

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

GUILHERME MENDES CHRISTOFOLETTI

**SOLDAGEM POR PONTOS: AVALIAÇÃO DOS
PARÂMETROS DE SOLDAGEM E DAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DA JUNTA SOLDADA**

BELO HORIZONTE

2013

GUILHERME MENDES CHRISTOFOLETTI

**SOLDAGEM POR PONTOS: AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE
SOLDAGEM E DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA JUNTA
SOLDADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ivan J. de Santana.

BELO HORIZONTE

2013

GUILHERME MENDES CHRISTOFOLETTI

**SOLDAGEM POR PONTOS: AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE
SOLDAGEM E DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA JUNTA
SOLDADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em / /

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ivan J. de Santana – Orientador

Prof. MSc. Joel Romano Brandão

Prof. MSc. Euclides Gonçalves Martins Filho

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Ivan J. de Santana, pela orientação e por toda a ajuda durante a realização deste trabalho.

A todos os professores e servidores do CEFET-MG que contribuíram com este trabalho.

A todos os amigos, que apoiaram e ajudaram a conclusão deste.

A minha namorada Mariana Dias e à minha família, por toda paciência e colaboração.

Ao professor Alexandre Queiroz Bracarense pela orientação e por ter cedido as instalações do Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) para a soldagem dos corpos-de-prova.

Aos amigos da Tower Automotive e da Civarp pela ajuda.

E a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para possibilitar a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Soldagem por pontos é o processo mais utilizado na união de chapas de aço na indústria automotiva para a produção de carrocerias e componentes. Esse tipo de solda envolve uma série de desafios, principalmente na área de validação das soldas executadas e na avaliação da resistência das juntas soldadas. Neste trabalho buscou-se realizar uma avaliação das propriedades mecânicas das juntas soldadas por pontos em chapas de aço carbono com a variação dos parâmetros de soldagem, como corrente elétrica, força aplicada e tempo, para de uma forma geral mostrar tendências e características deste processo. Foram realizados vários testes de soldagem em corpos de prova com dimensões pré-estabelecidas divididos em três procedimentos de soldagem diferente. Nos dois primeiros procedimentos usou-se uma variação definida de corrente de soldagem, no terceiro procedimento, que foi dividido em duas etapas, foi realizado a variação da força aplicada e do tempo de soldagem. Para se obter as propriedades mecânicas da junta soldada os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração. Foram realizados, também, ensaios metalográficos de micrografia e macrografia na região da zona fundida e zona termicamente afetada. Foi possível também analisar em paralelo a influência do centelhamento na resistência mecânica da solda. Como resultado obteve-se dados que possibilitaram verificar quais parâmetros mais influenciam no processo de soldagem por pontos, quais foram os parâmetros que realizaram soldas eficientes, a ausência de influência do centelhamento no processo na resistência mecânica das juntas soldadas, quais microestruturas são comuns neste tipo de junta e a variabilidade do processo.

ABSTRACT

Spot welding is the most used joiner process for steel joiner in the automotive industry for the production of car bodies and components. This type of welding involves a series of challenges, especially in the area of welds performed validation and evaluation of resistance of welded joints. In this work, we sought to perform an evaluation of the mechanical properties of welded joints in carbon steel plates with the variation of the welding parameters such as current, applied force and time to show a general trends and characteristics of the process. Conducted several welding tests on specimens with dimensions predetermined divided into three different welding procedures. In two the first procedure used to set a range of welding current in the third procedure, which was divided into two stages, was conducted varying the force applied and the time of welding. To obtain the mechanical properties of the welded joint specimens were subjected to tensile testing. Were also performed tests and metallographic micrograph of macrograph in the region of the weld zone and heat affected zone. It is also possible to analyze the influence of parallel arcing in the mechanical resistance of the solder. As a result we obtained data that enabled check which parameters most influence the process of welding points, which were the parameters that welds made efficient, the lack of influence of the spark in the process on the mechanical strength of welded joints, which are common in this type microstructures joint and process variability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação soldagem por pontos.....	16
Figura 2 - Macrografia de um ponto soldado	17
Figura 3 - Ciclo de soldagem.....	21
Figura 4 - Ponto de solda.....	22
Figura 5 - Ciclos especiais de corrente elétrica no processo de soldagem por pontos.....	22
Figura 6 - Tipos de equipamentos de soldagem por pontos. (a) Máquina estacionária (b). Máquina Suspensa	23
Figura 7 - Circuito elétrico típico de um transformador de soldagem por pontos	24
Figura 8 – Sistema de suporte e refrigeração de um eletrodo	27
Figura 9 - Tipos de geometria de eletrodos mais utilizados em solda por pontos.....	28
Figura 10 - Teste por tensão cisalhante	32
Figura 11 - Dimensões dos corpos-de-prova para teste de tensão cisalhante.....	32
Figura 12 - Tipos de falha em teste de resistência ao cisalhamento como função da rotação do corpo-de-prova.....	33
Figura 13 - Teste por tração axial.....	34
Figura 14 - Rotina de testes para arrancamento: a) Com chave tipo pé de cabra, b) Teste mecânico e c) Teste tipo descascamento	35
Figura 15 - Fluxograma da parte experimental	36
Figura 16 - Equipamento utilizado para a realização das soldas.....	37
Figura 17 - Representação de eletrodo: a) Vista isométrica, b) Vista Isométrica em corte e c) Desenho Técnico.....	38
Figura 18 - Equipamento utilizado para o ensaio de tração	39
Figura 19 - Guilhotina Modelo TM 10 N° 205 da Newton S.A.....	39
Figura 20 - Guilhotina modelo U-136-0 da Peck, Stow & Wilcox CO.	40
Figura 21 - Lixadeiras Modelo 115/60 da Struers	40
Figura 22 - Politriz modelo AROPOL-2V da Arotec S.A.....	41
Figura 23 - Microscópio modelo IM713	41
Figura 24 - Equipamento de EDX Rayny EDX-720 da marca Shimadzu	42
Figura 25 - Representação de marcações de referência em chapas para a confecção dos corpos-de-prova	45
Figura 26 - Teste de arrancamento para validação dos parâmetros de solda	46

Figura 27 - Resultado do ensaio da arrancamento para validação dos parâmetros	46
Figura 28 - Representação de duas chapas sobrepostas para soldagem dos corpos-de-prova.	48
Figura 29 - Posicionamento das chapas para a execução da soldagem	48
Figura 30 - Foto do posicionamento dos corpos-de-prova no ensaio de tração	49
Figura 31 - Corte dos corpos-de-prova para confecção de amostras para o ensaio metalográfico	51
Figura 32 - Corpo-de-prova após corte através do ponto de solda.....	51
Figura 33 - Micrografias da chapa de aço utilizadas no trabalho: (a) Sessão longitudinal e (b) Sessão transversal.....	53
Figura 34–Gráfico média de carga máxima (N) X Corrente de soldagem (kA) do ensaio corpos-de-prova do primeiro procedimento	55
Figura 35 - Corpos-de-prova rompidos após ensaio de tração - corrente de soldagem de 4,5 kA a 7,5 kA (da esquerda para direita).....	56
Figura 36 – Comparativo curva Carga (N) X Deformação (mm): (a) corpo-de-prova com corrente de soldagem 5,3 kA CP1 do primeiro procedimento de ensaios, (b) corpo-de-prova com corrente de soldagem 6,5 kA CP2 do primeiro procedimento de ensaios.....	56
Figura 37 – Comparativo de fratura: (a) Corpo-de-prova com corrente de soldagem 5,3 kA CP1 do primeiro procedimento de ensaios, (b) Corpo-de-prova com corrente de soldagem 6,5 kA CP2 do primeiro procedimento de ensaios.....	57
Figura 38 – Micrografias corpos-de-prova do primeiro procedimento: (a) corrente de soldagem 5,3 kA CP1 aumento de 200X; (b) corrente de soldagem 5,3 kA CP1 aumento de 400X; (c) corrente de soldagem 6,5 kA CP1 aumento de 200X e (d) corrente de soldagem 6,5 kA CP1 aumento de 400X.....	57
Figura 39 - Gráfico média de carga máxima (N) X corrente de soldagem (kA) do ensaio dos corpos-de-prova do segundo procedimento	59
Figura 40 – Gráfico média da carga máxima (N) X força aplicada nos eletrodos (N) do ensaio dos corpos-de-prova do terceiro procedimento	60
Figura 41 - Comparativo de fratura: (a) Corpo-de-prova F=49 N CP3 do terceiro procedimento de testes, (b) Corpo-de-prova F=294 N CP1 do terceiro procedimento de testes.....	61

Figura 42 - Micrografias corpos-de-prova do terceiro procedimento: (a) F=49 N CP2 aumento de 200X; (b) F=49 N CP2 aumento de 400X; (c) F=295 N CP2 aumento de 200X e (d) F=294 N CP2 aumento de 400X.....	61
Figura 43 - Gráfico Média da carga máxima (N) X Tempo (Ciclos) do terceiro procedimento	62
Figura 44 - Comparativo de fratura: (a) Corpo-de-prova T=10 CP3 do terceiro procedimento de testes, (b) Corpo-de-provaT=60 CP1 do terceiro procedimento de testes.....	63
Figura 45 - Micrografias corpos-de-prova do terceiro procedimento: (a) T=10 ciclos CP3 aumento de 200X; (b) T=10 ciclos CP3 aumento de 400X; (c) T=60 ciclos CP3 aumento de 200X e (d) T=60 ciclos CP3 aumento de 400X	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos materiais dos eletrodos segundo RWMA.....	26
Tabela 2 - Alguns defeitos na soldagem por pontos e suas possíveis causas.....	30
Tabela 3 - Dimensões dos corpos-de-prova para teste de tensão cisalhante	33
Tabela 4 - Parâmetros de soldagem variáveis dos corpos-de-prova dividido três em procedimentos. Parâmetros de soldagem constantes utilizados: tempo de pré-tensão=10 ciclos, tempo de aperto=20 ciclos, tempo de resfriamento=20 ciclos..	43
Tabela 5 - Resultado de ensaio EDX.....	53
Tabela 6 – Dado de resistencia maxima obtidos no ensaio dos corpos-de-prova do primeiro procedimento	54
Tabela 7 - Dados obtidos no ensaio dos corpos-de-prova Do segundo procedimento.....	58
Tabela 8 - Dados obtidos no ensaio dos corpos-de-prova do terceiro procedimento – Variação da Força	60
Tabela 9 - Dados obtidos no ensaio dos corpos-de-prova do terceiro procedimento – Variação do tempo	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS.....	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1	Definição de soldagem.....	15
3.2	Soldagem por resistência (<i>Resistance Welding</i>)	15
3.3	Soldagem por pontos (<i>Spot Welding</i>)	16
3.3.1	Definição	16
3.3.2	Fundamentos do Processo	17
3.3.3	Parâmetros	19
3.3.4	Ciclo de Operação do Processo de Soldagem por Resistência por pontos	21
3.3.5	Equipamento de soldagem por Pontos.....	23
3.3.6	Os Eletrodos aplicados no processo de Soldagem por pontos.....	25
3.3.7	Material dos Eletrodos.....	25
3.3.8	Geometria dos eletrodos	27
3.3.9	Variáveis no processo	28
3.3.10	Qualidade da solda.....	29
4	PARTE EXPERIMENTAL.....	36
4.1	Materiais	37
4.2	Equipamentos.....	37
4.2.1	Equipamento de soldagem.....	37
4.2.2	Equipamentos de ensaio	38
4.2.3	Equipamentos para a preparação dos corpos-de-prova	39
4.2.4	Equipamentos de ensaio metalográfico	40
4.2.5	Equipamento de ensaio EDX.....	41
4.3	Metodologia	42

4. 3.1	Caracterização do material das chapas	44
4.3.2	Corte e preparação dos corpos-de-prova	44
4.3.3	Parametrização do equipamento de soldagem e realização de testes	45
4.3.4	Soldagem dos corpos-de-prova.	47
4.3.5	Ensaio de tração.....	49
4.3.6	Ensaio metalográfico dos corpos-de-prova	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1	Resultado caracterização do material.....	53
5.2	Resultados do ensaio de tração	54
6	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Dentre os processos de soldagem, a soldagem por resistência é um dos processos de fabricação mais utilizados na indústria automobilística, principalmente na soldagem de componentes de carroceria e chassi. Este processo utiliza o princípio da resistência à passagem de corrente elétrica, efeito *Joule*, e a aplicação de tensão para gerar união localizada em materiais metálicos, normalmente utilizando eletrodos confeccionados a partir de ligas de cobre CuCrZr (Cobre Cromo Zircônio).

Estes processos de solda são largamente utilizados na indústria principalmente por possibilitar alta produtividade, custo operacional baixo quando comparado com outras técnicas de união e pouca necessidade de experiência do operador, em compensação requer amplo conhecimento do processo de quem irá definir a especificação do procedimento de soldagem.

Dos processos de soldagem por resistência o mais utilizado é a soldagem por pontos. Em um automóvel popular, por exemplo, há centenas de pontos de solda para a montagem da carroceria e de componentes diversos.

Como desvantagens deste processo, temos a dificuldade na definição dos parâmetros de soldagem adequados para obter propriedades mecânicas satisfatórias do ponto soldado, alto custo de equipamentos, o alto valor dos materiais dos eletrodos utilizados neste processo e uma grande demanda da rede elétrica pelos altos valores de corrente elétrica associados ao processo.

Serão apresentados os principais aspectos da soldagem por pontos aplicada à soldagem de chapas de aço carbono, e a análise dos possíveis fatores que interferem na qualidade e nas propriedades mecânicas deste processo.

Este trabalho propôs uma avaliação dos parâmetros da soldagem por pontos e sua influência nas propriedades mecânicas de juntas soldadas de aço. Para isso foram realizados ensaios destrutivos como ensaio de tração e ensaio de arrancamento, e também análise metalográfica, em corpos-de-prova soldados padronizados para verificar a resistência mecânica, o modo de ruptura e a microestrutura das soldas executadas.

Esperou-se avaliar experimentalmente qual, dentro dos principais parâmetros associados ao processo (corrente de soldagem, a força aplicada e o tempo de execução da solda) tem maior influência no processo ou nas propriedades, verificar qual a influência do centelhamento na resistência mecânica das juntas e verificar a variabilidade do processo.

Serão apresentados ao longo do texto:

- Os objetivos,
- Uma revisão bibliográfica sobre o processo de soldagem por resistência elétrica e soldagem por pontos,
- Os equipamentos e materiais utilizados,
- O procedimento experimental,
- Os resultados e discussões,
- As conclusões,
- E as referências bibliográficas.

2 OBJETIVOS

Avaliar os parâmetros de soldagem e sua influência na resistência mecânica de juntas soldadas pelo processo de soldagem por pontos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Definição de soldagem

Soldagem pode ser definida segundo Marques et al. (2009) como processos de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos. Dentre estes processos, a maioria é aplicada para a união de materiais metálicos (MARQUES et al., 2009).

De uma forma mais simples pode-se dizer que soldagem é a operação que objetiva a união de dois ou mais materiais assegurando a continuidade das propriedades químicas e físicas na junta (QUITES, 2011).

3.2 Soldagem por resistência (*Resistance Welding*)

Os processos de soldagem por resistência consistem na obtenção juntas soldadas por meio da geração de calor por efeito *Joule*, devido ao fluxo de corrente, e da aplicação de tensão localizada (MARQUES et al., 2009).

Segundo RWMA(1989) o processo de soldagem por resistência diferencia-se de outros processos de soldagem por não necessitar de material de adição, de uso de fluxos e gases de proteção (RWMA, 1989).

A soldagem por resistência é muito utilizada pela sua alta velocidade, versatilidade e facilidade de automatização, dentre as suas principais variações podemos citar a soldagem por resistência por pontos (*Spot Welding*), muito utilizada para a soldagem de chapas metálicas sobrepostas, revestidas ou não, a soldagem por resistência por projeção (*Projection Welding*), muito utilizado para a soldagem de componentes de fixação em chapas e peças e a soldagem de telas de aço galvanizado, a soldagem por resistência por costura (*Seam Welding*), muito utilizado para a soldagem de tanques de combustíveis automotivos (FONSECA, 1999).

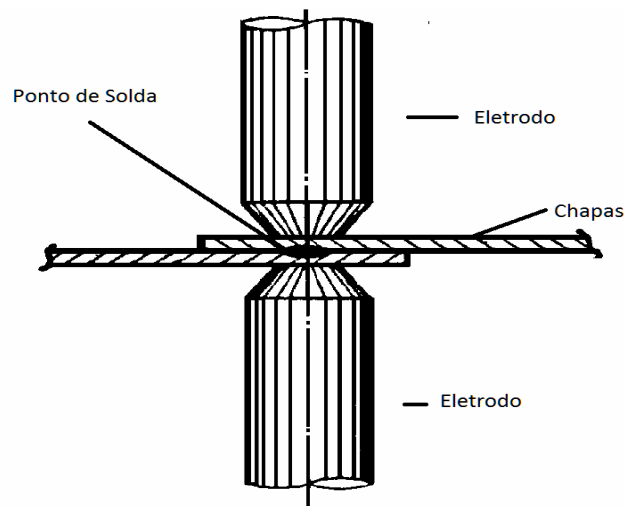
3.3 Soldagem por pontos (*Spot Welding*)

3.3.1 Definição

Segundo RWMA (1989), o principal uso da soldagem por resistência por pontos é a união de peças metálicas sobrepostas. A união por este processo tem baixo custo e alta velocidade, é interessante em juntas que não necessitem desmontagem. (RWMA, 1989).

A soldagem por pontos é um processo quase que exclusivamente utilizado para soldar chapas metálicas, normalmente aço, que utiliza a passagem de corrente entre duas ou mais chapas sobrepostas através de eletrodos de pequeno diâmetro da face de contato (normalmente de 3 a 8 mm) e a aplicação de uma força axial para formar uma solda pontual. As chapas soldadas por estes processos normalmente não ultrapassam três milímetros de espessura (MARQUES et al., 2009). A Figura 1 mostra uma ilustração esquemática do processo.

Figura 1 - Representação soldagem por pontos



Fonte: RWMA(1989) Adaptado

Dentre as suas principais características pode-se citar (FONSECA, 1999):

- Alta velocidade do processo,
- Facilidade de automação,
- É autógeno,

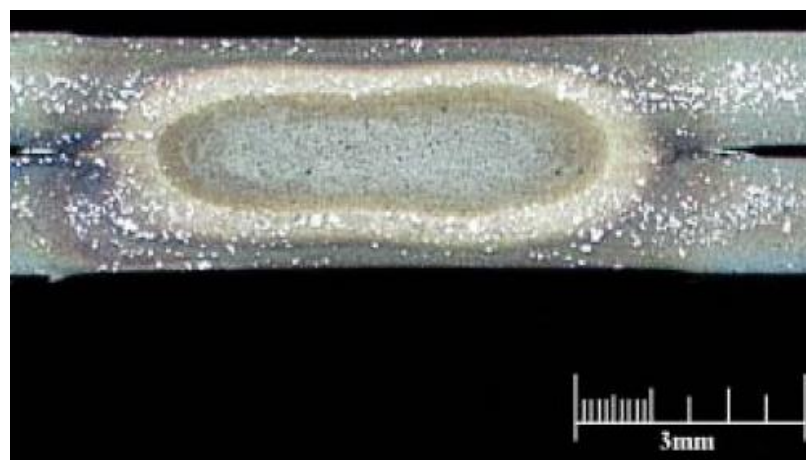
- Fácil operação,
- Permite a união de materiais diferentes,
- Não há perda de material.

Como principais desvantagem tem-se (FONSECA, 1999):

- O uso de juntas sobrepostas pode aumentar os custos de fabricação quando comparados com juntas de topo,
- Necessita de redes de elétricas de grande porte devido à altas correntes associadas ao processo,
- Juntas com baixa resistência à tração e à fadiga,
- Custo alto de equipamentos e de implantação.

A Figura 2 apresenta a macrografia de um ponto de solda em uma junta metálica:

Figura 2 - Macrografia de um ponto soldado



Fonte: VARGAS (2006)

3.3.2 Fundamentos do Processo

A soldagem por resistência por pontos é realizada pela passagem de corrente elétrica, por um intervalo de tempo definido, para união de peças através de fusão de um pequeno volume de material, com aplicação de uma força localizada através dos eletrodos. A corrente é aplicada

até a fusão do material e a força dos eletrodos é aplicada antes, durante e depois da aplicação da corrente elétrica. (FONSECA, 1999; RWMA, 1989).

A geração de calor para a fusão se dá por efeito *Joule*, devido à resistência a passagem da corrente elétrica. Devido curto caminho percorrido pela corrente elétrica no material base e ao baixo tempo de soldagem, altas correntes elétricas são necessárias para a realização da soldagem. A geração de calor no local da solda resulta da ação combinada de três parâmetros (BRANCO, 2004; FONSECA, 1999; MARQUES et al., 2009):

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

Reunindo estes termos em uma só expressão, temos a equação abaixo, que representa à lei de *Joule* aplicada ao condutor:

$$Q = I^2 \times R \times t$$

Onde:

Q =Calor gerado (J),

I =corrente elétrica (A),

R =resistência do condutor (Ω),

T =tempo (s).

Desta equação, tem-se que o fator que mais influência no calor gerado é a corrente elétrica, por ser o termo de maior grau (FONSECA, 1999).

Parte do calor é utilizado para gerar a solda e parte é perdida por condução, convecção e radiação para o material de base e eletrodo. A magnitude destas perdas é geralmente desconhecida (BRANCO, 2004).

A lei de *Joule* aplicada a condutores é comumente utilizada para representar a quantidade de calor gerada no processo de soldagem por pontos, entretanto ela pode ser considerada como

muito simplificada para esse processo, pois a resistência varia de modo complexo durante a soldagem em função de fatores como: a força aplicada pelos eletrodos, a temperatura, o tempo e características do material soldado. Sendo assim, pode-se expressar o calor gerado no processo como a integral da potência elétrica durante o tempo de soldagem conforme a equação abaixo (FONSECA, 1999):

$$Q = \int_0^t I^2 \times R \times dt$$

Onde:

Q=Calor gerado (J),

I=corrente elétrica (A),

R=resistência do condutor (Ω),

T=tempo (s).

3.3.3 Parâmetros

Os parâmetros de soldagem são as variáveis do processo que determinam a execução eficiente do processo de soldagem e as propriedades mecânicas do ponto soldado. Na soldagem por pontos existem três parâmetros principais: Corrente de soldagem, Força aplicadas nos eletrodos e o Tempo de soldagem (VARGAS, 2006).

A resistência elétrica da peça não é um parâmetro direto do processo de soldagem, mais tem grande importância na geração de calor (VARGAS, 2006).

3.3.3.1 Corrente de soldagem

A corrente de soldagem é o parâmetro que mais tem efeito na geração de calor, as variações em sua magnitude alteram significativamente as propriedades da solda. (VARGAS, 2006).

A corrente utilizada no processo pode ser de dois tipos (FONSECA, 1999):

- Alternada: com transformadores monofásicos ou trifásicos, operando em frequência igual ou diferente da rede de distribuição.
- Continua: direta, pulsada ou com picos de corrente.

A definição do parâmetro de corrente deve sempre ter um equilíbrio com o tempo de soldagem. No geral quando se aumenta o valor da corrente deve diminuir o tempo. Os valores de corrente no processo de soldagem por pontos podem chegar a valores superiores a 15 kA (VARGAS, 2006).

3.3.3.2 Força aplicada nos eletrodos

É a força aplicada para aproximar, assegurar a posição e unir as chapas que serão soldadas. A tensão mecânica gerada por essa força na peça está presente antes, durante e depois da aplicação da corrente de soldagem. É um parâmetro muito importante na qualidade dos pontos soldados (VARGAS, 2006). A força pode ser produzida por sistemas hidráulicos, pneumáticos, magnéticos ou mecânicos (FONSECA, 1999).

O aumento da força afeta indiretamente na geração de calor, pois reduz as resistências de contato. A força é também responsável pela retenção do metal fundido garantindo à consolidação do ponto (FONSECA, 1999).

3.3.3.3 Tempo de soldagem

É o tempo da aplicação da corrente de soldagem no ciclo de soldagem. Este parâmetro deve ser inversamente proporcional a intensidade da corrente de soldagem (VARGAS, 2006).

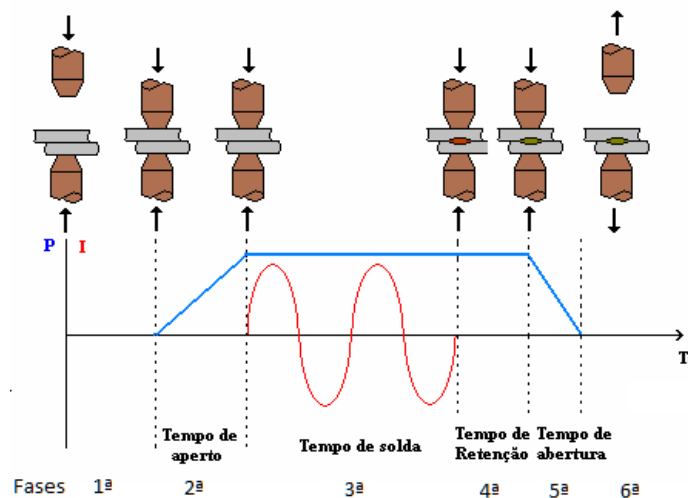
A quantidade de calor gerado na junta é diretamente proporcional ao tempo de aplicação da corrente elétrica. Logo o tempo deve ser sempre otimizado em função dos parâmetros de soldagem (FONSECA, 1999).

A unidade de tempo usada no processo é denominada ciclo. Cada ciclo é igual a $1/f$, onde f (Hz) é a frequência da rede, no Brasil a frequência pode ser de 50 Hz ou 60 Hz, dependendo da região, logo cada ciclo equivale à $1/50$ ou $1/60$ segundos (FONSECA, 1999).

3.3.4 Ciclo de Operação do Processo de Soldagem por Resistência por pontos

Pode-se observar na Figura 3 um ciclo hipotético básico de soldagem por pontos. Em que “P” força aplicada pelos eletrodos nas chapas e “I” é a corrente de soldagem (NASCIMENTO, 2008). O ciclo pode ser dividido em seis fases distintas. A soma do tempo de todas as fases é denominada tempo de soldagem. Na primeira fase, os eletrodos iniciam o processo de descida para que as chapas sejam pressionadas e posicionadas. As chapas devem ser pressionadas de tal forma que ocorra um bom assentamento e evite problemas como expulsão de metal fundido, que pode gerar rebarbas no ponto soldado. Este processo ocorre na segunda etapa, onde é aplicada a força necessária para a execução da soldagem. Na terceira etapa, os eletrodos são mantidos tensionados e a corrente de soldagem é aplicada. Na quarta etapa, com ponto de solda já formado, a corrente de soldagem é desligada, porém os eletrodos permanecem tensionando as chapas para auxiliar a solidificação do ponto de solda. Após a solidificação do ponto de solda, a força de soldagem aplicada pelos eletrodos é retirada e acontece a abertura total dos eletrodos, esse processo ocorre na quinta e na sexta etapa (BRANCO, 2004; VARGAS, 2006).

Figura 3 - Ciclo de soldagem

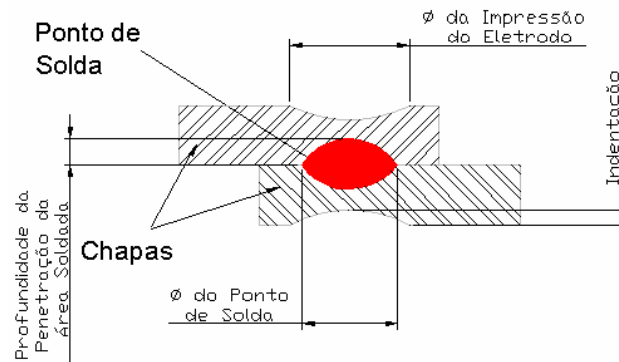


Fonte: VARGAS (2006) adaptado

Após a conclusão do ciclo de soldagem, um ponto de solda deverá ter sido formado, como mostrado na Figura 4. O ponto de solda e a região da solda de ter algumas características, tais

como apresentar um diâmetro mínimo especificado por norma, bem como uma profundidade de penetração na área soldada. A indentação é a impressão deixada pelos eletrodos na chapa durante o processo de soldagem, sendo desejável que ela seja a mínima possível (BRANCO, 2004).

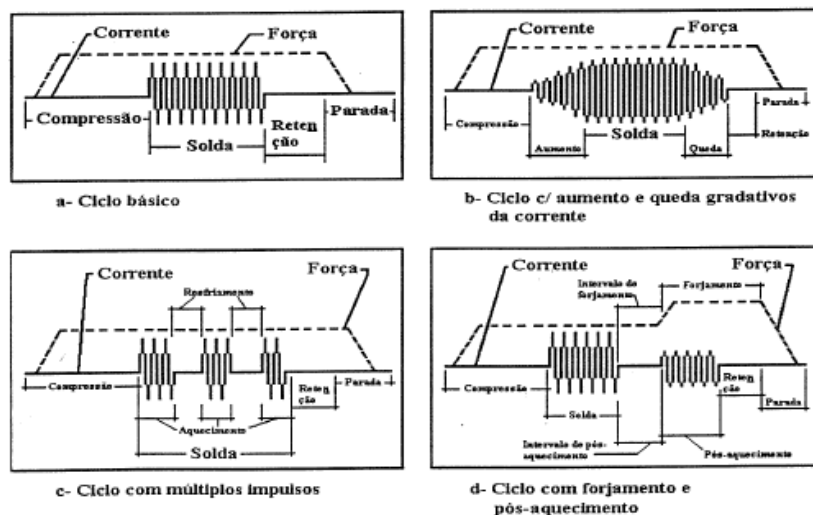
Figura 4 - Ponto de solda



Fonte: BRANCO (2004)

Existem vários ciclos de soldagem especiais, utilizados para metais e configuração de juntas particulares, dentro dos quais pode haver mudanças nos níveis de força ou corrente elétrica, ou a aplicação de pulsos intermitentes de corrente elétrica (FONSECA, 1999). A Figura 5 mostra alguns exemplos de ciclos específicos

Figura 5 - Ciclos especiais de corrente elétrica no processo de soldagem por pontos



Fonte: FONSECA (1999)

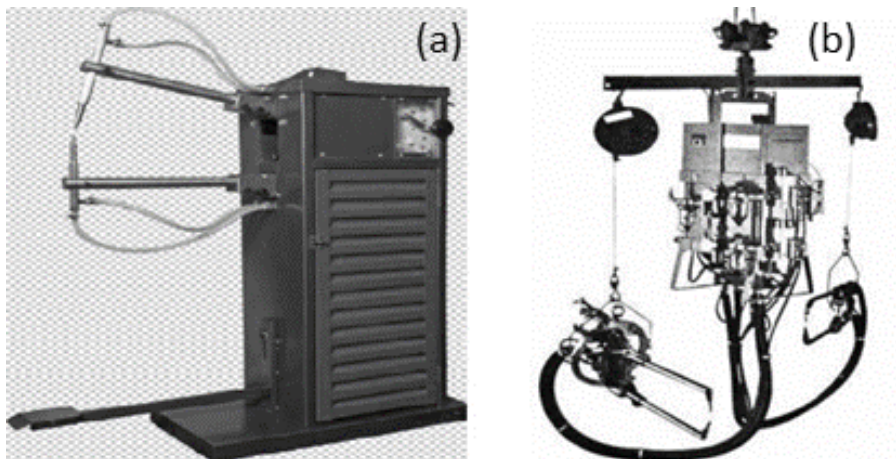
Segundo Marques et al (2009), diferentes tipos de metais podem ser submetidos à soldagem por pontos, sendo que a sua soldabilidade é controlada de maneira geral, pela resistividade

elétrica, condutividade térmica, temperatura de fusão e características metalúrgicas do material a ser soldado (MARQUES et al., 2009).

3.3.5 Equipamento de soldagem por Pontos

Os equipamentos utilizados para executar a soldagem por pontos podem ser estacionárias, como mostrado na Figura 4A, ou podem ser suspensas, também chamado de pinça de solda, como mostrado na Figura 4B. A forma construtiva dos dois tipos de equipamentos de solda são diferentes, porém, o funcionamento é semelhante e obedecem aos mesmos padrões de regulagem (BRANCO, 2004).

Figura 6 - Tipos de equipamentos de soldagem por pontos. (a) Máquina estacionária (b). Máquina Suspensa



Fonte: BRANCO (2004)

Os equipamentos de soldagem por pontos apresentam basicamente três componentes fundamentais: O sistema mecânico, o circuito elétrico e o sistema de controle (BRANCO, 2004; VARGAS, 2006; WAINER, 1992).

O sistema mecânico é composto por mecanismos acionados, geralmente, por sistemas hidráulicos, pneumáticos, hidropneumáticos, magnéticos ou mecânicos que são responsáveis pela aplicação da força durante o processo de soldagem (FONSECA, 1999).

Este sistema mecânico deve garantir que a velocidade de aproximação dos eletrodos seja rápida, porém controlada, de forma a evitar a colisão dos eletrodos. Deve ser dimensionado para garantir a tensão necessária no processo de soldagem (BRANCO, 2004; VARGAS, 2006; WAINER, 1992).

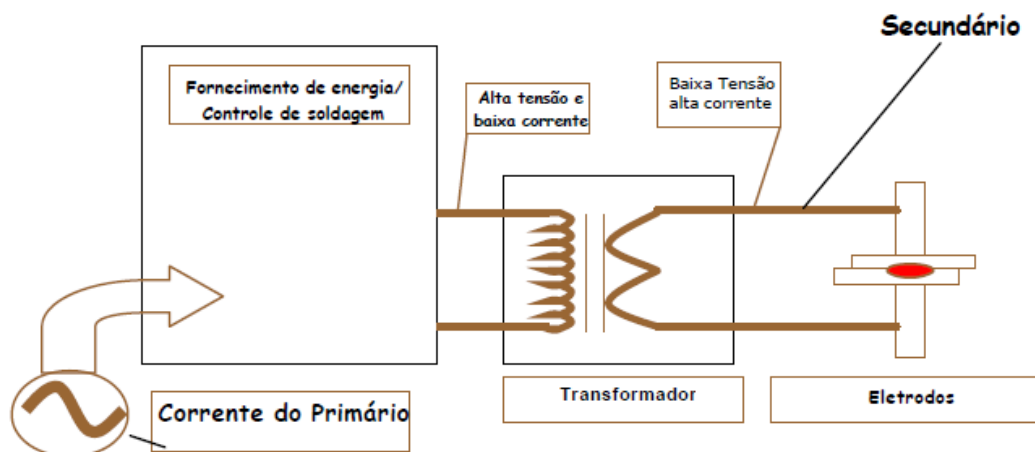
O circuito de controle é responsável pelo controle do ciclo de soldagem, que fornece as seguintes funções principais: iniciar ou cessar a corrente de soldagem para o transformador, controlar a amplitude da corrente de soldagem e liberar o mecanismo atuador de força do eletrodo no tempo adequado (BRANCO, 2004; VARGAS, 2006; WAINER, 1992).

As Características mecânicas dos equipamentos de solda por pontos, tais como: rigidez estrutural, atrito entre componentes e movimento de massa tem influências complexas sobre o processo de soldagem e a qualidade de solda (BRANCO, 2004; VARGAS, 2006; WAINER, 1992).

O circuito elétrico é composto de um transformador e um circuito secundário. O circuito secundário inclui os eletrodos que conduzem a corrente de soldagem até o material. (BRANCO, 2004; VARGAS, 2006).

O transformador de solda tem como função fornecer uma corrente alta para gerar o calor necessário para a execução do processo de soldagem. Esse transformador é responsável por abaixar a tensão e elevar a corrente de solda que será aplicada no processo (FONSECA, 1999). A Figura 7 apresenta um circuito esquemático de um transformador aplicado em soldagem por pontos.

Figura 7 - Circuito elétrico típico de um transformador de soldagem por pontos



Fonte: BRANCO (2004)

3.3.6 Os Eletrodos aplicados no processo de Soldagem por pontos

Os Eletrodos aplicados na soldagem por pontos tem como função conduzir corrente elétrica, aplicar a força no local onde o ponto de solda será realizado e ajudar a dissipar o calor na zona soldada (RWMA, 1989; WAINER, 1992).

Eletrodos devem possuir como características boa condutividade térmica e elétrica, alta resistência mecânica, além disso, deve manter suas propriedades a elevadas temperaturas (RWMA, 1989).

3.3.7 Material dos Eletrodos

Segundo Wainer (1992), o material dos eletrodos para soldagem por resistência por pontos devem ter temperatura de recozimento elevada, grande resistência à compressão e boa resistência ao atrito.

Os materiais dos eletrodos foram classificados pela *Resistance Welder Manufacturers Association* (RWMA) em três grupos: ligas à base de cobre, composições metal-refratário ou compostos e materiais especiais. Estes grupos são divididos em classes que cobrem uma grande gama de materiais à serem soldados (FONSECA, 1999; RWMA, 1989).

Os eletrodos à base de cobre mais utilizados na indústria automotiva, dentre estes pode-se citar três classes, segundo a RWMA, mais aplicadas (BRANCO, 2004; RWMA, 1989):

Classe 1: É composta de materiais não tratáveis termicamente e endurecidos por trabalho a frio, possuem alta condutibilidade térmica e elétrica;

Classe 2: É composta por materiais com melhores propriedades mecânicas e condutibilidade elétrica e térmica inferiores em relação aos eletrodos da Classe 1. As propriedades mecânicas e físicas requeridas são conseguidas por tratamento térmico ou por uma combinação de tratamento térmico e trabalho a frio. Estes são os mais utilizados e podem se adequar a uma ampla faixa de metais e condições de soldagem;

Classe 20: É composta por materiais com capacidade de resistir a altas taxas de troca de calor e altas tensões aplicadas quando comparado com os materiais das classes 1 e 2. São fabricados utilizando cobre e materiais refratários como a alumina.

A Tabela 1 mostra as composições e características dos materiais de fabricação dos eletrodos conforme a classificação da RWMA (BRANCO, 2004):

Tabela 1 - Características dos materiais dos eletrodos segundo RWMA

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

Fonte: BRANCO (2004) Adaptado

RWMA Classe 1 é recomendado especialmente para soldagem por pontos de ligas de alumínio, ligas de magnésio, latão e bronze, por possuir alta condutividade térmica e elétrica.

RWMA Classe 2 possui condutividade térmica e elétrica menor que o Classe 1 e maior resistência mecânica, ele é recomendado para a soldagem por pontos e soldagem por costura para a maioria dos materiais metálicos. Pode, também, ser utilizado para solda por projeção de porcas e parafusos de aço.

RWMA Classe 20 tem condutividade térmica e elétrica similar ao RWMA Classe 2 e maior resistência mecânica que o mesmo. Este material é muito recomendado para a soldagem de materiais revestidos, como por exemplo, chapas de aço galvanizadas.

Os eletrodos de Cu/Cr (1% Cr), Cu/Cr/Zr (1% Cr; 0,25% Zr) e CuZr (0,15% Zr) são formados por ligas endurecidas por precipitação. Estas ligas adquirem suas propriedades através da adição de elementos de liga em solução, depois são envelhecida em condições definidas de tempo e temperatura, promovendo a formação de finos precipitados. A condutibilidade elétrica destes tipos de eletrodo está na faixa de 80% a 90% IACS (BRANCO, 2004).

3.3.8 Geometria dos eletrodos

Um eletrodo para soldagem por pontos possui quatro características geométricas básicas (FONSECA, 1999; VARGAS, 2006):

A – Face: é a parte que mantêm contato com a peça de trabalho, na soldagem é a parte mais importante do eletrodo, pois ela determina o valor da densidade de corrente aplicada na execução da solda, também interfere na definição do parâmetro de força aplicada pelo equipamento de solda na tensão aplicada pelos eletrodos. Áreas de face de eletrodos grandes normalmente não são recomendadas.

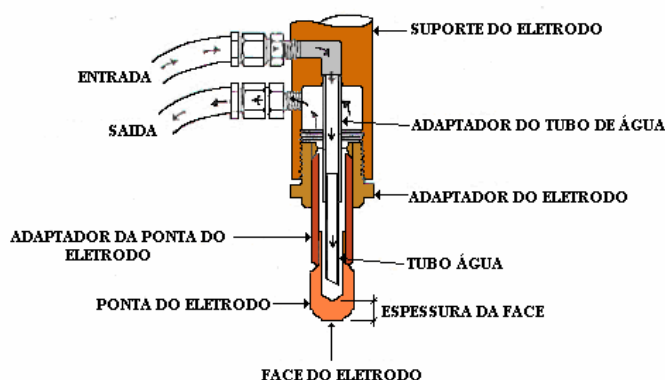
B – O corpo: deve ser dimensionado corretamente para suportar a força aplicada na execução da solda e também área de seção transversal dimensionada para não criar resistência elétrica.

C – Conexão: É o acoplamento que une o eletrodo ao suporte do eletrodo, a forma de fixação normalmente é por roscas ou acoplamento cônico, deve ter vedação eficiente para evitar vazamentos no sistema de refrigeração.

D – Caverna para refrigeração: é a parte oca interna do eletrodo que está conectada ao suporte do eletrodo, serve para permitir a refrigeração do eletrodo, deve ser dimensionado para não dificultar a passagem da água de refrigeração.

A Figura 8 mostra a representação de um sistema de refrigeração em soldagem por pontos.

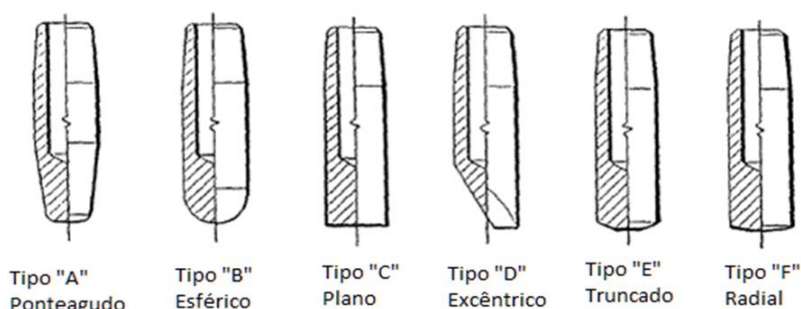
Figura 8 – Sistema de suporte e refrigeração de um eletrodo



Fonte: VARGAS (2006)

A Figura 9 apresenta os principais tipos de eletrodos utilizados e soldagem por pontos, os tipos A, B e E são as geometrias mais comum para uso geral. Os tipos C e F são utilizados quando é necessário um melhor acabamento superficial, reduzindo a marca deixada pelo processo de soldagem. O tipo D é utilizado quando se tem alguma interferência ou o ponto de solda é muito próximo a uma parede da peça (WAINER, 1992).

Figura 9 - Tipos de geometria de eletrodos mais utilizados em solda por pontos



Fonte: RWMA (1989)

3.3.9 Variáveis no processo

Segundo Ruiz (2005) a qualidade requerida para solda por pontos pode ser afetada pela composição química e condições do metal base, projeto da junção e das peças, condição dos eletrodos e equipamentos de solda (RUIZ, 2005).

A espessura da chapa influencia na formação do ponto de solda e na dissipação de calor no processo. Quanto maior a espessura, maior é a quantidade de material a ser fundida na junta, e consequentemente maior deve ser o ponto de solda para garantir a qualidade dessa união. Por consequência menor será a influência dos eletrodo na taxa de resfriamento no processo. Quando se tem grandes espessuras deve-se utilizar elevados valores de corrente elétrica e tempo de soldagem (FONSECA, 1999).

A condição superficial das peças que serão soldadas influencia a geração de calor no processo, a presença de óxidos, sujeira, óleo e outros materiais estranhos afeta a resistência de contato dos eletrodos com a peça e a interface entre as peças. A limpeza das peças permite a execução de soldas de melhor qualidade e com melhor uniformidade das propriedades. Além disso essa

variação de resistência de contato pode gerar maior aquecimento nos eletrodos de solda, reduzindo sua vida útil (FONSECA, 1999).

A mínima profundidade (indentação) é geralmente aceita como 20% da espessura da chapamais fina. Se menor, a solda é dita “fria” por motivo do calor gerado na zona de solda ser muito baixo. O máximo valor da profundidade não deve ser maior que 4/5 do valor da espessura da chapa mais fina (VARGAS, 2006).

3.3.10 Qualidade da solda

A qualidade na soldagem por resistência por pontos depende principalmente da sua aplicação. Para algumas indústrias em específico existem normas próprias para análise da qualidade dos pontos de solda (FONSECA, 1999; RUIZ, 2005).

De forma geral uma solda a ponto de qualidade deve apresentar as seguintes características (FONSECA, 1999):

- Boa aparência superficial: Sem trincas, crateras, endentação excessiva, inclusões ou rebarbas.
- Dimensão do ponto de solda dentro do especificado.
- Resistência: Deve ter a resistência dentro do especificado.
- Ausência de descontinuidades internas: sem trincas, porosidade, inclusões ou vazios.
- Ausência de expulsão ou separação das chapas.
-

A tabela 2 ilustra alguns defeitos na soldagem por pontos e suas possíveis causas (FONSECA, 1999).

Tabela 2 - Alguns defeitos na soldagem por pontos e suas possíveis causas

Defeito	Possíveis causas
Expulsão ou porosidade na interface de solda	Superfícies contaminadas Força do eletrodo muito baixa Corrente muito alta
Expulsão na interface eletrodo/peça	Absorção de impurezas pela ponta do eletrodo Eletrodos desalinhados ou de liga incorreta Causas do item anterior
Solda com dimensões menores que o normal	Tempo de solda muito curto Corrente muito baixa
Indentação excessiva ou marcas do eletrodo	Força do eletrodo muito alta ou muito baixa Eletrodos desalinhados Ajuste insatisfatório das partes Corrente muito alta
Trincas	Tempo de retenção muito curto ou muito longo Contaminação da superfície
Ponto deslocado	Eletrodos desalinhados Ajuste insatisfatório das partes
Achatamento do eletrodo	Número excessivo de soldas sem troca ou retificação do eletrodo Força muito alta ou muito baixa
Agarramento do eletrodo na peça	Tempo muito longo ou corrente muito alta Resfriamento inadequado do eletrodo

Fonte: FONSECA (1999) Modificado

A avaliação da qualidade da solda pode se dar por inspeção visual, ensaios destrutivos ou não destrutivos. Os ensaios destrutivos normalmente são os mais aplicados na indústria, principalmente pela facilidade de sua execução e pelo uso de dispositivos simples, uma desvantagem é que na maioria das vezes são qualitativos ou comparativos, e são dependentes de uma avaliação subjetiva.

3.3.10.1 Inspeção Visual

A superfície de um ponto de solda deve ser uniforme na forma, relativamente plana e deveria ser livre de fusão superficial, indentação profunda dos eletrodos, trincas, descoloração ao redor da solda e outros fatores que indicam necessidade de manutenção dos eletrodos ou funcionamento impróprio do equipamento. Entretanto, a aparência superficial não é sempre um indicador confiável da qualidade da solda já que o desvio decorrente e outras causas de

aquecimento insuficiente ou penetração inadequada, usualmente, não deixam efeitos visíveis nas chapas. (VARGAS, 2006).

3.3.10.2 Ensaios não destrutivos

Um ensaio que tem sido empregado com sucesso nos últimos anos é o ensaio ultrassom. Nesse ensaio a qualidade da solda é avaliada pela observação da forma de onda sonora previamente aplicada, quando esta retorna ao se deparar com algum obstáculo. Essa observação é feita em um osciloscópio. A desvantagem deste tipo de ensaio é a complexidade das formas de ondas obtidas e a interpretação delas. Raios infravermelhos e emissões acústicas são outras técnicas que podem ser aplicadas, mas no geral são muito caros e muito demorados. (VARGAS, 2006).

Um tipo de monitoramento tem sido promissor é o acompanhamento on-line do processo, com o monitoramento de parâmetros tais como: corrente e tensão de solda, resistência dinâmica, força do eletrodo, monitoramento do crescimento e da formação da lentilha de solda (VARGAS, 2006).

O teste metalográfico é também muito utilizado para medir o diâmetro da lente de solda. O corpo-de-prova é submetido ao teste de torção e o botão de solda é lixado e polido e levado ao microscópio para a determinação de seu diâmetro (VARGAS, 2006).

3.3.10.3 Ensaios destrutivos

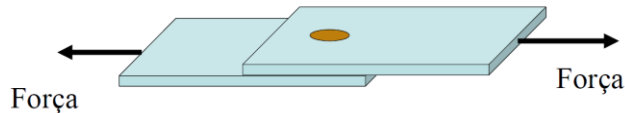
Nestes ensaios a qualidade da solda é determinada pelas informações obtidas sobre um grupo de amostras aleatórias na quais são realizadas os testes necessários de resistência do ponto e sua inspeção visual.

Dentre os principais pode-se citar: o teste por tensão cisalhante, o teste por tração axial, o teste de torção e o teste de arrancamento.

3.3.10.3.1 Teste por tensão cisalhante

O teste por tensão cisalhante consiste na aplicação de forças de separação em duas peças unidas. Estas forças são opostas e agem em uma direção paralela à superfície da peça, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Teste por tensão cisalhante

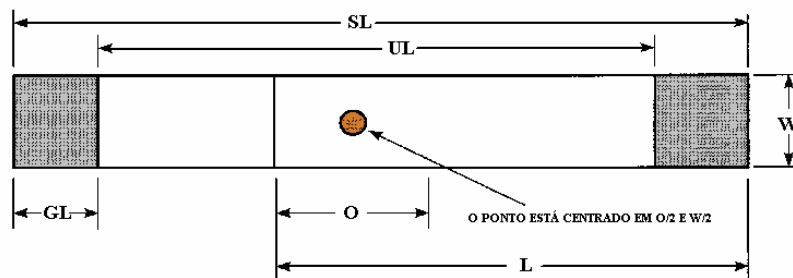


Fonte: VARGAS (2006)

O corpo-de-prova é solicitado até a sua ruptura sob tensão em uma máquina de ensaio de tração. As dimensões do corpo-de-prova para este teste são especificados por norma. A avaliação da solda é feita em função do valor máximo da carga utilizada para romper o corpo-de-prova, assim como o modo de ruptura do ponto que, em chapas de até 2 mm de espessura deve apresentar arrancamento do ponto de solda em uma das chapas (FONSECA, 1999; VARGAS, 2006).

O corpo-de-prova é carregado até a sua ruptura sob tensão numa máquina padrão para o teste. As dimensões do corpo-de-prova para este teste são especificados pela norma AWS/SAE 8.9M e são apresentadas na Figura 11 e na Tabela 3. A avaliação da solda é feita em função do valor máximo da carga utilizada para romper o corpo-de-prova, assim como o modo de ruptura do ponto que, em chapas de até 2 mm de espessura deve apresentar arrancamento da lente de solda de uma das chapas (VARGAS, 2006).

Figura 11 - Dimensões dos corpos-de-prova para teste de tensão cisalhante



Fonte: VARGAS (2006)

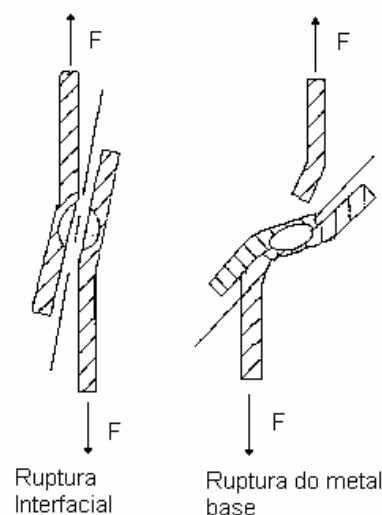
Tabela 3 - Dimensões dos corpos-de-prova para teste de tensão cisalhante

Espessura da chapa (mm)	Comprimento da chapa (L) (mm)	Largura (W) (mm)	Superposição (O) (mm)	Comprimento total (SL) (mm)	Comprimento livre (UL) (mm)	Comprimento a segurar (GL) (mm)
0,60 – 1,29	105	45	35	175	95	40
1,30 a 3,00	138	60	45	230	105	62.5

Fonte: VARGAS (2006) Modificado

A junta, quando submetida a tensões cisalhantes, pode falhar através da lente de solda, o que é associado à baixa resistência da solda, ou pelo rompimento do metal base adjacente à lente de solda, o que é associado com alta resistência da solda (Figura 12). Exige-se, em geral, um diâmetro de lente de solda de cerca de $4\sqrt{t}$, onde t é a espessura da chapa, para que a falha por rompimento do metal base ocorra (VARGAS, 2006).

Figura 12 - Tipos de falha em teste de resistência ao cisalhamento como função da rotação do corpo-de-prova



Fonte: VARGAS (2006)

A resistência ao cisalhamento das soldas aumenta rapidamente no intervalo entre os níveis de solda mínima e expulsão. Resultados mostram que a resistência ao cisalhamento ainda é

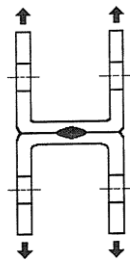
mantida em correntes acima do limite de expulsão de modo que soldas aceitáveis em termos de resistência ainda são obtidas. Entretanto, a expulsão é indesejável por uma série de razões, entre elas, a segurança do operador e o perigo de incêndio. Também deve ser evitada porque acredita-se que ela reduz a vida da ponta do eletrodo e isto é de importância fundamental quando se solda aços com revestimento metálico. É recomendado, portanto, soldar numa corrente um pouco abaixo da de expulsão (VARGAS, 2006).

A dureza da zona de fusão exerce algum efeito na resistência por tensão cisalhante, mas ela contribui ainda mais para a falha na solda quando esta é submetida a forças de impacto ou vibração. Para esta situação, uma dureza excessiva pode resultar em falhas devido a trincas e fadiga. Em alguns casos é empregado um intervalo de pós solda com a finalidade de evitar um esfriamento muito rápido do material onde as trincas ou rachaduras podem aparecer (VARGAS, 2006).

3.3.10.3.2 Teste por tração axial

Neste teste, a solda é tensionada na direção normal à superfície do material. O procedimento é normalmente adotado à nível industrial. A Figura 13 mostra a representação do ensaio. O corpo-de-prova deve ser dividido em três regiões iguais e suas bordas são dobradas a 90° para formar um perfil em “U”. Este corpo-de-prova é soldado a um outro igual. O conjunto assim formado é tracionado axialmente em relação ao ponto soldado. Este teste só é possível em chapas com espessura e materiais que permitam o dobramento em 90°. (FONSECA, 1999; VARGAS, 2006).

Figura 13 - Teste por tração axial



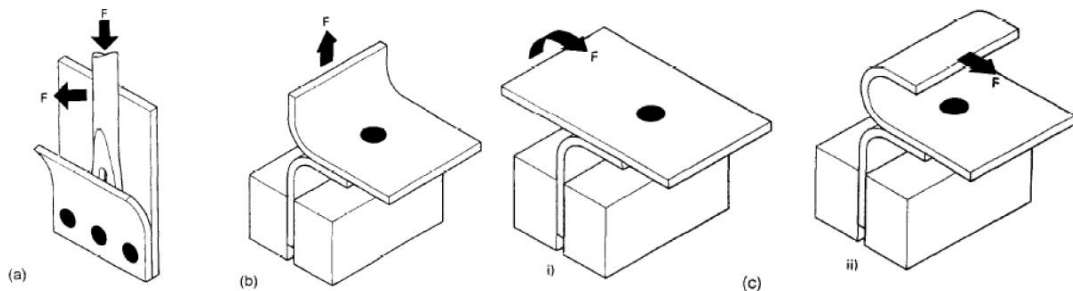
Fonte: FONSECA (1999)

3.3.10.3.3 Teste de arrancamento

É o tipo de teste mecânico mais comumente usados em soldas a ponto. Ele é usado para determinar a soldabilidade a ponto em todas as espécies automobilísticas. Existem várias razões para o amplo uso de teste: (a) facilidade de execução, (b) baixo custo, (c) utilização em chão de fábrica como um teste de controle de qualidade. A Figura 14 mostra de forma esquemática este ensaio.

Neste teste, após os corpos-de-prova terem sido soldados, eles são levados a um dispositivo de fixação e com auxílio de uma ferramenta apropriada, são dobrados fazendo-se o arrancamento da lente, como pode ser observado na Figura 2.14(a). Em seguida mede-se, com um paquímetro, o diâmetro do ponto de solda em duas direções perpendiculares. A qualidade da solda é avaliada pelo diâmetro da lente de solda que ficará aderido a uma das partes após separação (VARGAS, 2006).

Figura 14 - Rotina de testes para arrancamento: a) Com chave tipo pé de cabra, b) Teste mecânico e c) Teste tipo descascamento



Fonte: VARGAS (2006)

4 PARTE EXPERIMENTAL

As etapas de desenvolvimento deste trabalho podem ser observadas na Figura 15.

Figura 15 - Fluxograma da parte experimental



Fonte: Produzido pelo autor

4.1 Materiais

Para a confecção dos corpos-de-prova foram utilizadas chapas de aço carbono SAE 1010 com espessura de 1,4mm. O material foi fornecido pelo Departamento de Engenharia (DEMAT) do CEFET-MG.

4.2 Equipamentos

4.2.1 Equipamento de soldagem

Foi utilizada uma bancada de solda construída para fins didáticos e de pesquisa, composto por uma pinça de solda suspensa com cilindro pneumático da fabricante FASE modelo X/4 – 200; um transformador de média frequência de 440V e potência de nominal de 54 kVA modelo Cabine Compacta PTI número de série P04000951 com controlador Weld334MHC e unidade de programação móvel HCM 4300 HHT da fabricante FASE; um transformador de 220V para 440V Auto Trafo monofásico de 15 KVA e 60 Hz, modelo ELT78, da fabricante Eletro Transformadores LTDA e uma bomba hidráulica bivolt. O equipamento possui também um fresador pneumático de eletrodos integrado. Figura 16 apresenta uma foto do equipamento.

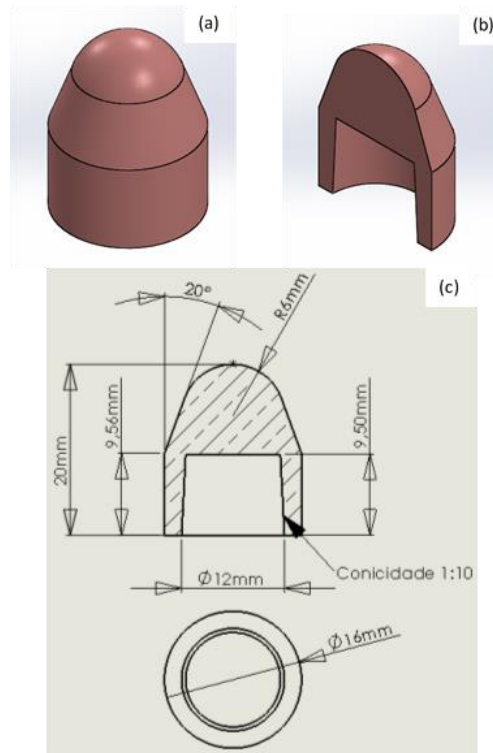
Figura 16 - Equipamento utilizado para a realização das soldas.



Fonte: Produzido pelo autor

Os eletrodos utilizados no equipamento são fabricados em uma liga de cobre e Al_2O_3 que pertence a Classe 20 de materiais segundo a classificação da RWMA. As dimensões do eletrodo seguem o código 52120124 da Norma 62972/30 da Fiat Automóveis e está apresentado de forma esquemática na Figura 17.

Figura 17 - Representação de eletrodo: a) Vista isométrica, b) Vista Isométrica em corte e c) Desenho Técnico



Fonte: Produzido pelo Autor

4.2.2 Equipamentos de ensaio

Para o ensaio de tração foi utilizado um equipamento VEB da WPM Leipzig modelo 281/13. O equipamento é analógico e a plotagem dos gráficos é feita através de plotagem em papel milimetrado com o auxílio de uma caneta. O equipamento é mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Equipamento utilizado para o ensaio de tração



Fonte: Produzido pelo autor

Para o ensaio de teste de arrancamento foram utilizados uma bancada com uma morsa para a fixação do corpo-de-prova, uma chave tipo talhadeira e uma marreta.

4.2.3 Equipamentos para a preparação dos corpos-de-prova

Para o corte da chapa e confecção dos corpos de prova foram utilizadas duas guilhotinas mecânicas: (a) Modelo TM 10 N° 205 da Newton S.A. com capacidade de corte de chapas de aço de até 2,5mm (Figura 19) e (b) modelo U-136-0 da Peck, Stow & Wilcox CO. com capacidade de corte de chapas de aço de até 1,5mm (Figura 20).

Figura 19 - Guilhotina Modelo TM 10 N° 205 da Newton S.A.



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 20 - Guilhotina modelo U-136-0 da Peck, Stow & Wilcox CO.



Fonte: Produzido pelo autor

4.2.4 Equipamentos de ensaio metalográfico

Para a preparação das amostras foram utilizadas duas lixadeiras Modelo 115/60 da Struers (Figura 21) e duas máquinas politriz modelo AROPOL-2V de 300 RPM (baixa rotação) e 600 RPM (alta rotação) da Arotec S.A. (Figura 22).

Figura 21 - Lixadeiras Modelo 115/60 da Struers



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 22 - Politriz modelo AROPOL-2V da Arotec S.A.



Fonte: Produzido pelo autor

Para análise metalográfica foi utilizado um microscópio modelo IM713 com número de série 0628894 da empresa Kontrol e distribuído pela Fortel Industria e comercio LTDA (Figura 23). O microscópio possui aumentos de 100X, 200X, 400X E 800X e câmera acoplada para aquisição de imagens diretamente para um computador.

Figura 23 - Microscópio modelo IM713



Fonte: Produzido pelo autor

4.2.5 Equipamento de ensaio EDX

O equipamento para ensaio de fluorescência de raios-X (EDX) utilizado foi um Rayny EDX-720 da marca Shimadzu. Na Figura 24 podemos ver uma fotografia do equipamento.

Figura 24 - Equipamento de EDX Rayny EDX-720 da marca Shimadzu



Fonte: Produzido pelo autor

4.3 Metodologia

O processo de soldagem dos corpos-de-prova deste trabalho foi dividido em três procedimentos diferentes:

- Primeiro procedimento: Variação dos valores corrente de soldagem: 4,5 kA, 5,0 kA, 5,3 kA, 5,5 kA, 5,8 kA, 6,0 kA, 6,3 kA, 6,5 kA, 7,0 kA e 7,5 kA. Foram soldados três corpos-de-prova com cada corrente de soldagem,
- Segundo procedimento: Variação dos valores corrente de soldagem: 5,5 kA, 6,5 kA e 7,5 kA. Foram soldados dez corpos-de-prova com cada corrente de soldagem,
- Terceiro procedimento: Foi dividido em duas partes:
 - Variação dos valores da força aplicadas nos eletrodos: 5 kgf, 10 kgf, 15 kgf, 20 kgf, 25 kgf e 30 kgf,

- Variação do valores de tempo de aplicação da corrente de soldagem utilizando os valores 10 ciclos, 20 ciclos, 40 ciclos e 60 ciclos. Para cada variação foram soldados três corpos-de-prova.

A Tabela 4 mostra o resumo desta divisão em procedimentos e os parâmetros constantes utilizados:

Tabela 4 - Parâmetros de soldagem variáveis dos corpos-de-prova dividido três em procedimentos.
Parâmetros de soldagem constantes utilizados: tempo de pré-tensão=10 ciclos, tempo de aperto=20 ciclos, tempo de resfriamento=20 ciclos.

		Corrente (kA)	Força aplicada (N)	Tempo de aplicação da corrente (Ciclos)	Número de Corpos-de-prova
Primeiro Procedimento		4,5	196	40	3
		5,0	196	40	3
		5,3	196	40	3
		5,5	196	40	3
		5,8	196	40	3
		6,0	196	40	3
		6,3	196	40	3
		6,5	196	40	3
		7,0	196	40	3
		7,5	196	40	3
Segundo Procedimento		5,5	196	40	10
		6,5	196	40	10
		7,5	196	40	10
Terceiro Procedimento	Primeira parte	6,5	49	40	3
		6,5	98	40	3
		6,5	147	40	3
		6,5	196	40	3
		6,5	245	40	3
		6,5	294	40	3
	Segunda parte	6,5	196	10	3
		6,5	196	20	3
		6,5	196	40	3
		6,5	196	60	3

Fonte: Produzido pelo autor

Os corpos-de-prova foram soldados separadamente em cada procedimento e os resultados dos testes de ensaio de tração definiram o próximo procedimento, sendo assim, o segundo procedimento foi executado com base nos resultados do primeiro procedimento, e o terceiro procedimento foi executado com base nos resultados do segundo procedimento.

A unidade de tempo utilizada pelo equipamento é denominada ciclo, unidade esta que é equivalente a $1/F$ segundos, onde F =Frequência da rede elétrica (Hz). No estado de Minas Gerais, onde os corpos-de-prova foram soldados, a frequência da rede elétrica tem o valor de 60 Hz, logo um ciclo é o equivalente a $1/60$ segundos.

4.3.1 Caracterização do material das chapas

O material para a confecção dos corpos de prova foi analisado realizando-se um ensaio metalográfico, para isso utilizou-se amostras cortadas da chapa utilizada em sua sessão transversal à direção de laminação e em sua sessão longitudinal à direção de laminação.

O procedimento de preparação das amostras foi o seguinte:

- Embutimento “à frio” das peças com resina acrílica auto polimerizante,
- Processo de lixamento com lixas de 240, 320, 400 e 600 mesh respectivamente,
- Lavadas com álcool etílico e secas com secador,
- Polimento em panos com pasta de diamante de 9μ e 3μ respectivamente. O lubrificante utilizado foi o álcool etílico,
- Ataque com uma solução de Nital 3% para a revelação da microestrutura.

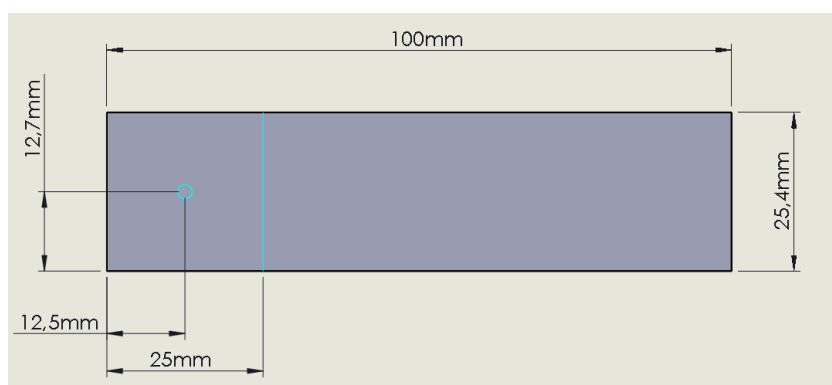
Após a preparação foram atacadas com solução de Nital 3% e analisadas em microscópio com aumento de 200X no qual foi possível visualizar sua microestrutura e obter as micrografias.

Foi realizado também um ensaio de EDX em uma amostra do aço utilizado para quantificar os elementos do material.

4.3.2 Corte e preparação dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova para execução dos testes foram cortadas de uma chapa inteira de 2400x1200mm. O tamanho das peças adotados foi 25,4x100mm, foram cortada cento e oitenta peças, duas para cada corpo-de-prova. Após o corte todas as peças foram desempenadas, rebarbadas e limpas com estopa, após esta preparação foram traçadas marcações de referência nas peças conforme a Figura 25.

Figura 25 - Representação de marcações de referência em chapas para a confecção dos corpos-de-prova



Fonte: Produzido pelo autor

4.3.3 Parametrização do equipamento de soldagem e realização de testes

Os parâmetros foram sendo modificados até se obter soldas eficientes no material, a análise foi realizada com avaliação visual e teste de arrancamento. Como parâmetros de solda eficiente foram considerados o nível de centelhamento no processo de soldagem e a forma de ruptura do material soldado. A ruptura aceita como eficiente foi a ruptura do metal base ao redor do ponto soldado.

O teste de arrancamento foi realizado prendendo-se o corpo-de-prova soldado em uma morsa e utilizando uma chave tipo talhadeira para separar as duas peças da junta com o auxílio de uma marreta.

A figura 26 mostra uma fotografia de um corpo-de-prova durante a realização do teste de arrancamento.

Figura 26 - Teste de arrancamento para validação dos parâmetros de solda



Fonte: Produzido pelo autor

A Figura 27 apresenta o resultado após o ensaio de arrancamento de um corpo-de-prova. Considerou-se o resultado obtido como válido pelo fato da ruptura se dar no material de base e não no ponto soldado. Essa análise auxiliou na validação dos parâmetros de soldagem base.

Figura 27 - Resultado do ensaio da arrancamento para validação dos parâmetros



Fonte: Produzido pelo autor

O modo de configuração do equipamento utilizado foi o de corrente constante.

4.3.4 Soldagem dos corpos-de-prova.

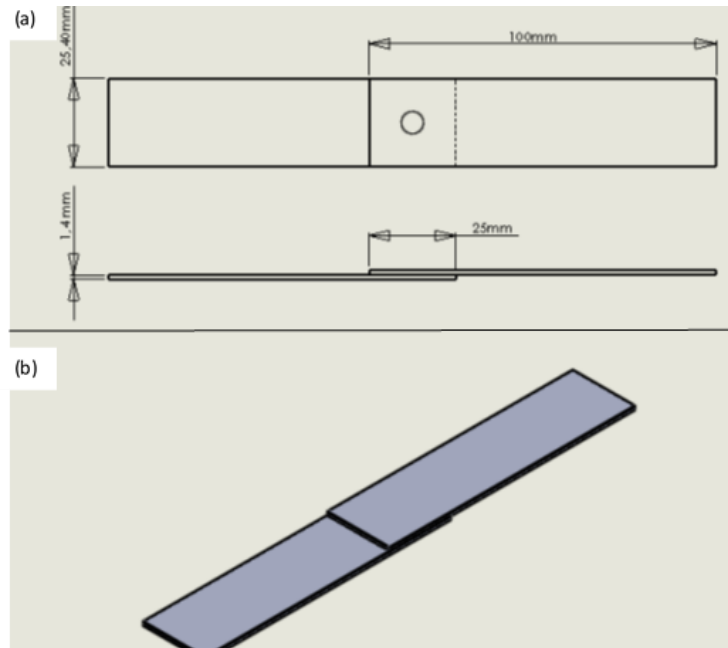
Os testes foram divididos em três procedimentos já descritos anteriormente, a sequência de soldagem geral utilizada para os três procedimentos está descrita abaixo:

- Os corpos-de-prova foram limpos com estopa antes da soldagem para eliminar qualquer resíduo de sujeira e óleo em sua superfície,
- Os eletrodos de cobre foram fresados no início de cada procedimento de soldagem,
- O equipamento foi ligado e programado com o parâmetro definido para cada variação de corrente de soldagem, tempo de soldagem ou força entre os eletrodos,
- Verificou-se o correto funcionamento do equipamento, com a soldagem de uma peça de teste,
- As chapas foram posicionadas sobrepostas respeitando a marcação de referência previamente feita e mantidas unidas com o auxílio de um alicate de pressão,
- Posicionou-se as chapas entre os eletrodos do equipamento na marca de centro também previamente traçada,
- Acionou-se o equipamento para execução do ponto de solda.

Após soldagem de cada corpo-de-prova foi verificado quanto ao posicionamento do ponto soldado e das duas chapas do corpo-de-prova, as juntas soldadas não conforme foram descartadas.

Todos os corpos-de-prova foram identificados com caneta para retroprojeter azul, com o parâmetro de corrente de soldagem utilizado e a variação de tempo ou força aplicada nos eletrodos, além do número do corpo de prova para cada variação de cada procedimento, sendo identificado por CP1, CP2, CP3, etc. A Figura 28 mostra a representação das duas chapas sobrepostas para a execução da soldagem dos corpos-de-prova.

Figura 28 - Representação de duas chapas sobrepostas para soldagem dos corpos-de-prova.



Fonte: Produzido pelo autor

A Figura 29 mostra o posicionamento das chapas para a execução da soldagem.

Figura 29 - Posicionamento das chapas para a execução da soldagem



Fonte: Produzido pelo autor

4.3.5 Ensaio de tração

O ensaio de tração dos corpos-de-prova soldados foi realizada utilizando garras para fixação de chapas no equipamento. A velocidade utilizada no ensaio foi de $7,6 \times 10^{-4}$ m/s, essa velocidade foi obtida utilizando uma escala fixada na coluna do equipamento, cronometrando-se o tempo para deslocamento de 100 mm da base. Foram feitas 3 medições e calculada a média dos valores. O equipamento estava com a chave de seleção de velocidade na posição 10%.

O equipamento utilizado é analógico e fornece gráficos plotados em papel milimetrado, esses gráficos foram posteriormente passados para o computador. O método utilizado foi a digitalização das imagens em escala real e medição das imagens no software AutoCad® 2013. A medição dos pontos no gráfico foi realizada da seguinte maneira: mediu-se o ponto de carga máxima no gráfico e dividiu-se esse valor em dez linhas equidistantes, obtendo-se 20 pontos de medição, dez na inclinação positiva e dez na inclinação negativa do gráfico. A partir dos pontos no eixo vertical, mediu-se a distância dos pontos no eixo horizontal. Após a aquisição das coordenadas de todos os pontos os dados foram tratados no EXCEL® 2013 e os gráficos foram plotados.

O procedimento de ensaio foi o seguinte: As garras do equipamento são posicionadas com uma distância padrão de 100 mm escolhida empiricamente, corpos-de-prova foi posicionado com o ponto de solda em uma distância no centro entre as duas garras. Após a fixação das garras o mostrador do equipamento foi zerado e o ensaio foi iniciado. O ensaio foi executado até o rompimento da junta soldada. Depois do ensaio foi anotado o valor de carga máxima suportada pelo corpo-de-prova e o material rompido foi retirado do equipamento. Esse procedimento foi repetido para os noventa corpos-de-prova utilizadas nesse trabalho. A Figura 30 mostra uma foto do posicionamento do corpo-de-prova no equipamento.

Figura 30 - Foto do posicionamento dos corpos-de-prova no ensaio de tração



Fonte: Produzido pelo autor

Os ensaios de tração foram realizadas em três etapas, uma para cada procedimento de soldagem.

Foram tiradas fotos de cada corpo-de-prova antes e depois do ensaio para posterior análise.

Com os dados obtidos no ensaio de tração foram calculados a média e o desvio dos valores de carga máxima dos corpos-de-prova ensaiados para cada variação de parâmetro. Com esses valores plotou-se quatro gráficos da carga máxima pelo valor do parâmetro variado em cada procedimento:

- Carga máxima (N) X corrente de soldagem (kA) para o primeiro procedimento,
- Carga máxima (N) X corrente de soldagem (kA) para o segundo procedimento,
- Carga máxima (N) X força aplicada nos eletrodos (N) para o terceiro procedimento,
- Carga máxima (N) X tempo (Ciclos) para o quarto procedimento.

Os valores de configuração de força do equipamento de soldagem e os valores de carga máxima apresentados pelo equipamento de ensaio de tração são em quilograma força (kgf), estes dados foram convertido para o sistema internacional de unidades, em Newtons (N), através de um fator de conversão 9,81.

4.3.6 Ensaio metalográfico dos corpos-de-prova

Para o ensaio metalográfico foram selecionadas seis corpos-de-prova listados abaixo:

- Corpo-de-prova com corrente de soldagem 5,3 kA CP1 do primeiro procedimento,
- Corpo-de- prova com corrente de soldagem 6,5 kA CP1 do primeiro procedimento,
- Corpo-de-prova com tempo de 10 ciclos CP3 do terceiro procedimento,
- Corpo-de-prova com tempo de 60 ciclos CP3 do terceiro procedimento,
- Corpo-de-prova com força de 49 N CP2 do terceiro procedimento,
- Corpo-de-prova com força de 294 N CP2 do terceiro procedimento.

Os corpos-de-prova foram fixados em uma bancada com uma morsa e cortadas com uma serra arco no centro do ponto soldado. Os cortes foram realizados lentamente para evitar alterações na micro estrutura do material por aquecimento. Após o corte as peças foram identificadas e levadas para o laboratório de ensaios metalográficos. O procedimento para o corte está apresentado na Figura 31.

Figura 31 - Corte dos corpos-de-prova para confecção de amostras para o ensaio metalográfico



Fonte: Produzido pelo autor

A Figura 32 apresenta um corpo-de-prova após o corte.

Figura 32 - Corpo-de-prova após corte através do ponto de solda



Fonte: Produzido pelo autor

A preparação das amostras seguiu o seguinte procedimento:

- Embutimento “à frio” das peças com resina acrílica auto polimerizante,
- Processo de lixamento com lixas de 240, 320, 400 e 600 mesh respectivamente,
- Lavadas com álcool etílico e secas com secador,
- Polimento em panos com pasta de diamante de 9μ e 3μ respectivamente. O lubrificante utilizado foi o álcool etílico,
- Ataque com uma solução de Nital 3% para a revelação da microestrutura.

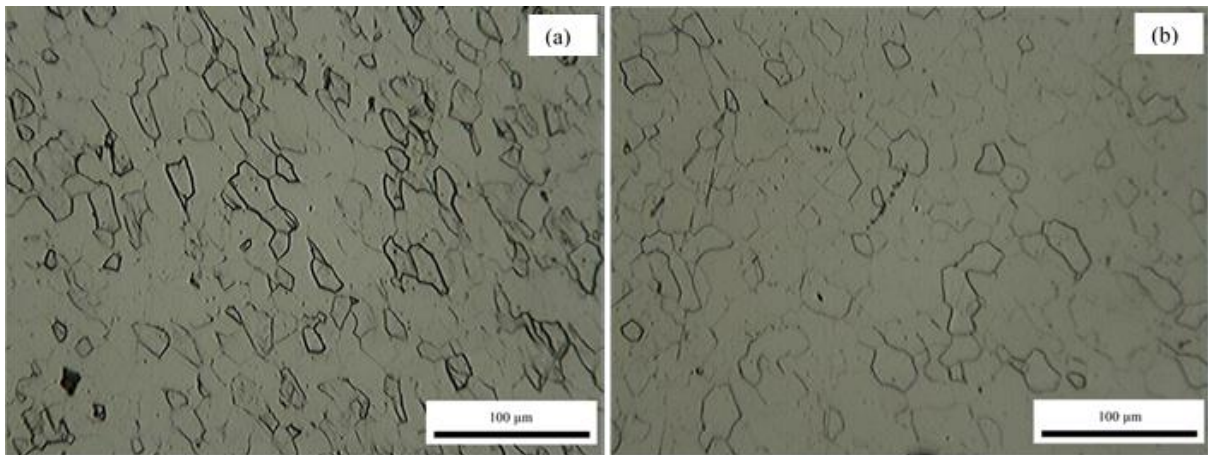
As amostras foram fotografadas nas regiões da zona fundida e na interface da zona fundida com aumento de 200X e 400X. Todas as imagens foram salvas no formato JPG e com resolução de 640x480 pixels. As escalas utilizadas nas imagens são padronizadas do laboratório.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resultado caracterização do material

A Figura 33 apresenta as micrografias obtidas através do ensaio metalográfico do material das chapas de aço utilizadas nos corpos-de-prova.

Figura 33 - Micrografias da chapa de aço utilizadas no trabalho: (a) Sessão longitudinal e (b) Sessão transversal.



Fonte: Produzido pelo autor

A análise das micrografias mostraram uma microestrutura formada basicamente por uma matriz de ferrita com pontos bem dispersos de perlita. Na Figura 33 (a) que mostra a sessão longitudinal do material pode-se ver um alinhamento dos grãos, isso observado por este ser um material laminado a frio.

A Tabela 5 apresenta os elementos identificados no ensaio de EDX no material:

Tabela 5 - Resultado de ensaio EDX

Elemento Químico	Quantidade em massa (%)
Fe	99.516
Mn	0.388
Cr	0.096

Fonte: Produzido pelo autor

O equipamento não consegue identificar elementos de baixo peso molecular, por isso não foi possível identificar a quantidade de carbono no material.

Com os resultados do ensaio metalográfico e do EDX pode-se concluir que o material analisado é uma aço com baixo teor de carbono, condizendo com a especificação de aço SAE 1010 declarada pelo fornecedor.

5.2 Resultados do ensaio de tração

Os resultados dos dados de carga máxima no ensaio de tração dos corpos-de-prova do primeiro procedimento estão apresentados na Tabela 6.

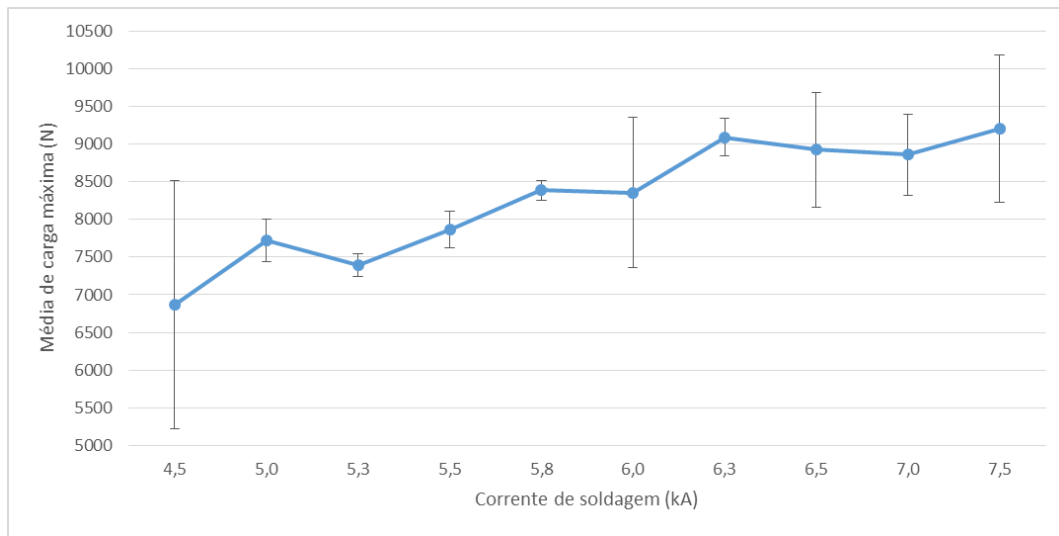
Tabela 6 – Dado de resistencia maxima obtidos no ensaio dos corpos-de-prova do primeiro procedimento

Corrente (kA)	Carga máxima - Ensaio de Tração (N)			Média (N)	Desvio Padrão (N)
	CP1	CP2	CP3		
4,5	8142	5003	7456	6867	1650
5,0	8044	7554	7554	7717	283
5,3	7259	7358	7554	7390	150
5,5	7701	7750	8142	7864	242
5,8	8339	8289	8535	8388	130
6,0	8829	7210	9025	8355	996
6,3	8878	9369	9025	9091	252
6,5	9663	8976	8142	8927	761
7,0	8682	8437	9467	8862	538
7,5	9908	8093	9614	9205	974

Fonte: Produzido pelo autor

O gráfico plotados desses dados são apresentados na Figura 34.

Figura 34—Gráfico média de carga máxima (N) X Corrente de soldagem (kA) do ensaio corpos-de-prova do primeiro procedimento



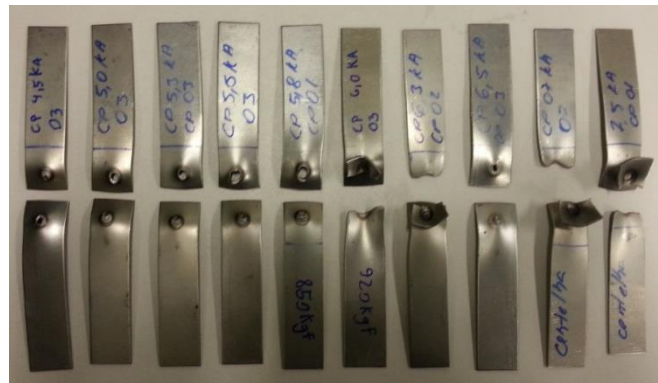
Fonte: Produzido pelo autor

Pela análise do gráfico pode-se verificar uma tendência de aumento na resistência mecânica com o aumento da corrente de soldagem. A partir do valor de corrente de soldagem de 6,0 kA percebeu-se a expulsão (centelhamento) durante o processo de soldagem. De acordo com a literatura (revisão bibliográfica) esperava-se que a expulsão iria afetar negativamente na resistência das juntas soldadas, mas esse fato não foi observado experimentalmente através da análise dos dados do ensaio de tração, sendo que o mesmo está associado a problemas operacionais (desgaste do eletrodo) e de segurança no processo de soldagem, e não a problemas de resistência mecânica.

Outro fato observado foi que o diâmetro do ponto soldado aumentou com o aumento da corrente de soldagem, o que pode estar associado com a maior resistência mecânica da junta no ensaio de tração, já que com uma maior corrente de soldagem haverá uma maior porção de material fundido na formação do ponto de solda da junta.

Os corpos-de-prova com corrente de soldagem maiores que 5,5 kA apresentaram maior tendência ao rasgamento da chapa no ensaio de tração. Abaixo pode-se ver algumas corpos-de-prova das diferentes correntes de soldagem e sua deformação após o ensaio de tração (Figura 35).

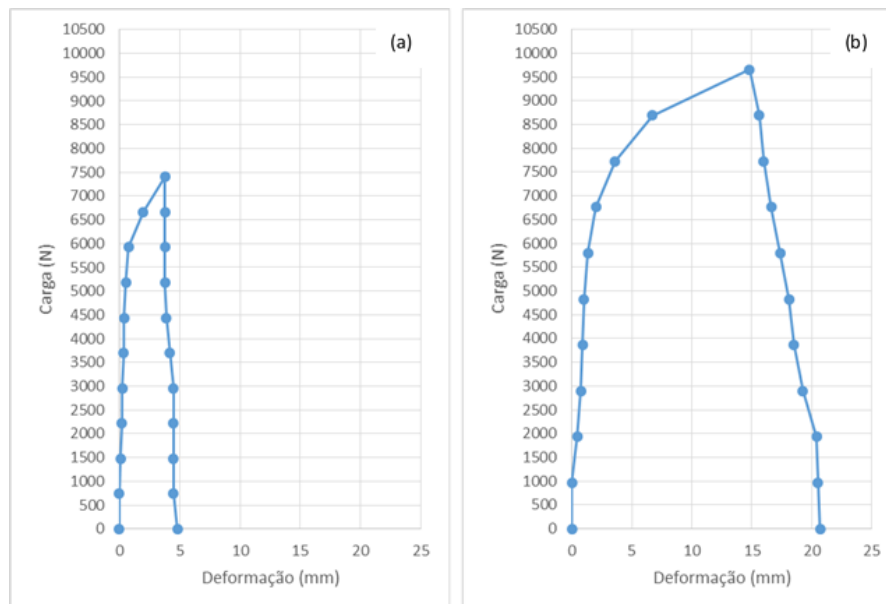
Figura 35 - Corpos-de-prova rompidos após ensaio de tração - corrente de soldagem de 4,5 kA a 7,5 kA (da esquerda para direita)



Fonte: Produzido pelo autor

A Figura 36 apresenta o comparativo de resistência mecânica e deformação corpo-de-prova com corrente de soldagem 5,3 kA CP1 e do corpo-de-prova com corrente de soldagem 6,5 kA CP2, ambos do primeiro procedimento de soldagem.

Figura 36 – Comparativo curva Carga (N) X Deformação (mm): (a) corpo-de-prova com corrente de soldagem 5,3 kA CP1 do primeiro procedimento de ensaios, (b) corpo-de-prova com corrente de soldagem 6,5 kA CP2 do primeiro procedimento de ensaios.



Fonte: Produzido pelo autor

Com a Figura 36 é possível ver que o corpo-de-prova de corrente de soldagem 6,5 kA suportou uma carga maior que o de corrente de soldagem 5,3 kA e teve uma deformação maior. A Figura 37 mostra os dois corpos-de-prova após o ensaio de tração.

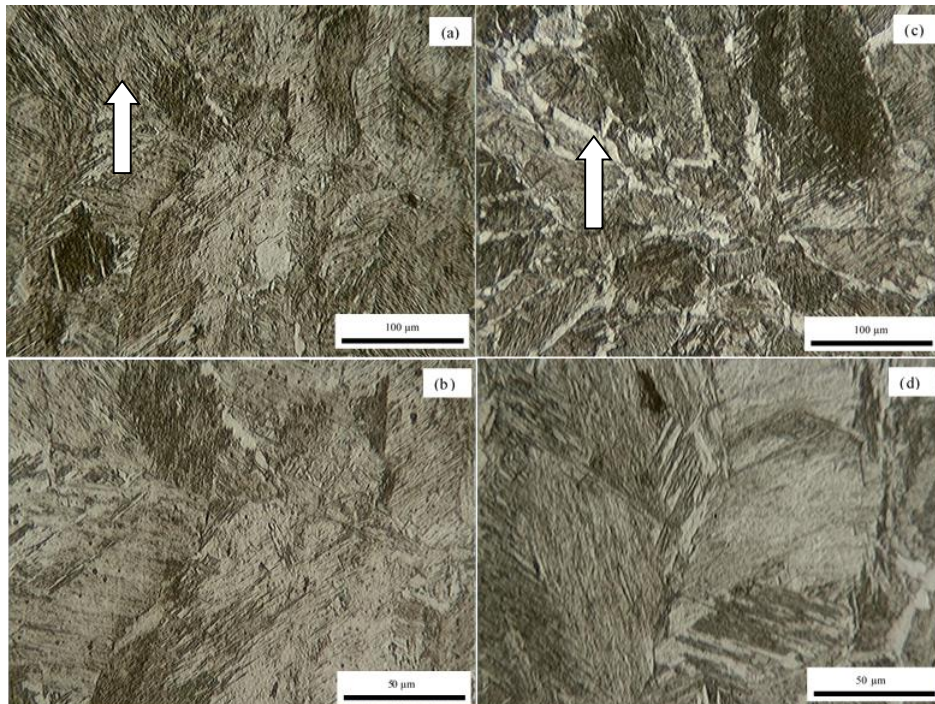
Figura 37 – Comparativo de fratura: (a) Corpo-de-prova com corrente de soldagem 5,3 kA CP1 do primeiro procedimento de ensaios, (b) Corpo-de-prova com corrente de soldagem 6,5 kA CP2 do primeiro procedimento de ensaios.



Fonte: Produzido pelo autor

Com a análise das micrografias podemos ver a diferença na microestrutura dos corpos-de-prova (Figura 38).

Figura 38– Micrografias corpos-de-prova do primeiro procedimento: (a) corrente de soldagem 5,3 kA CP1 aumento de 200X; (b) corrente de soldagem 5,3 kA CP1 aumento de 400X; (c) corrente de soldagem 6,5 kA CP1 aumento de 200X e (d) corrente de soldagem 6,5 kA CP1 aumento de 400X



Fonte: Produzido pelo autor

Na Figura 38 (a) e (b) pode-se verificar maior quantidade de ferrita de segunda fase alinhada, na Figura 38 (c) e (d) verifica-se grande quantidade de ferrita primária de contorno de grão (ou alotriomorfa) e também ferrita de segunda fase alinhada. A ferrita de segunda fase alinhada está indicada na seta na Figura 38 (a) e a ferrita primária de contorno de grão está indicada na seta na Figura 38 (c).

A ferrita de segunda fase possui maior dureza que a ferrita primária de contorno de grão em função de sua reação adifusional.

A presença de ferrita primária de contorno de grão na microestrutura do corpo-de-prova com corrente de soldagem de 6,5 kA lhe confere maior ductilidade e resistência mecânica, fato que pode ser observado no modo de ruptura dos dois materiais (Figura 37).

Analisando os dados do primeiro procedimento de ensaios verificou que o desvio padrão foi grande nos resultados. Para o segundo procedimento foram soldados dez corpos-de-prova em três variações e corrente de soldagem para avaliar a dispersão no processo.

Os dados do ensaio de tração segundo procedimento estão listados na Tabela 7.

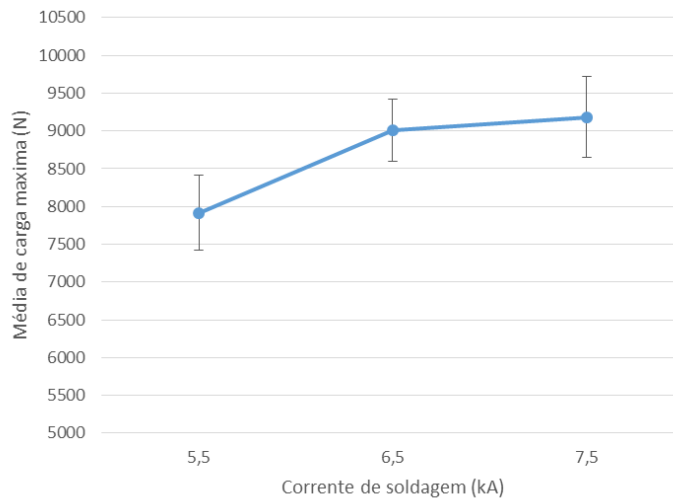
Tabela 7 - Dados obtidos no ensaio dos corpos-de-prova Do segundo procedimento

Corrente (kA)	Carga Máxima - Ensaio de Tração (N)								Média (N)	Desvio Padrão (N)
	1	2	3	4	5	6	7	8		
5,5	7848	7603	7456	7505	8044	8633	8682	7554	7915	497
6,5	9074	9123	8633	9516	8535	8486	9270	9467	9013	413
7,5	9074	8633	9172	8339	9761	9025	9712	9761	9185	535

Fonte: Produzido pelo autor

O gráfico plotados desses dados são apresentados na Figura 39.

Figura 39 - Gráfico média de carga máxima (N) X corrente de soldagem (kA) do ensaio dos corpos-de-prova do segundo procedimento



Fonte: Produzido pelo autor

A tendência de aumento da resistência mecânica com o aumento da corrente de soldagem continuou sendo observada neste segundo procedimento de ensaios. Os corpos-de-prova de 5,5 kA não apresentaram expulsão de material, já os de 6,5 kA e 7,5 kA apresentaram expulsão (centelhamento). Neste procedimento também foi verificada a maior tendência de rasgamento da chapa nas correntes de soldagem mais altas. Percebe-se que não há um indicativo claro na variação da dispersão dos valores de carga máxima em relação à variação dos valores de corrente elétrica. Dentre as corrente de soldagem utilizadas neste procedimento, a de 6,5 kA foi a que apresentou menor dispersão nos valores de carga máxima no ensaio de tração. Este foi o valor escolhido como parâmetro de corrente de soldagem para a execução do terceiro procedimento.

O terceiro procedimento foi dividido em duas partes, a primeira com valor fixo de corrente de soldagem em 6,5 kA e variação da força aplicada nos eletrodos e a segunda como mesmo valor de 6,5 kA de corrente de soldagem e variação do tempo.

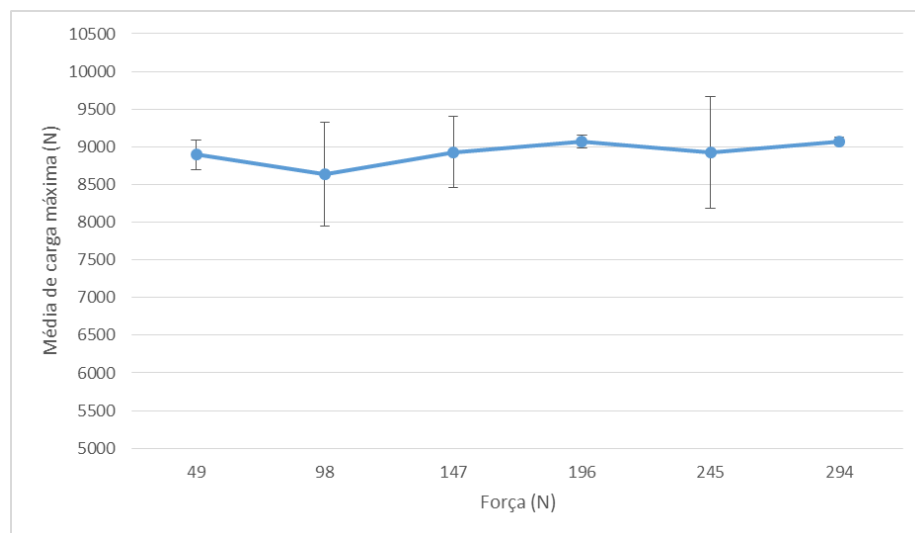
A Tabela 8 apresenta os dados da primeira parte.

Tabela 8 - Dados obtidos no ensaio dos corpos-de-prova do terceiro procedimento – Variação da Força

Parâmetro de força (N)	Carga máxima - Ensaio de Tração (N)			Média (N)	Desvio Padrão (N)
	CP1	CP2	CP3		
49	8927	9074	8682	8894	198
98	9123	8927	7848	8633	687
147	8731	9467	8584	8927	473
196	9123	8976	9123	9074	85
245	9614	9025	8142	8927	741
294	9123	9025	9074	9074	49

Fonte: Produzido pelo autor

A figura 40 apresenta o gráfico plotado para os dados da tabela 7.

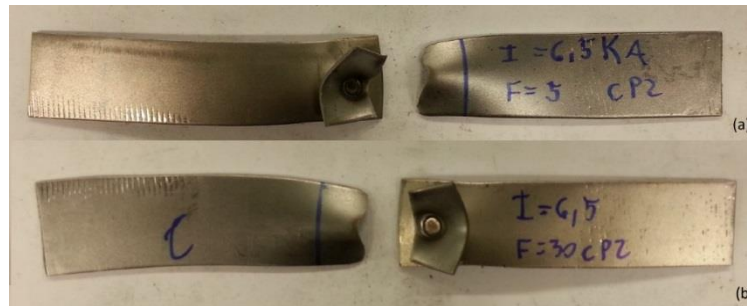
Figura 40–Gráfico média da carga máxima (N) X força aplicada nos eletrodos (N) do ensaio dos corpos-de-prova do terceiro procedimento

Fonte: Produzido pelo autor

Não foi possível verificar uma tendência somente com os dados obtidos neste ensaio, mas pode-se concluir que o parâmetro de força aplicada nos eletrodos tem menor influência na resistência mecânica da junta soldada.

A Figura 41 apresenta o comparativo da ruptura de dois corpos-de-prova do terceiro procedimento com variação da força. Foi utilizado um corpos-de-prova com o parâmetro de força 49 N e um com 294 N, respectivamente a menor e a maior variação.

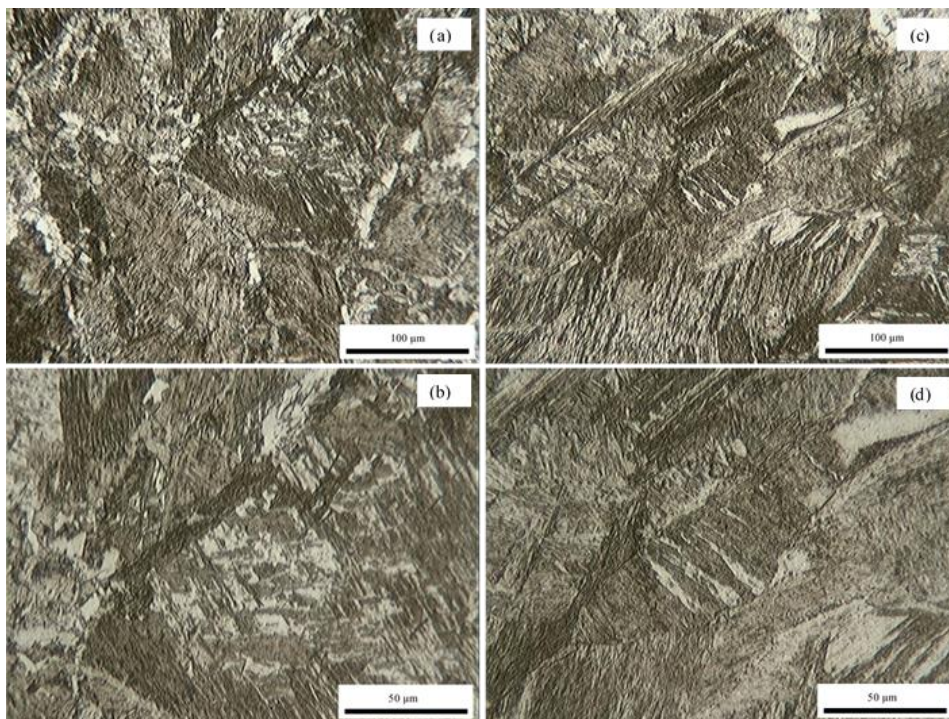
Figura 41 - Comparativo de fratura: (a) Corpo-de-prova F=49 N CP3 do terceiro procedimento de testes, (b) Corpo-de-prova F=294 N CP1 do terceiro procedimento de testes.



Fonte: Produzido pelo autor

Na Figura 42 estão as micrografias dos dois corpos-de-prova acima.

Figura 42 - Micrografias corpos-de-prova do terceiro procedimento: (a) F=49 N CP2 aumento de 200X; (b) F=49 N CP2 aumento de 400X; (c) F=294 N CP2 aumento de 200X e (d) F=294 N CP2 aumento de 400X



Fonte: Produzido pelo autor

Não foram observadas diferenças relevantes entre as microestruturas desses dois corpos-de-prova.

Os dados do ensaio de tração da segunda parte do terceiro procedimento estão listados na Tabela 9.

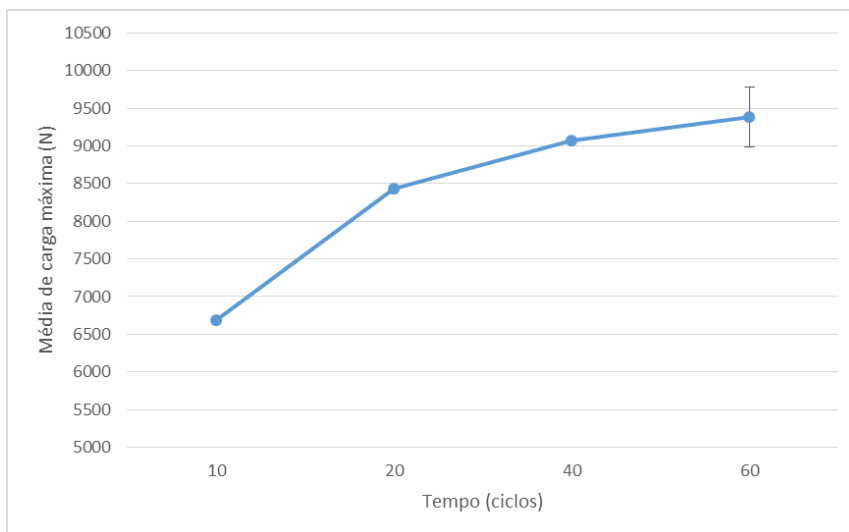
Tabela 9 - Dados obtidos no ensaio dos corpos-de-prova do terceiro procedimento – Variação do tempo

Tempo (Ciclos)	Carga máxima - Ensaio de Tração (N)			Média (N)	Desvio Padrão (N)
	CP1	CP2	CP3		
10	6229	6867	6965	6687	399
20	8339	8142	8829	8437	354
40	9123	8976	9123	9074	85
60	9467	9369	9320	9385	75

Fonte: Produzido pelo autor

A Figura 43 apresenta o gráfico da média de carga máxima da segunda parte do terceiro procedimento.

Figura 43 - Gráfico Média da carga máxima (N) X Tempo (Ciclos) do terceiro procedimento



Fonte: Produzido pelo autor

Verifica-se um aumento das resistências mecânicas acentuado com o aumento do tempo de aplicação da corrente. Esse fato pode ser associado à quantidade de material fundido no processo de soldagem e ao tamanho do ponto de solda gerado no processo de soldagem. A Figura 44 mostra um comparativo do rompimento de dois corpos-de-prova, a primeira com tempo de aplicação de corrente de 10 ciclos e a segunda com tempo de aplicação de corrente de 60 ciclos.

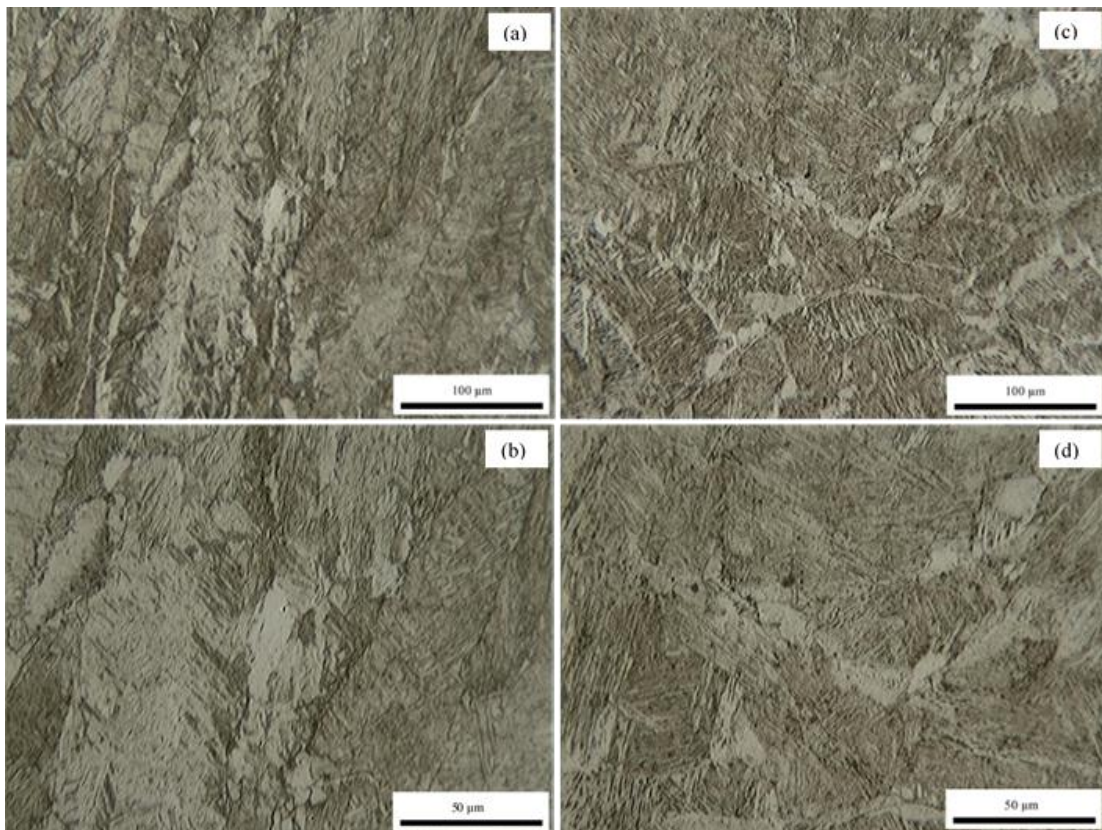
Figura 44 - Comparativo de fratura: (a) Corpo-de-prova T=10 CP3 do terceiro procedimento de testes, (b) Corpo-de-prova T=60 CP1 do terceiro procedimento de testes.



Fonte: Produzido pelo autor

A Figura 45 apresenta as micrografias do dois corpos de prova.

Figura 45 - Micrografias corpos-de-prova do terceiro procedimento: (a) T=10 ciclos CP3 aumento de 200X; (b) T=10 ciclos CP3 aumento de 400X; (c) T=60 ciclos CP3 aumento de 200X e (d) T=60 ciclos CP3 aumento de 400X



Fonte: Produzido pelo autor

Pode-se observar na Figura 44 (c) (d) (corpo-de-prova com tempo de 60 ciclos) maior quantidade de ferrita primária de contorno de grão (ferrita alotriomorfa) na microestrutura do que na Figura 44 (a) e (b) (corpo-de-prova com tempo de 10 ciclos). Isso se deve ao maior tempo de aplicação da corrente de solda no processo de soldagem. Com isso o corpo de prova T=60 ciclos apresenta maior ductibilidade e resistência mecânica, que pode ser comprovado com os dados de ensaio de tração para os dois valores de tempo aplicados (Figura 42) e com a forma de ruptura observada nos corpos de prova (Figura 43).

6 CONCLUSÃO

Baseando-se nos reestudados obtidos e em suas análises foram estabelecidas as seguintes conclusões:

- Há aumento da resistência mecânica da junta soldada com o aumento da corrente de soldagem.
- A expulsão de material (centelhamento) no processo não afeta negativamente na resistência das juntas soldadas, este pode ser considerado um problema operacional, pelo maior desgaste de eletrodos e um problema de segurança para o operador do equipamento e de risco de incêndios.
- O diâmetro do ponto soldado aumenta com o aumento da corrente de soldagem.
- A força é o parâmetro que menos influi na resistência mecânica das juntas soldadas.
- Os parâmetros que apresentaram a melhor média de carga máxima no ensaio de tração e o menor desvio padrão neste trabalho foi o de corrente de soldagem 6,5 kA, a força de 196 N e o tempo de aplicação de corrente de 60 ciclos.
- Há um aumento acentuado da resistência mecânica das juntas com o aumento da corrente de soldagem, só que isso implica em uma zona termicamente afetada maior no material.
- Conforme já esperado pela teoria a corrente de soldagem e o tempo são os parâmetros mais importantes na geração de calor do processo de soldagem por pontos, sendo a corrente o parâmetro que mais influi na resistência da junta soldada.
- A ferrita primária de contorno de grão e a ferrita de segunda fase alinhada são microestruturas comuns formadas na zona fundida de juntas soldadas por pontos.
- O aumento da quantidade ferrita primária de contorno de grão na microestrutura da zona fundida da junta soldada é o responsável pelo aumento da ductilidade e da resistência mecânicas da mesma.

REFERÊNCIAS

BRANCO, H. L. O. (2004). **Avaliação de capas de eletrodos utilizadas na soldagem por resistência de chapas galvanizadas automotivas**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2004. 113p.

FIAT AUTOMÓVEIS. **Saldature a resistenza: Punte di elettrodi con attacco femmina 1:10**. Turim, 2007. (62972/30).

FONSECA, EDUARDO OTÁVIO DA. **Monitoração da resistência dinâmica na soldagem a ponto por resistência elétrica e avaliação da sua relação com a resistência mecânica do ponto de solda**. 1999. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.

MARQUES, PAULO VILLANI. MODENESI, PAULO JOSÉ. BRACARENSE, ALEIXANDRE QUEIROZ. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. 363p.

NASCIMENTO, VINÍCIUS CASTANHAIRA DO. **Seleção de parâmetros de soldagem a ponto por resistência, baseado na medição da resistência elétrica entre chapas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2008. 130f.

QUITES, ALMIR. Definição de soldagem. **Soldasoft**, Ribeirão da ilha, 2011. Disponível em:

<<http://www.soldasoft.com.br/portal/generalidades/Definicao%20de%20soldagem.pdf>>.

Acesso em: 09 abr. 2013.

RUIZ, DOUGLAS CRIADO. **Contribuição ao desenvolvimento de processos de montagem e soldagem de carrocerias automotivas**. 2005. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

RWMA. **Resistance Welding Manual**. 4. ed. E.U.A., 1989. 443 p.

VARGAS, JOSÉ ENRIQUE. **Estudo da Formação, Geometria e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistências: Uma Abordagem Estatística**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006. 143p.

WAINER, EMILIO. BRANDI, SÉRGIO DUARTE. MELLO, FÁBIO DÉCOURT
HOMEM DE. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. 1 ed. São Paulo: Editora Bluncher,
1992. 494p.