferentes espessuras e revestimentos maior que 1,0 kA, sendo que os pontos de solda obtidos dentro desse intervalo de soldagem apresentem aspectos externos, aspectos internos e propriedades mecânicas dentro dos critérios previstos por normas.

CAPÍTULO 2

2. HISTÓRICO E PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.1 - HISTÓRICO

Em 1877, durante uma experiência realizada, o professor Elihu Thomson, do Instituto Franklin, descobriu por casualidade o princípio da soldagem elétrica por resistência. Ele carregava uns condensadores com ajuda de uma bobina de indução de dois enrolamentos, alimentada por uma bateria. Esta bateria estava conectada ao primário da bobina através de um interruptor, de tal forma que os condensadores se conectavam aos bornes da bobina secundária, que continha um número superior de espiras, e estava construída com fios mais finos (1).

Ao longo de sua demonstração, Thomson pensou que seria interessante realizar a experiência ao inverso. Conectou os condensadores aos bornes da bobina secundária, de fios finos, deixando as pontas do primário, de fios mais grossos, unidas por simples contato.

A descarga de corrente no secundário, induziu uma tensão no primário fechado, provocando uma fusão dos extremos da bobina, soldando as partes.

Havia sido descoberto o princípio de um novo procedimento de união por soldagem elétrica: a resistência ôhmica, formada pelo contato das peças metálicas, e atravessada por uma corrente elétrica, pode dar lugar, em determinadas circunstâncias, à geração de calor por efeito Joule.

Até 1886, Thomson procurou verificar as aplicações práticas do processo de soldagem, quando, então, aperfeiçoou o procedimento e o patenteou.

O descobrimento desse procedimento deu origem aos diversos processos de soldagem por resistência elétrica: solda a topo, solda a ponto, solda por costura, por centelhamento e por projeção (2).

Em 1898 apareceu a primeira utilização da soldagem a ponto por resistência, na fabricação de utensílios de cozinha. Em 1915 já era usado na construção de carrocerias de automóveis soldando chapas de aço, sendo que as publicações no assunto enfocavam apenas definições de parâmetros (3).

A criação de centrais elétricas, e a construção de novas linhas de distribuição de energia elétrica, tornaram possível a extensão de novas aplicações das máquinas de soldagem por resistência elétrica alimentadas por corrente alternada. A partir de 1930, os processos de soldagem por resistência tornaram-se mais seguros e econômicos, pois se podia contar com melhores equipamentos de monitorização do processo, havendo, ainda, uma maior preocupação com os fenômenos envolvidos (4 -7).

Durante a segunda guerra mundial, obrigada pelas necessidades de produção massiva, a indústria norte americana utilizou em grande escala a soldagem por resistência. Desta maneira numerosas aplicações novas foram descobertas, como a aplicação na indústria aeronáutica, com publicações dos trabalhos para ligas não ferrosas, principalmente alumínio (8-11).

A extraordinária difusão alcançada pela soldagem por resistência se deve em grande parte aos controles eletrônicos. Estes elementos, possibilitaram a precisão necessária na regulagem da passagem da corrente e dos tempos de solda, assim como possibilitaram a construção de equipamentos de monitorização dos fenômenos envolvidos (12,13).

Atualmente os processos de soldagem por resistência se aplicam a várias indústrias. A indústria automobilística, por exemplo, utiliza em um veículo de passeio de 3.000 a 4.000 pontos de solda (14). Utiliza-se, ainda, soldagem por costura na construção de tanques de gasolina e de tubos de escapamentos, solda a topo na construção de rodas, solda por projeção na fixação de parafusos, entre outros processos de soldagem elétrica por resistência.

As principais vantagens dos processos de soldagem por resistência elétrica são a rapidez do processo, a não necessidade de metal de adição, a possibilidade de soldar peças de formas complexas as quais não poderiam ser soldadas por outro processo e a possibilidade de completa automação dos equipamentos.

2.2 O PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA

O processo de soldagem a ponto por resistência elétrica é autógeno, utilizado principalmente para união de chapas sobrepostas, com espessuras de até 6,0 mm. Espessuras maiores podem ser soldadas mas o processo não é economicamente viável pois requer máquinas especiais (15).

As máquinas de soldagem por pontos podem ser classificadas em duas grandes categorias (1,15):

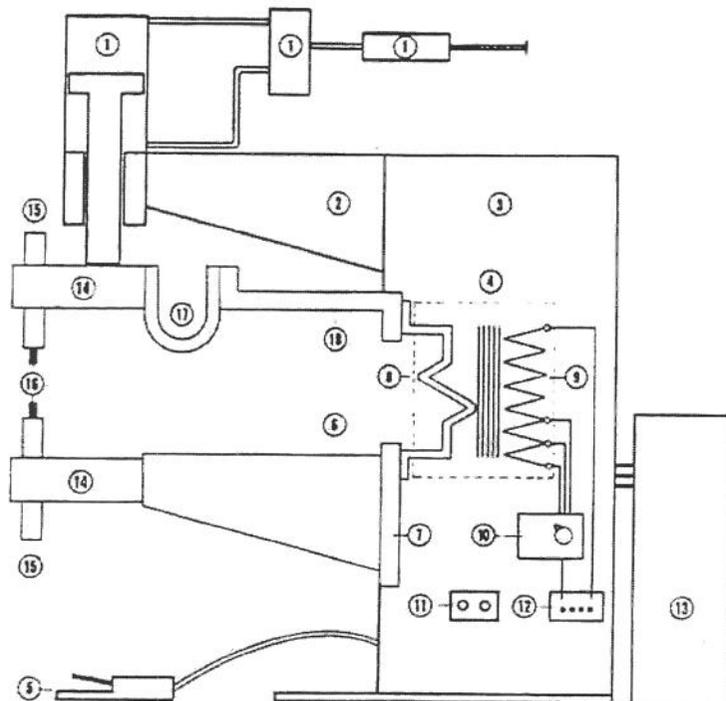
- Máquinas rígidas: estacionária com um ponto, duplo ponto, multi pontos, automatizada.
- Máquinas móveis: pinça, pistola manual, equipamentos com e sem transformador incorporado.

No caso das máquinas rígidas, as peças a serem soldadas são levadas até a máquina para realizar os pontos de solda, com deslocamento das peças. No caso das máquinas móveis, as peças a serem soldadas são fixas e a máquina de solda é que desloca-se para soldar as peças nos pontos desejados.

As máquinas de soldagem podem também ser caracterizadas por:

- Sistema de aplicação de força entre os eletrodos;
- Tipo de alimentação elétrica: monofásica ou trifásica;
- Disposição do circuito elétrico de soldagem;
- Corrente de soldagem: alternada, baixa frequência, contínua ou retificada;
- Cadência da soldagem: ponto por ponto, ponto automático, pequena ou grande cadência.

As soldas realizadas em máquinas rígidas geralmente são de melhor qualidade, pois a rigidez da máquina garante maior uniformidade dos pontos de solda do que as máquinas móveis. A representação esquemática de uma máquina de soldagem a ponto, rígida, do tipo usado neste trabalho, é mostrada na figura 2.1.



- | | |
|--------------------------------|----------------------------------|
| 1. Cilindro pneumático | 10. Regulador de potência |
| 2. Braço superior | 11. Alimentador de ar comprimido |
| 3. Armário | 12. Placa de conexão elétrica |
| 4. Transformador | 13. Aparelhos elétricos |
| 5. Pedal | 14. Suporte do porta-eletrodo |
| 6. Braço inferior | 15. Porta-eletrodos |
| 7. Suporte do braço inferior | 16. Eletrodos |
| 8. Secundário do transformador | 17. Condutor superior flexível |
| 9. Primário do transformador | 18. Condutor superior rígido |

Figura 2.1: Representação esquemática de uma máquina de soldagem a ponto (1)

A obtenção dos pontos de solda utilizando uma máquina estacionária, geralmente obedece a seguinte seqüência de operações: inicialmente as duas peças a serem soldadas são colocadas uma sobre a outra, e o conjunto sobre o eletrodo inferior. Provoca-se a descida do eletrodo superior, comprimindo assim as peças (figuras 2.2.A e 2.2.B).

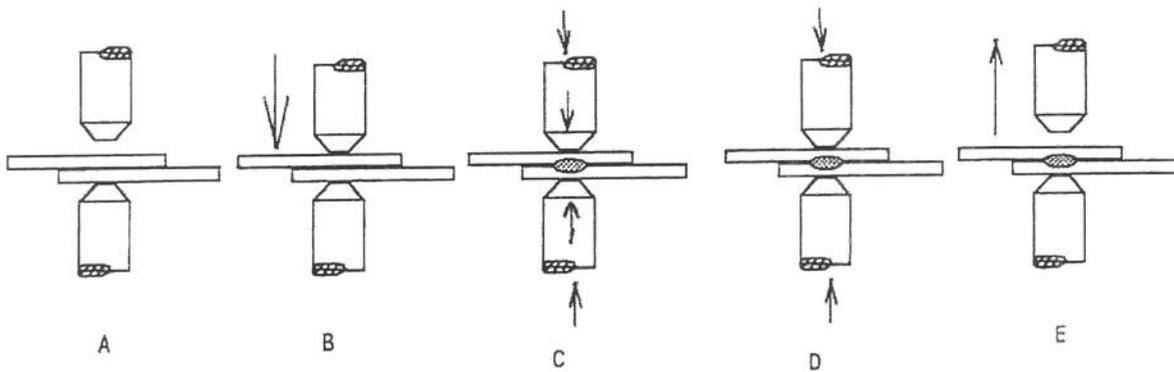


Figura 2.2: Representação esquemática das fases de uma operação de soldagem a ponto (1):

- A. Peças a soldar, colocadas uma sobre a outra;
- B. Descida do eletrodo superior e aplicação da força;
- C. Passagem da corrente elétrica de solda;
- D. Interrupção da passagem da corrente de solda;
- E. Retirada da força e elevação do eletrodo superior.

As faces externas das peças estão em contato com os eletrodos em uma superfície delimitada por suas pontas. Os eletrodos estão em contato com os bornes do secundário do transformador elétrico cuja missão é transmitir uma corrente elétrica de alta intensidade e pequena tensão.

Estando as peças comprimidas, o que provoca o fechamento do circuito secundário do transformador, faz-se passar uma corrente elétrica durante um determinado tempo (figura 2.2.C). A passagem da corrente produz calor, por efeito Joule, em cada uma das partes do circuito, proporcional à resistência ôhmica de cada região (16).

Neste circuito elétrico, é esperado que a maior resistência ôhmica esteja entre as peças, de modo que haja uma fusão de um núcleo de seção mais ou menos elíptica, que pertence às duas peças.

Após um certo tempo a corrente elétrica é interrompida, mas o esforço de compressão é mantido para que haja o rápido resfriamento das peças (figura 2.2.D). Terminada esta operação o eletrodo superior se eleva, sendo o final do processo (figura 2.2.E).

2.3 FENÔMENO DA GERAÇÃO DE CALOR POR EFEITO JOULE

Considerando um condutor qualquer de resistência elétrica R percorrido por uma corrente de intensidade I (figura 2.3), a diferença de potencial entre os extremos "a" e "b" é dada pela equação 2.1 (16,17):

$$V_a - V_b = RI \quad (2.1)$$

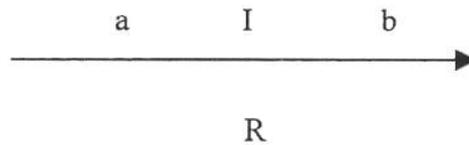


Figura 2.3: Condutor contínuo percorrido por uma corrente elétrica "I" (16).

Podemos então dizer que o condutor "ab" absorve e transforma, em energia de outra forma, a potência elétrica P , dada pela seguinte equação:

$$P = (V_a - V_b).I \quad (2.2)$$

Sendo

$$P = R.I^2 \quad (2.3)$$

Dessa última expressão pode-se observar que o valor da potência é independente do sentido da corrente, pois é proporcional ao quadrado desta e o resultado é sempre positivo. Pode-se dizer também que a absorção da potência elétrica no condutor "ab" é devido exclusivamente ao fato de um condutor de resistência elétrica R ser atravessado por uma corrente I .

Lembrando que a resistência elétrica de um condutor é consequência do atrito interno que se opõe ao movimento das cargas elétricas, pode-se pensar que a potência elétrica P é a necessária para vencer a resistência elétrica R , que se opõe à passagem de corrente I ; portanto, esta potência elétrica se transforma em calor.

A quantidade de calor produzida por uma corrente que atravessa um condutor é definida pela lei de Joule experimental (16,17):

"Em um condutor percorrido por uma corrente constante, desenvolve-se na unidade de tempo uma quantidade de calor proporcional à resistência elétrica do condutor e ao quadrado da intensidade de corrente que nele circula".

Essa lei pode ser escrita pela expressão:

$$Q = \int_0^t RI^2 dt \quad (2.4)$$

Exprimindo, nesta expressão, as grandezas com unidades do sistema SI, isto é, resistência (R) em ohms; intensidade de corrente (I) em ampère; tempo (t) em segundos, a energia elétrica que se transforma em calor (Q) é medida em Joule.

A lei de Joule foi enunciada para um condutor contínuo (portanto, com uma única resistência ôhmica), na qual são baseados os aparelhos de aquecimento elétricos, lâmpadas elétricas, etc. Nestas aplicações não ocorre a fusão do condutor, exceto pelo mal dimensionamento do condutor.

A lei de Joule possui ainda outra importante aplicação, que é o processo de soldagem por resistência elétrica. Nesse caso, a corrente elétrica que atravessa um condutor não-contínuo (formando um conjunto de resistências ôhmicas) em um intervalo de tempo, libera uma quantidade de calor que pode levar à fusão. Nessas aplicações se deseja a fusão, para que haja soldagem.

2.4 RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS NA SOLDAGEM A PONTO

O estudo das resistências elétricas no processo de soldagem a ponto tem sido desenvolvido há mais de 4 décadas, (18) com o intuito de ampliar os conhecimentos sobre os mecanismos de geração de calor na formação da lente de solda. As resistências do circuito de soldagem vem sendo estudadas tanto as resistências estáticas (RE) (19,20), como as resistências dinâmicas (RD), ou seja, com a passagem de corrente elétrica as resistências das juntas sofrem contínuas modificações (21-24).

Na soldagem a ponto por resistência, o condutor não-contínuo é constituído de um conjunto de resistências elétricas dispostas em série. Na figura 2.4 estão indicadas as principais resistências locais, que determinam o perfil térmico do circuito de soldagem.

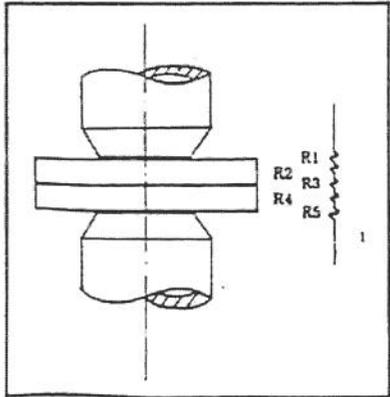


Figura 2.4. Esquema das resistências elétricas na soldagem a ponto por resistência (25), onde:
 - R1 e R5 : Resistências de contato entre os eletrodos e as peças;
 - R2 e R4 : Resistências dos metais de base;
 - R3 : Resistência de contato entre as peças.

Pode-se observar que existem dois tipos de resistências elétricas, a saber: de contato e do interior dos materiais. As resistências de contato aparecem devido ao fato da área efetiva, comum às duas superfícies metálicas, serem efetivamente constituída por apenas uma pequena fração de área aparente, conforme pode ser observado na figura 2.4, uma vez que a nível microscópico somente as irregularidades em alto relevo das duas superfícies se tocam (1,19,21). Estas regiões de contato são denominadas pontes metálicas.

Alcini, citado por Marra (26), propôs uma expressão para a resistência de contato, muito embora o próprio autor reconheça que uma equação que melhor caracterize esta propriedade ainda está por vir. A expressão é dada abaixo:

$$R_c = \frac{\rho}{2} \left\{ \frac{E\pi H_0 (T_s - T_0)}{[F(T_s - T_0)]^{1/2}} \right\} \tag{2.5}$$

onde: E = Rugosidade média das superfícies que compõem as interfaces;

H₀ = Dureza Brinell à temperatura ambiente;

T₀ = Temperatura ambiente;

T_s = Temperatura de amolecimento, acima da qual o material oferece baixa resistência à deformação plástica (aproximadamente 2/3 da temperatura de fusão) ;

F = Força aplicada pelos eletrodos;

ρ = Resistividade elétrica do material.

O segundo tipo de resistência no circuito de soldagem é a resistência interna dos metais de base, a qual pode ser expressa pela seguinte equação:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.6)$$

onde, R = Resistência do meio condutor;

L = Comprimento do condutor;

A = Área da seção reta do condutor;

ρ = Resistividade do metal de base.

Como pode-se observar, resistividade elétrica dos materiais interfere tanto na resistência de contato entre as chapas como nas resistências internas dos metais de base. Ela é função da temperatura e esta dependência pode ser aproximada a uma relação linear, da seguinte forma:

$$\rho = \rho_0 [1 + a(T - T_0)] \quad (2.7)$$

onde, ρ = Resistividade a uma temperatura genérica (T);

ρ_0 = Resistividade à temperatura ambiente (T_0);

a = Coeficiente médio de variação da resistividade com a temperatura.

O coeficiente "a" pode ser positivo ou negativo, em função da predominância de um dos seguintes efeitos:

- Aumento da resistividade pela maior interação dos núcleos dos átomos com os elétrons livres, decorrente da maior vibração da rede cristalina com a temperatura, que é o efeito predominante em materiais condutores (metais, etc);

- Diminuição da resistividade pelo aumento da quantidade de elétrons livres ejetados dos átomos, com a elevação da temperatura, que é o efeito predominante em materiais semicondutores.

Para os aços e metais em geral, este coeficiente é sempre positivo, ou seja, a resistividade sempre cresce com a temperatura. Segundo Mott e Jones a relação anterior não é válida para temperaturas muito altas, próximas à fusão (26).

Esta propriedade é ainda fortemente influenciada pela composição química, tendendo a crescer com a introdução de soluto. Existem algumas fórmulas desenvolvidas por métodos estatísticos, como as de Ludwingson e D'Haever dadas a seguir, que prevêm a resistividade elétrica de aços à temperatura ambiente (27, 28)

$$\rho(\mu\Omega.cm) = 10,1169 + 6,1985Mn + 14,3269P - 10,3715S + 11,7499Si + 3,8815Cu + 2,9775Ni + 5,5696Cr. \quad (2.8)$$

$$\rho(\mu\Omega.cm) = 11 + 16(Si + 0,35Mn + 0,43Cr) \quad (2.9)$$

As equações anteriores são calculadas em porcentagem de peso dos elementos, sendo que as porcentagens de manganês, fósforo, enxofre e silício têm maior influência no estabelecimento da resistividade elétrica do material.

Contudo, existe ainda alguma discrepância nos resultados sobre as medidas de resistências elétricas no circuito de soldagem, o que pode ser atribuído tanto ao fato das resistências elétricas do circuito variarem com os parâmetros de soldagem (força, tempo e corrente) (22) como também por não ter sido normalizado o método de investigação e por se utilizar diferentes instrumentos de controle. Eagar(29) afirma que é necessário desenvolver melhores instrumentos de controle para medidas das resistências elétricas das juntas soldadas a ponto por resistência.

2.5 FORMAÇÃO DA LENTE DE SOLDA

A evolução da lente de solda vem sendo investigada por vários métodos, os quais podem ser divididos em métodos adimensionais (metalografia dos pontos de solda) e métodos dimensionais (perfil térmico, expansão e contração da solda, emissão acústica, ultra-som e propriedades elétricas).

Trabalhos recentes tem sido realizados utilizando seqüência metalográfica de pontos de solda obtidos com valores crescentes de aporte de calor, fornecidos pelo acréscimo de corrente ou tempo de solda, mantendo os demais parâmetros constantes (23,30-32).

A análise metalográfica é uma ferramenta utilizada para dar informações dos mecanismos presentes na formação da lente de solda e se baseia na macro e micro estrutura dos pontos. De modo que, através da análise de estruturas resultantes da fusão e solidificação do ponto de solda, é possível saber onde o calor foi gerado, quais as temperaturas alcançadas, como foi o resfriamento, se existem defeitos e quais os mecanismos de sua evolução.

Para a formação da lente de solda, com a passagem de corrente ocorre, inicialmente, um aquecimento muito localizado na interface entre as chapas fundindo um núcleo de metal de seção elíptica, situado simetricamente entre as chapas. Com acréscimo do aporte de calor, a área fundida é maior, ou seja é maior o diâmetro de lente.

Interrompida a passagem de corrente de solda, o núcleo de metal fundido se encontra no centro de uma massa refrigeradora, constituída pela própria peça e eletrodos. Pode-se comparar a um metal fundido que se resfria dentro de uma lingoteira. O resfriamento do núcleo fundido se realiza de fora para dentro, e será tanto mais rápido quanto mais elevado for o gradiente de temperatura, o qual varia da temperatura de fusão (no centro da interface entre as chapas) até a temperatura ambiente (o ar e a água de refrigeração dos eletrodos).

Analisando um esquema genérico do estado térmico de um ponto de solda de chapas de aço baixo carbono, figura 2.5, pode-se determinar a macroestrutura geralmente resultante em cada zona de aquecimento (1,15,33), a saber:

- Zona central (A), alcança temperatura de fusão; após o resfriamento resulta em estruturas dendríticas que convergem para o centro do ponto, no sentido oposto à extração de calor, caracterizando-se pela presença de grãos colunares.
- Zona (B), que rodeia o metal fundido cujo metal está em estado plástico, com temperatura acima da crítica (mais que 723°C); seu resfriamento é lento, e é caracterizada pela presença de grãos equiaxiais grosseiros.
- Zona (C), em torno da temperatura crítica; se resfria tanto mais rápido quanto mais próxima está da ponta dos eletrodos, apresentando grãos equiaxiais finos.
- Zona (D), inferior à temperatura crítica; em contato com os eletrodos se resfria rapidamente apresentando pouca modificação microestrutural, sendo que durante a solda, sua temperatura se mantém a um valor ligeiramente superior à temperatura ambiente.
- Zona (E), permanece à temperatura ambiente; sem mudança microestrutural.

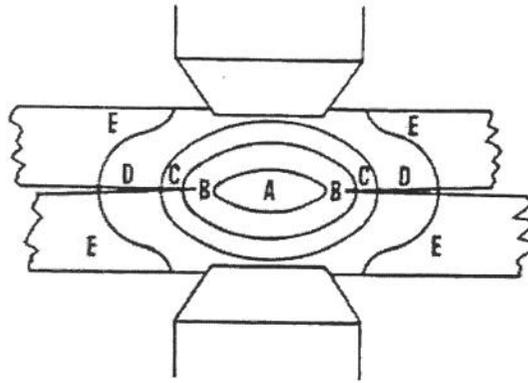


Figura 2.5: Esquema do estado térmico de um ponto de solda em duas chapas de aço baixo carbono, no final de seu período de aquecimento (1).

A microestrutura desempenha um papel importante na resistência mecânica da solda. A microestrutura é também importante, dado que uma estrutura dúctil é desejável na raiz do entalhe marcando a intersecção de duas chapas soldadas, evitando que a fratura interfacial ocorra na lente de solda. Williams (34) faz algumas considerações sobre a importância da taxa de aquecimento e da taxa de resfriamento na microestrutura da solda.

- Importância da Taxa de Aquecimento na Microestrutura

Para entender a estrutura final da solda, é necessário considerar as condições que controlam a formação e a distribuição da austenita durante o ciclo de aquecimento. A zona

termicamente afetada tem uma estrutura muito complexa por causa das altas taxas de aquecimento e de resfriamento típicos da solda por resistência. É necessário considerar as transformações de fase sob condições fora do equilíbrio; microestruturas normalmente associadas com aço hiper-eutetóide podem ser observadas na zona termicamente afetada em soldas de aço hipo-eutetóides (34).

Similarmente, as estruturas da lente de solda são complexas. A composição química da lente de solda tende a ser homogênea, devido ao alto grau de mistura resultante do uso de correntes alternadas (AC) durante o aquecimento. Entretanto, o padrão das taxas de resfriamento existente nas diversas zonas da solda é complexo e depende largamente da espessura da chapa e da configuração e do tamanho dos eletrodos.

Alcini (35) propõe que existe convecção no metal líquido fundido, cujo mecanismo é provavelmente por indução eletromagnética. Este efeito causa uma temperatura homogênea na lente. A figura 2.6 mostra um possível mecanismo de convecção no metal líquido.

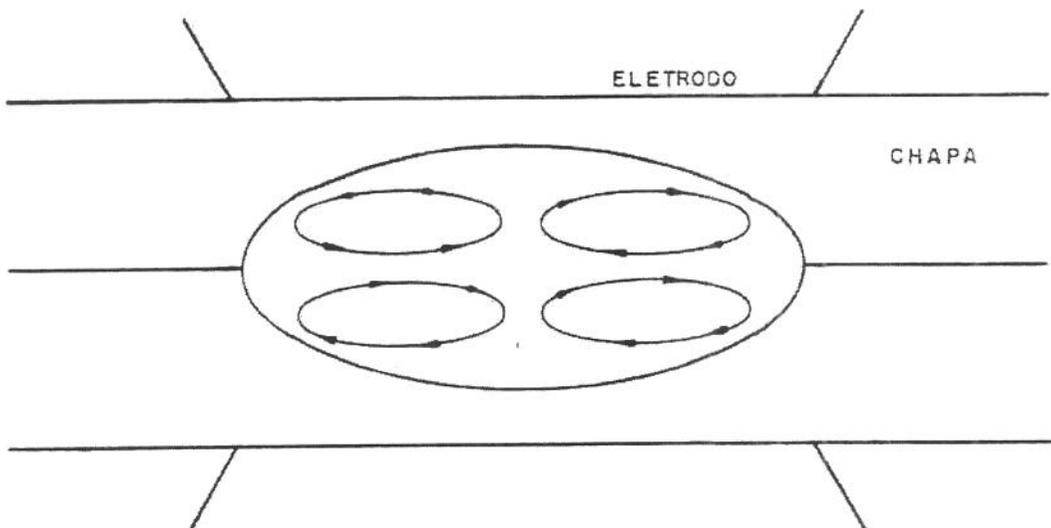


Figura 2.6: Convecção na lente de solda (35)

As mudanças estruturais possíveis de ocorrer em chapas de aço carbono, quando soldadas a ponto, foram bem estudadas por simulação de ciclos de solda típicos em amostras grandes;

taxas de aquecimento de 2000-20000⁰C por segundo foram usadas. Tem sido demonstrado que mudanças estruturais na zona termicamente afetada são, normalmente, insensíveis às taxas de aquecimento normalmente encontrada nesta região em uma solda a ponto, enquanto que as transformações metalúrgicas são muito sensíveis à estrutura inicial.

Em casos de aço completamente perlítico, a nucleação de austenita cresce aleatoriamente através da estrutura de base e na direção radial. Quando a estrutura inicial é martensítica, a austenita tende a nuclear nos contornos de grão da austenita previamente existente. Se a estrutura inicial é ferrita mais perlita, a austenita nucleia nas regiões perlíticas e cresce radialmente dentro da vizinhança da ferrita. A transformação geralmente ocorre dentro de uma faixa de temperatura muito estreita.

A formação de austenita em estruturas previamente esferoizadas ocorre, inicialmente, nas interfaces ferrita-cementita. Dois tipos de crescimento não-isotrópico ocorrem nos estágios iniciais da formação da austenita, a saber, contornos de grão de ferrita alongados e crescimento acircular dentro da ferrita. Esse mecanismo de crescimento difere daquele normalmente observado em estruturas aquecidas lentamente nas quais austenita geralmente envolve as partículas de cementita e, então, cresce radialmente.

- Importância da Taxa de Resfriamento na Microestrutura

É usual considerar que as propriedades finais da solda a ponto é controlada, até certo ponto, pela formação de martensita na lente de solda ou na zona termicamente afetada durante o ciclo térmico de resfriamento. Geralmente, a martensita é excessivamente dura somente quando o teor de carbono da austenita excede aproximadamente 0,2%, enquanto martensita de baixo carbono geralmente possui menor dureza.

Martensita pode geralmente ser formada em aços contendo mais que 0,15% de carbono mesmo nas partes da zona termicamente afetada de uma solda a ponto, onde a taxa de resfriamento é relativamente baixa. Enquanto que a martensita geralmente não é encontrada em aço com menos de 0,1% de carbono, após o aquecimento existe a possibilidade de formação de martensita na zona termicamente afetada da solda a ponto de tal aço. A taxa de resfriamento na

maioria das partes da zona termicamente afetada excede a taxa de resfriamento crítica necessária para formação da martensita, e tem sido mostrado que a taxa crítica é excedida mesmo em solda a ponto de aço de 0,012% de carbono. Taxas de resfriamento maiores que 5.000 C/segundo podem ser observadas em partes da zona termicamente afetada e, sob estas condições, a martensita pode rapidamente formar em aços com menos de 0,10% de carbono (34).

A formação da martensita em aço de baixo carbono seria também favorecida em áreas onde há formação da austenita com alta concentração de carbono. Na prática, a composição da austenita formada tanto na interface da ferrita como na de cementita é determinada pelo pico de temperatura alcançado no ponto e, porque existe um ciclo térmico dinâmico, um gradiente de carbono ocorrerá dentro da austenita. Em geral, o gradiente de carbono persiste até que a fase instável desapareça.

Entretanto, na zona termicamente afetada da solda, o ciclo térmico é tal que um gradiente de carbono abrupto persistiria todo o tempo. Isto resulta em áreas de austenita de alta concentração de carbono, particularmente perto de partículas de carbeto as quais não são completamente dissolvidas. O tamanho das partículas de carbeto é de grande importância; uma vez que a dissolução incompleta de partículas de carbeto aumentaria o gradiente de carbono na austenita formada em torno de uma partícula de carbeto, o gradiente de carbono seria maior para partículas maiores do que para partículas finas.

Tem sido demonstrado, através da simulação de estruturas termicamente afetadas, que carbeto finos em matriz ferrítica dissolvem-se mais rapidamente do que carbeto mais grossos. Além disto, para um dado teor de carbono, o caminho médio livre entre carbeto é inversamente proporcional ao tamanho dos carbeto. Portanto, a distância de difusão para homogeneização da austenita é menor para carbeto finos, e uma fase austenítica contínua é formada numa temperatura que esteja dentro da faixa intercrítica, onde o teor de carbono da austenita é maior do que o teor nominal do carbono no aço.

No resfriamento, esta condição induz a formação de uma rede contínua de martensita. Dos dados experimentais obtidos para aços de 0,07-0,09 % de carbono (36), foi calculado que para evitar a possibilidade de uma rede martensítica, a distância entre as partículas deve ser duas

vezes maior que a distância de difusão, do, onde:

$$d_0 = 4\sqrt{Dt} \quad (2.10)$$

onde, D = coeficiente de difusão do carbono no ferro

t = tempo na temperatura

Um importante fator a ser considerado, além da influência do gradiente de concentração, é o efeito das deformações elástica e plástica sobre a transformação da austenita. Wells e West (37) observaram uma deformação plástica quando a tensão foi aplicada durante a transformação. Por causa do aquecimento e do resfriamento não uniformes ocorridos na zona termicamente afetada de uma solda a ponto, tensões aparecem nessa zona, particularmente sob condições de alta restrição. Assim, certas regiões na temperatura de transformação pode escoar plasticamente, causando posterior esforços no resfriamento naquelas áreas que não escoaram. A tensão elástica pode causar rompimento da formação da martensita na maneira proposta por Wells e West (37) ocorrendo, assim, maior escoamento. Com tal padrão de transformação e de tensão, a probabilidade de martensita na zona termicamente afetada é maior mesmo em aços de baixo carbono.

A influência da deformação nas transformações microestruturais dos aços de baixo carbono também é citada por Mei (38). Afirma que quando o aço está na temperatura austenítica e é resfriado bruscamente, haverá uma tendência de formar uma fase metaestável (a martensita). Mas esta fase só aparecerá realmente se a temperatura for abaixada além da temperatura de início de formação da martensita. Isto porque sendo a martensita uma fase com deformações ela precisa de uma quantidade de energia elástica para a sua formação. Pode-se acelerar o aparecimento da martensita usando deformações plásticas durante a têmpera. Esta deformação externa fornece energia elástica para facilitar a transformação.

Os métodos dimensionais utilizados para se conhecer o desenvolvimento dos pontos de solda, com registro dinâmico dos dados obtidos, possibilitam avaliações da solda sob diferentes aspectos, enriquecendo o conhecimento dos mecanismos presentes na formação da lente de solda. Os métodos normalmente utilizados para monitorar o desenvolvimento das soldas estão descritos a seguir.

Parâmetros Elétricos:

A técnica de monitorização das características elétricas é uma das mais populares. Os valores que são monitorados inclui a voltagem, corrente e tempo. Com estes valores pode-se calcular a resistência dinâmica, energia e potência. Uma ilustração esquemática da variação destes parâmetros como função do tempo é mostrado na figura 2.7, onde os gráficos apresentam um ciclo de soldagem completo.

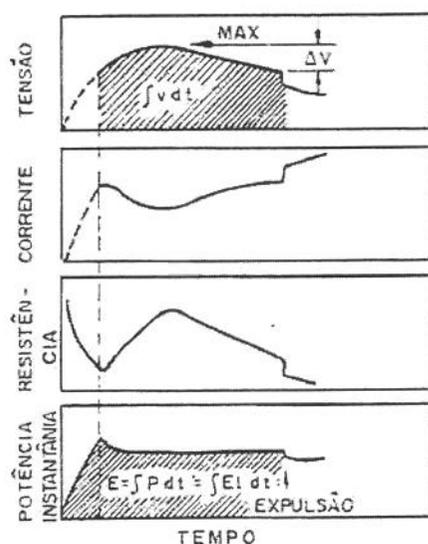


Figura 2.7: Características elétricas com registro dinâmico , durante a soldagem a ponto de aço-carbono (15).

O levantamento das resistências dinâmicas dos pontos de solda, tem sido bastante utilizado. Dickinson (22) apresenta um trabalho importante sobre o comportamento das resistências dinâmicas na explicação dos mecanismo de geração de calor na junta soldada a ponto por resistência elétrica, o que pode ser observada na figura 2.8.

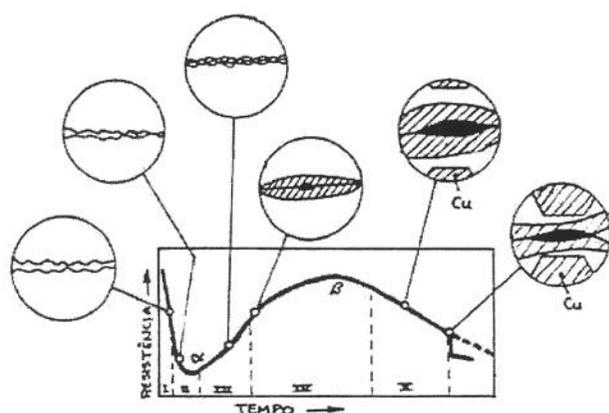


Figura 2.8. Curva teórica para o comportamento da resistência dinâmica (22)

Analisando a curva da figura 2.8, no trecho I, a resistência dinâmica (RD) cai de um valor elevado (RE) para um valor menor. Esta etapa compreende o começo da soldagem, após a justaposição das peças e a aplicação de força pelos eletrodos. A resistência inicial é elevada devido à presença de contaminantes superficiais nas peças. Assim, a geração de calor nos primeiros ciclos de soldagem está concentrada na interface da solda. Isso faz com que haja fusão e dissociação dos contaminantes como óxido, óleo e graxa. Ocorre também um amaciamento das rugosidades superficiais pela elevação da temperatura local. Portanto neste trecho, a resistência tende a cair. Esta etapa é extremamente rápida, tendo a duração de poucos ciclos.

O trecho II da mesma figura é caracterizado por dois efeitos conflitantes. O primeiro é a diminuição das resistências de contato (R1, R3, R5 na figura 2.4) pela continuação do amaciamento das rugosidades superficiais. O segundo é o aumento da resistência elétrica do material de base (R2 e R4 na figura 2.4) por ação térmica, pois o calor gerado na interface é difundido para as regiões vizinhas.

O trecho III da figura 2.8 é caracterizado pela elevação da resistência do circuito de soldagem. A forte atuação do segundo efeito, mencionado anteriormente, é responsável por isto. No final desta fase ocorre a fusão e o início da formação da lente de solda. Para materiais revestidos, neste trecho ocorrem quedas repentinas da resistência, correspondendo à fusão e à

expulsão do revestimento. Os locais de fusão na interface são aleatórios, ocorrendo em várias pequenas regiões.

O trecho IV é caracterizado por efeitos que elevam e reduzem a resistência elétrica dinâmica. A elevação da resistência elétrica ocorre em função do aquecimento do metal de base. Nesta etapa, as várias regiões fundidas coalescem formando a lente, que, a partir daí, cresce, havendo um acúmulo de metal fundido entre as peças. Este efeito tende a provocar a redução da resistência elétrica devido à aproximação dos eletrodos e devido ao desaparecimento gradativo da interface das peças. A aproximação dos eletrodos ocorre em função da redução da resistência mecânica do material fundido e do material sólido que circundam a poça fundida.

O trecho V é caracterizado pelo decréscimo das resistências, em função da aproximação dos eletrodos.

No trecho VI há uma brusca diminuição da resistência dinâmica, pois ocorre o vazamento de metal fundido pela ruptura da região corona, que é a região definida pelo material da interface que circunda a lente. Este fenômeno é denominado expulsão, e tem como causa a repentina aproximação dos eletrodos.

Neste trabalho, para se conhecer os mecanismos presentes na formação das lentes de solda, utilizou-se o registro da corrente de solda em conjunto com a seqüência metalográfica dos pontos.

- Perfil Térmico

Com o crescimento da lente de solda, o calor circunda o metal e, deste modo, baseado em rigorosos cálculos, pode-se determinar a máxima temperatura no centro da lente do solda (15, 25,35,39). Os instrumentos utilizados para medidas de temperaturas são termopares e detector de radiação infra vermelho. O segundo instrumento não é largamente usado porque sujeiras e fumaças causam variações nos resultados obtidos da superfície emissiva de radiação.

Chen (25), utilizando um modelo térmico de diferenças finitas, prevê a temperatura como função do tempo e sua localização na peça; para aços de baixo carbono, o mesmo modelo pode ser usado para outros metais desde que se inclua as respectivas propriedades físicas dos mesmos. Mostra ainda, que com base no perfil térmico pode-se prever, indiretamente, o tamanho da lente de solda da zona termicamente afetada, suas respectivas microestrutura e propriedades mecânicas. A figura 2.9.a apresenta o perfil térmico de um ponto de solda e a figura 2.9.b a lente de solda obtida pelo modelo e dados experimentais, com base no perfil térmico.

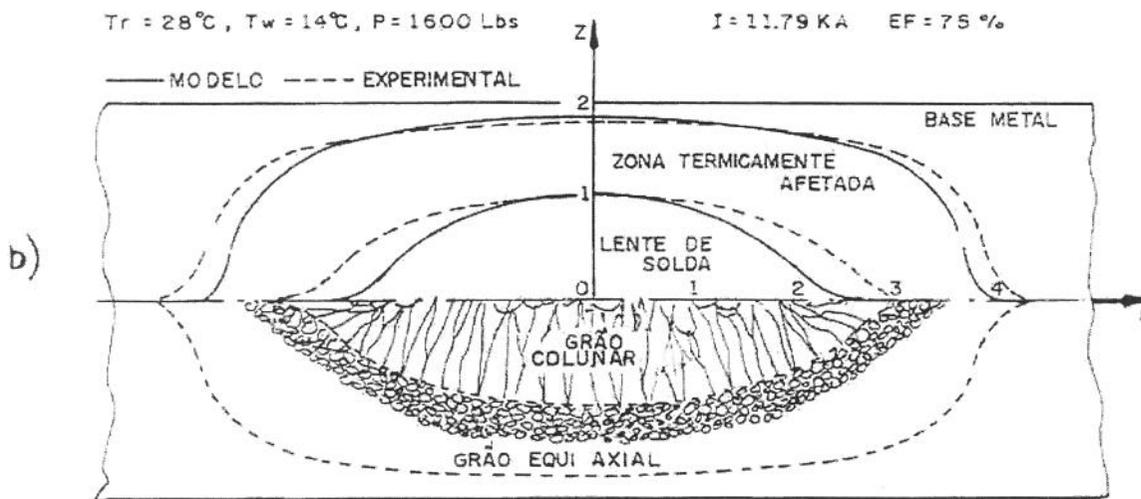
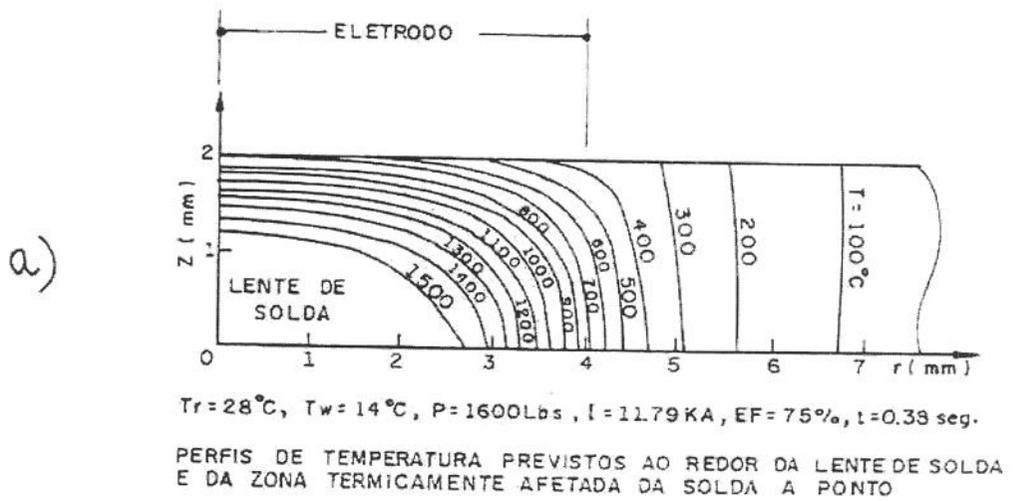


Figura 2.9: a) Perfil térmico de um ponto de solda; b) Lente de solda obtida pelo modelo e dados experimentais com base no perfil térmico (25).

- Dilatação e Contração Térmica

O aquecimento gerado pela passagem de corrente elétrica entre as chapas durante a solda, causa a expansão térmica das chapas forçando os eletrodos para cima. Quando a corrente cessa, o resfriamento causa contração das chapas, e os eletrodos se aproximam, tendo como consequência a indentação (40). A figura 2.10 apresenta um esquema desta operação.

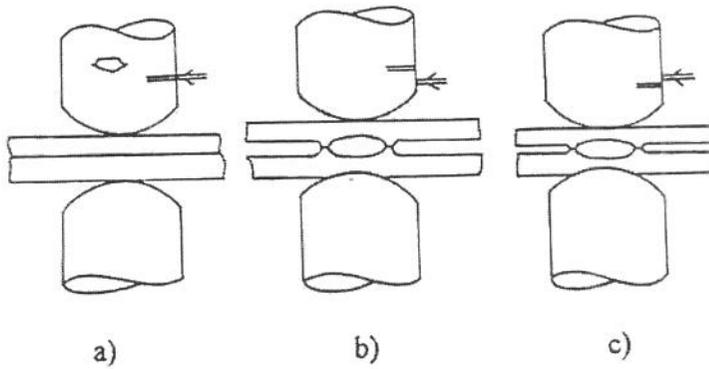


Figura 2.10:: Formação do ponto de solda com indentação: a) compressão inicial das chapas, b) passagem de corrente causando dilatação térmica, c) resfriamento, causando contração térmica e indentação (40).

A monitorização de todo o fenômeno de dilatação e contração térmica da lente de solda, pode ser realizada por meio de sensores acoplados aos eletrodos, informando o desenvolvimento da lente de solda. A figura 2.11 apresenta uma curva típica da relação entre a movimentação dos eletrodos, somente de soldagem e tempo de solda durante a formação da lente de solda(15). Analisando a figura 2.11, para baixos valores de corrente e tempo de solda, forma-se uma pequena lente, o que é registrado em baixos movimentos dos eletrodos; para altas correntes e tempos, há um rápido crescimento da lente, com presença de expulsão, registrando maior separação dos eletrodos seguida de rápida aproximação dos mesmos, devido à contração e expulsão da lente de solda. Os sistemas de monitorização da solda tem sido utilizados pela indústria aeronáutica e pouco pela indústria automobilística.

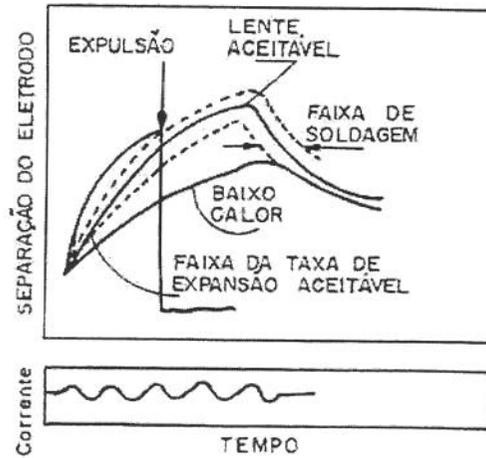


Figura 2.11: Contração e dilatação térmica da lente de solda durante a passagem de corrente.

- Emissão Acústica

Durante a formação da solda a ponto, o material aquecido sofre mudanças severas, incluindo expansão, recristalização, transformação de fases, fusão, vaporização, solidificação, deformação plástica, e, algumas vezes, trincas. Cada estágio pode emitir um sinal de tensão que pode ser detectado com emissão acústica por um transdutor piezo elétrico montado na máquina de solda. Um esquema da monitorização de emissão acústica durante a solda a ponto pode ser observado na figura 2.12. O primeiro pico resulta da pressão dos eletrodos. Um pico ainda maior resulta durante a solda. A solda ótima geralmente é considerada um pouco antes da linha de expulsão. Para produzir soldas com estas características e evitar desgaste dos eletrodos, é necessário controlar a corrente elétrica.

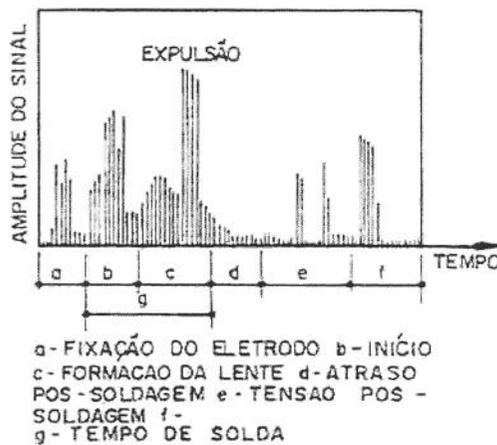


Figura 2.12: Esquema dos sinais de emissão acústica durante a soldagem a ponto (15).

- Sinais de Ultra-som

Várias técnicas de sinais de ultra-som tem sido usadas para monitorar a solda a ponto. Os resultados obtidos de uma técnica de ultrassom em função do tempo é mostrado na figura 2.13.

Como pode-se observar, na figura 2.13, com aumento do tempo, maior a curva de solda. Outros métodos de ultrassom podem ser usados para qualificar a solda após a sua execução. Contudo um grande número de dificuldades tem sido encontrado nas técnicas de monitorização por ultrassom: irregularidade na superfície, não percebe os defeitos de solda e fragilidade do instrumento de medida.

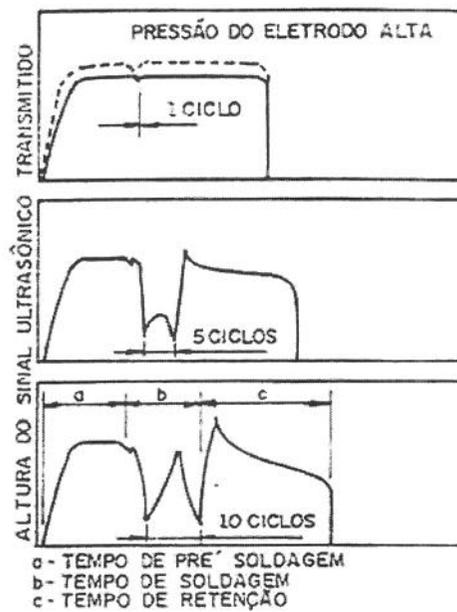


Figura 2.13: Sinais de ultra-som na inspeção da solda a ponto (15). Sendo um ciclo igual a 1/60 segundos.

O processo elétrico-térmico-mecânico segundo o qual se realiza a lente de solda e sua respectiva qualidade metalúrgica e mecânica é dependente das características dos materiais e parâmetros de solda. Deste modo, durante a formação da lente de solda, pode ocorrer vários tipos de defeitos, entre outros, de indentação, vazios, trincas, assimetria da lente; os quais são comentados no item sobre qualidade da solda a ponto.

CAPÍTULO 3

3. PRINCIPAIS PARÂMETROS DE SOLDAGEM

A soldagem a ponto por resistência elétrica é um processo de fabricação que envolve fenômenos elétricos, térmicos e mecânicos e compreende uma grande variedade de parâmetros, sendo os principais deles eletrodo, corrente, força entre eletrodos e tempo de solda. Neste capítulo são descritas as informações mais relevantes sobre estes parâmetros.

3.1 ELETRODO

Os eletrodos de solda a ponto por resistência elétrica tem como funções exercer pressão concentrada na superfície das peças, conduzir a corrente de soldagem para as peças e dissipar rapidamente o calor do ponto de solda (1,2).

As propriedades mecânicas e físicas dos eletrodos estão ligadas à sua composição química, processo de fabricação e geometria. As propriedades mais relevantes para caracterizar o desempenho dos eletrodos durante a soldagem (1) são:

- condutividade elétrica;
- condutividade térmica;
- limite de escoamento;
- temperatura de amolecimento;
- alongamento;
- dureza;
- resistência ao desgaste.

As condutividades elétrica e térmica dos eletrodos determinam a capacidade do material em conduzir a corrente de soldagem para as peças de trabalho, assim como sua capacidade para extrair calor dos pontos de solda após a fusão. A condutividade também interfere na resistência de contato do eletrodo/peça, de modo que baixa condutibilidade gera alta resistência de contato causando aderência dos eletrodos às peças, ou queima superficial dos ponto de solda (3).

A aderência ocorre principalmente quando há aquecimento na interface de contato eletrodo/peça e existe afinidade físico-químico entre o material do eletrodo com o material

da superfície da peça de trabalho tendo como consequência o maior desgaste do eletrodo pela formação de "pits" de erosão (4).

As propriedades mecânicas, limite de escoamento, alongamento e dureza determinam a eficiência mecânica dos eletrodos durante a solda, onde os eletrodos estão sujeitos a tensões de compressão à elevadas temperaturas. Estas condições podem causar rápida deterioração e deformação da face do eletrodo.

A especificação da dureza do material a altas temperaturas vem sendo utilizada como propriedade de caracterização na vida útil dos eletrodos, uma vez que a altas temperaturas, o material sofre um fenômeno de coalescimento dos contornos de grãos, perdendo dureza e conseqüentemente, resistência mecânica. A temperatura de amolecimento é definida como a temperatura na qual o material tem reduzida de 12% a dureza do material à temperatura ambiente após permanência de 2 horas (3).

A ocorrência de deformação nos eletrodos tende a causar um aumento de área na face de contato do eletrodo com a peça, o que provoca a redução da densidade de corrente necessária à formação do ponto de solda. Nesse caso os eletrodos devem ser reconicionados, o que vai desgastando a quantidade de material, podendo mudar as condições de resfriamento e a resistência (4,5).

Comparando-se as propriedades mecânicas e elétricas dos materiais de eletrodos podemos observar uma relação entre elas, de modo que os materiais com maior resistência mecânica tem menor condutividade elétrica e térmica, e vice-versa. Deste modo a seleção do material do eletrodo define as propriedades mecânicas e elétricas inerentes, as quais podem ser balanceadas com o processo de fabricação e com a geometria dos eletrodos.

3.1.1 MATERIAL DO ELETRODO

Originalmente o material do eletrodo largamente utilizado tem sido o cobre de alta condutividade. Embora com excelente condutividade elétrica, sua baixa resistência mecânica, resultava na perda precoce da configuração original da face de contato. Essa limitação incentivou o desenvolvimento de vários materiais para aplicações em eletrodos de solda a ponto por resistência.

Existe uma grande variedade de materiais para eletrodo de solda a ponto por resistência, os quais, entre outras, estão classificados pela " Resistance Welder Manufacturer's Association " RWMA (6), quanto à natureza básica das ligas, propriedades mecânicas e elétricas, assim como sugestões de aplicações.

Segundo a RWMA, os materiais são divididos em 2 grupos. O grupo A, ligas a base de cobre, é subdividido em 5 classes (de 1 a 5). O grupo B, ligas com metais refratários, também é subdividido em 5 classes (de 10 a 14). Estas classes são decorrentes dos diferentes elementos de liga presentes em cada uma, gerando, conseqüentemente, propriedades físicas, mecânicas e elétricas distintas. A tabela 3.1 apresenta um resumo das propriedades mecânicas e elétricas destas ligas (7).

Tabela 3.1: Resumo das propriedades mecânicas e elétrica das ligas de eletrodos (7).

RWMA Grupo A Classes:	Composição %	Dureza Rockwell, min.	Condutividade Elétrica , min., %IACS	Limite de Resistência à Tração -MPa
1	99,0 Cu	B 70	92	414
	1,0 Cd	B 70	92	448
2	99,2 Cu	B 71	82	428
	0,8 Cr	B 80	80	496
3	97,0 Cu	B 99	52	724
	2,5 Co	B 99	52	758
	0,5 Be	-	-	-
RWMA Grupo B Classes:	-	-	-	-
10	Cu-W	B 72	45	930
11	Cu-W	B 94	40	1103
12	Cu-W	B 98	35	1172
13	W	A 69	30	1380
14	Mo	B 85	30	-

Posteriormente foram desenvolvidas ligas especiais para eletrodos, em decorrência da soldagem de chapas zincadas requererem condições mais severas de soldagem, causando maior deformação e desgaste dos eletrodos. Entre outras ligas se destacam a Cu-Cr-Zr e Cu-Al₂O₃ (2,8-10). Estes materiais possuem propriedades superiores à classe 1 e classe 2 da RWMA, ou

seja, com o aumento da temperatura, a queda da dureza e a resistência mecânica são menores, assim como a deformação e a formação de pits de erosão, o que retarda o desgaste dos eletrodos. A figura 3.1 apresenta um comparativo de dureza X temperatura para as ligas em questão (2).

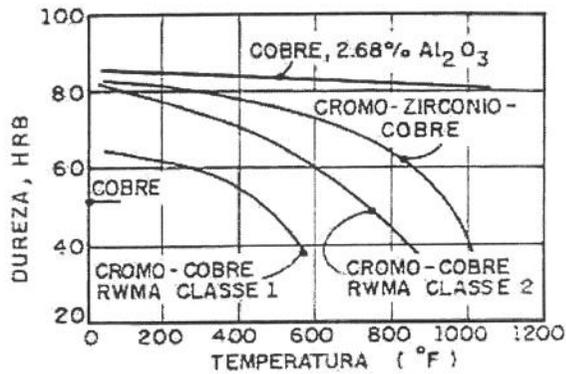


Figura 3.1: Comportamento da dureza X temperatura para vários tipos de ligas de eletrodos (2).

3.1.2 GEOMETRIA DO ELETRODO

A forma e a dimensão dos eletrodos dependem dos seguintes fatores (1):

- da espessura das peças, que determina o diâmetro da face de contato eletrodo/peça;
- do aspecto exterior exigido dos pontos, relacionado com a ponta (p.e., indentação, etc);
- da seqüência de solda, relacionada com o resfriamento e a fuga de corrente;
- do acesso aos lugares de solda, que está relacionado com a ponta do eletrodo e o porta eletrodo;
- das características mecânicas e elétricas do material a ser soldado, que estão relacionados com a dureza, densidade de corrente e resistência de contato eletrodo/metálico.

A forma das pontas dos eletrodos foi padronizada pela RWMA (3). Os seis tipos de pontas, são designados por letras de A a F e possuem aplicações distintas. A figura 3.2 apresenta estas formas.(7).

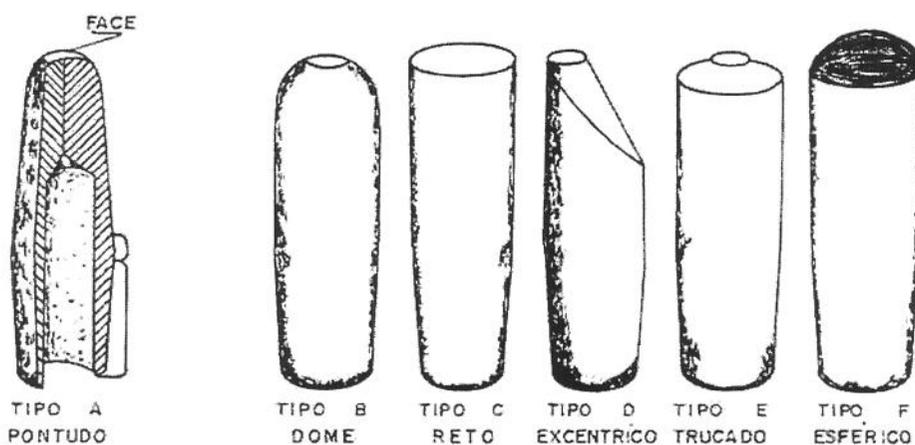


Figura 3.2: Forma das pontas dos eletrodos padronizadas (6,7)

O tipo A, PONTUDO, possui propriedades inferiores aos outros, uma vez que se desgasta mais facilmente. O tipo B, DOME, e E, CONE TRUNCADO, são preferidos, principalmente para aços zincados (2-5). O tipo C, RETO, é raramente usado e é indicado para reduzir marcas nas peças. O tipo D, EXCÊNTRICO, é normalmente indesejável, exceto quando a solda tem que ser feita em um local de difícil acesso. O tipo F, ESFÉRICO, é a forma mais indicada para equipamentos manuais de solda a ponto; o raio desta ponta varia de 2 a 10 polegadas, sendo o de 4 pol o mais usado. Existem ainda outras formas de eletrodos, mas as descritas acima são as mais utilizadas.

Na soldagem a ponto de chapas zincadas, as geometrias mais utilizadas são: cone truncado, esférico e dome (5). Lohbrandt (11), faz uma comparação do desempenho de eletrodos cone truncado com esférico na solda das chapas zincadas e seus resultados apresentam a forma cone truncado como capaz de executar maior número de pontos. Outros trabalhos também indicam a forma cone truncado como sendo a melhor para soldar chapas zincadas (12,13)

A espessura das chapas a serem soldadas governam as dimensões das faces de contato eletrodos/chapas, as quais determinam o diâmetro de lente e, conseqüentemente, a resistência mecânica da solda. Se a dimensão da face do eletrodo for pequena, pode causar uma solda pouco resistente como também indentar a peça. Se a dimensão for grande, pode causar uma pressão insuficiente, especialmente para altas correntes de soldagem, aparecendo vazios e baixa resistência da solda (3).

Para eletrodos de forma dome ou truncado, existem na literatura algumas equações que relacionam o diâmetro da ponta do eletrodo com a espessura das chapas, sendo que elas tem valores próximos (1, 2, 6, 7). A equação de diâmetro da ponta do eletrodo, dada em milímetros, é apresentada abaixo.

$$d = 5 (t)^{1/2} \quad (3.1)$$

onde : d = diâmetro da face do eletrodo,

t = espessura da chapa .

O diâmetro do corpo do eletrodo está relacionado com a refrigeração, de modo que quanto maior o diâmetro, maior a refrigeração e maior a vida útil do eletrodo. O diâmetro mínimo recomendado do corpo do eletrodo para uso em aços galvanizados até 1,6mm de espessura é de 16mm e para espessuras entre 1,6 e 2,7 mm o diâmetro é de 19 mm (3).

As dimensões do furo interno de refrigeração, assim como a espessura da ponta do eletrodo, são padronizadas. Os resultados mostram que para diâmetro externo do corpo do eletrodo até 3/4 de polegadas, as dimensões do furo interno podem ser alteradas de 3/8" para 7/16", assim como a espessura da ponta passa de 3/4" para 3/8". Essa mudança causa melhor refrigeração, logo o material apresenta maior capacidade de reter dureza ao longo da sua vida útil (3).

A otimização da refrigeração do eletrodo depende fortemente dos seguintes fatores:

- posicionamento interno do tubo de refrigeração em torno de 5 mm do fundo de refrigeração; (15-17)
- vazão e temperatura da água devidamente controladas e com valores aproximadamente iguais a 7 litros/minuto, à 25 graus C. (15,18,19)

O porta-eletrodo e a peça de fixação na máquina além de sustentarem o nariz do eletrodo, transportam corrente elétrica; daí serem confeccionados, na maioria das vezes, de mesmo material do eletrodo, isto é, de material que tenha boas condutividades elétrica e térmica, e alta resistência mecânica (15).

Trabalhos recentes sobre a geometria dos eletrodos tem sido desenvolvidos com o intuito de melhorar a qualidade dos pontos de solda.

Bower (20) utilizando um modelo matemático, cujos resultados foram coerentes com testes experimentais, comparou a face cone truncado com ângulos variando de 15 a 90 graus, e observou que no menor ângulo há maior intensidade de corrente nas bordas da face, decorrente do efeito borda onde as isoterma tem um menor espaçamento. Este efeito acarreta a queima anular do ponto de solda, o desgaste das bordas dos eletrodos e não uniformidade de calor na formação do ponto de solda. O melhor resultado obtido foi para ângulos de 90 graus, onde as isotermas tendem a ser planas e conseqüentemente há maior uniformidade de corrente na face dos eletrodos. A esta geometria chamou-se de PIMPLE.

Associado ao efeito de uniformidade de corrente na interface é necessário garantir maior resistência à deformação dos eletrodos. Deste modo, é proposto que haja um casamento da forma cone truncado de baixo ângulo com a geometria PIMPLE. A figura 3.3 apresenta as geometrias PIMPLE e PIMPLE modificada, a qual é proposta no trabalho, como sendo capaz de distribuir melhor a corrente elétrica e ao mesmo tempo resistir a deformação.

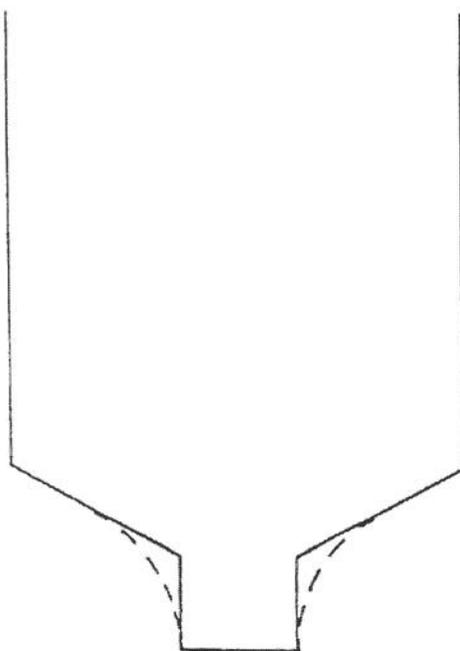


Figura 3.3 : Esquema das geometrias PIMPLE (____) e PIMPLE modificada (- - -) (20).

Takahashi e Saito (21) propõem um sistema de rotação do eletrodo com o intuito de aumentar a vida útil dos eletrodos utilizados na solda de aços zincados. O sistema consiste de

uma rotação periódica do eletrodo com relação ao eixo da força axial. A rotação dos eletrodos causa um tipo de auto-retificação das pontas e desta forma reduz o desgaste dos eletrodos, de modo que a vida útil dos eletrodos passa a ser 20 vezes maior do que o método convencional. A figura 3.4 apresenta um esquema do sistema de rotação dos eletrodos utilizados.

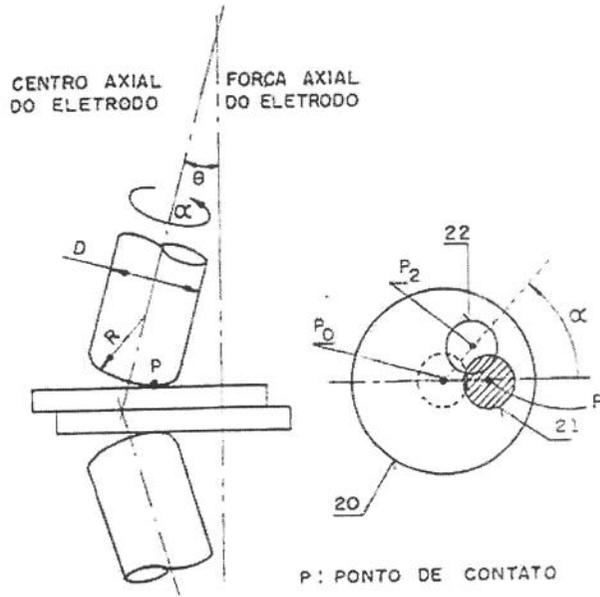


Figura 3.4: Esquema de um tipo de eletrodo com rotação no eixo axial (21).

Quando se deseja soldar duas peças de mesma composição e espessura, o material e a ponta dos eletrodos devem ser os mesmos. Mas para peças de espessuras diferentes, deve-se usar diâmetro da ponta maior em contato com as chapas mais grossas, para melhorar o balanço térmico na geração da lente de solda (2,5,6,22).

Na soldagem de materiais dissimilares, a mesma consideração anterior pode ser feita, ou seja: deve-se utilizar maior diâmetro de eletrodo em contato com a chapa de maior resistividade, ou usar um material de eletrodo mais resistivo em contato com a peça de maior condutibilidade..

Realizamos um trabalho de solda a ponto por resistência elétrica em chapas de aço baixo carbono de diferentes espessuras (23), variando a geometria dos eletrodos para se conseguir melhor balanço térmico e com isso obter lentes de solda simétrica à interface de contato chapa/chapa.

Os resultados mostram que utilizando eletrodos com área de $5\sqrt{t}$ em contato com as chapas da junta, se observa assimetria das lentes de solda; contudo, utilizando área de contato de eletrodo 129 % maior, do que o recomendado pela norma de $5\sqrt{t}$, em contato com a chapa mais grossa, os resultados apresentam uma redução da assimetria, mas não é o suficiente para eliminá-la. O valor médio da razão entre penetração na chapa superior sobre penetração na chapa inferior foi de 10,5 % para soldas com eletrodos de área de $5\sqrt{t}$, enquanto que o valor médio da razão penetração superior sobre inferior foi de 3,5 % para soldas com eletrodos com área de 129% maior, em contato com as chapas mais grossas.

3.2 CORRENTE DE SOLDAGEM

A corrente de soldagem (secundário do transformador) é uma das variáveis que determina o calor gerado na operação de soldagem, o qual, após desconto das perdas por convecção, por condução e por irradiação (dissipadas pelos eletrodos, peças e meio ambiente), é responsável pela geometria da lente.

A corrente de soldagem fornecida pela máquina não é uma constante para uma dada regulagem. Ela é função das características elétricas do equipamento que responde para uma mesma regulagem com correntes diferentes em função da resistência elétrica do sistema equipamento peça (6)

A corrente de soldagem necessária para uma peça com determinada espessura é função de vários fatores(16): estado das superfícies, rigidez da peça, diâmetro da face de contato dos eletrodos, dimensões da peça, natureza do material, força entre eletrodos, tempos de soldagem, etc.

Além do nível de corrente necessário para soldar, é importante também que a faixa de corrente na qual se obtém soldas aceitáveis seja ampla o suficiente para acomodar as tolerâncias de produção na confecção de um componente em particular.

Os limites de qualidade podem ser: tamanho mínimo de lente (0,8 do diâmetro de contato do eletrodo), penetração mínima (20%), indentação máxima (20%), expulsão, diâmetro máximo de lente (1,25 % do diâmetro de contato do eletrodo), resistência mecânica do ponto, etc.(2,3,5).

A composição química dos aços interfere nos valores de corrente necessários para soldar um componente (24). Aços carbono comuns necessitam de correntes maiores do que aços refosforados, devido à sua menor resistividade interna.

Aços com revestimento de zinco, necessitam de correntes maiores para a soldagem em decorrência de sua boa condutividade elétrica, menor resistência de interface das chapas, e pela formação de poça de zinco fundido na circunvizinhança da lente diminuindo a densidade de corrente (15,25,26). Este efeito pode ser observado na figura 3.5, a qual apresenta um esquema comparativo do fluxo de corrente na solda de chapas de aço sem revestimento (a) e com revestimento de zinco (b).

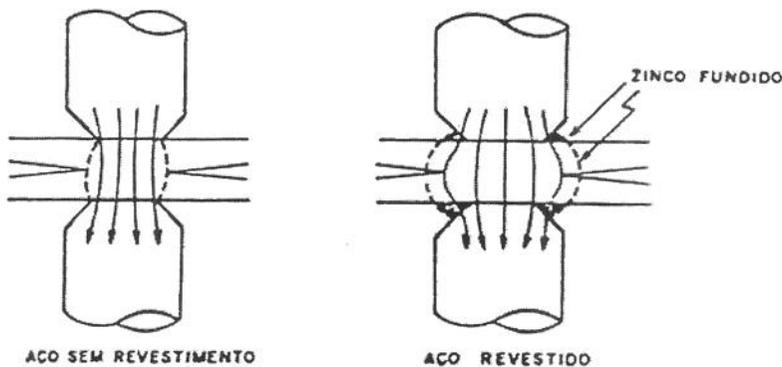


Figura 3.5: Comparação do fluxo de corrente de solda em aços a) sem revestimento, b) com revestimento de zinco (26).

3.3 FORÇA ENTRE ELETRODOS

Para melhor exprimir o esforço mecânico entre os eletrodos, recomenda-se citar a densidade de força ou tensão (razão entre a força e a área de contato do eletrodo). A tensão pode ser separada em três estágios: antes da operação de soldagem, durante e após (2,3).

Antes da passagem da corrente de solda a função da tensão aplicada é aproximar as peças uma contra a outra, provocando um contato íntimo no local onde será efetuada a solda. A tensão aplicada deve ser suficientemente alta para vencer as reações mecânicas elásticas e até mesmo deformar plasticamente, se necessário, para assegurar adequadas resistências de contato, eletrodo/peça, e interfacial, peça/peça.

O efeito do aumento da tensão também é diminuir as resistências elétricas estáticas, particularmente a de contato (25); conseqüentemente a corrente é menor, devendo-se então aumentar a força eletromotriz (voltagem) no secundário para gerar-se um maior valor de corrente, necessário para execução da lente sob a tensão mais baixa. É necessário um valor ótimo que seja suficiente para vencer o efeito mola das peças e para garantir contato elétrico sem centelhamento, sem com isto diminuir muito a resistência de contato.

Durante a solda, a relação entre a tensão e as resistências elétricas dinâmicas se tornam complexas(27). A tensão tem a função de restringir a expulsão entre as chapas enquanto a lente se forma. A tensão transmitida entre os eletrodos detém uma poça de fusão dentro de um anel de força. Se este anel de força falha, o metal fundido escapa, a lente torna-se então porosa e o metal sólido sobre a lente colapsa sob a ponta do eletrodo (25). Deve ser feito então, um balanço entre a indentação e a qualidade da solda.

O período após a passagem da corrente corresponde ao resfriamento da lente, no qual a manutenção da tensão tem o efeito de refinar o grão, aumentando a resistência mecânica .

Na maioria dos casos a pressão é constante durante toda a soldagem, mas existem recursos para aplicação de diversos programas de pressão durante a soldagem (16).

A composição química dos materiais também interfere nos valores de força necessária à soldagem . Quanto maior a dureza do metal, deve-se utilizar forças maiores para deformar as rugosidades superficiais, fornecendo um bom contato elétrico (1,28)

Quanto à influência da camada de zinco, existem opiniões (3,15,18,29,24) quanto a vantagem do aumento de tensão para soldar melhor, possivelmente porque a face do eletrodo penetra mais rapidamente na camada fundida do zinco, fixando-se firmemente à superfície subjacente do aço. Existem outros trabalhos que não encontram vantagens (30) no aumento da tensão aplicada para soldas aceitáveis . Tensões excessivas deformam o eletrodo, abaixando a vida útil, sendo necessário um compromisso na escolha da tensão.

3.4 TEMPO DE SOLDA

O calor necessário para fundir um volume de metal que constitui o ponto de solda, segundo a lei de Joule, depende também da grandeza física "tempo". O processo de solda a ponto por resistência dividi-se em quatro segmentos de tempo: tempo de pré-pressão, tempo de solda,

tempo de retenção e tempo de pausa. Todos os segmentos são usualmente expressos em ciclo, onde um ciclo é 1/60 segundos (3).

Tempo de pre-pressão: é o intervalo que compreende o fechamento dos eletrodos sobre as peças até o início da passagem de corrente. Este tempo deve ser o suficiente para a força aplicada se estabilizar. Ele antecede ao tempo de passagem de corrente.

Tempo de solda: é o intervalo através do qual a corrente flui pelo circuito eletrodo-peças-eletrodo. Existe um valor abaixo do qual a solda não ocorre.

Tempo de retenção: é o intervalo que ocorre após a passagem de corrente, onde os eletrodos são mantidos juntos às peças, atuando como sumidouros de calor, o que controla o resfriamento e a consolidação da lente de solda. A importância do controle desta variável é ainda uma controvérsia no que diz respeito ao aparecimento de fases frágeis na zona termicamente afetada. Enquanto alguns autores afirmam que o maior tempo de retenção acelera o resfriamento do ponto e causa o aparecimento de fases frágeis com maior dureza, outros afirmam que no menor tempo de retenção, a taxa crítica de resfriamento para a formação da martensita já foi atingida (22)

Tempo de pausa: intervalo de tempo decorrido da retirada dos eletrodos do ponto de solda até o início da próxima solda.

Existem vários tipos de ciclos de soldagem especiais, usados para metais e configuração de juntas especiais, dentro dos quais pode haver mudanças do nível de corrente, força e pulsos interrompidos de corrente. Alguns destes ciclos especiais incluem o tratamento de revenimento pós soldagem, através da passagem de corrente após um período adequado de resfriamento, visando a melhoria da ductilidade da lente sem causar a oxidação excessiva ou a modificação das propriedades dos materiais de base.

O tempo de solda e a intensidade de corrente são dois fatores independentes, os quais combinados com as resistências da junta dão um número infinito de combinações possíveis de se obter um ponto de solda.(1)

Porém não se pode diminuir indefinidamente o valor da corrente e aumentar o tempo. Existe uma intensidade mínima de corrente na qual a solda é possível. Esta intensidade mínima

depende das características dos materiais a soldar, da espessura, das dimensões das pontas dos eletrodos e do esforço de compressão.

O autor (1), apresenta um gráfico que relaciona o diâmetro do ponto em função do tempo de passagem de corrente. Este gráfico é diferente para espessuras de chapas até 3,0 mm e chapas de espessuras superiores a 3,0 mm, o que pode ser observado na figura 3.6.a e 3.6.b , as quais se referem às chapas de aço baixo carbono de espessura 1,0 mm e 5,0 mm, respectivamente.

Para chapas de espessuras finas, o segmento AB da figura 3.6.a é quase vertical, ou seja, a fusão do diâmetro máximo se alcança muito rapidamente (1).

Para as chapas grossas, ao contrário, o segmento AB, acusa uma inclinação bastante acentuada. Esta inclinação mostra um aumento lento do diâmetro do ponto, onde a fusão progride mas devagar, figura 3.6.b.

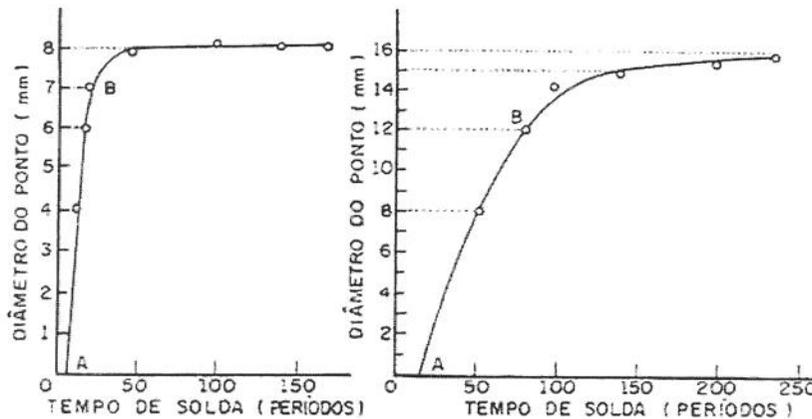


Figura 3.6: Relação entre diâmetro do ponto de solda e tempo de solda para chapas de aço de baixo carbono com espessura de : a) 1,0 mm e b) 5,0 mm.

Os tempos de solda para aços galvanizados não devem ser muito longos (maiores do que 20 ciclos) (22), pois implicam em maior reatividade entre material de base-zinco-eletrodo. Mas, para tempos muito curtos, menores do que 5 ciclos, ocorre superaquecimento(22).Vários resultados recomendam tempos médios, de 10 a 15 ciclos, (18,29), sendo estes superiores aos utilizados para solda de aço não revestido, devido ao tempo necessário para a fusão e remoção do zinco.

Parte do revestimento de zinco é removido da superfície durante o contato com os eletrodos na solda de aço zincados. A aparência das solda pode variar desde a permanência de um revestimento contínuo até uma zona escura da qual todo o zinco vaporizou ou foi removido pelo contato do eletrodo. A colagem dos eletrodos é a principal causa do desgaste da ponta dos eletrodos.

3.5 INTER-RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS DE SOLDAGEM - GRÁFICO DE SOLDABILIDADE

A inter-relação entre os parâmetros de soldagem - tempo, corrente e força - para um dado material de uma dada espessura, pode ser utilizada para definir o gráfico de soldabilidade, ou seja, define a faixa de parâmetros possíveis de soldarem o material.

A definição do gráfico de soldabilidade envolve o levantamento de um sistema de eixos "tempo x corrente de solda" obtidos sob uma determinada força, resultando em duas curvas que se aproximam da forma de uma hipérbole. A curva à esquerda é definida por soldas com diâmetro mínimo de $4\sqrt{t}$, (t = espessura da chapa), ou 80% do diâmetro do eletrodo. A curva a direita é definida por soldas obtidas com expulsão ou soldas com diâmetro de 1,25 % do diâmetro inicial do eletrodo (31-33).

Segundo estes limites, os parâmetros de soldagem devem ser ajustados de forma a fornecer a maior área entre os dois limites das curvas de soldabilidade. A figura 3.7 apresenta um esquema de um gráfico de soldabilidade para chapas de aço baixo carbono com diferentes tipos de acabamento superficial, de modo que as chapas não revestidas necessitam de menores correntes (curvas mais à esquerda). As chapas zincadas de revestimento leve necessitam de correntes um pouco maiores, o que desloca o gráfico para a direita. Por fim, as chapas zincadas com revestimento pesado necessitam de correntes ainda maiores, reduzindo a faixa de soldabilidade.

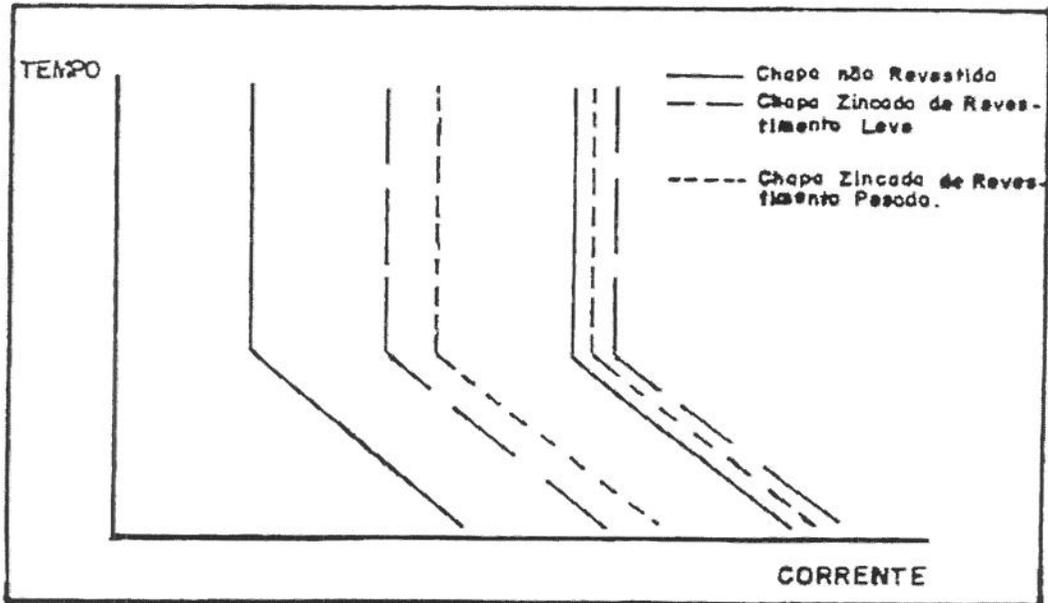


Figura 3.7: Esquema genérico de um gráfico de soldabilidade (2).

- a. chapa não revestida (—)
- b. chapa zincada de revestimento leve (— —)
- c. chapa zincada de revestimento pesado (---)

O gráfico de soldabilidade de um dado material depende dos seguintes fatores: força entre os eletrodos, seu diâmetro, taxa de resfriamento (tempo de retenção), resistência elétrica da superfície de contato eletrodo/chapa, resistência elétrica das chapas, resistência elétrica da interface chapa/chapa e rigidez da peça (34).

Aumentando a força entre eletrodos, desloca-se a curva para a direita, já que se diminui as resistências elétricas eletrodo/chapa e chapa/chapa, fazendo que seja necessário maior corrente para que se mantenha o mesmo efeito Joule. Geralmente, com maior força entre eletrodos aumenta o intervalo de corrente disponível para a soldagem.

Para soldas de aços cuja resistência elétrica eletrodo/chapa é baixa, a taxa de geração de calor é bastante reduzida, e a perda de calor através do material pode se igualar à taxa de geração de calor na superfície de modo que a curva à esquerda tende a ser vertical para tempos de solda

longos, tornando-se quase impossível a formação de uma lente aceitável abaixo de um determinado nível de corrente.

O calor gerado na interface eletrodo/chapa pode ser bastante alto, porém não influenciando a solda em si pela capacidade do eletrodo em agir como um dissipador de calor rápido.

De um modo geral, para pequenos valores de resistências elétricas eletrodo/chapa, chapa/chapa e interna do material, a curva à esquerda do gráfico se desloca para a direita, assim como para altos valores das resistências a curva se desloca para à esquerda; ou seja, é necessário maior ou menor corrente respectivamente para se obter as soldas. Materiais com maior resistência elétrica interna tem as curvas deslocadas para a esquerda, menores corrente e tempo de solda.

O tempo necessário para que a interface entre as chapas se funda depende também da resistência elétrica desta interface. Após fundida, a mesma não mais interfere no desenvolvimento da solda.

A curva à direita, limite de expulsão, depende basicamente da resistência elétrica interna do material em combinação com a energia fornecida à solda (função da corrente e tempo de solda).

Baixos tempos de solda e altas corrente, causam um aquecimento muito rápido da interface entre as chapas, não permitindo a dissipação de calor para o restante do material, este tipo de expulsão é chamado de "flash". O que também pode ocorrer para baixas correntes, quando o material a ser soldado tem alta resistência elétrica interna (32)

Um segundo tipo de expulsão pode ocorrer com longos tempos de solda em função do amolecimento do material sólido adjacente à lente de solda. Quanto maior a resistência elétrica interna das chapas maior será a temperatura deste material adjacente facilitando a ocorrência de expulsão. A este tipo de expulsão dá-se o nome de "expulsão violenta" (32).

A presença do revestimento de zinco nos aços, determina o deslocamento do gráfico para a direita, ou seja um aumento da faixa de corrente. Assim como maiores camadas de revestimento de zinco determinam um estreitamento do gráfico de soldabilidade, ou seja uma diminuição da soldabilidade do material, resultados encontrados por pesquisas realizadas na CSN (26,35,36).

Duboc (26,35,36), propõe a construção de gráficos de soldabilidade otimizados a partir de gráficos de soldabilidade convencional, com o objetivo de fornecer condições mais seguras e práticas para a soldagem de chapas de aço, o que resulta em uma restrição de área de soldagem do gráfico convencional.

Otimizou-se os gráficos de soldabilidade convencionais levando em consideração as seguintes premissas:

- não ocorrência de expulsão (mesmo de forma leve ou intermitente);
- não ocorrência de centelhamento superficial;
- indentação máxima de 20% para chapas zincadas e 10% para chapas não revestidas;
- tempo de solda igual ou inferior a 16 ciclos (visando maior produtividade);
- resistência à tração axial mínima a ser especificada para cada material;
- resistência à tração axial mínima após a realização de 1000 pontos pelo mesmo par de eletrodos.

A figura 3.8 apresenta o G.S.C e G.S.O. (área achurada) de uma chapa zincada comum, de 0,8mm de espessura e revestimento tipo B. Neste caso a força entre eletrodos foi de 180 kgf e a resistência a tração axial mínima foi de 200 kgf. Como se pode observar, a curva à esquerda do G.S.O. se funde com a curva do G.S.C.. Isto equivale a dizer que foi possível a obtenção de resistência a tração axial de todos os pontos desta curva mesmo após a utilização do mesmo par de eletrodos por mais de 1000 vezes. Desta forma a chapa zincada comum de 0,8mm de espessura, apresenta uma ampla faixa de corrente para a sua soldagem (>2500A).

A carga de tração axial mínima foi determinada, para cada um dos tipos de materiais utilizados (CFF, ZC, ZAR), como sendo a corrente mínima, abaixo da qual não ocorre uma estabilização da carga de tração axial. Os valores de carga de tração axial foram definidos, sendo de 100 kgf para chapas de alta resistência e de 200 kgf para chapas comuns.

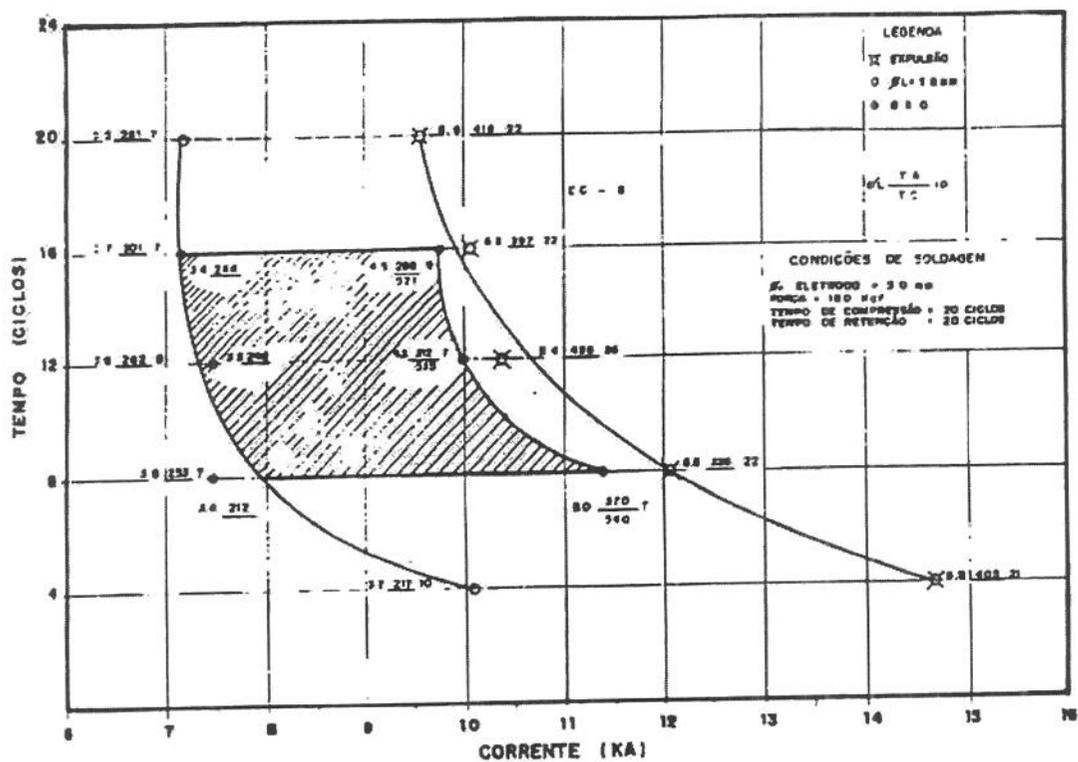


Figura 3.8: Gráfico de soldabilidade comum (GSC) e gráfico de soldabilidade otimizado (GSO) (área achurada). Chapa de aço zincada comum e revestimento tipo B. (26,36).

CAPÍTULO 4

4. CARACTERÍSTICAS DE REVESTIMENTO E SOLDAGEM DE CHAPA DE AÇO BAIXO CARBONO ZINCADO E FOSFATIZADO

Inicialmente são apresentadas as características de revestimentos de zinco em chapas de aço de baixo carbono, posteriormente as características de soldagem destas chapas e, no terceiro momento são apresentadas as características do revestimento de fosfato. Foi feito um breve comentário sobre soldagem de chapas de diferentes espessuras, composição química e geometria das juntas.

4.1 AÇO DE BAIXO CARBONO ZINCADO

As informações sobre aços de baixo carbono zincados expostas abaixo foram obtidas, principalmente, com base em trabalhos já realizados pela CSN, por meio de catálogos de produtos zincados e relatórios internos.

As chapas zincadas podem ser produzidas com uma ampla variedade de substratos que basicamente podem ser divididos em dois tipos principais : aços comum (C-Mn) e aços de alta resistência (C-Mn; C-Mn-P; C-Mn-Nb e C-Mn-P-Nb).

Abordaremos apenas o aço comum, por ter sido utilizado neste trabalho. As chapas zincadas de aços comuns podem ser de diferentes tipos, os quais são decorrentes de variações na composição química e condições de processamento. A tabela 4.1 apresenta as especificações das camadas zincadas comuns produzidas pela CSN (1,2).

Tabela 4.1: Especificação das chapas de aço zincadas.

Especificação	L.E. (MPa)	L.R. (Mpa)	Al (%) Mín. e<0,6mm	Al (%) Mín. e>0,6mm	Dureza Máxima Rockwell
ZC	-	-	-	-	B 65
ZE	-	320/390	27	28	B 57
ZEE	-	320/380	30	31	B 57
ZEE-PC	230 max.	350 max.	36	37	B 50

Do ponto de vista da soldabilidade, o principal elemento a ser considerado é o teor de carbono, uma vez que as variações do teor de manganês não são suficientes para alterar as características de soldabilidade. Vale lembrar que cada um ponto percentual de carbono corresponde aproximadamente 6 pontos percentuais de manganês, no que se refere à soldabilidade.

As chapas zincadas no que se refere ao revestimento, podem ser produzidas com diversas espessuras de revestimento, diferentes tipos de acabamento superficial e com ou sem tratamento químico do revestimento. Estas diferentes especificações são determinadas pelo tipo de aplicação.

As chapas zincadas podem ter revestimentos iguais em ambas as faces ou revestimentos diferenciados. A tabela 4.2 apresenta as especificações dos tipos de revestimentos iguais, e a tabela 4.3 os tipos de revestimentos diferenciados (1, 2).

Tabela 4.2 : Tipos de revestimentos iguais.

Tipo de Revestimento	Ensaio Individual-Mínimo (g/m ²) (Total das 2 Faces)	Média do Ensaio Triplo-Mínimo (g/m ²) (Total das 2 Faces)
X	60	70
A	160	170
B	250	260
C	315	335
D	390	410
E	450	470
F	510	530
G	580	610

Tabela 4.3: Tipos de revestimento diferenciados.

Tipos de Revestimento (*)	Ensaio Individual-Mínimo (g/m ²)	Ensaio Individual-Mínimo (g/m ²)
	Face A	Face B
X/A	30	80
X/B	30	125
A/B	80	125
A/C	80	158
B/C	125	158

(*) Outros tipos de combinações podem ser produzidas.

O acabamento superficial das chapas podem ser de três tipos:

- Cristais normais: o revestimento de zinco apresenta-se com a forma de cristais, tendo a conhecida aparência de flores
- Cristais minimizados: o revestimento apresenta uma ausência praticamente total de flores de zinco. A aparência é usualmente fosca e não muito homogênea. A superfície é mais lisa que de cristais normais.
- Superfície extra lisa: o revestimento de cristais minimizados com passagem em laminador de encruamento, para dar à superfície um acabamento especialmente liso.

As chapas zincadas podem ter a superfície tratada quimicamente de modo a retardar a formação de ferrugem branca durante o transporte e a estocagem. Existem dois tipos de tratamento químico:

- Tratamento químico leve: recomendado para estocagem em períodos curtos.
- Tratamento químico forte: recomendado para estocagem mais prolongada.

As chapas expedidas sem tratamento químico são fornecidas com oleamento, em alguns casos o oleamento pode ser feito em cima do tratamento químico.

- Estrutura da Camada de Revestimento

Quando a tira de aço é imersa no banho de zinco fundido, dependendo da temperatura do banho e do tempo de imersão, forma-se um revestimento de zinco firmemente aderido às superfícies da tira. Este revestimento de zinco, se observado em microscópio, é composto de

camadas distintas de ligas Fe-Zn e Zn puro. Com ampliações da ordem de 1000X, pode-se observar as camadas indicadas na tabela 4.4 (1, 3).

Tabela 4.4: Camadas que compõem o revestimento

Camada	P.F.(°C) - aproximado	Fe %	Consistência	Espessura (µm)
Alfa	-	100	Metal de Base	-
Gama	680	21-28	-	0,5-1
Delta-1	530	7-12	Aderente, porosa	3-6
Delta-1+Zeta	-	-	Frágil, porosa	10-30
Zeta	530	5,8-6,2	Frágil, compacta	10-30
Zeta+Eta	-	-	-	-
Eta	419	0,0	Tenaz, dútil	-

Algumas destas fases dificilmente são distinguidas no microscópio, em função de suas espessuras muito diminutas e por confundir-se com as fases adjacentes.

A formação e crescimento da camada de liga depende de:

- Composição química, topografia e limpeza superficial do metal de base.
- Tempo de imersão.
- Velocidade de retirada da tira e remoção do excesso de zinco.
- Resfriamento da camada.

4.2 SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA DE CHAPA ZINCADA COMUM

Na soldagem a ponto por resistência elétrica, o fator determinante na formação da lente de solda é exatamente a resistência de contato entre as chapas a serem soldadas, a qual é responsável pela geração de calor necessário para a fusão entre as chapas. (1, 4-7).

Na soldagem de chapas revestidas com um material de baixo ponto de fusão e menor resistividade elétrica como o zinco, o calor gerado além de ser menor, devido a baixa resistência de contato, é inicialmente usado para fundir o revestimento, o qual escorre da interface de contato para a periferia da mesma. O zinco fundido forma assim um desvio para a corrente de

soldagem, que passa a não fluir apenas restrita à região entre as faces de contato dos eletrodos (1, 4).

Em função destas características, para a soldagem de chapas zincadas se faz necessária a utilização de correntes mais elevadas, o que determina um maior aquecimento das pontas dos eletrodos que, associado aos efeitos de reatividade química entre o zinco e a liga de cobre dos eletrodos, tende a diminuir a vida útil dos mesmos (8, 9).

Os fatos descritos no parágrafo anterior caracterizam bem as diferenças de soldabilidade entre as chapas zincadas e as chapas não revestidas. As próprias chapas zincadas, além disso, apresentam variações das características de soldabilidade entre si, o que depende de uma série de fatores que serão vistos a seguir.

- Espessura do Revestimento

Quanto maior a espessura do revestimento, maior a intensidade de corrente necessária para a soldagem, menor a vida útil do eletrodo e maior o estreitamento da faixa de corrente na qual soldas satisfatórias podem ser feitas, isto é, menor a largura dos gráficos de soldabilidade.(1, 4 -9).

É importante observar que o processo de zincagem por imersão a quente, mesmo com os desenvolvimentos recentes que garantem um revestimento mais uniforme, pode determinar pequenas variações de revestimento que podem chegar a influir na soldabilidade da chapa. Esta variação ocorre principalmente na direção transversal da tira, sendo que as maiores espessuras de revestimento ocorrem na região central da tira (1).

- Acabamento do Revestimento

Conforme descrito anteriormente, as chapas zincadas podem ser fornecidas com diferentes tipos de acabamento no revestimento, isto é: cristais normais, minimizados, liso e extra liso. Estes tipos de acabamento interferem nas características de soldabilidade das chapas zincadas, embora de forma relativamente branda, quando comparado com os efeitos de espessura do revestimento (1).

- Tratamento de Superfície

Os tratamentos de superfície normalmente utilizados, tratamento químico leve, tratamento químico forte e oleamento, podem afetar as características de soldabilidade das chapas zincadas. O tratamento químico leve e oleamento, causam pouca interferência na soldabilidade; por outro lado, o tratamento químico forte tem um efeito detrimental na soldabilidade e vida útil dos eletrodos e, portanto, deve ser removido antes da soldagem. No caso de oleamento, se o mesmo estiver impregnado de partículas, estas afetam sensivelmente o contato entre eletrodo/chapa e chapa/chapa (1, 4).

- Resistência à Corrosão

Na soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas zincadas, boa parte do revestimento de zinco se volatiliza ou é expulso da superfície do ponto de solda ficando segregado ao longo da periferia deste ponto. O zinco restante da superfície do ponto forma uma camada de liga Fe-Zn em decorrência da difusão do ferro. Além disso, normalmente ocorre uma impregnação de cobre, decorrente da superfície da ponta do eletrodo, na superfície do ponto de solda, que funciona como um anodo de sacrifício. A resistência à corrosão das chapas zincadas soldadas não é afetada de forma substancial (10 -12).

4.3 AÇO DE BAIXO CARBONO FOSFATIZADO

A fosfatização é um processo pelo qual se transforma a superfície metálica do ferro ou aço, zinco e suas ligas de alumínio numa superfície com uma camada de fosfato metálico. Isto se dá pelo contato da solução fosfatizante com a superfície metálica, por duas reações fundamentais e em seqüência: uma primeira em que há o ataque à superfície metálica pela acidez do banho e uma segunda em que, pela redução local de acidez, há uma deposição ou formação de fosfato insolúvel em água e no meio em que se dá a formação (13).

- Mecanismo de Formação da Camada de Fosfato

Um possível mecanismo de formação da camada de fosfato, a partir de uma solução contendo íons de Zn^{2+} , foi proposto em 1972 por Ghali e Potvin. Usando técnicas de raio-X, os autores definiram o processo de formação da camada em quatro etapas fundamentais:

- 1) Ataque eletroquímico da superfície pela solução fosfatizante;
- 2) A precipitação de cristais de fosfato extremamente pequenos, formando uma camada algumas vezes denominada amorfa;
- 3) Uma cristalização "grosseira" dos fosfatos formados;
- 4) Uma reorganização cristalina, dando origem à estrutura final do revestimento.

As reações fundamentais são bastante conhecidas mas existe uma série de reações secundárias ainda não absolutamente determinadas.

A camada de fosfatização é dependente de fatores tais como a composição do banho, a natureza do substrato, a velocidade de ataque, temperatura, e a difusão iônica durante a reação. Deste modo, várias são as maneiras pelas quais os cristais podem crescer, sendo comumente encontrados na forma de agulhas e de plaquetas.(13)

Os componentes fundamentais do banho de fosfatização são: ácido fosfórico livre, fosfato ácido do metal formador da camada (zinco, manganês, cálcio) e oxidantes (nitratos, cloratos, nitrito, peróxidos, etc.). Com finalidades específicas outros íons podem estar presentes: níquel, cobre, flúor, etc. Porém, nem todos os produtos citados estão sempre presentes em todos os tipos de banho de fosfatização.

- Métodos de Aplicação de Fosfato

O método de aplicação da solução fosfatizante exerce grande influência nas características finais do revestimento, os quais podem ser:

- Fosfatização por imersão: requer menor aparato técnico, pois suas instalações tem como principais componentes tanques onde o material a ser revestido é imerso. Neste processo a camada de fosfato é constituída de 95% de fosfilita e 5% de hopeita.

- Fosfatização por aspersão: ocorre através de jatos sobre a peça a ser tratada, que percorre um trajeto retilíneo através de um túnel formado por vários compartimentos dentro dos quais ocorre a pulverização. A camada de fosfato é totalmente formada de hopeita.

- Principais Aplicações da Camada de Fosfato (14)

a) Utilizado como uma camada de preparação para acabamento por pintura empregado em veículos automotivos e em praticamente todos os artigos metálicos acabados com pintura. Esta camada pode ser aplicada por imersão ou jato. Com a fosfatização se consegue reduzir a penetração da corrosão nas áreas em que a tinta foi danificada por corte ou impacto e, ainda, melhorar a aderência, a resistência ao impacto e a flexibilidade das camadas de tinta .

b) Preparação para acabamento por impregnação com óleos protetores, utilizado para parafusos, molas, porcas, etc. A camada de fosfato mantém sobre a superfície uma quantidade de óleo protetor, permitindo maior vida do acabamento e resistência a corrosão.

c) Preparação para ancoramento de lubrificantes para operações de deformação a frio tais como extrusão, trefilação, estampagem profunda, utilizado para arames das mais variadas dimensões, tubos com diferentes espessuras de paredes, parafusos a partir de barras e sem usinagem. Esta fosfatização como base para lubrificantes permite deformações mais profundas, maiores velocidades nas operações, menos desgaste nas ferramentas.

d) Fosfatização como suporte para lubrificante de peças que trabalham com atrito, utilizados para anéis, engrenagem, pistões, eixos, virabrequins, etc. O contato direto metal-metal nos primeiros movimentos, é evitado, conseguindo-se evitar o engripamento e reduzir o atrito.

e) Como contato elétrico de superfície. A característica da camada de fosfato de ser má condutora de eletricidade é utilizada para um isolamento elétrico entre as lâminas do transformador, de rotores, etc.

- Tipos de Fosfato

Quanto ao metal que forma a camada de fosfato, esta pode ser classificada de fosfato de ferro, fosfato de zinco, fosfato de manganês, fosfato de zinco-cálcio e zinco-manganês. O tipo a ser usado depende da finalidade da utilização, características de qualidade desejada, etc.

Como preparação para acabamento por pintura são usados geralmente os fosfatos de zinco, misto de zinco-cálcio e zinco-manganês e de ferro. Como ancoramento de óleos protetores são usados geralmente fosfatos de zinco e de manganês. Como proteção para ancoramento de lubrificantes antes das operações de deformação a frio são usados fosfatos de zinco e de zinco-cálcio. Como suporte para lubrificantes de peças que trabalham com atrito é usado quase exclusivamente fosfato de manganês. Para isolantes elétricos são usados fosfato de zinco e de ferro.

- Classificação do Peso da Camada de Fosfato

A classificação do peso da camada de fosfato se baseia na quantidade de fosfato formada por unidade de área exposta ao tratamento . A Tabela 4.5 mostra a classificação do revestimento quanto ao seu peso de camada (13,15)

Tabela 4.5: Classificação da camada de fosfato (13,15).

Classificação dos Revestimentos	Peso da Camada (g/m ²)
Extra-Leve	0,2-1,5
Leve	1,5-4,5
Médios	4,5-7,5
Pesados	>7,5

Os revestimento pertencentes às classes extra-leves e leves são indicados como pré-tratamento para peças que serão submetidas a sistemas de pintura. Os revestimentos médios tem aplicação como pré-tratamento para pintura como para trabalhos de deformação a frio. Os revestimentos pesados, são geralmente utilizados em trabalhos onde a peça fosfatizada necessite estar constantemente lubrificada.

4.4 SOLDAGEM DE MATERIAIS COM DIFERENTES ESPESSURAS, COMPOSIÇÕES QUÍMICAS E REVESTIMENTOS

A soldagem a ponto em chapas de aço com diferentes espessuras, composições químicas e revestimentos é frequentemente utilizada pela indústria automobilística, contudo as publicações sobre estes tipos de juntas são raras.

Segundo normas (8, 9, 16, 17) a solda a ponto por resistência elétrica é indicada para juntas com chapas de espessuras até 6,0 mm, sendo possível soldar chapas de espessuras diferentes na proporção de 5 para 1 (9) com algumas modificações no processo de soldagem.

As soldas em chapas de diferentes espessuras e/ou composições químicas causam o desbalanceamento térmico na junta (16) gerando calor de forma assimétrica em decorrência da maior ou menor condutividade térmica e elétrica das chapas, de modo que o calor se concentra mais em chapas de menor condutibilidade. Este desbalanceamento pode ser corrigido pela geometria dos eletrodos e/ou pelo material dos mesmos, pois eletrodos de maior área de contato ou feitos de material com maior resistência elétrica interna (por exemplo, as ligas do grupo B da RWMA) devem ser colocados em contato com as chapas de menor condutividade elétrica ou térmica para equilibrar o desbalanceamento térmico da junta.

Em um trabalho anteriormente por nós realizado, já mencionado no capítulo 3, mostra que a soldagem de chapas de aço baixo carbono de 0,95 mm soldadas sobre chapas de 2,0 mm, apresentaram maior área fundida nas chapas de maior espessura, e a utilização de eletrodos com área de contato 129 % maior em contato com chapas de 2,0 mm, reduziu a área fundida nas chapas de 2,0 mm, contudo não foi o suficiente para tornar de mesmo tamanho as área fundidas nas duas chapas (18).

Tsai e Dickinson (19) estudaram o processo de soldagem a ponto por resistência para chapas de diferentes espessuras e diferentes composições químicas, analisando dados experimentais e comparando com modelos de elementos finitos modificados. Para o estudo da influência da espessura das chapas utilizou aço inox 347, força de 1000 lb e corrente de 8 kA, chapa superior com 1,0 mm de espessura e inferior com 1,5 mm. Os resultados obtidos mostram que as lentes de solda foram maiores nas chapas mais grossas do que nas finas. Deste modo, o

calor gerado permaneceu mais tempo na peça mais grossa, alargando a área fundida, enquanto que na peça mais fina os eletrodos tiveram maior eficiência na extração de calor. A mudança na geometria dos eletrodos e sua composição pode mudar este fato.

O efeito da composição química foi estudado em juntas com chapas de 1,0 mm, sendo a chapa superior de aço 1045 AISI e a chapa inferior de aço inox 347, a força aplicada foi de 1000 lb e a corrente de 8 kA. Os resultados obtidos mostram que a maior área fundida foi na chapa de aço inox. Deste modo, evidenciou-se que as propriedades térmicas do material influenciam significativamente o mecanismo de formação da lente. No aço inox, que tem maior resistividade elétrica, o calor gerado foi maior do que nas chapas de aço carbono 1045. Além disto, o calor ficou mais confinado na chapa de inox do que de aço 1045, gerando lentes assimétricas.

A composição química também interfere nas resistências de contato nas juntas soldadas a ponto por resistência elétrica. Aços inoxidáveis e HSLA apresentam maiores resistências interna e de contato do que aços de baixo carbono(4). Nos aços inox e HSLA, as resistências internas são maiores em decorrência dos elementos de ligas que compõem estes aços, assim como suas resistências de contato são maiores em virtude de sua maior dureza superficial.

Foi encontrada só uma publicação sobre solda a ponto por resistência elétrica em juntas de chapa sobre tubo, a qual informa que a utilização de tubos de aço com fim estrutural podem também ser soldados por resistência elétrica (20) com vantagens, tais como: ganho de tempo, ganho de material, e podem ser soldados por pessoal não especializado. A solda por resistência em tubos de aço é empregada principalmente na construção de veículos automotivos, móveis, bicicletas, etc.

A publicação mencionada afirma, ainda, que é possível soldar tubos de aço com chapas finas de aço desde que os eletrodos sejam devidamente redefinidos, sendo que os tubos devem estar em contato com eletrodos de grande área. Ressalta que a deformação resultante destas soldas podem ser controladas com as dimensões das faces dos eletrodos e a força aplicada por eles durante a solda. Contudo não apresenta parâmetros de solda para estas juntas assim como não mostra os resultados obtidos.

CAPÍTULO 5

5. CONTROLE DE QUALIDADE DA SOLDA A PONTO

5.1 ASPECTOS GERAIS

Segundo a RWMA (1) e a AWS (2), o controle de qualidade da solda a ponto por resistência elétrica tem como objetivo definir padrões de qualidade de solda, assim como garantir a repetibilidade de uma dada condição de soldagem especificada. Estas normas são bastante usadas pelas indústrias automobilísticas, apesar de existirem outras, como as normas do IIW (3) utilizadas na Europa e as normas "MIL-Standard", mais utilizada pela indústria aeroespacial (4).

Tanto para RWMA como AWS, o controle de qualidade envolve diversos aspectos, a saber, o planejamento da solda, a estabilidade e confiabilidade da máquina de solda, a estabilidade e a confiabilidade dos instrumentos de controle dos parâmetros, o preparo do operador para inspeção da solda e os ensaios mecânicos para a caracterização da solda. Os ensaios devem garantir, para uma dada condição de soldagem especificada, que todas as amostras testadas tenham resultados iguais ou maiores ao valor mínimo previamente estabelecido, sendo admissível que haja uma variação de mais ou menos 10 % do valor estabelecido.

Segundo esta base, a RWMA apresenta duas normas de controle de qualidade da solda por resistência: "Evaluation of Weld Consistency", com método descrito pela ASTM e "Control of Weld Quality by Statistical Methods" descrito pela ASA. As duas normas usam praticamente a mesma terminologia e são baseadas em métodos estatísticos, sendo que a primeira se baseia na determinação de um valor médio de uma dada condição de soldagem, enquanto que a segunda se baseia na determinação do menor valor de uma condição de soldagem desejável, exibindo os resultados por meio de gráficos.

A AWS apresenta a norma C1.1-66(5), "Recommended Practices for Resistance Welding", na qual detalha os métodos de análise do ponto de solda, os quais são semelhantes aos critérios adotados pela RWMA. Esta norma envolve análises externas, internas e de

propriedades mecânicas dos pontos de solda. A figura 5.1 apresenta um esquema metalográfico de uma lente de solda com as características resultantes do processo.

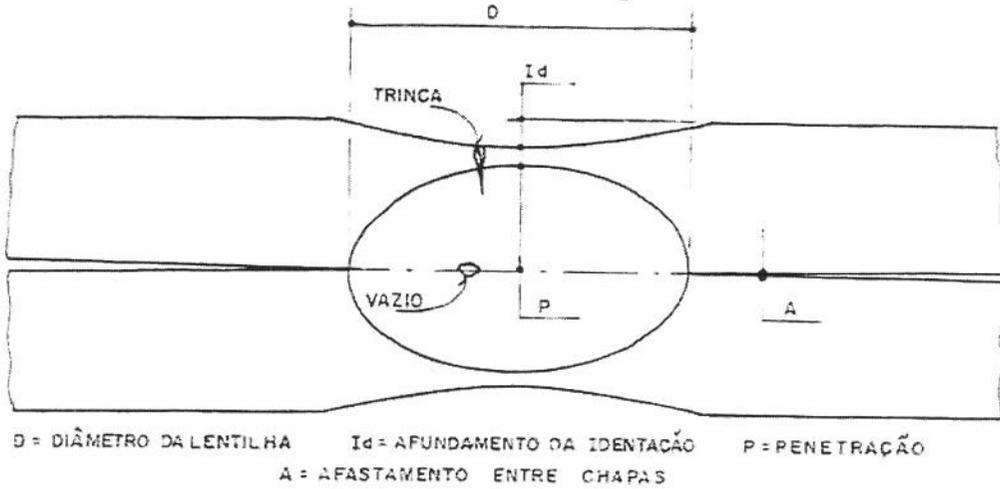


Figura 5.1: Esquema metalográfico de uma lente de solda mostrando alguns parâmetros (diâmetro de lente, afastamento entre as chapas e penetração) e alguns defeitos (trincas e vazios) (4).

5.2 ANÁLISES EXTERNAS DOS PONTOS DE SOLDA

As análises externas dos pontos de solda compreendem: indentação, distorção, separação entre as chapas, expulsão, aderência de cobre, fusão superficial, trinca externa.

A "indentação", definida como uma depressão na superfície da solda, causada principalmente pela pressão dos eletrodos, cujo limite aceitável é de 10 a 20 % de redução da espessura das chapas anterior a soldagem, é um importante critério quando se trata de soldas em chapas revestidas ou soldas aparentes, onde não é desejável a indentação. Um esquema de indentação pode ser observado na figura 5.1.

C.B. Wu (6) estudou por quatro anos o tema indentação e seus resultados mostram que a indentação aumenta com maiores valores de corrente de solda, pois é maior o aquecimento dos metais sendo, conseqüentemente, menor a resistência mecânica. O aumento da força também causa maior indentação, assim como a redução da espessura das chapas.

O autor mostra ainda que a indentação cresce linearmente com a corrente de solda e, para valores até 10% de indentação, a resistência ao cisalhamento dos pontos de solda também é crescente, ou seja, a indentação não interfere na resistência ao cisalhamento.

Trabalhos mais recentes (7), mostram que eletrodos cone truncado a 45 graus apresentam grandes indentações, e estes valores são decrescentes para cone truncado a 30 graus e esférico com raio de 76 mm. Mostra ainda que soldas obtidas com corrente acima da expulsão, apresentam indentação maior do que 10 %, e paralelamente apresentam maior resistência mecânica. Assim segundo estes autores a indentação não causa sensível interferência na resistência ao cisalhamento.

A "distorção" ocorre quando a solda é realizada na borda das chapas, onde a distância das bordas deve ser grande o suficiente para prover adequada resistência e evitar fratura. Ela também pode ocorrer pelo desalinhamento dos eletrodos. Trabalhos de Azambuja, apresentam um método simples para o alinhamento dos eletrodos (8).

A "separação das chapas" é observada na interface entre as chapas, na região adjacente à área de solda. A faixa normalmente aceitável é de 10 % da espessura das duas chapas. A excessiva separação entre as chapas é indesejável porque cresce o momento fletor sobre a junta quando solicitada em cisalhamento. Este fator pode ser encarado como um entalhe adjacente à lente de solda, de modo a ser determinante no modo de fratura dos pontos de solda (1, 2, 5). A figura 5.1 apresenta um esquema do parâmetro separação entre as chapas.

"Expulsão" é definida como a ejeção de metal fundido para fora da zona da solda. É uma condição geralmente causada por excessivo calor na solda e força entre eletrodos imprópria.

A expulsão é normalmente acompanhada de indentação, separação entre as chapas, vazios e maior resistência mecânica da solda (9,10), apesar de alguns trabalhos apresentarem soldas com expulsão com igual ou menor resistência do que as soldas sem expulsão (5).

Paes (9,10) apresenta dois tipos de expulsão. O primeiro chamado de expulsão tipo "flash" (figura 5.2.a), ocorre a baixos tempos de solda e altas correntes, causando um aquecimento muito rápido da interface entre as chapas, não permitindo a dissipação de calor para o restante do material. Este tipo de expulsão pode ocorrer a baixas correntes, quando o material a ser soldado tem alta resistência elétrica interna.

O segundo tipo de expulsão, expulsão violenta (figura 5.2.b), ocorre com longos tempos de soldagem em função do amolecimento do material sólido adjacente à lente de solda. Quanto maior a resistência elétrica interna das chapas maior será a temperatura deste material adjacente facilitando a ocorrência de expulsão.

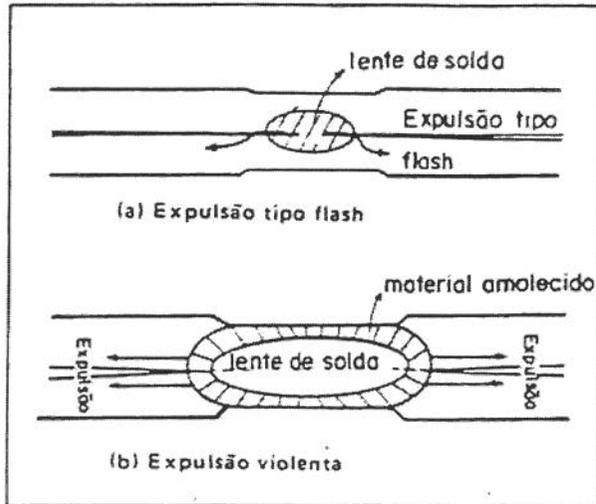


Figura 5.2: Esquema de expulsão, a) "splash" b) expulsão violenta (9,10)

Quando se solda com tempos de solda muito elevados, a expulsão pode ocorrer antes mesmo de uma lente aceitável ter sido formada, tipo "flash", ou imediatamente após a sua formação, sendo que aquelas consideradas aceitáveis só ocorrem para valores de resistência eletrodo/chapa muito baixos. Admite-se que a fusão na interface entre as chapas ocorra na periferia do eletrodo, devido ao fato desta região estar sob menor constrição triaxial sendo mais facilmente deformável, oferecendo então menor resistência ao fluxo de corrente.

A expulsão violenta ocorre quando lentes de solda aceitáveis estão presentes. Isto se deve à resistência elétrica eletrodo/chapa ser muito baixa fornecendo taxas de aquecimento lentas o suficiente para que haja tempo para formar a lente e amolecer o material adjacente à esta, possibilitando o segundo tipo de expulsão.

A expulsão faz crescer a deposição de cobre na superfície das chapas, crescendo a suscetibilidade à corrosão nos pontos de solda. O cobre pode ser completamente removido com palha de aço, escova ou lixa. Para testar a completa remoção de cobre, aplicar uma solução de ácido acético 10% na região da solda; havendo cobre, este ficará preto.

Carvalho (11, 12) em seus trabalhos sobre o potencial de cobre na superfície de chapas zincadas soldadas a ponto chegou às seguintes conclusões:

- com aumento da corrente de solda, maior é a impregnação de cobre;
- a contaminação de cobre é maior nos estágios iniciais da vida útil dos eletrodos e diminui com maior número de pontos;
- o potencial de cobre é maior na região central dos pontos de solda;
- os pontos de solda com maior potencial de cobre na superfície sofreram maior corrosão; o tempo de solda parece não influenciar a deposição de cobre.

"Fusão superficial" ou "queima", pode ser descrito como a fusão superficial do metal em contato com os eletrodos. A qualidade da solda e sua aparência são adversamente afetadas nestas condições. A fusão superficial ocorre principalmente devido a alta resistência de contato eletrodo/chapa (11, 12).

"Trincas externas" na superfície da solda normalmente indicam uma imprópria relação de força e corrente. A força de solda deve ser grande o suficiente para prevenir a excessiva geração de calor e aplicada por um tempo suficiente para resfriar a zona fundida. A trinca superficial apresenta menor resistência a corrosão e resistência mecânica.

A presença de trincas na superfície dos pontos de solda de chapas zincadas, é um problema bastante antigo (13, 14). Elas são intergranulares, e normalmente são causadas pela penetração de Cu ou latão nos contornos de grãos do aço. A figura 5.1 apresenta um esquema de trincas em lentes de solda.

Para que ocorra penetração intragranular do cobre proveniente dos eletrodos, ou as ligas de cobre decorrentes da combinação do cobre do eletrodo com o zinco do revestimento, estes metais devem primeiramente estar na forma líquida na superfície do aço. Os átomos deste metal líquido penetram nos contornos de grão fragilizados do material de modo que qualquer incremento de força causa o aparecimento de trincas.

A penetração intragranular do cobre ocorre em 3 estágios:

- ataque rápido do contorno de grão do metal de base pelos átomos de cobre;
- decréscimo da força coerciva do contorno de grão resultando na formação de trincas a quente no campo de tensão;

- o retro-preenchimento destas trincas pelo metal líquido, fornecendo energia interfacial favorável.

Sabe-se que a penetração intergranular ocorre mais facilmente em chapas de aço na condição de austenita. Contudo, o mecanismo exato de formação de trincas em diferentes tipos de aço zincado, não é bem conhecido.

5.3 ANÁLISES INTERNAS DOS PONTOS DE SOLDA

As análises internas dos pontos de solda envolvem: inconsistência, assimetria, penetração, trincas internas e vazios. A observação destes fatores é realizada geralmente por meio de ensaios destrutivos de metalografia; contudo, existe também a possibilidade de serem submetidos à inspeção radiográfica.

A inspeção de raio-x de solda a ponto críticas e de alta resistência é freqüentemente necessária, especialmente em estruturas de avião e partes de máquinas, podendo revelar os defeitos acima mencionados. Contudo, a inspeção de raio-X não determina se há fusão nem o diâmetro de lente, exceto em ligas onde o cobre e zinco são segregados para a periferia da solda. Em alguns materiais é possível ver a indentação e a área de forja. Os defeitos que ocorrem em solda por resistência são extremamente pequenos e difíceis de serem detectados, sendo necessário um maior contraste para que possam ser observados. As condições de inspeção de solda a arco não tem sensibilidade suficiente para a inspeção da solda a ponto.

Solda a ponto de alta qualidade consistente requer rígido controle de espessura, da composição, da condição superficial e da dureza do material soldado. Requer também um rígido controle da relação elétrica-mecânica do equipamento, das condições de manutenção do eletrodo e da escolha do programa de solda. Integridade interna é freqüentemente difícil de se determinar, a menos com teste destrutivo; portanto, métodos de garantia devem ser utilizados para reduzir a possibilidade de falha na solda. Consistência pode ser definida como a capacidade de produzir soldas com suficiente resistência e livre de defeitos.

A lente de solda bem formada pode ser definida através da existência de simetria da poça de solda no eixo vertical e horizontal, com relação à interface entre as chapas. Para obter

qualidade de solda consistente é necessário ter uniformidade e estar propriamente localizada e alinhada. A figura 5.1 apresenta um esquema de lentes simétricas.

A simetria da lente de solda está diretamente ligada à penetração da lente, de modo que lentes simétricas possuem penetrações uniforme a partir da interface entre as chapas.

A "penetração" em solda a ponto pode ser definida como a profundidade com a qual a fusão se estende dentro da peça na qual ela ocorre; ele é expressa como uma porcentagem da espessura da chapa. O limite para a penetração é normalmente aceita variando de 20 % a 80 %. Soldas onde o limite mínimo ou máximo é excedido podem apresentar uma variação indesejável na sua resistência, a saber:

- penetração insuficiente: soldas produzidas com menos de 20% de penetração podem apresentar diversas falhas, próprias das variações na corrente, tempo e força entre eletrodos .
- penetração excessiva: soldas com mais de 80% de penetração podem criar outros defeitos tais como expulsão, "tip peckup", fissuras e porosidade própria das variações de corrente, tempo e força entre eletrodos .

A "assimetria" da lente de solda, ou seja, a fusão de um maior volume de metal em uma das chapas causando penetrações diferentes, ocorre quando se solda chapas de espessuras diferentes ou materiais diferentes, em decorrência da ausência de balanço térmico na geração de calor das juntas. A figura 5.3 apresenta um esquema de lentes de solda assimétrica, sendo que a maior área fundida da lente de solda está na chapa inferior (15, 16).

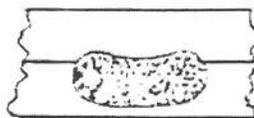


Figura 5.3: Esquema de lentes de solda assimétrica (16).

Vários autores afirmam (2, 15-17) que o melhor balanço térmico em juntas de chapas com diferentes espessuras podem ser conseguidos com o melhor dimensionamento de eletrodos em contato com cada espessura de chapa.

Dickinson (17) afirma que a lente de solda é maior na chapa mais grossa, em razão do calor ser extraído mais rapidamente da chapa mais fina, através da do eletrodo. Deste modo, o

calor gerado nas peças, permanece mais tempo na peça mais grossa aumentando a área fundida, em razão de não ter sido extraído pela água de refrigeração dos eletrodos. Portanto, o efeito da condutividade térmica e da dimensão dos eletrodos são pronunciados no balanço térmico do calor.

O autor afirma ainda que a assimetria das lentes de solda em chapas de composição química diferentes, são decorrentes das diferentes resistividade elétrica e condutividade térmica. O calor gerado é maior nas chapas de maior resistividade elétrica, e ficará confinado em chapas de menor condutibilidade térmica.

As lentes de solda podem apresentar "vazios". Os vazios são defeitos freqüentemente presentes nos pontos de solda que tenham um excesso de calor e baixa força durante a sua formação. Segundo Paes (9, 10) a expulsão pode ser causada por altas corrente e baixos tempos de soldagem, ou por altos tempos e altas correntes. Quando se solda material de alta resistência interna as expulsões são mais freqüentes. Vários fatores afetam a ocorrência de vazios nas lentes de solda, tais como, segregação, taxa de resfriamento, taxa de aquecimento e tensão no ponto.

Durante a solidificação da lente, com o crescimento de estruturas dendríficas, que convergem para o centro do ponto de solda, com contração paralela do metal líquido, ocorrem vazios de contração conhecidos como rechupe. A solda de aços que segregam elementos de ligas e impurezas de baixo ponto de fusão, também pode causar a presença de vazios de contração (rechupe) em decorrência dos elementos segregados se solidificarem, posteriormente, em baixas temperaturas.

A força entre os eletrodos é um dos principais fatores na formação de vazios e porosidades. No caso da formação de vazios, o baixo esforço de compressão transmitido pelos eletrodos durante a solda não consegue impedir a expulsão de metal fundido. Enquanto que o baixo esforço de compressão transmitido pelos eletrodos durante a solidificação, não consegue obrigar o metal frio que rodeia a lente fundida a deformar-se e seguir a contração do metal aquecido, surgindo as porosidades resultante da contração térmica (18).

Soldas com trincas internas podem ser detectadas de forma não-destrutiva por radiografia ou, destrutivamente, pelo seccionamento da solda. Usualmente, especificações devem ser previstas para fornecer informações sobre o grau da integridade da solda requerida para a aplicação a que se destina. Trincas podem ocorrer tanto na direção transversal como na direção

longitudinal numa solda a ponto. Elas podem se estender até a zona termicamente afetada ou ser confinada no centro da poça (trincas de repuxo).

5.4 ENSAIOS MECÂNICOS

As propriedades mecânicas dos pontos de solda podem ser obtidas por vários tipos de ENSAIOS mecânicos, em conjunto com o modo de fratura após os ensaios, os quais estão descritos abaixo. Contudo, os ENSAIOS mais utilizados em laboratório são tração cisalhante e tração axial, enquanto que o de arrancamento é o mais utilizado a nível de rotina de produção.

O ensaio de tração cisalhante consiste na sollicitação dos corpos de prova, até a fratura, em uma máquina universal. As amostras são obtidas por duas chapas sobrepostas soldadas com um ponto. Neste ensaio obtem-se a tensão máxima de ruptura e o modo de fratura, quer por cisalhamento do metal de solda ou por rasgamento do metal de base, demonstrando fragilidade ou ductilidade, respectivamente. A figura 5.4 apresenta um esquema do corpo de prova para este ensaio.

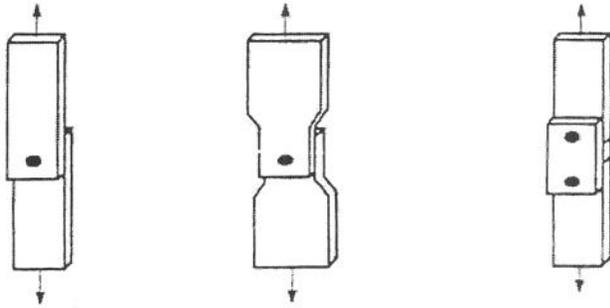


Figura 5.4: Esquema de 3 tipos de corpo de prova (CP) para o ensaio de tração cisalhante (2).

Neste teste pode-se ainda obter medidas de diâmetro de lente, mas não muito precisas. O efeito das excentricidades das amostra pode ser desprezadas. Para amostras de espessuras de chapas iguais ou maiores do que 2,57 mm, é recomendado que as garras da máquina de teste seja compensada para evitar dobramento.

A proposta do ensaio de tração axial" é obter medidas melhores, com maior sensibilidade ao entalhe do que as obtidas com os de cisalhamento. A razão de resistência a tração pela resistência ao cisalhamento é freqüentemente relacionada como a ductilidade da solda. Nesse

ensaio pode-se obter a tensão máxima na ruptura e o modo de fratura. O ensaio de tração pode ser realizado por dois tipos, a saber, tração transversal e tração axial.

A tração transversal é designada para solicitação de tensão na solda na direção normal à superfície do material. Nestes ensaios, utilizam-se garras ou suportes para fixar as amostras. A geometria do corpo de prova pode ser observada na figura 5.5.a.

Nos testes de tração axial as amostras são soldadas na forma de U (figura 5.5.b) e são tracionadas até a ruptura das chapas. Suportes na forma de blocos são utilizados para se fixar as amostras durante os teste, de modo que a carga seja confinada na região da solda. Este teste é limitado para grandes espessuras de chapas, devido ao dobramento que estas devem sofrer para estarem na forma de U.

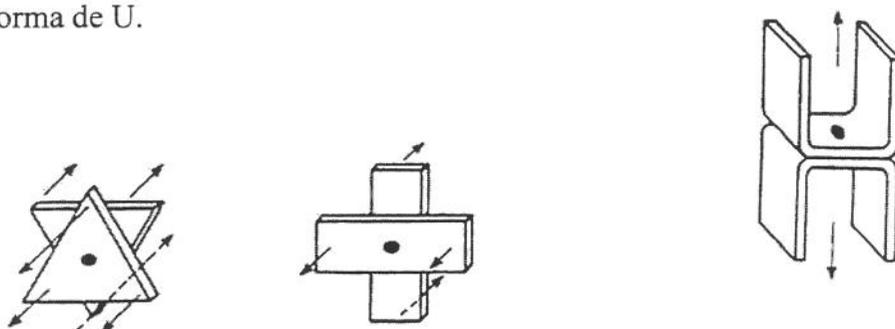


Figura 5.5: Esquema do corpo de prova para ensaio de tração, a) transversal; b) axial (2).

São usados dois tipos de ensaio de torção, a saber, o de torção não instrumentado e o de torção cisalhante. No de torção não instrumentado, usado para determinar o diâmetro da lente de solda e o modo de fratura, os corpos de prova são os mesmos utilizados no teste de tensão de cisalhamento (vide figura 5.4). O segundo tipo é o ensaio de torção cisalhante, o qual é realizado quando se requer medidas da resistência e ductilidade da solda a ponto. Os corpos de prova podem ser do tipo utilizado para a tração axial (vide figura 5.5.b). Nesses deve-se garantir que a solda seja centralizada com o eixo de rotação. Três valores são determinados nesse ensaio:

- 1- Torque máximo obtido com a ruptura do ponto de solda na torção;
- 2- Ângulo de torção para o último torque ;
- 3- Diâmetro da lente de solda;

A resistência da solda pode ser determinada usando o último torque, sendo que o diâmetro da solda e a ductilidade podem ser determinados pelo ângulo de torção. Estas grandezas podem ser usadas para indicar a qualidade da solda.

A tensão de cisalhamento na torção pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$\tau = \frac{Mc}{I} \quad (5.1)$$

onde τ = tensão de cisalhamento na torção

M = torque

c = distância da fibra externa para o centro

I = momento de inércia polar

O valor da tensão obtido para as fibras externas, é diretamente proporcional à tensão de cisalhamento em torção. Em ensaios recentes com aço baixo carbono, foi encontrado que a tensão máxima de cisalhamento na superfície das fibras submetidas à torção é, aproximadamente, duas vezes a tensão de cisalhamento sem torção.

Para avaliação da tensão de cisalhamento sem torção, usando o ensaio de torção, é necessário usar a seguinte equação:

$$\text{Tensão de cisalhamento na torção} = 2 \times \text{tensão de cisalhamento} \quad (5.2)$$

Substituindo na equação 5.2 a expressão dada pela equação 5.1, tem-se que:

$$Mc / I = 2 \times (\text{carga da tensão cisalhante}) / \text{área} \quad (5.3)$$

Agora, substituindo " M " por " T " (torque máximo), sendo " L " a carga da tensão cisalhante e, ainda, substituindo " I " e a área pelas correspondentes expressões obtém-se a equação 5.4, dada a seguir, a qual, após as simplificações devidas resulta na equação 5.5:

$$\frac{T\left(\frac{D}{2}\right)}{\frac{\pi D^4}{32}} = \frac{2L}{\pi D^2} \quad (5.4)$$

$$\frac{16T}{\pi D^3} = \frac{8L}{\pi D^2} \quad (5.5)$$

Resolvendo a equação 5.5 para "L", carga de tensão cisalhante, chega-se à equação 5.6

$$L = \frac{2T}{D} \quad (5.6)$$

Ou,

$$\text{Carga de tensão cisalhante} = 2 (\text{torque máximo}) / \text{diâmetro} \quad (5.7)$$

A expressão dada em 5.7 fornece uma relação aproximada entre a tensão de cisalhamento e o torque requerido para cisalhar a solda, utilizando os resultados obtidos do teste de torção. Deste modo, multiplicando o torque por dois e dividindo pelo diâmetro da lente, obtém-se a tensão de cisalhamento da solda.

Os ensaios de tração axial e de torção instrumentado são bastante utilizados na Europa. Johnson apresenta um trabalho normativo sobre ensaio de torção e compara os resultados obtidos com os resultados de tração axial (19). Para esse trabalho foram utilizadas chapas de aço de baixo carbono de 1,0 mm de espessura, soldadas a ponto por resistência elétrica. Os valores obtidos de torque máximo e tração axial estão na figura 5.6. Esta figura mostra que para diâmetros de lente maiores que 4,5 mm, o torque máximo é igual a aproximadamente 20 N.m, e a carga de tração axial é igual a aproximadamente 4000 N, sendo que nesses casos a fratura do ponto de solda foi na forma de botão.

O "ensaio de fadiga" sob tensão de cisalhamento utiliza o mesmo tipo de amostra dos testes de cisalhamento. Deve-se tomar muito cuidado com a centralização da solda. As amostras são submetidas a um carregamento estático e posteriormente é aplicado o carregamento cíclico.

O "ensaio de macrografia" é utilizado para se determinar o diâmetro da lente de solda e a penetração, como medida de controle. As amostras devem ser preparadas com corte perpendicular à superfície do ponto de solda, e no centro do ponto. As medidas devem ser realizadas com microscópio para serem mais precisas. Estas amostras podem ser usadas para medidas de dureza. Este teste é entendido como uma rápida checagem e a precisão dos resultados depende do cuidado com a preparação das amostras. A figura 5.1 apresenta um esquema de uma lente de solda para ensaios de macrografias.

Para se determinar a dureza dos pontos de solda, as amostras do ensaio de macrografia devem ser preparadas com cuidado para que não ocorra um aquecimento durante o corte, o que mudaria o perfil de dureza. Cuidados também devem ser tomados com a escolha do método de dureza para que a impressão não ocorra na borda das amostras.

Os testes de "Peel" e "Chisel" são os testes mais simples que podem ser feitos, com um mínimo de equipamento, mas associado com os teste de cisalhamento e tração, tornam-se um controle ideal da solda. Eles são aplicados para toda espessura de material. Os dados obtidos deste ensaios são: modo de fratura, tamanho de lente e penetração. Modificando as amostras é possível também se determinar o desvio de corrente. A limitação destes testes é a variação nos resultados, em decorrência do ferramental utilizado.

Existem ainda outros ensaios destrutivos tais como "Pillow", usado em solda por costura e "Bend", um teste relativamente simples, utilizado em produção para uma rápida avaliação da soldabilidade, particularmente se a solda é livre de trincas. Este ensaio é limitado para espessuras de chapas de até 0,125 in é bastante desenvolvido para alumínio.

5.5 FRATURA DOS PONTOS DE SOLDA

O tipo de fratura em testes de solda é um critério de qualificação bastante usado na indústria automobilística. A análise das fraturas é baseada nos ensaios mecânicos efetuados, tais como: cisalhamento, tração, impacto, fadiga, torção, "peel" e "chisel". Marra (20), em seu

trabalho, faz um levantamento dos tipos de fratura dos pontos de solda submetidos aos testes mecânicos

Podem existir quatro diferentes modos de fratura (21,22), a saber, "totalmente interfacial", "em botão, pelo material de base", "em botão, pela zona termicamente afetada" e "em botão, pela zona fundida". Estes modos de fratura estão ilustrados na figura 5.7.

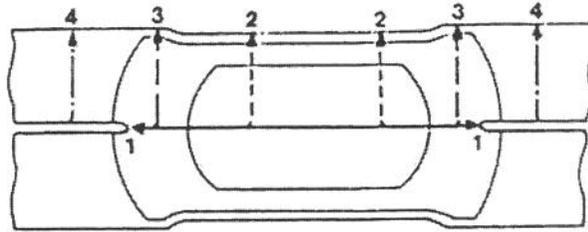


Figura 5.7: Ruptura do ponto de solda (22)

- 1) totalmente interfacial
- 2) em botão, pela zona fundida
- 3) em botão, pela zona termicamente afetada
- 4) em botão, pelo material de base

- Fratura Totalmente Interfacial

Este modo de fratura ocorre inteiramente através da antiga interface entre as peças e não deve ser confundida com fratura frágil por causa de sua aparência macroscópica cristalina, uma vez que alguns pesquisadores (23, 24) observaram, através de microscopia eletrônica de varredura, certos aspectos que indicavam a ocorrência de micromecanismos de fratura dúctil (coalescência de microcavidades) nas superfícies deste tipo de falha.

Segundo Pollard e Goodenow (24), o mecanismo atuante pode ser dúctil ou frágil, dependendo se a falha for devido à baixa resistência mecânica ou à falta de ductilidade. Sob o primeiro aspecto, estão incluídas as soldas de pequeno diâmetro de lente resultantes de condições inadequadas de soldagem tais como, queda de tensão e desvio de corrente. As fraturas frágeis podem ocorrer em decorrência do alinhamento de inclusões na antiga interface entre as chapas, formadas durante a solidificação da lente.

- Fratura em Botão

Pode ocorrer de três modos, segundo a sua propagação:

- pelo metal de base (MB),
- pela zona termicamente afetada (ZTA), ou
- pela zona fundida (ZF).

A fratura pelo MB ou pela ZTA ocorre normalmente através de mecanismos dúcteis. Pelo cisalhamento da espessura das peças a partir da extremidade do entalhe, figura 5.7, embora Jones e Willians, tenham observado a ocorrência de clivagem e de coesão lamelar em algumas superfícies de fratura.

Hoult e Kerr (25), trabalhando com aço refosforados, relataram a ocorrência de fraturas intergranulares pela região de grãos grosseiros da ZTA devido, possivelmente, à alta dureza local associada à segregação de fosfato nos contornos de grão. Contrariamente, um outro tipo de falha pela ZTA, especialmente para aços laminados à frio e recozidos parcialmente, a fratura ocorre devido à um amaciamento de uma estreita faixa desta região provocado pelo ciclo térmico de soldagem (26).

As falhas em botão pela ZF, segundo Sawill e Backer (26) ocorrem, com maior incidência, para aços com maiores teores de fósforo e carbono e são, normalmente, iniciadas por uma pequena porção interfacial de aspecto frágil, primariamente intergranular, envolvendo mecanismo de baixa energia de deformação. Por contraste, a porção seguinte da fratura, fora da interface, sempre mostrou aspectos dúcteis, com a atuação de mecanismos que envolvem alta energia de deformação. Estes autores sugerem que a porção interfacial ocorre devido à fragilização por segregação de fósforo nos contornos de grão e por endurecimento excessivo provocado pelo carbono.

De maneira prática, quase toda energia gasta na ruptura se deve à fração não-interfacial (4). Portanto, é importante para estes tipos de aço a produção de soldas com maiores diâmetros que os estabelecidos para os aços carbono. Nishi e colaboradores (27) criaram para esta falha mista, um parâmetro de avaliação chamado de "Razão de Botão"(RB), que é a relação entre os diâmetros da região de fratura em botão e da lente.

Os ensaios mecânicos usados neste critério são os classificados como de rotina (28) e são, peculiarmente, de rápida execução e de extrema simplicidade. Eles, normalmente, são realizados em linhas de produção para o Controle da Qualidade. Os ensaios de cealhamento e de arrancamento (28) são os mais comuns. Estes dois ensaios consistem, basicamente, na aplicação de esforços sobre os corpos de prova (CPs) visando a separação das duas partes da junta soldada. Os CPs ensaiados fornecem informações sobre o modo de fratura e o tamanho da lente de solda (28, 29). A confiabilidade destas informações está diretamente ligada à experiência do examinador (23).

Na verdade, este critério mencionado é do tipo "passa/não-passa", onde soldas com falhas pela zona fundida são consideradas inaceitáveis por indicarem que esta região é menos resistente que o material de base. Por outro lado, as falhas em botão pelo MB ou ZTA são classificadas de satisfatórias (29). Deve ser ressaltado que este é um critério antigo, criado em uma época em que havia uma utilização exclusiva dos aços baixo carbono, os quais, caracteristicamente, são possuidores de boa ductibilidade.

Com o incremento do uso de aços ligados, a partir da década de setenta, este critério foi automaticamente aplicado pelos fabricantes de automóveis, a estes novos materiais (30). Esta conduta tem sido questionada por alguns pesquisadores (23, 31) pois estes materiais podem apresentar falhas pela zona fundida, mas com a atuação de mecanismos dúcteis, como já foi visto e, ao mesmo tempo, apresentar maiores valores de resistência mecânica que os apresentados por aços carbono. Portanto, o uso de outros testes mecânicos, chamados de ensaios de laboratório, que avaliem o nível de resistência mecânica da junta soldada é fundamental (28).

A norma AWS-C1.1 (5) em conjunto com os critérios de fratura dos pontos de solda após os ensaios mecânicos, foi utilizada como base de análise para qualificar os pontos de solda obtidos neste trabalho.

CAPÍTULO 6

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a caracterização dos metais de base e dos revestimentos utilizados, define a geometria dos corpos de prova a serem soldados a ponto por resistência elétrica, especifica os equipamentos de soldagem e os instrumentos de controle empregados, apresenta o método de soldagem utilizado assim como a sequência de investigação realizada e, por fim, os ensaios mecânicos e as análises dos pontos de solda.

6.1 MATERIAIS

A caracterização cuidadosa dos materiais utilizados neste trabalho se fez necessária para o melhor desenvolvimento do estudo de soldabilidade de juntas obtidas de chapa/chapa e chapa/tubo, com diferentes espessura, composição química e revestimento dos substratos, juntas estas obtidas através de soldagem a ponto por resistência elétrica. Os metais de base utilizados estão na tabela 3.1, os quais foram caracterizados do seguinte modo:

- caracterização do substrato quanto à composição química, resistividade elétrica, propriedades mecânicas e microestrutura;
- caracterização do acabamento superficial quanto à composição química, peso do revestimento, espessura, aderência e microestrutura.

Tabela 6.1 - Materiais utilizados

AÇOS	ESPESSURA mm	TIPO DE REVESTIMENTO (μm)
Chapas ZE-NBR 7008 (ou ASTM 1005)	0,95	zincada por imersão a quente (20)
		Decapada
Tubos seção quadrada 30x30(mm) MBB-F 4041 (ou ASTM 1023)	1,5	Fosfatizado (5)
	2,0	Fosfatizado (5)
		zincado por imersão a quente (80)
		Decapado
	3,0	Fosfatizado (5)

6.1.1 - CARACTERIZAÇÃO DOS SUBSTRATOS

- Composição Química, Propriedades Mecânicas e Resistividade Elétrica

A composição químicas dos substratos de aço, foram determinadas por via úmida, enquanto que as propriedades mecânicas foram obtidas pelos ensaios de tração e dureza, com base nas normas NBR 6673 e NBR 6671 (1,2), respectivamente. A resistividade elétrica dos aços à temperatura ambiente, foi calculada segundo uma equação proposta por D'Haeyer, desenvolvida por métodos estatísticos (3), dada abaixo.

$$\rho(\mu\Omega \cdot cm) = 11 + 16(Si + 0,35 Mn + 0,43 Cr) \quad (6.1)$$

onde, ρ = resistividade elétrica;

Si, Mn e Cr - % de peso destes elementos presente no aço.

- Microestrutura

Sabe-se que as propriedades dos materiais estão intimamente ligadas à sua microestrutura e que esta sofre variações localizadas no processo de soldagem. Deste modo, com auxílio das metalografias quantitativa e qualitativa, procurou-se identificar a estrutura inicial do metal de base da chapa e dos tubos. Os parâmetros analisados foram:

- tipo e proporção de fases ;
- tamanho e forma dos grãos;
- classificação de inclusões .

- Tipo e Proporção de Fases:

Para as observações dos micro constituintes estruturais da chapa e dos tubos foi realizada uma preparação metalográfica prévia das amostras, com polimento até 1 μm sendo, posteriormente, atacadas com nital 3 % por 15 segundos e fotografadas com microscópio óptico, aumento de 200x e 800x .

Dois métodos foram utilizado para calcular a proporção de fases presentes :

- regra da alavanca , com base no diagrama de fases Fe-C (4);
- determinação da fração volumétrica pelo método de contagem de pontos (5).

O método de contagem de pontos consiste da superposição de uma rede padrão sobre a micrografia, contando-se as intersecções dos nós da rede com a segunda fase. A fração volumétrica da fase (V_f) em questão é calculada pela razão entre o número de intersecções "nós - fases" (P) e o número de nós total da rede (P_t), como descrito a seguir.

$$f = \frac{P}{P_t} \quad (6.2)$$

Utilizou-se uma rede com 16 nós aplicada sobre a amostra aumentada 800 vezes, contando-se as intersecções dos nós com a fase perlita. O cálculo foi realizado para 10 regiões diferentes em cada amostra.

- Tamanho de Grão:

Inicialmente as amostras receberam o mesmo tipo de preparação e ataque utilizados no estudo de fases presentes na microestrutura. Utilizou-se o método da intersecção de Hilliard para determinação de tamanho de grão (5), o qual consiste na superposição de um círculo de comprimento conhecido (L_t) sobre a microestrutura contando-se o número de grãos que são cortados pela linha teste (N_l). O diâmetro médio dos grãos (d) é então calculado pela razão entre o comprimento total da linha teste e o número de intersecções multiplicado pelo aumento utilizado (M), conforme a equação (6.3).

$$\bar{d} = L_t / (N_l \cdot M) \quad (6.3)$$

Quando duas fases estão presentes, deve ser computado à equação 6.3 a fração volumétrica de cada fase em questão. Neste caso, fração volumétrica da ferrita (V_α) e fração volumétrica da perlita (V_p). Assim o diâmetro médio dos grãos da ferrita foi calculado por :

$$\bar{d}_\alpha = (L_t \cdot V_\alpha) / (N_l \cdot M) \quad (6.4)$$

e o diâmetro médio dos grãos da perlita por :

$$\bar{d}_p = (L_t \cdot V_p) / (N_l \cdot M) \quad (6.5)$$

Para cada tipo de metal-base foram realizadas 5 medidas em posições diferentes, sendo calculado as médias. Após estes cálculos, os tamanhos de grãos foram classificados segundo a norma ASTM E 112-85 (6).

- Classificação de Inclusões:

A classificação de inclusões nos metais de base, baseou-se na comparação por carta, segundo norma ASTM E 45-85 (7). Inicialmente as amostras de aço foram polidas até 1 μm , e examinadas no microscópio óptico (MO), com aumento de 100 vezes. Em seguida procurou-se varrer a superfície das amostras para identificar e quantificar as inclusões existentes por campo nas amostra.

6.1.2 - CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS

Conforme tabela 6.1, os revestimentos superficiais caracterizados foram:

- chapa de aço zincada, pelo processo contínuo de imersão a quente e tubo de aço zincado por imersão a quente;
- tubo de aço fosfatizado, por imersão a quente;
- chapa e tubo de aço decapados.

6.1.2.1 Chapa de Aço Zincada e Tubo de Aço Zincado

- Composição Química:

As análises químicas dos revestimentos de zinco da chapa e do tubo, foram obtidos pelo processo de via úmida, quantitativo.

- Peso do Revestimento:

No processo de zincagem por imersão a quente pode ocorrer uma variação de peso do revestimento ao longo do substrato das chapas ou dos tubos, o que tornou necessário analisar o peso do revestimento da chapa e do tubo zincado. Estas análises foram realizadas conforme norma ABNT MB-25 (8).

Cada chapa utilizada, cujas dimensões eram de 1000 mm de largura e 2000 mm de comprimento e 0,95mm de espessura, teve suas bordas descartadas em 50 mm, evitando-se

assim a utilização destas regiões. Em seguida foram cortadas 5 tiras de 180 mm de largura, sendo estas identificadas por C1, C2, C3, C4 e C5. De cada uma destas tiras foi retirado 1 corpo de prova para a determinação do peso do revestimento. A figura 6.1. apresenta o esquema adotado.

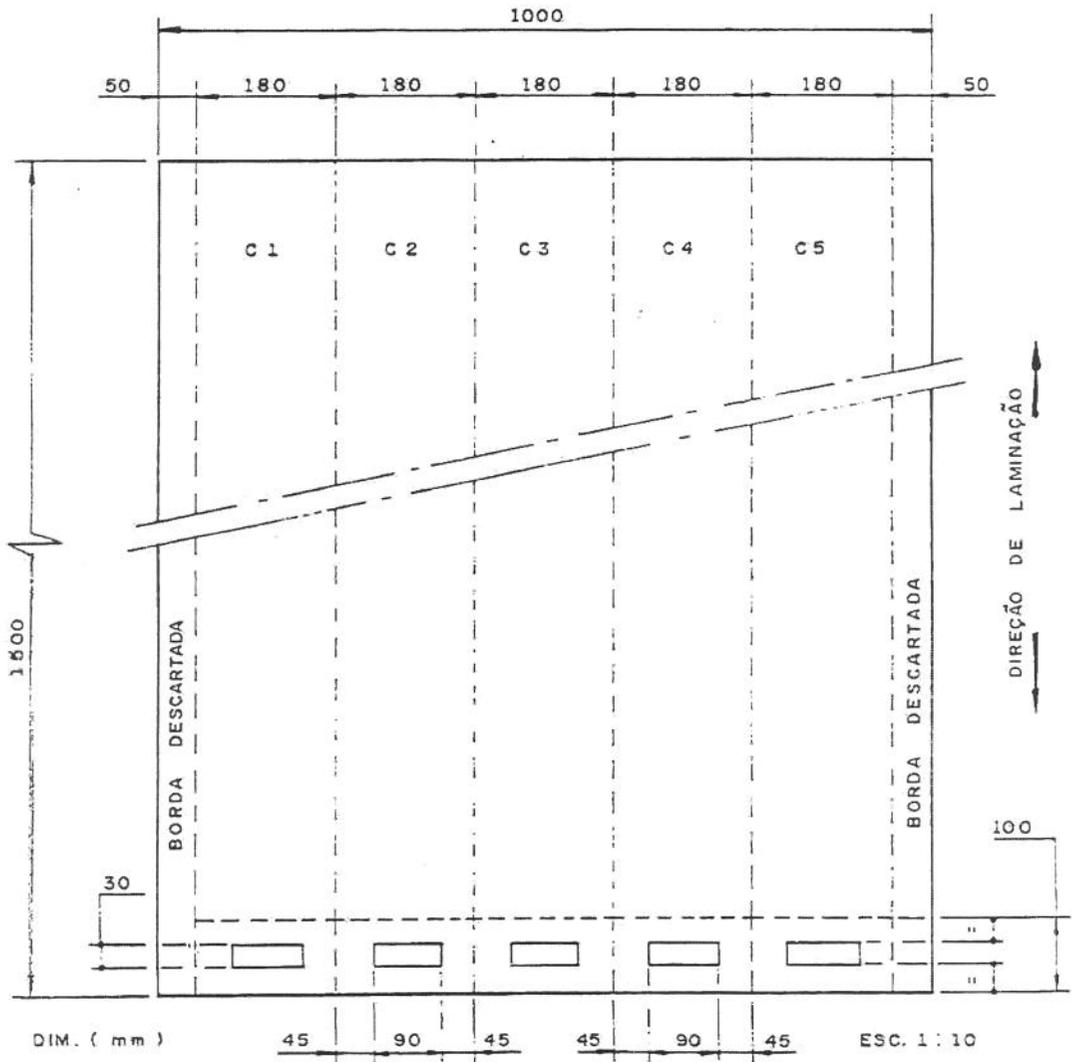


Figura 6.1: Esquema da retirada de CP's das chapas, para a determinação do peso do revestimento.

Cada tubo utilizado, de seção quadrada 30x30x2 mm e 1500 mm de comprimento, teve suas bordas descartadas em 50 mm, evitando-se assim a utilização destas regiões. Em seguida foi cortado em 5 partes de 250 mm de comprimento, sendo identificados por T1, T2, T3, T4 e T5. De cada uma destas partes foi retirado 1 corpo de prova para a determinação do peso do revestimento. A figura 6.2 apresenta o esquema adotado.

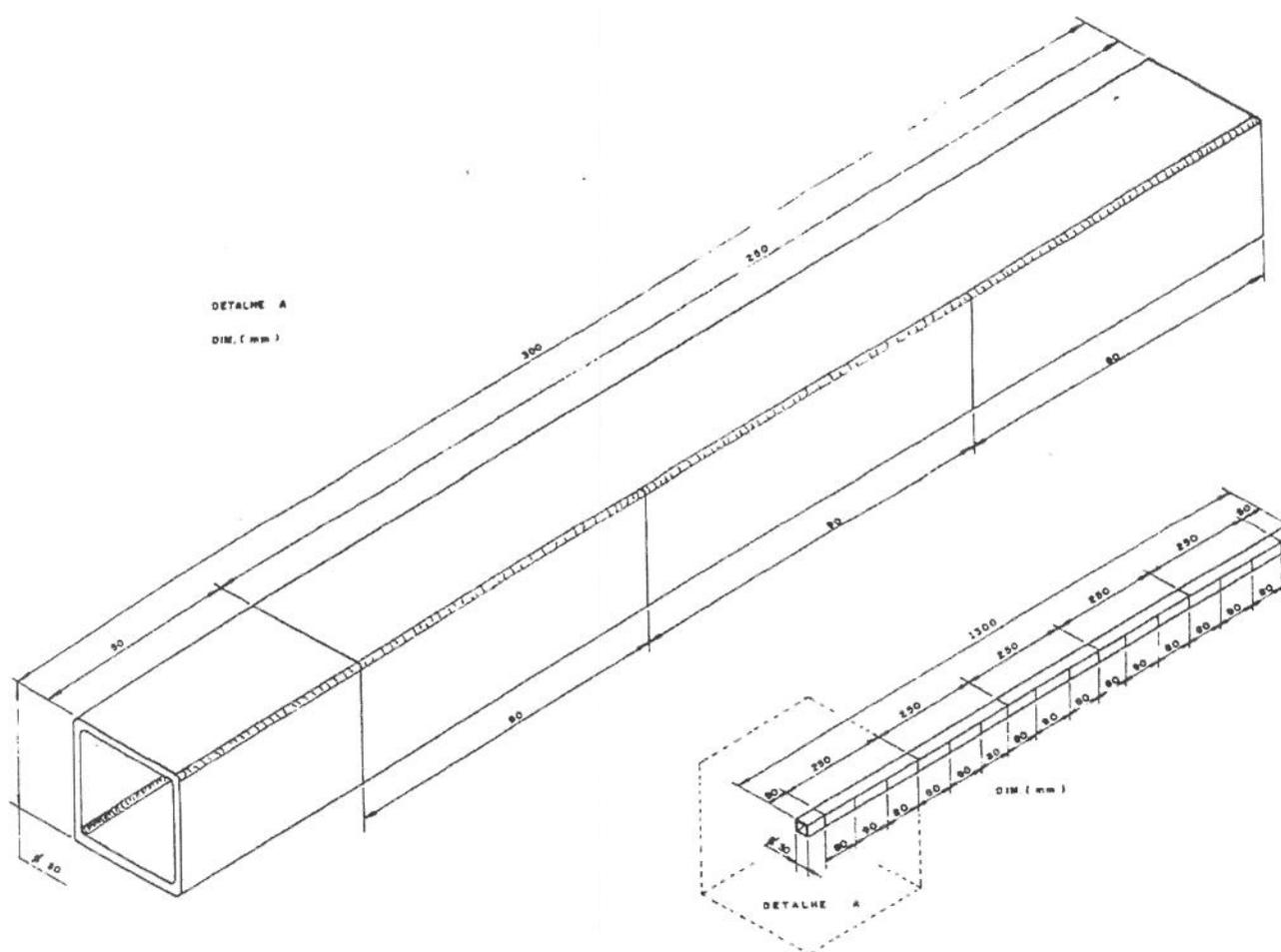


Figura 6.2 : Esquema da retirada de CP's de tubo de aço zincado para análises do peso do revestimento.

- Espessura :

As medidas de espessura de zinco foram realizadas com um equipamento eletrônico, cujo método não-destrutivo se baseia na indução eletromagnética. O equipamento usado foi da marca Eddytronic, modelo MEC NF 2500. Foram realizadas 72 medidas de espessura para as chapas e 216 para os tubos, em diferentes regiões.

- Aderência:

A aderência da camada de zinco, para os dois casos, foi testada por meio do ensaio de dobramento, conforme norma ABNT MB-25 (8). Os CP's utilizados foram dobrados em um ângulo de 180 graus sobre um mandril cilíndrico. Em vista dos primeiros resultados, os tubos foram ensaiados também por "martelo basculante" (8).

- Microestrutura:

Para observação da microestrutura dos revestimentos de zinco, as amostras foram obtidas de cortes perpendiculares às superfícies das chapas e tubos, preparadas metalograficamente; polidas até 1 μm ; atacadas quimicamente e fotografadas no microscópio óptico com aumento de 625 x.

Condições do ataque químico

- reagente número 4 : - 0,075 g de ácido piccro

- 1,3 ml álcool etílico

- 35-60 ml água.

- tempo : - 10 a 30 seg.

6.1.2.2 Tubo de Aço Fosfatizado

A camada de fosfato deve ser compacta, uniforme e na forma de cristais finos, conforme norma MBB-F-8400 (9). Para a caracterização do revestimento de fosfato foram estudadas a composição química, a espessura, a porosidade e a microestruturura.

- Composição Química:

Inicialmente os CP's foram desengraxados com acetona, e atacados com HNO₃ 1 %, até que iniciasse o desprendimento de bolhas, sendo retirados deste ácido e encaminhado esta solução para análise química por via húmida, qualitativamente.

- Espessura :

As medidas de espessura foram realizadas por meio do equipamento de indução eletromagnética, mencionado anteriormente. Foram realizadas 336 medidas de espessuras, em regiões diferentes.

- Porosidade:

A determinação da porosidade do revestimento baseou-se no método de contagem de pontos (poros) por área. Inicialmente, utilizou-se papel de filtro com área conhecida (2,5 cm x 5,0 cm) embebido em um reagente, o qual foi colocado em diferentes locais na superfície do tubo. Os pontos escuros que se revelaram (diâmetro médio de 0,1 cm), foram então contados.

Reagente utilizado - 20 g cloreto de sódio

- 15 g ferrocianeto de potássio

- 0,5 g detergente neutro

- 400 ml de H₂O

Tempo de ataque : - 2 minutos

- Microestrutura:

Para as observações da microestrutura do revestimento de fosfato, as amostras foram levadas diretamente ao microscópio, sem prévia preparação. A superfície foi observada no MEV à 500x.

6.1.2.3 Chapa e Tubo de Aço Decapados.

Os materiais selecionados para a decapagem foram chapas zincadas de 0,95 mm de espessura e tubos fosfatizados com 2,0 mm de espessura, sendo utilizadas soluções diferentes para cada material. Após a decapagem as amostras foram oleadas e armazenadas até a soldagem.

Decapagem do Zinco da Chapa: Os corpos de prova foram imersos em uma solução de ácido clorídrico com 10 gramas de tricloreto de antimônio, por 3 minutos. Em seguida foram lavados em água, secados e oleados.

Decapagem do Fostato do Tubo: Os corpos de prova foram imersos em uma solução de ácido nítrico 1 %, por 3 minutos. Em seguida foram lavados em água, secados e oleados.

6.2 - EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM E INSTRUMENTOS DE CONTROLE

6.2.1 - MÁQUINA DE SOLDA

O equipamento de soldagem é fator de fundamental importância na obtenção de soldas a ponto dentro dos padrões de qualidade normalmente exigidos. Sabe-se que soldas realizadas sob condições idênticas, em máquinas diferentes, podem fornecer resultados totalmente diferentes e que, portanto, o grau de soldabilidade a ponto por resistência de um material depende do tipo de equipamento utilizado. O equipamento de soldagem a ponto por resistência elétrica utilizado neste trabalho é semelhante ao esquema da figura 2.1, apresentada no capítulo 2, e possui as seguintes características:

Marca : ULTRASOLDA
Modelo : CDS-2002-5 (estacionária)
Tensão de alimentação : 440 volts
Frequência : 60 Hz
Circuito de tempo : digital
Primeira compressão : 1 a 99 ciclos
Segunda compressão : 1 a 99 ciclos
Solda : 1 a 99 ciclos
Resfriamento : 1 a 99 ciclos
Retenção : 1 a 99 ciclos
Pausa : 1 a 99 ciclos
Impulso : 1 a 9 ciclos
% de potência : 20 a 99 %
Ajuste de fator de potência : automático.

6.2.2 - MONITORAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM

Para a maioria das necessidades, os três parâmetros básicos que devem ser monitorados num equipamento de soldagem a ponto por resistência elétrica são: corrente, pressão e tempo.

A corrente de solda que deve ser medida é a do secundário, ou seja, a corrente que realmente passa através dos eletrodos. A determinação desta corrente pode ser feita pelo método direto ou indireto. Este trabalho utilizou o método direto, o qual tem a vantagem de levar em consideração as perdas do transformador, informando medidas mais corretas. Os valores de corrente obtidos são elevados, associados aos baixos valores de tensão e ao curto período de soldagem, o que exige a utilização de equipamentos especiais.

Deste modo, a corrente e o tempo de solda foram medidos e registrados com um WELD-CHECKER MM-316A, que tem as seguintes especificações:

Fonte de potência : 100 VAC +/- 10% 50/60 Hz

Medida de corrente : 0,5 kA - 9,99 kA - 5,0 kA - 99,99 kA - precisão : +/- 9,9 %

Medida de voltagem : 0,5 V - 9,99 V - precisão : +/- 2%

Medida do ciclo de solda : 0,5 - 99,5 ciclos (cada meio ciclo) - precisão : +/- 10%

Sistema de registro em carta

A força entre eletrodos foi medida com a utilização de um dinamômetro, uma vez que a leitura indireta feita através dos manômetros não leva em consideração a possibilidade de ocorrência de perdas na transmissão de carga.

6.3 - DEFINIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA (CP's)

O estudo de soldabilidade realizado neste trabalho utilizou dois tipos de geometrias de juntas:

- junta de chapa sobre chapa, doravante representada por "chapa/chapa";
- junta de chapa sobre tubo, doravante representada por "chapa/tubo".

Na junta sobreposta chapa/chapa, a parte superior foi obtida da chapa de aço equivalente ao aço ASTM 1005, com 0,95 mm de espessura e, a parte inferior foi obtida a partir do tubo de aço equivalente ao aço ASTM 1023, sendo estes tubos de secção quadrada 30x30 mm², de espessuras 1,5

mm, 2,0 mm e 3,0 mm, com uma das faces cortada. Deste modo, essas juntas tem a parte superior de um só tipo de aço (ASTM 1005) e uma só espessura de material (0,95 mm), enquanto que a parte inferior é de um só tipo de aço (ASTM 1023) mas com 3 espessuras diferentes (1,5 mm; 2,0 mm; 3,0 mm).

Para a junta chapa/tubo, para a qual utilizou-se os mesmos tipos de aços citados acima, houve apenas mudança na geometria da parte inferior das juntas. Deste modo, a parte superior também foi obtida da chapa de 0,95 mm de espessura e, a inferior, dos tubos de secção quadrada 30x30 mm² nas três espessuras mencionadas, isto é, 1,5 mm, 2,0 mm e 3,0 mm. Assim, estas juntas são constituídas de partes com diferentes características quanto a composição química, revestimento, espessura e geometria da parte inferior.

Foram obtidos corpos de provas das chapas de aço zincadas de 0,95 mm, nas dimensões 30x90 mm². Estes foram dobrados simetricamente na forma de U, vide figura 6.3. Os corpos de provas dos tubos de secção quadrada 30x30, foram obtidos com 30 mm de comprimento, nas três espessuras, tendo assim a forma de um cubo vazado, figura 6.4.a. Nos casos onde os tubos foram utilizados como chapas, foi cortada uma das faces do tubo, ficando assim com a forma de U, figura 6.4.b.

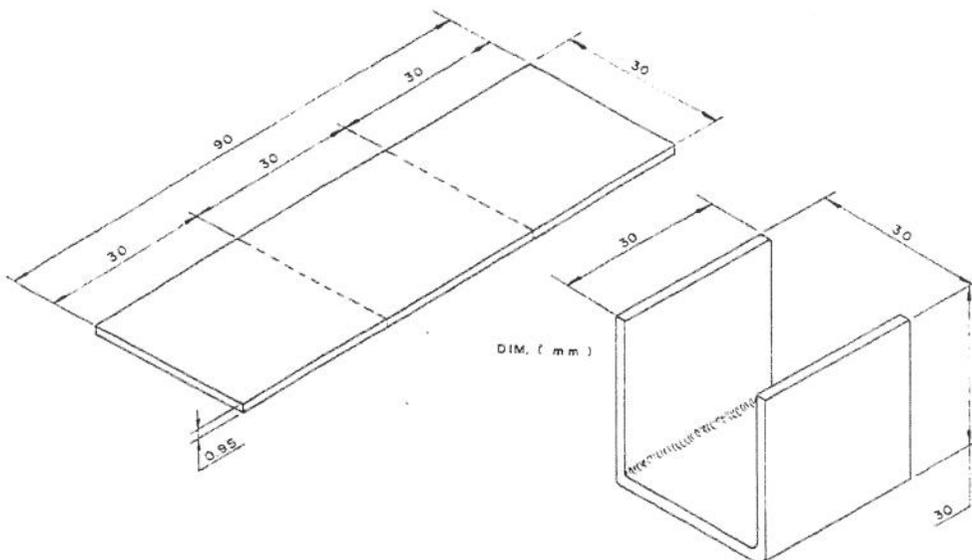


Figura 6.3: Esquema dos CP's das chapas para solda.

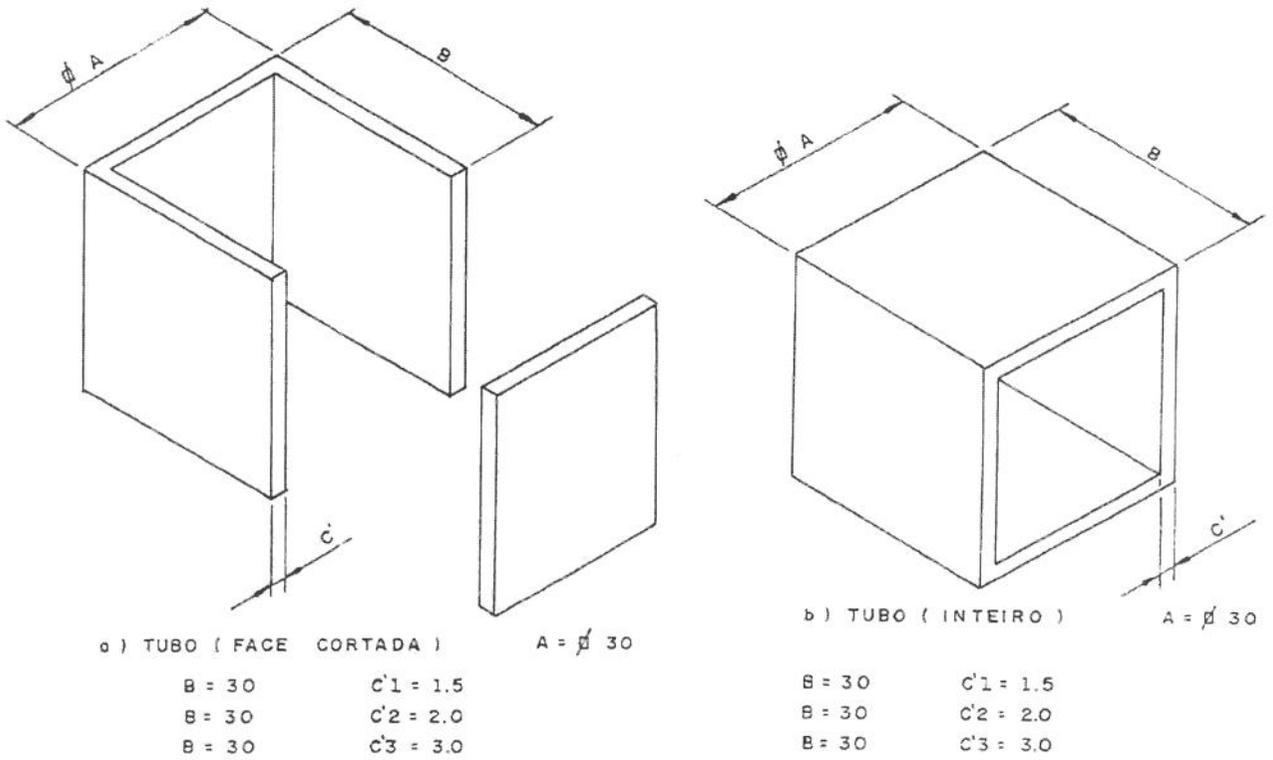


Figura 6.4: Esquema dos CP's dos tubos para a solda. a) Tubo na forma de U. b) Tubo na forma de cubo vazado (dimensões em mm).

Para obtenção da junta chapa/chapa, os CP's das chapas e tubos (cortados) na forma de U, foram soldados na forma de H com ponto de solda no centro, mantendo sempre na parte inferior da junta o tubo cortado (figura 6.5.a). As juntas de chapa/tubo, com CP's das chapas na forma de U e dos tubos na forma de um cubo vazado, foram soldados com ponto de solda ora no centro (figura 6.5.b) e ora na borda do tubo (figura 6.5.c), mantendo sempre na parte inferior da junta o cubo vazado.

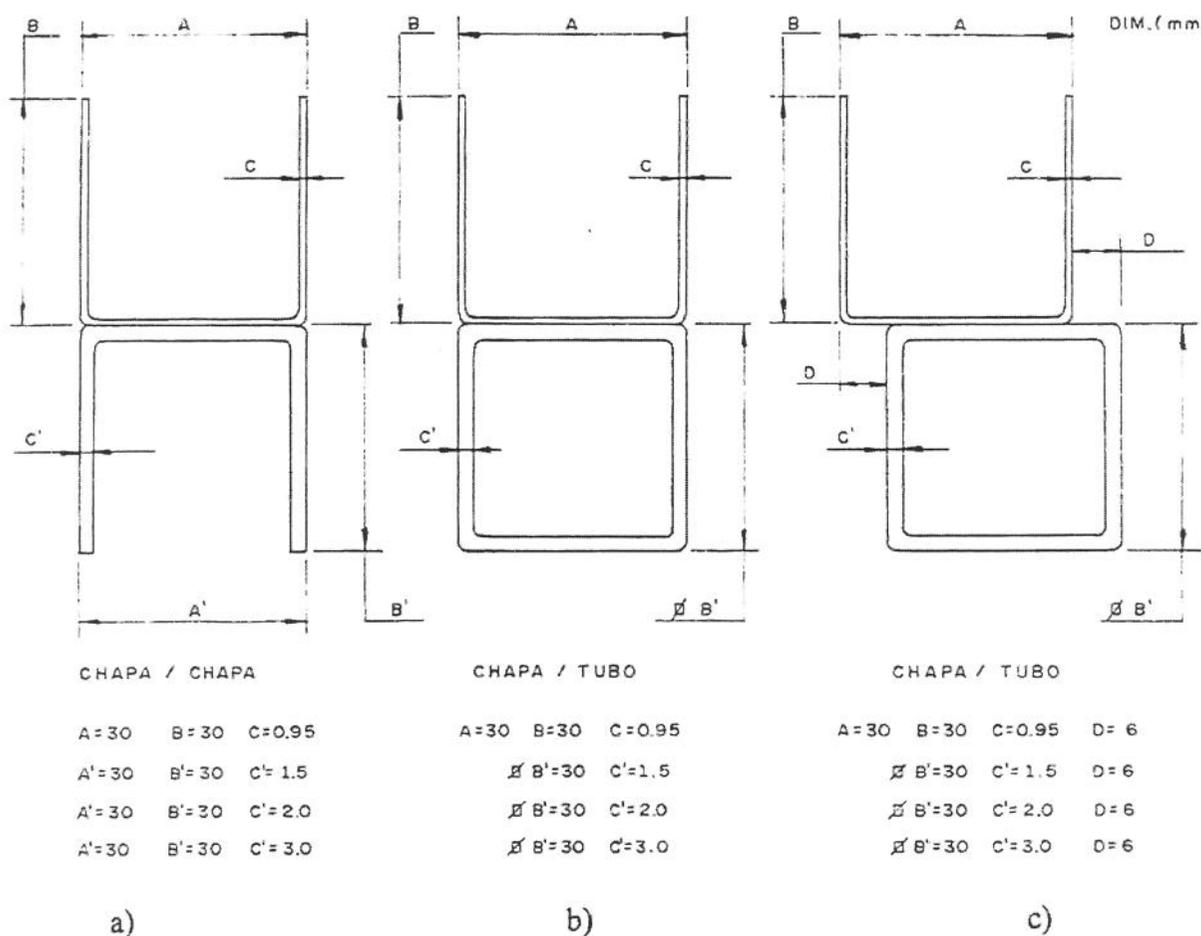


Figura 6.5: Esquema de solda das juntas:

- a) chapa/chapa com diferentes espessuras das chapas (tubo) inferiores-
0,95/1,5 mm; 0,95/2,0 mm; 0,95/3,0 mm;
- b) chapa/tubo com diferentes espessuras dos tubos e solda no centro dos CP's-
0,95/1,5 mm, 0,95/2,0 mm, 0,95/3,0 mm;
- c) chapa/tubo com diferentes espessuras dos tubos e solda na borda dos CP's-
0,95/1,5 mm; 0,95/2,0 mm; 0,95/3,0 mm.

Para realizar o ponto de solda na borda, foi necessário calcular o centro geométrico da junta em decorrência da necessidade de submeter estes pontos de solda aos testes de tração axial.

6.4 - METODOLOGIA DE SOLDAGEM

Sendo as juntas em estudo constituídas de chapas com diferentes características, os valores dos parâmetros iniciais de soldagem foram selecionados com base nas chapas mais finas, com 0,95 mm de espessura. A definição dos valores dos parâmetros foi baseada em trabalhos já realizados pela CSN (10, 11) e catálogos de produtos zincados (12).

Para todos os testes de soldagem realizados, obteve-se faixas de soldagem com variação da corrente de soldagem, mantendo os demais parâmetros fixos. As faixas de soldagem foram definidas com o seguinte critério: procurou-se o menor valor de corrente que resultasse em um diâmetro de lente de $4\sqrt{t}$, após ensaio de torção da junta, sendo este valor de corrente aumentado gradativamente até que ocorresse a primeira expulsão (10).

Os diversos parâmetros de soldagem foram definidos da seguinte forma:

- corrente de solda- variando de um valor mínimo de diâmetro de lente de $4\sqrt{t}$ até expulsão;
- tempo de solda- fixo em 15 ciclos;
- tempo de pré e pós solda- fixo em 20 ciclos;
- força entre eletrodos- fixa em 2800 N, exceto em alguns teste de solda em tubo, utilizou 800 N.
- eletrodos - da liga Cu-Cr-Zr, grupo A, classe 2 da RWMA (13).;
 - geometria tipo capa com diâmetro de corpo de 16mm;
 - 3 tipos de faces de contacto: - cone truncado a 120 graus, com face plana de 5 mm de diâmetro, utilizado em contacto com a chapa superior, representado por (5);
 - esférico, com raio de 12 mm, utilizado em contacto com a chapa superior, representado por (12);
 - plano, com 16mm de face de contacto, utilizado em contacto com a chapa inferior e tubo, representado por (16).
- combinações de geometrias utilizadas: - par de eletrodos 5/16 mm

- par de eletrodos 12/16 mm

Para a execução dos pontos de solda das juntas chapa/chapa ou chapa/tubo, foi necessário utilizar gabaritos de fixação para cada tipo de junta, para garantir a repetibilidade da simetria dos pontos de solda.

Utilizando as condições de soldagem acima, foi caracterizado o comportamento de soldagem a ponto por resistência elétrica dos materiais mencionados na tabela 6.1, tendo sido estudadas inicialmente as juntas chapa/chapa e, posteriormente, as juntas chapa/tubo na sequência de investigação exposta nos itens 6.4.1 e 6.4.2 deste trabalho.

6.4.1 - SOLDAGEM DE CHAPA SOBRE CHAPA (CHAPA/CHAPA)

A- Influência da Espessura da Chapa Inferior com Eletrodo Cone Truncado.

Utilizando chapa superior de 0,95mm de espessura, zincada, eletrodo superior cone truncado de 5 mm de diâmetro e eletrodo inferior plano 16 mm, 5/16 mm. Variou-se a espessura das chapas inferiores em :

- chapa inferior 1,5 mm , fosfatizada;
- chapa inferior 2,0 mm , fosfatizada ;
- chapa inferior 3,0 mm , fosfatizada.

B- Influência da Espessura da Chapa Inferior com Eletrodo Esférico.

Utilizando chapa superior de 0,95mm de espessura, zincada, eletrodo superior esférico de raio 12 mm e eletrodo inferior plano de 16 mm, 12/16 mm. Variou-se a espessura das chapas inferiores em :

- chapa inferior 1,5 mm , fosfatizada;
- chapa inferior 2,0 mm , fosfatizada ;
- chapa inferior 3,0 mm , fosfatizada.

C- Influência do Acabamento Superficial das Chapas com Eletrodo Cone Truncado.

Utilizou-se nestes testes chapa superior de 0,95 mm de espessura e chapa inferior de 2,0 mm de espessura, eletrodos 5/16 mm.. Variou-se o acabamento superficial em :

- chapa de 0,95 mm, zincada sobre chapa de 2,0 mm fosfatizada ;
- chapa de 0,95 mm, zincada sobre chapa de 2,0 mm zincada;
- chapa de 0,95 mm sobre chapa de 2,0 mm, decapada.

6.4.2 - SOLDAGEM DE CHAPA SOBRE TUBO (CHAPA/TUBO)

D - Influência da Espessura do Tubo e Local da Solda Com Eletrodo Cone Truncado

Utilizou-se nestes testes chapa superior de 0,95 mm de espessura, zincadas, par de eletrodos 5/16 mm. Soldas realizadas no centro e na borda dos CP's. Variou-se a espessuras dos tubos em:

- tubo de 1,5 mm, fosfatizado;
- tubo de 2,0 mm, fosfatizado;
- tubo de 3,0 mm, fosfatizado.

E - Influência da Espessura do Tubo e Local da Solda Com Eletrodo Esférico

Utilizou-se nestes testes chapa superior de 0,95 mm de espessura, zincadas, par de eletrodos 12/16 mm. Soldas realizadas no centro e na borda dos CP's. Variou-se a espessuras dos tubos em:

- tubo de 1,5 mm, fosfatizado;
- tubo de 2,0 mm, fosfatizado;
- tubo de 3,0 mm, fosfatizado.

F - Influência do Suporte Não Condutor no Interior do Tubo e Local da Solda Com Eletrodos Cone Truncado e Esférico

Utilizou-se chapa superior de 0,95 mm, zincada, tubo de 1,5 mm, fosfatizado, suporte não condutor no interior do tubo. Variou-se o local da solda e geometria superiores do eletrodo em:

- solda no centro com eletrodo 5/16 mm;
- solda na borda com eletrodo 5/16 mm;
- solda no centro com eletrodo 12/16 mm;
- solda na borda com eletrodo 12/16 mm.

G - Influência da Força de 800 N e Local da Solda Com Eletrodos Cone Truncado e Esférico

Utilizou-se chapa superior de 0,95 mm, zincada, tubo 1,5 mm, fosfatizado, força entre eletrodos de 800 N. Variou-se o local da solda e geometria superiores em:

- solda no centro com eletrodo 5/16 mm;
- solda na borda com eletrodo 5/16 mm;
- solda no centro com eletrodo 12/16 mm;
- solda na borda com eletrodo 12/16 mm.

H - Influência do Suporte Condutor no Interior do Tubo Com Eletrodo Esférico

Utilizou-se chapa superior de 0,95 mm, zincada, par de eletrodo 12/16 mm, suporte condutor de cobre no interior dos tubos, soldas somente no centro dos CP's.. Variando-se a espessura dos tubos:

- tubo de 1,5 mm , fosfatizado, solda no centro;
- tubo de 2,0 mm, fosfatizado, solda no centro;
- tubo de 3,0 mm, fosfatizado , solda no centro.

I - Influência do Percurso da Corrente no Tubo Com Eletrodo Superior Cone Truncado e Inferior Peça em "U"

Utilizou-se chapa superior de 0,95 mm, zincada, eletrodos superior de 5 mm de diâmetro e eletrodo inferior sendo uma peça de cobre em forma de "U" para conduzir a corrente na parede lateral, do tubo (o esquema da peça utilizada pode ser observado na figura 6.6), força entre eletrodos de 800 N, soldas realizadas apenas no centro. Variou-se a espessura do tubo em:

- tubo de 1,5 mm, fosfatizado, solda no centro;
- tubo de 2,0 mm, fosfatizado, solda no centro.

J - Influência do Percurso da Corrente no Tubo Com Eletrodo Superior Esférico e Inferior peça em "U"

Utilizou-se chapa superior de 0,95 mm, zincada, eletrodos superior esférico de raio 12 mm, e eletrodo inferior sendo uma peça de cobre em forma de "U" para conduzir a corrente na parede lateral do tubo (vide figura 6.6), força entre eletrodos de 800 N. Variou-se a espessura do tubo e local da solda em:

- tubo de 1,5 mm, fosfatizado, solda no centro e borda;
- tubo de 2,0 mm, fosfatizado, solda no centro e borda.

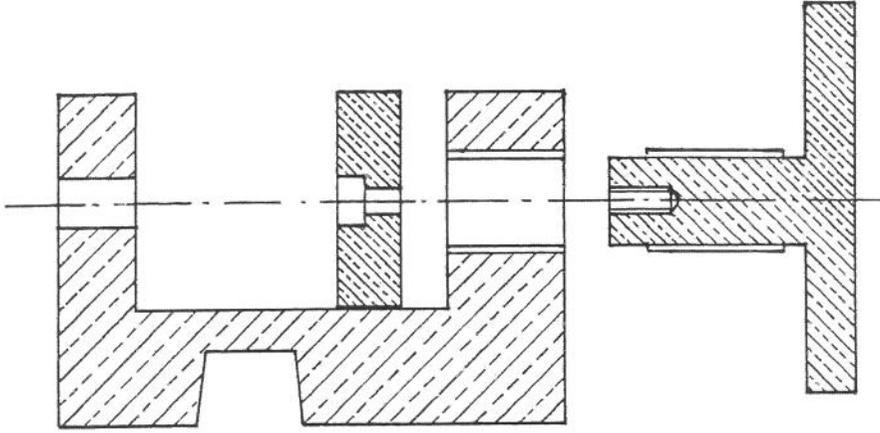


Figura 6.6: Peça de cobre utilizada como eletrodo inferior, a qual conduz a corrente na lateral dos tubos durante a soldagem

L - Influência do Acabamento Superficial da Chapa e do Tubo Com Eletrodo Cone Truncado

Utilizou-se chapa superior de 0,95 mm, tubo de 2,0 mm, par de eletrodos 5/16 mm, solda somente no centro. Variou-se o tipo do acabamento em:

- chapa de 0,95 mm, zincada e tubo 2,0 mm fosfatizado;
- chapa de 0,95 mm, zincada e tubo 2,0 mm zincado;
- chapa de 0,95 mm e tubo de 2,0 mm decapados.

M - Influência de um Suporte Condutor no Interior do Tubo Zincado Com Eletrodo Cone Truncado.

Utilizou-se chapa superior de 0,95 mm, zincada, tubo de 2,0 mm zincado, suporte condutor no interior do tubo, solda no centro.

6.5 - TESTES E ANÁLISES DOS PONTOS DE SOLDA

Os pontos de solda obtidos em cada faixa de soldabilidade, foram analisados com base na norma AWS C1.1-66 (14), envolvendo os seguintes itens:

- análises externas;

- análises internas;
- propriedades mecânicas.

6.5.1 - ANÁLISES EXTERNAS

Nas análises externas dos pontos de solda, observou-se a indentação, a expulsão e a deformação interna da geometria do tubo após a soldagem. Para estas análises as amostras não necessitaram de preparação prévia.

A indentação (I_{den}) é calculada pela equação 6.6, sendo medida em porcentagem da espessura das chapas (%). Os pontos de soldas das juntas de chapa/chapa foram medidos com um micrômetro de ponta bem no centro da lente; enquanto que os pontos de solda de chapa/tubo não foram medidos em decorrência dos valores de indentação serem mascarados com a deformação interna dos tubos soldados.

$$I_{den}\% = \frac{e_i - e_f}{e_i} \cdot 100\% \quad (6.6)$$

onde, e_i = soma das espessuras inicial das duas chapas antes da solda (mm);

e_f = medida da espessura das chapas, no centro do ponto de solda (mm).

A deformação do tubo (Def) é calculada pela expressão 6.7, sendo medida em mm. Este parâmetro não consta na norma anteriormente citada (14). Ele se baseia nas deformações dos tubos após a solda, onde o interior dos tubos sofrem redução na altura interna. As medidas foram realizadas com um paquímetro, no interior dos tubos, simétrico ao local do ponto de solda.

$$Def (mm) = H_i - H_f \quad (6.7)$$

sendo, Def = deformação plástica no interior do tubo após a solda (mm);

H_i = altura interna do tubo, antes da solda, (mm);

H_f = altura interna do tubo, após a solda, (mm).

A expulsão não foi quantificada, sendo que sua ocorrência serviu como critério para determinar o término do intervalo de soldagem.

6.5.2 - ANÁLISES INTERNAS

Nas análises internas dos pontos de solda, observou-se:

- macroestrutura de solidificação,
- penetração superior e inferior,
- vazios,
- trincas e
- diâmetro de lente.

Exceto para a determinação dos diâmetro de lente, para todas estas análises as amostras foram cortadas perpendicularmente à superfície dos pontos de solda, polidas e atacadas com nital 3%. O esquema destes parâmetros analisados estão na figura 5.1 do capítulo 5.

Macroestruturas dos pontos de solda, foram analisadas qualitativamente, sendo um parâmetro muito importante na determinação dos fenômenos de geração e extração de calor dos pontos de soldagem. Das macrografias foram obtidas fotos com aumento de 12,5x.

Os vazios no interior dos pontos de solda, foram analisados qualitativamente.

As trincas (T_s/i) são medidas em " μm ". A presença de trincas foi observada tanto nas chapas superiores (s) como nas chapa inferiores (i). Elas foram observadas no microscópio óptico com aumento de 200x.

A penetração (P_s/i) é medida em porcentagem das espessuras das chapas. Este parâmetro analisa a profundidade que alcança a poça fundida no interior do metal soldado, e foi dividido em penetração superior (P_s) e penetração inferior (P_i). As medidas foram obtidas utilizando um microscópio óptico, e o cálculo efetuado com base nas equações 6.8 (para penetração da chapa superior) e 6.9 (para penetração da chapa inferior).

$$P_s\% = \frac{es - ps}{es} \cdot 100\% \quad (6.8)$$

$$P_i\% = \frac{ei - pi}{ei} \cdot 100\% \quad (6.9)$$

onde, es = espessura da chapa superior;

Ps = penetração da chapa superior;

ei = espessura da chapa inferior;

Pi = penetração da chapa inferior.

Os diâmetros de lente (ϕL) são medidos em mm. As amostras foram obtidas utilizando-se os pontos de solda inicialmente submetidos ao teste de torção, os quais restavam na chapa inferior à lente de solda, que foram lixados, polidos e atacados com nital 10 %. A medição das lentes foi realizada com a utilização de um estereoscópio com ocular milimetrada, sendo o resultado o valor médio de duas medidas feitas à 90 graus uma da outra.

6.5.3 - PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas dos pontos de solda foram avaliadas pelos ensaios de tração axial e torção e forma macroscópica da fratura dos pontos após os dois ensaios citados.

O ensaio de tração axial foi o principal ensaio utilizado no levantamento da resistência dos pontos de solda, executados para todas as condições de soldagem. Utilizou-se uma máquina Instron, escala de 1000 kgf, e velocidade de 1 cm/min. Para a execução dos ensaios de tração, foi necessário utilizar garras para fixar e centralizar os CP's durante os ensaios.

O ensaio de torção foi realizado para o levantamento da resistência ao cisalhamento dos pontos de solda e para fornecer CP's para as medidas de diâmetro de lente. Foi executado para todas as condições de soldagem. As medidas de torque foram obtidas com um torquímetro manual, marca Snap-on, com comprimento de cabo de 330 mm, escala de m.kg. Para a execução destes ensaios foi necessário utilizar um dispositivo para fixar e centralizar os CP's durante os ensaios.

As análises de fratura dos pontos de solda foram realizadas para auxiliar nas informações de resistência mecânica dos pontos de solda. As fraturas foram analisadas de modo macroscópico, observando a presença ou ausência de lente, após o ponto de solda ser submetido aos testes de tração e torção. O modo de fratura dos pontos de solda foi baseado na classificação apresentada no capítulo 5, figura 5.7, sendo que, neste trabalho, os pontos de solda foram classificados em fratura em botão (B) ou fratura interfacial (I). Os resultados são apresentados em porcentagem de fratura em botão ou de fratura interfacial.

CAPÍTULO 7

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho, fez-se uma caracterização e análise da soldabilidade de juntas chapa/chapa e chapa/tubo, de aço baixo carbono de diferentes composições químicas, espessuras e revestimentos, as quais foram submetidas ao processo de solda a ponto por resistência elétrica. Inicialmente são apresentados os dados obtidos da caracterização inicial dos substratos e, em um segundo momento, dos revestimentos. Finalmente são apresentados os resultados e análises das variáveis do processo de soldagem

7.1 - RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS SUBSTRATOS

Os resultados das análises da composição química, das propriedades mecânicas e da resistividade elétrica das chapas e tubos de aço utilizados estão na tabela 7.1. Sendo a composição química determinante para as propriedades mecânicas e elétricas dos aços, observa-se que os tubos que têm maiores teores de carbono, manganês e silício apresentaram maiores resistência mecânica e resistividade elétrica do que as chapas.

Tabela 7.1 - Características dos aços utilizados

Esp. (mm)	ρ ($\mu\Omega$.cm)	LR (N/mm ²)	LE (N/mm ²)	Al (%)	Dure. (HRB)	Composição Química (% Peso)					
						C	Mn	P	S	Si	Al
0,95	12,792	374	321	35,9	57	0,05	0,30	0,012	0,016	0,007	0,062
1,5	19,208	475	325	29,2	72	0,22	0,78	0,024	0,023	0,24	0,050
2,0	18,440	453	340	31,4	73	0,23	0,70	0,017	0,011	0,22	0,039
3,0	18,448	478	316	32,3	73	0,20	0,73	0,012	0,024	0,21	0,059

Os resultados obtidos de porcentagem de fases presente nos aços, tamanho de grãos, e classificação de inclusões podem ser observados na tabela 7.2, e as micrografias podem ser observadas nas figuras 7.1 e 7.2.

A microestrutura das chapas e dos tubos de aço baixo carbono é constituída de uma matriz ferrítica, com perlita nos contornos de grãos, sendo que os tubos apresentam uma quantidade um pouco maior de perlita, em decorrência do maior teor de elementos de liga, tabela 7.2.

Segundo o método de contagem de pontos, utilizado para determinar a porcentagem de fases presente na microestrutura dos aços utilizados, as chapas apresentaram um valor médio de 7,5% de perlita enquanto que os tubos apresentaram um valor médio de 13,5 % de perlita.

Deste modo, os tubos apresentam 80% a mais de perlita do que as chapas. Estes resultados mostram uma diferença quando comparados com os resultados obtidos através do diagrama de fases em equilíbrio, pelo método da regra da alavanca, onde as chapas com 0,05% de carbono apresentam 5,5 % de perlita e os tubos com 0,23% de carbono com 25% de perlita. A diferença nos resultados pode ser atribuída principalmente a três fatores, a saber:

- a regra da alavanca tem como base uma condição teórica de solidificação;
- a regra da alavanca considera somente a presença de carbono e ferro, desconsiderando os outros elementos presentes;
- a imprecisão estatística inerente ao método de contagem de pontos.

As análises da presença de inclusões, tanto nas chapas como nos tubos, revelaram serem estas inclusões de forma globular, constituídas de óxidos de alumínio. e em pouca quantidade.

Tabela 7.2 - Características da microestrutura dos aços

Aços	Microestutura	Porcent. De Fases (média)	Tamanho Grãos-ASTM (média)	Tipo de Inclusões ASTM
Chapa - 0,95mm	Perlita	7,5 %	12	Óxidos globulares
	Ferrita	92,5 %	12	
Tubo - 1,5 mm	Perlita	11,9 %	12	Óxidos globulares
	Ferrita	88,1 %	14	
Tubo -2,0 mm	Perlita	16,7 %	12	Óxidos globulares
	ferrita	83,3 %	13	
Tubo - 3,0 mm	perlita	11,9 %	11	Óxidos globulares
	ferrita	88,1 %	14	

Após estas análises, os aço utilizados foram enquadrados como 1005 da ASTM para a chapa de 0,95 mm de espessura e 1023 da ASTM para os tubos de 1,5, 2,0 e 3,0 mm de espessuras.

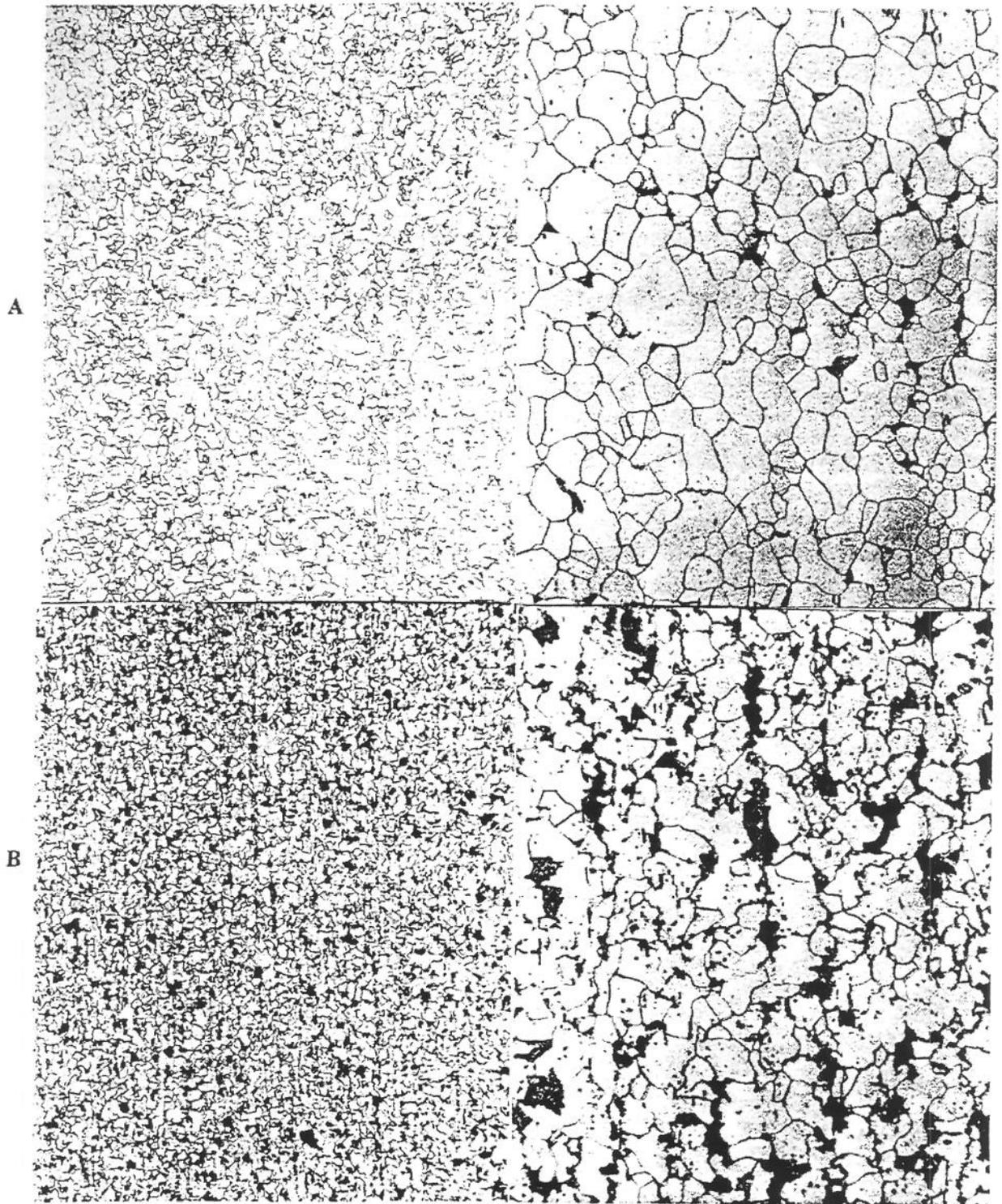


Figura 7.1: Microestrutura dos aços: (A): Chapa de aço de 0,95 mm de espessura, equivalente ao 1005 da ABNT, constituída de matriz de ferrita e baixa quantidade de perlita. (B): Tubo de aço de 1,5 mm de espessura, equivalente ao 1023 da ABNT, constituído de matriz de ferrita e perlita nos contornos dos grãos. Nital 3%. 200x e 800x..

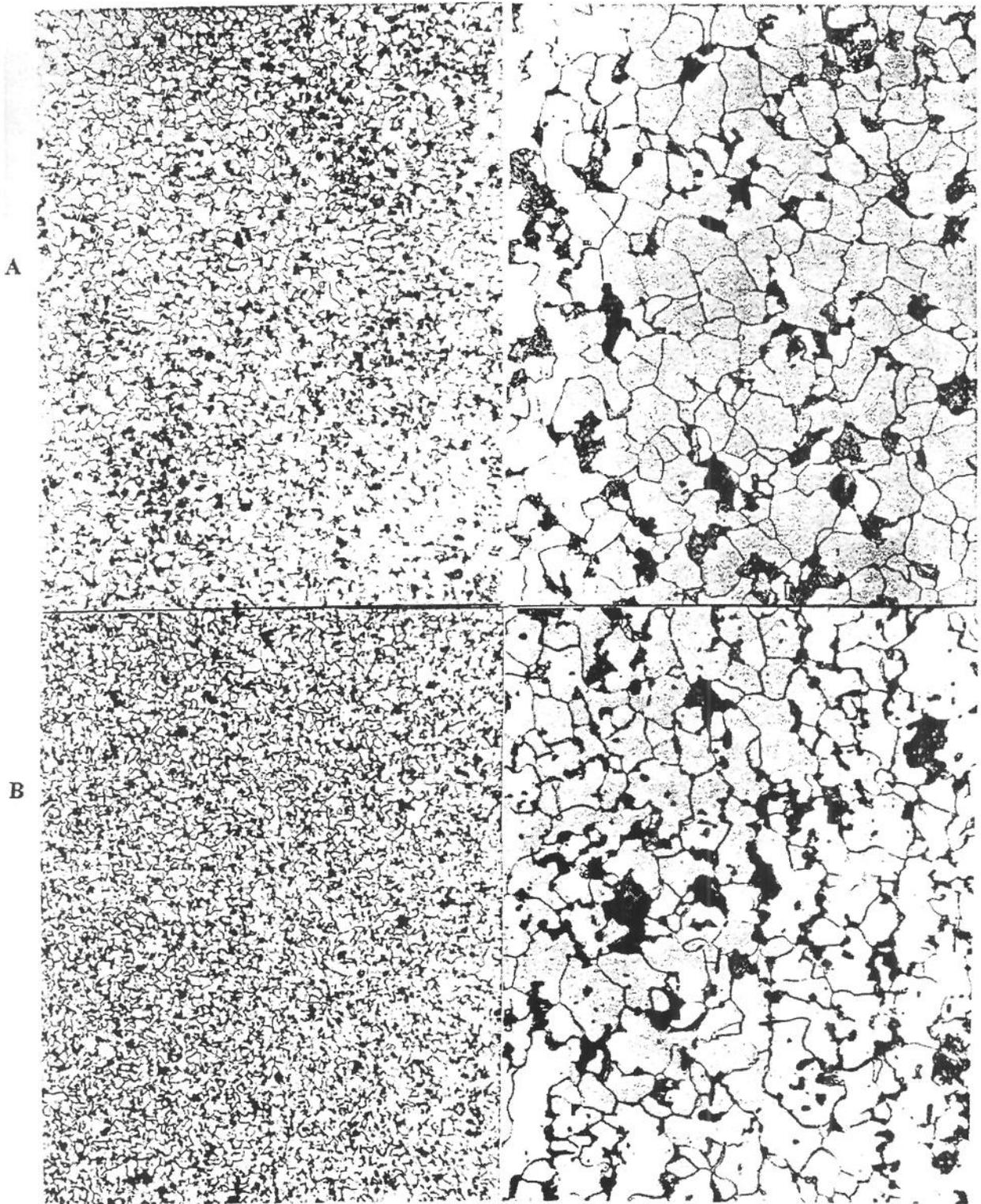


Figura 7.2: Microestrutura dos aços: (A): Tubo de aço de 2,0 mm de espessura, equivalente ao 1023 da ABNT, constituído de matriz de ferrita e perlita nos contornos dos grãos. (B): Tubo de aço de 3,0 mm de espessura, equivalente ao 1023 da ABNT, constituído de matriz de ferrita e perlita nos contornos dos grãos. Nital 3%. 200x e 800x.

7.2 - RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS DOS AÇOS

7.2.1 - REVESTIMENTO DE ZINCO

A camada de zinco das chapas de aço de 0,95 mm de espessura e a dos tubos de aço de 2,0 mm de espessura foram obtidas por imersão a quente com uma espessura nominal de 20 e 80 μm , respectivamente. Os resultados obtidos da caracterização das camadas de zinco estão na tabela 7.3 e na figura 7.3.

Comparando as composições químicas das camadas de zinco das chapas e tubos, pode-se observar que elas são semelhantes, ressaltando que a camada de zinco do tubo é um pouco mais rica em ferro e a camada de zinco da chapa apresenta silício.

Os tubos apresentaram um aumento no peso de revestimento ao longo de uma extremidade a outra variando de 1234 a 1521 g/m^2 , sendo todos utilizados. As chapas apresentaram uma variação no peso do revestimento ao longo da sua largura, sendo utilizadas somente as faixas onde o peso do revestimento ficou entre 240 a 290 g/m^2 , o qual é classificado pela CSN como revestimento B (1). Os fatores responsáveis pelas variações nas espessuras de zinco são atribuídos ao processo de fabricação e à geometria das peças.

O acabamento superficial do revestimento de zinco da chapa é constituído de cristais minimizados, com aparência fosca, não apresentando a formação de cristais na forma de flores. A camada de zinco do tubo é de cristais normais, com crescimento de cristais na forma de flores.

Os revestimentos de zinco são formados de ligas Fe-Zn e Zn puro, podendo apresentar várias fases (2). Observando a estrutura formada no revestimento de zinco da chapa não foi possível distinguir as fases presentes, em função da reduzida espessura e por confundirem-se com fases adjacentes (figura 7.3.a). Já a microestrutura do revestimento do tubo apresentou as fases gama, delta, zeta e eta (figura 7.3.b).

Os resultados dos testes de aderência da camada de zinco das chapas não apresentaram estrias ou destacamento de partículas do revestimento após o dobramento, o que significa ótima

aderência. Já o revestimento do tubo apresentou algumas estrias e, em alguns casos, houve um pequeno destacamento de partículas, o que poderá significar menor aderência ou ser somente uma decorrência da maior espessura da camada de zinco. Em vista destes resultados os tubos foram ensaiados também por "Martelo Basculante"; onde não se verificou destacamento de partículas, indicando boa aderência.

Tabela 7.3: Características das camadas de zinco

Revesti- mento (Rev)	Peso médio g/m ²	Esp. Média μm	Acab .	Ade- rência	Composição Química (% Peso)						
					Zn	Pb	Al	Si	Fe	Cl	Cr
Chapa zincada	260	21,2	C.M. *	Otima	99,30	-	0,50	0,10	0,10	-	-
Tubo zincado	1377	86,4	C.N. **	boa	88,63	traço	0,50	traço	0,38	-	-

* C.M.- cristais minimizados

**C.N.- cristais normais

7.2.2 - REVESTIMENTO DE FOSFATO

Os resultados obtidos da caracterização do revestimento de fosfato diretamente sobre os tubos de aço de seção quadrada 30x30 mm nas espessuras 1,5; 2,0 e 3,0 mm estão na tabela 7.4 e na figura 7.4.

Tabela 7.4: Caracterização do revestimento de fosfato

Revestimento	Espessura média (μ m)	Porosidade média (%)	Composição Q.Qual. fosfato de zinco
tubo fosfatizado	3,77	1,4	

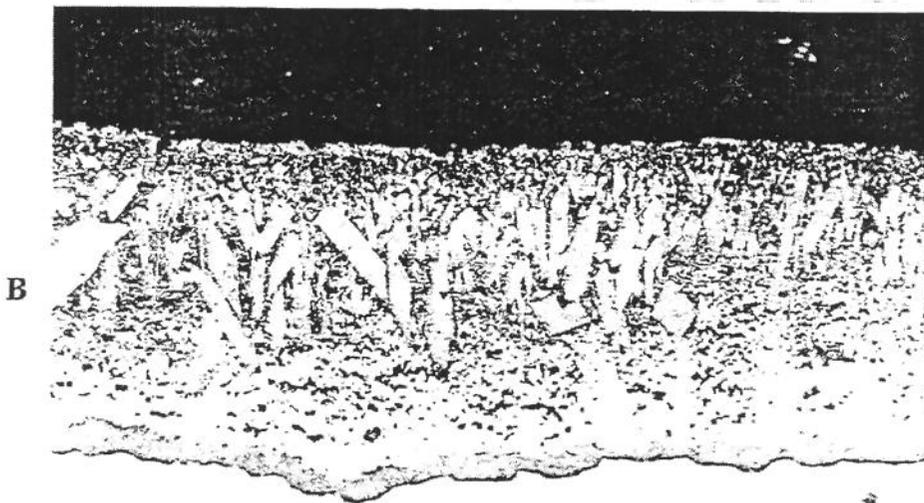
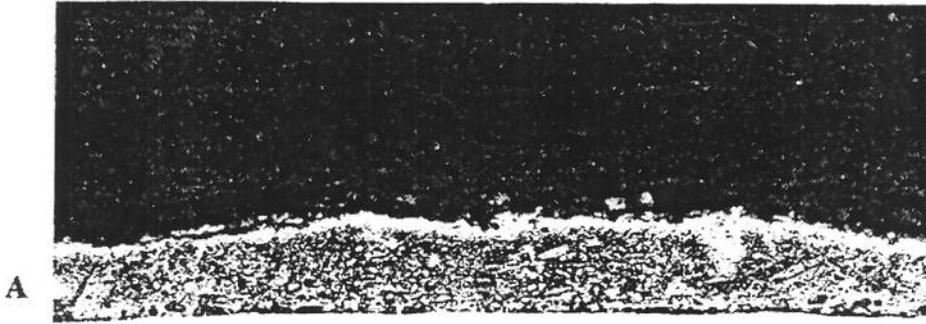


Figura 7.3: Micrografia dos revestimentos de zinco (A): Chapa de aço zincada com espessura da camada de 20 μm . (B): Tubo de aço zincado com espessura de camada de 80 μm .

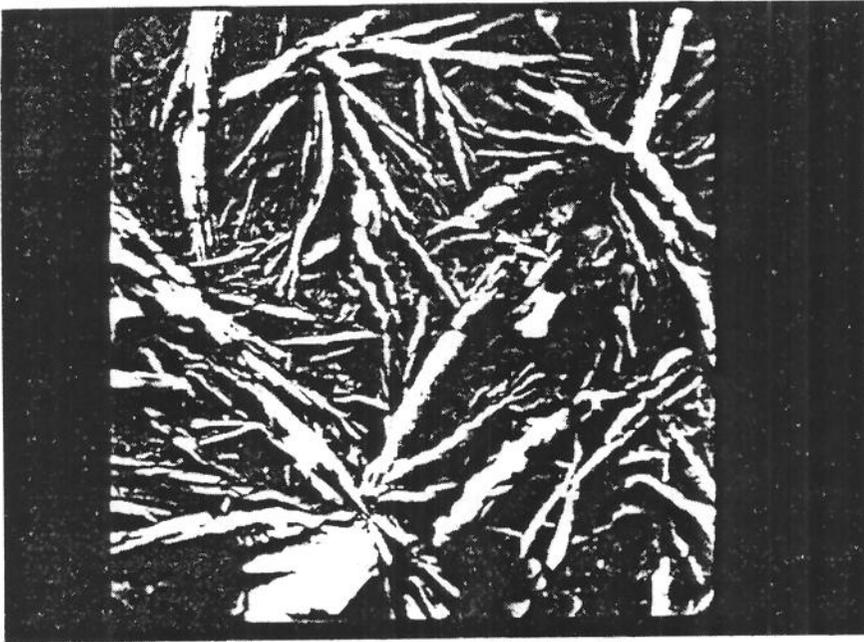


Figura 7.4: Micrografia da superfície de do revestimento de fosfato sobre tubos de aço. MEV. 500x.

Como pode ser observado na tabela 7.4, o revestimento é de fosfato de zinco, tem espessura entre 3 a 5 μm e baixa porosidade; já a micrografia da figura 7.4 revelou que este revestimento é constituído de cristais finos e compactos, conforme norma MBB-F-8400. Deste modo, este revestimento é adequado como proteção anticorrosiva e para armazenamento de peças.

7.3. - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE SOLDAGEM

Conforme já mencionado no capítulo 6, os experimentos de soldagem a ponto por resistência elétrica foram executados pelo seguinte método: definiu-se os parâmetros fixos com relação à chapa mais fina variou-se apenas a corrente de soldagem (I) de um menor valor de corrente, que resultava em um diâmetro de lente de $4\sqrt{t}$ (sendo t a espessura da chapa mais fina), até o maior valor de corrente, onde ocorresse a expulsão. O que resultava em um intervalo de corrente de soldagem para cada experimento.

Cada intervalo de soldagem obtido foi analisado quanto à indentação, diâmetro de lente, penetração, presença de trincas, macroestruturas, carga máxima na tração axial e torque máximo, tipos de fraturas. No caso das soldas em chapa/tubo, também foi analisada a deformação interna do tubo após a solda.

Inicialmente são apresentados os resultados da caracterização da soldabilidade de chapa/chapa, em seguida foi realizada uma discussão comparativa destes resultados. Após esta etapa, são apresentados os resultados de chapa/tubo e discussão comparativa dos resultados. Por fim foi feita uma discussão comparativa dos resultados de chapa/chapa e chapa/tubo.

7.3.1 - RESULTADOS DA SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA DE CHAPA/CHAPA

Utilizando o método mencionado anteriormente e fixando-se os parâmetros de força entre eletrodos (F) em 2800 N, o tempo de solda (ts) em 15 ciclos, e os tempos de pré e pós solda em 20 ciclos; foram obtidos os intervalos de soldagem para investigar os seguintes fatores:

Influência das Espessura da Chapa Inferior com Eletrodo Cone Truncado

Utilizou-se chapa superior com 0,95 mm de espessura, zincada, eletrodo superior cone truncado com $\phi = 5\text{mm}$, eletrodo inferior plano com $\phi = 16\text{ mm}$ (5/16mm). Variou-se as espessuras das chapas inferiores em 1,5; 2,0 e 3,0 mm, sendo todas elas fosfatizadas. Os resultados obtidos estão nas tabelas 7.5, 7.6 e 7.7; e figuras 7.5 e 7.6.

Tabela 7.5: Resultados da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincadas, sobre chapa de 1,5mm, fosfatizada; par de eletrodos 5/16; F = 2800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	Iden(%)	$\phi L(\text{mm})$	PeS/I(%)	TS/I(μm)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
8,3	7,6	5,2	39/88	-	B/B	23	3580
8,9	10,0	5,8	60/92	-	B/B	27	3530
10,0	14,8	6,0	78/100	41/169	B/B	31	4700

Tabela 7.6: Resultados da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapa de 0,95mm, zincada, sobre chapa de 2,0mm fosfatizada; par de eletrodos (5/16 mm); F=2800 N; ts= 15 ciclos.

I (kA)	Iden(%)	ϕ L(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
8,2	6,4	5,7	34/74	- / -	B/B	25	5380
9,5	7,7	5,4	56/79	164/ -	B/B	33	5420
10,4	10,7	6,3	67/86	26/ -	B/B	35	4290
11,4	11,2	6,4	60/84	102/ -	B/B	35	4430

Tabela 7.7: Resultados da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre chapa de 3,0mm fosfatizada; par de eletrodos 5/16; F = 2800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	Iden(%)	ϕ L(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
8,3	2,8	5,1	43/28	- / -	B/B	20	3730
8,9	3,5	5,9	49/36	- / -	B/B	25	6100
9,7	5,3	6,0	49/41	- / -	B/B	27	6200
10,5	11,1	5,6	53/68	205/ -	B/B	30	6160

Os valores iniciais das correntes de soldagem foram semelhantes para as três espessuras de juntas analisadas, em torno de 8,3 kA. Os intervalos de corrente de soldagem foram: 1,7 kA para as juntas de chapas de 0,95/1,5 mm; 3,2 kA para juntas de 0,95/2,0 mm e 2,2 kA para juntas de 0,95/3,0 mm. Como pode ser observado, as juntas com chapas de 2,0 mm apresentaram os maiores intervalos de corrente.

Analisando as soldas no aspecto externo, com relação à indentação, pode-se observar que as identações só ocorreram nas chapas superiores, cresceram com a corrente de soldagem para as três espessuras de juntas. Os valores médios de indentação foram: 10,8% para juntas de 0,95/1,5 mm; 9,0 % para juntas de 0,95/2,0 mm e 5,7% para juntas de 0,95/3,0 mm.

Comparando os valores médios das identações vemos que , as juntas com chapas de 1,5mm apresentaram 20% mais indentação do que as juntas com chapas de 2,0 mm e 89% mais do

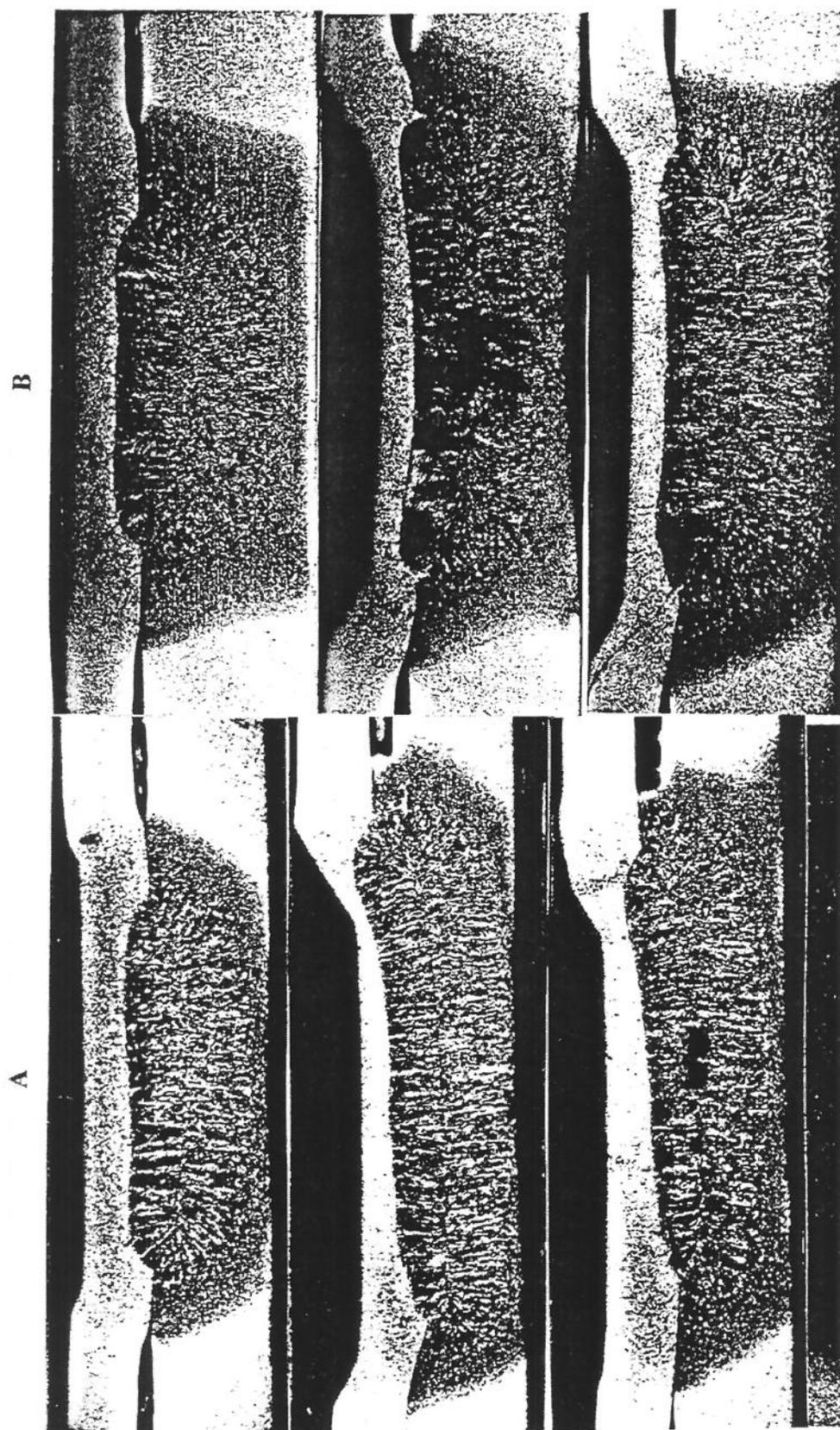


Figura 7.5: Sequencia metalográfica das soldas de chapa zincada/chapa fosfatizada obtidas com $F=2800$ N, $t_s=15$ ciclos, eletrodos 5/16, correntes de : 8,3 kA, 8,9 kA, 10 kA., para 0,95 /1,5 mm (A); e 7,9 kA, 9,5 kA, 11,4 kA para 0,95/2,0 mm (B). Nital 3%. 12,5x.

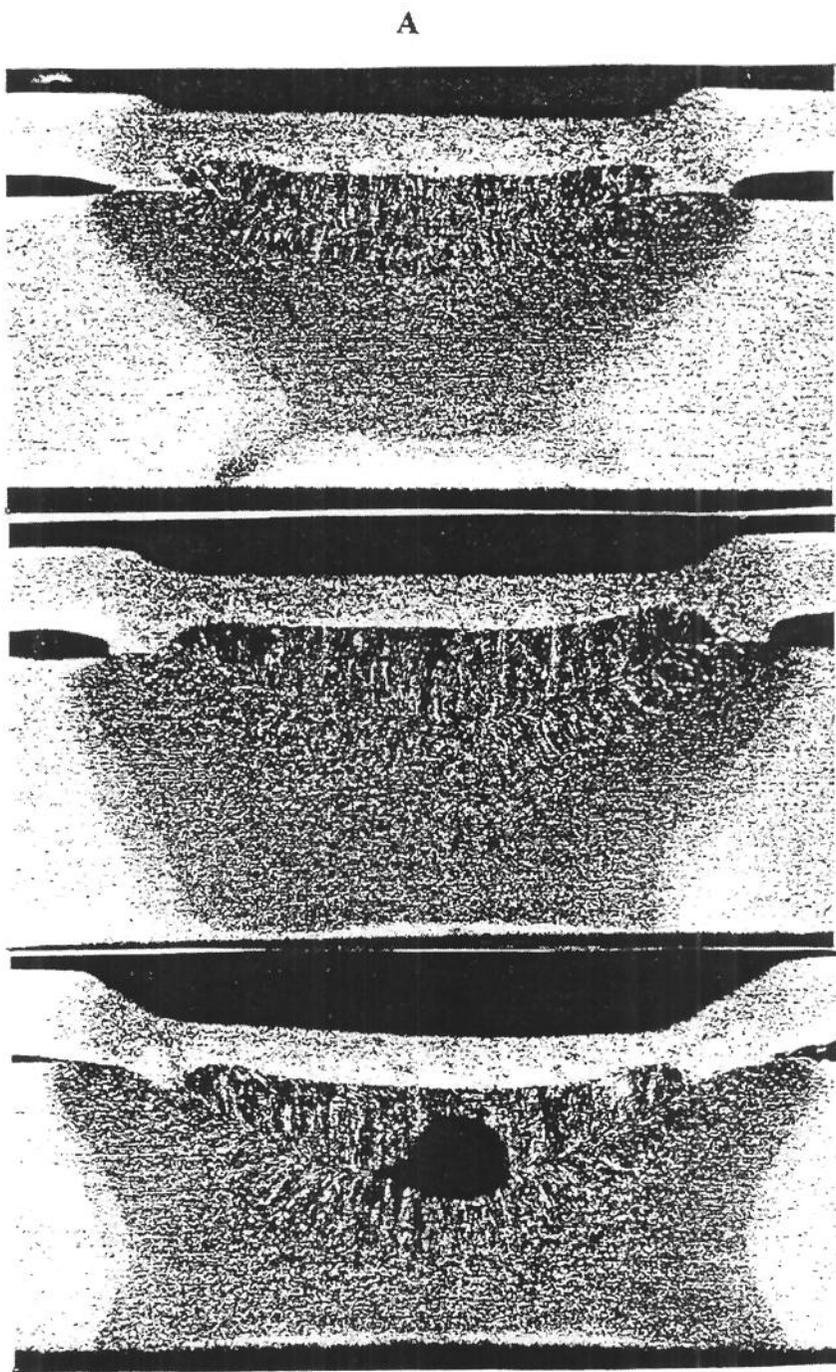


Figura 7.6: Sequencia metalográfica das soldas de chapa zincada/chapa fosfatizada obtidas com $F=2800$ N, $t_s=15$ ciclos, eletrodos 5/16, variando corrente: 8,3 kA, 9,7 kA, 10,5 kA para 0,95/3,0 mm (A). Nital 3%. 12,5x.

que as juntas com chapas de 3,0 mm. Deste modo, com maiores espessuras de chapas inferiores, os valores médios de indentação foram menores.

Analisando as soldas no aspecto interno (figuras 7.5 e 7.6) houve a fusão da lente de solda para as juntas de diferentes espessuras de chapas inferiores, o que pode ser observado pela presença de uma área fundida central (ZF), constituída de grãos colunares, circundada por uma área térmicamente afetada pelo calor (ZTA), constituída de grãos equiaxiais grosseiros, a qual, por sua vez, é circundada pelo metal de base (MB) no seu estado inicial (grãos equiaxiais pequenos).

Observando-se a área fundida dos pontos de solda, pode-se notar um aumento da área fundida com maiores correntes de soldagem para todos os pontos analisados. Estas áreas fundidas são assimétricas com relação à interface de contato chapa/chapa para as juntas com chapas de 1,5 e 2,0 mm, ou seja, é maior a área fundida nas chapas mais grossas das juntas. O mesmo não ocorreu para as juntas com chapas de 3,0 mm. Estas assimetrias foram quantificadas pelas medidas de penetrações nas chapas superiores e inferiores para as três espessuras de juntas.

Observando os valores das penetrações superiores e inferiores nas tabelas 7.5, 7.6 e 7.7, nota-se que nenhum ponto de solda apresentou penetração superior menor do que 20% e maior do que 80%. Contudo, as penetrações inferiores nas juntas com chapas de 1,5 e 2,0 mm ultrapassaram o limite máximo de 80% , mesmo para correntes de soldagem menor do que a expulsão. O mesmo não ocorreu para as juntas com chapas de 3,0 mm. O limite mínimo de 20% e máximo de 80% foram baseados nas normas AWS (3,4) e RWMA (5).

Calculando a razão entre as penetrações superiores e inferiores nota-se claramente a evolução das penetrações nas três espessuras de juntas; os valores foram : 0,4 a 0,8 para as juntas com chapas de 0,95/1,5mm; 0,5 a 0,8 para as juntas com chapas de 0,95/2,0 mm, e 0,8 a 1,5 para as juntas com chapas de 0,95/3,0 mm. Estes resultados mostram um comportamento semelhante para as juntas com chapas de 1,5 e 2,0 mm, com maior área fundida nas chapas mais grossas e diferente para juntas com 3,0 mm, área fundida superior e inferior mais próximas, menor assimetria das lentes de solda.

Pode-se observar ainda nas figuras 7.5 e 7.6 que a linha final de solidificação das lentes de solda se encontram abaixo da interface chapa/chapa para todos pontos de solda, com ou sem assimetria. Mostrando assim a eficiência de extração de calor da junta, pelo eletrodo superior.

Há presença de vazios nas juntas com chapas de 1,5 mm somente com a corrente de expulsão. O mesmo ocorre para a junta com chapas de 3,0 mm. Para as juntas com chapas de 2,0 mm, os vazios aparecem com correntes menores do que a de expulsão. Em todos os casos, os vazios são localizados na linha final de solidificação e são característicos de vazios de contração.

Observações das lentes de solda, com relação à presença de trincas, revelaram que elas só foram encontradas nas chapas superiores. Estas trincas se originaram na superfície da chapa superior em contato com o eletrodo e cresceram para o interior da chapa, paralela ao fluxo da corrente. Elas crescem com o maior aporte de calor, e são freqüentes nos pontos de solda com expulsão. A maior incidência de trincas foi observada para as juntas de chapas de 2,0 mm de espessura.

Os diâmetros de lente aumentaram com o aumento da corrente de soldagem, para as três espessuras de juntas. Os valores médios dos diâmetros de lente para as juntas com chapas de 1,5 e 3,0 mm foram semelhantes, em torno de 5,7 mm; já as juntas com chapas de 2,0 mm apresentaram os maiores valores: 6,0 mm, com diferença percentual de 5,3%. Estes valores são 50% maiores do que o mínimo recomendado pelas normas AWS e RWMA. (4,5), tomando como base a espessura da chapa superior (0,95 mm).

A resistência mecânica das juntas, caracterizada pelo ensaio de tração axial máxima, mostrou que, quando aumentou-se a corrente de soldagem, houve tendência de aumentar as cargas de tração dos pontos de solda, exceto para as juntas com chapas de 2,0 mm, cujos valores reduziram um pouco com a corrente de expulsão, comportamento já esperado segundo a literatura (6). Os resultados de tração axial máxima podem ser observados na figura 7.7.

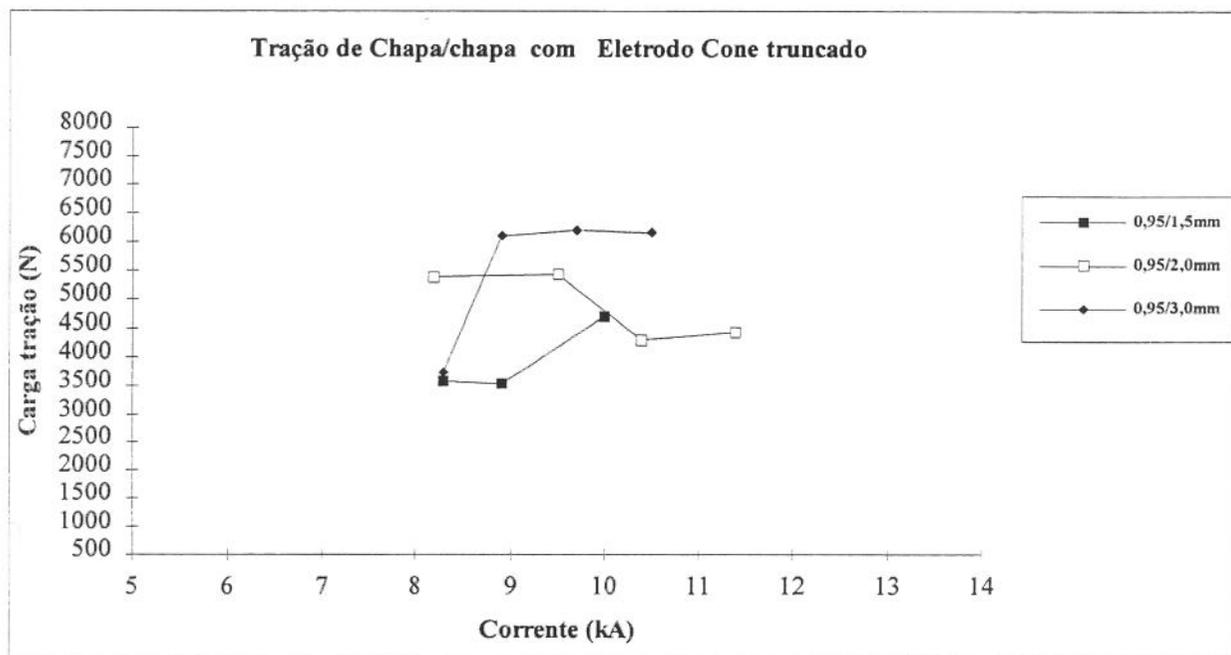


Figura 7.7: Carga de tração axial máxima versus corrente de soldagem de juntas de chapa/chapa obtidas com o par de eletrodo 5/16 mm.

Os valores médios das cargas máximas de tração foram de 3940 N para as juntas de 0,95/1,5 mm; 4880 N para as juntas de 0,95/2,0 mm e de 5550 N para as juntas de 0,95/3,0 mm. Quando aumentou-se a espessura das chapas inferiores, aumentaram os valores médios de carga de tração axial máxima, sendo que o aumento percentual médio da carga com relação às juntas com chapas de 1,5 mm, foi de: 24% maior para as juntas com chapas de 2,0 mm e de 41% maior para as juntas com chapas de 3,0 mm.

O torque máximo dos pontos de solda estão apresentados na figura 7.8. Observando os resultados, nota-se que aumentando a corrente de soldagem, aumentaram os torques máximos dos pontos de solda, para as três espessuras de juntas.

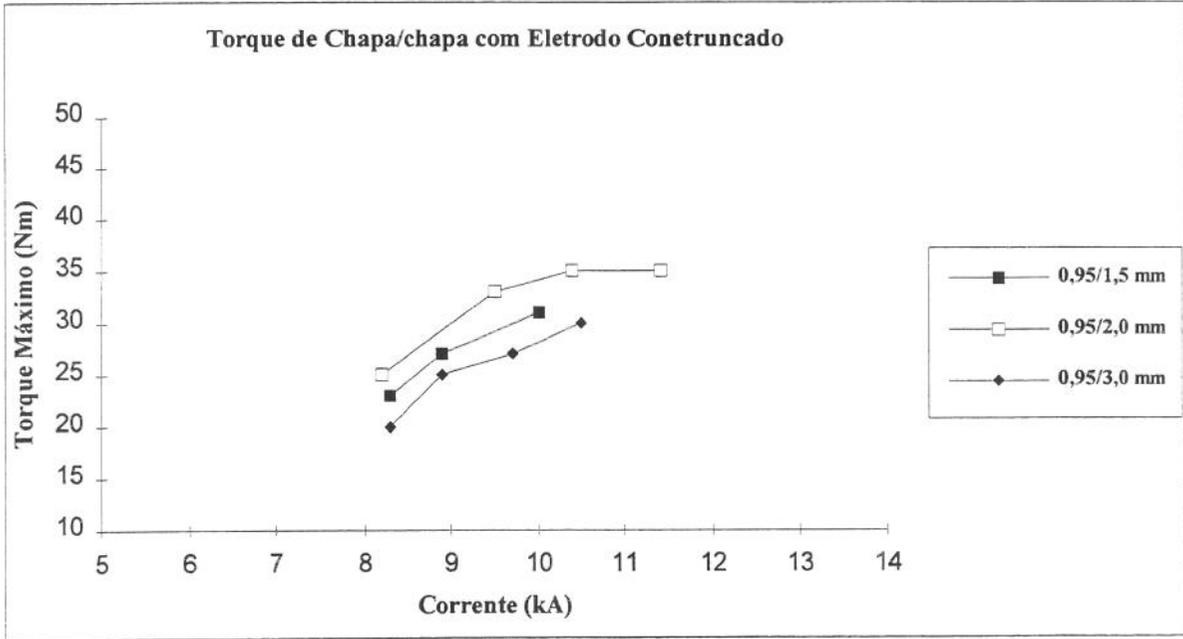


Figura 7.8: Torque máximo versus corrente de soldagem das juntas de chapa/chapa obtidas com o par de eletrodo 5/16 mm.

Os valores médios encontrados foram da ordem de 27 Nm para juntas de 0,95/1,5 mm; 32 Nm para as juntas de 0,95/2,0 mm e de 26 Nm para as juntas de 0,95/3,0 mm. Os valores médios de torque não aumentaram com as maiores espessuras das juntas, como ocorreu nos ensaios de tração axial. As variações percentuais dos valores médios de torque dos pontos de solda, com relação às juntas com chapas de 1,5 mm de espessura foram semelhantes para juntas com chapas de 3,0 mm e estes resultados foram 19% menores do que para juntas com chapas de 2,0 mm de espessura.

A fratura dos corpos de prova nos ensaios de tração e torção, foi 100% na forma de botão para as três espessuras de juntas; ou seja, com destacamento da chapa superior, restando a lente de solda na chapa inferior, conforme esquema apresentado na figura 5.7 do capítulo 5. Este tipo de fratura indica boa resistência mecânica dos pontos de solda (3-5,7-9).

Com estes resultados ficou claro que foi possível soldar as três espessuras de junta com um amplo intervalo de soldagem (maior do que 1,7 kA), sendo que a corrente inicial de soldagem não variou com as espessuras inferiores. A fusão foi maior nas chapas de 1,5 e 2,0 mm, na de 3,0

mm houve maior extração de calor. Nestas soldas, com altas correntes de soldagem, há presença de vazio e trinca, o que indica que o excesso de calor contribui para o seu aparecimento. Contudo, as cargas de tração axial máxima e torque máximo foram altas e, assim como o modo de fratura, parecem não ter sido influenciadas pela presença de vazios e trincas na lente de solda, uma vez que houve 100 % de fratura em botão.

Influência da Espessura da Chapa Inferior com Eletrodo Esférico

Utilizou-se chapa superior de 0,95mm de espessura, zincada, eletrodo superior esférico de raio 12mm, e eletrodo inferior plano de $\phi = 16\text{mm}$ (12/16 mm). Variou-se as espessuras das chapas inferiores em 1,5; 2,0 e 3,0 mm, todas fosfatizadas. Os resultados obtidos estão nas tabelas 7.8, 7.9, 7.10; e figuras 7.9 e 7.10.

Tabela 7.8: Resultados da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre chapa de 1,5 mm fosfatizada; par de eletrodos 12/16mm; F=2800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	Iden(%)	$\phi L(\text{mm})$	PeS/I(%)	TS/I(μm)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
6,5	7,6	4,5	50/72	- / -	I/B	18	2430
7,1	7,6	4,9	58/88	- / -	B/B	21	4540
8,3	10,0	6,1	85/88	- / -	B/B	30	3970
9,3	13,0	6,2	76/92	154/ -	B/B	35	5250

Tabela 7.9: Resultados da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre chapa de 2,0 mm fosfatizada; par de eletrodos 12/16mm; F=2800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	Iden(%)	$\phi L(\text{mm})$	PeS/I(%)	TS/I(μm)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
6,5	4,5	4,0	45/54	- / -	B/B	15	3820
7,0	7,1	4,5	52/67	- / -	B/B	20	4090
8,1	9,0	5,7	63/79	- / -	B/B	31	6220
9,1	11,3	6,1	67/84	148/ -	B/B	33	5040

Tabela 7.10: Resultados da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre chapa de 3,0 mm fosfatizada; par de eletrodos 12/16 mm; F = 2800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	Iden(%)	ϕ L(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
7,5	3,8	3,3	34/21	- / -	B/B	25	4040
8,0	4,3	5,1	56/38	- / -	B/B	31	5390
9,3	7,1	5,3	69/44	36/ -	B/B	30	6720

As correntes iniciais de soldagem para as juntas com chapas de 1,5 mm e 2,0 mm, foram iguais a 6,5 kA, enquanto que para juntas com chapas de 3,0 mm foram iguais a 7,5 kA, ou seja, 15% maiores. O intervalo de corrente de soldagem decresceu com aumento da espessura da chapa inferior, apresentando 2,8, 2,6 e 1,8 kA, respectivamente para as juntas 0,95/1,5, 0,95/2,0 e 0,95/3,0 mm.

As identações ocorreram nas chapas superiores e os valores aumentaram com o aumento da corrente de soldagem para as três espessuras de juntas. Os valores médios obtidos foram de: 9,6 % para as juntas de 0,95/1,5 mm, 8,0 % para as juntas de 0,95/2,0 mm, e 5,1 % para juntas de 0,95/3,0 mm. Comparando os valores médios de identações, as juntas com chapas de 1,5 mm apresentaram valores 20% maiores do que as juntas com chapas de 2,0 mm e 88% maiores do que as juntas com chapas de 3,0 mm; logo, com aumento da espessura das chapas inferiores, houve uma redução nos valores médios de identações.

Observando-se a macroestrutura das lentes de solda das três espessuras de juntas nas figuras 7.9 e 7.10, nota-se que ocorreu fusão na interface de contato chapa/chapa, assim como nos pontos de solda obtidos com eletrodos 5/16 mm. Há presença de grãos colunares na ZF, os quais cresceram no sentido oposto à extração de calor e estão circundados por grãos equiaxiais grosseiros na ZTA. Após a ZTA se encontra o metal de base em seu estado inicial com grãos equiaxiais pequenos.

As penetrações da lente de solda aumentaram com o aumento da corrente tanto nas chapas superiores como inferiores, em todos os testes. As juntas de chapas de 1,5 e 2,0 mm apresentaram um comportamento semelhante, ou seja, as penetrações são maiores nas chapas inferiores do que

superiores. Já nas juntas de chapas com 3,0 mm de espessura, ocorre o inverso, as penetrações são maiores na chapa superior.

Em todos os casos as penetrações superiores são sempre maiores do que o limite mínimo e menores do que o limite máximo. Já as penetrações inferiores tiveram um comportamento distinto para cada espessura de junta, ou seja, as juntas com chapas de 1,5 mm apresentaram valores maiores do que 80% mesmo para corrente de soldagem anterior a expulsão. As juntas com chapas de 2,0 mm só ultrapassaram o limite máximo com a corrente de expulsão, sendo que as juntas com chapas de 3,0 mm não ultrapassaram o limite máximo em nenhuma corrente de soldagem.

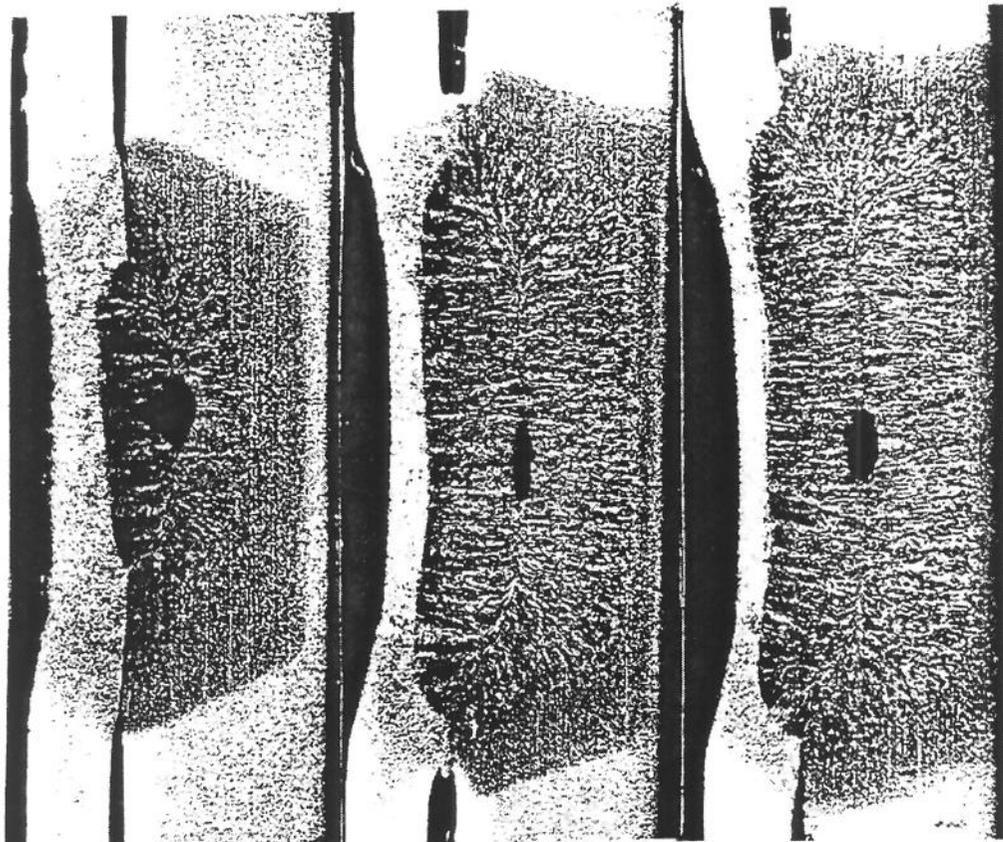
A razão entre penetrações superiores e inferiores para estas soldas foi semelhante para as juntas com chapas de 1,5 e 2,0 mm, variando de 0,7 a 0,9, enquanto que as juntas com chapas de 3,0 mm apresentaram o valor de 1,5.

Observando as linhas finais de solidificação das lentes veremos que, em todos os casos, elas estão abaixo da interface chapa/chapa, o que indica eficiência de extração de calor das juntas pelo eletrodo superior.

Os vazios não estão presentes nas juntas com chapas de 1,5 e 3,0 mm, enquanto que nas chapas de 2,0 mm estão presentes em quase todas as correntes de soldagem. Os vazios estão localizados na linha final de solidificação.

A presença de trincas nos pontos de solda ocorreu de um modo semelhante para as três espessuras de chapas, tendo surgido somente nas chapas superiores com a corrente de expulsão. Estas trincas surgiram na superfície de contato chapa/eletrodo e cresceram para o interior das chapas, paralelas ao fluxo de corrente.

B



A

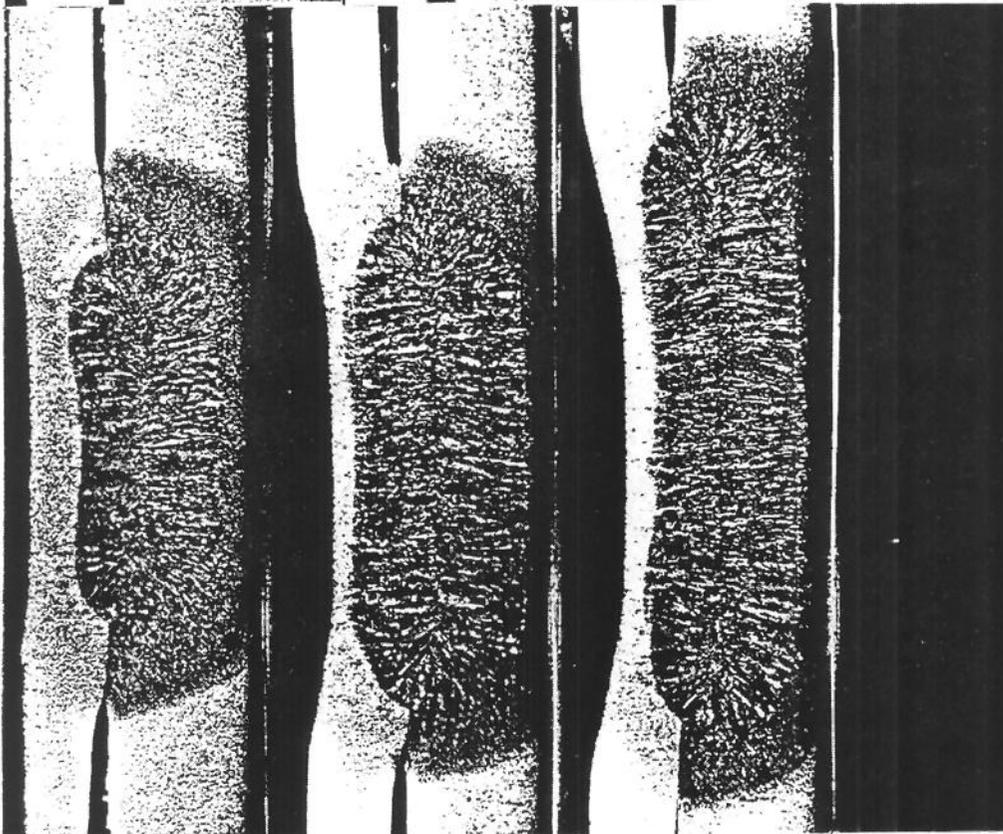


Figura 7.9: Sequencia metalográfica das soldas de chapa zincada/chapa fosfatizada, $F=2800\text{ N}$, $t_s=15$ ciclos, eletrodos 12/16, variando corrente: 6,5 kA, 8,3 kA, 9,3 kA para 0,95/1,5 mm (A); e 6,5 kA, 8,1 kA, 9,1 kA para 0,95/2,0 mm (B). Nital 3%. 12,5

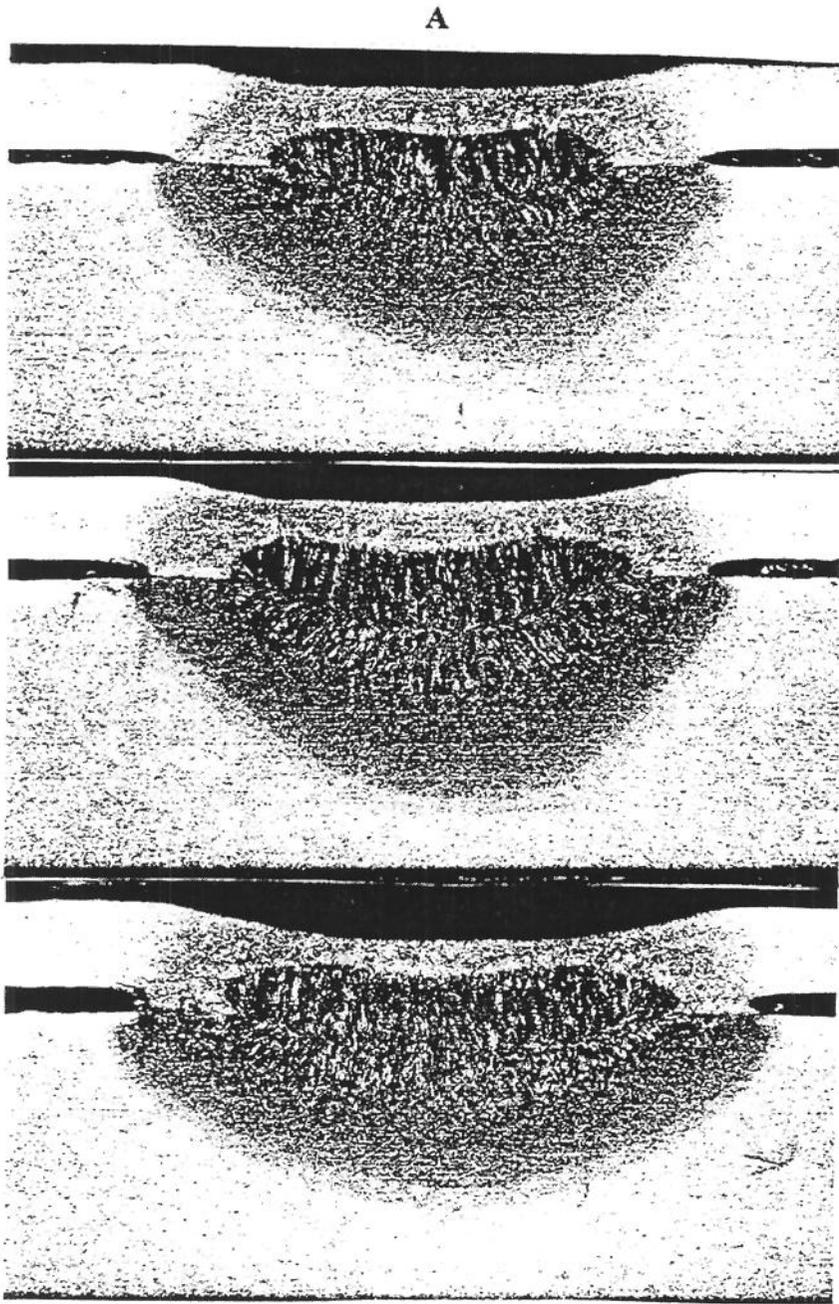


Figura 7.10: Sequencia metalográfica das soldas de chapa zincada/chapa fosfatizada, $F=2800\text{ N}$, $t_s=15$ ciclos, eletrodos 12/16, variando corrente: 6,5 kA, 8,1 kA, 9,1 kA para 0,95/3,0 mm (A). Nital 3%. 12,5x.

Os diâmetros de lente aumentaram com o aumento da corrente de soldagem, apresentando valores médios menores com o aumento da espessura da chapa inferior da junta, a saber: 5,4 mm para 0,95/1,5 mm; 5,1 mm para 0,95/2,0 mm e 4,6 mm para 0,95/3,0 mm. Comparando-se os valores médios de diâmetro de lente, as juntas com chapas de 1,5 mm possuem valor médio 6% maior do que as juntas com chapas de 2,0 mm e 17% maior do que as juntas com chapas de 3,0mm. Contudo, os menores valores médios foram 19% maiores do que o mínimo recomendado pelas normas AWS e RWMA.

As cargas de ruptura de tração axial máxima dos pontos de solda, tendem a aumentar com maiores corrente de soldagem para as três espessuras de juntas, sendo que somente a junta com chapa de 2,0 mm apresenta uma queda de carga com a corrente de expulsão, comportamento previsto na literatura (6). A figura 7.11 mostra os dados obtidos.

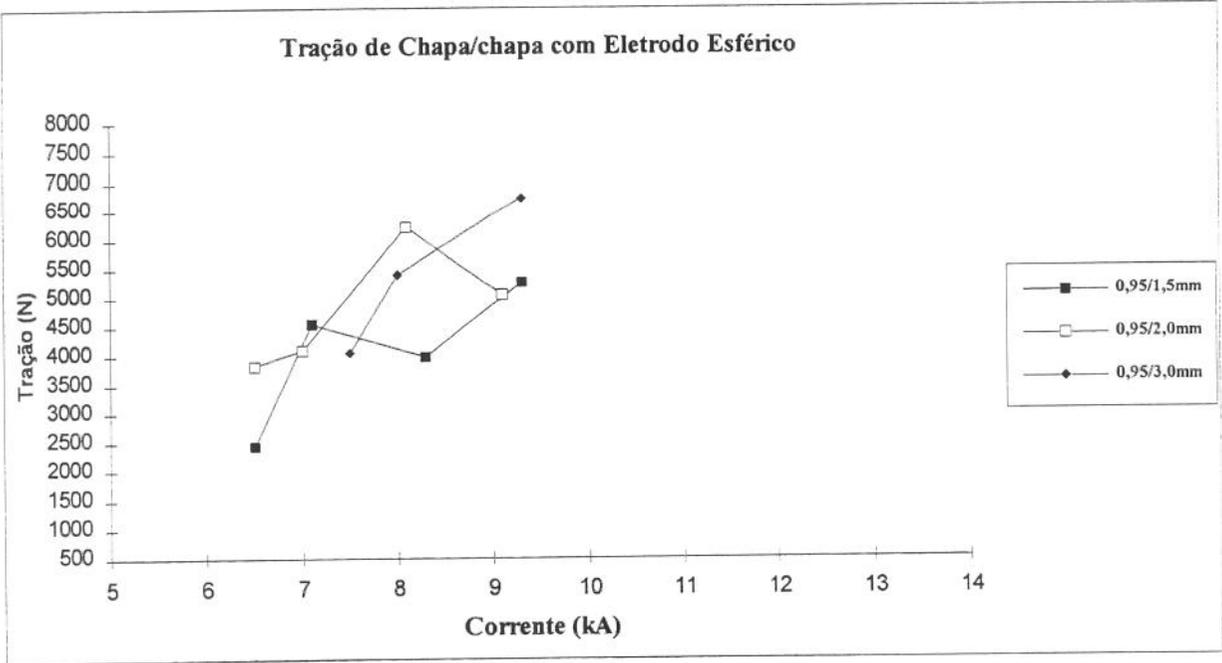


Figura 7.11 Cargas de tração axial máxima versus corrente de soldagem para juntas de chapa/chapa obtidas com o par de eletrodos 12/16 mm.

Os valores médios de cargas de tração indicam que juntas de espessuras maiores apresentam maiores cargas de tração, cujo valores médios obtidos foram: 4050 N para 0,95/1,5 mm; 4790 N para 0,95/2,0 mm e 5380 N para 0,95/3,0 mm. A variação percentual dos valores médios de carga de tração, com relação às juntas de 0,95/1,5 mm foi de 18% maiores para as juntas com chapas de 2,0 mm e 33% maior para as juntas com chapas de 3,0 mm.

O torque máximo dos pontos de solda aumentou com maiores valores da corrente de soldagem para as três espessuras de juntas, sendo que somente a junta com chapa de 3,0 mm apresentou menor torque com a corrente de expulsão. Os resultados podem ser observados na figura 7.12.

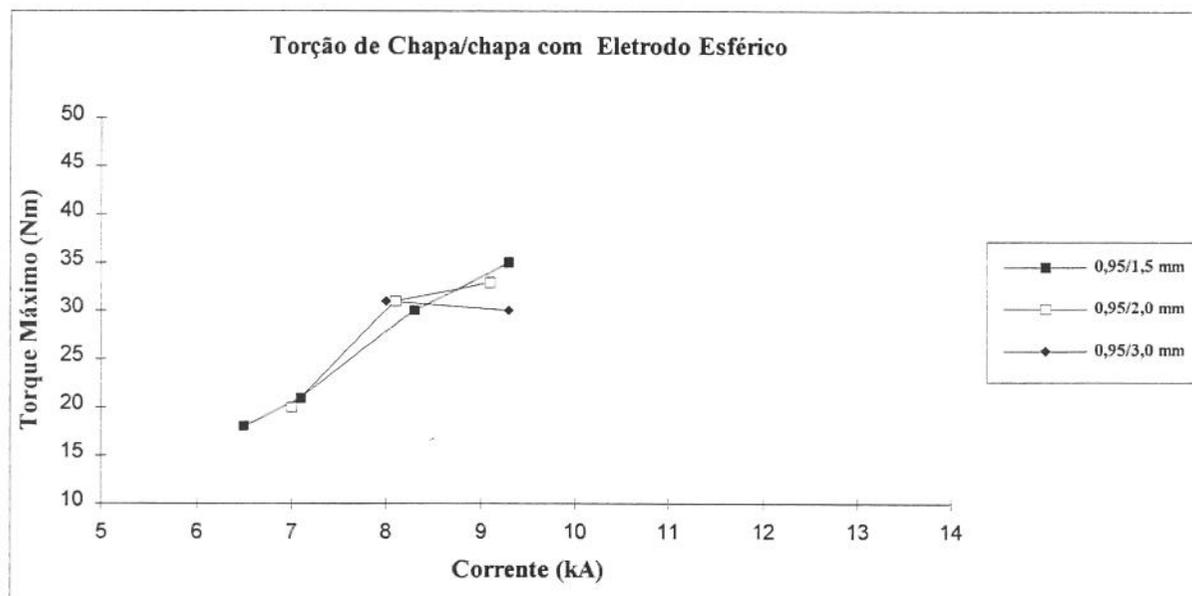


Figura 7.12: Torque máximo versus corrente de soldagem para as juntas de chapa/chapa obtidas com o par de eletrodos 12/16mm.

Os valores médios dos torques foram semelhantes para as juntas com chapas de 1,5 e 2,0 mm, em torno de 25 Nm; já as juntas com chapas de 3,0 mm de espessuras, apresentaram valor médio maior, 29 Nm. O aumento percentual do torque máximo para as juntas com chapas de 3,0 mm foi de 12%.

A fratura dos pontos de solda após ensaio de torção foi 100% na forma de botão, com destacamento da chapa superior. A fratura interfacial ocorreu apenas para uma condição inicial de soldagem para a junta de 0,95/1,5 mm, submetida ao ensaio de tração, representando 13% do total.

Os resultados destes testes de soldagem, cujos pontos de solda foram obtidos apenas com mudança do eletrodo superior para esférico de raio 12 mm, foram muito similares aos resultados obtidos dos pontos de solda realizados com eletrodo superior cone truncado com face de contato de 5,0 mm, de modo que foi possível soldar as três espessuras de junta com um amplo intervalo de soldagem (maior do que 1,8 kA). A corrente inicial de soldagem foi maior para a maior espessura de chapa inferior (3,0 mm), sendo que as correntes foram no mínimo 11% menores do que quando se utilizou eletrodo superior cone truncado. Tal como nos testes com eletrodo cone truncado, a fusão foi maior nas chapas de 1,5 e 2,0 mm, sendo que a menor fusão na chapa de 3,0 mm foi devida à maior extração de calor. Nestas soldas, com altas correntes de soldagem existem vazios e trincas, os quais são decorrentes do excesso de calor. Contudo, as cargas de tração e torque foram altas, e o modo de fratura parece não ter sido influenciado pela presença de vazios e trincas na lente de solda, uma vez que houve no mínimo 87% de fratura em botão.

7.3.2 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE SOLDAGEM DE CHAPA/CHAPA OBTIDAS COM ELETRODO CONE TRUNCADO E ESFÉRICO

Para estas análises foi confeccionada uma nova tabela, tabela 7.11, na qual estão agrupados os valores médios e o resumo dos resultados obtidos dos parâmetros medidos anteriormente.

As correntes necessárias para executar os pontos de solda para as três espessuras de juntas, foram menores quando se utilizou o par de eletrodos 12/16 mm do que quando se utilizou o par 5/16 mm. Esta redução de corrente, com a conseqüente redução de energia gasta, foi em torno de 28% para as juntas de 0,95/1,5 mm, 26% para as juntas de 0,95/2,0 mm e 11% para as juntas de 0,95/3,0 mm. Pode-se notar ainda que para maiores espessuras de juntas a redução de corrente foi menor.

Tabela 7.11: Comparação dos valores médios e resumo dos resultados obtidos para chapa/chapa, considerando dois tipos de eletrodos e três espessuras das chapas inferiores, sendo σ a tensão na tração e τ a tensão de cisalhamento.

Junta	I _{in} (kA)	ϕ L (mm) média	I _{den} (%) média	PeS/I (%) média	TS/I (μ m)	F _{tra} /tor %B	Tor (Nm) média	Tra (N) média	σ N/mm ² média	τ N/mm ² média
0,95/1,5 *	8,3	5,6	11,0	0,4-0,8	14/56	100	27	3940	156	233
0,95/2,0 *	8,2	6,0	9,0	0,5-0,8	73/0	100	32	4880	181	279
0,95/3,0 *	8,3	5,7	5,7	0,8-1,5	5/0	100	26	5550	219	327
0,95/1,5 **	6,5	5,4	9,6	0,7-0,9	39/0	87	26	4050	176	241
0,95/2,0 **	6,5	5,1	7,8	0,7-0,9	37/0	100	24	4790	244	317
0,95/3,0 **	7,5	4,6	5,1	1,5	12/0	100	29	5380	347	397

* soldas em chapa/chapa com eletrodos 5/16 mm;

** soldas em chapa/chapa com eletrodos 12/16 mm.

A menor energia gasta quando se utilizou eletrodo esférico ocorreu devido à redução de área de contato do eletrodo superior com as chapas, de modo que houve maior concentração do fluxo de corrente, requerendo menor intensidade corrente para se obter os pontos de solda.

As correntes iniciais de soldagem foram iguais para as três espessuras de juntas quando se utilizou o par de eletrodos 5/16 mm; já para o par de eletrodos 12/16 mm as correntes aumentaram para as maiores espessuras. Contudo, chapas de maior espessura possuem maior resistência elétrica interna, como previsto pela equação 2.6 apresentada no capítulo 2 deste trabalho. Portanto, era de se esperar um comportamento inverso, ou seja, para maiores espessuras, menores as correntes necessárias. Todavia, parece que o efeito da resistência interna foi compensado pelo efeito da extração de calor pela massa metálica da própria chapa.

Os intervalos de soldagem tiveram um comportamento singular para cada espessura de junta e geometria de eletrodo. As juntas de 0,95/1,5 mm apresentaram maior intervalo de soldagem quando se utilizou o par de eletrodos 12/16 mm; as demais juntas 0,95/2,0 mm e 0,95/3,0 mm apresentaram maior intervalo de soldagem com a utilização do par de eletrodos 5/16

mm. Pode-se notar que todos os intervalos de soldagem foram maiores do que o valor mínimo de 1000 A, o que indica boas condições de soldagem.

As identações aumentaram com maiores correntes de soldagem para todas as espessuras de juntas, assim como para as duas geometrias de eletrodos. Sendo que os valores de identificação máxima e a média das identações reduziram com o aumento da espessura das chapas, tanto para eletrodos 5/16 mm como para 12/16 mm. Contudo, mesmo com a corrente de expulsão, nenhum ponto de solda ultrapassou o limite máximo de 20 %.

Pode-se considerar a identificação como um fator dependente da área fundida da lente de solda, ou seja, para maior área fundida menor é a quantidade de metal sólido resistente à pressão dos eletrodos. Assim, as juntas com diâmetros de lente próximos apresentaram, para chapas de maior espessura, proporcionalmente maior área resistente à pressão dos eletrodos e logo resultaram em menor identificação. A figura 2.10 do capítulo 2 mostra claramente a formação de identificação de um ponto de solda, através da força dos eletrodos (10).

O par de eletrodos 5/16 mm apresentou em média 12 % a mais de identificação do que o par 12/16 mm, para as três espessuras de chapas, o que pode ser atribuído aos maiores diâmetros de lente das juntas obtidas com o par de eletrodo 5/16, pois menor era a área resistente à força dos eletrodos. A identificação é um parâmetro particularmente importante nas soldas de peças zincadas, uma vez que o aumento da identificação diminui a proteção anticorrosiva da camada de zinco (8,9).

Observando a macro estrutura dos pontos de solda nas figuras 7.5, 7.6, 7.9 e 7.10, as três espessuras de juntas obtidas com as duas geometrias de eletrodo apresentaram as mesmas estruturas de formação das lentes de solda, ou seja, ZF central, constituída de grãos colunares que cresceram principalmente no sentido oposto à extração de calor pelos eletrodos, ZTA, circundando a ZF, constituída de grãos equiaxiais grosseiros resultantes do calor recebido da ZF e MB circundando a ZTA, na sua forma inicial, constituída de grãos equiaxiais pequenos.

Em uma rápida observação da microestrutura das lentes de solda constatou-se que estas são constituídas de estruturas aciculares, com presença de martensita, o que garante grande resistência mecânica a estas áreas.

Segundo Willians (11), a formação de martensita em aços doce é possível pelo rápido resfriamento da lente (efeito têmpera) em conjunto com a deformação plástica a qual fornece energia elástica necessária para a transformação da austenita em martensita. Como os pontos de solda foram resfriados muito rapidamente e estavam sob ação da força dos eletrodos, existiram condições para a formação da martensita.

Os pontos de solda obtidos com as duas geometrias de eletrodo apresentaram o mesmo comportamento com relação a simetria das lentes, isto é, as áreas fundidas das juntas com chapas de 1,5 e 2,0 mm são assimétricas com relação à interface de contato chapa/chapa, com maior penetração inferior. Nas juntas com chapas de 3,0 mm as lentes de solda são mais simétricas, tendo as penetrações superior e inferior próximas.

Pode-se notar ainda que as juntas de 0,95/1,5 e 0,95/2,0 mm apresentaram valores de penetração inferior maiores que o limite máximo recomendado de 80 % (3,4). Já as juntas de 0,95/3,0 mm não ultrapassaram os limites máximos definidos mesmo com a corrente de expulsão. As penetrações superiores não ultrapassaram o limite máximo em nenhuma condição de soldagem, para nenhuma espessura de junta. Estas diferenças de penetração podem ser entendidas pela interação de dois fatores mencionados a seguir.

O primeiro fator a ser considerado é a resistência elétrica interna das chapas, a qual varia com a composição química, segundo as equações 2.8 ou 2.9, e com a espessura das chapas, conforme previsto pela equação 2.6, apresentadas no capítulo 2 deste trabalho. Assim, as chapas inferiores das juntas têm maior resistência elétrica porque são equivalentes ao 1023 da ASTM e por terem maiores espessuras. O segundo fator está associado à extração de calor da junta, a qual ocorre principalmente pela condução dos eletrodos e pela própria peça (12,13).

Deste modo, durante a passagem de corrente em juntas com chapas de 1,5 e 2,0 mm de espessuras, o calor gerado na interface chapa/chapa ficou mais concentrado nas chapas inferiores

por apresentarem maior resistência elétrica interna, fundindo uma área maior. Simultaneamente, a atuação dos eletrodos superiores foi mais acentuada na extração de calor das chapas de menores espessuras o que reduziu a área fundida destas chapas, enquanto que a atuação dos eletrodos inferiores nas chapas de maior espessuras foi pouco eficiente na extração de calor em decorrência da maior distância do eletrodo até a interface chapa/chapa. Para estas espessuras de junta a extração de calor pela massa metálica das próprias chapas mais grossas não foi significativa.

Em juntas com chapas de 3,0 mm de espessura verificou-se menor penetração nas chapas inferiores, apesar destas possuírem maior resistência elétrica interna e ser menor a eficiência na extração de calor por parte dos eletrodos inferiores nestas chapas. Provavelmente, o efeito de extração de calor pela própria massa metálica das chapas inferiores sobrepõe os dois fatores mencionados anteriormente, resultando em menores assimetrias das lentes de solda.

Em soldas de chapas de espessuras diferentes, parece existir um limite de espessura para o qual predomina a atuação de altas resistências elétricas internas das chapas em conjunto com menor eficiência de extração de calor pelos eletrodos inferiores (lentes assimétricas) ou predomina uma eficiente extração de calor pela massa da chapa de maior espessura (lentes simétricas).

A eficiência da extração de calor das lentes de solda pelos eletrodos superiores é comprovada quando se observa a linha final de solidificação. Ela está sempre abaixo da interface de contato chapa/chapa para todas as juntas acima analisadas. Esta característica é muito interessante, pois a linha final de solidificação é uma região de concentração de defeitos e não está alinhada com a interface de contato chapa/chapa. O que deve ter contribuído para que os pontos de solda solicitados mecanicamente fraturassem na forma de botão.

As lentes de solda apresentaram vazios na linha final de solidificação. Comparando o tamanho e frequência dos vazios nas juntas soldadas, pode-se observar que para juntas com chapas de 1,5 mm os vazios são pequenos e em pouca quantidade, para as juntas com chapas de 2,0 mm eles são maiores e mais frequentes, e para as juntas com chapas de 3,0 mm foram grandes e raros.

Segundo a literatura, os vazios ocorrem devido a insuficiência de força entre os eletrodos (15), combinado com os seguintes fatores, a saber:

- excesso de calor devido a altas correntes ou tempo de solda (14), e/ou
- contração de metal líquido na solidificação da lente de solda (15).

Nestes resultados, os vazios presentes nos pontos de solda parecem ser decorrentes da combinação dos fatores anteriormente mencionados. O excesso de calor pode ser atribuído aos valores de tempo, à corrente de soldagem e à maior resistência elétrica interna das chapas. Contudo, cada espessura de junta apresentou peculiaridades na formação dos vazios.

Nas juntas com chapas de 1,5 e 2,0 mm, durante a passagem de corrente parece ter ocorrido excesso de calor na formação dos pontos de solda, de modo que houve ejeção de metal fundido da lente. Após esta etapa houve o resfriamento da lente, com contração térmica do metal líquido resultando no aparecimento de vazios os quais foram eliminados pela ação dos eletrodos somente para as juntas com chapas de 1,5 mm por apresentarem menor resistência mecânica à força de 2800 N; já as juntas com chapas de 2,0 mm, por possuírem maior resistência mecânica à ação dos eletrodos, não foram tão eficientes para eliminar os vazios decorrente da ejeção de metal e contração térmica, apresentando pontos de solda com vazios mesmo com corrente anterior à corrente de expulsão.

Nas juntas com chapas de 3,0 mm parece não ter ocorrido excesso de calor na formação dos pontos de solda, pois apesar destes pontos terem sido obtidos com maiores correntes, a massa metálica não fundida destas juntas extraiu o calor gerado na interface chapa/chapa, de modo que não houve ejeção de metal líquido da lente de solda para a maioria dos pontos de solda. Apenas para a corrente de expulsão houve a ejeção de metal líquido e formação de vazios pela contração térmica e ineficiência da força dos eletrodos em decorrência da maior espessura das juntas.

Como apresentado anteriormente, as trincas dos pontos de solda foram observadas somente nas chapas de aço zincadas na região de contato com os eletrodos superiores, ocorrendo predominantemente com a corrente de expulsão. A espessura das juntas não apresentou clara interferência na formação de trincas.

A presença de trincas em chapas de aço zincadas soldada a ponto é um problema bastante antigo, sendo de origem intergranular e, normalmente, causada pela penetração de cobre (dos eletrodos) ou latão (combinação de cobre dos eletrodos com zinco das chapas) nos contornos de grão do aço (16). O mecanismo da formação das trincas está descrito no capítulo 5 deste trabalho.

Estes resultados mostram que as altas correntes de soldagem de chapas zincadas, associadas com eletrodos de pequenas áreas de contato, deram condições para a ocorrência de trincas. Deste modo, estas trincas ocorreram durante a passagem de alta corrente porque houve aquecimento da interface de contato eletrodo/chapa zincada, com formação de um filme de líquido, o qual penetrou nos contornos de grão do aço, formando a trinca no resfriamento.

Os diâmetros de lentes foram claramente influenciados pela geometria dos eletrodos, de modo que os pontos de solda obtidos com o par de eletrodos 5/16 mm resultaram em um valor médio de diâmetro de lente 12% maior do que o par 12/16 mm.

Estes resultados são bastante coerentes, pois as dimensões das lentes de solda são dependentes da área de contato dos eletrodos em conjunto com o aporte de calor. Deforma que quando se utilizou o par de eletrodos 5/16 mm estes tiveram maior área de contato com as chapas e necessitaram de maior intensidade de corrente para realizar os pontos de solda, resultando em lentes de solda maiores.

A espessura das juntas também influenciou a dimensão dos diâmetros de lente. Os diâmetros de lente obtidos com o par de eletrodos 5/16 mm resultaram em um valor médio próximo para as três espessuras de chapas. Já o par de eletrodos 12/16 mm apresentou diâmetros de lente que reduziram com o aumento da espessura das chapas, apesar das juntas de maior espessura terem necessitado de maiores correntes de soldagem. Este fato se deu em decorrência da extração de calor da interface de solda por parte da massa metálica das próprias peças, de modo que as juntas mais espessas extraíram mais calor, produzindo diâmetros de lente menores.

O valor médio de diâmetro de lente obtido para as três espessuras de juntas, quando se utilizou o par de eletrodos 12/16 mm, foi 5,1 mm e quando utilizou-se o par de eletrodo 5/16 mm foi 5,7 mm, sendo estes valores, respectivamente, 31% e 47% maiores do que o mínimo

recomendado pelas normas AWS e RWMA (3-5), com base na espessura da chapa de 0,95 mm, para se ter resistência mecânica nos pontos de solda.

O ensaio de tração axial máxima foi o ensaio mais importantes na determinação da resistência dos pontos de solda. As cargas de tração axial máxima aumentaram com o aumento da espessura das chapas inferiores, tanto com eletrodos (5/16 mm) como com eletrodos (12/16 mm). De modo que, utilizando o par de eletrodos (5/16 mm), o valor médio das cargas de tração para juntas de 0,95/1,5 mm foi 24% menor do que para as juntas de 0,95/2,0 mm e 14% menor do que para as juntas de 0,95/3,0 mm. Com a utilização do par de eletrodos (12/16 mm) as reduções foram de 18% e 12%, respectivamente para as juntas acima.

O fato das juntas de maiores espessuras terem apresentado maior carga à tração axial máxima parece contraditório com o comportamento dos diâmetros de lente para as mesmas espessuras de juntas. De acordo com a descrição anterior, as juntas de maior espessura apresentaram diâmetros de lentes menores. Assim, área resistente foi menor, conseqüentemente, deveriam ter resultado em menores cargas de tração, no entanto, as maiores espessuras de juntas apresentaram maiores cargas. Infere-se daí que devem existir outros fatores que interferiram no resultado das solicitações mecânicas destas juntas, como por exemplo o parâmetro "separação entre as chapas" e a microestrutura da ZF e ZTA, os quais devem ser estudados em trabalhos futuros.

Os valores médios obtidos das cargas de tração, quando se utilizou os pares de eletrodos 5/16 mm e 12/16 mm, foram semelhantes, isto é 4790 N e 4740 N, respectivamente. Portanto, o fato dos diâmetros de lente serem 12% maiores para soldas obtidas com par de eletrodo 5/16 não causou interferência nas cargas de tração axial. Estes valores são bem maiores do que o valor mínimo proposto por trabalhos de Natal(2), realizados na CSN sobre solda a ponto por resistência elétrica de chapas de aço zincadas, o qual estabeleceu a carga mínima de 2000 N.

Analisando ainda os resultados dos ensaios de tração para estas juntas podemos verificar que durante este tipo de solicitação mecânica existiram no ponto de solda tensões de tração como tensão de cisalhamento uma vez que as juntas fraturaram em botão rompendo a chapa de 0,95

mm de espessura, . Assim a ZF dos pontos de solda ficaram submetidas a tensão de tração enquanto que na ZTA à tensão de cisalhamento.

Os resultados dos cálculos da tensão na tração (σ) dado pela expressão (7.1) cuja área resistente à tração (A_t) é dada pela expressão (7.2) e calculo da tensão de cisalhamento na tração (τ) dada pela expressão (7.3) cuja área resistente ao cisalhamento (A_c) é dada pela expressão (7.4) (diter) podem ser observados na tabela 7.11.

Cálculo da resistência à tração:

$$\sigma = \frac{F}{A_t} \quad (7.1)$$

onde a área resistente no ensaio de tração é :

$$A_t = \frac{\pi d^2}{4} \quad (7.2)$$

sendo "d" o diâmetro do ponto.

Cálculo da resistência ao cisalhamento na tração:

$$\tau = \frac{F}{A_c} \quad (7.3)$$

onde a área resistente ao cisalhamento é:

$$A_c = \pi . d . e \quad (7.4)$$

sendo "e" a espessura da chapa superior.

Observando-se na tabela 7.11 os valores médios de tensão de tração e tensão de cisalhamento dos pontos de solda para as diferentes espessuras de chapas e duas geometrias de eletrodos, podemos notar que aumentando a espessura da chapa inferior aumentaram o limite de resistência à tração e ao cisalhamento dos pontos de solda, sendo que quando se utilizou o par de eletrodos 12/16 mm os valores foram maiores do que quando se utilizou o par de eletrodos 5/16 mm. As juntas com maior espessura de chapas inferiores causou maior extração de calor na ZF e ZTA dos pontos de solda, resultado em microestrutura acicular com maior resistências mecânicas nestas regiões, logo maior o limite de resistência à tração e ao cisalhamento. A maior resistência à tração e ao cisalhamento apresentada quando se utilizou o par de eletrodos 12/16 mm, também parece estar relacionada com a taxa de extração de calor das juntas uma vez que quando se utilizou o par de eletrodos 12/16 mm a corrente de soldagem foi menor logo a massa metálica da junta teve maior eficiência na extração de calor tanto na ZF como ZTA, resultando em microestruturas mais resistentes.

Comparando os valores de limite de resistência à tração dos pontos de solda , tabela 7.11, com o valor de limite de resistência das chapa de 0,95 mm antes da soldagem , tabela 7.1, podemos notar que o limite de resistência à tração dos pontos de solda são sempre menores do que o limite de resistência da chapa de 0,95 mm, antes da soldagem. O que é intrigante uma vez que a microestrutura das chapas de aço de 0,95 mm de espessura em seu estado inicial é constituída de 92 % de ferrita, ou seja estrutura dúctil, segundo dados apresentados na tabela 7.2, enquanto que os pontos de solda apresentam tanto na ZF como ZTA, estruturas aciculares, ou seja estruturas mais resistentes do que a ferrita. Este comportamento pode ser explicado pelo fato desta geometria de junta apresentar também tensão de cisalhamento na ZTA durante o ensaio de tração axial. Sendo que durante o ensaio de tração, e aplicação de uma determinada carga, houve maior tensão de cisalhamento na ZTA do que de tração na ZF, de modo que os pontos de solda fraturaram em botão devido às tensões de cisalhamento, não atingindo a tensão máxima de resistência à tração. Assim os valores obtidos de tensão de tração nos pontos de solda, tabela 7.11, não corresponde ao limite máximo de resistência à tração, mas uma tensão bem menor, o que acarretou a discrepância dos valores obtidos no ponto de solda e chapas de 0,95 mm em seu estado inicial.

Os valores médios de torque máximo dos pontos de solda não apresentam nenhuma tendência clara com a variação das espessuras das chapas inferiores das juntas soldadas, assim como também não se observa variação com a geometria superior dos eletrodos. Os valores médios de torque máximo foram de 28 Nm quando se utilizou eletrodos 5/16 mm e de 27 Nm quando se utilizou eletrodos de 12/16 mm.

Segundo um trabalho realizado pelo IIW (ver pag.185) sobre ensaios de torção em chapas de aço baixo carbono, onde estes foram utilizados tanto para dimensionamento das lentes de solda como para determinação do torque, seus resultados apresentam torque máximo de 20 Nm. Os valores encontrados neste trabalho foram sempre maiores do que este valor proposto.

Comparando os resultados obtidos de cargas de tração máxima com torque máximo, pode-se notar que eles apresentam algumas tendências semelhantes, ou seja, com maiores correntes, maiores foram as cargas de tração e os torques, sendo que a mudança de geometria de eletrodos não interferiu significativamente neste aspecto.

As formas das fraturas dos pontos de solda após os ensaios de tração e torção foram predominantemente na forma de botão para todas as espessuras de juntas e para as duas geometrias de eletrodos investigadas. Somente as juntas com chapas de 1,5 mm soldadas com eletrodos esféricos apresentaram 13% de fratura interfacial nos ensaios de tração e torção, o que ocorreu para baixas correntes de soldagem. Nos ensaios de torção desta junta ocorreu fratura em botão em 100% dos casos.

Como mencionado anteriormente, as fraturas dos pontos de solda na forma de botão nos ensaios de tração ocorreram devido às tensões de cisalhamento nas chapas de 0,95 mm de espessuras e não devido às tensões de tração nas lentes de solda, ZF, o que resultaria em fraturas interfaciais. A partir de uma análise de tensões nos pontos de solda, quando submetidos aos ensaios de tração axial, pode-se explicar a tendência de ocorrer fratura em botão nestes ensaios. Considerando um caso genérico: as juntas submetidas à tração axial geram tensões de cisalhamento nas chapas de 0,95 mm, assim como tensões de tração na lente, logo:

Fratura por tensões de cisalhamento Fratura por tensões de tração na lente de solda

da chapa de 0,95 mm.

Área resistente (A_c) Área resistente (A_t)

$$A_c = \pi \cdot d \cdot e \quad A_t = \pi \cdot d^2 / 4$$

onde "d" é o diâmetro da lente (5,0 mm), "e" é a espessura da chapa de 0,95 mm,

Tensão de cisalhamento (T_c) Tensão de tração (T_t)

$$T_c = F / \pi \cdot d \cdot e \quad T_t = F / (\pi \cdot d^2 / 4)$$

$$T_c = 0,067 F \quad T_t = 0,051 F$$

Primeira HIPÓTESE : supondo material homogêneo, e não considerando a concentração e triaxialidade de tensão devido ao entalhe no ponto de solda.

Carga de escoamento / fratura da chapa de 0,95mm Carga de escoamento / fratura da lente

Com base no critério de Tresca

$$T_c = T_e / 2 \quad T_t = T_e = 0,051 F$$

$$T_c = 0,067 F = T_e / 2$$

$$F_c = T_e / 0,134 \quad F_t = T_e / 0,051$$

$$F_c / F_t = 0,051 / 0,134 = 0,38$$

$$\text{logo } F_t = 2,63 F_c$$

Deste modo a força necessária para que o ponto de solda escoe e rompa por tensão de tração na lente de solda fraturando interfacialmente é 2,63 vezes maior do que a força necessária para que o ponto de solda escoe e rompa por tensões de cisalhamento na chapa de 0,95 mm, fraturando em botão. Assim, quando os pontos de solda atingiram a resistência ao cisalhamento das chapas, houve fratura em botão.

Um outro fator que contribuiu para a ocorrência de fraturas na forma de botão está associado ao fato das lentes de solda serem constituídas de estruturas aciculares e possuírem a linha final de solidificação abaixo da interface chapa/chapa, e esta não estar alinhada com a região de separação entre as chapas adjacentes à lente de solda.

A região de separação entre as chapas adjacente às lentes de solda pode ser considerada, segundo a mecânica da fratura, como um "entalhe", no qual se acumulam as tensões quando os pontos de solda foram submetidos aos ensaios de tração ou torção. Deste modo o fato desta região não estar alinhada à linha final de solidificação, e ser constituída de estruturas bastante resistentes, contribuíram para a fratura na forma de botão e não interfacial. O que permite classificar os pontos de solda em boa qualidade.

Podemos notar que a presença de vazios nas lentes de solda, no centro da ZF, parece não ter afetado as cargas de tração axial máxima e o torque máximo. As lentes nas chapas de 2,0 mm apresentaram maior incidência de vazios sem, contudo, apresentar cargas de tração ou torques menores. A presença de trincas na superfície dos pontos de solda parece também não ter influenciado as cargas de tração e torque. Apesar do surgimento de trincas nas lentes com o aumento da corrente, as cargas de tração axial e de torque foram maiores e os pontos de solda não fraturaram no local das trincas. Para uma avaliação mais completa do efeito das trincas nas lentes de solda, posteriormente deverá ser realizado um estudo com base no ensaio de fadiga mecânica.

Influência do Acabamento Superficial das Chapas Com Eletrodo Cone Truncado

Este experimento foi realizado para estudar a influência do revestimento de zinco/zinco, zinco/fosfato e decapagem em juntas de chapa/chapa. Foi utilizado neste experimento, chapa superior de 0,95 mm de espessura e chapa inferior de 2,0 mm de espessura; eletrodo superior

cone truncado de $\phi = 5$ mm, eletrodo inferior plano de $\phi = 16$ mm (5/16). Variou-se o revestimento superficial das chapas em:

- chapa de 0,95mm zincada sobre chapa de 2,0 mm fosfatizada;
- chapa de 0,95 mm zincada sobre chapa de 2,0 mm zincada;
- chapa de 0,95 mm sobre chapa de 2,0 mm decapadas.

Os resultados obtidos estão, respectivamente, nas tabelas 7.6, 7.12 e 7.13, e figuras 7.5 e 7.13.

Tabela 7.12: Resultados da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre chapa de 2,0 mm zincada; par de eletrodos 5/16; F = 2800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	Iden(%)	ϕL (mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
10,4	1,3	4,0	-	52/ -	B/B	19	2460
11,5	5,2	4,5	31/36	130/ -	B/B	25	3200
12,1	4,8	5,0	58/60	130/ -	B/B	34	4110
12,8	6,7	5,8	68/68	154/ -	B/B	37	4340
13,5	7,9	6,1	-/64	66/ -	B/B	40	4380
13,9	13,9	6,5	-/76	102/ -	B/B	42	4990

Tabela 7.13: Resultados da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm sobre chapa de 2,0 mm, decapadas; par de eletrodos 5/16; F = 2800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	Iden(%)	ϕL (mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
7,1	4,4	-	41/58	- / -	B/B	17	3660
7,9	6,6	4,9	19/43	- / -	B/B	25	5220
8,7	6,9	5,3	54/74	- / -	B/B	30	5780
9,7	11,0	6,0	65/78	- / -	B/B	33	6830
10,7	25,0	6,0	67/85	- / -	B/B	29	6440

Os valores médios da corrente de soldagem variaram com o tipo de revestimento das juntas, de modo que as menores correntes (7,1 kA) foram para as juntas decapadas, sendo um pouco maiores para as juntas com zinco sobre fosfato (8,3 kA); os maiores valores de correntes foram para as juntas com revestimentos de zinco nas duas chapas (10,4 kA).

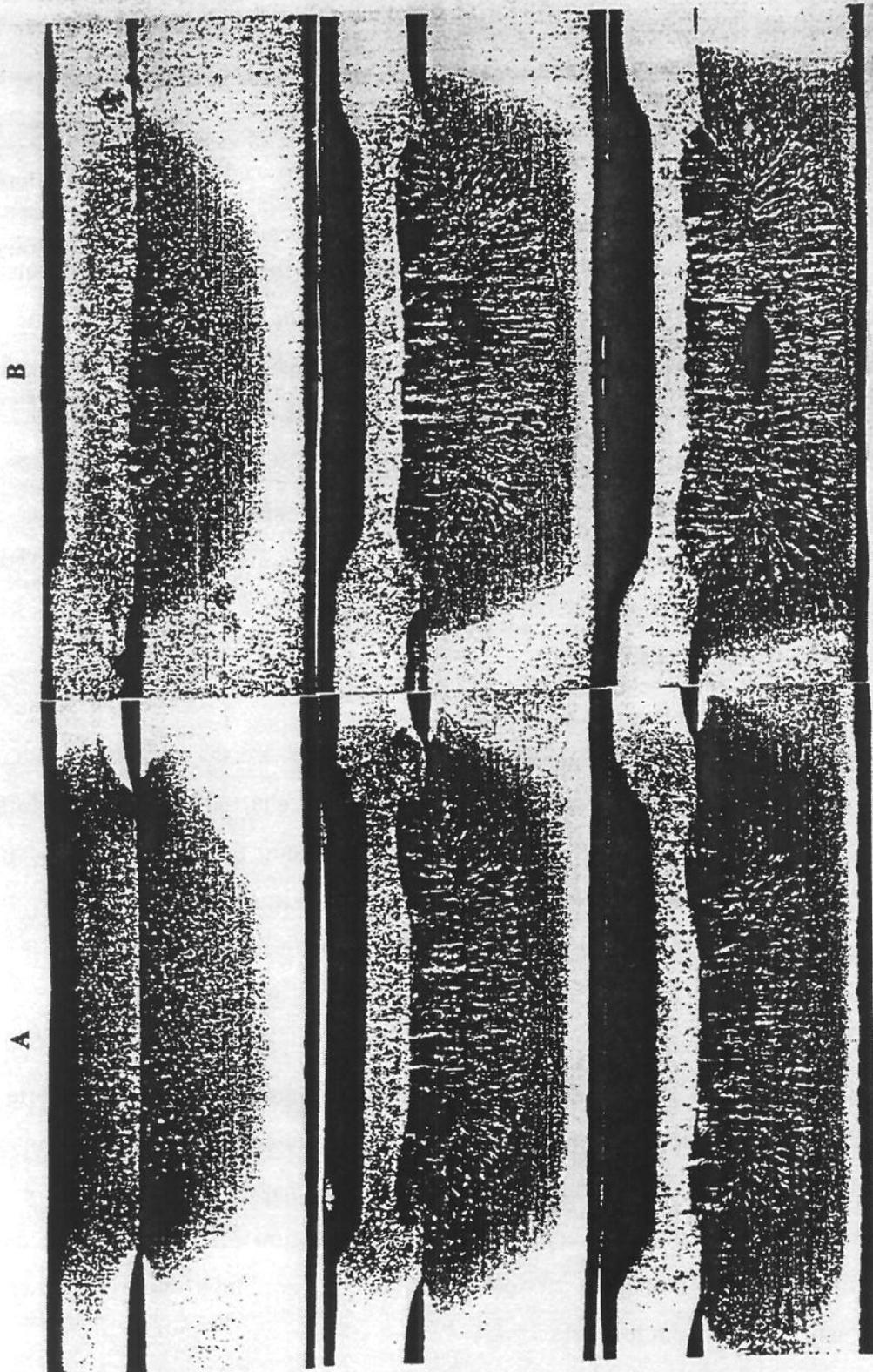


Figura 7.13: Sequencia metalográfica da soldagem de chapa/chapa variando revestimento. $F=2800$ N, $t_s=15$ ciclos, eletrodos 5/16, variando corrente: 10,4 kA, 12,1 kA, 13,9 kA, para chapa zincada (20 m)/chapa 2,0 mm, zincada (80 m) (A); e 7,1 kA, 8,7 kA, 10,7 kA, para 0,95/2,0 mm, decapadas. Nital 3%. 12,5x.

Calculando-se a porcentagem de acréscimo de corrente com os diferentes tipos de revestimento, em relação às juntas decapadas, os revestimentos de zinco sobre fosfato necessitaram de 15% a mais de corrente e os revestimentos de zinco sobre zinco necessitaram de 46% a mais de corrente. Estes resultados são coerentes com a literatura (8,9,18) pois as chapas de aço zincadas requerem maior corrente de solda, sendo que esta cresce com o aumento da espessura da camada de zinco.

As juntas com revestimento de zinco/zinco necessitaram de maiores correntes porque a interface de contato chapa/chapa apresentava as menores resistências de contato, de modo que foi necessário maior corrente para gerar o calor necessário para formar as lentes de solda. Um outro fator que deve contribuir para as maiores correntes de solda em juntas zincadas advém do fato de que durante a passagem de corrente pela interface chapa/chapa o zinco funde a uma temperatura bem mais baixa do que a do metal de base (aço) e expulsa este revestimento, restando zinco no contorno da área por onde passou a corrente. Assim, passa a existir uma maior área de contato entre as chapas, sendo necessário maior corrente para fundir o metal de base (2, 19). Esse efeito pode ser observado na figura 3.5 do capítulo 3.

Para as juntas com revestimento de zinco/fosfato, cuja espessura da camada de zinco é bem mais fina (20 μm) do que para as juntas com zinco nas duas chapas (20/80 μm), foram encontradas valores menores de corrente, devido ao fato das resistências de contato zinco/fosfato serem maiores do que as resistências de contato zinco/zinco. Nesta situação, pode ter ocorrido a expulsão de zinco durante a passagem de corrente, restando menor resíduo de zinco ao redor da área por onde passou a corrente.

Nas juntas decapadas a resistência de contato entre as chapas foi maior em decorrência da maior rugosidade da superfície, de modo que necessitaram menores correntes para a formação das lentes de solda. A redução da corrente de soldagem para chapas não revestidas é um comportamento esperado, o que pode ser constatado através da figura 3.7 do capítulo 3 deste trabalho (2). Os intervalos de soldagem obtidos para os três conjuntos de revestimentos investigados foram semelhantes e em torno de 3,2 kA.

Com o aumento da corrente de soldagem aumentaram as identações dos pontos de solda para todos os casos analisados, sem contudo ultrapassar o limite máximo de 20 %. Os valores médios das identações foram em torno de 9 %, tanto para as juntas decapadas como para as juntas revestidas de zinco sobre fosfato. Já as juntas revestidas somente por zinco, apresentaram menor valor médio de identações (6,6%) o que pode ser atribuído ao fato destas juntas terem apresentado menores diâmetros de lente com área fundida, de modo que a área resistente à força dos eletrodos era maior, resultando em menor identações.

Como as juntas zinco/fosfato e decapadas possuem diâmetro de lentes próximos e maiores do que as juntas de revestimento zinco/zinco, estas juntas apresentaram menor resistência à ação dos eletrodos formando maiores identações.

O mecanismo de formação das lentes de solda parece ter sido o mesmo para as juntas com diferentes revestimentos, pois todas apresentam ZF central constituída de estruturas colunares que cresceram no sentido oposto à extração de calor pelos eletrodos, circundada pela ZTA, constituída de grãos equiaxiais grosseiros e após esta área, o metal de base em seu estado inicial, com grãos equiaxiais pequenos.

As juntas com diferentes revestimentos tiveram um comportamento próximo com relação os valores das penetrações. Elas são maiores nas chapas inferiores do que nas superiores, sendo que as juntas com revestimento de zinco apresentaram menores variações nos valores de penetrações superior e inferior. Com o aumento da corrente de soldagem houve aumento das medidas de penetração para todas as juntas.

A razão entre os valores de penetração superior sobre inferior para as juntas com diferentes revestimentos foram de: 0,5 a 0,8 para as juntas com revestimentos de zinco sobre fosfato e decapadas e de 0,8 a 1,0 para zinco sobre zinco. Deste modo, as juntas zincadas apresentaram menores assimetria das lentes de solda.

Observando ainda a macroestrutura dos pontos de solda (figuras 7.5 e 7.13), pode-se notar que as juntas com diferentes revestimentos também apresentaram a linha final de solidificação

abaixo da interface chapa/chapa, a qual é resultante da eficiência da refrigeração dos eletrodos superiores sobre os inferiores.

Os vazios estão presentes nas juntas com diferentes revestimentos. Sendo que eles foram mais freqüentes em juntas decapadas do que nas revestidas, pois existem vazios mesmo com corrente de soldagem mínima nas juntas decapadas. Logo, pode-se afirmar que o revestimento de zinco não é o fator responsável pela formação dos vazios.

A presença dos vazios parece ser decorrente dos fenômenos de "splash" e da expulsão, ou seja, excesso de calor na formação dos pontos de solda. Como explicado anteriormente, o excesso de calor foi atribuído aos valores de tempo e da corrente de soldagem em conjunto com a alta resistência elétrica do interior das chapas mais grossas. A resistência de contato entre as chapas mostrou-se ser também um parâmetro importante na formação de vazios, uma vez que as chapas decapadas, cujas resistências de contato são maiores do que as chapas zincadas, apresentaram maior incidência de vazios. A maior resistência de contato para as chapas decapadas aumentou a geração de calor nas juntas contribuindo para aumentar os fenômenos de "splash" e da expulsão, dando surgimento a vazios após a contração térmica da solidificação.

A análise dos pontos de solda quanto à presença de trincas revelou que as juntas decapadas não possuem trincas nas chapas superiores e inferiores. Já as juntas com revestimento de zinco sobre fosfato e de zinco sobre zinco só apresentaram trincas nas chapas superiores em contato com os eletrodos de $\phi = 5$ mm.

Com estes resultados podemos concluir que eletrodos com pequena área de contato em conjunto com o revestimento de zinco foram determinantes na formação das trincas nos pontos de solda. O que pode ser comprovado pela não existência de trincas nas chapas decapadas em contato com eletrodos de $\phi = 5,0$ mm, e chapas zincadas em contato com eletrodos de $\phi = 16$ mm. A menor área de contato dos eletrodos tinha maior densidade de corrente e, conseqüentemente, maior foi o aquecimento dos eletrodos em contato com o zinco da superfície da chapas. Deste modo, houve formação de um filme de líquido na interface de contato chapa/eletrodo dando condições para ocorrer trincas intergranulares, as quais cresceram paralela ao fluxo de corrente de solda (16).

Nota-se ainda que as trincas tendem a aumentar com a corrente de soldagem, e que o revestimento de zinco sobre zinco apresentou a maior incidência de trincas (elas apareceram desde as condições iniciais de soldagem). A maior incidência de trincas em juntas zincadas, é atribuída á maior intensidade de corrente necessária para se obter os pontos de solda. De modo que, aumentando o peso destes revestimentos maiores foram as correntes, conseqüentemente maiores foram as trincas .

Os pontos de solda obtidos com diferentes revestimentos apresentaram maiores diâmetros de lente com o aumento da corrente de soldagem, dentro do intervalo de soldagem de cada junta. Os valores médios foram de 5,3 mm para juntas com revestimento de zinco sobre zinco, 5,6 mm para juntas decapadas e 5,9 mm para juntas de fosfato sobre zinco. Como pode-se notar, houve uma variação de 5% nas médias obtidas.

É interessante notar que as juntas com revestimento de zinco nas duas chapas, necessitaram das maiores correntes de soldagem. No entanto, apresentaram os menores diâmetros de lente, o que pode ser atribuído ao fato das resistências de contato chapa zincada/chapa zincada serem mais baixas, havendo menor desprendimento de calor nesta interface.

As cargas de tração axial máxima tendem a aumentar com maiores correntes de soldagem para as juntas com três tipos de revestimentos, sendo que as juntas com revestimento de zinco/fosfato e decapadas, apresentaram menores cargas de tração máxima com a corrente de expulsão, comportamento coerente com a literatura especializada (6). Os resultados podem ser observados na figura 7.14.

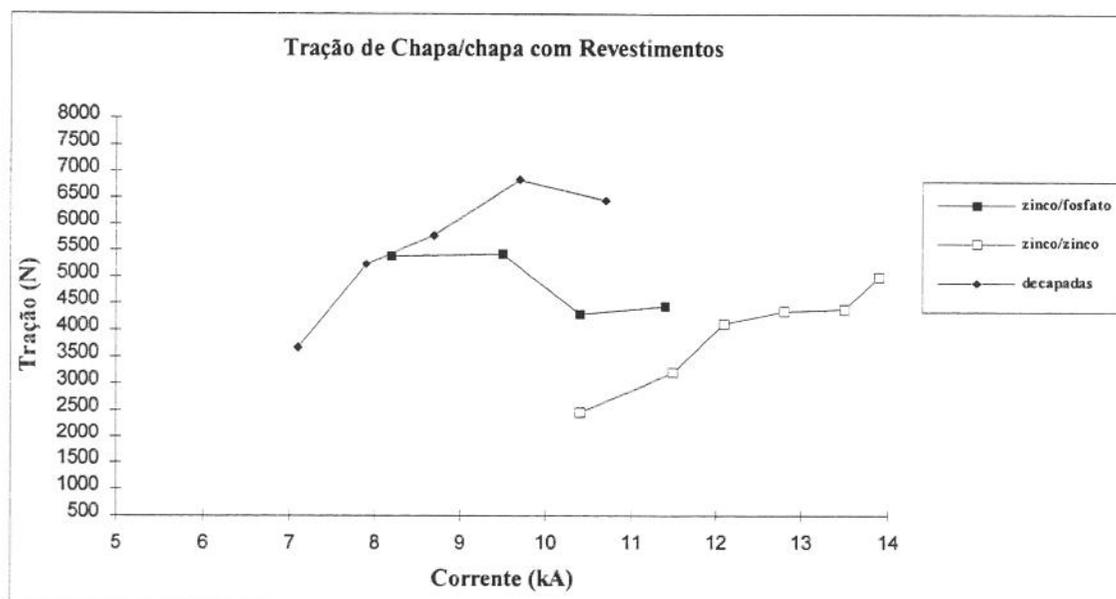


Figura 7.14: Tração axial máxima versus corrente de soldagem de juntas com diferentes revestimentos superficiais, obtidas com o par de eletrodos 5/16 mm.

O valor médio das cargas foi menor para as juntas com revestimento de zinco (3910 N), um pouco maior para as juntas de zinco sobre fosfato (4880 N) e, ainda maior para as juntas decapadas (5590 N). Todos estes resultados são bem maiores do que o valor mínimo recomendado de 2000 N (2). A porcentagem de variação das cargas de tração, quando comparadas com as juntas decapadas, foi 30% menor para as juntas com zinco/zinco e 13% menor para as juntas com revestimento de zinco sobre fosfato.

Estabelecendo uma relação entre diâmetro de lente com carga de tração obtida para as soldas com diferentes revestimentos, podemos notar que as juntas decapadas apresentaram os maiores diâmetros de lente e resultaram nas maiores cargas de tração. Já as juntas com revestimento de zinco sobre fosfato apresentaram diâmetro de lente um pouco menor, sendo as cargas de tração também um pouco menores. Por fim, as juntas com revestimento de zinco apresentaram os menores diâmetros de lente e as menores cargas de tração. Deste modo, com menores diâmetros de lente, menores foram as áreas resistentes às tensões durante os ensaios de tração, havendo a conseqüente diminuição das cargas.

As juntas com os três tipos de revestimentos apresentaram torque máximo maiores com maiores valores de correntes de soldagem. Os resultados obtidos estão na figura 7.15.

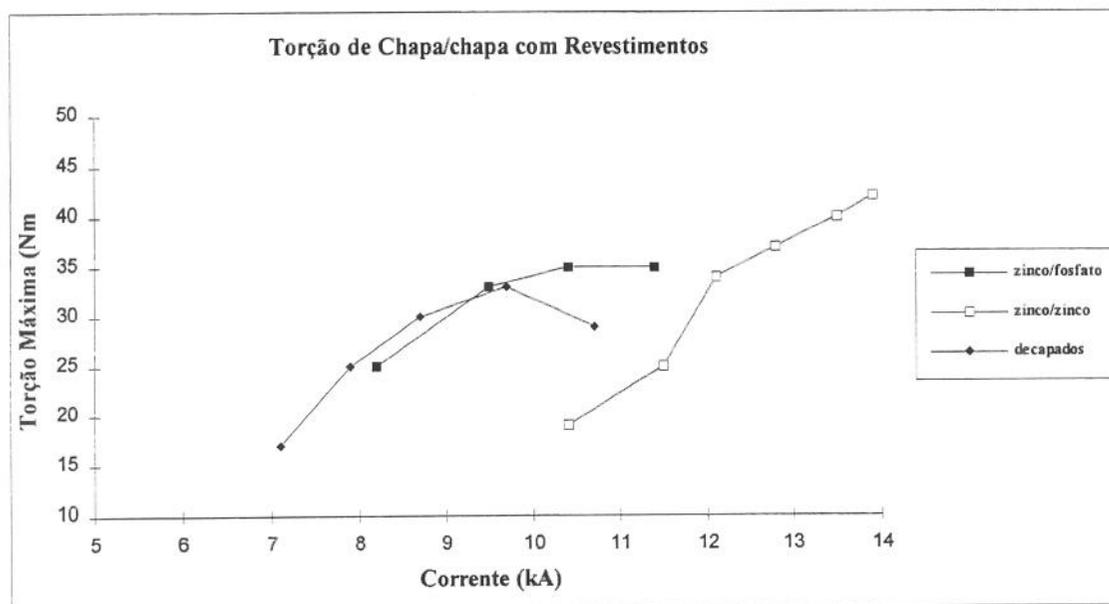


Figura 7.15: Torque máximo versus corrente de soldagem para as juntas obtidas com diferentes revestimentos obtidas com o par de eletrodos (5/16 mm).

Os valores médios de torque máximo dos pontos de solda com diferentes revestimentos foram de 27 Nm para decapadas, 32 Nm para zinco sobre fosfato e 33 N para zincados. A porcentagem de variação do torque, quando comparadas com as juntas decapadas, foi 22 % maior para as juntas com zinco e 19% maior para as juntas com revestimento de zinco sobre fosfato. Para melhor conhecer a influência dos revestimentos destas juntas nos testes de torção, é necessário um estudo da microestrutura da ZF e da ZTA.

Comparando os resultados obtidos dos testes de tração e torção podemos observar que as tendências foram o inverso. Ou seja, enquanto nos testes de torção, o torque máximo cresceu com o aumento da camadas de zinco, nos testes de tração as cargas diminuíram com maiores revestimentos de zinco.

As fraturas dos pontos de solda das juntas com diferentes revestimentos, submetidos aos testes de tração e torção, foram 100% na forma de botão para todas as condições ensaiadas. Isto

nos permite dizer que estas condições de soldagem são boas e que o revestimento não interferiu no modo de fratura.

Os revestimentos de zinco/fosfato e o decapado apresentaram resultados semelhantes e distintos do revestimento zinco/zinco. A corrente de soldagem inicial para as juntas com revestimento de zinco/zinco foi 30 % a 40 % maior, com amplo intervalo de soldagem para todos revestimentos (3,2 kA). Os pontos de solda apresentaram poça de fusão, com maior penetração na chapa inferior.

Os vazios só foram observados nas juntas decapadas e nas de zinco/fosfato; nas juntas de zinco/zinco não ocorreu a formação de vazios, já que nestas o calor gerado é menor em função da sua baixa resistência de contato. As trincas surgiram nas chapas de 0,95 mm zincadas, o que se explica pela alta densidade de corrente existente nesta condição de soldagem. As juntas com revestimento de zinco apresentaram os menores diâmetros de lente e, como consequência, as menores cargas de tração axial. No entanto, os valores de torque foram maiores, o que faz necessário um estudo da microestrutura para entender este comportamento inverso do torque. Em todos os casos houve 100% de fratura em botão., caracterizando boas condições de soldagem.

7.3.3 - RESULTADOS DA SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA DE CHAPA/TUBO

Utilizando o mesmo método de soldagem para obtenção das juntas de chapa/chapa, a saber, tempo de solda (ts) em 15 ciclos, tempos de pré e pós solda em 20 ciclos, força entre eletrodos de 2800 N e variando a corrente de solda do valor mínimo, correspondente à obtenção de lente de diâmetro de $4\sqrt{t}$, até o valor máximo, quando da ocorrência de expulsão. Foram obtidos os intervalos de solda para as juntas de chapa/tubo, sendo investigados os seguintes fatores:

- espessura do tubo;
- local da solda;
- tipo de eletrodo;
- geometria do conjunto de eletrodos (suportes condutor e não condutor);
- força entre eletrodos; e,

- revestimento das juntas.

Influência da Espessura dos Tubos e do Local da Solda com Eletrodo Cone Truncado

Utilizou-se chapa superior com 0,95 mm de espessura zincada, eletrodo superior cone truncado com $\phi = 5\text{mm}$, eletrodo inferior plano com $\phi = 16\text{ mm}$ (5/16 mm) e força entre eletrodos de 2800 N. Variou-se a espessura dos tubos em 1,5, 2,0 e 3,0 mm, sendo todos eles fosfatizados; variou-se também o local da solda no tubo (centro e borda dos CP's), de modo que cada espessura de tubo foi soldada ora na borda ora no centro. Os resultados da soldagem em tubos de 1,5 mm estão comentados abaixo, e os resultados das soldas em tubos de 2,0 e 3,0 mm estão nas tabelas 7.14, 7.15 , 7.16, 7.17 e figuras 7.16 e 7.17.

Tabela 7.14: Resultado da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 2,0 mm fosfatizado; solda no centro dos CP's; par de eletrodos 5/16; F = 2800 N ts = 15 ciclos.

I (kA)	$\phi L(\text{mm})$	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μm)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
10,7	5,8	0,8	-	- / -	B/B	32	6600
11,3	6,2	1,1	34/8	- / -	B/B	37	5670
12,0	6,6	1,3	58/19	- / -	B/B	37	7100
12,8	6,6	1,2	69/22	- / -	B/B	42	7080
13,3	7,3	1,4	71/19	15/ -	B/B	41	7700

Tabela 7.15 : Resultado da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 2,0 mm fosfatizado; solda na borda dos CP's; par de eletrodos 5/16; F = 2800 N ts = 15 ciclos.

I (kA)	$\phi L(\text{mm})$	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μm)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
10,7	5,9	0,9	58/12	- / -	B/B	34	-
11,0	5,8	0,8	49/3	31/ -	B/B	29	5260
11,5	5,8	1,1	-	46/ -	B/B	30	5630
12,7	6,1	1,1	74/24	97/ -	B/B	34	6750
13,1	5,9	1,1	-	117/ -	B/B	34	6150

Tabela 7.16: Resultado da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 3,0 mm fosfatizado; solda no centro dos CP's; par de eletrodos 5/16; F = 2800 N ts = 15 ciclos.

I (kA)	ϕL (mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
9,4	5,0	0,2	-	- / -	B/B	25	5500
9,9	5,6	0,2	54/24	- / -	B/B	33	6270
10,7	5,2	0,2	56/24	174/ -	B/B	30	5200
11,5	6,2	0,2	67/28	385/ -	B/B	39	6600
12,3	6,1	0,2	63/27	138/ -	B/B	39	6900

Tabela 7.17: Resultado da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre chapa de 3,0 mm fosfatizada; solda na borda dos CP's; par de eletrodos 5/16; F = 2800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	ϕL (mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
8,5	4,9	0,3	51/24	- / -	B/B	29	4520
8,8	5,3	0,2	54/24	- / -	B/B	27	4610
9,5	5,7	0,1	61/25	31/ -	B/B	35	6500
10,5	6,2	0,1	63/33	31/ -	B/B	34	4900

Utilizando os parâmetros de soldagem acima mencionados, os mesmos utilizados na soldagem de chapa/chapa, não foi possível obter os pontos de solda para juntas de chapa de 0,95 mm sobre tubo de 1,5 mm. Os tubos sofreram uma deformação plástica durante a soldagem, de modo a reduzir a sua altura interna em 4,0 mm, além do que as chapas não se fixaram aos tubos após a retirada dos eletrodos. Deste modo não foi possível obter o intervalo de soldagem para esta junta com estes parâmetros de soldagem.

As soldas de chapa/tubo de 2,0 mm tiveram os valores iniciais de corrente iguais, tanto para as soldas realizadas no centro como na borda do tubo (10,7 kA). As soldas de chapa/tubo de 3,0 mm necessitaram de uma corrente inicial menor do que para chapa/tubo 2,0 mm, sendo que

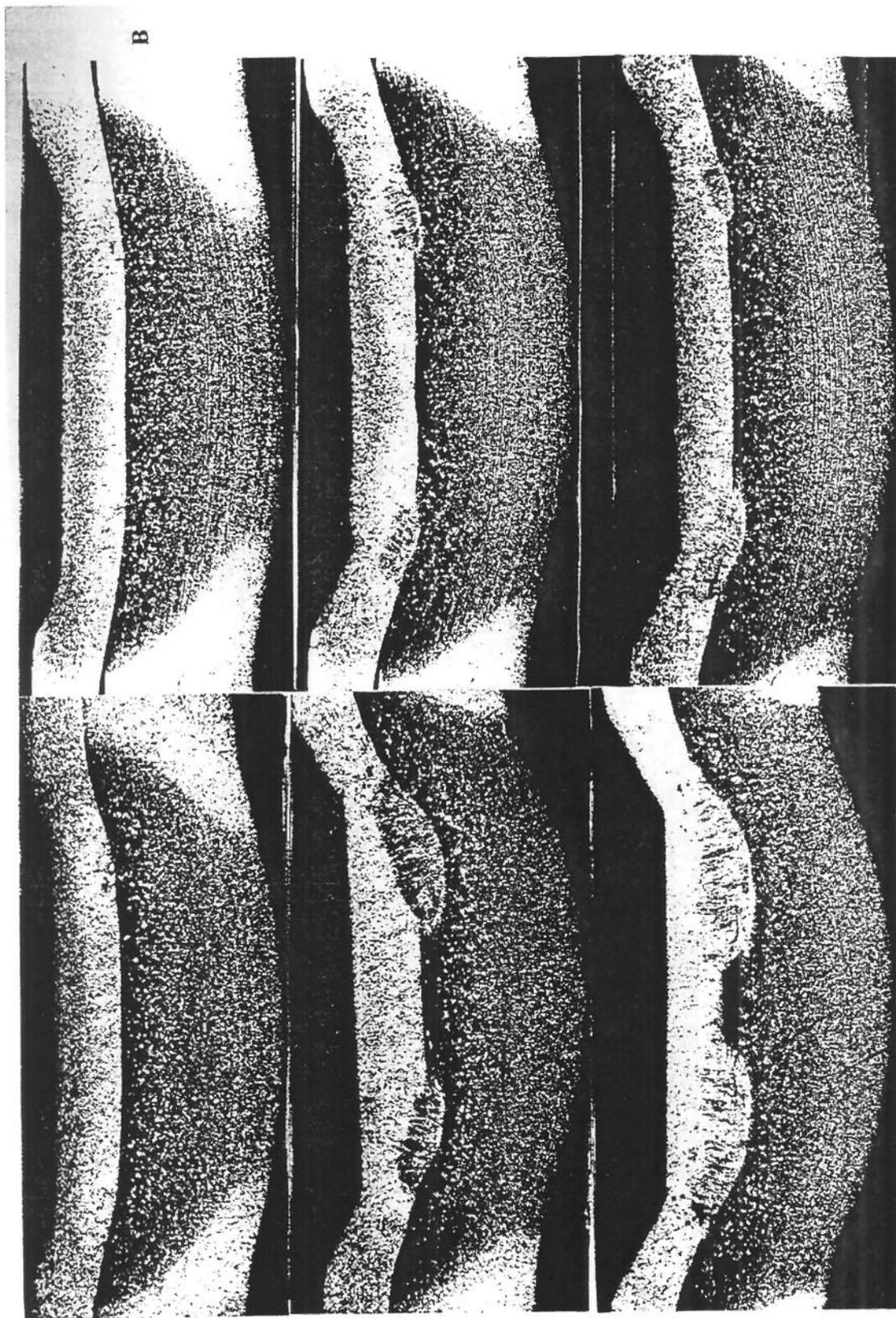


Figura 7.16: Sequencia metalográfica das soldas de chapa/tubo obtidas com $F=2800$ N, $t_s=15$ ciclos, eletrodos 5/16, variando corrente: 10,7 kA, 12,0 kA, 13,3 kA para 0,95/2,0 mm, centro, (A); e 10,7 kA, 12,7 kA, 13,1 kA para 0,95/2,0 mm, borda (B). Nital 3%. 12,5x.

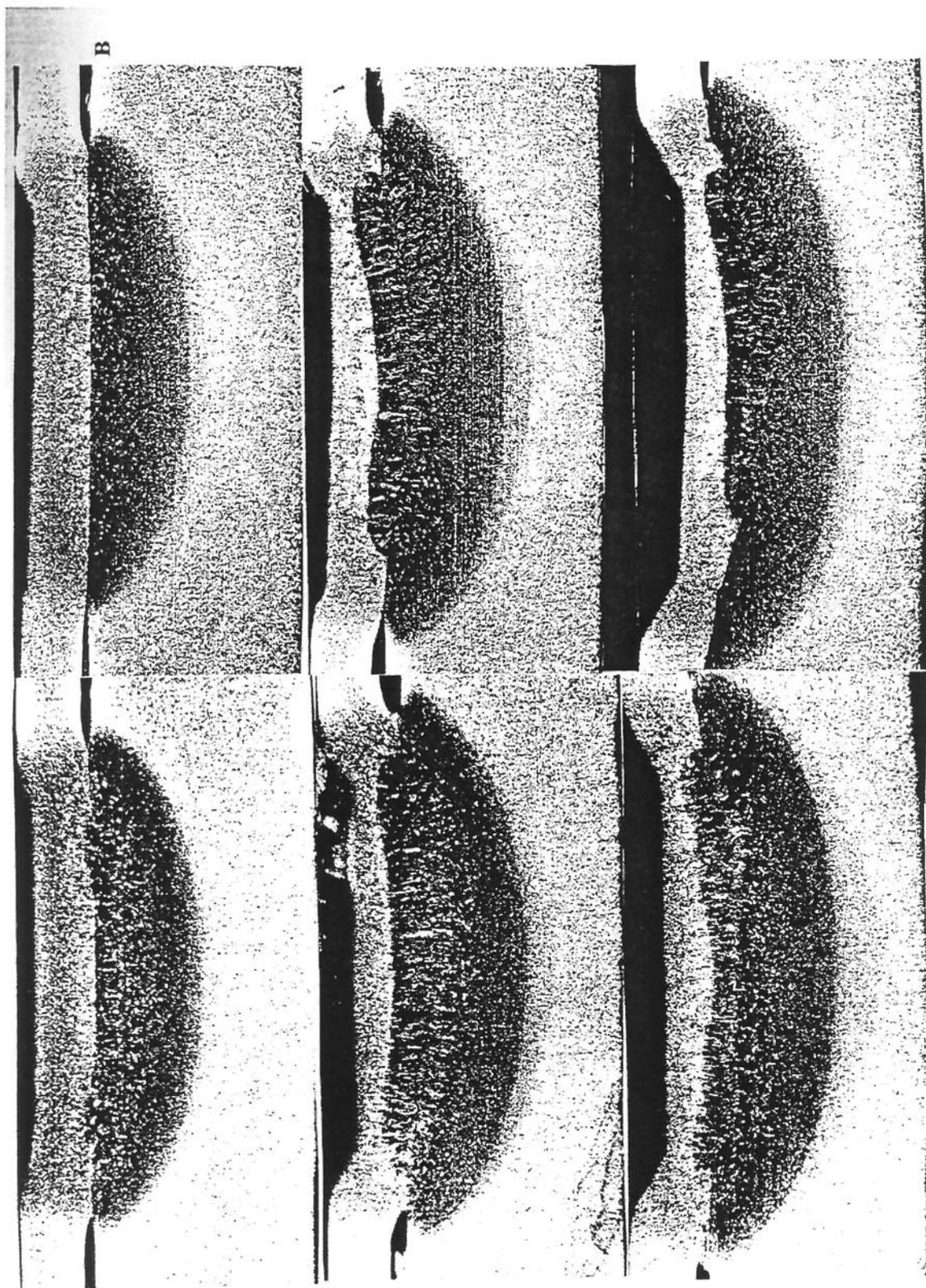


Figura 7.17: Sequencia metalográfica das soldas de chapa/tubo. $F=2800$ N, $t_s=15$ ciclos, eletrodos 5/16, variando corrente: 9,4 kA, 10,7 kA, 12,3 kA, 0,95/3,0 mm, centro (A); e 8,5 kA, 9,5 kA, 10,5 kA, 0,95/3,0 mm,borda (B) Nital 3%. 12,5x.

no centro necessitou de 9,4 kA e na borda de 8,5 kA. Assim, as juntas com tubo de 2,0 mm necessitaram de aproximadamente 18% a mais de corrente que as juntas com tubos de 3,0 mm.

Os intervalos de soldagem foram 2,6 kA e 2,4 kA, respectivamente para a solda no centro e na borda de juntas com tubos de 2,0 mm, enquanto que as juntas com tubos de 3,0 mm apresentaram intervalos de soldagem de 2,9 e 2,0 kA para soldas no centro e na borda. Deste modo, estes intervalos indicam boa faixa de soldagem.

De acordo com os dados acima, com o aumento da espessura do tubo, os valores iniciais de corrente foram menores. O local da solda influenciou o valor inicial da corrente somente em tubo de 3,0 mm, de modo que as soldas na borda necessitaram de correntes 11% menores.

As medidas de deformação foram propostas neste trabalho em decorrência da geometria das juntas chapa/tubo apresentarem deformações plásticas na altura interna dos tubos durante a soldagem. O procedimento adotado para as medidas foi explicado no capítulo 6 deste trabalho..

As medidas de deformação, no interior dos tubos soldados, aumentaram com a corrente em tubos de 2,0 mm de espessura e permaneceram constante em tubos de 3,0 mm de espessura. Os valores médios das deformações dos tubos de 2,0 mm foram de 1,2 mm para soldas no centro e 1,0 mm para soldas nas bordas; já os tubos de 3,0 mm foram de 0,2 mm tanto para soldas no centro como solda nas bordas. Assim os tubos de 2.0 mm apresentaram deformação permanente 4 a 5 vezes maior do que os tubos de 3,0 mm.

A ocorrência de maior deformação nos tubos de 2,0 mm com o aumento da corrente de soldagem ocorreu por ser menor a espessura dos tubos. Com o aquecimento da peça, ocorre a diminuição da resistência mecânica e a ação da força entre eletrodos gerou deformação plástica no interior dos tubos. O mesmo não ocorreu para os tubos de 3,0 mm em virtude da sua maior resistência mecânica e maior eficiência na extração de calor da ZF. Os valores de deformações observados podem ser considerados como variação dimensional dos tubos, segundo as normas internas MBB-F-4041 (20).

As soldas no centro resultaram em maior deformação por sua resistência mecânica ser menor que na borda.

Observando a seqüência metalográfica dos pontos de solda nas figuras 7.16 e 7.17 para as duas espessuras de tubos, verifica-se que com baixa corrente de soldagem, não houve fusão total das lentes, mas existem pequenas regiões de estruturas colunares na interface de contato chapa/tubo, as quais estão imersas em uma grande região com estruturas equiaxiais grosseiras.

Para valores maiores de corrente, as duas espessuras de juntas apresentaram comportamento distinto, ou seja, em juntas com tubos de 2,0 mm de espessura nota-se que a lente de solda está dividida em duas, tanto para soldas no centro como soldas nas bordas dos tubos. Já para as juntas com tubos de 3,0 mm de espessuras, as lentes de solda são inteiras, como as lentes formadas em juntas de chapa/chapa. Nas duas espessuras de juntas a macroestrutura das lentes de solda apresentaram zona fundida central (ZF), constituídas de grãos colunares os quais cresceram no sentido oposto à extração de calor pelos eletrodos; esta região é circundada por grãos equiaxiais grosseiros (ZTA). Após esta região se observa o metal de base em seu estado inicial, com grãos equiaxiais pequenos.

Observando a linha final de solidificação das lentes de solda, as quais não são muito nítidas, elas estão um pouco abaixo da interface de contato chapa/tubo e não há presença de vazios em nenhum ponto de solda.

As poças fundidas são assimétricas com relação à interface de contato chapa/tubo. Nestas soldas, a assimetria é observada com penetrações maiores nas chapas superiores, de 0,95 mm de espessura. Comportamento oposto ao observado em soldas de chapa/chapa para as mesmas espessuras de junta.

Para as duas espessuras e locais de solda, as medidas de penetração da lente de solda aumentaram com a corrente. As penetrações nas chapas superiores são sempre maiores do que nas chapas inferiores, sendo que as penetrações inferiores e superiores não ultrapassaram o limite mínimo de 20% e máximo de 80% com as correntes de soldagem. Estas medidas têm um

comportamento constante para espessuras de 3,0 mm, mas o mesmo não ocorre para espessuras de 2,0 mm.

Para juntas com tubos de 2,0 mm, a relação de grandeza entre as penetrações superior/inferior são maiores do que 3 vezes, enquanto que para juntas com tubos de 3,0 mm as relações são maiores que 2 vezes. O local da solda não causou interferência nas medidas de penetrações das lentes.

As trincas só ocorreram nas chapas superiores, sendo que elas surgiram e se intensificaram com as maiores corrente de soldagem. Não se nota uma clara tendência com a variação do local da solda, uma vez que em tubos de 2,0 mm as trincas na borda são maiores (valor médio de 73 μm) do que no meio (valor médio de 15 μm), enquanto que para os tubos de 3,0 mm as trincas são maiores no meio (valor médio de 232 μm) do que nas bordas (valor médio de 31 μm). As trincas foram maiores em tubos de 3,0 mm, tanto para pontos no centro como na borda.

Com aumento da corrente aumentaram os diâmetros de lente para todas as condições analisadas. As juntas com tubos de 2,0 mm apresentaram valor médio dos diâmetros de lente de 6,5 mm para soldas realizadas no centro do tubo e 5,9 mm para soldas realizadas na borda. Já os tubos de 3,0 mm apresentaram valores de 5,6 mm para o centro e 5,5 para as bordas.

O local da solda influenciou nos valores do diâmetro de lente, de modo que as soldas realizadas no centro apresentaram diâmetro de lente 10% maior para juntas com tubos de 2,0 mm e 2% maior para juntas com tubos de 3,0 mm. A espessura também influenciou nos valores de diâmetro de lente, de modo que as juntas com tubos de 2,0 mm apresentaram valor médio 12% maior do que as juntas de 3,0 mm.

As cargas de tração axial máxima das juntas tendem a aumentar com a corrente de soldagem para as duas espessuras de juntas e para soldas no centro. Os resultados obtidos podem ser observados na figura 7.18.

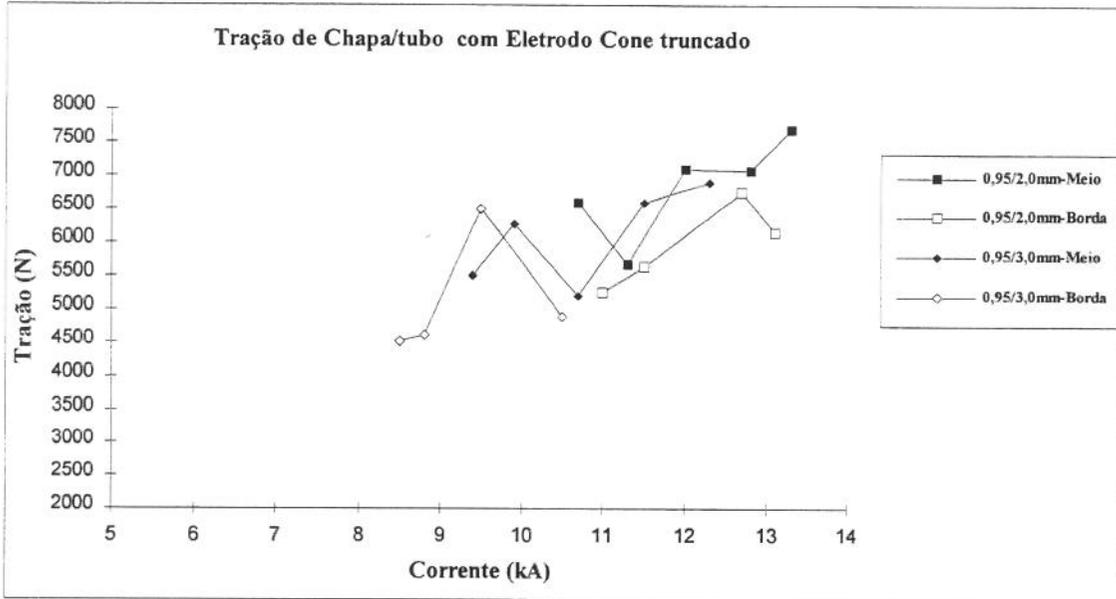


Figura 7.18: Carga de tração axial máxima versus corrente de soldagem para juntas de chapa/tubo, com espessuras de tubos de 2,0 e 3,0 mm, obtidas com par de eletrodos 5/16mm, soldas no centro e na borda dos CP's.

Os valores médios das cargas de tração axial máxima para as juntas com tubos de 2,0 mm foram de 6830 N para soldas nos centros e 5940 N para soldas nas borda; portanto, as cargas das soldas no centro são 15% mais resistentes. Para as juntas com tubos de 3,0 mm os valores médios das cargas de tração foram 6090 N para soldas no centro e 5130 N para soldas na borda; logo, as cargas de tração dos pontos no centro são 19% mais resistentes. Deste modo as duas espessuras de tubos apresentaram maiores cargas de tração para pontos realizados no centro dos tubos.

Comparando os resultados das cargas de tração com relação às espessuras dos tubos, verifica-se que as juntas com tubos de 2,0 mm apresentaram um valor médio em torno de 14% maior do que as juntas com tubos de 3,0 mm.

O valor do torque máximo das juntas tendem a aumentar com o aumento da corrente de soldagem. Os resultados obtidos, podem ser observados na figura 7.19.

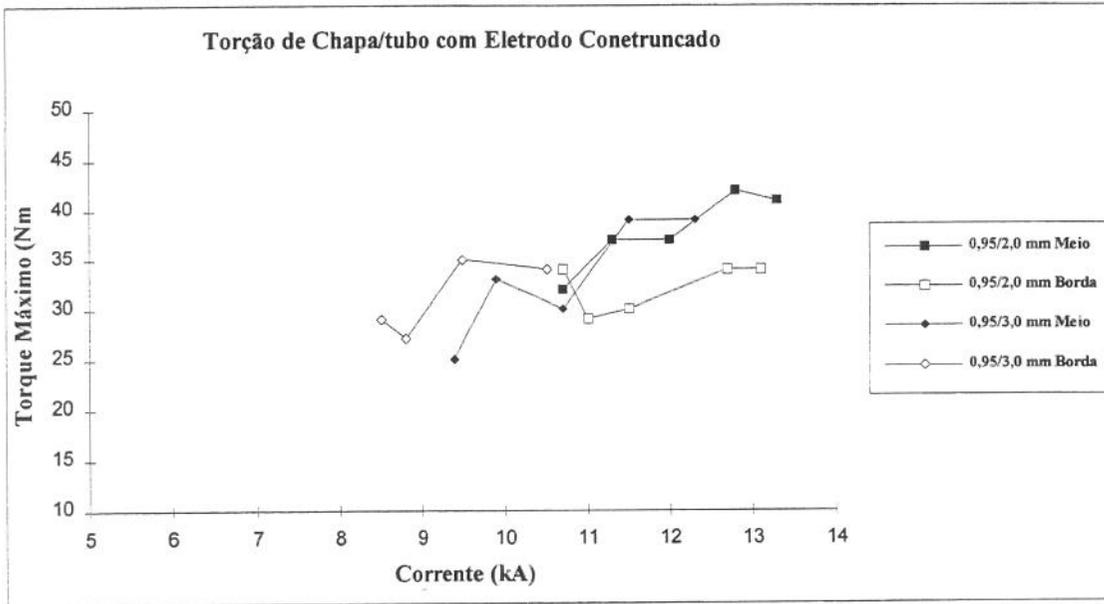


Gráfico 7.19: Torque máximo versus corrente de soldagem para juntas chapa/tubo, com tubos de 2,0 e 3,0 mm de espessura, obtidas com o par de eletrodo 5/16 mm, pontos no centro e nas bordas dos CP's.

O valor médio do torque máximo foi 38 Nm para as juntas com tubos de 2,0 mm e soldas no meio e 32 Nm para soldas na borda, comparando estes valores, o torque máximo para solda no centro é 19 % maior. Para as soldas em tubos de 3,0 mm o valor médio foi 33 Nm para soldas no meio e 31 Nm para soldas na borda; nestas juntas o torque máximo para soldas no centro é 6% maior. Comparando, ainda, os resultados de torque com relação às espessuras das juntas, o aumento da espessura dos tubos apresentou valores 9% menores.

Os pontos de solda submetidos aos testes de tração e torção, fraturaram 100 % na forma de botão para tubos de 2,0 mm e 3,0 mm de espessura, o que indica boas condições de soldagem.

De um modo geral, a soldagem em tubos de 2,0 mm e 3,0 mm de espessura, com eletrodo superior cone truncado, resultou em amplo intervalo de soldagem, (2,0 kA), apesar dos tubos de 2,0 mm apresentarem alguma deformação (máximo de 1,4 mm) na altura interna. Não há vazios em nenhum ponto de solda, e só há trincas nas chapas de 0,95 mm com a corrente de expulsão. Apesar das deformações, vazios e trincas, os valores de tração axial máxima e torque máximo foram altos, com 100% de fratura em botão, indicando boas condições de soldagem. A solda na

borda também apresentou boas condições de soldagem uma vez que apresentaram altas cargas de tração, torque e fratura 100 % em botão.

Influência da Espessura dos Tubos e Local da Solda com Eletrodo Esférico

Utilizou-se chapa superior com 0,95 mm de espessura, zincada, eletrodo superior esférico de raio = 12 mm, eletrodo inferior plano com $\phi = 16$ mm (12/16), força entre eletrodos de 2800 N. Variou-se a espessura dos tubos em 1,5, 2,0 e 3,0 mm, sendo todos eles fosfatizados; variou-se também o local da solda, de modo que cada espessura de tubo foi soldada ora na borda ora no meio, resultando em 6 intervalos de soldagem. Os resultados das soldas em tubos de 1,5 mm estão comentados abaixo, e os resultados das soldas em tubos de 2,0 e 3,0mm estão nas tabelas 7.18, 7.19, 7.20 e 7.21 e figuras 4.20 e 4.21.

Tabela 7.18: Resultado da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 2,0 mm fosfatizado; solda no centro dos CP's; par de eletrodos 12/16; F = 2800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	ϕL (mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
9,3	3,9	0,7	-	- / -	B/B	25	5380
9,9	4,0	0,8	-	- / -	B/B	25	4840
10,7	4,1	0,8	61/9	31/ -	B/B	24	7200
11,3	5,1	0,8	-	- / -	B/B	28	5760
12,0	5,1	1,0	71/19	123/ -	B/B	26	5420
12,9	5,7	1,0	74/28	154/ -	B/B	29	7100
13,2	6,5	1,0	-	- / -	B/B	33	5950

Tabela 7.19: Resultado da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 2,0 mm fosfatizado; solda na borda dos CP's; par de eletrodos 12/16; F = 2800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	φL(mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μm)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
9,4	5,9	0,7	65/7	113/ -	B/B	30	5200
9,8	5,5	0,7	65/20	- / -	B/B	30	5150
10,7	4,8	0,8	71/17	21/ -	B/B	34	5720
11,5	6,2	0,7	-	154/ -	B/B	33	6540
12,3	6,4	0,7	45/1	- / -	B/B	34	6880

Tabela 7.20: Resultado da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 3,0 mm fosfatizado; solda no centro dos CP's; par de eletrodos 12/16; F = 2800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	φL(mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μm)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
8,0	4,4	0,1	54/18	51/ -	B/I	14	3370
8,9	4,8	0,2	52/22	61/ -	B/B	24	4400
9,5	5,1	0,2	58/31	102/ -	B/B	36	6250
10,4	5,4	0,1	58/22	113/ -	B/B	39	7120

Tabela 7.21: Resultado da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 3,0 mm fosfatizado; solda na borda dos CP's; par de eletrodos 12/16; F = 2800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	φL(mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μm)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
6,8	3,9	0,0	45/18	- / -	B/B	33	4100
7,7	4,5	0,1	63/24	56/ -	B/B	35	4520
8,5	4,6	0,1	61/27	92/ -	B/B	39	5170
9,0	4,4	0,0	90/28	102/ -	B/B	30	4470

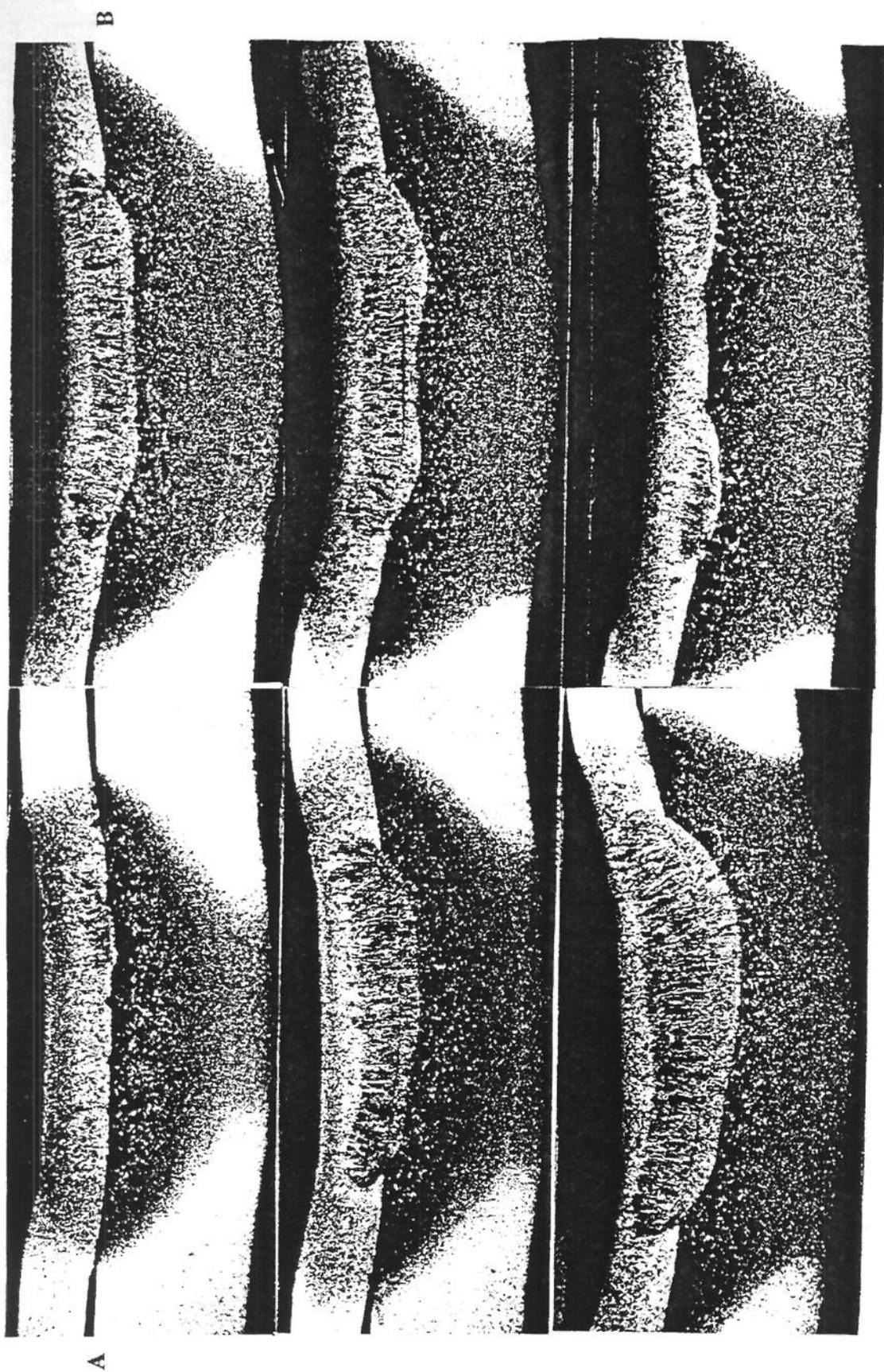


Figura 7.20: Sequencia metalográfica das soldas de chapa/tubo. F=2800 N, $t_s=15$ ciclos, eletrodos 12/16, variando corrente: 9,3 kA, 10,7 kA, 12,9 kA para 0,95/2,0 mm no centro (A); e 9,4 kA, 10,7 kA, 12,3 kA para 0,95/2,0 mm na borda (B). Nital 3%, 12,5x.

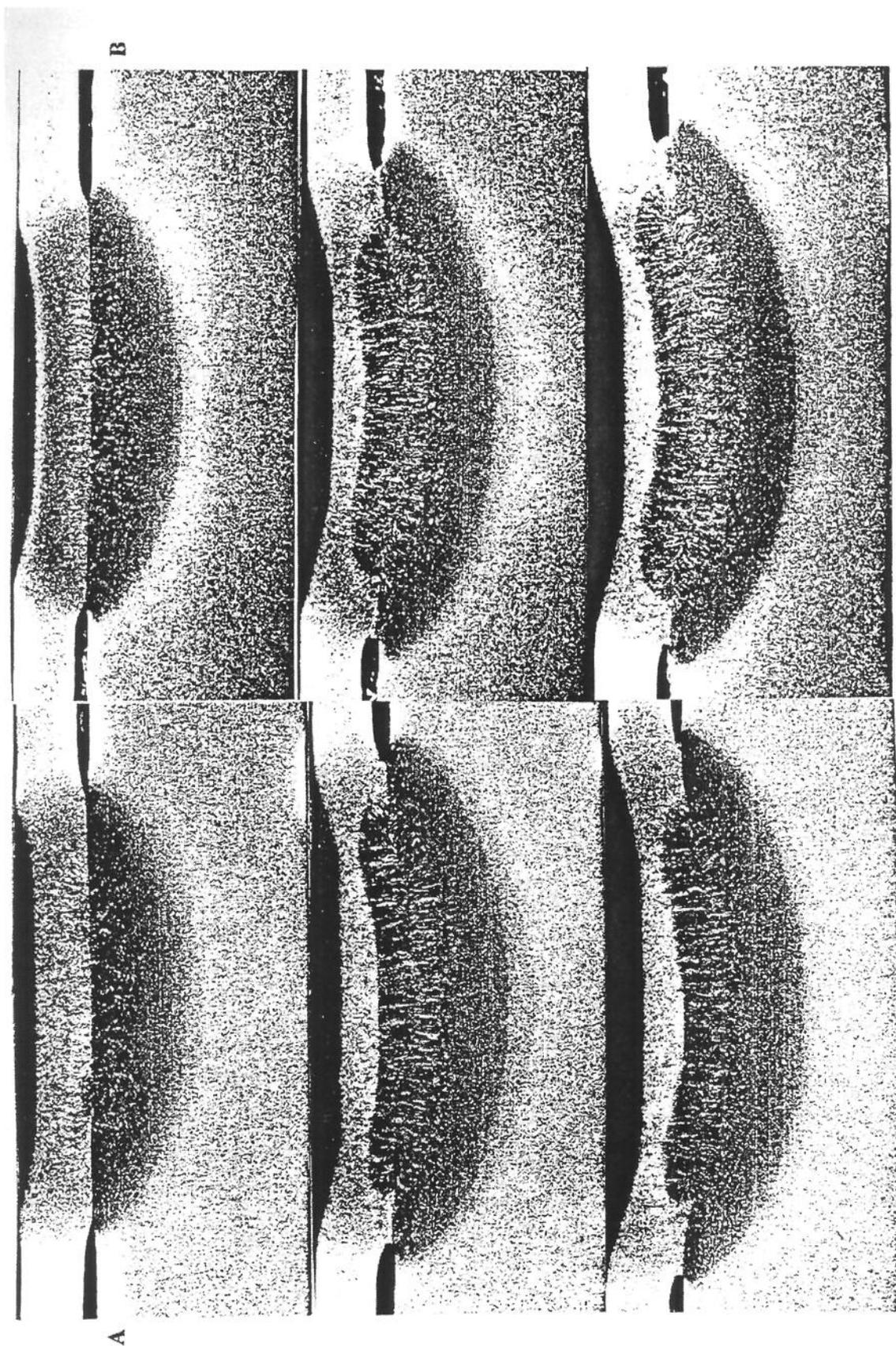


Figura 7.21: Sequencia metalográfica das soldas de chapa/tubo. $F=2800$ N, $t_s=15$ ciclos, eletrodos 5/16, variando corrente: 8,0 kA, 9,5 kA, 10,4 kA para 0,95/3,0 mm no centro (A); e 6,3 kA, 7,7 kA, 9,0 kA para 0,95/3,0 mm, na borda (B). Nital 3%. 12,5x.

A solda de chapas de 0,95 mm sobre tubos de 1,5 mm não foi possível ser executada apenas com a mudança da geometria do eletrodo superior, utilizando os parâmetros de soldagem dos testes anteriores, os quais foram os mesmos para a soldagem de chapa/chapa. Houve deformação do tubo com redução de 4,0 mm na altura interna e o desprendimento da chapa superior.

As correntes iniciais de soldagem para as juntas com tubo de 2,0 mm de espessuras foram semelhantes tanto para as soldas realizadas no centro como na borda (9,3 kA), mas a corrente inicial de soldagem em chapa/tubo de 3,0 mm foi maior quando os pontos foram no centro (8,0 kA) do que quando na borda (6,8 kA). Assim, em juntas com tubos de 3,0 mm, o local da solda influenciou na corrente inicial de soldagem de modo que as soldas no centro foram 18% maiores. Pode-se notar também que os valores de corrente diminuíram com a espessura do tubo, de modo que as juntas com tubos de 2,0 mm necessitaram de corrente 26% maior.

Os intervalos de corrente obtidos também foram menores para as maiores espessuras de tubo, tanto para soldas realizadas no centro como na borda. Os valores obtidos para juntas com tubos de 2,0 mm foram de 3,9 e 2,9 kA para pontos no centro e na borda, respectivamente, e para juntas com tubos de 3,0 mm foram 2,4 kA e 2,2 kA para pontos no centro e na borda.

As juntas com tubos de 2,0 mm apresentaram deformação no interior dos tubos, sendo que as deformações aumentaram com a corrente de soldagem. O mesmo não ocorreu para as juntas com tubos de 3,0 mm, as quais não deformaram com o aumento da corrente de soldagem. Comportamento semelhante às soldas com eletrodo cone truncado.

Os valores médios das deformações no interior dos tubos soldados com 2,0 mm de espessura foram, respectivamente, de 1,0 mm e 0,7 mm para pontos de solda no centro e borda das juntas; portanto, as deformações no centro foram 40% maiores. As juntas chapa/tubo de 3,0 mm apresentaram os valores de 0,2 mm para ponto no centro e 0,1 mm para ponto na borda. Para menores espessuras dos tubos as deformações permanentes foram maiores, assim como são menores as deformações para os pontos na borda. As deformações em tubos de 2,0 mm foram de 2 a 3 vezes maiores.

Observando a seqüência metalográfica dos pontos de solda obtidos com o par de eletrodos 12/16 mm nas figuras 7.20 e 7.21, para os valores mais baixos de corrente, as juntas com tubos de 2,0 mm e 3,0 mm não apresentaram poças de fusão nas lentes de solda, mas existem estruturas colunares na interface chapa/tubo (ZF), as quais estão circundadas por uma grande área de grãos equiaxiais grosseiros(ZTA); após esta região se encontra o metal de base em seu estado inicial, com grãos equiaxiais pequenos.

Com maiores correntes de soldagem, as lentes estão bem definidas para as duas espessuras de tubos; contudo para as juntas com tubos de 2,0 mm, solda na borda e correntes de expulsão, vê-se que as lentes de soldagem apresentam-se divididas em duas. Os pontos de solda apresentam ZF na interface de contato chapa/tubo (constituída de grãos colunares) a qual é circundada pela ZTA (constituída de grãos equiaxiais grosseiros); após esta região, o metal de base está em seu estado inicial.

A linha final de solidificação das lentes se encontra curva, de modo que não coincide com as interfaces de contato chapa/tubo. Nelas não há vazios para nenhuma das condições de soldagem acima mencionadas.

Também nestas soldas, as poças fundidas são assimétricas com relação à interface de contato chapa/tubo. A assimetria é observada com penetrações maiores nas chapas superiores de 0,95 mm de espessura. Para as duas espessuras e locais de solda, as medidas de penetração da lente de solda aumentaram com a corrente. Para juntas com tubos de 2,0 mm, a relação de grandeza entre as penetrações superior/inferior variam de 2 a 9 vezes, enquanto que para juntas com tubos de 3,0 mm as relações são 2 vezes maiores. O local da solda não causou interferência nas medidas de penetração das lentes.

Nestas soldas, as trincas só existem nas chapas superiores e se intensificam com o aumento da corrente de soldagem. As juntas com tubos de 3,0 mm de espessura apresentaram valor médio de 82 μm para soldas no centro e 63 μm para soldas nas bordas. As juntas com tubos de 2,0 mm apresentaram valor médio de 44 μm para soldas no centro e 58 μm para soldas nas bordas.

Os diâmetros de lente aumentaram com a corrente de soldagem nas situações testadas. Os diâmetros médios para as juntas com tubo de 2,0 mm foram 4,9 mm e 5,7 mm, respectivamente para soldas no centro e na borda; para juntas de tubo de 3,0 mm foram de 4,9 mm e 4,3 mm, respectivamente para soldas no centro e na borda. Observando estes resultados, parece que para maiores espessuras de tubos, menores são os diâmetros de lente, pois as juntas com tubos de 2,0 mm apresentaram valores médios de diâmetros de lente 15 % maiores que para os tubos de 3,0 mm. O local das soldas não apresentou uma correlação muito clara, uma vez que em juntas com tubos de 2,0 mm os valores médios foram maiores para soldas na borda, enquanto que para juntas com tubos de 3,0 mm os maiores valores foram para soldas no centro.

As cargas de tração tendem a aumentar com a corrente de soldagem para a maioria dos pontos testados, exceto para as juntas com tubos de 2,0 mm e para ponto no centro, sendo que os valores oscilaram muito. Os resultados obtidos estão na figura 7.22.

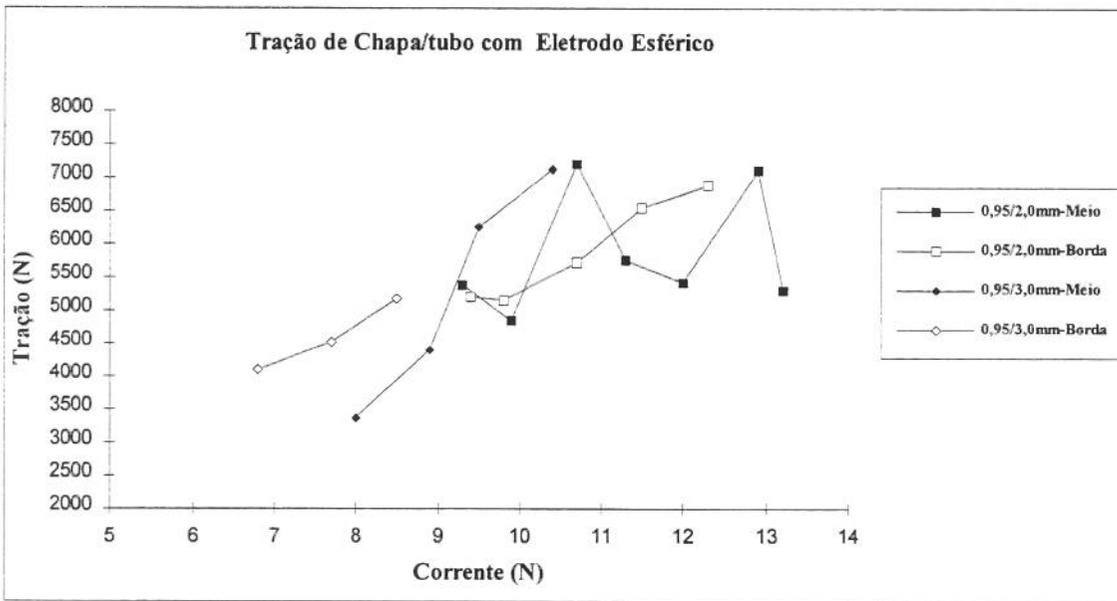


Figura 7.22: Tração axial máxima versus corrente de soldagem de juntas de chapa/tubo, com espessuras de tubos de 2,0 e 3,0 mm, obtidas com o par de eletrodos 12/16 mm, e pontos no centro e na borda dos CP's.

Os valores médios obtidos para as juntas com tubos de 2,0 mm, foram de 5860 N para pontos no centro e de 5900 N para pontos na borda, não havendo variações com relação ao local da solda para estes tubos. As juntas de tubo de 3,0 mm apresentaram os valores de 5290 N para as

soldas no centro e de 4570 N para soldas na borda; portanto, as soldas no centro suportaram cargas 16 % maiores para os tubos de 3,0 mm. E, comparando os resultados de carga de tração para as duas espessuras de juntas, os valores médios das cargas para juntas com tubos de 2,0 mm foram 19 % maiores.

O torque máximo obtido destes pontos de solda também tende a aumentar com a corrente de soldagem, sendo que somente em uma das condições de soldagem estudadas - tubo de 3,0 mm com ponto na borda - ocorreu a redução do torque com a corrente de expulsão. Os resultados obtidos podem ser observados na figura 7.23.

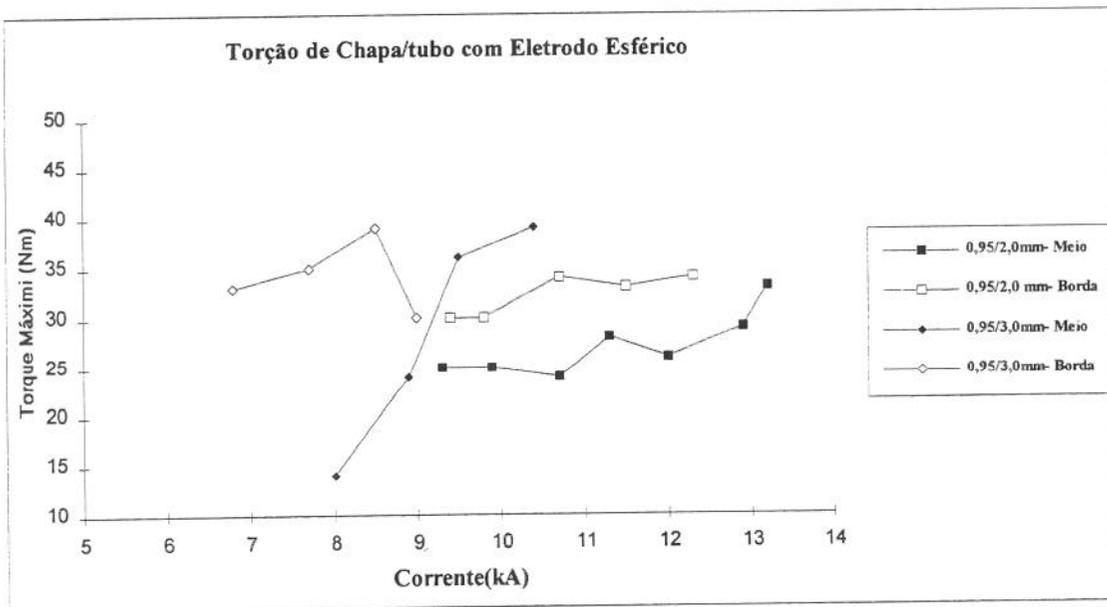


Figura 7.23: Torque máximo versus corrente de soldagem de juntas de chapa/tubo, com espessuras de tubos de 2,0 e 3,0 mm, obtidas com o par de eletrodos 12/16 mm, e pontos no centro e na borda dos CP's.

Os valores médios obtidos foram 27 Nm e 32 Nm para tubos de 2,0 mm, respectivamente para solda no centro e na borda; para tubos de 3,0 mm foram 28 Nm e 34 Nm, respectivamente para soldas no centro e na borda. Estes resultados mostram que, para as duas espessuras de tubos, as soldas no centro apresentaram torque máximo 19% menor que na borda. Quanto à variação com a espessura do tubo, os valores médios de torque foram bastante semelhantes, sendo que os tubos de 3 mm apresentaram valores apenas 3% maiores.

A forma da fratura dos pontos de solda submetidos aos testes de tração máxima e torque máximo foram predominantemente na forma de botão, para as duas espessuras de tubos e independente do local das soldas. Somente as soldas com tubos de 3,0 mm e ponto no centro apresentaram 25% de fratura em botão nos testes de torção, para pontos de solda obtidos com baixa corrente. As fraturas em botão dos pontos de solda após os testes de tração e torção ocorreram por cisalhamento das chapas de 0,95 mm de espessura.

Esses testes de soldagem apresentaram resultados semelhantes aos obtidos com eletrodos cone truncado, para as mesmas espessuras de tubo. De um modo geral, pode-se obter amplo intervalo de soldagem (2,2 kA), com alguma deformação no interior dos tubos de 2,0 mm (máximo de 1,4 mm). As lentes de solda apresentam poça de fusão na interface chapa/tubo, com melhor delineamento. Vazios não são observados, mas existem trincas nas chapas de 0,95 mm com a corrente de expulsão. As cargas de tração axial máxima e torque máximo foram altas, sendo que houve apenas 25% de fratura interfacial, as quais ocorreram para pontos obtidos com baixa corrente de soldagem. Os pontos na borda apresentaram comportamento semelhante aos pontos no centro, com suficiente resistência mecânica e alta incidência de fratura em botão, o que viabiliza a soldagem nesta região.

Influência do Suporte Não Condutor no Interior do Tubo

Com o objetivo de viabilizar a soldagem em tubos de 1,5 mm, bem como conhecer melhor a influência da espessura dos tubos na formação do ponto de solda, foram realizados alguns experimentos utilizando o suporte não condutor mencionado no capítulo 6 deste trabalho.

Com as condições anteriormente experimentadas, não foi possível soldar chapas de 0,95 mm sobre tubos de 1,5 mm de seção quadrada 30X30 mm², com os mesmos parâmetros definidos para solda de chapa/chapa. Observou-se que os corpos de prova do tubo após serem submetidos às condições de soldagem se deformavam, com redução da altura interna das paredes, além de não se fixarem às chapas. Deste modo, investigou-se a possibilidade de impedir a deformação no interior dos tubos, introduzindo o suporte não condutor no seu interior antes da soldagem.

Utilizou-se chapa superior com 0,95 mm de espessura, zincada, tubo de 1,5 mm, fosfatizado, força entre eletrodos de 2800 N, pares de eletrodos 5/16 e 12/16 mm e o suporte não condutor no interior do tubo. Variou-se o local da solda, de modo a ter solda no centro ou borda dos CP's com eletrodo cone truncado e soldas no centro ou na borda dos CP's com eletrodo esférico. Os resultados obtidos estão nas tabelas 7.22, 7.23, 7.24 e 7.25, e nas figuras 7.24 e 7.25.

Tabela 7.22: Resultado da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 1,5 mm fosfatizado; solda no centro dos CP's; par de eletrodos 5/16; F = 2800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	ϕ L(mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
9,5	-	0,1	-	- / -	I/I	15	660
10,1	6,5	0,0	-	- / -	B/B	35	4980
10,5	6,8	0,1	-	56/ -	B/B	38	4380

Tabela 7.23: Resultado da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 1,5 mm fosfatizado; solda na borda dos CP's; par de eletrodos 5/16; F = 2800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	ϕ L(mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
9,3	6,3	0,0	-	- / -	B/B	34	4720
9,7	6,1	0,2	-	31/ -	B/B	39	4730
10,5	6,6	0,1	52/47	- / -	B/B	39	5160

Tabela 7.24: Resultado da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 1,5 mm fosfatizado; solda no centro dos CP's; par de eletrodos 12/16; F = 2800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	ϕ L(mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
7,9	-	0,2	-	- / -	I/I	15	-
8,3	-	0,2	-	51/ -	I/I	10	2280
9,1	5,4	0,1	-	- / -	B/B	31	680
9,5	6,2	0,2	80/11	77/ -	B/B	35	4360
10,3	6,0	0,1	80/19	77/ -	B/B	34	5550

Tabela 7.25: Resultado da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 1,5 mm fosfatizado; solda na borda dos CP's; par de eletrodos 12/16; F = 2800 N; ts = 15 ciclos.

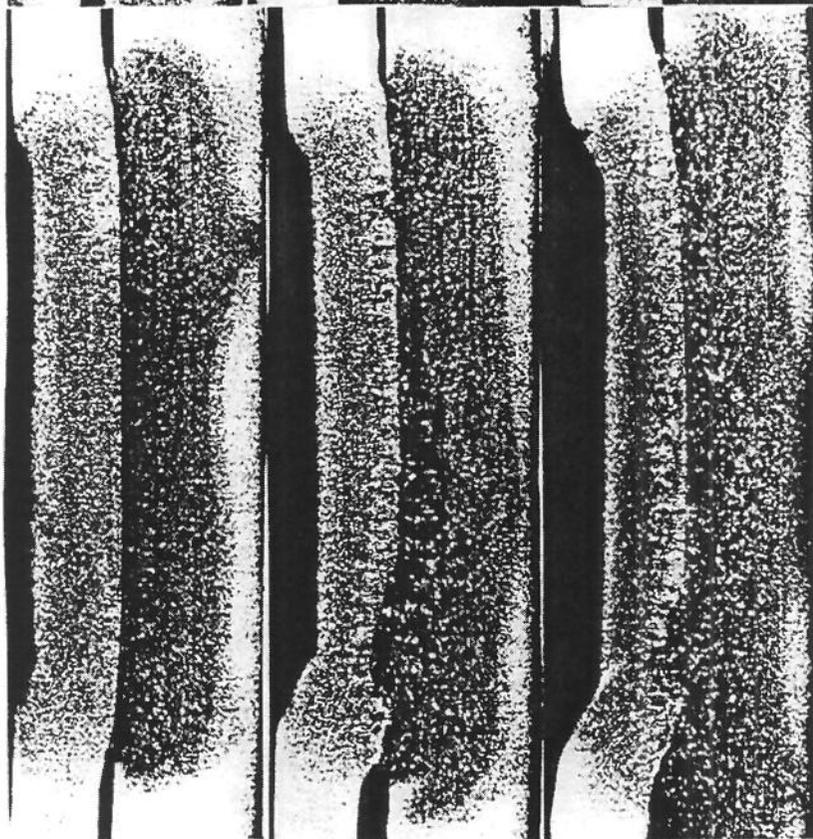
I (kA)	ϕL (mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μm)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
7,9	5,6	0,1	-	- / -	B/B	31	2790
8,4	5,9	0,1	45/38	- / -	B/B	37	4140
9,1	5,7	0,0	74/44	46/ -	B/B	37	4880
9,9	5,7	0,2	78/44	72/ -	B/B	39	3990

As correntes iniciais de soldagem não variaram com o local da solda. Com o uso de eletrodos (5/16 mm) a corrente necessária foi 9,3 kA , sendo de 7,9 kA para eletrodos (12/16 mm). Pode-se notar que reduzindo-se a área do eletrodo reduziram-se as correntes de soldagem em 19 %. Os intervalos de soldagem foram menores para eletrodos 5/16 (em torno de 1,0 kA) e maiores para eletrodos 12/16 (em torno de 2,0 kA).

Nestes testes utilizando o suporte não condutor, as deformações no interior dos tubos com redução da altura interna foram desprezíveis, em torno de 0,1 mm, tanto para soldas no meio como na borda para as duas geometrias de eletrodos. Não houve acréscimo das deformações com maiores valores de corrente. Uma vez que o suporte no interior do tubo impediu que ocorressem as deformações.

Observando as seqüências metalográficas dos pontos de solda nas figuras 7.24 e 7.25, quando se utilizou o par de eletrodos 5/16 mm com ponto no centro, não se obteve clara formação da lente de solda. A macroestrutura apresenta pequenas regiões de grãos colunares na interface de contato chapa/tubo envolvidos por uma grande área de grãos equiaxiais maiores do que do MB. As soldas realizadas na borda definiram um pouco mais as lentes de solda, apresentando lente em um canto da interface de contato chapa/tubo, constituídas de grãos colunares (ZF), os quais são envolvidos por grãos equiaxiais maiores do que os do metal de base.

A



B

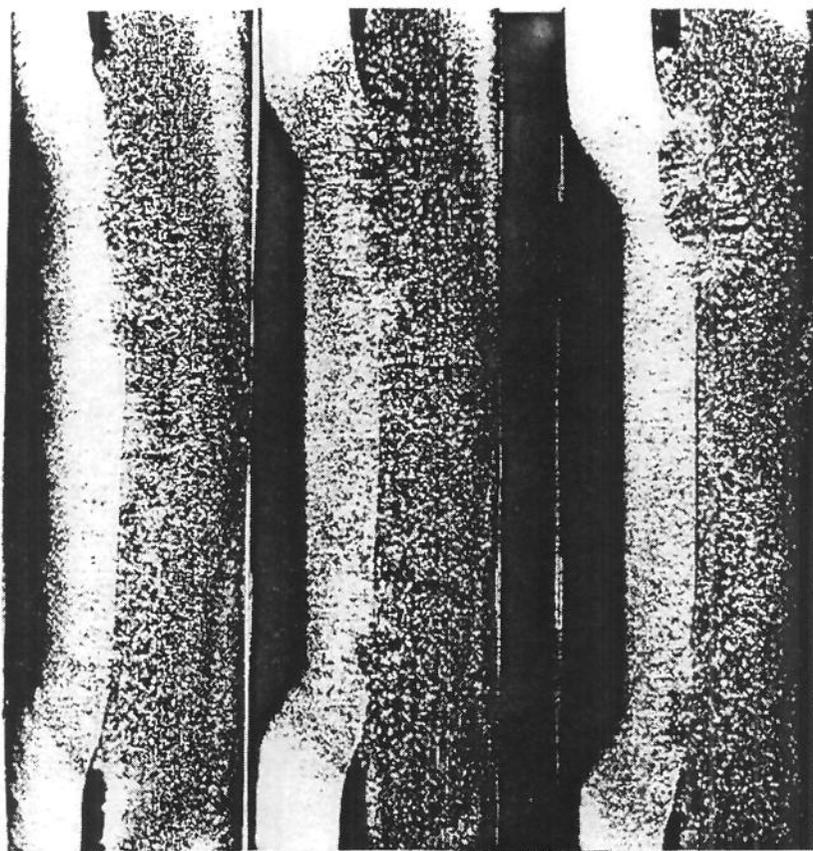


Figura 7.24: Sequencia metalográfica das soldas de chapa/tubo, com suporte não condutor no interior dos tubos, $F=2800$ N, $t_s=15$ ciclos, eletrodos 5/16, variando corrente: 9,5 kA, 10,1 kA, 10,5 kA para 0,95/1,5 mm, no centro (A); e 9,3 kA, 9,7 kA, 10,5 kA para 0,95/1,5 mm, na borda (B). Nital 3%. 12,5x.

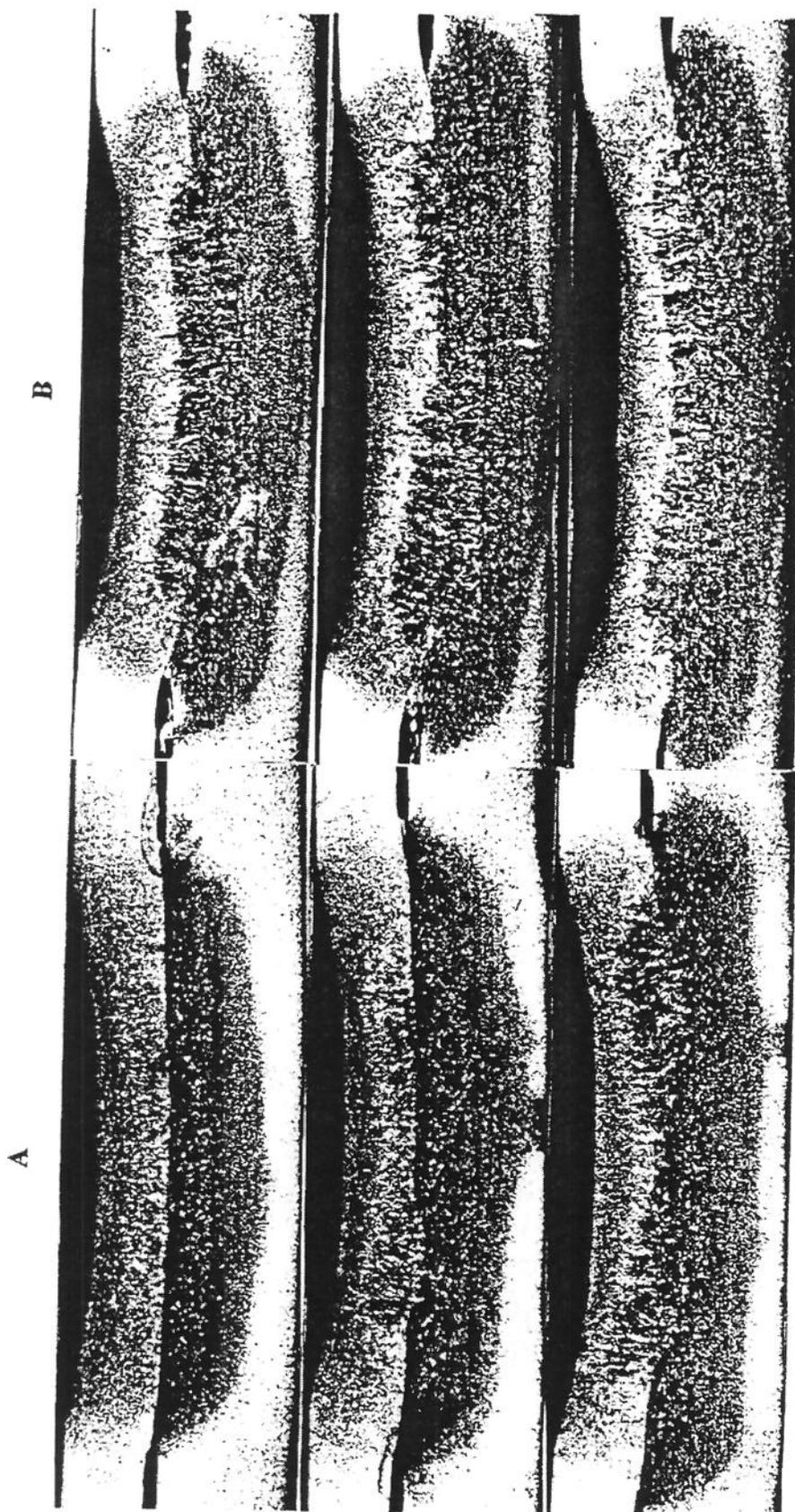


Figura 7.25: Sequencia metalográfica das soldas de chapa/tubo, com suporte não condutor no interior dos tubos, $F=2800\text{ N}$, $t_s=15$ ciclos, eletrodos 12/16, variando corrente: 8,3 kA, 9,5 kA, 10,3 kA para 0,95/1,5 mm, no centro (A); 8,4 kA, 9,1 kA, 9,9 kA para e para 0,95/1,5 mm, na borda. Nital 3%. 12,5x.

Quando se utilizou o par de eletrodos 12/16 mm houve uma melhor formação das lentes, sendo que as soldas nas bordas apresentam-se melhor delineadas do que as soldas no meio. A macrografia das lentes de solda é constituída de grãos colunares na interface chapa/tubo (ZF), os quais são circundados por grãos equiaxiais (ZTA) maiores do que os do metal de base.

O mau delineamento das lentes de solda ocorreu pela menor eficiência de extração de calor da junta tanto por parte dos eletrodos com pela própria massa metálica das peças soldadas, de modo a não existir uma mudança brusca nas estruturas macrográficas da ZTA para a ZF.

Nenhum ponto de solda apresentou vazios e as linhas finais de solidificação estão mais próximas da interface de contato chapa/tubo.

As medidas de penetração não puderam ser realizadas nas juntas obtidas com o par de eletrodos 5/16 mm. Já nas juntas obtidas com eletrodos 12/16 mm, as penetrações foram maiores para as chapas superiores do que para as inferiores, sendo que estas crescem com a corrente de soldagem. A relação de grandeza entre as penetrações superior e inferior para as soldas obtidas com o par de eletrodos 12/16 mm e pontos no centro foi de 4 a 7 vezes maior nas chapas superiores; para os pontos na borda foi de 1,2 a 1,8 vezes maior. Portanto, os pontos nas bordas apresentaram menor assimetria das lentes de solda.

As trincas só apareceram nas chapas superiores e se intensificaram com as correntes de soldagem mais altas. Quando se utilizou o par de eletrodos 5/16 mm, as trincas só existiram para altas correntes de soldagem, com dimensões de 56 μm para soldas no centro e 31 μm para solda nas bordas. Com o par de eletrodos 12/16 mm as trincas surgiram com menores valores de corrente e suas dimensões foram de 68 μm para soldas no centro e 59 μm para soldas na borda. Portanto, as trincas foram maiores com a utilização do par de eletrodos 12/16 e para soldas no centro dos CP's.

Com acréscimo da corrente, os diâmetros de lente foram maiores. Os valores médios obtidos quando se utilizou o par de eletrodos 5/16 mm, foram de 6,7 mm para soldas no centro e 6,3 para soldas nas bordas, os quais são maiores do que os obtidos quando se utilizou o par de

eletrodos 12/16 mm, cujas valores foram de 5,9mm para soldas no centro e 5,7mm para soldas na borda.

Os diâmetros de lente sofreram pequena influência com o local da solda, uma vez que as soldas no centro apresentaram diâmetro de lente aproximadamente 5% maiores do que as soldas na borda. Já a geometria dos eletrodos apresentou maior influência, uma vez que os diâmetros de lente com eletrodos cone truncado foram aproximadamente 12% maiores do que com o esférico.

De um modo geral, as cargas de tração axial máxima dos pontos de solda tendem a aumentar com a corrente de soldagem, sendo que somente a junta obtida com o par de eletrodo 12/16 e ponto na borda apresentou queda na tração para a corrente de expulsão. Os resultados obtidos podem ser observados na figura 7.26.

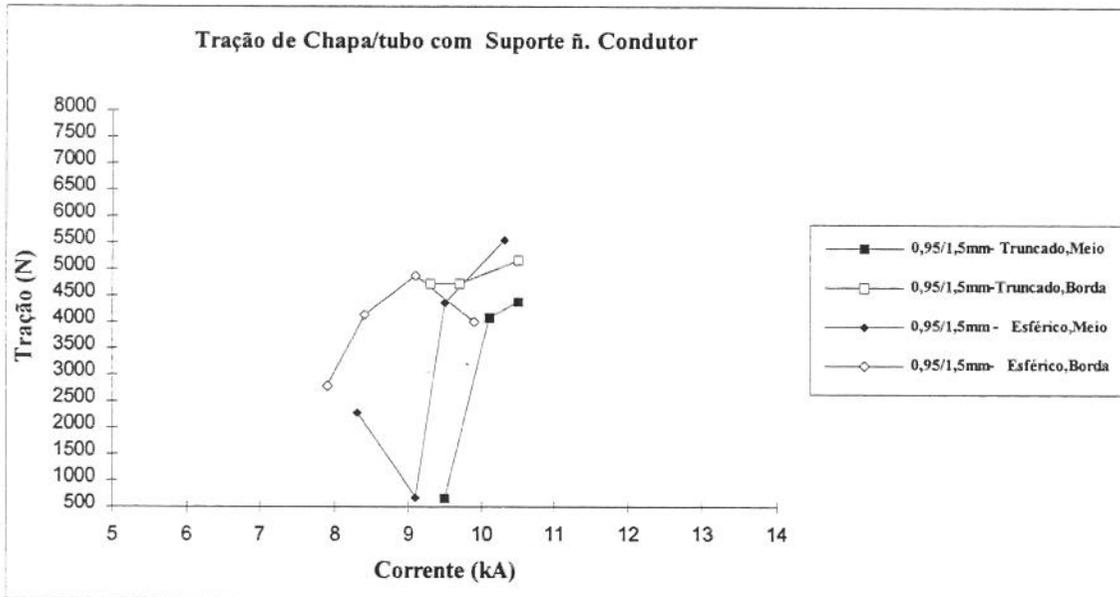


Figura 7.26: Tração axial máxima versus corrente de soldagem de juntas de chapa/tubo, com espessuras de tubos de 21,5 mm, obtidas com dois pares de eletrodos: 5/16 mm e 12/16 mm, com pontos no centro e na borda dos CP's.

Os valores médios obtidos para as soldas realizadas com eletrodos 5/16 mm foram de 3340 N (ponto no centro) e 4870 N (ponto na borda); portanto, as cargas nas bordas foram 45 % maiores. Já para os pontos realizados com os eletrodos de 12/16 mm, os valores médios das cargas foram de 3210 N (ponto no centro) e 3950 N (ponto nas bordas). Nestes testes, as cargas

nas bordas foram 23 % maiores. Comparando as cargas de tração das juntas obtidas com diferentes geometrias de eletrodos, as juntas obtidas com eletrodos cone truncado apresentaram cargas 15 % maiores.

O torque máximo obtido nos testes de torção dos pontos de solda sofreu acréscimo com maiores valores da corrente de soldagem. Os resultados obtidos podem ser observados na figura 7.27

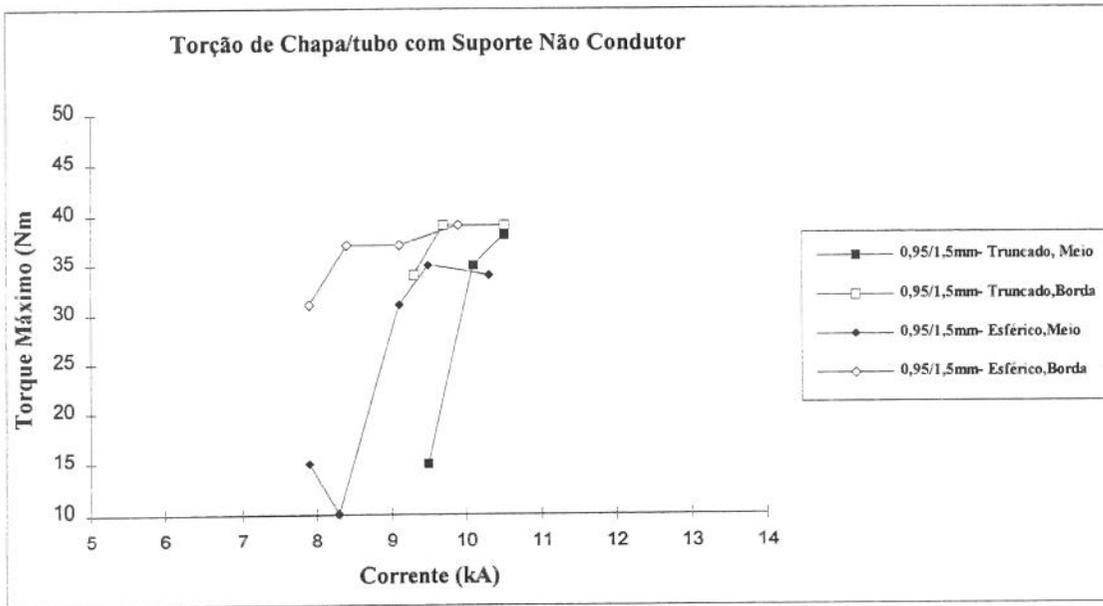


Figura 7.27: Torque máximo versus corrente de soldagem de juntas de chapa/tubo, com espessuras de tubos de 1,5 mm, obtidas com dois pares de eletrodos: 5/16 mm e 12/16 mm, com pontos no centro e na borda dos CP's.

As soldas realizadas com eletrodos 5/16 mm apresentaram valores médios de torque máximo de 29 Nm e 37 Nm, respectivamente para pontos de soldas no centro e na borda. Os pontos de solda obtidos com eletrodos 12/16 mm apresentaram valores médios de torque máximo de 25 Nm e 36 Nm, respectivamente para soldas no centro e na borda dos CP's.

Os valores médios de torque máximo variaram com o local da solda e com a geometria dos eletrodos. Os pontos obtidos com o par de eletrodos (5/16 mm) apresentaram valor médio 8% maior do que com eletrodo (12/16 mm). A solda na borda apresentou valores de 28 % e 44% maior, respectivamente para soldas com os pares de eletrodos (5/16 mm) e (12/16 mm).

As fraturas dos pontos de soldas submetidos aos testes de tração e torção foram predominantemente na forma de botão. Contudo, para as menores corrente de soldagem e pontos no centro, houve 30 % e 40 % de fraturas interfaciais, respectivamente soldas com eletrodos 5/16 mm e 12/16 mm. Os demais pontos de solda fraturaram 100% em botão. As fraturas em botão dos testes de tração e torção ocorreram por cisalhamento das chapas de 0,95 mm.

Estabelecendo uma relação entre a macroestrutura dos pontos de solda com o comportamento de tração, torção e fratura dos pontos de solda, podemos verificar que as soldas na borda apresentaram lente com nítida região de grãos colunares na interface de contato chapa/tubo, logo resultaram em cargas de tração 15% maior, torque 8% maior e 100% de fratura em botão. Já as soldas no centro, com pequena área de grãos colunares, resultaram em menor tração e torque, e 30 % de fratura interfacial. Assim, as estruturas presentes na lente de solda são determinantes nas cargas de tração, torque e modo de fratura.

De um modo geral, as soldas em tubo de 1,5 mm de espessura obtidas com os parâmetros inicialmente determinados, foram viabilizadas com a utilização de um suporte não condutor no interior dos tubos para impedir a deformação dos mesmos. Assim, as juntas apresentaram um razoável intervalo de soldagem (maior que 1,0 kA), sendo que com a utilização do par de eletrodo (12/16 mm) as correntes de soldagem foram 20% menores. Houve uma melhor formação de lente de solda quando se utilizou o par de eletrodos (12/16 mm) e pontos na borda. Não existem vazios nos pontos de solda, mas existem trincas nas chapas 0,95 mm com altas correntes de soldagem. Quando se utilizou o par de eletrodos 5/16 mm, o valor médio dos diâmetros de lente foi 12 % maior, a carga de tração axial máxima foi 20 % maior e o torque máximo 8 % maior. Os pontos na borda apresentaram tração axial máxima e torque máximo 20 % maior que no centro. A fratura dos pontos de solda na borda foi 100% em botão e no centro foi 70 %, o que viabiliza a soldagem nesta região.

O processo desenvolvido neste trabalho para soldagem de tubos de 1,5 mm de espessura, utilizando o suporte não condutor no interior do tubo, é viável de ser aplicado em ambiente industrial para tubos com dimensão de até 1,0 m de comprimento.

Influência da Força entre Eletrodos e do Local da Solda Para Eletrodos Cone Truncado e Esférico

Utilizou-se chapa superior com 0,95 mm de espessura, zincada, tubo de 1,5 mm, fosfatizado, força entre eletrodos de 800 N e eletrodo inferior plano de $\phi = 16$ mm. Variou-se o local da solda, e a geometria do eletrodo superior, de modo que cada experimento foi realizado com a seguinte combinação: solda no centro e na borda dos CP's com eletrodo cone truncado; solda no centro e borda dos CP's com eletrodo esférico. Os resultados obtidos estão nas tabelas 7.26, 7.27, 7.28, 7.29 e nas figuras 7.28, 7.29, 7.30 e 7.31.

Tabela 7.26: Resultado da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 1,5 mm fosfatizado; solda no centro dos CP's; par de eletrodos 5/16; F = 800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	ϕL (mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
10,6	5,6	0,6	-	246/ -	B/I	18	3780
11,0	6,8	0,8	-	364/ -	B/B	33	3580
11,8	6,4	0,7	-	888/ -	B/B	31	4240
12,5	7,5	0,9	-	486/ -	B/B	34	3340
12,8	7,1	0,9	-	617/ -	B/B	30	4510

Tabela 7.27: Resultado da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 1,5 mm fosfatizado; solda na borda dos CP's; par de eletrodos 5/16; F = 800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	ϕL (mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
10,6	5,9	0,5	-	128/ -	B/B	25	3870
10,9	6,2	0,7	-	282/ -	B/B	27	4050
11,4	6,6	0,7	-	179/ -	B/B	29	4310
11,9	6,5	0,7	-	220/ -	B/B	35	4160
12,1	6,5	0,8	-	281/ -	B/B	35	4350
12,5	6,2	0,8	-	486/ -	B/B	22	2880

Tabela 7.28: Resultado da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 1,5 mm fosfatizado; solda no centro dos CP's; par de eletrodos 12/16; F = 800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	ϕL (mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
9,5	5,5	0,5	75/15	164/ -	I/B	25	3050
9,9	6,0	0,7	83/25	220/ -	B/B	30	2970
10,5	6,0	1,0	-	461/ -	I/B	30	4660
11,1	6,0	0,8	-	230/ -	B/B	34	4460
11,6	6,2	-	-	384/ -	B/B	40	3900
12,0	7,1	1,0	-	358/ -	B/B	41	4790
12,5	7,6	1,1	-	512/ -	B/B	42	5180

Tabela 7.29: Resultado da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 1,5 mm fosfatizado; solda na borda dos CP's; par de eletrodos 12/16; F = 800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	ϕL (mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
10,9	4,9	0,5	-	230/ -	B/B	33	2920
11,3	-	0,4	-	250/ -	B/B	33	3050
11,7	5,5	0,8	-	281/ -	B/B	31	4560
11,9	5,4	0,7	-	321/ -	B/I	32	4000
12,5	5,4	0,8	-	256/ -	I/B	36	3440
12,9	6,5	0,9	-	333/ -	B/I	36	4940
13,1	6,5	1,4	-	445/ -	B/I	38	4810

As correntes iniciais de soldagem para obtenção destas juntas foram de 10,6 kA quando se utilizou o par de eletrodos 5/16 mm. Já para o par de eletrodos 12/16 mm, as correntes iniciais de soldagem foram de 9,5 kA para soldas no centro e 10,9 kA para soldas na borda . Os intervalos de corrente foram de aproximadamente 2,0 kA, exceto para soldas no centro com eletrodos 12/16 mm, cujo valor foi de 3,0 kA.

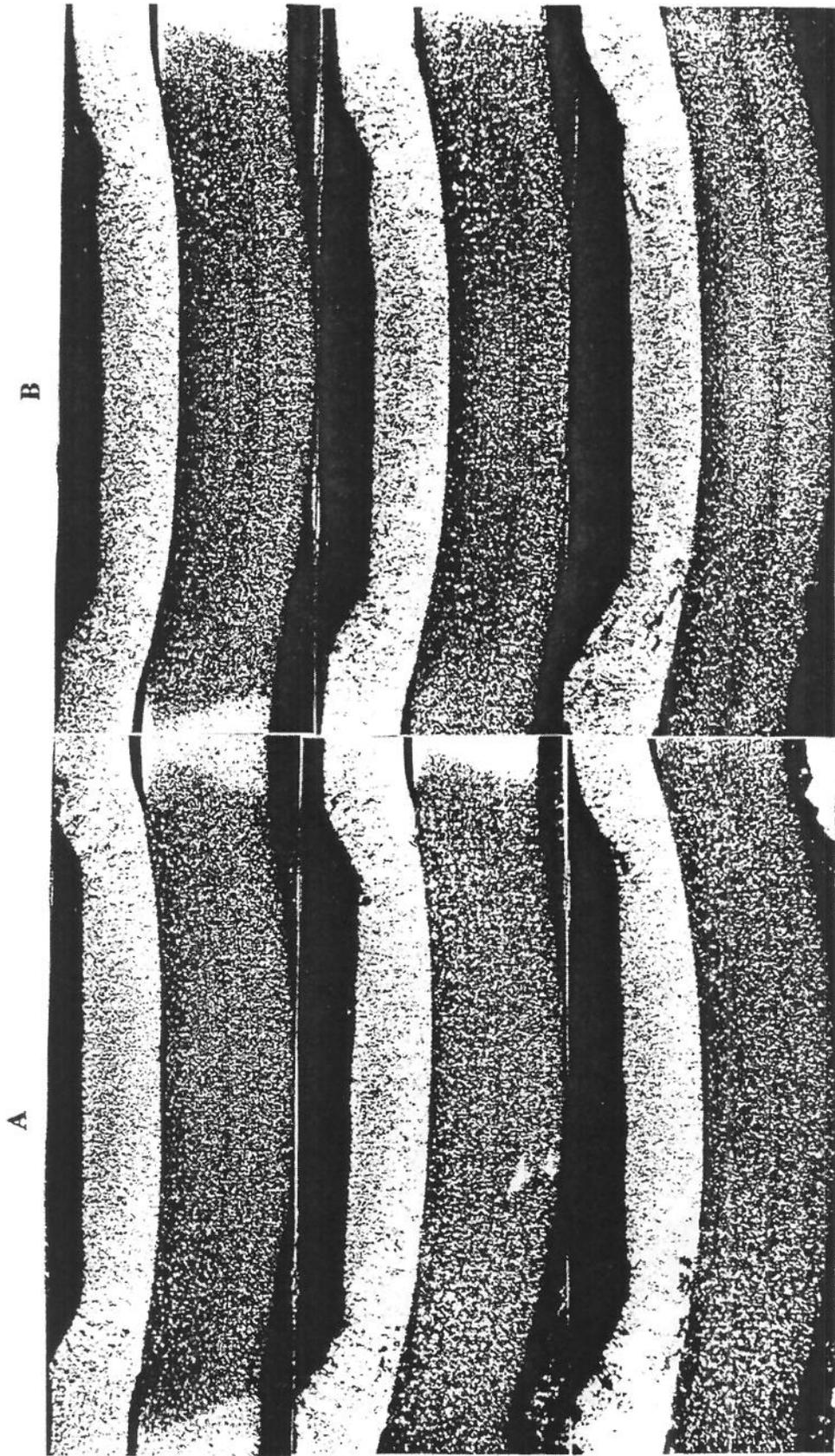


Figura 7.28: Sequencia metalográfica das soldas de chapa/tubo, com $F=800$ N, $ts=15$ ciclos, eletrodos 5/16, variando corrente: 11,0 kA, 12,5 kA, 12,8 kA para 0,95/1,5 mm, no centro (A); e 10,6 kA, 11,4 kA, 12,5 kA, para 0,95/1,5 mm, na borda (B). Nital 3%. 12,5x.

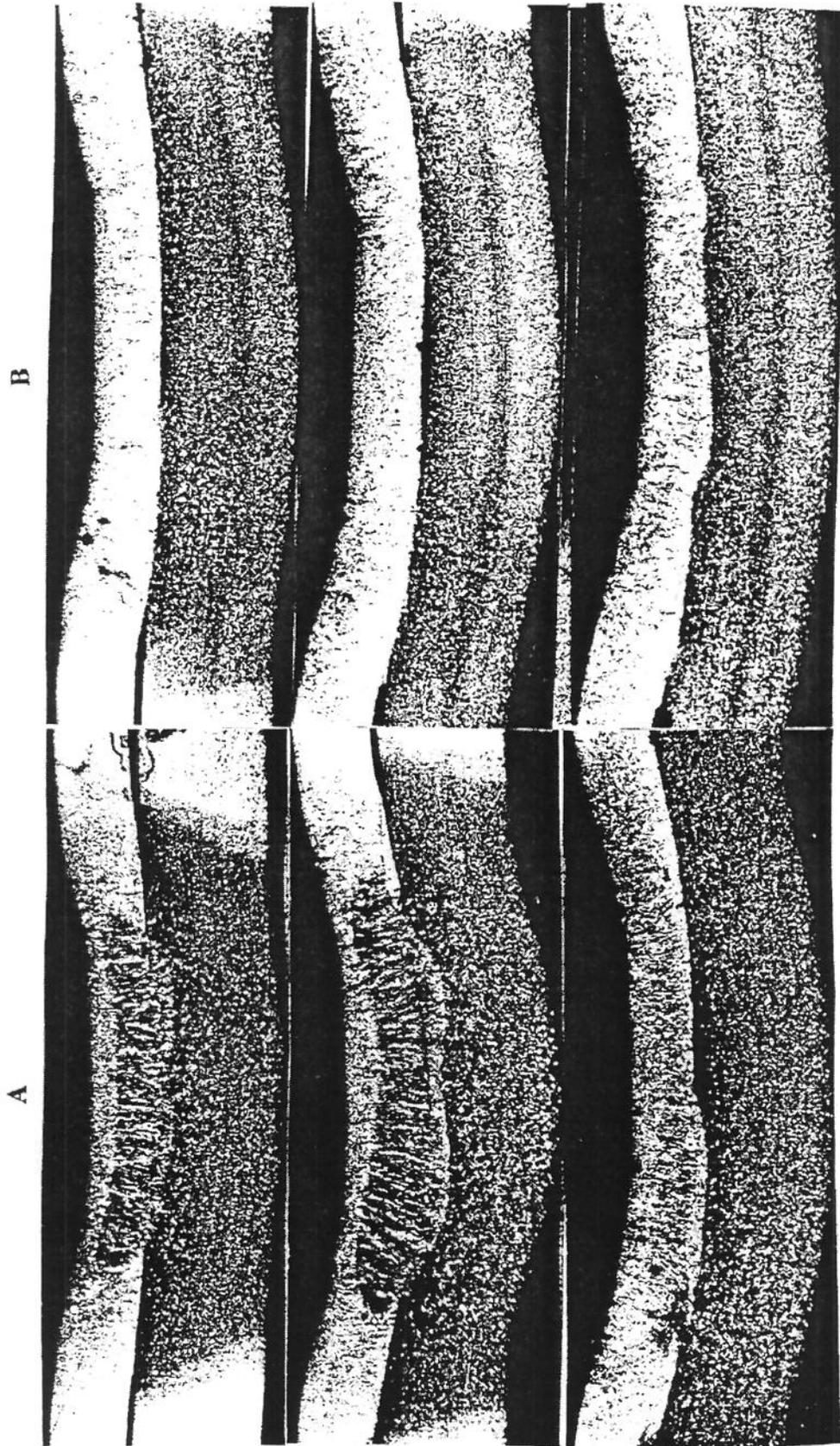


Figura 7.29 : Sequencia metalográfica das soldas de chapa/tubo obtidas com $F=800$ N, $t_s=15$ ciclos, eletrodos 12/16 , variando corrente: 9,5 kA, 10,5 kA, 12,5 kA, para 0,95/1,5 mm, no centro (A); e 10,9 kA, 11,9 kA, 13,1 kA, para 0,95/1,5 mm, na borda (B). Nital 3%. 12,5x.

As deformações aumentaram com a corrente para todos pontos de solda, sendo que os valores médios foram próximos. Quando se utilizou eletrodos (5/16 mm) os valores médios das deformações foram de 0,8 e 0,7 mm para soldas no centro e na borda respectivamente. Quando se utilizou eletrodos (12/16 mm) os valores das deformações foram de 0,9 e 0,8 mm para soldas no centro e borda. Nestes casos, as deformações no centro foram 12 % maiores, independentemente da geometria dos eletrodos.

Observando as seqüências metalográficas dos pontos de solda obtidos com o par de eletrodos (5/16 mm) (figuras 7.28 e 7.29), não houve boa formação das lentes em todas as condições de soldagem. A macro estrutura das lentes revelou pequenas regiões na interface de contato entre as chapas com grãos colunares, envolvidos por uma grande área de grãos equiaxiais maiores do que do MB.

A macroestrutura dos pontos de solda realizados com eletrodos 12/16 mm apresentou lente com poça de fusão bem definida somente para soldas no centro, as quais são constituídas de grãos colunares, ZF, circundado por grãos equiaxiais, ZTA. Os demais pontos de solda realizados com esta geometria de eletrodos não delinearam lentes de solda; contudo, se observa claramente a presença de grãos colunares, ZF, ligando a chapa ao tubo, localizados predominantemente nas chapas de 0,95 mm; ao redor desta região se encontram grãos equiaxiais grosseiros.

Para todos os pontos de solda obtidos, não observou-se a formação de vazios no interior das lentes. Nas soldas com eletrodos (5/16 mm) as medidas de penetração não puderam ser obtidas por não ser clara a área fundida das lentes de solda, exceto para duas condições de soldagem mencionadas acima. Nestes casos, as penetrações superiores são de 3 a 5 vezes maiores do que as inferiores.

As trincas surgiram apenas nas chapas superiores, em todas as condições de soldagem, e aumentaram com maiores valores da corrente. Os pontos de solda realizados com eletrodos 5/16 mm apresentaram o valor médio de trinca de 520 μm para solda no centro e 263 μm para soldas na borda. Quando se utilizou eletrodos 12/16 mm os valores médios das trincas foram de 333 μm e 302 μm . Como pode se observar, as trincas foram maiores para soldas com eletrodos cone

truncado assim com para pontos realizados no centro. Quando se utilizou eletrodos truncado as trincas foram 100% maiores no centro.

Os diâmetros das lentes cresceram com as correntes de soldagem. Os pontos obtidos com eletrodos 5/16 mm apresentaram os valores médios de 6,7 e 6,3 mm para soldas no centro e na borda dos CP's, sendo a diferença de 6%. Quando utilizou eletrodos 12/16, os valores médios foram de 6,3 e 5,7 mm para soldas realizadas no centro e borda dos tubos, sendo a diferença de 10%. Comparando os valores médios com relação à geometria de eletrodos, os diâmetros obtidos com 5/16 mm foram 8% maiores.

Os resultados dos testes de tração axial máxima podem ser observados na figura 7.30 e mostram que as cargas de tração tendem a crescer com as correntes de soldagem.

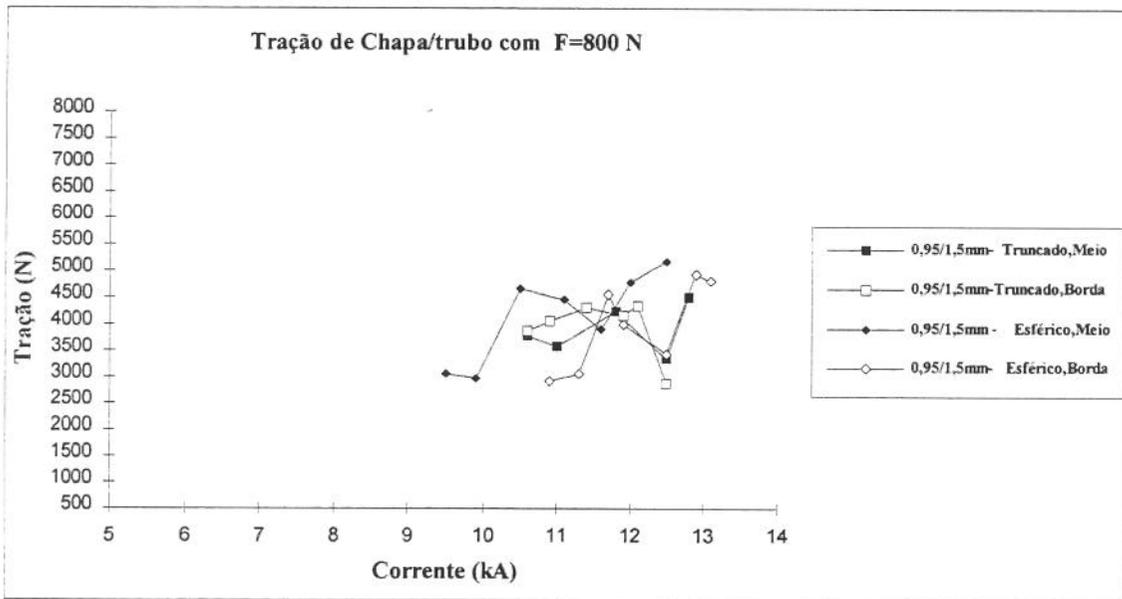


Figura 7.30: Tração axial máxima versus corrente de soldagem de juntas de chapa/tubo, com tubos de 1,5 mm, obtidas com força de 800 N para os dois pares de eletrodos, soldas no centro e na borda dos CP's.

Os valores médios das cargas de tração máxima com o par de eletrodos (5/16 mm) foram 3890 N e 3940 N, respectivamente para soldas no centro e na borda. Quando se utilizou o par de eletrodos 12/16 os valores foram de 4110 N para ponto no centro e 4960 N para ponto na borda. Como pode-se notar as cargas na borda foram maiores, sendo que utilizando o par de eletrodos

5/16 mm as cargas na borda foram apenas 3% maior, enquanto que com eletrodos 12/16 mm as cargas na borda foram 21% maior. A geometria dos eletrodos também influenciou os resultados pois as cargas obtidas dos pontos com eletrodos (5/16 mm) foram 14 % menor do que com o par de eletrodos (12/16 mm).

Os valores de torque máximo dos pontos de solda tendem a aumentar com as corrente de soldagem, sendo que as juntas obtidas com eletrodos 5/16 mm apresentaram uma queda com a corrente de expulsão. Os resultados podem ser observados na figura 7.31.

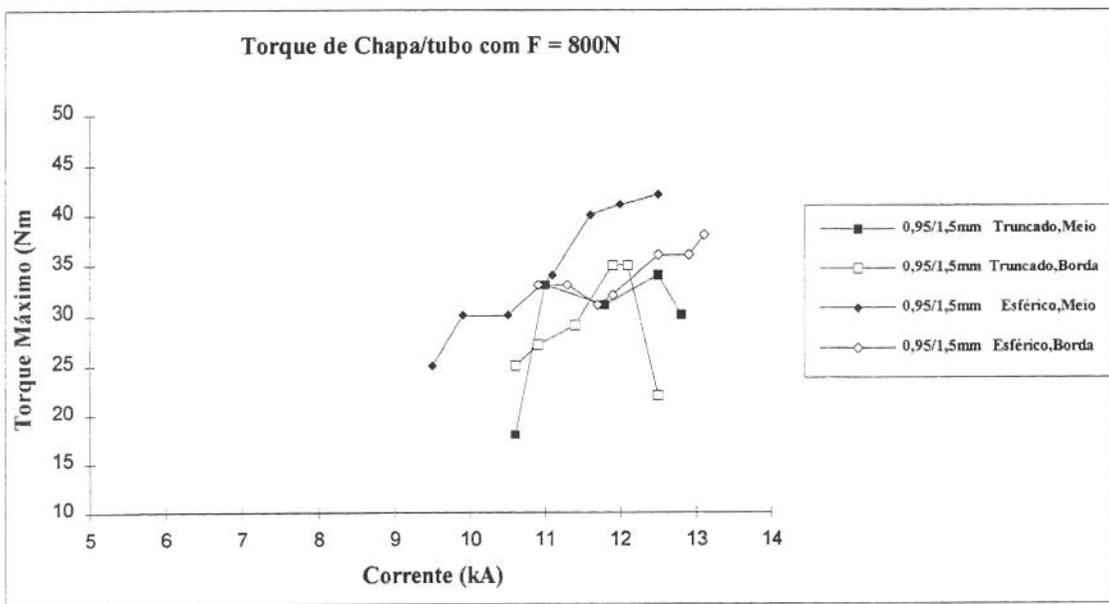


Figura 7.31: Torque máximo versus corrente de soldagem das juntas obtidas com força de 800 N, pares de eletrodos (5/16 mm) e (12/16 mm), soldas no centro e na borda dos CP's.

O valor médio do torque máximo obtido dos pontos de solda realizados com o par de eletrodos (12/16 mm), tanto no centro como na borda, foi 35 Nm. Já os pontos obtidos com o par de eletrodos (5/16 mm), soldas no centro e na borda, apresentaram o valor médio igual a 29 Nm. Deste modo, os torques obtidos com eletrodos esféricos foram 17 % maiores e não houve variação com o local da solda.

As fraturas resultantes dos pontos de solda submetidos tanto aos testes de tração como aos testes de torção foram predominantemente na forma de botão, muito embora tenham ocorrido nos

dois testes fraturas interfaciais. As soldas realizadas com eletrodos (5/16 mm) apresentaram 10% de fraturas interfaciais para pontos no centro e 100% em botão para pontos na borda. Já as soldas realizadas com o par de eletrodos (12/16 mm), com pontos no centro, apresentaram 14 % de fratura interfacial e, com ponto na borda, 28% de fratura interfacial. É interessante observar que as fraturas interfaciais ocorreram com maior incidência quando se utilizou o par de eletrodos (12/16 mm) e para baixas correntes de soldagem.

Os resultados de tração e torção apresentaram comportamento semelhantes, pois os valores médios foram maiores para os pontos obtidos com o par de eletrodos 12/16 mm. Comparando estes resultados com os valores médios de diâmetros de lente, podemos notar que os pontos obtidos com o par 12/16 mm foram 8% menores. Este comportamento pode ser atribuído às estruturas existentes nas lentes de solda, pois quando se utilizou o par de eletrodos 12/16 mm as lentes de solda foram menores mas apresentaram poça de fusão bem definida na interface de contato chapa/tubo, com estruturas colunares, o que deu maior resistência às lentes de solda.

A soldagem em tubos de 1,5 mm, com redução da força para 800 N, conseqüentemente com maior resistência de contato chapa/tubo, resultou em amplo intervalo de soldagem (2,0 kA), apesar de algumas deformações no interior do tubo (máximo de 1,4 mm). Não há presença de vazios, mas houve maior incidência de trincas na chapa de 0,95 mm em decorrência da maior resistência de contato eletrodo/chapa. A utilização do par de eletrodos 12/16 mm resultou em melhor formação da lente de solda com maiores cargas de tração e torção, havendo no máximo 30% de fratura interfacial. As cargas de tração axial máxima e torque máximo foram maiores que o valor limite determinados na literatura especializada.

O processo para soldagem de tubos de 1,5 mm de espessura, reduzindo a força entre eletrodos para 800 N, é viável de ser aplicado em ambiente industrial para tubos de qualquer comprimento.

Influência de Um Suporte Condutor no Interior dos Tubos Com Eletrodo Esférico.

Utilizou-se chapa superior com 0,95 mm de espessura, zincada, tubos de espessuras 1,5, 2,0 e 3,0 mm, fosfatizados, força entre eletrodos de 2800 N, par de eletrodos 12/16 e suporte no

interior dos tubos de cobre eletrolítico. As soldas foram realizadas no centro dos CP's. Os resultados obtidos estão nas tabelas 7.30, 7.31 e 7.32 e nas figuras 7.32 e 7.33.

Tabela 7.30: Resultado da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 1,5 mm fosfatizado; solda no centro dos CP's; par de eletrodos 12/16; condutor de cobre eletrolítico no interior do tubo; F = 2800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	ϕL (mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
7,4	4,3	0,1	32/47	102/ -	I/B	18	-
7,8	5,4	0,2	34/31	- / -	I/B	29	3700
8,9	5,7	0,2	63/83	102/ -	B/B	33	3720
10,3	6,1	0,1	65/85	102/ -	B/B	31	3990

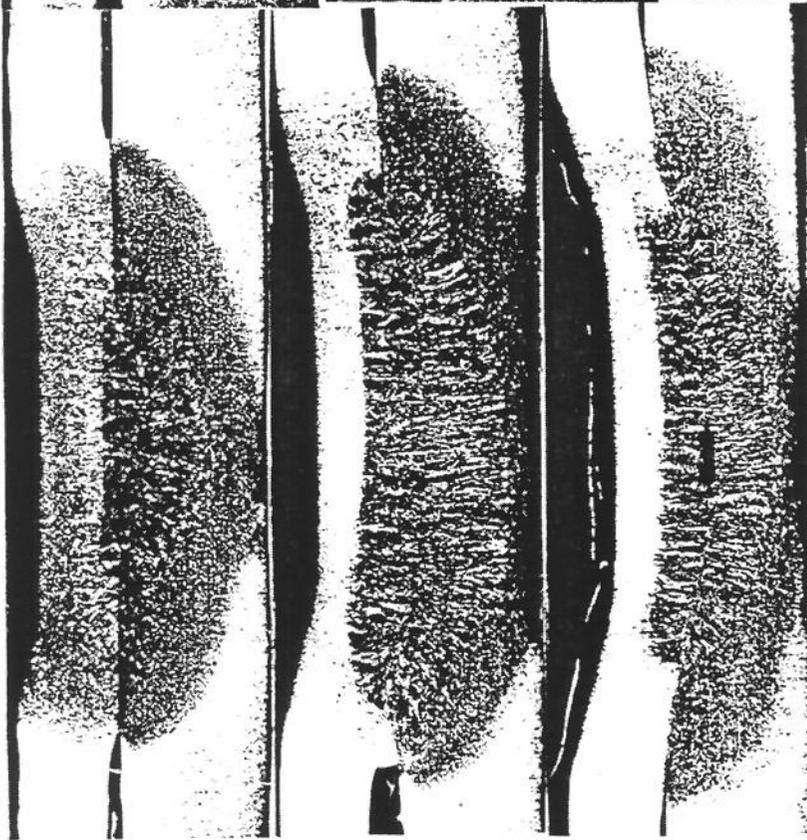
Tabela 7.31: Resultado da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 2,0 mm fosfatizado; solda no centro dos CP's; par de eletrodos 12/16; condutor de cobre no interior do tubo F = 2800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	ϕL (mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
8,0	5,1	0,0	50/20	36/ -	B/B	29	5830
8,5	5,0	0,3	52/22	- / -	B/B	30	6770
9,3	5,2	0,3	56/24	- / -	B/B	26	5410
10,8	6,3	0,3	67/27	133/ -	B/B	38	-

Tabela 7.32: Resultado da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 3,0 mm fosfatizado; solda no centro dos CP's; par de eletrodos 12/16; condutor de cobre eletrolítico no interior do tubo F = 2800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	ϕL (mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
7,9	3,9	0,1	52/48	- / -	I/I	-	5620
8,3	4,8	0,1	61/43	97/ -	B/B	29	6430
9,4	5,7	0,1	67/53	- / -	B/B	40	6500
10,5	5,3	0,1	74/64	- / -	B/B	28	5100

A



B

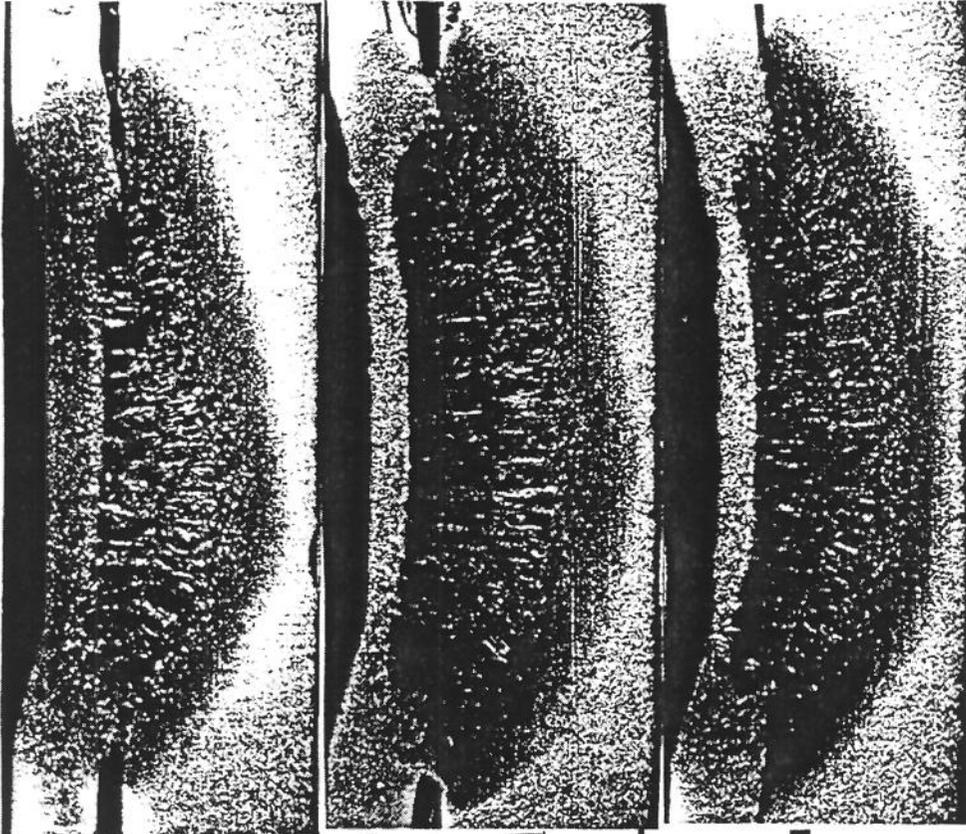


Figura 7.32: Sequencia metalográfica das soldas de chapa/tubo obtidas com suporte condutor no interior dos tubos, $F=2800$ N, $t_s=15$ ciclos, eletrodos 12/16, variando corrente: 7,4 kA, 8,9 kA, 10,3 kA, para 0,95/1,5mm, no centro (A); e 8,0 kA, 9,3 kA, 10,8 kA, para 0,95/2,0 mm, no centro (B). Nital 3%. 12,5x.

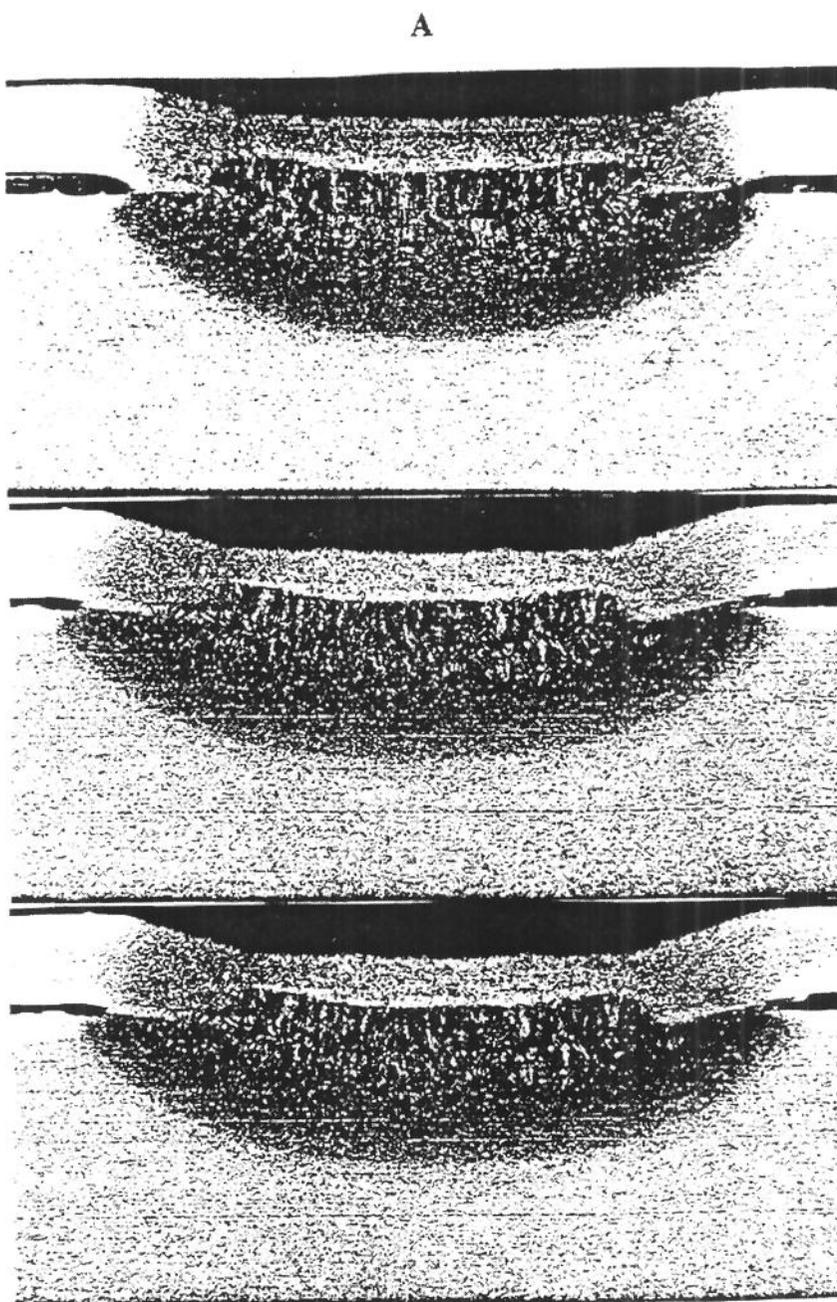


Figura 7.33: Sequencia metalográfica das soldas de chapa/tubo obtidas com suporte condutor no interior dos tubos, $F=2800\text{ N}$, $t_s=15$ ciclos, eletrodos 12/16, variando corrente: 7,9 kA, 9,4 kA, 10,5 kA, para 0,95/3,0 mm, no centro (A). Nital 3%. 12,5x.

As correntes iniciais de soldagem foram próximas para as três espessuras de tubos, sendo os valores 7,4 kA, 8,0 kA e 7,9 kA, respectivamente para as soldas de juntas com tubos de espessuras 1,5, 2,0 e 3,0 mm. Os intervalos de corrente obtidos foram 2,9 kA, 2,8 kA e 2,6 kA, os quais decresceram com o aumento da espessura dos tubos.

As deformações não variaram com maiores valores da corrente de soldagem, para as três espessuras de tubo. O valor médio das deformações foram em torno de 0,2 mm.

As seqüências metalográficas dos pontos de solda nas figuras 7.32 e 7.33, para os três tipos de juntas, mostram que a lente de solda apresenta poça de fusão. As macroestruturas são de natureza semelhantes, ou seja, possuem uma região central fundida (ZF), constituída de grãos colunares, que cresceram no sentido oposto à extração de calor pelos eletrodos. Esta é circundada por grãos equiaxiais grosseiros, caracterizando a ZTA. Estas lentes de solda são semelhantes aos resultados obtidos para as soldas de chapa/chapa com diferentes espessuras (vide figuras 7.9 e 7.10).

Em todas as amostras, a linha final de solidificação está abaixo das interfaces de contato chapa/tubo, e nos pontos de solda das juntas com tubos de 1,5 e 2,0 mm há a presença de vazios nestas linhas. Estes vazios estão presentes com altas correntes de soldagem.

Os valores de penetração cresceram com a corrente de soldagem para as três espessuras de tubo. Podemos notar que a relação de grandeza entre as penetrações superiores e inferiores tem um comportamento distinto para cada espessura de tubos. Nas soldas de chapa/tubo 1,5 mm, as penetrações inferiores são em média 27% maiores do que as penetrações superiores.. Nas soldas de chapa/tudo de 2,0 mm e 3,0 mm , as penetrações superiores são maiores do que do que as inferiores, em torno de 140% e 22%, respectivamente.. Como pode-se notar que quanto maior a espessura dos tubos maior é a tendência de que as penetrações superiores sejam maiores.

As trincas surgiram apenas nas chapas de 0,95 mm. As juntas com tubos de 1,5 mm apresentaram trincas em quase todas as condições de soldagem e o tamanho médio destas foi de 102 μ m. As juntas com tubos de 2,0 mm apresentaram trincas em algumas condições de

soldagem, com tamanho médio de 85 μm . Por fim, as juntas com tubos de 3,0 mm apresentaram trincas em uma condição de soldagem, com tamanho de 97 μm .

Os diâmetros de lente cresceram com a corrente de soldagem para as três espessuras de tubo. Os valores médios para espessuras de 1,5 e 2,0 mm foram de 5,4 mm de diâmetro, enquanto que para tubos de 3,0 mm o valor médio foi menor, 4,9 mm, ou seja 10% menor. Logo, para maiores espessuras menor foi o diâmetro de lente.

As cargas de tração máxima tendem a crescer com a corrente de soldagem, sendo que as juntas com tubos de 2,0 mm e 3,0 mm apresentaram queda na carga de tração axial com a corrente de expulsão, comportamento esperado pela literatura (6). Os resultados das cargas de tração podem ser observados na figura 7.34.

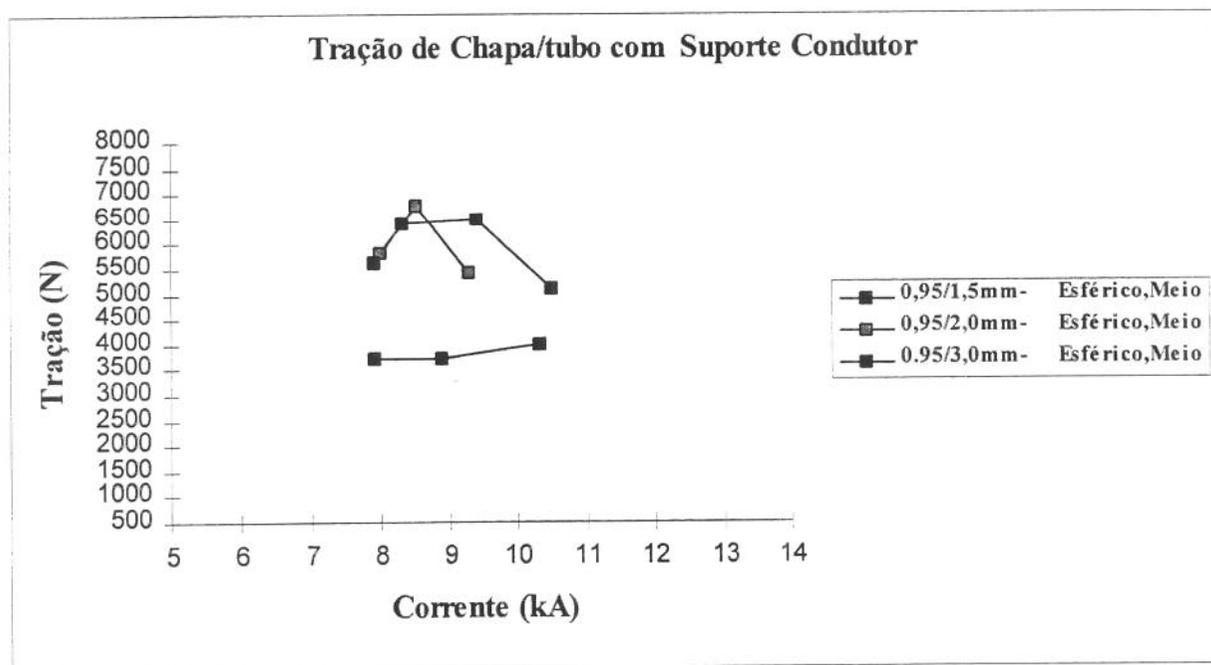


Figura 7.34: Carga de tração axial máxima versus corrente de soldagem de juntas chapa/tubo , para as três espessuras de tubas, obtidos com eletrodos 12/16 mm, solda no centro, suporte condutor no interior dos tubos.

As cargas de tração axial máxima para juntas com tubos de 1,5 mm de espessura, com valor médio de 3800 N, foram 60% menores do que para espessuras de 2,0 e 3,0 mm cujos valores médios foram de 6000 e 5910 N, respectivamente. Portanto, quanto maior a espessura dos tubos, maiores são as cargas de tração axial máxima.

Os valores médios de torque máximo dos pontos de solda tendem a aumentar com a corrente de soldagem, sendo que as juntas com tubo de 3,0 mm apresentaram queda do torque com a corrente de expulsão. Os resultados obtidos estão na figura 7.35.

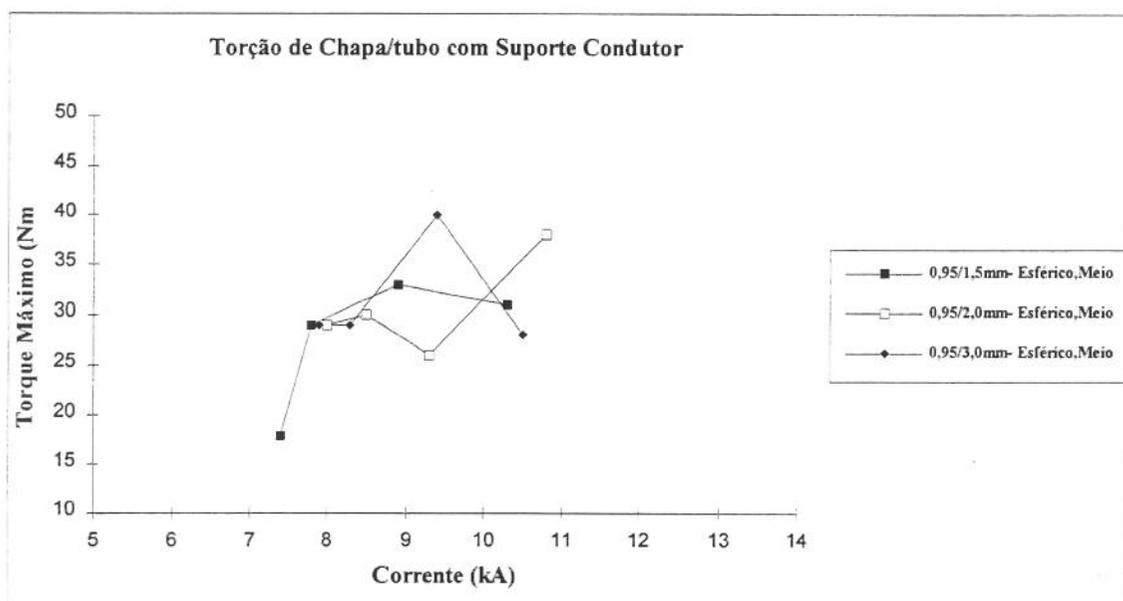


Figura 7.35: Torque máximo versus corrente de soldagem de juntas chapa/tubo , para as três espessuras de tubos, obtidos com eletrodos 12/16 mm, solda no centro, suporte condutor no interior dos tubos.

O comportamento do torque máximo nos pontos de solda foi semelhante às cargas de tração. Para as menores espessuras de tubo, o valor médio foi de 28 Nm e, para os tubos de 2,0 mm e 3,0 mm, os valores médios foram de 31 Nm e 32 Nm, respectivamente. Deste modo o torque médio das juntas com tubos de 1,5 mm foi em torno de 10 % menor do que para as outras duas juntas.

A maioria dos pontos de solda fraturaram em botão tanto nos testes de tração como no de torção. As juntas com tubos de 1,5 mm e 3,0 mm apresentaram 25% de fratura interfacial e, para as juntas com tubos de 2,0 mm, as fraturas foram 100% em botão.

A utilização do suporte condutor no interior do tubo de 1,5 mm, 2,0 mm e 3,0 mm de espessura produziu pontos de solda com características semelhantes aos resultados obtidos de chapa/chapa com as mesmas espessuras. Todos os testes de soldagem apresentaram intervalos de soldagem maiores que 2,5 kA, sem nenhuma deformação no interior dos tubos. As lentes de solda apresentam vazios e trincas nas chapas de 0,95 mm, com altas correntes de soldagem. As cargas de tração máxima e torque máximo são 10% maiores do que as cargas obtidas dos pontos de solda chapa/chapa. Contudo a incidência de fratura interfacial foi maior. Logo, podemos considerar estes pontos de solda com qualidade suficiente.

O processo desenvolvido neste trabalho para soldagem de tubos de 1,5 mm, 2,0 mm e 3,0 mm de espessura, utilizando o suporte condutor no interior do tubo, apresentou características semelhantes às soldas de chapa/chapa, com as mesmas espessuras. Assim, este processo mostrou-se viável de ser aplicado em ambiente industrial para tubos com até 1,0 m de comprimento.

Influência do Percurso da Corrente no Tubo com Eletrodo Superior Cone Truncado e Inferior Peça em "U"

Este experimento foi realizado com o objetivo de evitar o fluxo da corrente de soldagem pelo interior das paredes do tubo, como alternativa ao suporte condutor usado no interior dos tubos.

Utilizou-se chapa superior com 0,95 mm de espessura, zincada, tubos de espessuras 1,5 mm e 2,0 mm, fosfatizados, força entre eletrodos de 800 N, eletrodo superior cone truncado de $\phi = 5$ mm, eletrodo inferior sendo uma peça de cobre para injetar a corrente na parede lateral do tubo. As soldas foram realizadas no centro dos CP's. Os resultados obtidos estão nas tabelas 7.33, 7.34 e na figura 7.36.

Tabela 7.33: Resultado da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 1,5 mm fosfatizado; solda no centro dos CP's; eletrodos superior cone truncado de $\phi = 5\text{mm}$, eletrodo inferior sendo peça de cobre para injetar a corrente na parede lateral do tubo; $F = 800\text{ N}$; $t_s = 15$ ciclos.

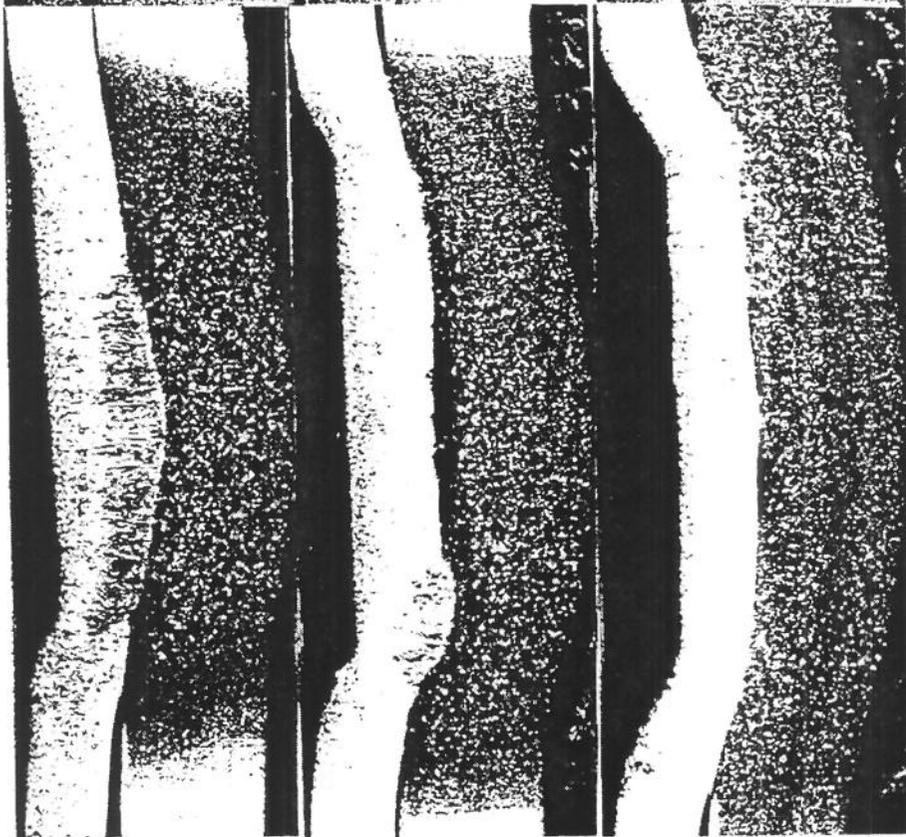
I (kA)	$\phi L(\text{mm})$	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μm)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
9,5	5,3	0,7	75/8	159	I/I	20	2570
9,8	5,8	0,9	-	230	B/B	28	3100
10,7	6,1	0,8	66/8	79	B/B	26	3450
11,2	6,4	1,0	-	118	B/B	33	3620
11,7	6,5	0,9	-	420	B/B	34	4190

Tabela 7.34: Resultado da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 2,0 mm fosfatizado; solda no centro dos CP's; eletrodos superior cone truncado de $\phi = 5\text{mm}$, eletrodo inferior sendo peça de cobre para injetar a corrente na parede lateral do tubo; $F = 800\text{ N}$; $t_s = 15$ ciclos.

I (kA)	$\phi L(\text{mm})$	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μm)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
6,5	4,6	0,3	-	- / -	B/B	21	4480
7,5	-	0,2	47/6	102/ -	I/I	22	3310
8,0	4,9	0,1	63/24	179/ -	B/B	22	4820
8,8	5,4	0,2	63/24	467/ -	B/B	16	3400
9,4	-	0,2	76/26	364/ -	B/B	-	4480

Para espessuras dos tubos de 1,5 mm, as corrente iniciais de soldagem foram 46 % maiores do que para os tubos de 2,0 mm, utilizando o mesmo dispositivo e os mesmos parâmetros. Com o aumento da espessura dos tubos, aumentaram os intervalos de soldagem; os valores foram de 2,2 kA e 2,9 kA, respectivamente para as espessuras de 1,5 e 2,0 mm. Portanto, os tubos de 2,0 mm apresentaram um intervalo de soldagem 32% maior.

A



B

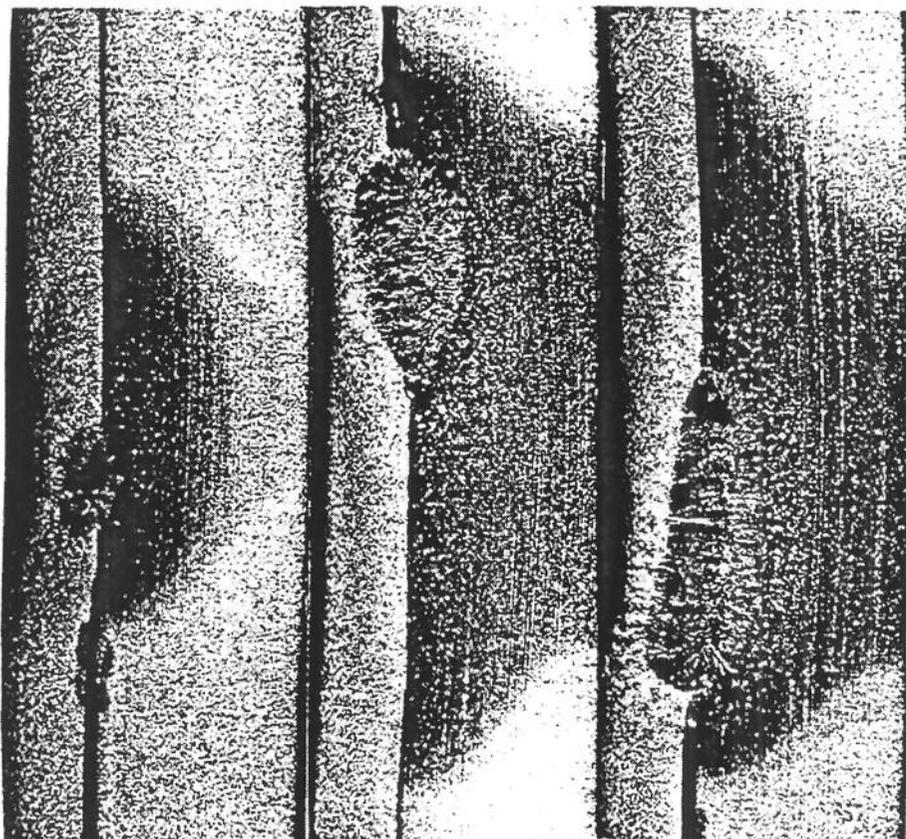


Figura 7.36: Sequencia metalográfica das soldas de chapa/tubo obtidas com eletrodo inferior na forma de U, $F=800$ N, $t_s=15$ ciclos, eletrodos 5mm/peça U, variando corrente: 9,5 kA, 10,7 kA, 11,7 kA para 0,95/1,5 mm, no centro (A); e 7,5 kA, 8,0 kA, 8,0 kA, para 0,95/2,0 mm, centro (B). Nital 3%. 12,5x.

Para as espessuras de 1,5 mm, as deformações no interior dos tubos após a soldagem aumentaram com a corrente de soldagem, tendo um valor médio de 0,9 mm. Para as espessuras de 2,0 mm, as deformações não aumentaram com a corrente. O valor médio obtido foi de 0,2 mm, isto é, uma deformação 3 vezes e meia menor que a do tubo de 1,5mm.

As seqüências metalográficas dos pontos de solda, para juntas com tubos de 1,5 mm de espessura (vide figura 7.36), revelam que, com menores valores de corrente de soldagem, houve formação de lentes com poças de fusão (ZF) constituídas por grãos colunares. Com altas correntes há grãos colunares ligando a chapa ao tubo, muito embora não houve delineamento da lente de solda. Para juntas com tubos de 2,0 mm, houve a fusão da lente para todas as correntes de soldagem, sendo a lente constituída de grãos colunares; contudo, as lentes não são simétricas com relação ao eixo vertical.

Observando a linha final de solidificação, pode-se notar que as juntas com tubos de 1,5 mm não apresentam vazios, enquanto que as soldas em tubos de 2,0 mm apresentam estes vazios, desde baixas valores de correntes de soldagem.

As medidas de penetração superior/inferior foram muito irregulares para juntas com tubos de 1,5 mm de espessura. Elas foram maiores nas chapas de 0,95 mm, sendo que a razão entre penetração superior sobre inferior foi da ordem de 9 vezes . As juntas com tubos de 2,0 mm de espessura apresentam um aumento da penetração com a corrente de soldagem, tendo uma relação de grandeza entre as penetrações superiores/inferiores variável (de 2,6 a 7,8 vezes).

As trincas surgiram apenas nas chapas de 0,95 mm de espessura, crescendo com a corrente. Os valores médios foram 201 μ m e 278 μ m, respectivamente para as juntas com tubos de 1,5 mm e de 2,0 mm. As trincas em juntas com tubos de 2,0 mm foram 38 % maiores.

Os diâmetros de lente aumentaram com a corrente de soldagem, sendo que as juntas de tubo com 1,5 mm de espessuras apresentaram um valor médio de 6,0 mm de diâmetro, valor este maior do que os apresentados para juntas com tubos de 2,0 mm de espessura, cujo valor foi de 5,0 mm de diâmetro. Portanto, os valores médios dos diâmetros de lentes em tubos de 1,5 mm, foram 20% maiores.

Com o aumento da corrente de soldagem, a carga de tração axial máxima dos pontos de solda tenderam ser maiores para as juntas com tubos de 1,5 mm de espessura. O mesmo não ocorreu para as juntas com tubos de 2,0 mm de espessura, cujos resultados, apresentados na figura 7.37, oscilaram bastante.

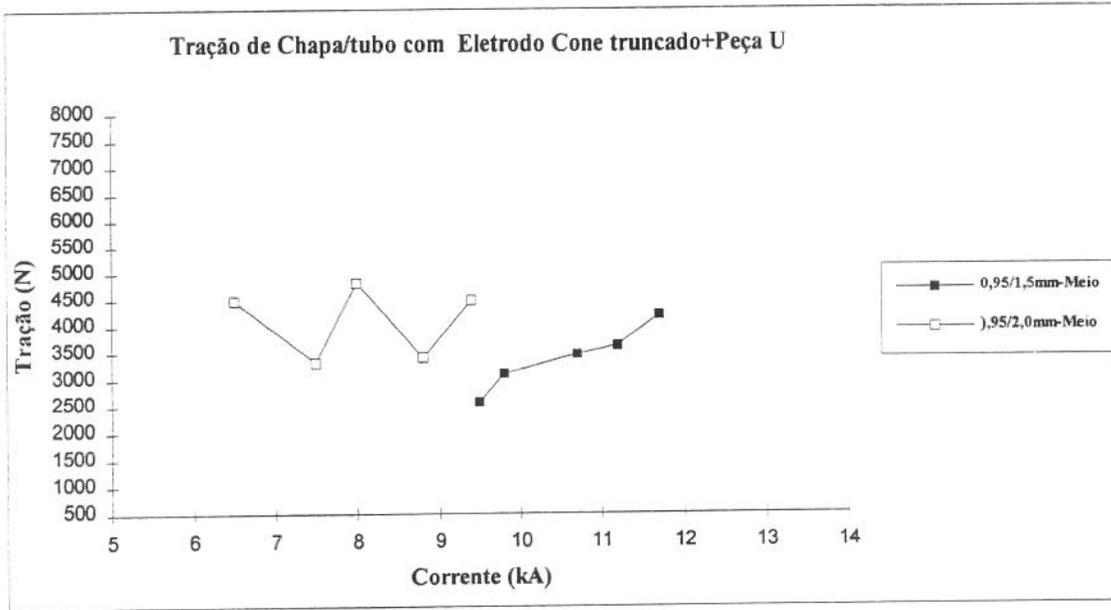


Figura 7.37: Tração axial máxima versus corrente de soldagem de juntas chapa/tubo com tubo de 1,5 e 2,0 mm, obtidas com eletrodo superior cone truncado e eletrodo inferior peça de cobre.

Os valores médios das cargas de tração axial foram de 3390 N e 4100 N, respectivamente para as juntas com tubos de 1,5 mm e 2,0 mm, de modo que as juntas com tubos de 2,0 mm apresentaram valor médio 21% maior.

O torque máximo dos pontos de solda tenderam a crescer com a corrente de soldagem, tanto para juntas com tubos de 1,5 mm como para os de 2,0 mm. No caso dos tubos de 2,0 mm, houve uma queda na carga de torque para a corrente de expulsão, como pode ser observado na figura 7.38.

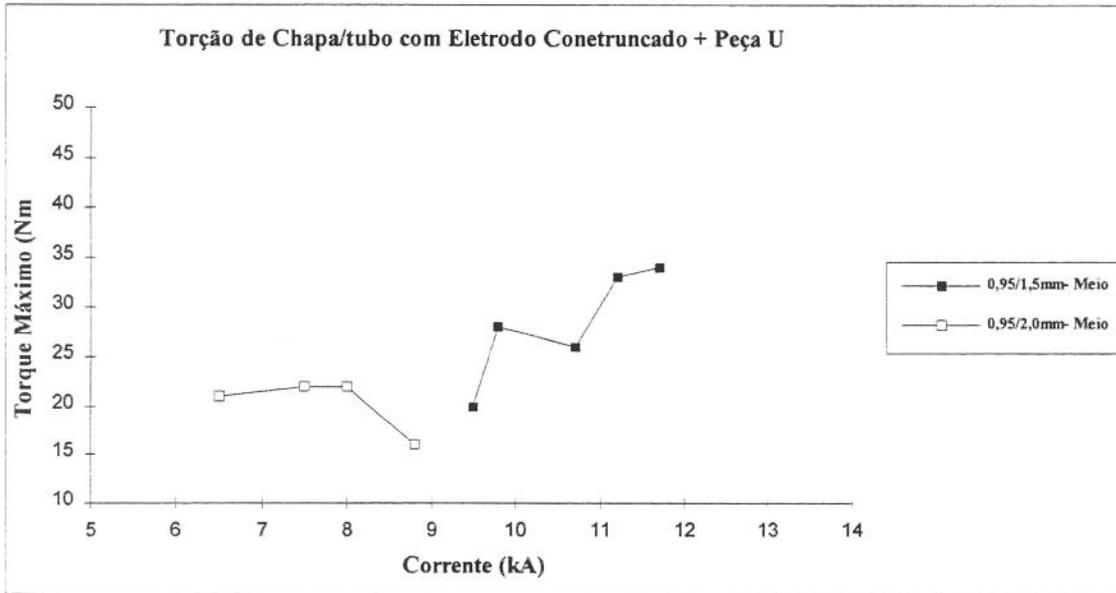


Figura 7.38: Torque máximo versus corrente de soldagem de juntas chapa/tubo obtidos com eletrodo superior truncado e inferior peça de cobre em "U"

Os valores médios obtidos para torque máximo foram 28 Nm e 20 Nm, respectivamente para tubos de 1,5 e 2,0 mm. Assim, as juntas com tubo de 1,5 mm apresentaram valores 40% maior. Este comportamento é oposto ao encontrado na tração.

A fratura dos pontos de solda submetidos aos ensaios de torção e tração foram predominantemente na forma de botão. Contudo, as juntas com tubos de 1,5 mm e 2,0 mm apresentaram 20% de fratura interfacial, a qual ocorreu apenas para pontos obtidos com baixa corrente de soldagem

A utilização do eletrodo inferior na forma de "U", com corrente na lateral do tubo, resultou em baixas correntes de soldagem, com amplo intervalo de soldagem (maior que 2,2 kA), com alguma deformação nos tubos (máximo de 1,0 mm). Houve formação da lente com poça de fusão, com alguns vazios e trincas na superfície das chapas de 0,95 mm. As cargas de tração axial máxima e de torção máxima foram maiores que os valores mínimos determinados, tendo ocorrido uma baixa incidência de fratura interfacial (menor que 20%).

O processo desenvolvido neste trabalho para soldagem de tubos de 1,5 mm e 2,0 mm de espessura, utilizando eletrodo inferior uma peça de cobre em forma de "U", é viável de ser aplicado em ambiente industrial para tubos de qualquer comprimento. Contudo, faz-se necessário algumas alterações na peça desenvolvida para que esta possa se adequar melhor ao processo industrial.

Influência do Percorso da Corrente no Tubo Com Eletrodo Superior Esférico e Inferior Peça em "U"

Utilizou-se a chapa superior com 0,95 mm de espessura, zincada, com tubos de espessuras 1,5 e 2,0 mm, fosfatizados, força entre eletrodos de 800 N, eletrodo superior esférico de raio 12 mm eletrodo inferior, sendo uma peça de cobre para injetar a corrente na parede lateral do tubo. As soldas foram realizadas no centro e na borda dos CP's. Os resultados obtidos estão nas tabelas 7.35, 7.36, 7.37 e 7.38 e nas figuras 7.39 e 7.40.

Tabela 7.35: Resultado da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincadas sobre tubo de 1,5 mm fosfatizado; solda no centro dos CP's; eletrodo superior esférico de raio 12 mm, eletrodo inferior com peça de cobre para conduzir a corrente na parede lateral do tubo; F = 800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	ϕL (mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
7,8	4,5	0,5	66/15	102/ -	B/B	18	3800
8,5	4,7	0,4	75/36	- / -	B/B	20	3200
9,1	5,4	0,6	58/9	154/ -	B/B	21	3100
9,9	-	0,8	75/25	154/ -	B/B	25	3370
10,7	6,0	0,8	83/31	164/ -	B/B	24	3410
11,3	6,6	0,9	-	179/ -	B/B	33	2970

Tabela 7.36: Resultado soldagem de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 1,5 mm fosfatizado; solda na borda dos CP's; eletrodos superior esférico de raio 12 mm, eletrodo inferior com peça de cobre para conduzir a corrente na parede lateral do tubo; F = 800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	ϕL (mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
7,3	4,6	0,5	74/22	266	B/I	17	2350
8,1	-	0,6	78/4	179	B/B	20	3920
8,8	4,9	0,8	85/1	205	B/B	23	4140
9,9	5,4	0,7	100/1	179	B/I	20	3750
10,5	-	0,8	100/1	410	B/B	31	3960

Tabela 7.37: Resultado da soldagem de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 2,0 mm fosfatizado; solda no centro dos CP's; eletrodos superior esférico de raio 12 mm, eletrodo inferior com peça de cobre para conduzir a corrente na parede lateral do tubo; F = 800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	ϕL (mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
6,1	4,3	0,1	58/27	- / -	B/B	21	3670
7,1	-	0,1	65/31	- / -	B/I	19	3230
7,7	-	0,3	76/43	143/ -	B/B	24	2570
8,5	4,8	0,2	- / -	26/ -	B/B	22	4890
9,3	5,7	0,3	80/22	72/ -	B/B	33	6540

Tabela 7.38: Resultado da soldagem de chapas de 0,95mm, zincadas, sobre tubo de 2,0 mm fosfatizado; solda na borda dos CP's; eletrodo superior esférico de raio 12 mm, eletrodo inferior com peça de cobre para conduzir a corrente na parede lateral do tubo; F = 800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	ϕL (mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
5,7	-	0,1	- / -	- / -	I/I	10	-
6,4	4,0	0,2	65/38	46/ -	B/B	16	2500
7,1	-	0,2	61/27	46/ -	B/I	16	2890
8,1	-	0,2	71/18	102/ -	B/I	15	2630
8,9	4,4	0,3	- / -	61/ -	B/B	20	5100

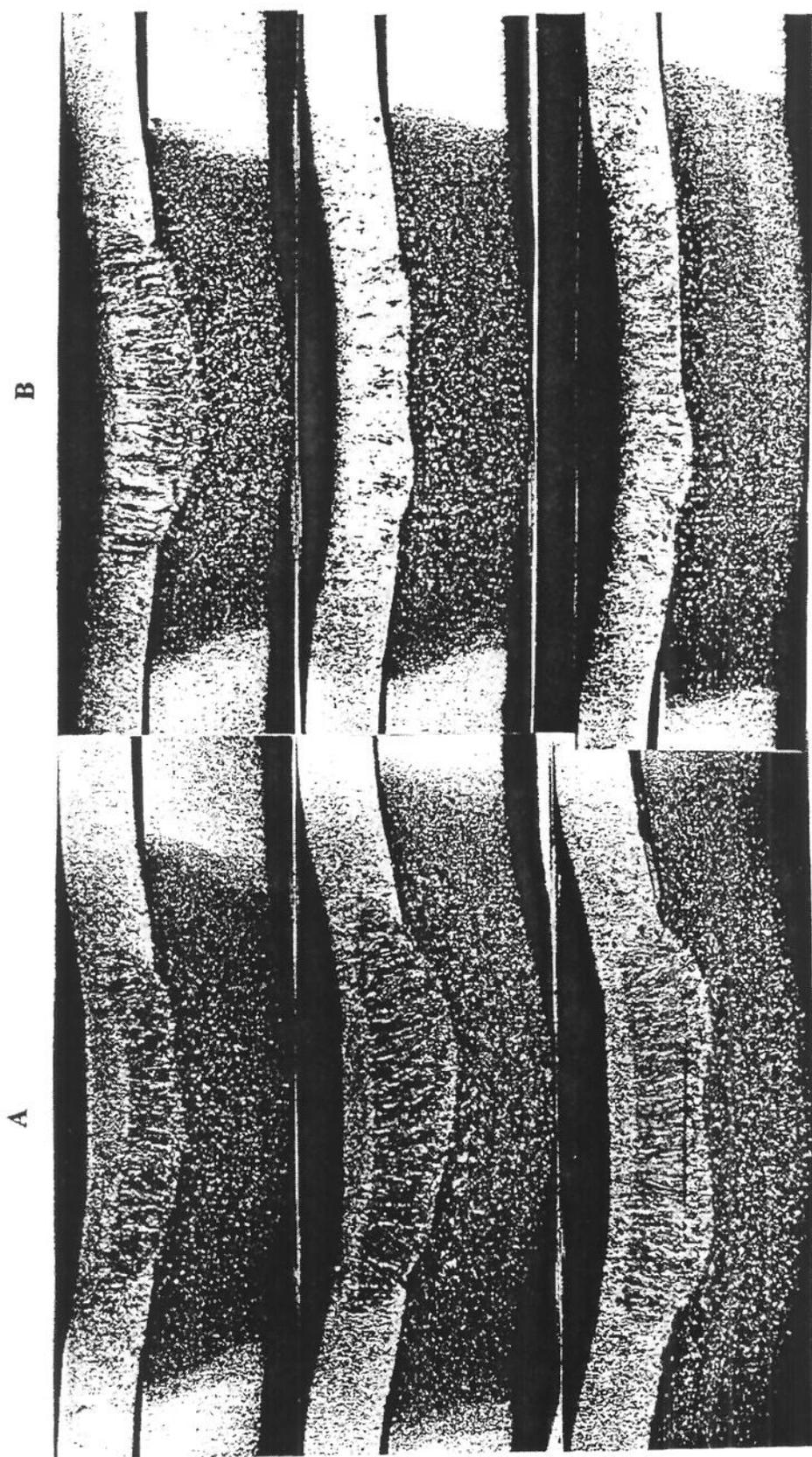


Figura 7.39: Sequencia metalográfica das soldas de chapa/tubo obtidas com eletrodo inferior na forma de U, $F=800\text{ N}$, $t_s=15$ ciclos, eletrodos 12mm/peça U, variando corrente: 7,8, kA, 9,8 kA, 10,7 kA para 0,95/1,5 mm, no centro (A); e 7,3 kA, 8,1 kA, 9,9 kA para 0,95/1,5 mm, na borda. Nital 3%. 12,5x.

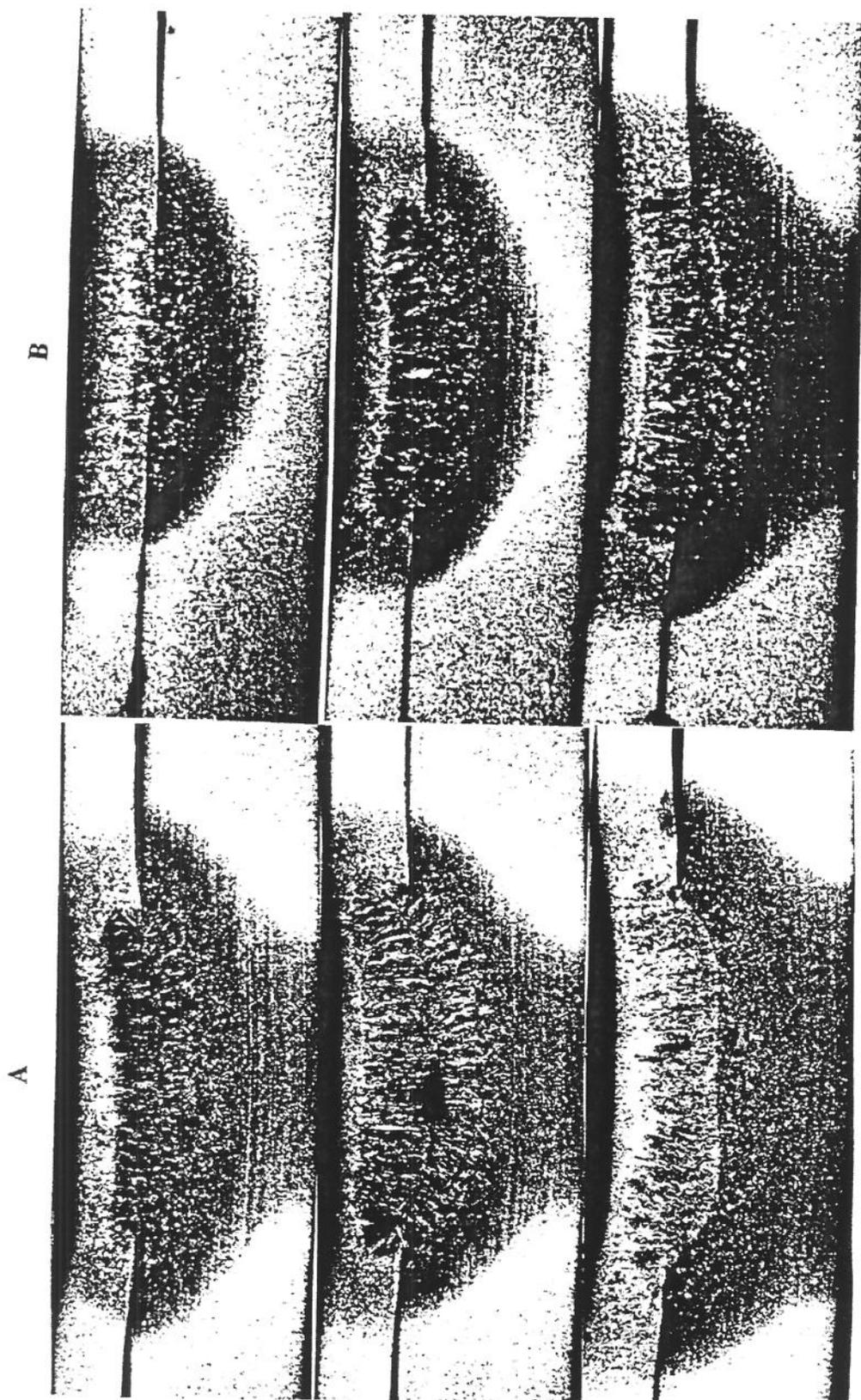


Figura 7.40: Sequencia metalográfica das soldas de chapa/tubo obtidas com eletrodo inferior na forma de U, $F=800$ N, $t_s=15$ ciclos, eletrodos 12mm/peça U, variando corrente: 6,1 kA, 7,1 kA, 9,3 kA, para 0,95/2,0 mm, no centro (A); e 5,7 kA, 7,1 kA, 8,1 kA para 0,95/2,0 mm, na borda (B). Nital 3%. 12,5x.

Os valores iniciais das correntes de soldagem foram menores para os tubos de 2,0 mm de espessura, tanto para soldas no centro como na borda dos CP's, sendo a redução das correntes da ordem de 20 % . As soldas realizadas nas bordas, tanto para o tubo de 1,5 mm como para o de 2,0 mm, foram em torno de 7% menores do que as realizadas no meio. Os intervalos de corrente foram semelhantes para as quatro condições testadas e iguais a 3,2 kA.

Aumentando-se os valores de corrente, as maiores deformações internas foram observadas no interior dos tubos de 1,5 mm, tanto para soldas na borda como no meio do CP's, sendo o valor médio igual 0,7 mm. Nos tubos de 2,0 mm de espessura não se observou o crescimento da deformação para maiores valores de corrente, sendo o valor médio de 0,2 mm nestas condições. O local da solda não causou influência nas deformações dos tubos, tanto para 1,5 mm como para 2,0 mm; contudo, as deformações em tubos de 1,5 mm foram duas vezes e meia maiores do que em tubos de 2,0 mm.

As seqüências metalográficas dos pontos de solda, obtidos com as duas geometrias de eletrodos e locais de solda, revelaram boa formação de lente, com presença de fusão. Como pode ser observado nas figuras 7.39 e 7.40, as lentes são constituídas de grãos colunares (ZF), os quais cresceram paralelamente à extração de calor pelos eletrodos. Esta região se encontra rodeada por grãos equiaxiais (ZTA) maiores do que do MB. Em todos os casos, a maior área fundida foi nas chapas de 0,95 mm de espessura. Observando a linha final de solidificação dos pontos de solda, só houve formação de vazios nos pontos obtidos com tubos de 2,0 mm e soldas no centro.

Para maiores valores da corrente, cresceram as penetrações superiores e inferiores, sendo que para todas as condições, as superiores são maiores do que as inferiores. As soldas em tubos de 1,5 mm de espessura apresentaram uma relação de grandeza entre penetração superior e inferior variando de 2 a 6 vezes para soldas no centro e de 3 a 100 vezes para soldas na borda. As soldas em tubos de 2,0 mm de espessura apresentaram o mesmo padrão, havendo uma variação de 2 a 3 vezes. Como pode ser notado, para tubos de 1,5 mm houve maior variação das áreas fundidas.

As trincas só apareceram nas chapas de 0,95 mm, estando presentes em quase todas as condições de soldagem, e suas dimensões cresceram com a corrente. A dimensão média das

trincas nas soldas em tubos de 1,5 mm foram de 126 μm para soldas no centro e 211 μm para soldas na borda. Para tubos de 2,0 mm a dimensão média foi de 80 μm para soldas no centro e 68 μm para soldas na borda. Portanto, com tubos de espessura maior as trincas foram 60% menores. O local da solda não causou efeito apreciável na presença de trincas.

Os diâmetros de lente aumentaram com a corrente para as duas espessuras de tubo, sendo que os tubos de 1,5 mm de espessuras apresentaram valores médios de 5,5 mm para soldas no centro e 5,0 mm para soldas na borda. Já os tubos de 2,0 mm apresentaram os valores de 4,9 mm para soldas no centro e 4,2 mm para soldas nas bordas. As juntas com tubos de 2,0 mm apresentaram diâmetros de lente 15 % menores. O local da solda influenciou os diâmetros de lente para as duas espessuras de tubos, de modo que as soldas realizadas no centro foram em média 13% maiores que aquelas realizadas na borda.

As cargas de tração axial máxima tenderam a aumentar para maiores correntes de soldagem nas juntas com tubos de 2,0 mm; para as juntas com tubos de 1.5 mm as cargas foram de valores próximos. Estes resultados podem ser observados na figura 7.41.

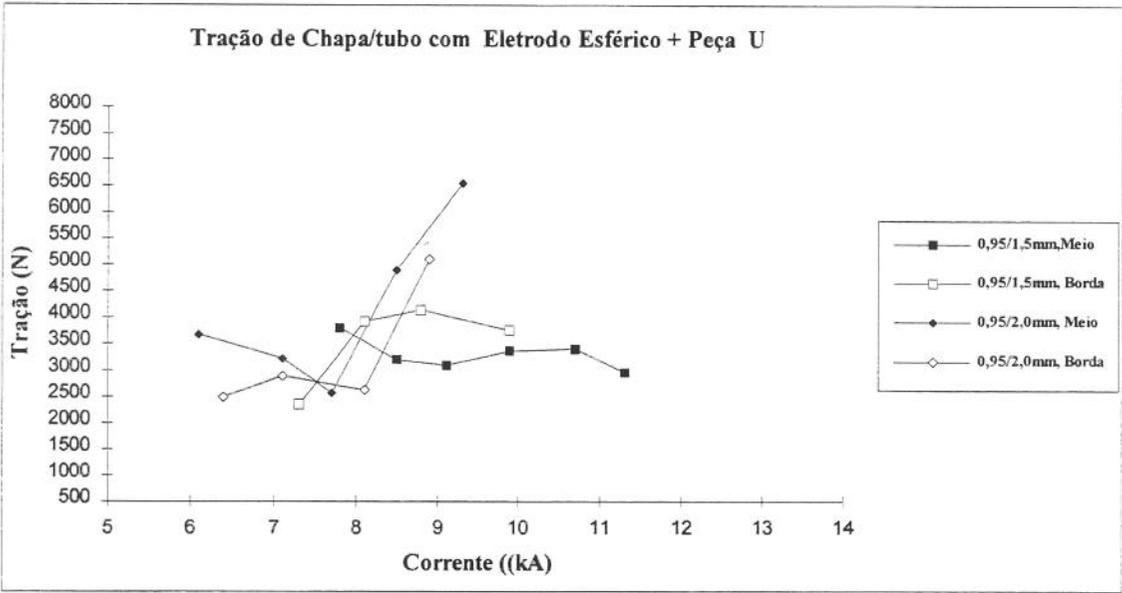


Figura 7.41: Tração axial máxima versus corrente de soldagem de juntas de chapa/tubo, para tubos de 1,5 mm e 2,0 mm, pontos obtidos com eletrodo superior esférico e inferior com peça de cobre em "U", para pontos no centro e na borda.

Os valores médios das cargas para tubos de 1,5 mm foram de 3320 N e 3620 N, respectivamente, para soldas no centro e na borda. As juntas com tubos de 2,0 mm apresentaram os valores de 4180 N para soldas no centro e 3280 N para soldas na borda. Não há uma tendência clara de variação da carga de tração axial com o local da solda.

Os valores de torque máximo tendem a crescer com a corrente de soldagem; os resultados podem ser observados na figura 7.42.

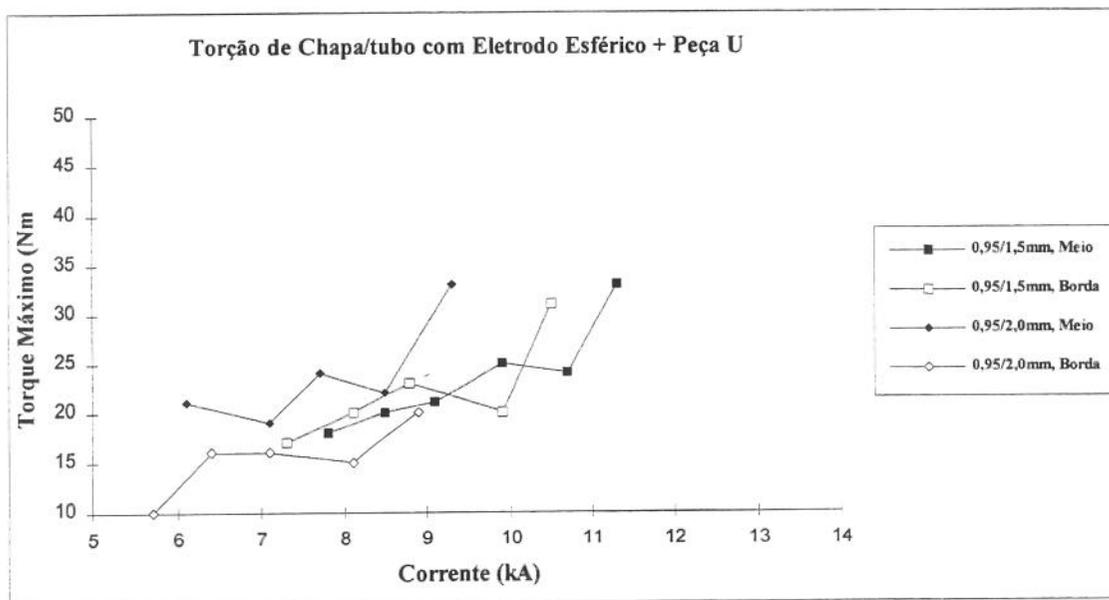


Figura 7.42: Torque máximo versus corrente de soldagem de juntas de chapa/tubo obtidas com eletrodo superior esférico e inferior com peça de cobre em "U", para pontos no centro e na borda dos CP's.

Os valores médios obtidos para juntas com tubos de 1,5 mm foram de 24 Nm e 19 Nm, para soldas no centro e na borda, respectivamente. As juntas com tubos de 2,0 mm apresentaram valores médios de 24Nm e 15 Nm, para soldas no centro e borda dos CP's. Pode-se notar que os valores de torque foram próximos para as duas espessuras de tubo e que existe uma tendência semelhante nos dois casos, a saber: as soldas no centro apresentam torque máximo 30 % maior que na borda.

As fraturas dos pontos de solda após os testes de tração e torção ocorreram principalmente na forma de botão. Os pontos de solda em tubos de 1,5 mm apresentaram 100 % de fratura em

botão para soldas no centro e 20% interfacial para soldas na borda. Já em tubos de 2,0 mm, houve 10 % de fratura interfacial para soldas no centro e 40 % para soldas na borda. Em tubos de 2,0 mm, a incidência de fraturas interfaciais foi 20 % maior do que para tubos de 1,5 mm. As soldas realizadas na borda apresentaram maior incidência de fratura interfacial, tanto para tubos de 1,5mm como para os de 2,0 mm de espessura.

Portanto, estas juntas soldadas com eletrodo superior esférico e inferior na forma de "U" necessitaram de baixas correntes de soldagem, com amplo intervalo de soldagem (maior do que 3,0 kA) sendo que as juntas apresentaram algumas deformações no interior dos tubos, (máximo 0,9 mm). Houve a formação de poça fundida, com alguns vazios internos e trincas na superfície da chapa de 0,95 mm para as correntes mais altas. Contudo, as cargas de tração axial e o torque foram maiores que o mínimo requerido. As soldas feitas nas bordas apresentaram menores torques, maior incidência de fratura interfacial, apesar da boa resistência à tração.

Influência do Revestimento da Junta de Chapa/Tubo Com Eletrodo Cone Truncado.

Utilizou-se a chapa superior com 0,95 mm sobre tubos de 2,0 mm de espessura para uma força entre eletrodos de 2800 N; as soldas foram realizadas no centro dos CP's utilizando o eletrodo (5/16). Os revestimentos investigados foram chapa zincada/ tubo fosfatizado, chapa zincada/tubo zincado, chapa/tubo decapados; Os resultados obtidos estão apresentados nas tabelas 7.14, 7.39 e 7.40, e nas figuras 7.16 e 7.43.

Tabela 7.39: Resultados da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincada, sobre tubo de 2,0 mm zincado; solda no centro dos CP's; par de eletrodos 5/16; F = 2800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	ϕL (mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
12,7	4,4	1,0	- / -	26/ -	I/I	32	1650
13,4	4,9	0,9	- / -	138/ -	I/I	26	3050
14,5	5,4	1,1	- / -	205/ -	I/I	36	3260
15,0	6,4	1,2	- / -	82/ -	I/B	40	6100
15,5	6,5	1,4	- / -	179/ -	I/I	46	6640

Tabela 7.40: Resultados da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm sobre tubo de 2,0 mm decapados; solda no centro dos CP's; par de eletrodos 5/16; F = 2800 N; ts = 15 ciclos..

I (kA)	ϕL (mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μ m)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
10,2	4,9	0,8	- / -	- / -	B/I	26	5300
10,6	5,1	1,1	56/13	- / -	B/B	29	5990
11,3	6,1	1,4	67/11	- / -	B/B	29	7600
12,1	6,4	1,5	74/10	- / -	B/B	33	7890
13,0	6,6	1,5	71/9	- / -	B/B	35	7850

Os valores iniciais de corrente de soldagem foram semelhantes para as juntas decapadas e com revestimento de zinco sobre fosfato, sendo seus valores, respectivamente, 10,2 e 10,7 kA. As juntas com revestimento de zinco sobre zinco necessitaram de 19% a mais de corrente (12,7 kA). Os intervalos de soldagem foram de valores próximos e iguais a 2,7 kA. O maior valor de corrente de soldagem para juntas com revestimento de zinco/zinco é coerente com os dados da literatura (2,8,9), sendo que a resistência de contato na interface chapa/tubo é menor, logo, é necessário maior corrente para formar o ponto de solda.

As deformações no interior dos tubos de 2,0 mm de espessura, com diferentes revestimentos, aumentaram com a corrente de soldagem, e seus valores médios foram próximos à 1,2 mm.

Observando as seqüências metalográficas dos pontos de solda nas figuras 7.16 e 7.43, as juntas com revestimento de zinco/fosfato apresentaram um comportamento semelhante às juntas decapadas, ou seja, houve a formação de lentes de modo irregular. Na maioria dos casos elas estão divididas em duas e situadas nos cantos da região de contato chapa/tubo. Estas lentes apresentam ZF, com grãos colunares, os quais cresceram no sentido oposto a extração de calor pelos eletrodos e estão envolvidos por grãos equiaxiais grosseiros (ZTA). Já as juntas com revestimento de zinco/zinco apresentaram lentes de solda sem poça de fusão para todas as correntes de soldagem; a lente de solda apresenta apenas grãos equiaxiais grosseiros. A linha final de solidificação não apresentou vazios em nenhum ponto de solda analisado.

As juntas com revestimento de zinco/zinco não apresentaram penetração da lente de solda. As demais juntas apresentaram penetração, com os valores aumentando com a corrente, sendo as penetrações superiores maiores do que as inferiores. A relação de grandeza entre as penetrações superiores e inferiores varia de 3 a 4 vezes para as juntas com revestimento de zinco/fosfato e de 4 a 8 vezes para as juntas decapadas.

As juntas decapadas não apresentaram trincas; já as juntas com revestimento de zinco/fosfato, só apresentaram trincas na chapa superior com a corrente de expulsão. As juntas com revestimento de zinco/zinco apresentaram trincas nas chapas de 0,95 mm em todas as condições de soldagem, sendo sua dimensão crescente com a corrente e o valor médio igual a 126 μm . Com estes resultados fica evidente que as trincas surgem com alta densidade de corrente.

Com aumento da corrente de soldagem cresceram os diâmetros de lente para as juntas com os diferentes revestimentos. As juntas com revestimento de zinco sobre fosfato apresentaram o diâmetro médio de 6,5 mm; as juntas decapadas apresentaram o valor médio de 5,8 mm, e as juntas com revestimento de zinco sobre zinco, 5,5 mm. Comparando-se os diâmetros de lente das juntas decapadas com as demais, pode-se notar que as juntas com revestimento de zinco/fosfato apresentaram valores 12% maiores e que as juntas com revestimento de zinco/zinco apresentaram valores 5% menores.

As cargas de tração axial aumentaram com a corrente de soldagem, sendo que o maior valor médio - 6930 N - foi obtido para as juntas decapadas, sendo este valor próximo ao obtido para as juntas com revestimento de zinco/fosfato (6830 N). O menor valor médio foi para as juntas com revestimento de zinco/zinco e é igual a 4140 N. Portanto, as juntas decapadas e com zinco/fosfato apresentaram cargas 66% maiores do que as juntas com zinco/zinco.

Com aumento da corrente de soldagem, o torque máximo foi maior. Nestes testes, as juntas decapadas apresentaram os menores valores médios (30 Nm), enquanto que as juntas com revestimento de zinco/fosfato e zinco/zinco apresentaram valores médios de 38 Nm e 36 Nm, respectivamente. Assim, o torque das juntas decapadas foi 23% menor, comportamento oposto aos resultados de tração axial máxima, o que torna necessário maior estudo na microestrutura da ZF e ZTA, para maiores esclarecimentos desse comportamento.

Para as juntas decapadas e zinco/fosfato as fraturas nos testes de tração e torção foram, respectivamente, de 90 % e 100% na forma de botão. As juntas com revestimento de zinco/zinco apresentaram 90 % de incidência de fratura interfacial quando submetidas aos mesmos testes.

Assim, pode-se afirmar que as juntas com revestimento de zinco/fosfato e decapadas apresentaram características semelhantes, logo as resistências de contato chapa/tubo foram próximas e de valores maiores do que as juntas com revestimento de zinco/zinco, uma vez que as juntas com revestimento de zinco/zinco necessitaram de valores de corrente 20 % maiores, sendo que para os três tipos de revestimentos houve amplo intervalo de soldagem maior do que 2,7 kA. O revestimento não interferiu nas deformações, já que foram praticamente iguais para os três conjuntos de revestimentos. As lentes de solda com revestimento de zinco/zinco não apresentaram poça de fusão. Não há vazios em todos os pontos de solda, mas há trincas somente nas chapas de 0,95 mm, zincadas. As cargas de tração foram maiores para as juntas com revestimentos de zinco/fosfato e decapadas, enquanto que o torque foi maior para juntas com revestimento de zinco/zinco e zinco/fosfato. Todos os valores de carga de tração e torque foram maiores do que o mínimo indicado na literatura. Contudo, os pontos de solda das juntas com revestimentos de zinco/zinco apresentaram 90 % de fratura interfacial, o que não viabiliza estas condições de soldagem.

Influência do Suporte Condutor no Interior do Tubo Para Junta Revestida de Zinco

Utilizou-se chapa a superior com 0,95 mm, zincada sobre tubos de 2,0 mm zincados, força entre eletrodos de 2800 N, par de eletrodos 5/16, suporte no interior dos tubos de cobre eletrolítico. As soldas foram realizadas no centro dos CP's. Os resultados obtidos estão na tabela 7.37 e na figura 7.41, os quais foram comparados com os resultados da tabela 7.40 e da figura 7.43, já que se trata da mesma junta, soldada sem o suporte condutor no interior do tubo.

Tabela 7.41: Resultados da soldagem a ponto por resistência elétrica de chapas de 0,95mm, zincadas, sobre tubo de 2,0 mm, zincado; solda no centro dos CP's; par de eletrodos 12/16; condutor de cobre eletrolítico no interior do tubo; F = 2800 N; ts = 15 ciclos.

I (kA)	ϕL (mm)	Def(mm)	PeS/I(%)	TS/I(μm)	Ftra/tor	Tor(Nm)	Tra(N)
12,6	5,9	0,1	- / -	-	B/B	29	5200
13,2	5,1	0,2	43/69	-	B/B	31	4560
14,0	-	0,1	58/63	179/ -	B/B	44	5000
15,1	6,5	0,1	71/58	205/ -	B/B	39	4400

As correntes iniciais de soldagem foram semelhantes para as juntas obtidas com suporte condutor e sem este suporte. Os intervalos de soldagem foram de 2,5 kA para as juntas com suporte e de 2,8 kA para as juntas com suporte condutor.

As juntas obtidas sem suporte condutor apresentaram valores de deformação no interior dos tubos, os quais cresceram com a corrente, com um valor médio igual a 1,1 mm. Já para as juntas obtidas com suporte condutor, que não apresentaram acréscimo da deformação com a corrente, o valor médio foi igual a 0,1 mm.

As seqüências metalográficas, mostradas nas figuras 7.43 e 7.44, revelaram que as juntas obtidas com suporte condutor de corrente no interior dos tubos apresentaram lente de solda bem formadas, constituídas de grãos colunares (ZF), os quais cresceram no sentido oposto à extração de calor pelos eletrodos. O mesmo não ocorreu com as juntas zincadas sem o suporte, que apresentaram apenas grãos equiaxiais grosseiros.

Nota-se nas juntas com suporte de cobre que há a presença de vazios na linha final de solidificação.

Somente as juntas obtidas com suporte condutor no interior dos tubos apresentaram penetrações das lentes de solda. Os valores das penetrações aumentaram com a corrente de soldagem, sendo que a relação de grandeza entre penetração superior e inferior variou de 0,6 a 1,2 vezes.

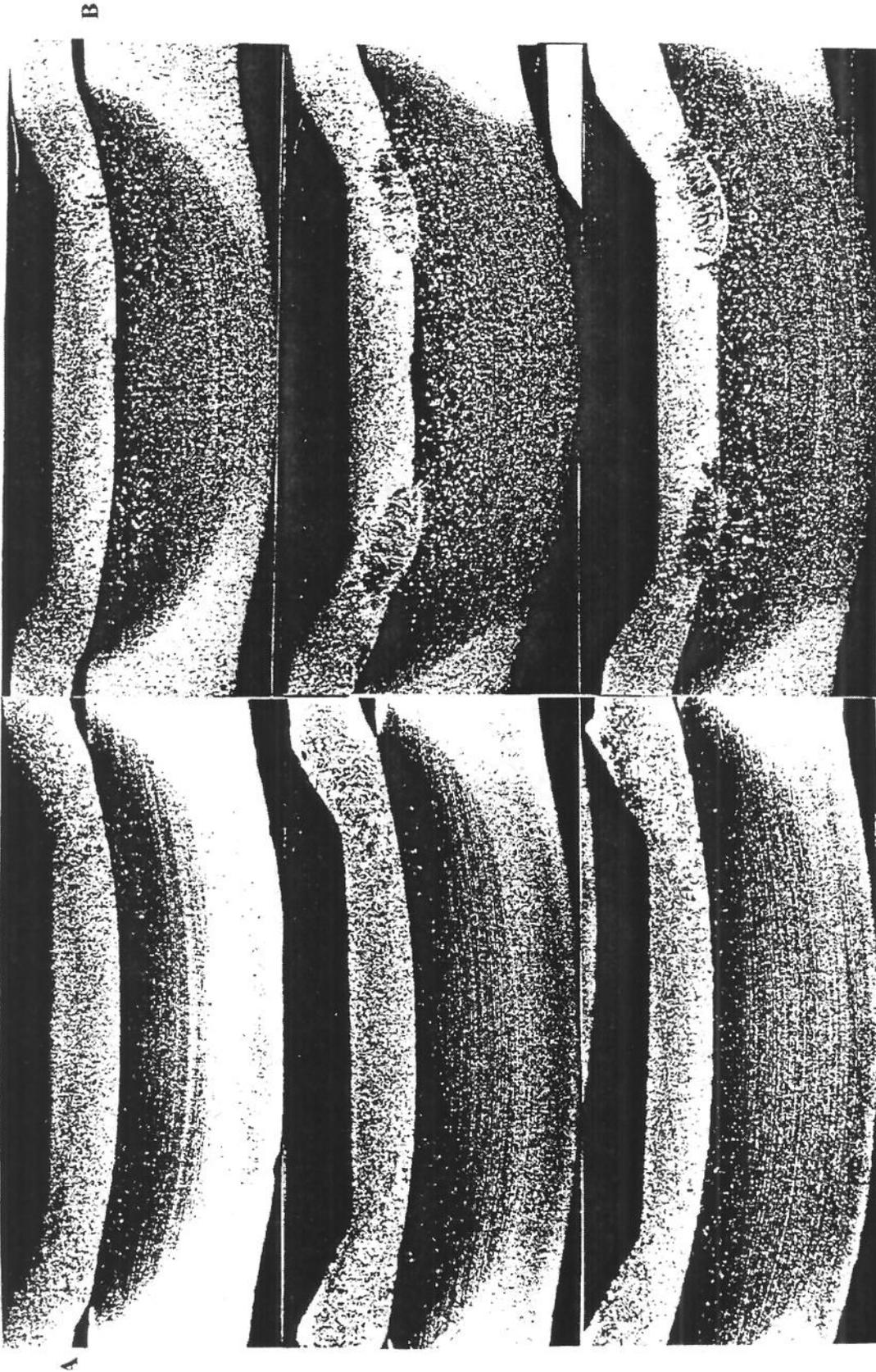


Figura 7.43: Sequencia metalográfica das soldas de chapa/tubo obtidas com, $F=2800$ N, $t_s=15$ ciclos, eletrodos 5/16, variando corrente: 12,7 kA, 14,5 kA, 15,5 kA para 0,95/2,0 mm, zincados (A); e 10,2 kA, 11,3 kA, 13,0 kA para 0,95/2,0 mm, decapados (B). Nital 3%. 12,5x.

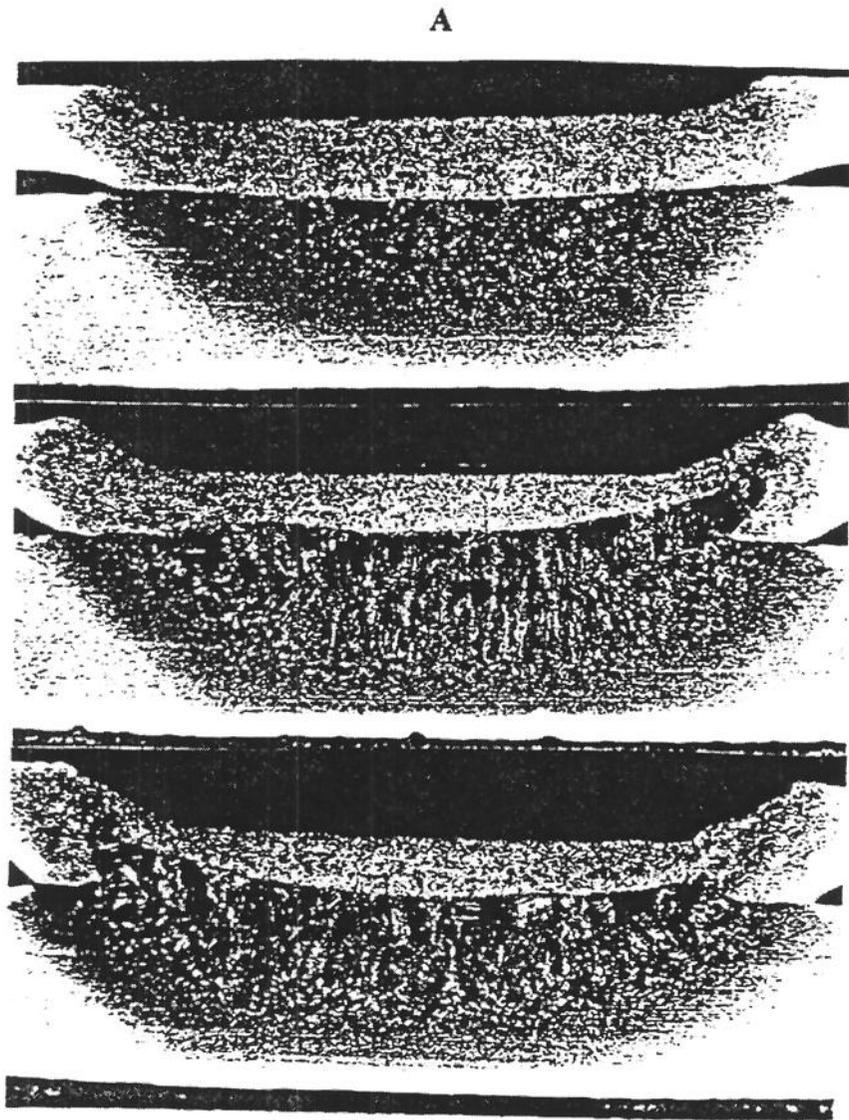


Figura 7.44: Sequencia metalográfica das soldas de chapa/tubo obtidas com suporte condutor no interior dos tubos, $F=2800\text{ N}$, $t_s=15$ ciclos, eletrodos 5/16, variando corrente: 12,6 kA, 14,0 kA, 15,1 kA, para 0,95/2,0 mm, zincado (A). Nital 3%. 12,5x.

As trincas em juntas obtidas com suporte condutor no interior dos tubos só apareceram com as mais altas correntes, tendo um valor médio de $192\mu\text{m}$. Já nas juntas obtidas sem o suporte, as trincas existem para todos os valores de corrente, sendo o valor médio obtido igual a $126\mu\text{m}$. Como pode-se notar, houve maior incidência de trincas para as juntas obtidas sem o suporte no interior dos tubos. Em juntas soldadas com suporte condutor, o valor médio dos diâmetros de lente foi de $5,9\text{mm}$, o qual é 7% maior do que para aquelas obtidas sem o suporte condutor ($5,5\text{mm}$).

Para a maioria dos casos, as cargas de tração aumentaram com a corrente de soldagem. Os resultados dos pontos de solda obtidos com vários revestimentos podem ser observados na figura 7.45.

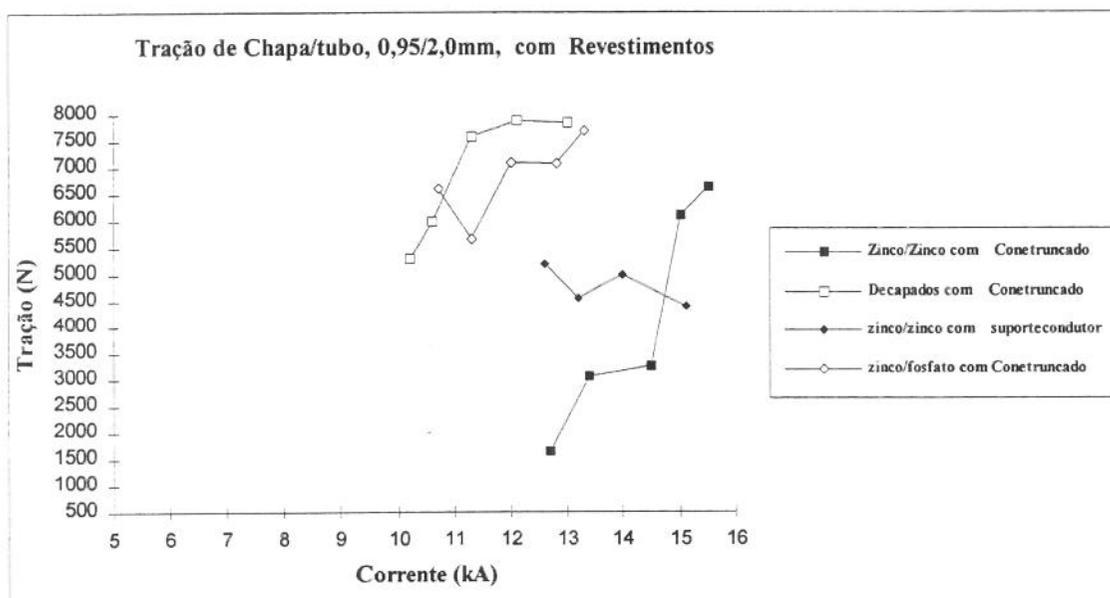


Figura 7.45: Tração axial máxima versus corrente de soldagem de juntas obtidas com diferentes revestimentos.

O valor médio das cargas de tração axial obtido para as juntas soldadas com suporte condutor é igual a 4790N , valor este maior do que o obtido para as juntas soldadas sem o suporte (4140N). Portanto, as juntas zincadas obtidas com suporte apresentaram cargas 16% maiores do que as juntas zincadas obtidas sem suporte no interior dos tubos; as juntas zincadas obtidas com o suporte apresentaram um valor médio 66% menor do que as juntas decapadas e com revestimento de zinco/fosfato.

Comparando-se os valores de torque máximo para as juntas com diferentes revestimentos, pode-se observar que estes tendem a crescer com a corrente (figura 7.46).

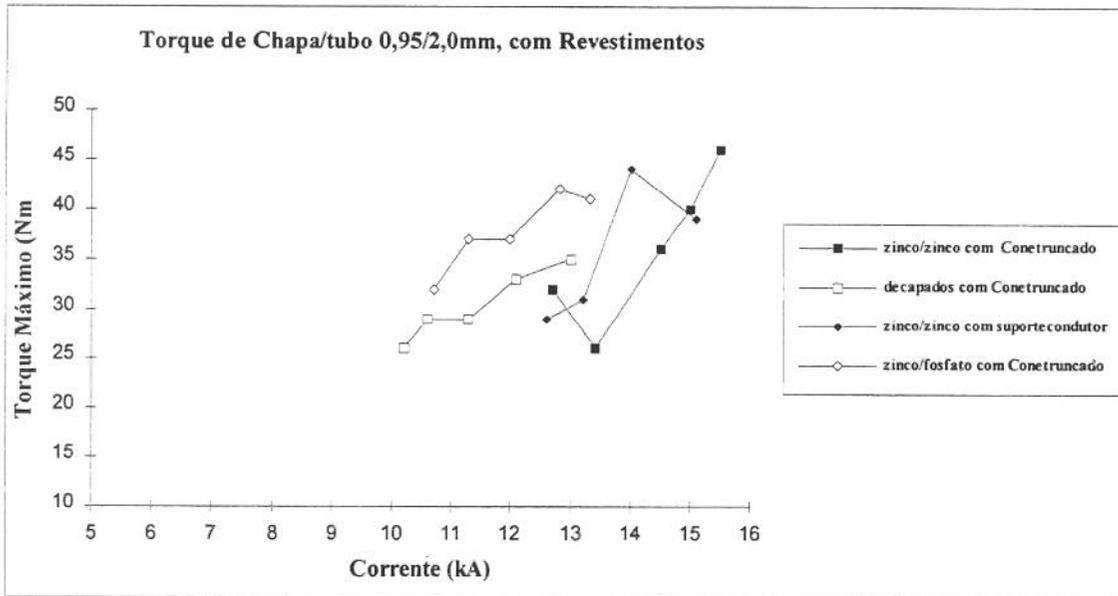


Figura 7.46: Torque máximo versus corrente de soldagem de juntas chapa/tubo com diferentes revestimentos.

As juntas com revestimento de zinco/zinco apresentaram valores médios semelhantes e igual a 36 Nm, os quais foram próximos dos resultados obtidos para juntas com revestimento de zinco/fosfato (38Nm). Já as juntas decapadas apresentaram os menores valores, 30 Nm, sendo este valor 23% menor do que os obtidos para as demais juntas.

As juntas zincadas e soldadas com suporte condutor no interior dos tubos, quando submetidas aos testes de tração e torção, fraturaram 100 % na forma de botão, enquanto que as juntas soldadas sem o suporte condutor fraturaram 90 % na forma interfacial.

Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que a utilização de um suporte condutor no interior dos tubos zincados não alterou a corrente de soldagem nem a faixa de soldagem. Houve fusão da lente sem deformação no interior dos tubos, mas com trincas nas chapas de 0,95 mm. As cargas de tração foram 16 % maiores do que as observadas nas juntas de zinco/zinco, obtidas sem o suporte condutor, e os torques foram iguais, mas nessas soldas houve 100 % de fratura em botão, o que viabiliza estas condições de soldagem.

7.3.4 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE SOLDAGEM DOS TUBOS DE 1,5 MM DE ESPESSURA

Foram comparados todos os testes de soldagem em tubos de 1,5 mm, a saber: solda com força entre eletrodos de 2800 N e suporte não condutor no interior dos tubos; solda com redução da força entre eletrodos para 800 N; soldas com força de 800 N e corrente na lateral do tubo; solda com força de 2800 N e suporte condutor no interior do tubo. Para estas análises foi construída a tabela 7.44 apresentada a seguir, com base nas tabelas 7.22, 7.23, 7.24, 7.25, 7.26, 7.27, 7.28, 7.29, 7.30, 7.33, 7.35 e 7.36.

Tabela 7.42: Valores médios dos resultados de soldagem obtidos de todos os testes de soldas em chapa/tubo de 0,95/1,5 mm, cujas condições de soldagem estão indicadas abaixo da tabela.

Soldas	I(kA) Início	ϕ L(mm) média	Def(mm) Média	PeS/I razão	TS/I(μ m) Média	Ftra/tor %B	Tor(Nm) média	Tra(N) Média
5/16 C*	9,5	6,7	0,1	-	19/ -	67	29	3340
5/16 B*	9,3	6,3	0,1	1,1	10/ -	100	37	4870
12/16 C*	7,9	5,8	0,1	4,2 a 7,2	41/ -	60	25	3210
12/16 B*	7,9	5,7	0,1	1,2 a 1,8	30/ -	100	36	3950
5/16 C**	10,6	6,7	0,8	-	520/ -	90	29	3890
5/16 B**	10,6	6,3	0,7	-	263/ -	100	29	3940
12/16 C**	9,5	6,3	0,9	3,3 a 5,0	333/ -	85	35	4140
12/16 B**	10,9	5,7	0,8	-	302/ -	72	34	3960
5/16 C***	9,5	6,0	0,9	8,3 a 9,4	201/ -	80	28	3390
12/16 C***	7,8	5,4	0,7	2,1 a 6,4	126/ -	100	24	3310
12/16 B***	7,3	5,0	0,7	3,4 a 100	48/ -	80	22	3620
12/16 M****	7,4	5,4	0,2	0,76 a 1,1	77/ -	75	28	3800

* soldas com força de 2800 N, e suporte não condutor no interior dos tubos de 1,5 mm;

** soldas com força de 800 N;

*** soldas com força de 800 N e corrente na lateral do tubo;

**** solda com 2800 N e suporte condutor no interior dos tubos de 1,5 mm.

- As correntes iniciais de soldagem foram singulares para cada teste de solda, a saber:
- soldas realizadas com suporte condutor no interior dos tubos resultaram nos menores valores, 7,4 kA, ;
 - soldas com corrente na lateral do tubo, os valores foram 12% maiores, 8,3 kA;
 - soldas com suporte não condutor no interior dos tubos, os valores foram 18% maiores do que a obtida com suporte condutor;
 - soldas obtidas com força de 800 N necessitaram de correntes 41% maiores do que as obtidas com suporte condutor, 10,4 kA.

As menores correntes de soldagem quando se utilizou o suporte condutor no interior dos tubos se deve ao fato do fluxo de corrente ter sido mais concentrado, não foi conduzido pelas paredes do tubo, requerendo assim menor energia para efetuar os pontos de solda.

Observa-se que a utilização de eletrodo superior esférico de raio 12 mm, causou redução nas correntes de soldagem (em torno de 20%) quando comparado com eletrodo cone truncado de 5,0 mm de diâmetro, exceto para as soldas obtidas com força de 800 N, cujas reduções foram menores (em torno de 11%). Como explicado anteriormente, solda com eletrodo esférico, têm menor área de contato com as peças, o que torna o fluxo de corrente concentrado, logo requer menor corrente para efetuar o ponto de solda.

A influência do local da solda nos valores das correntes só foi percebida para soldas realizadas com corrente na parede lateral do tubo; nestes testes, o valor da corrente foi menor para pontos na borda. Os demais testes não apresentaram variações de corrente com o local da solda.

Os intervalos de soldagem foram maiores do que 2,0 kA para a maioria dos testes de soldagem, exceto para os pontos obtidos com suporte não condutor e eletrodo 5/16 mm, os quais apresentaram intervalo de corrente em torno de 1,0 kA. Pode-se observar ainda que quando se utilizou eletrodo superior esférico de raio 12 mm, os intervalos de soldagem foram sempre maiores do que quando se utilizou eletrodo superior cone truncado de diâmetro 5,0 mm.

A deformação plástica dos tubos durante a soldagem ocorreu de modo distinto para cada teste de soldagem realizado. As soldas realizadas com suporte não condutor no interior dos tubos, assim como as soldas obtidas com suporte condutor, não sofreram acréscimo das deformações para maiores valores da corrente de soldagem, tendo a média ficado em torno de 0,1 mm, que pode ser considerada como variação dimensional do tubo, segundo norma MBBF-4041 (20).

Nos demais testes de soldagem, os valores das deformações no interior dos tubos aumentaram com a corrente de soldagem, sendo que as soldas com corrente na lateral dos tubos apresentaram valores médios de 0,7 mm e as soldas com força de 800 N apresentaram valor médio um pouco maior, de 0,9 mm. Comparando os valores médios destas deformações, as soldas obtidas com força de 800 N resultaram em deformações 28 % maiores. Pode-se notar ainda que o local da solda influenciou os dois tipos de solda, de modo que as deformações foram 13 % maiores para as soldas no centro.

A presença de deformação nas soldas obtidas com força entre eletrodos igual a 800 N ou com corrente na lateral dos tubos ocorreram pelo mesmo mecanismo explicado anteriormente para juntas com tubos de 2,0 mm de espessura. Durante a passagem da corrente de soldagem pelas paredes do tubo há um desprendimento de calor por efeito Joule aquecendo-as, de modo a reduzir a sua resistência mecânica. Assim, pela ação da força dos eletrodos ocorre a deformação. Este comportamento fica evidente pelo fato das deformações aumentarem para correntes de soldagem maiores, as quais, como já foi explicado anteriormente, reduzem a resistência mecânica dos tubos.

Observando as seqüências metalográficas dos pontos de solda, figura 7.16, 7.20, 7.25, 7.28, 7.29, 7.36, 7.39, 7.40, em todos os testes acima, quando se utilizou eletrodo superior de raio 12 mm, os resultados foram melhores para a formação das lentes de solda do que com o uso do eletrodo cone truncado de diâmetro igual a 5,0 mm. Entende-se por boa formação de lente a existência de uma única área fundida na interface de contato chapa/tubo, a qual deve estar simetricamente distribuída nesta interface. Deste modo, os pontos obtidos em diferentes condições de soldagem, com eletrodo esférico de 12 mm, apresentaram boa formação de lente, com a zona fundida, ZF, constituída de grãos colunares, os quais estão envolvidos por grãos equiaxiais grosseiros, caracterizando a ZTA.

As juntas obtidas com o par de eletrodos 5/16 mm apresentam lentes de solda mal formadas, ou seja, há pequenas e esparsas regiões fundidas na interface chapa/tubo e não são simétricas com a interface de contato chapa/tubo, caracterizadas pela presença de grãos colunares, os quais estão envolvidos por uma grande área de grãos equiaxiais grosseiros.

A melhor formação de lentes de solda verificou-se quando se utilizou eletrodo superior esférico, isto se deve ao fato desta geometria de eletrodo concentrar a corrente de soldagem e, deste modo, fundir a interface chapa/tubo de modo mais simétrico e concentrado.

A relação de grandeza entre as penetrações superior e inferior nas soldas obtidas com suporte condutor, variou de 0,6 a 1,1, mostrando penetrações maiores nos tubos do que nas chapas de 0,95 mm, este comportamento é semelhante ao de juntas de chapa/chapa para as mesmas espessuras. Já as soldas com corrente na lateral dos tubos apresentam uma relação muito variável, em torno de 10, mas sendo sempre maior a penetração na chapa superior. Nas outras condições testadas que apresentaram penetrações, elas foram sempre maiores nas chapas de 0,95 mm do que nos tubos, com valores variando de 1 a 8 vezes.

As penetrações parecem estar ligadas à concentração do fluxo de corrente. Assim, quando se utilizou suporte condutor no interior dos tubos, a corrente de soldagem não teve que passar pela parede do tubo para fundir a interface chapa/tubo, ficando mais concentrada e, portanto, fundindo maior área nos tubos do que nas chapas de 0,95 mm. Este fato é comprovado quando se observa as penetrações dos demais testes de solda, onde a corrente por passar pela parede do tubo ficando mais distribuída e, conseqüentemente, apresentou penetrações inferiores menores do que as superiores.

Os pontos de solda com força de 800 N apresentaram maiores e mais freqüentemente trincas, com valores médios entre 120 μm a 520 μm . Já nas soldas com 2800 N, os valores médios foram bem menores (de 30 μm a 80 μm). Deste modo, evidencia-se que o aumento das resistências de contato eletrodo/chapa, obtidos com a força de 800 N, causou maior aquecimento nesta interface, favorecendo o aparecimento de trincas.

Os diâmetros de lente apresentam uma relação linear crescente com a corrente de soldagem. Os valores médios dos diâmetros de lente para cada teste foram 6,3 mm para soldas com 800 N, 6,1 mm para soldas com suporte não condutor e 5,4 mm para soldas com condução da corrente na parede lateral do tubo e com suporte condutor no interior dos tubos.

Pode-se notar que os diâmetros de lente sofreram interferência do local da solda e da geometria dos eletrodos. Os testes de soldagem com ponto no centro apresentaram maiores diâmetros de lente, variando de 2% a 20% em relação aos pontos na borda. As soldas realizadas com eletrodos de cone truncado apresentaram diâmetros de lente maiores, variando de 6% a 12% em relação às soldas obtidas com eletrodos esféricos.

Em todos os testes, as cargas de tração aumentaram com a corrente de soldagem. Os valores médios das cargas de cada tipo de teste foram de: 3793 N para as soldas realizadas com suporte não condutor no interior dos tubos, 3975 N para soldas realizadas com força de 800 N, 3168 N para soldas realizadas com corrente na lateral dos tubos e 3800 N para soldas realizadas com suporte condutor no interior dos tubos. Como se observa, os valores médios das soldas obtidas com suporte condutor, suporte não condutor e força de 800 N foram muito próximos (variação de 2 % a 4 %). Já as soldas com corrente na lateral dos tubos apresentou um valor médio 22% menor.

A geometria do eletrodo não apresentou clara influência, ora as cargas são maiores com eletrodo esférico ora são maiores com eletrodo cone truncado. Já o local da solda, revelou que solda na borda apresentaram maiores valores médios de cargas de tração. Provavelmente porque houve melhor formação da lente de solda para pontos na borda, por apresentarem maior resistência mecânica durante a soldagem.

Os diâmetros de lente apresentaram relação linear crescente com as cargas de tração. Contudo a influência das penetrações não foi clara nas cargas de tração, pois as soldas com suporte condutor no interior dos tubos apresentaram penetrações e ainda assim os valores médios das cargas foram semelhantes aos obtidos para soldas sem penetração (soldas obtidas com a força de 800 N). Outra evidência são as soldas obtidas com corrente lateral dos tubos, em que as

penetrações foram muito grandes nas chapas de 0,95 mm e as cargas de tração foram as mais baixas.

O comportamento do torque máximo dos pontos de solda é semelhante ao das cargas de tração axial máxima. Os valores médios, obtidos para cada tipo de teste de solda, foram: 32 Nm para as soldas realizadas com suporte não condutor, 32 Nm para as soldas realizadas com a força de 800 N, 23 Nm para as soldas realizadas com corrente na lateral dos tubos e 28 Nm para as soldas obtidas com suporte condutor no interior dos tubos.

As geometrias dos eletrodos e os locais das soldas não apresentaram clara influência no torque máximo dos pontos de solda realizados nos tubos de 1,5 mm.

Os diâmetros de lente apresentaram relação linear crescente também com as cargas de torção. Os valores médios de torção foram maiores para as juntas onde não houve clara formação de lente de solda (em torno de 32 N). Onde as penetrações foram maiores, nas chapas de 0,95 mm (para pontos obtidos com corrente na lateral do tubo), as cargas de torção foram menores. (em torno de 24 Nm).

As fraturas dos pontos de solda após os testes de tração e torção ocorreram predominantemente na forma de botão, muito embora, algumas fraturas interfaciais tenham ocorrido. As soldas obtidas com suporte não condutor apresentaram de 30 % a 40 % de fraturas interfaciais para as duas geometrias de eletrodos, mas somente para pontos no centro. Nas soldas obtidas com força de 800 N, as fraturas interfaciais ocorreram para as duas geometrias de eletrodos e para os dois locais de solda, apesar de terem uma incidência menor que no caso anterior, em torno de 20 %. Já as soldas obtidas com corrente na lateral dos tubos só não apresentaram fraturas interfaciais quando se utilizou eletrodo esférico com pontos no centro dos CP's; a incidência foi de 20 %. Por fim, as soldas obtidas com suporte condutor e ponto no centro apresentou 25% de fraturas interfaciais.

A geometria dos eletrodos e locais de soldagem não apresentaram uma correlação clara com a obtenção de fraturas interfaciais, para esta espessura de junta, soldadas sob diferentes condições. Contudo, a fratura interfacial ocorreu em pontos de solda obtidos com baixa corrente, sendo que nestas condições de soldagem os pontos de solda possuirão uma pequena lente de solda com área de fusão pouco definida, apresentando assim menor resistência mecânica na lente de solda, favorecendo a fratura interfacial.

É interessante notar que as juntas com espessura de tubo de 1,5 mm foram as que apresentaram o maior índice de fratura interfacial, e menores cargas de tração, quando comparadas com as demais espessuras de juntas testadas. Comparando estes resultados com as juntas de chapa/chapa, se verifica o mesmo comportamento, ou seja: as juntas de chapa/chapa com chapas de 0,95/1,5 mm também apresentaram menores cargas de tração e maior incidência de fratura interfacial quando comparada com as demais espessuras de chapas estudadas, sendo que nestas juntas houve lente fundida para todas as condições de soldagem. Contudo, para os dois tipos de juntas, os valores médios obtidos para as cargas de tração axial e de torção foram maiores do que os valores mínimos proposto por Yelson (2) e IIW (17), respectivamente, o que viabiliza os quatro processos de soldagem proposto nesse trabalho para juntas de chapa/tubo de 0,95/1,5 mm assim como o processo de soldagem de juntas de chapa/chapa de 0,95/1,5 mm.

7.3.5 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE SOLDAGEM EM TUBOS DE 2,0 MM DE ESPESSURA

Para possibilitar a comparação dos resultados obtidos para juntas com tubos de 2,0 mm de espessura, foi construída a tabela 7.45 apresentada a seguir. Os valores médios apresentados foram obtidos com base nas tabelas 7.14, 7.15, 7.18, 7.19, 7.31, 7.34, 7.37 e 7.38.

Tabela 7.43: Valores médios dos resultados dos parâmetros de soldagem obtidos de todos os testes de soldagem em chapa/tubo de 0,95/2,0 mm, cujas condições de soldagem estão indicadas abaixo da tabela.

Soldas	I(kA) inicial	ϕ L(mm) média	Def(mm) média	PeS/I rezão	TS/I(μ m) média	Ftra/tor % B	Tor(Nm) média	Tra(N) Média
5/16 C*	10,7	6,5	1,2	3,1 a 4,3	3/ -	100	38	6830
5/16 B*	10,7	5,9	1,0	3,1 a 16,3	58/ -	100	32	5940
12/16 C*	9,3	4,9	0,9	2,6 a 6,7	44/ -	100	27	5860
12/16 B*	9,4	5,8	0,7	3,3 a 9,3	58/ -	100	32	5900
5/peça C**	6,5	5,0	0,2	2,6 a 7,8	278/ -	80	20	4100
12/peça C**	6,1	4,9	0,2	2,5 a 3,6	48/ -	90	24	3480
12/peça B**	5,7	4,2	0,2	1,7 a 3,9	51/ -	60	15	3280
12/16 M***	8,0	5,4	0,2	2,3 a 2,5	42/ -	100	31	6000

* Solda com os parâmetros inicialmente determinados, F= 2800 N, ts = 15 ciclos;

** Solda com corrente na lateral do tubo, F = 800 N, ts = 15 ciclos;

*** Solda com suporte condutor no interior dos tubos, F = 2800 N, ts = 15 ciclos.

A corrente inicial de soldagem variou significativamente para os três condições testa. Para as soldas obtidas com os parâmetros inicialmente determinados a corrente inicial apresentou os maiores valores, em torno de 18% maiores do que para soldas obtidas com um condutor de cobre em seu interior, e estes, 36% maiores do que os valores obtidos para soldas utilizando força de 800 N e corrente na lateral do tubo.

A corrente inicial variou também em função da geometria dos eletrodos e do local da solda. O uso de eletrodo esférico, de raio 12 mm, causou redução da corrente inicial em torno de 10 a 14 %. O local da solda só influenciou os pontos realizados com força de 800 N e corrente na lateral do tubo, enquanto que as correntes necessárias para soldas no centro foram 7 % maiores do que as soldas realizadas na borda. Conforme comentários anteriores, vimos que eletrodo de menor área de contato requer menor corrente de soldagem porque o fluxo de corrente fica mais concentrado, necessitando de menor intensidade de corrente para se obter o ponto de solda. Já o ponto no centro do tubo necessitou de mais corrente porque a corrente de soldagem foi dividida

em 2 e conduzida pelas paredes do tubo, dispersando o fluxo de corrente, logo foi necessário maior corrente de soldagem para se obter os pontos de solda.

Os intervalos de corrente para os três testes de soldagem foram em todos maiores do que 2,6 kA. Podemos notar ainda que o intervalo de soldagem foi maior quando se utilizou eletrodos esféricos de raio 12 mm (em torno de 10 % a 30 % maior). Em todos os testes houve ampla faixa de soldagem.

Os pontos de solda, obtidos com os parâmetros inicialmente determinados, causaram aumento da deformação com o aumento da corrente de soldagem, tendo um valor médio de 1,0 mm. Já os demais métodos apresentaram valores de deformações constantes com a corrente, tendo um valor médio de 0,2 mm. As soldas nas bordas dos CP's apresentaram deformações cerca de 20 % menores do que as soldas realizadas no centro.

As maiores deformações nas juntas de chapa/tubo de 0,95/2,0 mm obtidas com os parâmetros iniciais de soldagem ocorreram porque necessitaram de maiores corrente, logo houve maior aquecimento das paredes do tubo por efeito Joule, conseqüentemente com redução da resistência mecânica, deformando sob ação dos eletrodos. . Já nas soldas com corrente na lateral dos tubos as correntes foram menores, assim como a força entre eletrodos, resultando em menores deformações. Por fim as juntas obtidas com suporte condutor no interior dos tubos não deformaram principalmente porque havia um suporte no interior dos tubos.

As seqüências metalográficas dos pontos de solda em chapa/tubo de 0,95/2,0 mm, figuras 7.16, 7.20, 7.32, 7.36, 7.40, apresentaram ZF na interface de contato chapa/tubo, sendo estas constituída de grãos colunares que cresceram no sentido oposto à extração de calor pelos eletrodos. Após a ZF, encontra-se a ZTA, constituída de grãos equiaxiais grosseiros.

As lentes de solda das juntas de 0,95/2,0 mm obtidas nos três processos de soldagem apresentaram maior penetração nas chapas superiores apesar de existirem peculiaridades decorrente de cada processo de soldagem. Nas lentes de solda obtidas com suporte condutor no interior dos tubos, a razão entre penetrações superior e inferior (PeS/I) foi da ordem de 1,2. Já as soldas realizadas com 800 N e corrente na lateral do tubo, a razão PeS/I variou de 2 a 8 e nas

soldas obtidas com os parâmetros iniciais a razão PeS/I variou de 2 a 16. O fato das penetrações terem sido maiores nas chapas de 0,95 mm ocorreu principalmente porque a massa metálica dos tubos extraiu calor da interface chapa/tubo, tornando menores as penetrações nos tubos.

Observando ainda as lentes de solda das juntas obtidas com os parâmetros iniciais de soldagem e eletrodo cone truncado na figura 7.16 nota-se que as lentes estão divididas em duas. Esta irregularidade parece ser decorrente do fato da corrente de soldagem ter sido dividido em duas e conduzida pelas paredes do tubo, chegando ao eletrodo superior principalmente pelas bordas. Paralelamente houve deformação dos tubos o que propiciou a formação de duas pequenas poças de fusão na interface chapa/tubo destas juntas. Essa "irregularidade" na lentes de solda resultou nas maiores cargas de tração destas juntas.

A utilização de eletrodos esféricos de raio 12 mm, resultou em uma melhor formação de lente do que os eletrodos cone truncado, para todas as juntas testadas. Entende-se por melhor formação das lentes de solda a existência de uma poça fundida na interface chapa/tubo, simétrica e compacta.

A análise dos pontos de solda revelou que não existem vazios no interior das lente, contudo há trincas nas chapas zincadas de 0,95 mm de espessura sendo que estas crescem com a corrente de soldagem. As soldas realizadas com 800 N e corrente na lateral do tubo, apresentaram os maiores tamanhos e incidências de trincas por ser maior a resistência de contato chapa/eletrodo com a menor força entre eletrodos (2,14,18). A geometria dos eletrodos e o local das soldas não parecem ter uma influência clara na formação das trincas.

Os diferentes métodos de obtenção dos pontos de solda influenciaram os valores médios de diâmetros de lente. As soldas obtidas com parâmetros iniciais de soldagem apresentaram diâmetros de lente 7 % maior do que as soldas obtidas com suporte condutor no interior dos tubos; estes apresentaram diâmetro 15 % maior do que as soldas com força de 800 N e corrente na lateral do tubo. Assim como no caso de tubos de 1,5 mm, os diâmetros de lente aumentaram com a corrente de soldagem.

Os diâmetros de lente foram influenciados pela geometria dos eletrodos superiores, de modo que com eletrodos esféricos o diâmetro de lente médio foi menor do que com o eletrodo cone truncado, ficando em torno de 9 a 16%.

As cargas de tração axial máxima e os torques máximo resultaram em comportamento coerente com os diâmetros das lentes de solda, ou seja nos casos onde os diâmetros foram maiores os valores de carga de tração e torque também foram maiores, uma vez que com maior diâmetro maior é a área resistente do ponto de solda.

A média das cargas de tração axial dos pontos de solda obtidos com os parâmetros iniciais foram as maiores (6140 N), sendo este valor 3% maior do que para os pontos de solda obtidos com suporte condutor no interior dos tubos (6000 N), os quais são 53% maior do que as cargas de tração para os pontos de solda obtidos com 800 N e corrente na lateral dos tubos (3930 N).

As cargas de tração parecem não sofrer influência do local da solda. Já a geometria dos eletrodos exerce uma influência; as cargas de tração axial obtidas para as juntas soldadas com o uso do eletrodo cone truncado apresentaram um valor médio da ordem de 5% a 17 % maior.

Os pontos de solda obtidos com os parâmetros iniciais de soldagem resultaram em maior torque, 33 Nm, sendo este valor 6% maior do que o obtido com o suporte condutor (31 Nm) e 65% maior que o valor médio obtido para os pontos de solda com força de 800 N e corrente na lateral do tubo (20 Nm).

As cargas de torção parecem não ser influenciadas pelo local das soldas, já que os valores médios são muito próximos. As geometrias de eletrodos apresentam valores médios um pouco mais distintos, sendo 30 N·m quando se utilizou o par de eletrodos 5/16 mm e 25 Nm para o par 12/16 mm.

Os pontos de solda submetidos aos testes de tração e torção, só apresentaram fratura interfacial para as soldas obtidas com força de 800 N e corrente na lateral do tubo, sendo que, mesmo nestes casos, a incidência de fratura interfacial foi de apenas 10 % para soldas no centro e de 40% para soldas nas bordas.

Podemos verificar que as soldas em juntas de chapa/chapa e chapa/tubo de 0,95/2,0 mm de espessura apresentaram os maiores intervalos de soldagem, as maiores cargas de tração máxima e torque máximo assim como a menor incidência de fratura interfacial, o que indica boas condições de soldagem e que os parâmetros de soldagem previamente definidos foram mais adequados para esta espessura de junta.

7.3.6- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE SOLDAGEM DAS TRÊS ESPESSURAS DE TUBOS OBTIDOS COM OS PARÂMETROS INICIAIS.

Como visto anteriormente, utilizando os parâmetros de soldagem determinados para as soldas de chapa/chapa, não foi possível soldar as chapas de 0,95 mm, zincadas, sobre os tubos de 1,5 mm fosfatizados, devido à deformação do tubo. Deste modo, tentando conhecer as demais influências da espessura do tubo de 1,5 mm, utilizou-se os resultados dos testes de solda em tubos de 1,5 mm, realizados com suporte não condutor no interior dos tubos, comparando estes aos resultados obtidos das soldas em tubos de 2,0 mm e soldas em tubos de 3,0 mm. Para tanto, foi confeccionada a tabela 7.42 com os valores médios dos resultados dos parâmetros de soldagem analisados nas tabelas 7.14 a 7.25 e figuras 7.16 a 7.27 .

Tabela 7.44: Valores médios dos resultados dos parâmetros de soldagem obtidos de soldas em chapa/tubo, com chapas zincadas de 0,95 mm e tubos fosfatizados, de três espessuras, soldados com os parâmetros inicialmente determinados e com suporte não condutor no interior dos tubos, eletrodos 5/16 e 12/16, soldas no centro e na borda, F= 2800 N, ts = 15 ciclos.

Soldas	I(kA) início	ϕ L(mm)	Def(mm)	PeS/I %	TS/I(μ m) média	Ftra/tor %	Tor(Nm)	Tra(N)
5/16 C *	9,5	6,7	0,1	-	56	67	29	3340
5/16 B *	9,3	6,3	0,1	1,1	31	100	37	3870
12/16 C *	7,9	5,9	0,2	4 - 7	68	60	25	3218
12/16 B *	7,9	5,7	0,2	1,2 - 1,8	59	100	36	3950
5/16 C **	10,7	6,5	1,2	3	15	100	38	6830
5/16 B **	10,7	5,9	1,1	3	73	100	32	5940
12/16 C **	9,3	4,9	0,9	2 - 6	103	100	27	5857
12/16 B **	9,4	5,8	0,7	3 - 9	96	100	32	5898
5/16 C ***	9,4	5,6	0,2	2	232	100	33	6090
5/16 B ***	8,5	5,5	0,2	2	31	100	31	5130
12/16 C ***	8,0	4,9	0,2	2 - 3	82	87	28	5285
12/16 B ***	6,8	4,4	0,1	2 - 3	83	100	34	4570

* soldas de chapa/tubo de espessura 0,95/1,5 mm, obtidas com suporte não condutor no tubo

** soldas de chapa/tubo de espessura 0,95/2,0 mm, obtidas com os parâmetros iniciais de soldagem

*** soldas de chapa/tubo de espessura 0,95/3,0 mm, obtidas com os parâmetros iniciais de soldagem

As correntes iniciais de soldagem foram menores quando se utilizou o par de eletrodos 12/16 mm, ficando em torno de 14% a 22 % menores, para todas as espessuras de tubos e para soldas tanto no centro como na borda dos CP's. Este fato se deve à menor área de contato do eletrodo esférico com a superfície das chapas, requerendo, assim, um menor valor de corrente para obter-se a mesma densidade de corrente necessária para se executar os pontos de solda.

Apesar da redução da corrente inicial de soldagem com o uso de eletrodo esférico, as duas geometrias de eletrodos apresentaram o mesmo comportamento, ou seja, as correntes nos tubos de 1,5 mm e de 2,0 mm de espessura foram maiores do que nos tubos de 3,0 mm.

Os tubos de 1,5 mm e de 2,0 mm não apresentaram variações de corrente com o local da solda; no entanto, nos tubos de 3,0 mm as soldas realizadas nas bordas apresentaram menores correntes do que no centro, tanto para eletrodos 5/16 como para 12/16 mm. As reduções de corrente foram, respectivamente, da ordem de 11 % a 18% para soldas na borda.

A menor intensidade de corrente necessária para soldar juntas com tubos de 3,0 mm pode ser atribuída à menor resistência interna destes tubos, pois, calculando as resistências internas dos tubo, pela expressão 2.6 apresentada no capítulo 2 deste, obtive-se os seguintes resultados:

R_i = Resistência interna dos tubos ,

R_i para tubos de 1,5 mm = 147,5 Ω ,

R_i para tubos de 2,0 mm = 116,64 Ω ,

R_i para tubos de 3,0 mm = 73,76 Ω .

Deste modo, durante a passagem de corrente, os tubos de 3,0 mm ofereceram menor resistência interna, havendo menor aquecimento interno por efeito Joule e, conseqüentemente, necessitando-se de menor corrente de soldagem necessária para a obtenção dos pontos de solda. As juntas com tubos de 2,0 mm não apresentaram menores correntes do que as juntas com tubos de 1,5 mm, provavelmente, por existir um valor limite de resistência interna no interior dos tubos, no qual durante a passagem de corrente pelas paredes do tubo causa um aquecimento por efeito Joule, aumentando ainda mais as resistências internas destes, conseqüentemente, necessitando de maiores correntes de soldagem. No entanto, a confirmação destas hipóteses demanda uma investigação mais detalhada em trabalhos posteriores.

Os intervalos de soldagem foram maiores quando se utilizou o par de eletrodos 12/16 e quando a solda foi feita no centro, para as três espessuras de juntas. Todos os intervalos de soldagem obtidos foram maiores do que 1000 A, o que indica parâmetros de soldagem aceitáveis para estas juntas.

As deformações no interior dos tubos, durante a soldagem, variaram com a espessura dos tubos. Os tubos de 1,5 mm submetidos às condições iniciais de soldagem, sem suporte interno, para as duas geometrias de eletrodos e os dois locais de solda, sofreram grandes deformações (em torno de 4,0 mm de redução da altura interna dos tubo, não sendo possível executar a solda. Mas, quando estes tubos foram soldados com os mesmos parâmetros, porém com o suporte não condutor no seu interior, o valor médio das deformações reduziu para 0,15 mm.

As juntas com tubos de 2,0 mm, submetidas aos parâmetros iniciais de soldagem, conseguiram ser soldadas com alguma deformação interna das paredes dos tubos; os valores médios obtidos ficaram na faixa de 0,7 mm a 1,2 mm. A utilização do par de eletrodos 5/16 mm causou deformação nos tubos de 2,0 mm 38 % maior do que com eletrodos 12/16 mm, tanto para soldas no centro como na borda dos CP's. O local da solda também influenciou significativamente, de modo que soldas no centro deformam 20 % a mais do que as soldas realizadas nas bordas.

Os tubos de 3,0 mm, submetidos aos parâmetros iniciais de soldagem, para as duas geometrias de eletrodo e local de solda, não deformaram significativamente durante as correntes de soldagem, com valor médio constante de 0,2 mm, em todos os casos.

A deformação interna dos tubos ocorreu principalmente pela ação conjugada de dois fatores, a saber, a resistência mecânica e a resistência elétrica do material. Quando se tentou soldar os tubos de seção quadrada 30X30 mm², com espessura de 1,5 mm, sua baixa resistência mecânica não foi suficiente para suportar à força dos eletrodos, deformando sensivelmente os tubos sem que ocorresse a solda. Este problema se agrava com a passagem da corrente elétrica, já que o calor gerado por efeito Joule nas paredes do tubo diminui ainda mais sua resistência mecânica. Mas com a utilização de suporte no interior dos tubos, este ofereceu a resistência mecânica necessária à força dos eletrodos, tornando possível a realização dos pontos de solda.

As juntas com tubos de 2,0 mm de espessura, muito embora apresentassem alguma deformação, puderam ser soldadas, já que estas apresentam uma maior resistência mecânica. Nestes casos, com condições suficientes para suportar a força dos eletrodos mesmo durante a passagem das altas correntes de soldagem. Nos tubos de 3,0 mm a resistência mecânica foi alta o

suficiente para suportar a força dos eletrodos, não tendo havido deformação apreciável nestas juntas durante a passagem de corrente elétrica.

Comparando as seqüências metalográficas dos pontos de solda nas figuras 7.16, 7.17, 7.20, 7.21, 7.24 e 7.25, para as três espessuras de tubos, observa-se um comportamento distinto na macroestrutura das lentes para cada espessura.

As juntas com tubos de 3,0 mm apresentaram lentes de solda com área fundida na interface de contato chapa/tubo, para todos os intervalos de soldagem, não apresentando variações com a geometria dos eletrodos e nem com o local da solda. Para as juntas com tubos de 2,0 mm, as lentes sofreram nítida interferência da geometria dos eletrodos, sendo que as melhores formações de lente foram com o par de eletrodos 12/16; neste caso, há uma área fundida na interface de contato chapa/tubo. Quando se utilizou eletrodos 5/16 mm a área fundida se apresentou dividida em duas. Já nas juntas com tubos de 1,5 mm, soldadas com suporte não condutor, houve formação de lente com área fundida na interface chapa/tubo para as duas geometrias de eletrodo. Porém, com o par de eletrodos 5/16, a fusão foi restrita à interface, enquanto que com o par 12/16, houve fusão completa da lente.

Em todos os CP's que apresentaram lente com área fundida, as estruturas presentes na ZF são constituídas de grãos colunares que cresceram, principalmente, no sentido oposto à extração de calor pelos eletrodos e estão circundados por grãos equiaxiais grosseiros (ZTA); após esta região situa-se o metal de base em seu estado inicial, constituído de grãos equiaxiais pequenos.

As variações da geometria das lentes de solda foram resultantes de particularidades no mecanismo de geração de calor por efeito Joule, para as três espessuras de juntas, as quais estão descritas abaixo.

Nas juntas com tubos de 1,5 mm, obtidas com suporte não condutor, durante a passagem de corrente, o calor foi gerado no interior dos tubos (em menor quantidade) e na interface de contato chapa/tubo, provocando a fusão nesta região. Cessada a corrente, a extração de calor ocorreu principalmente pela ação dos eletrodos, pois o tubo aquecido não teve eficiência na refrigeração dos pontos, o que causou uma área difusa após a ZF central. As lentes obtidas com o

par de eletrodos 5/16 não apresentam poça de fusão, como no caso em que se usou par 12/16, em virtude do fluxo de corrente ser mais difuso.

Nas juntas com tubos de 2,0 mm, as quais necessitaram de altas correntes e apresentaram alguma deformação durante a soldagem, quando se utilizou o par de eletrodos 5/16 mm, o fluxo de corrente estava concentrado na borda dos eletrodos, formando duas pequenas lentes de solda; o mesmo não ocorreu com eletrodos esféricos, pois a corrente se concentrou no centro do eletrodo fundindo apenas uma região mais central. Cessada a passagem de corrente, o calor foi extraído pelos eletrodos e pela massa do tubo, o que pode ser observado pela nitidez da área fundida.

Trabalhos recentes sobre geometria de eletrodos (21) confirmam que a geometria cone truncado, com diferentes graus de conicidade, concentra a maior parte da corrente na sua borda. Outros trabalhos (22) sobre soldas de chapas de aço afirmam que em soldas obtidas com altos valores de corrente, estas não estão distribuídas uniformemente e causam o aparecimento de lentes divididas. Portanto, quando se utilizou o par de eletrodos 5/16, esta geometria de eletrodos, associada às altas correntes e deformações dos tubos, foram os responsáveis pelo aparecimento de lentes divididas em juntas com tubos de 2,0 mm.

Nas juntas com tubos de 3,0 mm, obtidas com menores correntes e sem deformação interna dos tubos durante a passagem de corrente, também houve a geração de calor por efeito Joule tanto no interior do tubo (em pequena quantidade) como na interface de contato chapa/tubo, sendo que a fusão na interface ocorreu sem deformação dos tubos. Cessada a passagem de corrente, o calor foi extraído tanto pelos eletrodos de contato como pela massa metálica dos tubos de 3,0 mm, pois as paredes destes tubos aqueceram pouco durante a passagem de corrente, em virtude de sua baixa resistência elétrica. Deste modo, a extração de calor foi tão eficiente que fez surgir uma linha divisória entre a área fundida e a zona termicamente afetada pelo calor, delineando claramente a lente de solda para todas as condições de soldagem executadas.

Observando ainda as macrografias dos pontos de solda (figuras 7.16, 7.17, 7.20, 7.21, 7.24 e 7.25), podemos notar que a linha final de solidificação não é muito nítida para as soldas em tubos de 1,5 mm e 2,0 mm, assim como não se observam vazios em nenhum ponto de solda.

A não existência de vazios pode ser atribuída ao menor calor gerado na interface de contato chapa/tubo, em decorrência do fluxo de calor não ter sido concentrado nestas interfaces.

As penetrações das lentes de solda aumentaram com a corrente de soldagem, sendo que as penetrações superiores são sempre maiores do que as inferiores, para as três espessuras de tubo. A relação de grandeza entre PeS/I , para tubos de 3,0 mm, permaneceu constante e igual a 2. Já nos tubos de 1,5 mm e 2,0 mm, a relação PeS/I variou muito, na faixa de 2 até 16.

O motivo provável para que tenha ocorrido maior penetração na chapa superior, (de 0,95 mm), talvez seja a concentração do fluxo de corrente na chapa de 0,95 mm, em conjunto com a maior dispersão do fluxo de corrente no interior dos tubos e com a maior extração de calor por parte do material do tubo. Durante a passagem de corrente, o eletrodo superior, em contato com a superfície da chapa de 0,95 mm, provocou a concentração do fluxo de corrente até a interface chapa/tubo. Ao mesmo tempo, houve maior resfriamento do tubo, em decorrência de sua maior massa metálica, sendo este resfriamento mais eficiente em tubos de 3,0 mm, devido à sua maior massa metálica e menor temperatura (já que a geração de calor por efeito Joule nas suas paredes foi menor).

As explicações do parágrafo anterior são coerentes com um trabalho por nós já realizado (23), onde investigou-se a influência de diferentes geometrias de eletrodos nas soldas de chapas de 0,95 mm sobre chapas de 2,0 mm. Os resultados obtidos com um par de eletrodos, que é exatamente o complementar (inverso) do utilizado neste trabalho, ou seja, 16/5 mm, mostraram soldas com fusão no interior das chapas de 2,0 mm e não na interface, o que ocorreu devido à concentração do fluxo de corrente no interior da chapa mais grossa. Isto demonstra que a concentração de corrente desempenha um importante papel na fusão da lente de solda.

As trincas surgiram apenas nas chapas de 0,95 mm e cresceram com as maiores correntes de soldagem, tanto para o par de eletrodos 5/16 como para o 12/16, não existindo em nenhum ponto de solda obtido com baixa corrente. A geometria dos eletrodos e o local da solda influenciaram o tamanho das trincas, de modo que as soldas realizadas com o par de eletrodos 12/16 mm apresentaram maiores trincas nas três espessuras de tubos investigadas. As trincas

foram maiores para as soldas realizadas no centro dos CP's, principalmente com o uso do par de eletrodos 12/16 mm.

Como visto no capítulo dois, a presença de trincas em chapas zincadas está associada ao alto calor gerado na interface eletrodo/chapa. Deste modo, o calor gerado por altos valores de corrente provoca o desprendimento de cobre, formando uma liga de cobre e zinco na superfície da chapa, os quais penetram nos contornos de grão das chapas, provocando as trincas (18). Deste modo, o fato das trincas serem mais acentuadas com o eletrodo esférico, se deve a maior densidade de corrente que estes eletrodos geram durante a soldagem, causando maior aquecimento da interface eletrodo/chapa. O fato das trincas serem maiores no centro dos pontos de solda pode ser atribuído à existência de maiores deformações elásticas do tubo quando aquecido, durante a passagem de corrente.

Os diâmetros de lente aumentaram com a corrente de soldagem em todos os casos. Eles sofreram interferência da geometria dos eletrodos, local de solda e espessura dos tubos.

Os diâmetros de lente obtidos com eletrodos 5/16 mm foram sempre maiores do que os obtidos com o par de eletrodos 12/16 mm. O aumento percentual dos diâmetros quando se utilizou o par de eletrodos 5/16 mm foram de 12%, 15% e 19%, respectivamente, para os tubos de espessura 1,5 mm, 2,0 mm e 3,0 mm.

As soldas realizadas no centro dos tubos apresentaram valor médio de diâmetro de lente maior do que as soldas realizadas nas bordas dos CP's (de 2% a 11%), sendo que apenas as juntas com tubos de 2,0 mm, obtidas com o par de eletrodos 12/16 mm, apresentaram diâmetro de lente maior na borda.

Comparando os diâmetros de lente médios de cada espessura de tubo, pode-se observar que os valores reduziram com aumento da espessura dos tubos. Os valores médios obtidos foram 6,2 mm para tubos de 1,5mm, 5,8 mm para tubos de 2,0 mm e 5,2 para tubos de 3,0 mm. Portanto, as variações percentuais com relação às juntas de 1,5 mm foram de 7% menores com tubos de 2,0 mm e 19% menores com tubos de 3,0 mm.

A utilização de eletrodo superior esférico produziu menor diâmetro de lente porque tanto a corrente de soldagem foi menor como o fluxo de corrente foi mais concentrado. A redução do diâmetro de lente para maiores espessuras de tubos ocorreu principalmente, pela ação de dissipação de calor da interface de solda por parte da massa metálica do tubo, de modo que, com maior espessura, menor foi o diâmetro. O tubo estava menos aquecido, deste modo com menor resistência elétrica interna, assim foi mais eficiente na extração de calor da interface, tornando menor a lente de solda. O maior diâmetro de lente para solda no centro, se deve ao fato da corrente de soldagem que saiu do eletrodo inferior ter sido dividida em duas, sendo cada parte conduzida pela parede do tubo, alcançando o eletrodo superior pelas suas bordas, favorecendo assim o maior diâmetro de lente.

As cargas de tração axial médias obtidas com eletrodos 5/16 mm foram sempre maiores do que as cargas de tração obtidas com o par de eletrodos 12/16 mm, sendo que o acréscimo percentual das cargas de tração foram de 2% para tubos de 1,5 mm, 9% para tubos de 2,0 mm e 14% para tubos de 3,0 mm.

A espessura do tubo também influenciou as cargas de tração axial, de modo que os tubos de 2,0 mm apresentaram o maior valor médio (6140 N) enquanto que nos tubos de 3,0 mm o valor médio foi 15 % menor (5270 N) e, ainda 70 % menor, nos tubos de 1,5 mm (3595 N).

A influência do local da solda variou com a espessura dos tubos, sendo que em juntas com tubos de 1,5 mm as soldas na borda apresentaram cargas em torno de 16% a 23% maiores que no centro. Já nas juntas com tubos de 2,0 e 3,0 mm, há uma tendência de carga maior para solda no centro, com um acréscimo percentual de 15% a 19%.

Como se sabe, o aumento da corrente de soldagem, normalmente, determina maiores diâmetros de lente e maiores cargas de tração, já que as cargas de tração são resultantes do tamanho da área resistente. Portanto, as soldas obtidas com o par de eletrodos 5/16 apresentaram as maiores lentes e, conseqüentemente, as maiores cargas de tração.

Como visto anteriormente, os diâmetros das lentes de solda diminuíram com o aumento da espessura do tubo, enquanto as cargas de tração aumentaram. Este fato, que poderia parecer

contraditório com as explicações existentes, sugere que a área fundida das lentes de solda desempenha importante papel quanto às cargas de tração, sendo esta área resultante de diferentes mecanismos de geração e extração de calor na interface chapa/tubo. As juntas com tubo de 2,0 mm apresentaram lentes de solda divididas em dois, o que resultou nas maiores cargas de tração; as juntas com tubos de 3,0 mm apresentaram lentes de modo convencional, com apenas uma área fundida central, e bem delineada, o que resultou em cargas de tração um pouco menores que nas juntas de 2,0 mm. Por último, nas juntas com tubos de 1,5 mm obtidas com suporte não condutor, as lentes de solda tem os maiores diâmetros mas, no entanto, não possuem a área fundida bem delineada e compacta como para juntas de 3,0 mm; a região fundida é irregular ao longo da interface chapa/tubo, o que resultou nas menores cargas de tração. De qualquer modo, para um entendimento mais exato dos mecanismos envolvidos, faz-se necessário um estudo posterior mais aprofundado da microestrutura e do parâmetro de separação entre as chapas.

Os resultados obtidos nos testes de torção indicam um crescimento do torque com maiores correntes de soldagem. O torque máximo obtido com o par de eletrodos 5/16 mm foi sempre maior do que os valores obtidos com 12/16 mm, sendo que os aumentos percentuais foram de 10% para juntas com tubo de 1,5 mm, 17% com tubos de 2,0 mm e 3% com tubos de 3,0 mm.

Quanto ao local da solda, em juntas com tubo de 1,5 mm as soldas na borda apresentaram um torque maior, enquanto que para as juntas de 2,0 mm e de 3,0 mm há uma tendência de maior torque para soldas no centro.

As juntas com tubos de 2,0 mm apresentaram valor médio de torque igual a 33 Nm, sendo este valor muito próximo do obtido para as juntas com tubos de 1,5 mm e 3,0 mm (32 Nm). Portanto, pode-se afirmar que a espessura dos tubos não causou interferência significativa nos valores de torque dos pontos de solda, quando comparados de maneira global.

Os resultados obtidos indicam que o torque é dependente do diâmetro da lente de solda, já que os maiores valores foram alcançados quando se utilizou o par de eletrodos 5/16 mm, os quais possuem as maiores lentes de solda. Existe, ainda, uma correlação muito fraca do torque com a geometria da lente, pois nos tubos de 2,0 mm, que apresentam lentes divididas em duas, o valor médio do torque foi 3% maior do que nas outras duas condições.

Os pontos de solda após os testes de tração e torção fraturaram predominantemente na forma de botão, para todas as condições de soldagem realizadas. Contudo, ocorreu também fratura interfacial para as juntas com tubos de 1,5 mm e 3,0 mm, na porcentagem de 25 % e 13%, respectivamente. As juntas com tubos de 2,0 mm apresentaram fratura em botão em 100% dos pontos testados

As fraturas interfaciais ocorreram nos pontos de solda obtidos com o par de eletrodos 12/16 mm e no centro do CP, tanto para as juntas de 1,5 mm como para as de 3,0 mm.

Observa-se que as fraturas interfaciais ocorreram somente para pontos de solda obtidos com baixas correntes de soldagem. As juntas com tubos de 1,5 mm, apesar de possuírem diâmetro de lente grande, tinham a interface de contato chapa/tubo constituída por estruturas colunares dispersas em pequenas regiões, o que resultou em baixa resistência mecânica das lentes. No caso das juntas com tubos de 3,0 mm, a baixa resistência mecânica se deve ao fato das lentes de solda, apesar de serem constituídas por estruturas colunares mais compactas, terem pequenos diâmetros de lente. O restante dos pontos de solda, que fraturaram em botão, apresentam a macroestrutura das lentes de solda, com formação de uma ou duas lentes de solda bem definidas e compactas. As juntas que apresentaram este tipo de formação de lente são constituídas de grãos colunares, no interior dos quais se encontram microestruturas aciculares, o que tornou a poça fundida bastante resistente.

Analisando a forma das fraturas, podemos notar que a ocorrência de fraturas em botão se deu por cisalhamento das chapas de 0,95 mm, tanto nos testes de tração como de torção, e as fraturas interfaciais ocorreram por tração nas lentes de solda.

7.3.7- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE SOLDAGEM DAS TRÊS ESPES-SURAS DE TUBOS OBTIDOS COM E SEM SUPORTE CONDUTOR NO INTERIOR DOS TUBOS, PAR DE ELETRODOS 12/16 MM E SOLDA NO CENTRO.

Para realizar estas comparações são utilizados os resultados apresentados nas tabelas 7.18, 7.20, 7.24, 7.30, 7.31 e 7.32, e nas figuras 7.21, 7.25, 7.32 e 7.33. Calculou-se os valores médios dos parâmetros analisados, e estes estão organizados na tabela 7.45, dada a seguir. Esta

comparação é muito interessante uma vez que as soldas obtidas com o suporte condutor no interior dos tubos apresentaram lente de solda semelhante às juntas de chapa/chapa, para as três espessuras investigadas.

Tabela 7.45: Valores médios dos resultados de soldagem das três espessuras de tubo obtidos com e sem suporte condutor no interior dos tubos, eletrodos 12/16, soldas no centro.

*,**	I(kA) início	ϕ L(mm) média	Def(mm) média	PeS/I razão	TS/I(μ m) média	Ftra/tor % B	Tor(Nm) média	Tra(N) média
0,95/1,5 *	7,4	5,4	0,2	0,7 a 1,1	77	40	28	3800
0,95/2,0 *	8,0	5,4	0,2	2,3 a 2,5	43	100	31	6000
0,95/3,0 *	7,9	4,9	0,2	1,1 a 1,4	24	87	32	5910
0,95/1,5 **	7,9	5,9	0,1	4 a 7	41	75	25	3210
0,95/2,0 **	9,3	4,9	0,9	3 a 7	44	100	27	5860
0,95/3,0 **	8,0	4,9	0,2	2 a 3	82	75	28	5290

* soldas em chapa/tubo COM suporte condutor no interior dos tubos

** soldas em chapa/tubo SEM suporte condutor no interior dos tubos

Comparando as correntes iniciais de soldagem, podemos notar que os valores foram maiores para as juntas obtidas sem suporte condutor. No geral, as soldas sem suporte condutor foram obtidas com correntes 10 % maiores. Todos os intervalos de soldagem foram maiores do que 2,0 kA.

Exceto para as soldas com tubos de 2,0 mm e sem suporte condutor (cujo valor médio da deformação no interior dos tubos foi 0,9 mm), os demais tubos soldados apresentaram valores médios em torno de 0,2 mm, os quais podem ser considerados como variações dimensionais, segundo a norma MBBF- 4041 (23). Lembrando que as juntas com tubos de 1,5 mm não apresentaram deformação por terem sido obtidas com suporte não condutor no interior dos tubos.

A presença de deformação nas soldas com tubos de 2,0 mm ocorreu devido ao aquecimento das paredes do tubo por efeito Joule, reduzindo sua resistência mecânica e, assim,

permitindo a deformarem pela ação da força dos eletrodos. Este comportamento fica evidente quando se observa que as deformações aumentaram com correntes de soldagem maiores.

As seqüências metalográficas das solda obtidas com e sem suporte condutor (figuras 7.21, 7.25, 7.32 e 7.33), mostram que houve formação de poça de fusão (ZF) na interface de contato chapa/tubo, e que estas são constituídas de grãos colunares que cresceram, principalmente no sentido oposto à extração de calor pelos eletrodos. Após esta região, encontra-se a ZTA constituída de grãos equiaxiais grosseiros. Somente as soldas com tubos de 1,5 mm, sem o suporte condutor, não apresentam nítida interface entre a ZF e ZTA.

As soldas sem suporte condutor tiveram maior penetração superior, enquanto que a situação se inverte com o uso do mesmo suporte, indicando que o fator determinante foi a concentração do fluxo de corrente. Sem o suporte condutor, a corrente se distribui pelas paredes interna dos tubos para chegar à interface chapa/tubo, provocando uma menor densidade de corrente nesta região. Já nas solda obtidas com suporte condutor o fluxo de corrente está mais concentrado ao chegar na interface chapa/tubo.

Observando ainda as seqüências metalográficas anteriormente mencionadas, nota-se que as soldas em tubos de 1,5 mm e 2,0 mm obtidos com suporte condutor, apresentaram vazios na linha final de solidificação. Nestas juntas houve menor dissipação de calor na interfaces chapa/tubo, causando o "splash" e a expulsão, os quais são responsáveis pelo surgimento dos vazios. As juntas com tubos de 3,0 mm não apresentaram "splash" porque a maior massa metálica do tubo teve atuação como dissipador do calor gerado na interface chapa/tubo.

As trincas foram um pouco maiores para as solda sem suporte condutor, as quais foram obtidas com correntes da ordem de 10% maior. Portanto, houve maior desprendimento de calor na interface de contato chapa/eletrodo, propiciando a formação de filme de líquido na interface, condição necessária para a formação de trincas. As soldas com tubos de 2,0 mm, sem suporte condutor, apresentaram valores médios de trincas maiores; mas nestas soldas houve deformação da parede interna dos tubos em torno de 0,9 mm, o que favoreceu o surgimento de maiores trincas.

Os diâmetros das lentes de solda, obtidas com e sem suporte condutor, apresentaram a mesma tendência de redução com o aumento da espessura dos tubos, indicando a participação da massa metálica na extração de calor das juntas soldadas. Ressalte-se que os valores médios do diâmetro de lente foram 20 a 40 % maiores do que o mínimo determinado pelas normas aplicáveis, ou seja, $4\sqrt{t}$, sendo "t" a espessura da chapa mais fina.

Os resultados dos testes de tração e torção, apresentaram o mesmo comportamento para as soldas obtidas com e sem suporte condutor, tendendo a crescer com a espessura do tubo. Os valores médios de carga de tração axial para juntas com tubos de 2,0 mm e 3,0 mm foram 50 % maiores do que para juntas com tubos de 1,5 mm; os torques obtidos foram 10 % maiores.

Pode-se notar ainda, que as soldas obtidas com suporte condutor, apresentaram cargas de tração e torque máximo 10 % maiores do que as juntas obtidas sem o suporte, apesar de terem sido obtidas com correntes 10 % menores. Deste modo, o suporte condutor no interior dos tubos, o qual concentrou a corrente de solda, necessitou de menores correntes para se obter os pontos e estes apresentaram maior resistência mecânica. É interessante observar ainda que, a diferença entre os resultados obtidos é pequena, indicando boas condições de soldagem para as juntas obtidas sem o suporte condutor.

Em todas as soldas, os valores das cargas de tração axial máxima foram maiores do que o mínimo recomendado em trabalhos já realizados por Duboc (2) sobre a soldabilidade de chapas de aço zincadas. Os resultados do torque máximo dos pontos de solda, foram iguais ou maiores aos valores indicados em um trabalho apresentado pelo IIW (19), o qual analisa o ensaio de torção em chapas de aço baixo carbono.

Após os testes de tração e torção, os pontos de solda fraturaram predominantemente na forma de botão. Como explicado anteriormente, a fratura em botão dos pontos de solda ocorreram por cisalhamento da chapa de 0,95 mm

As soldas obtidas com e sem suporte condutor, resultaram em um comportamento semelhante no modo de fratura após os testes de tração e torção. As juntas com tubos de 1,5 mm apresentaram maior incidência de fraturas interfaciais (40%), as juntas com tubo de 3,0 mm

apresentaram 25 % de fratura interfacial e nas juntas com tubos de 2,0 mm não houve fratura interfacial. Todos pontos de solda apresentaram poça de fusão na interface de contato chapa/tubo

A presença de fratura interfacial pode estar relacionada com o parâmetro "separação entre as chapas" e com a microestrutura na ZTA os quais não foram analisados neste trabalho.

Em resumo, os parâmetros utilizados para soldar juntas de chapa/tubo, para as três espessuras de tubos, com e sem suporte condutor no interior dos tubos, resultaram em ampla faixa de soldagem, com presença de fusão nas interfaces chapa/tubo e boa resistência mecânica nos testes de tração e torção, apesar de existir defeitos como trincas, vazios e alguma incidência de fratura interfacial.

8. CONCLUSÕES

A partir dos parâmetros de soldagem definidos para chapas de espessura mais fina (0,95 mm), foi possível obter intervalos de soldagem maiores que 2,0 kA, garantindo ampla faixa de soldabilidade, para juntas de chapa/chapa e chapa/tubo com as diferentes combinações de espessuras e revestimentos estudados.

Com os parâmetros iniciais de processo, só não foi possível soldar as juntas de chapa de 0,95 mm sobre tubo de 1,5 mm a qual foi viabilizada mediante o desenvolvimento dos seguintes processos:

- utilização de um suporte não condutor no interior dos tubos;
- utilização de um suporte condutor no interior dos tubos;
- utilização de eletrodo inferior na forma de "U", eletrodo este desenvolvido neste trabalho;
- redução da força entre eletrodos para 800 N.

A corrente de soldagem com o uso do par de eletrodo 12/16 mm foi de 10% a 25% menor do que quando se utilizou o par 5/16 mm, tanto para as juntas de chapa/chapa como para as de chapa/ tubo. Sendo as corrente de soldagem das juntas chapa/chapa 10% menor do que para as juntas chapa/tubo. As juntas com revestimento de zinco/zinco apresentaram valores iniciais de corrente de soldagem 25% maiores para chapa/chapa e 40% maiores para chapa/tubo. Contudo, os intervalos de soldagem não foram influenciados pelo revestimento.

As identações em soldas de chapa/chapa reduziram com o aumento da espessura da chapa inferior. e foram 36% menores para as juntas zincadas, comparada com as juntas de outros revestimentos. As medidas de identação para juntas de chapa/tubo não foram realizadas uma vez que o tubo se deformou plasticamente. Assim, o critério utilizado para a caracterização de chapa/chapa não se aplica para chapa/tubo. Foi proposto um novo parâmetro para análise externa das juntas chapa/tubo, que é a medida de deformação plástica no interior dos tubos após a

soldagem. Deformações de até 1,5 mm de redução da altura interna dos tubos, é aceitável, uma vez que até este valor não houve comprometimento das propriedades mecânicas dos pontos de solda obtidos.

Nas soldas de chapa/chapa, a penetração foi maior nas chapas inferiores de 1,5 e de 2,0 mm de espessura, devido a maior resistência elétrica interna das chapas mais grossas. Já para as juntas com chapa de 3,0 mm de espessura, a penetração foi mais simétrica, em decorrência da chapa de 3,0 mm ter causado maior extração de calor, sobrepondo ao efeito da maior resistência elétrica interna desta espessura de chapa. Para juntas de chapa/tubo a penetração na chapa superior foi sempre maior para as três espessuras de tubos, devido a corrente de soldagem não ter sido concentrada no interior dos tubos.

Nas lentes de solda de juntas de chapa/chapa só ocorrem vazios nos revestimentos de zinco/fosfato e decapados. Em juntas de chapa/tubo não ocorreram vazios para nenhum dos revestimentos. O fluxo de corrente concentrado, associado com as altas resistências elétricas das chapas favoreceram os fenômenos de "splash" e de expulsão violenta, resultando no aparecimento de vazios de contração. A presença de vazio no interior do ponto de solda não afetou a carga de tração axial máxima, uma vez que as juntas com revestimento de zinco/fosfato e decapadas apresentaram vazio na lente de solda, no entanto as cargas de tração foram 30 % maiores do que as juntas com revestimento de zinco/zinco, sem vazios na lente de solda.

Existem trincas somente nas chapas zincadas de 0,95 mm de espessura, tanto para juntas de chapa/chapa como de chapa/tubo. As trincas surgiram com a presença de zinco, altas correntes e maior densidade de corrente (só existem trincas em contato com o eletrodo superior). A presença de trinca não influenciou o torque máximo, uma vez que as juntas com revestimento de zinco/zinco apresentaram as maiores trincas, no entanto os valores de torque máximo foram 20% maiores do que para as juntas decapadas, as quais não apresentaram trincas.

Os diâmetros das lentes de solda diminuíram com o aumento da espessura tanto das chapas como dos tubos. As juntas com chapas e tubos de 1,5 mm apresentaram diâmetro de lente 5% maior do que as juntas com chapas ou tubos de 2,0 mm e 17% maior do que as juntas

com chapas ou tubos de 3,0 mm. Os diâmetros de lente obtidos em soldas com par de eletrodos 5/16 foram sempre maiores do que os diâmetros obtidos com par de eletrodos 12/16 (em torno de 15% maior, para todos os casos estudados). O ponto de solda no meio dos tubo, apresentou diâmetro de lente maior do que o ponto na borda, com valores variando de 5% a 15%, para todos os casos. Os diâmetros de lente nas juntas de chapa/chapa foram menores do que para juntas de chapa/tubo (de 5 a 16 %). Os diâmetros de lente reduziram de 8% a 15% para juntas com revestimento de zinco, tanto em chapa/chapa como em chapa/tubo. Isto ocorreu em virtude da baixa resistência de contato existente neste tipo de revestimento, o que significa menor calor despreendido.

As cargas de tração máxima dos pontos de solda aumentaram com o aumento da espessura das chapas e dos tubos. As juntas com chapas e tubos de 1,5 mm apresentaram valores de 20% a 60% menores do que as juntas de chapas e tubos mais espessos. Os pontos de solda obtidos com eletrodo cone truncado apresentaram maiores cargas de tração do que os obtidos com eletrodo esférico, ficando em torno de 5%. O local da solda nos tubos, centro ou borda, não apresentou clara influência; ora as cargas foram maiores no centro, ora foram maiores na borda. Nas juntas de chapa/chapa as cargas de tração foram 10% menores do que nas juntas de chapa/tubo. As juntas de chapa/chapa e chapa/tubo com revestimento de zinco apresentaram cargas de tração menores do que com os demais revestimentos.

Com o aumento da espessura das chapas e tubos os valores de torque máximo tendem a crescer em 15%. Os pontos de solda obtidos com eletrodos cone truncado apresentaram torque máximo 10% maior em relação ao eletrodo esférico, tanto para juntas de chapa/chapa como para as de chapa/tubo. Pelos resultados obtidos, não ficou clara a influência sobre os valores de torque do local da solda. Os valores de torque obtidos para as juntas chapa/tubo foram, em média, 15% maiores que para as juntas chapa/chapa. O valor médio de torque obtido para juntas de chapa/chapa e chapa/tubo zincados foram 20% maior, comportamento esse oposto às cargas de tração.

A fratura dos pontos de solda de chapa/chapa e chapa/tubo após os testes de tração e torção foram predominantemente na forma de botão. Nas juntas de chapa/chapa só ocorreu

fratura interfacial para chapas de espessura de 1,5 mm, em torno de 25% dos casos testados. Nas juntas de chapa/tubo ocorreram fraturas interfaciais para juntas com tubos de 1,5 mm e 3,0 mm, em torno de 30% dos casos. Observou-se que a fratura interfacial só ocorreu para pontos obtidos com baixo valor de corrente de soldagem, e com eletrodo esférico, de forma que não havia uma área bem fundida e suficientemente grande para resistir às tensões de tração e torção.

A solda de juntas chapa/tubo zincadas com suporte condutor no interior do tubo, apresentou poça de fusão na lente de solda, alguns vazios, trincas nas chapas de 0,95 mm de espessura, diâmetro de lente 7% maior do que nas juntas obtidas sem o suporte, carga de tração 15% maior, valores de torque iguais e 100% de fratura em botão. Este experimento comprova que a incidência de fratura interfacial está associada à não existência de poça de fusão.

8.1. SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

O presente trabalho abre uma série de possibilidades para trabalhos futuros. A seguir são apresentadas algumas dessas possibilidades.

- Caracterização da microestrutura dos pontos de solda de juntas de chapa/chapa e chapa/tubo, assim como junta de chapa/tubo zinca, tanto na ZF como ZTA.
- Levantamento do perfil de dureza das juntas de chapa/chapa e chapa/tubo.
- Conhecer o comportamento de fadiga dos pontos de solda, principalmente para aqueles com presença de trincas.
- Adaptar eletrodo em "U", desenvolvido nesse trabalho, para melhores condições de soldagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

As referências bibliográficas utilizadas neste trabalho estão organizadas por capítulos.

Capítulo 2

1. HEUREUX, G.E.; BELOTTE, E.J. - "Soldadura Por Resistência" Ed. Hispano Europea, Barcelona, 1 Ed, p. 40 - 201, 1968.
2. REHDER, H., - "Soldagem" Associação Brasileira de Soldagem, ABM, Ed. ABM, SP, p. 657 - 720, 1985.
3. MEADOWCROFT, J.W. - "Resistance Welding Progress" Welding Journal, p. 538 - 539, Jun. 1945.
4. WOODWARD, F.R. - "Resistance Welding Fundamentals" Welding Journal, p. 713-725, Aug 1945.
5. EVANS, S.O. - "Quality Control During Production of Electric Resistance Welded Tubing" Welding Journal, p. 805 - 810, Set. 1945.
6. GILLETTE, R.T. - "Resistance Welding Laboratories and Their Instruments" Welding Journal, p. 833 - 837, Sep. 1945
7. BUTLER J.B. - " Some Conclusions Regarding Resistance Welding and Statistical Quality Control" Welding Journal, p. 909 - 914, Oct. 1945.
8. DODGE, C.W. - "Spot Welding of Heavy Aluminum Alloys" Welding Journal, p. 915 - 918, Oct. 1945.
9. MORRIS, F.M. - "Survey of Chemical Practices for Spot Welding Aluminum Alloys" Welding Journal, p. 61s - 64s, Jan. 1945.

10. HESS, W.F. - " An Investigation of the Spot Welding of Aluminum Alloys Using Condenser-Discharge Equipment" Welding Journal, 404s - 405s, 1945.
11. KOUWENHOVEN, W.B. ET all - "Contact Resistance" Welding Journal, p. 457-464s, Oct. 1952.
12. LANE, C.T., ET all - "Cinematography of Resistance Spot Welding of Galvanized Steel Sheet" Welding Journal, p. 260s - 265s, Set. 1987.
13. WELDING JOURNAL - "System Monitors and Controls Nugget Expansion in Real Time" Welding Journal, p. 61 - 63, Feb. 1990.
14. NATALE, T., ET all - "Automakers Set the Pace for Spot Welding the New Galvanized Steels" Welding Journal, p. 47 - 51, Mar. 1992.
15. AMERICAN WELDING SOCIETY, AWS - "Welding and Brazing - Resistance Welding", 9 ed., vol. 6, p. 468 - 493, 1983.
16. MARTIGNONI, A. - "Eletrotécnica" Ed. Globo, p. 114 - 118, 1971.
17. CAVALCANTI, P.J.M. - "Fundamentos Eletrotécnica" Ed. Freitas Barros, p. 113 - 128, 1974.
18. KOUWENHOVEN, W.B. ET all - "The Spreading Resistance of Contacts" Welding Journal, p. 512s - 520s, Oct. 1950.
19. SAVAGE, W.F. ET all - "Static Contact Resistance of Welds" Welding Journal, p. 365s - 370s, Nov. 1977.
20. KAISER, J.G.; EAGAR, T.W. ET all - "The Effect of Electrical Resistance on Nugget Formation During Spot Welding" Welding Journal, p. 167s - 174s, Jun. 1982.

21. SAVAGE, W.F. ET all - "Dynamic Contact Resistance of Series Spot Welds" *Welding Journal*, p. 43s - 50s, Feb. 1987.
22. DICKINSON, D.W. ET all - "Characterization of Spot Welding Behavior by Dynamic Electrical Parameter Monitoring" *Welding Journal*, p. 170s - 176s, Jun. 1980.
23. GOULD, J.E. - "An Examination of Nugget Development During Spot Welding, Using Both Experimental and Analytical Techniques" *Welding Journal*, p. 1s - 10s, 1987.
24. CHANDEL, R.S., ET all - "Resistance Spot Welding of Mild Steels - Review" *Indian Welding Journal*, p. 1 - 7, Jan. 1985.
25. HAN, Z.; CHEN, C.H. ET all - "Resistance Spot Welding: A Heat Transfer Study" *Welding Research Supplement*, p. 363s - 371s, set. 1989.
26. MARRA, K.M. - "Estudo Comparativo de Soldabilidade a Ponto de Um Aço Laminado a Frio e de Alta Resistência Mecânica em Relação a Outro ao Carbono" *Dissertação de Mestrado da UFMG*, Mar. 1992.
27. LUDWIGSON, D.C. Et all - "The Effect of Composition on the Resistivity of Carbon Steel Sheet" *Metallurgical Transaction*, vol. 2, p. 3500 - 3501, Dec. 1971.
28. D'HAeyer, J.P. ET all - "Appraisal Resistance Spot Weldability Using Multi Spot Welded Assemblies" London. The International Institute of Welding, 1987.
29. GEDEON, S.A.; EAGAR, T.W. - "Measurement of Dynamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welds" *Welding Journal*, p. 378s - 385s, Dec. 1987.
30. NICHOLSON, S. ET all - "Heat Development and Weld Nugget Formation in Mild Steel Spot Welds" *Paper 34*, p. 89 - 94, Apr. 1970.

31. GOULD, J.E.; PETERSON W.A. - "Resistance Welding Reach Evaluations of Coated Steels" Part Two, Dynamic Resistance Studies. Edison Welding Institute, Mar. 1988.
32. ALCINI, W.V., - " A Measurement Window Into Resistance Welding" Welding Journal, p. 47 - 50, Sep. 1987
33. LAMBERT, Y.; DEVILLER, L. - "Appreciation de La Qualité D'une Soudure Par Point D'Aciers À Haute Resistance" Soudage Et Techniques Connexes. p. 15 - 30, Mai/Jun 1990.
34. WILLIAMS, N.T. "Metallurgical Aspects of Resistance Spot Welding of Steel" British Steel Corporation, IIW DOC. III-656-80, 1980.
35. ALCINI, W.V.- "Experimental Measurement of Liquid Nugget Heat Convection in Spot Welding" Welding Research Supplement, Welding Journal, p. 177s - 180s, Apr. 1990.
36. VANDEN BOSSCHE, D.J. Detroit Congress paper 770214, Soc. Automotive Eng., 1977
37. WELLS, M.G.H.; WEST, D.R.F. "Journal Iron and Steel Inst.", p. 710 - 715, 1962
38. SILVA, A.L.C.; MEI, P.R. - "Tecnologia dos Aços" Ed. UNICAMP. p. 46 - 49, 1981.
39. KIM, W. ET all - " Measurement of Transient Temperature Response During Resistance Spot Welding" Welding Journal, p. 303s - 312s, Aug. 1989.
40. WALLER, D.N; KNOWLSON, P.M.- "Electrode Separation Applied to Quality Control in Resistance Welding" Welding Journal, p. 168s - 174s, Apr. 1965.

Capítulo 3

1. LHEUREUX, G.E.; BELOTTE, E.J. "Soldadura por Resistência" Ed Hispano Europea, Barcelona, 1 ed., p. 40 - 201, 1968.

2. AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS "Welding and Brazing - Resistance Welding" 9 ed., vol. 6, p. 468 - 493, 1983.
3. REBELLO, J.M.A.; ET all "Soldagem por Pontos de Chapas Zincadas" Relatório final de pesquisa da COPPE/UFRJ, RJ, 105 p., Out. 1988.
4. CHRYSLER INTERNATIONAL S.A. "Resistance Welding of Galvanized Coated Sheet Steel" Production Engineering Department, (documento interno), 25 p., Aug. 1961.
5. SPORE, H.B. "Electrodes for Spot Welding Galvanized Steel" Welding Journal, p. 31s-36s, Jan. 1950.
6. RESISTANCE WELDER MANUFACTURERS ASSOCIATION - RWMA "Resistance Welding Manual" Ed. E.J. Del Vecchio, vol. II, 3. Edition, 1956.
7. AMERICAN WELDING SOCIETY "Standard for Automotive Resistance Spot Welding Electrodes" 67 p., AWS D8.6-77, 1977.
8. SAITO T.; NISHI, T., TAKAHASHI Y. 'Electrode Tip Life in Resistance Spot Welding of Zinc and Zinc Alloy Coated Sheet Steels" Nippon Steel Technical Report n. 37, p. 24 - 30, Apr. 1988.
9. KIMCHI, M.; GOULD, J.E. "The Evaluation of Resistance Spot Welding Electrode Materials For Welding Galvanized Steels" The Sheet Metal Welding Conference III, Oct. 1988.
10. KIMCHI M.; GOULD, J. Et all "Evaluation of Various Electrode Materials for Resistance Spot Welding thin Galvanized Steel Sheets" Widerstandsschweiben Resistance Welding, DVS 124, p. 54 - 60, 1989.
11. LOHBRANDT, H.; FRINGS, A. "Resistance Spot Welding of Zinc-Coated Sheet Steels" Thyssen Technische Berichte, p. 213 - 220, Heft 2/1989.

12. BRITISH STANDARDS INSTITUTION / BS 1140: 1980 "Specification for Resistance Spot Welding of Uncoated and Coated Low Carbon Steel", 12p. , 1980.
13. BRITISH STEEL CORPORATION -BSC- "Zintec Technical Manual". Steel Sheet Information Center BSC Welsh Laboratory Port Talbot West Glamorgan SH 132 NG, 30 p., 1980.
14. AZAMBUJA, S.; BARCELOS, E.J. "Soldagem de Chapa Zincada Convencionais Pelo Processo a Ponto Por Resistência Elétrica" Trabalho ganhador do premio "SOLTRONIC/87" no XII ENTS - ABS, 17 p., Out/Dez 1987.
15. AZAMBUJA, S.; BARCELOS, E.J.; ROSAS, W.R. "Soldagem a Ponto Por Resistência Elétrica" Informe Técnico CSN-SGPD-043/87, 10 p. , 1987.
16. NEGRE, J. "Le soudage Electrique par Résistance" ed.4, Publications de La Soudure Autogène, 1972.
17. OSTGAARD, E. "Spot Welding Aluminum as Delivered" Metal Construction, Feb. 1980.
18. CONNELL, L.D., "Electrodes for Resistance Welding", Metal Construction, p. 30-32 Jan. 1977.
19. COMMISSION II OF THE IIW "The Assessment and Testing of Resistance Spot Welding Electrode Materials" Welding in the World vol. 19, n. 1/2, 1981.
20. BOWERS R.J.; SORENSEN, C.D.; EAGAR, T.W. "Electrode Geometry in Resistance Spot Welding" Welding Journal, p. 45s - 51s, Feb. 1990.
21. TAKAHASHI Y.; SAITO, T. "Development of Spin Electrode System for Superior Electrode Tip Life in Spot Welding of Coated Steel Sheets" IIW Doc. III-965-91, Jul. 1991.
22. WILLIAMS, N.T. "Problems in the Resistance Welding of Coated Steels" Sheet Metal Industries, p. 625 - 633, Oct. 1972.

23. DAMASCO, A.; FERREIRA, I.; NATAL, Y.D.; ET all "Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica de Chapas de Aço Zincadas COM Diferentes Composições, Espessura Revestimentos" XIX ENTS, p. 381 - 402, Out. 1993.
24. BAKER, J.C.; MEITZNER, G.F. "Resistance Welding of Galvanized Sheet Steel, Welding Journal, Jun. 1982.
25. CHIARO, A.J. "Spot Welding Setups Need Care, Accuracy" Welding Design & Fabrication, p. 77 - 80, Apr. 1984.
26. NATAL, Y.D.; BARCELOS, E.J. "Soldabilidade de Chapas Zincadas de Alta Resistência Por Soldagem a Ponto Por Resistência Elétrica" Relatório final de estudo da Companhia Siderúrgica Nacional - CSN - SGPD - 056/90, 84 p., Jun. 1990.
27. RICE, W.; FUNK, E.J. "An Analytical Investigation of the Temperature Distributions During Resistance Welding" Welding Journal, Apr.1967.
28. NIED, H.A. "The Finite Element Modeling of the Resistance Spot Welding Process" Welding Journal, Apr. 1984.
29. PORTER, F.C. "Galvanizing and Welding Structure Steel - Part 2" Metal Construction, p. 676 - 679, Nov. 1983.
30. FRIEDMAN, L.M. and Mc. CAULEY, R.B. "Influence of Metallurgical Characteristics on Resistance Welding of Galvanized Steel" Welding Journal, Oct. 1969.
31. AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS - "Recommended Practices for Resistance Welding" AWS C1.1.66, 1966
32. PAES, M.T.P.; GUIMARÃES, A.S.; REBELO, J.M.A. "Curvas de Soldabilidade e Características Mecânicas de Soldas Por Ponto em Chapas Finas de Aço Baixo Carbono" Soldagem & Materiais, p. 32 - 36, Jan/Mar 1989.

33. PAES, M.T.P.; GUIMARÃES, A.S.; REBELO, J.M.A.; NATAL, Y.D.; AZAMBUJA, S. "Soldagem a Ponto de Chapas Finas Galvanizadas Parte II - Aplicação a Chapas com 0,8 mm de Espessura de Média e Alta Resistência" XV ENTS, Nov. 1989.
34. DICKINSON, D.W., NATALE, T.V., "The Effect of Sheet Surface on Spot Weldability" Doc. EM 8209-72-03941, p. 229 - 249, 1982.
35. NATAL, Y.D.; BARCELOS, E.J. "Otimização dos Gráficos de Soldabilidade de Soldas a Ponto por Resistência Elétrica - Especial Referência à Soldagem de Chapas Zincadas" XVII ENTS. p. 533 - 548, Set. 1991.
36. CARVALHO, J.E.R.; AZAMBUJA, S.; BARCELOS, E.J. "Avaliação Comparativa da Soldabilidade do "Galvannealed", Chapas Zincadas e Chapas Finas a Frio, Pelo Processo de Resistência Elétrica à Ponto" XV CETEC - CSN, 9 p., Set. 1992.

Capítulo 4

1. NATAL, Y.D.; BARCELOS, E.J. "Soldabilidade de Chapas Zincadas de Alta Resistência por Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica" Relatório final de estudo da CSN - SGPD-056/90, 84 p., Jun. 1990.
2. CSN, COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL "Catálogo de Produtos" Sistema Siderbrás.
3. ROWLAND, D.H. "Metallography of Hot-Dipped Galvanized Coatings" Trans American Doc. Metals 40, p. 983 - 1011, 1948.
4. LHEUREUX, G.E.; BELOTTE, E.J. - "Soldadura Por Resistência" Ed. Hispano Europea, Barcelona, 1 ed., p. 40 - 201, 1968.
5. AZAMBUJA, S.; Y.D.N.; E.J.B. "Soldagem de Chapas Zincadas por Imersão a Quente" Contribuição técnica apresentada no XV SETEC da CSN, Set. 1992.

6. AZAMBUJA, S.; E.J.B. " Soldagem de Chapas Zincadas Convencionais pelo Processo a Ponto por Resistência Elétrica" Trabalho apresentado no XII ENTS, ABS/COSOL, trabalho ganhador do prêmio "SOLTRONIC/87", ABS Out/Dez 1987.
7. PAES, M.T.P.; C.R.M.; J.M.A.R.; A.G.S.; Y.D.N.; S.A. "Soldagem a Ponto de Chapas Finas Galvanizadas" apresentado no XV ENTS; Nov.1989.
8. BRITISH STEEL CORPORATION - BSC "Zintec Technical Manual" Steel Sheet Information Center BSC Welsh Laboratory Port Talbot. West Glamorgan SA 132 NG, 30 p., 1980.
9. BRITISH STANDARDS INSTITUTION / BS 1140 " Specification for Resistance Spot Welding of Uncoated and Coated Low Carbon Steel", 12 p., 1980.
10. CARVALHO, J.E.R.; "Comportamento à Corrosão de Soldas a Ponto por Resistência Elétrica de Chapas Zincadas de Alta Resistência" Tese de mestrado da UFRJ, RJ, Ago. 1990.
11. CARVALHO, J.E.R.; YELSON, D.N., GUIMARÃES, A.S., ET all "Caracterização da Superfície de Soldas a Ponto por Resistência Elétrica de Chapas Zincadas" Trabalho Apresentado no XVI ENTS, p. 515 - 532, set. 1991.
12. THE WELDING INSTITUTE, " Welding Coated Steels", book, 40 p., 1978.
13. AMORIM, C.C. "Avaliação de Filmes de Fosfatização Via Técnica de Impedância Eletroquímica: Influência das Principais Variáveis do Processo" Tese de mestrado da UFRJ, RJ, Ago. 1989.
14. FERREIRA, J.D. "Generalidades Sobre Decapagem e Fosfatização" Curso da Associação Brasileira de Corrosão, 20 p., Maio 1974.
15. MBB-F-8400; "Proteção Superficial por Meio de Fosfatização Anticorrosiva para Peças de Materiais Ferrosos (sem rosca)" Norma interna da Mercedes Bens do Brasil. Out/1986.

16. AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS "Welding and Brazing - Resistance Welding" Ed.9, vol. 6, p. 468 - 493, 1983
17. RESISTANCE WELDER MANUFACTURERS ASSOCIATION - RWMA "Resistance Welding Manual" Ed. E.J. Del Vecchio, vol. II, 3. Edition, 1956.
18. DAMASCO, A.; FERREIRA, I.; NATAL, Y.D.; ET all "Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica de Chapas de Aço Zincadas COM Diferentes Composições, Espessura e Revestimentos" XIX ENTS, p. 381 - 402, Out. 1993.
19. TSAI, C.L.; DICKINSON, D.W. ET all "Modeling of Resistance Spot Weld Nugget Growth" Welding Journal, p. 47s - 54s, Feb. 1992.
20. "Soudage Par Résistance des Tubes D'acier" Serrurerle - Constructions Métalliques; número 179-180 de Mai-Jun 1965.

Capítulo 5

1. RESISTANCE WELDER MANUFACTURERS ASSOCIATION - RWMA "Resistance Welding Manual" Ed. E.J. Del Vecchio, vol. II, 3. Edition, p. 40 - 204, 1956.
2. AMERICAN WELDING SOCIETY, AWS - "Welding and Brazing - Resistance Welding", 9 Ed., vol. 6, p. 468 - 493, 1983.
3. INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING, IIW " Resistance Spot Welding of Steels Of up to 3 mm Single Sheet Thickness" Doc. III-969-91, 1991.
4. MILITARY SPECIFICATION, MIL - W - 6858D, "Welding, Resistance: Spot and Seam" 49 p., 28 Mar. 1978.

5. AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS C 1.1.66 - "Recommended Practices for Resistance Welding" 115 p., 1966.
6. WU, K.C. - "Electrode Indentation Criterion for Resistance Spot Welding" Welding Journal, p. 472s - 478s, Oct. 1968.
7. WALLER, D.N.; KNOWLSON, P.M. - "Electrode Separation Applied to Quality Control in Resistance Welding" Welding Journal, p. 168s - 174s, Apr. 1965.
8. AZAMBUJA, S.; BARCELOS, E.J. "Metodologia de Soldagem para Chapas Zincadas Convencionais a Ponto por Resistência Elétrica" Relatório Interno da CSN, SGPD-078/85, 19 p., 1985.
9. PAES, M.T.P.; GUIMARÃES, A.S.; REBELO, J.M.A. "Curvas de Soldabilidade e Características Mecânicas de Soldas Por Ponto em Chapas Finas de Aço Baixo Carbono" Soldagem & Materiais, p. 32 - 36, Jan/Mar 1989.
10. PAES, M.T.P.; GUIMARÃES, A.S.; REBELO, J.M.A.; NATAL, Y.D.; AZAMBUJA, S. "Soldagem a Ponto de Chapas Finas Galvanizadas Parte II - Aplicação a Chapas com 0,8 mm de Espessura de Média e Alta Resistência" XV ENTS, Nov. 1989.
11. CARVALHO, J.E.R.; Y.D.N.; E.J.B.; F.C.O.C. "Estudo de Potenciais Eletroquímico em Soldas a Ponto por Resistência Elétrica de Chapas Zincadas de Alta Resistência" apresentado no 45, Congresso Nacional da ABM (pré print).
12. THE WELDING INSTITUTE, "Welding Coated Steels", book, 1 ed., 86 p. 1978.
13. WADDLE, B. - "Concerning The Incidence of Cracking in Spot/Sean Resistance" British Steel Technical Welsh Laboratories, Jan. 1987.

14. WILLIAMS, N.T. Et all - "Problems in The Resistance Welding of Coated Steels" Steel Metal Industries, p. 625 - 633, Oct. 1972.
15. MURTO, L.J. ET all - "A Grasp of Resistance Welding Fundamentals Insures an Improved Finished Product" The Fabricator, Apr. 1984.
16. COLANGELO, V.J.; HEISER, F.A. "Analysis of Metallurgical Failures", 2 ed., John Wiley & Sons, p. 327 - 355, 1987.
17. TSAI, C.L.; DICKINSON, D.W. Et all - "Modeling of Resistance Spot Weld Nugget Growth" Welding Journal, Feb. 1992.
18. HAN, Z.; BHAT, S. ET all - "Weld Nugget Development and Integrity in Resistance Spot Welding of High-Strength Cold-Rolled Sheet Steels" Welding Journal, p. 209s - 216s, May 1993.
19. JOHNSON, K.I. ET all "Assessment of The Torsion Test for Resistance Spot Welds" The Welding Institute, 16 p., Doc. III-771-84, 1984.
20. MARRA, K.M. - "Estudo Comparativo de Soldabilidade a Ponto de Um Aço Laminado a Frio e de Alta Resistência Mecânica em Relação a Outro ao Carbono" dissertação de mestrado da UFMG, Mar. 1992.
21. HEDAI, ET all "Resistance Spot Welding of High Strength Steel Sheets" Annual Assembly of The International Institute of Weeding, Bratislava, Doc. IIW - III - 612-79, 13 p., 1979.
22. DEVILLERS, Y.L. "Apréciation de la Qualité D'Une Soudure Par Point D'Aciers à Haute Résistance" Soudage ET Techniques Connexes, p. 15 - 30, Mai-Jui. 1990.
23. JONES, and WILLIAMS "Spot and Projection Welding of High Strength Steel" British Steel Corporation, Doc WL. FP. 1156.80.C, 38 p., Nov. 1980.

24. POLLAD, B.; GOODNOW, R.H. "Spot Weldability of Dual-Phase Steel" Society of Automotive Engineers, Doc. SAE 79006, 12p. 1979.
25. HOULT, S.H.; KERR, H.W. "Spot Weldability of Rephosphorised Steels" Metal Construction, v. 14, n. 8, p. 426 - 432, Aug. 1982
26. SAWHILL JUNIOR, J.M.; BACKER, J.C. "Spot Weldability of High-Strength Sheet Steels" Welding Journal, v.59, n.1, p. 19s - 30s, Jan. 1980.
27. HISHI, T. ET all "Evaluation of Spot Weldability of High Strength Steels for Automobile User" Nippon Steel Technical Report, n. 20, p. 37 - 44, Dec. 1982.
28. RIVETT, R.M. "Assessment of Resistance Spot Welds in Low Carbon and High Strength Steel Sheet" The Welding Institute Research Bulletin, p. 350 - 357, 1981
29. SAWHILL JUNIOR, J.M.; FURR, S.T. "Weldability Considerations in the Development of High- Strength Sheet Steels" Welding Journal, vol. 63, n. 7, p. 203s - 212s, Jul. 1984.
30. RIVETT, R.M.; BOOTHBY, P.J. "Factors Influencing the Properties of Spot Welds in Cold Rolled High Strength Steels. The Welding Institute Research Report, 45 p., Oct. 1982.
31. WILSON, R.B.; FINE, T.E. "Fatigue Behavior of Spot Welded High Strength Steel Joints" Society of Automotive Engineers, Doc. SAE 810354, 15 p., 1981.

Capítulo 6

1. ABNT, NBR 6673 "Determinação das Propriedades Mecânicas a Tração de Produtos Planos de Aço" MB-856/79.
2. ABNT, NBR 6671 "Determinação da Dureza Rockwell de Materiais Metálicos" MB - 358/79.

3. D'HAeyer, J.P. Et. Al. "Appraisal Resistance Spot Weldability Using Multi Spot Welded Assemblies. The International Institute of Welding, 1987, doc. IIW - III- 895-87.
4. VAN VLACK, L.H.; "Princípio de Ciências dos Materiais" ed. Editora Edgard Blucher Ltda, P. 228 - 268, 1970.
5. METALS HANDBOOK, "Metallography Structures and Phase Diagrams". Edition 8, vol. 8, Set.1973.
6. ASTM e112- 85 "Standard Methods for Determining the Average Grain Size" Published July p. 277 - 301, 1986.
7. ASTM E 45-85; "Standard Practice for Determining the Inclusion Content of Steel", p. 61-74, 1985.
8. ABNT, NBR 7397, "Produto de Aço ou Ferro Fundido Revestido de Zinco por Imersão a Quente - Determinação da Massa do Revestimento por Unidade de Área". Norma ABNT, MB-25-I, 5 p., Mar/1990.
9. MBB-F-8400; "Proteção Superficial por Meio de Fosfatização Anticorrosiva para Peças de Materiais Ferrosos (sem rosca)" Norma interna da Mercedes Benz do Brasil, 5 p., Out/1986.
10. AZAMBUJA, S.; BARCELOS, E.J.; "Soldagem de Chapas Zincadas Pelo Processo a Ponto Por Resistência Elétrica" Trabalho ganhador do prêmio "Soltronic/87", ABS n. 18 - Out/Dez - 1987.
11. NATAL, Y.D.; BARCELOS, E.J.; "Otimização dos Gráficos de Soldabilidade de Soldas a Ponto por Resistência Elétrica - Especial Referência à Soldagem de Chapas Zincadas" XVII ENTS, p. 533 - 548, set. 1991.
12. BRITISH STANDARDS INSTITUTION; "Specification for: Resistance Spot Welding of Uncoated and Coated Low Carbon Steel"; 1980.

13. RESISTANCE WELDER MANUFACTURERE ASSOCIATIOM, -RWMA; "Resistance Welding Manual" Third Edition, ed. E.J. Del Vecchio, vol. II, 1956.
14. AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS C1-1-66; "Recommended Practices for Resistance Welding"; 115 p., 1966.
15. AMERICAN WELDING SOCIEY, AWS, "Welding and Brazing - Resistance Welding", 9 Ed., vol. 6, p. 468 - 493, 1983.
16. DEVILLERS, Y.L.L.; "Appréciation de la Qualité D'une Soudure par Point D'acier à Haute Résistance" Soudage ET Techniques Connexes, p. 15 - 30, Mai/Jun 1990.

Capítulo 7

1. COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL, CSN; "Catálogo de Produtos" Sistema Siderbrás.
2. NATAL, Y.D.; BARCELOS, E.J. "Soldabilidade de Chapas Zincadas de Alta Resistência Por Soldagem a Ponto Por Resistência Elétrica" Relatório final de estudo da CSN - SGPD-056/90, 84 p., Jun. 1990.
3. AMERICAN WELDING SOCIETY, AWS; "Welding and Brazing - Resistance Welding" 9 Ed, vol. 6, p. 468 - 493, 1983.
4. AMERICAN WELDING SOCIETY, AWS; "Recommended Practices for Resistance Welding" AWS C1.1.66, 80 p., 1966.
5. RESISTANCE WELDER MANUFACTURERS ASSOCIATION, RWMA "Resistance Welding Manual" Ed. E.J. Del Vecchio, vol. II, 3 ed., 1958.
6. KIMCHI, M. "Spot Weld Properties when Welding With Expulsion - A Comparative Study", Welding Research Supplement, Feb. 1984.

7. DEVILLERS, Y.L. "Apréciation de la Qualité D'Une Soudure Par Point D'Aciers à Haute Résistance " Soudage ET Techniques Connexes, p. 15 - 30, Mai/Jui 1990.
8. AZAMBUJA, S.; NATAL, Y.D.; BARCELOS, E.J. "Soldagem de Chapas Zincadas por Imersão a Quente " Contribuição técnica apresentada no XV SETEC da CSN - Set. 1986.
9. AZAMBUJA, S.; BARCELOS, E.J.; " Soldagem de Chapas Zincadas Convencionais Pelo Processo a Ponto por Resistência Elétrica" Trabalho apresentado no XII ENTS, ABS/COSOL, trabalho ganhador do prêmio "SOLTRONIC", ABS, 17 p., Out/Dez 1987.
10. WALLER, D.N.; KNOWLSON, P.M. - "Electrode Separation Applied to Quality Control in Resistance Welding", Welding Journal, p. 168s - 174s, Apr. 1965.
11. WILLIAMS, N.T. "Metallurgical Aspects of Resistance Spot Welding of Steel", British Steel Corporation, Documento Interno - DOC. III-656-80, 1980.
12. HAN, Z.; BHAT, S. ET all - "Weld Nugget Development and Integrity in Resistance Spot Welding of High-Strength Cold-Rolled Sheet Steels", Welding Journal, p. 209s - 216s, May 1993.
13. TSAI, C.L.; DICKINSON, D.W. ET all "Modeling of Resistance Spot Weld Nugget Growth", Welding Journal, p. 47s - 54s, Feb. 1992.
14. PAES, M.T.P.; GUIMARÃES, A.S.; REBELO, J.M.A. "Curves de Soldabilidade e Características Mecânicas de Soldas a Ponto em Chapas Finas de Aço Baixo Carbono", Soldagem & Materiais, p. 32 - 36, Jan/Mar, 1989.
15. LHEREUX, G.E.; BELOTTE, E.J. - "Soldadura por Resistência", Ed. Hispano Europea, Barcelona, 1 Ed, p. 40 - 201, 1968.
16. WADDLE, B. "Concerning the Incidence of Cracking in Spot/Sean Resistance", British Steel Technical Welsh Laboratories - Documento Interno, Jan. 1987.

17. JOHNSON, K.I. ET all "Assessment of the Torsion Test for Resistance Spot Welds", The Welding Institute - Documento Interno, Doc. III, 1984.
18. BRITISH STANDARDS INSTITUTION / BS 1140: 1980 "Specification for Resistance Spot Welding of Uncoated and Coated Low Carbon Steel", 12p., 1980.
19. ORTS, D.H. "The Do's and Don'ts of Welding Galvanized and Aluminum-Coated Steels", Welding Design & Fabrication, p. 62 - 76, Dec. 1976.
20. MERCEDES-BENZ DO BRASIL S.A. - MBB-F- 4041, "Especificação de Fornecimento – Tubos Retangulares Soldados", Out. 1977.
21. BOWERS, R.J.; SORENSEN, C.D.; EAGAR, T.W. "Electrode Geometry in Resistance Spot Welding", Welding Journal, p. 45s - 51s, Feb. 1990.
22. LEHMKUHL, B.; HENNING, I; SIMON, G.; "Vergrößern der Elektrodenstandmenge beim Widerstandspunktschweißen von unlegiertem Stahl durch Nachstellen des Schweißstromes", Schweißen und Schneiden", p. 29 - 32, 39, Heft 1, 1987.
23. DAMASCO, A.; FERREIRA, I.; NATAL, Y.D.; ET all "Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica de Chapas de Aço Zincadas COM Diferentes Composições, Espessuras e Revestimentos", XIX ENTS, p. 381 - 402, Out. 1993.