



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DAS POTENCIALIDADES DO DISPOSITIVO
AUTOMÁTICO RECÉM-DESENVOLVIDO PARA O ENSAIO
DE TORÇÃO DE SOLDA A PONTO**

THALES LUCAS DINIZ DE AVILA

Belo Horizonte, 28 de abril de 2017

Thales Lucas Diniz de Avila

**AVALIAÇÃO DAS POTENCIALIDADES DO DISPOSITIVO
AUTOMÁTICO RECÉM-DESENVOLVIDO PARA O ENSAIO
DE TORÇÃO DE SOLDA A PONTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Processos de Fabricação.

Orientador: PhD Alexandre Queiroz Bracarense.

Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2017

A958a Avila, Thales Lucas Diniz de.
Avaliação das potencialidades do dispositivo automático recém-
desenvolvido para o ensaio de torção de solda a ponto [manuscrito] /
Thales Lucas Diniz de Avila. – 2017.
113 f., enc.: il.

Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas
Gerais,
Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 108-113.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Soldagem - Teses. 3.
Torção - Teses. 4. Localização de falhas (Engenharia) - Teses. I.
Bracarense, Alexandre Queiroz, 1959-. II. Universidade Federal de Minas
Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



Universidade Federal de Minas Gerais

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha – 31.270-901 – Belo Horizonte – MG

Tel.: +55 31 3499-5145 – Fax: +55 31 3443-3783

www.demec.ufmg.br – E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

AVALIAÇÃO DAS POTENCIALIDADES DO DISPOSITIVO AUTOMÁTICO RECÉM-DESENVOLVIDO PARA O ENSAIO DE TORÇÃO DE SOLDA A PONTO

THALES LUCAS DINIZ DE AVILA

Dissertação defendida e aprovada em 28 de abril de 2017, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de “**Mestre em Engenharia Mecânica**”, na área de concentração de “**Processos de Fabricação**”.

Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense – UFMG – Orientador

Prof. Dra. Ivanilza Felizardo – CEFET- MG - Examinadora

Prof. Dr. Cláudio Turani Vaz – CEFET - MG - Examinador

Dedicado a minha esposa e ao mais novo integrante da família, que esta a caminho e, mesmo sem ainda ter vindo ao mundo, deu mais sentido a todo o esforço.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me propiciar condições e forças para chegar até este momento.

Aos meus pais, Pierre de Avila e Nicélia Barreto Diniz de Avila, por me incentivar desde criança a contribuir para o conhecimento e desenvolver uma carreira na pesquisa, além de incentivar e apoiar as minhas decisões. Ao meu irmão Thomaz Lucas Diniz de Ávila por contribuir diretamente para realização do trabalho, solucionando dúvidas e questionamentos. A toda minha família pelo apoio e incentivo.

A minha esposa Maria Carolina Andrade Sousa de Avila e sua família pelo amor, carinho, compreensão, fortalecimento e apoio, contribuindo de forma determinante para esta conquista.

Ao meu orientador Professor Alexandre Queiroz Bracarense, PhD, pela confiança, auxílio, e tempo despendido no desenvolvimento do projeto, sobretudo atenção no entendimento de cada particularidade apresentada.

Aos amigos do LRSS pelas conversas, descontrações, soluções de problemas e momentos juntos.

Aos amigos da FIAT, que sempre com boa vontade estão solícitos a tirar dúvidas e contribuir de alguma forma.

À Universidade Federal de Minas Gerais e à Faculdade de Engenharia pela oportunidade de realizar este curso. Em especial aos professores e funcionários do curso de Pós-Graduação, sempre prestativos para oferecer ajuda.

A todos que sempre estão presentes e contribuíram para a conclusão deste trabalho,
meus agradecimentos.

SUMÁRIO

NOMENCLATURA.....	9
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS E QUADROS.....	14
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	15
RESUMO	16
1. INTRODUÇÃO.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1. Soldagem por resistência elétrica (Resistance Welding).....	20
2.1.1. Fenômeno da soldagem	21
2.1.2. Soldagem por resistência elétrica por pontos	21
2.2. Processo de soldagem.....	24
2.2.1. Parâmetros de soldagem	24
2.2.1.1. Ciclo de soldagem	25
2.2.1.1.1. Tempo de compressão	25
2.2.1.1.2. Tempo de soldagem.....	26
2.2.1.1.3. Tempo de resfriamento.....	27
2.2.1.1.4. Tempo de pausa.....	27
2.2.1.1.5. Recursos adicionais	27
2.2.1.2. Corrente de soldagem	29
2.2.1.3. Pressão de soldagem.....	30
2.2.2. Máquina.....	31
2.2.2.1. Transformador	32
2.2.2.2. Controladores de soldagem	32
2.2.2.3. Sistema de refrigeração	32
2.2.2.4. Pinça de soldagem	33
2.2.2.5. Aplicação do ponto.....	34
2.2.3. Eletrodos.....	35
2.3. Metalurgia do ponto de solda	37
2.4. Controle de qualidade.....	39
2.4.1. Inspeção visual	39

2.4.2. Ensaio de arrancamento.....	41
2.4.3. Ultrassom.....	42
2.4.4. Características geométricas	46
2.5. Dimensionamento.....	48
2.5.1. Esforços solicitantes	49
2.5.2. Ensaios mecânicos.....	50
2.5.2.1. Ensaio de cisalhamento	50
2.5.2.2. Ensaio de tração.....	52
2.5.2.3. Ensaio de impacto.....	54
2.5.2.4. Ensaio de fadiga.....	54
2.5.2.5. Ensaio com cargas combinadas	55
2.5.2.6. Ensaio de torção.....	56
2.5.2.6.1. Dispositivo de torção automatizado	59
3. METODOLOGIA.....	62
3.1. Instrumentação do dispositivo	63
3.2. Seleção dos parâmetros	66
3.2.1. Material.....	66
3.2.2. Máquina.....	67
3.2.3. Parâmetros	70
3.2.4. Ensaio de ultrassom.....	71
3.2.5. Ensaio metalográfico	72
3.2.5. Ensaio de arrancamento.....	73
3.3. Ensaio de torção.....	74
3.3.1. Procedimento do ensaio de torção	75
3.3.1. Corpos de prova do ensaio de torção.....	75
3.4. Modo de falha do ensaio de torção	77
3.4.1. Testes de sensibilidade da curva de torção	79
3.4.2. Teste de propagação da trinca	79
3.4.3. Modo de falha em função das variáveis do processo	80
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	83
4.1. Instrumentação do dispositivo	83
4.1.1. Análise da repetibilidade das medições e do ensaio.....	83
4.2. Parâmetros de soldagem	85
4.3. Ensaio de torção.....	88

4.2.1. Influência do tempo de soldagem na curva característica do ensaio de torção	89
4.2.2. Influência da corrente de soldagem na curva característica do ensaio de torção	92
4.4. Ângulo de parada do ensaio de torção.....	94
4.3.1. Comportamento do equipamento com a variação de ângulos	95
4.3.2. Comportamento do equipamento e análise metalográfica com a variação de ângulos ..	95
4.4. Modo de falha.....	98
5. CONCLUSÕES	105
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	106
ABSTRACT	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

NOMENCLATURA

Letras Latinas

Q	Calor gerado [J]
R	Resistência Elétrica [Ω]
I	Corrente elétrica [A]
t	Tempo [s]
F	Força [N]
d	Diâmetro do ponto [mm]
Rc	Resistência de contato [Ω]
h	Largura da ZTA
HB	Dureza Brinell [HB]
t	Espessura da chapa [mm]
V	Tensão [V]
Pu	Potência útil [W]
U	Tensão de alimentação [V]
In	Corrente nominal [A]
N	Velocidade [RPM]
BD	Queda de Tensão nas Escovas

Letras Gregas

σ_y	Limite de Resistência do Material [Mpa]
ρ	Resistividade do material a 0°C [Ωm]
ρ_0	Resistividade do material a temperatura ambiente [Ωm]
α	Constante do material [coeficiente de temperatura °C ⁻¹]

θ	Temperatura de trabalho [°C]
θ_0	Temperatura ambiente [°C]
η	Rendimento do motor
Φ	Fluxo Magnético [Tm ²]

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Principais Métodos de Soldagem por Resistência Elétrica – (a) Soldagem por Pontos, (b) Soldagem por Projeção, (c) Soldagem por Costura	20
FIGURA 2.2 – Resistências do Processo de Soldagem por Resistência Elétrica a Ponto	22
FIGURA 2.3 – Principais Estágios da Resistência Dinâmica Durante a Formação do Ponto de Solda.....	24
FIGURA 2.4 – Representação de um ciclo de soldagem	25
FIGURA 2.5 – Influência do Tempo de Soldagem no Diâmetro do Ponto.....	26
FIGURA 2.6 – Tempos de Soldagem.....	28
FIGURA 2.7 – Curva de Soldabilidade.....	29
FIGURA 2.8 – Efeito da Corrente de Soldagem sobre o Tamanho do Ponto	30
FIGURA 2.9 – Relação entre a Força Aplicada Nos Eletrodos e a Resistência de Contato	31
FIGURA 2.10 – Sistema de Refrigeração do Processo de Soldagem	33
FIGURA 2.12 – Distribuição de Pressão na chapa com eletrodos alinhados e desalinhados	35
FIGURA 2.13 – Macrografia do ponto "A" sem escorregamento e "B" com escorregamento.....	35
FIGURA 2.14 – Dureza do Eletrodo <i>versus</i> Temperatura do Eletrodo.....	36
FIGURA 2.15 – Tipos de Geometria de Eletrodo	37
FIGURA 2.16 – Solidificação do Ponto de Solda – a)Solidificação Ideal, b) Alta Taxa de Resfriamento na Direção do Eletrodo, c) Alta Taxa de Resfriamento na Direção das Chapas.....	38
FIGURA 2.17 – Expulsão de material na solda a ponto	39
FIGURA 2.18 – Influência da Expulsão de Material nas Características do Ponto de Solda	40
FIGURA 2.19 – Tipo de Teste de Arrancamento.....	42
FIGURA 2.20 – Ultrassom de uma solda satisfatória	43
FIGURA 2.21 – Ultrassom ponto solto	44
FIGURA 2.22 – Ultrassom ponto pequeno	44
FIGURA 2.23 – Ultrassom de um ponto com defeito interno	45
FIGURA 2.24 – Ponto colado e ponto queimado.....	45
FIGURA 2.25 – Imagem do Ensaio Com o Ultrassom Multiponto	46
FIGURA 2.26 – Características Geométricas do Ponto de Solda	47
FIGURA 2.27 – Efeito de cada parâmetro geométrico no limite de resistência da solda	48
FIGURA 2.28 – Principais Esforços em um Ponto de Solda	49

FIGURA 2.29 – Teste por Tensão Cisalhante	50
FIGURA 2.30 – Curva Característica do Ensaio de Cisalhamento	51
FIGURA 2.31 – Tipos de Falha no Ensaio de Cisalhamento – (a) Ruptura do Metal de Base, (b) Ruptura na ZTA, (c) Ruptura do Ponto com Arrancamento, (d) Ruptura do Ponto Rasgando a Chapa, (e) Ruptura do Ponto na Interface	52
FIGURA 2.32 – Corpo de prova utilizado no teste de tração axial	53
FIGURA 2.33 – Curva característica do teste de tração axial	53
FIGURA 2.34 – Gráfico comparativo entre tensão de cisalhamento e tensão de tração	55
FIGURA 2.35 – Metalografia de um Ponto de Solda que Sofreu Tração Pura.....	56
FIGURA 2.36 – Curva característica do ensaio de torção	57
FIGURA 2.37 – Propagação da Trinca no Ensaio de Torção	57
FIGURA 2.38 – Resultados Encontrados para Ensaios Mecânicos em Chapas de Aço com Baixo Teor de Carbono com 1 mm de Espessura: a) Torque Máximo, b) Carga Máxima de Tração.	58
FIGURA 2.39 – Corpo de prova para ensaio de torção.....	59
FIGURA 2.40 – Dispositivo para Ensaio de Tração	60
FIGURA 2.41 – Curva Característica do Motor com Excitação em Série	60
FIGURA 3.1 – Etapas Desenvolvidas no Trabalho.....	62
FIGURA 3.2 – Equipamento de Aquisição de Dados Utilizado	64
FIGURA 3.3 – Gráfico gerado pelo programa SAP V4TI.....	64
FIGURA 3.4 – Exemplo de Curva do Ensaio de Torção Instrumentado	65
FIGURA 3.5 – Dimensões do corpo de prova.....	67
FIGURA 3.6 – Pinça de solda Fase X/4-200	68
FIGURA 3.7 – Esquemático do Terminal de Programação Utilizado	69
FIGURA 3.8 – Tipos de eletrodo utilizados.....	69
FIGURA 3.9 – Equipamento de Ultrassom.....	72
FIGURA 3.10 – Esquema de corte para realização dos ensaios metalográficos.....	73
FIGURA 3.11 – Microscópios utilizados	73
FIGURA 3.12 – Ensaio de Arrancamento por Talhadeira	74
FIGURA 3.13 – Equipamento de Torção de Solda a Ponto	74
FIGURA 3.14 – Funcionamento do dispositivo.....	75
FIGURA 3.15 – Ângulos de Torção do Corpo de Prova.....	78
FIGURA 3.16 – Corte para Realização da Metalografia.....	80

FIGURA 3.17 – 1) Eletrodo “A” em Contato com a Chapa Mais Fina. 2) Eletrodo “A” em Contato com a Chapa Mais Fina.	81
FIGURA 4.1 – Curva Característica do Ensaio de Torção.....	83
FIGURA 4.2 – Gráfico do Ensaio de Torção Realizado sem Corpo de Prova.....	84
FIGURA 4.3 – Gráfico do Ensaio de Torção dos Parâmetros 1.1 e 3.5.....	85
FIGURA 4.4 – Resultado do Ensaio de Ultrassom	86
FIGURA 4.5 – Gráfico de Evolução do Diâmetro do Ponto de Solda.....	88
FIGURA 4.6 – Gráfico do Ensaio de Torção dos Corpos de Prova Soldados com 4,25kA	89
FIGURA 4.7 – Gráfico do Ensaio de Torção dos Corpos de Prova Soldados com 5,0kA	90
FIGURA 4.8 – Gráfico do Ensaio de Torção dos Corpos de Prova Soldados com 5,75kA	91
FIGURA 4.9 – Gráfico do Ensaio de Torção dos Corpos de Prova Soldados com 10 ciclos	93
FIGURA 4.10 – Gráfico do Ensaio de Torção dos Corpos de Prova Soldados com 30 ciclos	93
FIGURA 4.11 – Gráfico do Ensaio de Torção dos Corpos de Prova Soldados com 50 ciclos	93
FIGURA 4.12 – Gráfico do Ensaio de Torção dos Corpos de Prova Soldados com 70 ciclos	94
FIGURA 4.13 – Gráfico do Ensaio de Torção dos Corpos de Prova Soldados com 90 ciclos	94
FIGURA 4.14 – Gráfico do Primeiro Ensaio de Torção com Variação do Ângulo de Parada	95
FIGURA 4.15 – Gráfico do Segundo Ensaio de Torção com Variação do Ângulo de Parada	96
FIGURA 4.16 – Macrografia com 5X de Aumento do Corpo de Prova Torcido até 90°	97
FIGURA 4.17 – Macrografia com 5X de Aumento do Corpo de Prova Torcido até 40°	97
FIGURA 4.18 – Gráfico do Ensaio de Torção dos Corpos de Prova A1, A2, B1 e B2.....	102

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Prováveis causas de defeito de soldagem a ponto	41
TABELA 3.1 – Dados Técnicos do Equipamento de Aquisição	63
TABELA 3.2 – Composição Química do Material Utilizado	67
TABELA 3.3 – Parâmetros Utilizados	70
TABELA 3.4 – Parâmetros Utilizados	76
TABELA 3.5 – Parâmetros Utilizados	77
TABELA 3.6 – Parâmetros Utilizados	79
TABELA 3.7 – Parâmetros Utilizados	80
TABELA 3.8 – Parâmetros Utilizados	82
TABELA 4.1 – Resultado dos Testes de Validação dos Parâmetros de Soldagem	87
TABELA 4.2 – Macrografias com 5X de Aumento dos Corpos de Prova M1	99
TABELA 4.3 – Macrografias com 5X de Aumento dos Corpos de Prova B1	100
TABELA 4.4 – Macrografias com 5X de Aumento dos Corpos de Prova C2.....	101
TABELA 4.5 – Metalografia dos Corpos de Prova Torcidos a 20°	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANSI	American National Standards Institute
AWS	American Welding Society
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CC	Corrente Contínua
FIAT	Fábrica Italiana de Automóveis de Turim
HHT	Hand Held Terminal
HSLA	High Strength Low Alloy
ISO	International Organization for Standardization
LRSS	Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação
MBN	Mercedes Benz Technische Norm
RWMA	Resistance Welder Manufacturers Association
SAE	Society of Automotive Engineers
SCR	<i>Silicon Controlled Rectifier</i>
TP	Terminal de Programação
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
ZTA	Zona Termicamente Afetada
MB	Metal de Base
MF	Metal Fundido

RESUMO

A segurança de um veículo inicia com a concepção e projeto da carroceria, que são resultado da união de chapas por juntas soldadas principalmente através do processo de soldagem por resistência elétrica a ponto (*Resistance Spot Welding*). Quando em trabalho normal ou em situações atípicas como colisões e terrenos acidentados, os pontos de solda da estrutura do veículo sofrem esforços de tração, cisalhamento e torção. Analisando o ponto de solda individualmente, ele possui menor resistência ao esforço de torção. A correta caracterização da robustez da junta soldada é de extrema importância para garantia da segurança do veículo, por isso alguns testes são realizados nas linhas de produção. O teste de arrancamento é mais difundido, porém não caracteriza o ponto de solda, pois não identifica defeitos internos. O ultrassom é utilizado, porém é por amostragem e apenas nos principais pontos de solda do veículo. Por isso, é de fundamental importância o domínio da reação aos esforços para o correto dimensionamento do ponto. Para o esforço de torção e cisalhamento são utilizados ensaios difundidos e normatizados, com modo de falha conhecido e relação entre parâmetros e esforços bem conhecidos. Para o ensaio de torção, poucos equipamentos ou tipos de ensaio são conhecidos e utilizados. Recentemente foi proposto um equipamento automatizado de torção de solda a ponto, compacto e de simples manuseio, capaz realizar ensaios de forma rápida e com baixo custo. Portanto, o objetivo deste trabalho é avaliar as potencialidades desse dispositivo analisando seu desempenho para um ensaio de torção para um e dois pontos de solda e o modo de falha resultante. Foi realizada a instrumentação do dispositivo, a definição de parâmetros de solda a serem ensaiados e realizados ensaios com chapas soldadas com um e dois pontos em diferentes espessuras. Os resultados mostraram uma curva característica do ensaio. Além da definição do melhor eletrodo para se utilizar para diferentes espessuras de chapa quando solicitados a esforço de torção, também foi possível identificar dois modos de falha característicos o rompimento na ZTA e na interface da solda.

Palavras-chave: Soldagem por pontos, Resistência a Torção, Modo de Falha.

1. INTRODUÇÃO

James Joule, em 1856, executou o que seria a primeira soldagem por resistência elétrica, quando uniu um determinado volume de arames de cobre. Posteriormente, o professor Elihu Thomson, do Instituto Franklin, desenvolveu e patenteou em 1886, o primeiro transformador de soldagem por resistência (DAMASCO, 1994).

Desde então, a soldagem por resistência elétrica é utilizada como um mecanismo de união, no qual as peças são ligadas entre si pela fusão localizada do material devido ao aquecimento promovido pela passagem de corrente (Efeito Joule) sob pressão dos eletrodos. Os métodos de soldagem que utilizam este mecanismo são: soldagem por pontos, soldagem por projeção, soldagem por costura, soldagem topo a topo e soldagem por resistência por alta frequência (AWS, 1983).

O processo de soldagem por resistência elétrica por pontos (Resistance Spot Welding) é utilizado em diversas áreas da indústria e em grande escala na indústria automotiva, devido à alta produtividade, pouca necessidade de experiência do operador, baixo custo operacional e facilidade de automatização, sendo o primeiro processo de soldagem que foi robotizado. As dificuldades que o processo apresenta são: dificuldade da otimização dos parâmetros de soldagem para obter propriedades mecânicas desejadas, alto custo do investimento em equipamentos e grande demanda da rede elétrica pelos altos valores de corrente utilizados no processo.

Por possuir uma difícil otimização dos parâmetros, a definição de valores que garantam propriedades desejadas a um ponto de solda é de extrema importância. Nos veículos modernos existem entre 2000 e 5000 pontos de solda sendo que de 20% a 30% destes pontos possuem uma incerteza em relação às suas propriedades. Para aumentar a confiabilidade do processo é demandado um custo para “extra solda”, custo esse que não seria necessário se fosse dominada a influência de cada parâmetro sobre cada propriedade mecânica. (POURANVARI, 2011).

Devido a essa incerteza sobre o ponto de solda é importante a avaliação criteriosa para garantir a segurança do veículo. Para verificar se os pontos de solda atendem às características de segurança, um ponto de solda deve sofrer ensaios, podendo ser destrutivo ou não destrutivo, sendo os mais comuns os ensaios de arrancamento por talhadeira e o ultrassom.

Na indústria, o teste de arrancamento é o ensaio mais difundido. O ensaio consiste no posicionamento de uma talhadeira entre as chapas soldadas e com o auxílio de um martelo é exercido uma carga com o objetivo de romper o ponto de solda. Caso ocorra o destacamento da lente de solda, é então medido o diâmetro do ponto em duas direções perpendiculares. Segundo Stocco (2003), estudos comprovam que o teste de arrancamento é impreciso uma vez que mascara uma grande quantidade de informações sobre o ponto como: espessura da união e defeitos internos na lente de solda.

O outro método, o ensaio por ultrassom, vem sendo cada vez mais utilizado, por ser um ensaio não destrutivo e por conseguir agregar confiabilidade ao processo, gerando relatórios e rastreabilidade. Esse ensaio precisa de um maior investimento em equipamentos, se comparado ao arrancamento, além de que, devido à velocidade de produção, é geralmente realizado por amostragem e apenas nos pontos de solda críticos da carroceria. O ultrassom também não é capaz de caracterizar diretamente quanto às propriedades mecânicas, apenas quanto a falha e defeitos da solda, que refletem no comportamento mecânico.

Para o conhecimento das propriedades mecânicas de um ponto de solda é necessário saber quais esforços um ponto esta sujeito sendo os principais: tração, torção e cisalhamento e a combinação entre eles dependendo da região da carroceria. O esforço de tração está predominantemente presente em uma colisão frontal, na qual ocorre a deformação da longarina. Já no uso diário do veículo, a deformação da carroceria ocorre devido às variações no piso e os esforços predominantes são: cisalhamento e torção.

A caracterização do esforço de cisalhamento é feita pelo ensaio de cisalhamento, que é um ensaio destrutivo e apresenta frequentes falhas devido à rotação do corpo de prova durante o ensaio. Já o esforço de tração é avaliado com o ensaio de arrancamento que possui elevado custo, pois utiliza o mesmo equipamento do cisalhamento, porém com um mecanismo próprio. Ambos os ensaios são conhecidos e difundidos sendo estudados por diferentes autores como, por exemplo: Poranvari (2011), Ruiz (2005), e Lin (2003).

Especificamente para o esforço de torção existem estudos, porém utilizando diferentes mecanismos. Segundo a ISO (2012), o ensaio de torção pode ser instrumentado ou não instrumentado (ISO, 2012). No ensaio não instrumentado, o corpo de prova é levado a um dispositivo adequado para sofrer torção. Após a ruptura, a lente fica aderida em uma das chapas cujo diâmetro é medido com o paquímetro. O ensaio de torção instrumentado utiliza um torquímetro adaptado a um dispositivo para verificação da resistência da solda a esse esforço, geralmente não automático.

Recentemente, Cota (2015) desenvolveu um equipamento de torção automatizado e compacto, capaz de ensaiar corpos de prova com uma preparação simples e um ensaio rápido. Possuindo potencial de realizar ensaios de torção com esforço simples e com cargas combinadas (cisalhamento e torção) além de possibilitar agilidade na análise do ponto de solda com distintas variáveis.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é buscar tecnologias que propiciem a aquisição de informação de cada momento do ensaio de torção, avaliando as potencialidades e parametrizando o dispositivo automático de ensaio de torção desenvolvido por Cota, (2015). A tecnologia selecionada deve ser capaz de monitorar cada instante do ensaio relacionando os dados adquiridos com o comportamento do corpo de prova, além de possuir repetibilidade e confiabilidade. Sendo possível identificar, por exemplo: a propagação da trinca, o momento da ruptura e a relação da resistência a torção com os parâmetros de soldagem. Os resultados serão comparados com o ensaio de ultrassom e análise metalográfica, avaliando para ambos: a indentação, o diâmetro da lente, a penetração, a presença de trincas e os modos de fratura, reforçando ou contestando os resultados alcançados. Será ainda diversificada a técnica de realização do ensaio, sendo feito testes variando o ângulo de parada do ensaio, testes com corpos de prova soldados com dois pontos, variando as espessuras das chapas e outros com diferentes parâmetros de soldagem. Buscando avaliar a influência de cada variável sobre o resultado final da resistência do ponto tendo como base o ensaio recém-desenvolvido.

Como objetivos específicos, buscou-se neste trabalho:

- Traçar curvas da tensão de alimentação do motor de acionamento do dispositivo em função do tempo do ensaio possibilitando definir uma curva característica do ensaio de torção automatizado e instrumentado.
- Avaliar os modos de falha característicos para o ensaio de torção automatizado e instrumentado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Soldagem por resistência elétrica (Resistance Welding)

A soldagem por resistência elétrica se divide em soldagem por pontos, por projeção, por costura, topo a topo e por resistência por alta frequência (FIG 2.1). A soldagem por resistência elétrica por pontos (*Resistance Spot Welding*) é utilizada principalmente para união de chapas sobrepostas. A soldagem por costura (*Resistance Seam Welding*) é largamente usada na soldagem de tanques de combustíveis e a soldagem por projeção (*Resistance Projection Welding*) muito utilizada na união de componente de fixação de chapas. O processo consiste na passagem de corrente elétrica entre dois eletrodos (não consumíveis) que comprimem peças distintas. Conseqüentemente, devido à maior resistência apresentada pelas interfaces em contato, pode ocorrer fusão nesse local, formando a soldagem (MACHADO, 1996).

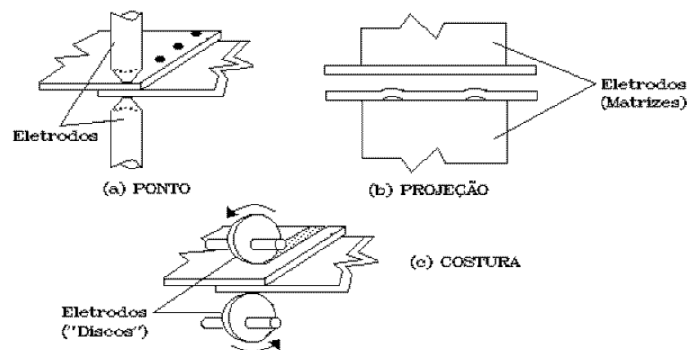


FIGURA 2.1 – Principais Métodos de Soldagem por Resistência Elétrica – (a) Soldagem por Pontos, (b) Soldagem por Projeção, (c) Soldagem por Costura

FONTE: MACHADO, 1996.

Segundo Marques (2009), a soldagem por resistência elétrica consiste na obtenção de juntas soldadas por meio da geração de calor por efeito Joule, devido ao fluxo de corrente e da aplicação de pressão localizada. O processo se diferencia de outros por não necessitar de material de adição, do uso de fluxo ou gases de proteção, sendo sua utilização difundida devido à alta produtividade e facilidade de automatização.

2.1.1. Fenômeno da soldagem

No processo de soldagem por resistência elétrica a união das peças metálicas é produzida em superfícies sobrepostas ou em contato topo a topo, pelo calor gerado na junta através de resistência à passagem de corrente elétrica e pela aplicação de pressão, podendo ocorrer certa quantidade de fusão na interface. O calor gerado pela passagem da corrente elétrica na junta pode ser estimado segundo a EQUAÇÃO 2.1 (ASLANLAR, 2006; BRANCO, 2004; FONSECA, 1999; MARQUES, 2009):

$$Q = I^2 R t \quad (2.1)$$

Onde Q é o calor gerado [J], I é a intensidade da corrente elétrica [A], R é a resistência elétrica [Ω] e t é o tempo de passagem de corrente [s].

Damasco (1994) atenta para existência de uma resistência real de contato onde ocorre o micro contato. Conclui-se que nem toda a superfície de contato esta realmente tocando a superfície adjacente e, dessa forma, a resistência elétrica na interface é dependente da rugosidade e do acabamento superficial, da resistência mecânica, da temperatura do material, além da força aplicada.

2.1.2. Soldagem por resistência elétrica por pontos

Processo de união de chapas sobrepostas por um ou mais pontos gerados pelo calor decorrente da resistência ao fluxo de corrente elétrica entre as peças que são mantidas unidas devido à força aplicada pelos eletrodos.

O processo atinge altos níveis de corrente, fornecido por um transformador monofásico, provocando um desbalanceamento na rede de distribuição elétrica sendo essa a principal desvantagem do processo. A soldagem por pontos é usada na fabricação de peças e conjuntos, a partir de chapas metálicas finas, com espessura média 3mm, podendo ser usado para peças de aço com até 6mm (MARQUES, 2009).

Segundo Stocco (2003), o processo de soldagem por pontos é usado como substituto à fixação mecânica (rebites e parafusos) e quando a desmontagem da união não é exigida. Tendo como principais vantagens segundo Fonseca (1999) e Vargas (2006): Facilidade de automação, fácil operação, sem necessidade de acabamento final e baixo custo de manutenção e por esses motivos é o principal processo utilizado para união de chapas na

fabricação de automóveis. Segundo Pouranvari (2011) um veículo possui de 2000 a 5000 pontos de solda.

No processo de soldagem a ponto a interface pode ser observada em 7 posições diferentes como apresentado na FIG. 2.2, comportando como 7 resistências em série resultando em uma resistência total.

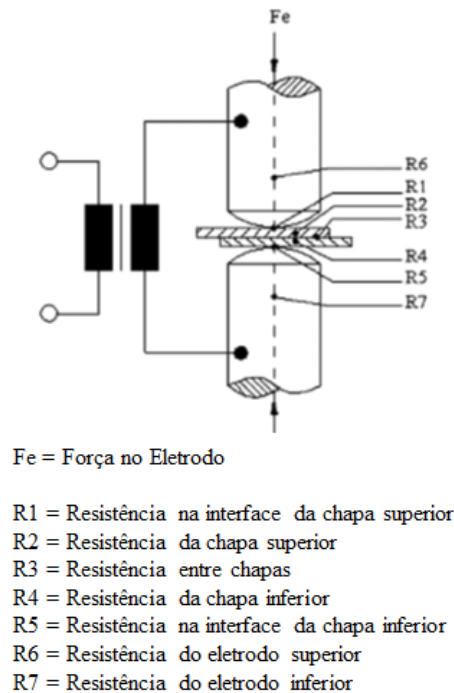


FIGURA 2.2 – Resistências do Processo de Soldagem por Resistência Elétrica a Ponto
 FONTE: Adaptado de ASLANLAR, 2006.

As resistências 6 e 7 são referentes à resistência elétrica do material do eletrodo, podendo ser iguais ou diferentes dependendo do material do eletrodo superior e do inferior.

As resistências 1 e 5 são do contato entre o eletrodo e a peça de trabalho, a magnitude desta resistência depende da condição da superfície do metal de base e do eletrodo, do tamanho e do perfil da face do eletrodo e da força aplicada. Este é um ponto de alta geração de calor, mas a superfície do metal não atinge sua temperatura de fusão durante a passagem de corrente devido à alta condutibilidade térmica dos eletrodos e ao fato de que eles são usualmente refrigerados a água.

Os indicadores R2 e R4 representam a resistência elétrica do material de base. A última resistência 3 se refere à resistência elétrica da interface entre os metais de base e deve ser o ponto de maior resistência para que o calor seja gerado ali ocorrendo a soldagem.

A resistência equivalente de soldagem, $R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7$ é a resistência realmente mensurada, através da medição da corrente e da tensão, durante o processo de soldagem. Resultando, como proposto por Dickinson (1980), em uma resistência dinâmica uma vez que varia com tempo como demonstrado na FIG 2.3. Um dos fatores que influenciam na mudança da resistência ao longo do ciclo de soldagem é a alteração da resistividade do material em função da variação da temperatura como descrito na EQUAÇÃO (2.2).

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha (\theta - \theta_0)] \quad (2.2)$$

- ρ = Resistividade do material a 0°C [Ωm]
- ρ_0 = Resistividade do material a temperatura ambiente [Ωm]
- α = Constante do material [coeficiente de temperatura $^\circ\text{C}^{-1}$]
- θ = Temperatura de trabalho [$^\circ\text{C}$]
- θ_0 = Temperatura ambiente [$^\circ\text{C}$]

Na FIG 2.3, é possível identificar cinco principais estágios da resistência dinâmica durante a soldagem a ponto, sendo eles:

I – No primeiro momento da soldagem ocorre uma queda brusca da resistência, isso ocorre, pois em um curto período de tempo a resistência que é elevada no início da soldagem cai para um valor menor devido à quebra das rugosidades superficiais das chapas e expulsão dos contaminantes, facilitado pelo aumento da temperatura e a força dos eletrodos.

II – Neste momento ocorre o contato metal-metal onde há um aquecimento concentrado, acontecendo dois fenômenos a diminuição da resistência (R_1 , R_3 e R_5 – FIG 2.2) devido ao aumento da área de contato e o aumento da resistividade do material (R_2 e R_4 – FIG 2.2) como consequência do aumento da temperatura, determinando o ponto α .

III – Caracterizado pelo aumento da resistência devido ao aumento da resistividade do material em decorrência do aumento de temperatura. Segundo Damasco (1994), para materiais revestidos, nesse momento é possível ocorrer quedas repentinas da resistência, correspondentes a fusão e expulsão do revestimento.

IV – Com o aumento da temperatura e o aumento da resistividade ocorre o início da fusão e a formação da lentilha, ponto β . O material fundido possui menor resistência

mecânica e, dessa forma, devido à força exercida nos eletrodos, eles se aproximam diminuindo a seção transversal e diminuindo a resistência elétrica.

V – Ocorre o aumento da lentilha e a contínua aproximação do eletrodo podendo ocorrer a expulsão do material.

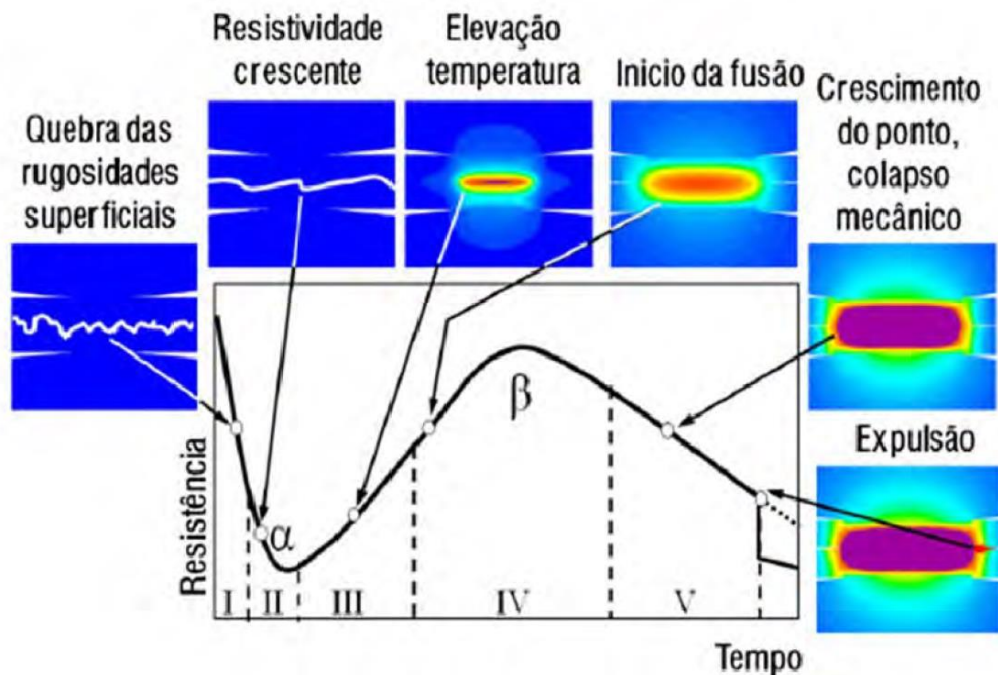


FIGURA 2.3 – Principais Estágios da Resistência Dinâmica Durante a Formação do Ponto de Solda
 FONTE: VENCEGUERRA *et al.*, 2013.

2.2. Processo de soldagem

Para o estudo do processo de soldagem é necessário avaliar três aspectos que caracterizam o processo, os parâmetros de soldagem, a máquina utilizada e os eletrodos.

2.2.1. Parâmetros de soldagem

No processo de soldagem por pontos para que se tenha um resultado que garanta resistência e aparência é de grande importância a correta definição dos parâmetros de soldagem, os três principais são: corrente de soldagem, pressão de soldagem e ciclo de soldagem. Para a determinação desses três fatores outras grandezas devem ser avaliadas como espessura da chapa, material a ser utilizado, tipo de revestimento e acesso ao ponto.

2.2.1.1. Ciclo de soldagem

O ciclo de soldagem é determinado pelo controlador de soldagem e é dependente da tecnologia utilizada no equipamento. No caso de transformadores convencionais um ciclo de soldagem seria um ciclo da onda senoidal de energia alternada, no caso do Brasil com a frequência de 60Hz um ciclo seria $1/60$ s (0,016s). Porém, já existem transformadores de média frequência que transformam a frequência da rede, 60Hz, em uma frequência de 1KHz cujo um ciclo seria $1/1000$ s (0,001s) logo a unidade de medida não é mais ciclo e sim “ms” (milissegundos).

O ciclo de soldagem é separado em quatro tempos principais como descrito na FIG 2.4, sendo, tempo de compressão, tempo de soldagem, tempo de resfriamento e tempo de pausa, sendo F = força nos eletrodos e I = corrente de soldagem.

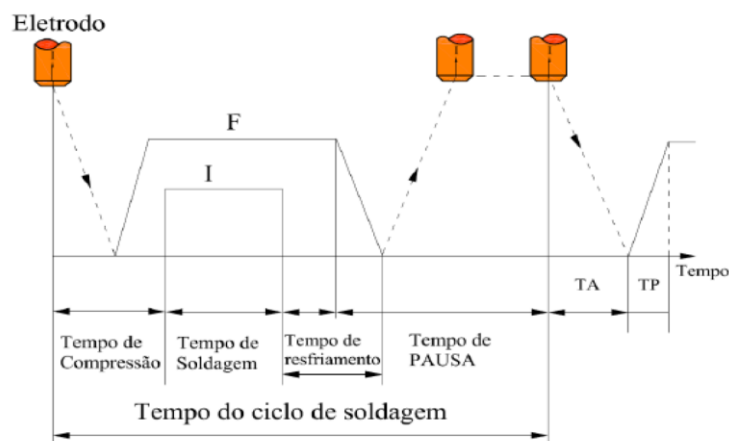


FIGURA 2.4 – Representação de um ciclo de soldagem

FONTE: PINHEIRO, 2010.

2.2.1.1.1. Tempo de compressão

Intervalo que compreende o fechamento dos eletrodos até a passagem de corrente. No caso deste tempo ser zero, a corrente iniciaria a passagem antes do fechamento do eletrodo, podendo ocorrer fagulhas. O tempo de compressão é utilizado para a estabilização da força, ou seja, garantir que quando iniciar a passagem de corrente a resistência elétrica entre as chapas seja estável até o início do aquecimento.

2.2.1.1.2. Tempo de soldagem

Intervalo através do qual a corrente flui pelo circuito. Nesta etapa, a corrente de soldagem aquece as chapas podendo fundir o material no ponto de contato dos eletrodos e as peças de trabalho, formando o ponto de solda (BRANCO, 2004).

O principal influenciador do tempo de soldagem é a espessura das chapas a serem soldadas, quanto maior a espessura mais calor é necessário e, portanto, maior tempo. O segundo é o material de base e seu tratamento superficial (SANTOS, 2006).

Com relação ao tempo de soldagem, quando é muito longo ocorre alta indentação, expulsão de material e os eletrodos podem aderir na peça. Quando é muito curto, resultará na formação de um ponto pequeno, podendo até não ocorrer a solda.

Com o aumento do tempo de soldagem ocorre o aumento do diâmetro do núcleo da solda e por consequência o aumento da resistência mecânica até um limite que ocorre a expulsão de fagulhas fazendo com que devido à maior indentação e a perda de material, a resistência mecânica se estabilize como mostra a FIG 2.5 (ZHANG, 2011).

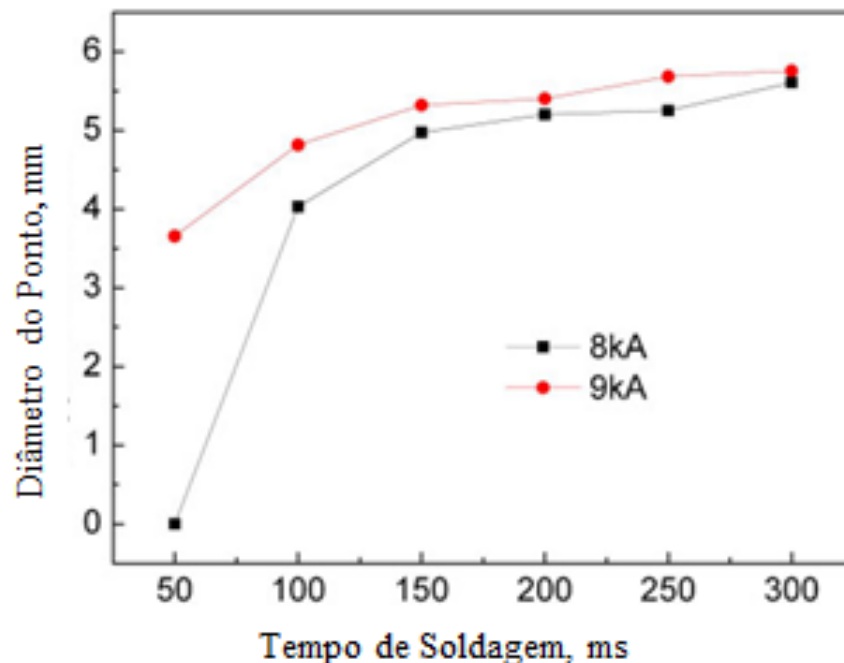


FIGURA 2.5 – Influência do Tempo de Soldagem no Diâmetro do Ponto

FONTE: Adaptado de ZHANG, 2011.

2.2.1.1.3. Tempo de resfriamento

Tempo após cessar a corrente quando os eletrodos são mantidos unidos as peças auxiliando na refrigeração e na consolidação do ponto. Permite que o ponto se solidifique antes que os eletrodos sejam removidos, caso sejam retirados antes de completar a solidificação, o ponto pode ser puxado, separando as chapas e ocasionando um ponto solto (BRANCO, 2004). O tempo de resfriamento também influencia no tratamento térmico do ponto de solda.

2.2.1.1.4. Tempo de pausa

Intervalo de tempo entre a retirada dos eletrodos do ponto de solda e o início da próxima solda. É utilizado em produção em série, onde em alguns casos, o mesmo ponto é repetido ou dois pontos são dados muito próximos. A principal função é a preservação dos componentes da pinça, garantido que sempre resfriem no tempo entre soldagens e realize a soldagem sempre na temperatura ideal.

2.2.1.1.5. Recursos adicionais

Com a evolução dos materiais utilizados principalmente na soldagem a ponto automobilística, além da evolução do design dos veículos, foi necessário desenvolver recursos adicionais nos controladores de solda de forma a garantir a perfeita execução do ponto. Os recursos também são utilizados para um ajuste fino do processo preservando a ZTA (Zona Termicamente Afetada) e diminuindo a expulsão de material do ponto.

Um dos primeiros recursos desenvolvidos foi o “*slope*” ou tempo de subida e tempo de descida. Ao se determinar a corrente de soldagem pode-se optar que a corrente obedeça a uma rampa de subida que vai de um valor pré-determinado de corrente até o valor nominal especificado. De maneira análoga, utilizar uma rampa de descida no final da passagem da mesma a fim de que a interrupção não seja abrupta. O objetivo desse recurso é que o efeito da aplicação da corrente seja suavizado diminuindo a geração de respingo e não permitindo a falta de fusão.

Outro recurso é o impulso de soldagem, que seria a divisão do tempo de soldagem. Ou seja, ao invés da passagem de corrente ocorrer uma única vez, ela se divide em pulsos. O objetivo é a soldagem de chapas de maior espessura que necessitam de tempos de

solda relativamente altos, que podem gerar o superaquecimento nas chapas e expulsão de respingo. Dividindo o tempo de solda em pulsos evita-se esta situação, lembrando que entre cada pulso existe um tempo de resfriamento programado garantindo o efeito dos pulsos.

Além do impulso de soldagem, o recurso do pré-aquecimento da chapa foi criado com o objetivo de queimar e volatilizar os revestimentos das chapas, de forma que o tempo de soldagem seja utilizado efetivamente para soldar, mas também é utilizado em processos de solda a pontos especiais quando o pré-aquecimento é necessário para evitar trincas e defeitos. Já o pós-aquecimento é utilizado também com o propósito de evitar um resfriamento abrupto evitando trincas e falhas no processo (SANTOS, 2006).

A FIG 2.6 resume todos os tempos de soldagem, utilizando os recursos já conhecidos e os recursos adicionais como: o tempo de pré-pressão (compressão), o tempo de pré-aquecimento ou primeira solda, o tempo de resfriamento entre a primeira solda e a segunda solda, o tempo de subida de corrente ou “*slope*” inicial, o tempo de soldagem, a quantidade de impulsos, o tempo entre cada impulso, o tempo de descida de Corrente ou “*slope*” final, o tempo de resfriamento entre a segunda solda e a terceira solda, o tempo de pós-aquecimento (resfriamento) e o tempo de pós-pressão.

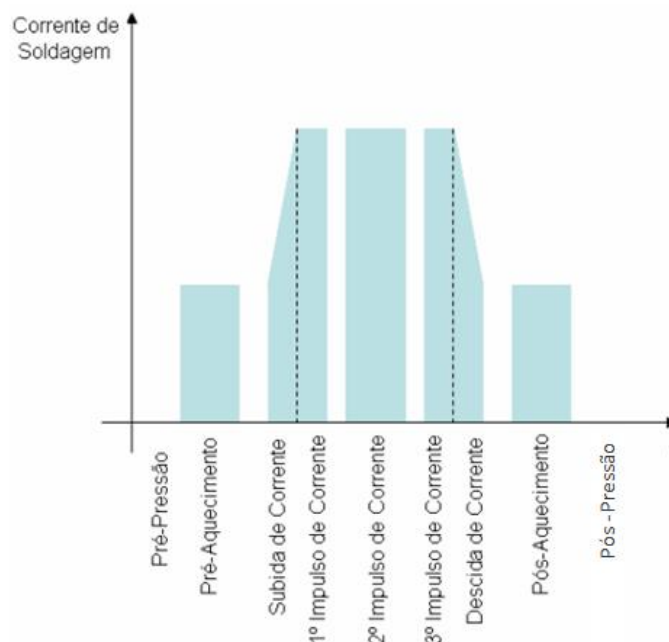


FIGURA 2.6 – Tempos de Soldagem

FONTE: SANTOS, 2006.

2.2.1.2. Corrente de soldagem

Os níveis de corrente utilizados na soldagem a ponto é na faixa de Kiloampères e é dependente: da resistência elétrica do sistema, equipamento mais peça, e de outros fatores como estado das superfícies, rigidez da peça, diâmetro da face do eletrodo, espessura da chapa e material da peça.

Observando esses fatores, pode ser determinado um limite de aceitação da corrente, um limite inferior que está diretamente relacionado ao diâmetro mínimo do ponto e um limite superior ou de expulsão de material (SANTOS, 2006).

A FIG 2.7 demonstra a relação da corrente com o diâmetro do ponto e o tempo de soldagem sendo que o limite inferior das soldas aceitáveis deve atender a norma MBN 10320 sendo o diâmetro do ponto $d = 4\sqrt{t}$, onde “t” é a espessura da chapa mais fina. O limite superior deve ser abaixo do valor de corrente que cause a expulsão (COTA, 2015).

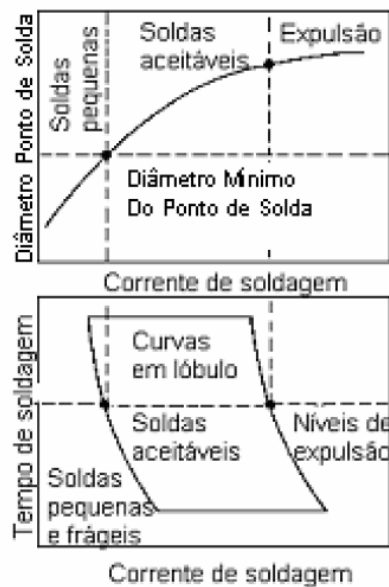


FIGURA 2.7 – Curva de Soldabilidade

FONTE: BRANCO, 2004.

A FIG 2.8 descreve o aumento do tamanho do ponto com o aumento da corrente de soldagem e o comportamento diferente em função do número de ciclos, este comportamento se deve a expulsão de material que ocorreu para o maior tempo de soldagem (POURANVARI, 2011).

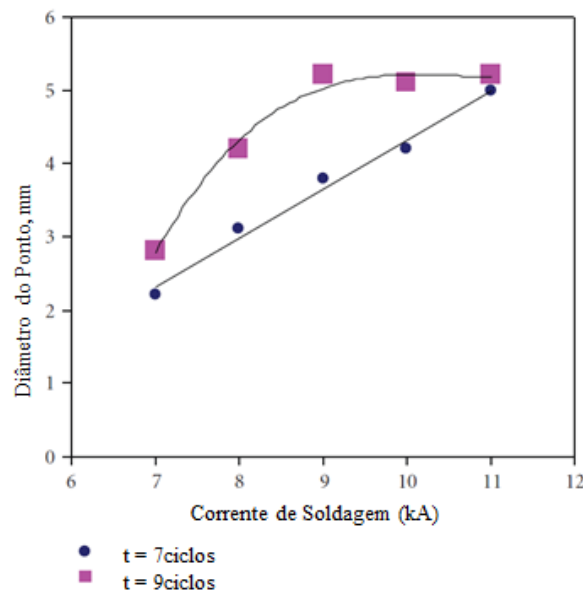


FIGURA 2.8 – Efeito da Corrente de Soldagem sobre o Tamanho do Ponto
 FONTE: Adaptado de POURANVARI, 2011.

Na indústria, o processo se repete várias vezes em um curto período de tempo sendo uma de suas principais vantagens, porém essa repetição causa o desgaste do formato ideal da ponta do eletrodo fazendo com que seu flange, (onde se concentra a passagem de elétrons) se deforme aumentando a área e diminuindo a densidade de elétrons.

Outro fator decorrente do processo é que em metais revestidos ocorre a deposição do revestimento na ponta do eletrodo, aumentando a resistência elétrica. Para combater esses fatos duas ações são adotadas uma é a fresagem periódica dos eletrodos e a outra é a curva “*stepper*” que acrescenta uma quantidade de corrente a cada ponto dado e tenta combater a diminuição da densidade de corrente e o aumento da resistência da ponta do eletrodo.

2.2.1.3. Pressão de soldagem

A pressão de soldagem é responsável pela determinação da resistência elétrica de contato, influenciando diretamente na quantidade de calor gerado na zona de formação do ponto (SANTOS, 2006). Por esse motivo um modo de falha decorrente da pressão de soldagem é o ponto solto, ou a realização da solda sem a união do material. Isso ocorre, pois com a força acima da necessária ocorre a diminuição considerável da resistência de contato e com isso a diminuição do calor gerado. A FIG 2.9 ilustra que as maiores resistências de

contato ocorrem para as menores forças aplicadas nos eletrodos, porém é possível observar que para menores forças o processo fica mais instável.

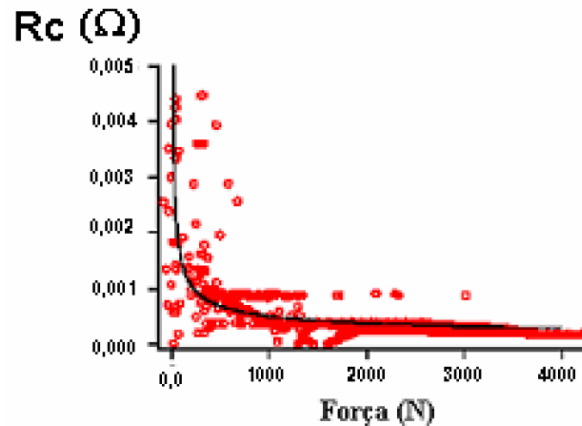


FIGURA 2.9 – Relação entre a Força Aplicada Nos Eletrodos e a Resistência de Contato
 FONTE: BRANCO, 2004.

A pressão atua na peça durante todo o ciclo de soldagem sendo dividido em três momentos principais, assim como no tempo de soldagem. A compressão ou aperto é responsável por aproximar as peças provocando o contato íntimo no local da soldagem e determinando a resistência de contato inicial. A pressão de soldagem é o momento que ocorre a passagem de corrente e sua principal função é manter o metal fundido dentro da lente de solda evitando que o mesmo escape, gerando a expulsão e outros defeitos como a porosidade. Por último temos o resfriamento responsável pela garantia da solda, mantendo as chapas unidas até que o ponto se solidifique e seja capaz de suportar a solitação mecânica (STOCCO, 2003).

Durante todo o ciclo o valor nominal da força deve se manter constante, para isso a tecnologia utilizada na aplicação da força deve ser capaz desta manutenção.

2.2.2. Máquina

O equipamento de soldagem por resistência elétrica a ponto é constituído, por um transformador que tem como objetivo transformar a tensão e fornecer as correntes necessárias na solda, um controlador que determina o ciclo de soldagem, o sistema de refrigeração responsável por retirar calor de todo o conjunto e a pinça que tem como função exercer a força e conduzir a corrente até o ponto.

2.2.2.1. Transformador

O transformador de soldagem tem como objetivo fornecer a corrente necessária à soldagem. Ele é importante, pois como descrito a corrente para a soldagem por resistência elétrica a ponto é na faixa de kiloampères valores não fornecidos na rede de alimentação industrial. O propósito é transformar a tensão permanecendo o produto ($V \times I$) constante. No primário do transformador tem-se um produto, ou potência, decorrente de uma tensão relativamente alta e uma baixa corrente, já no secundário a potência é decorrente de uma tensão baixa e uma corrente altíssima (TRAFOFLUID, 2012).

2.2.2.2. Controladores de soldagem

O controlador ajusta a corrente de soldagem através da modulação de largura de onda quadrada aplicada ao transformador por uma técnica chamada PWM (GF WELDING, 2005). A corrente é determinada variando o ângulo da placa de disparo que controla o SCR (*Silicon Controlled Rectifier* – Retificador Controlado de Silício). A pressão de soldagem é controlada enviando um sinal para a válvula proporcional no caso de pinças movidas a cilindro e um sinal ao servomotor no caso de pinças com esta tecnologia. O sinal é proporcional à força que será aplicada e, portanto, deve ser calibrado de acordo com a tecnologia. Outra função do controlador é definir os tempos do ciclo de soldagem,.

2.2.2.3. Sistema de refrigeração

Durante a soldagem a face dos eletrodos pode atingir cerca de 1200°C e os outros componentes também são aquecidos, para que não ocorra um desgaste acelerado é de extrema importância a refrigeração do sistema por completo como demonstra a FIG 2.10.

O sistema de refrigeração trabalha em paralelo, para que a geração de calor de um componente não influencie na troca de calor de outro. Os componentes que são refrigerados no processo de solda a ponto são o SCR (responsável pelo chaveamento e determinação da energia de soldagem e por isso gera aquecimento), o transformador, os cabos de solda, os porta eletrodos e eletrodos (que são os caminhos da corrente).

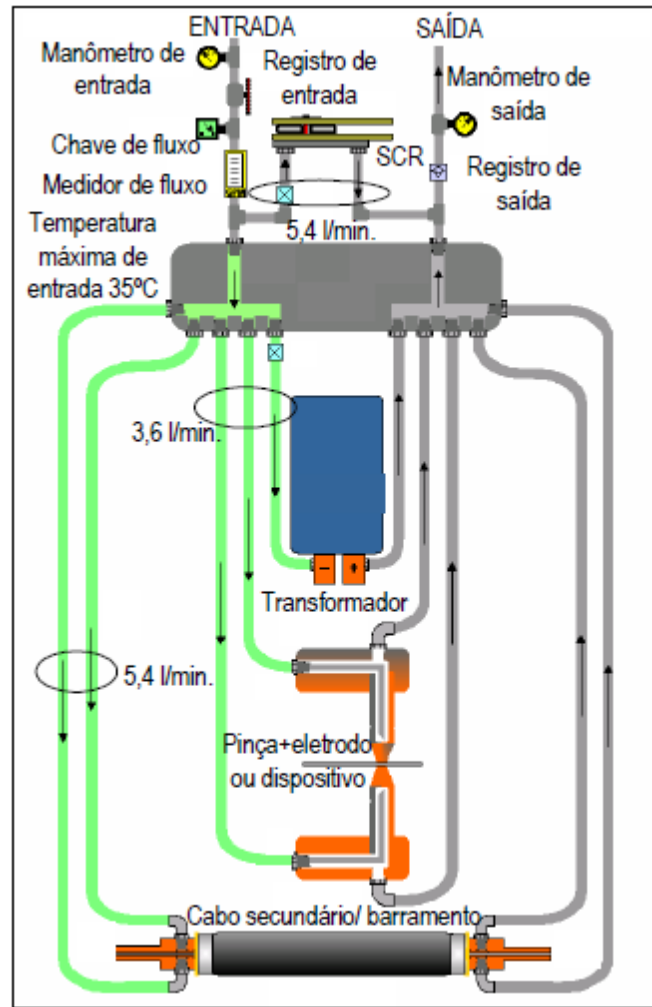


FIGURA 2.10 – Sistema de Refrigeração do Processo de Soldagem

FONTE: MEDAR, 2004.

2.2.2.4. Pinça de soldagem

As pinças de soldagem têm como finalidade executar o ponto de solda, abrindo e fechando o braço, executando a pressão de soldagem e transmitindo a corrente ao ponto de solda, possuindo os seguintes componentes como mostrados na FIG 2.11: transformador, braço fixo, braço móvel, porta eletrodo, servo atuador, mola de contato (barramento) e o suporte de montagem (chassis). As pinças podem ser classificadas quanto a sua forma construtiva, quanto ao tipo de elemento de força utilizado, o posicionamento do transformador e a movimentação da pinça.

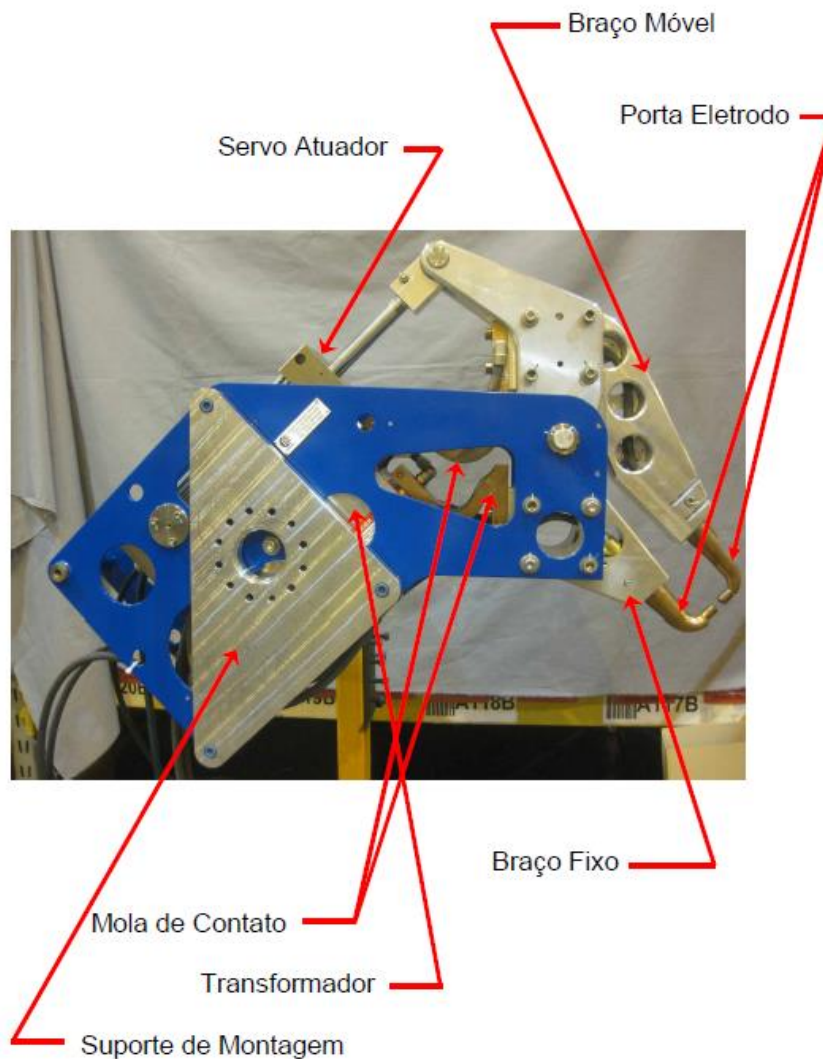


FIGURA 2.11 – Componentes de uma Pinça de Solda Automática
 FONTE: COMAU, 2010.

2.2.2.5. Aplicação do ponto

Durante a aplicação do ponto de solda vários fatores devem ser levados em consideração seja na programação do robô no caso da soldagem automática seja no movimento da pinça no caso do operador. O primeiro fator é o alinhamento entre os eletrodos, sendo fundamental para estabilidade na formação do ponto de solda. Com o desalinhamento, ocorre o acúmulo de pressão e por consequência uma deformação não homogênea na peça como demonstra a FIG 2.12 (FURLANETTO, 2014).

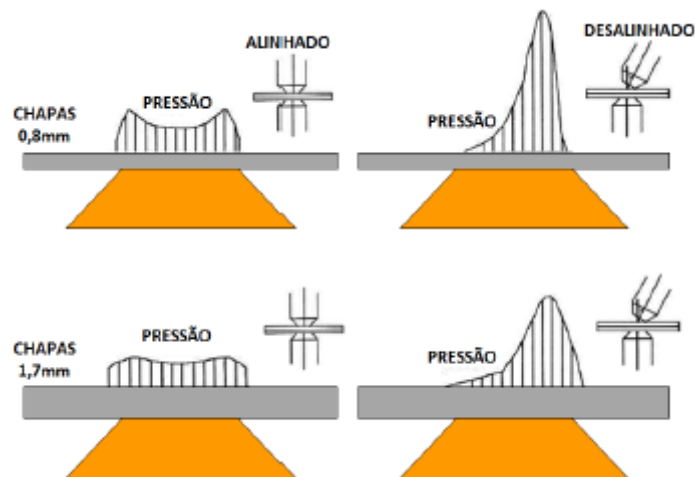


FIGURA 2.12 – Distribuição de Pressão na chapa com eletrodos alinhados e desalinhados
 FONTE: FULANETTO, 2014.

Outro fator é o escorregamento da pinça que ocorre quando há a falta de atrito entre os eletrodos aumentando a área de contato, diminuindo a resistência elétrica e modificando a resistência dinâmica. Com a diminuição do fluxo de corrente ocorre a diminuição do ponto de solda como mostra a FIG 2.13 (FURLANETTO, 2014).

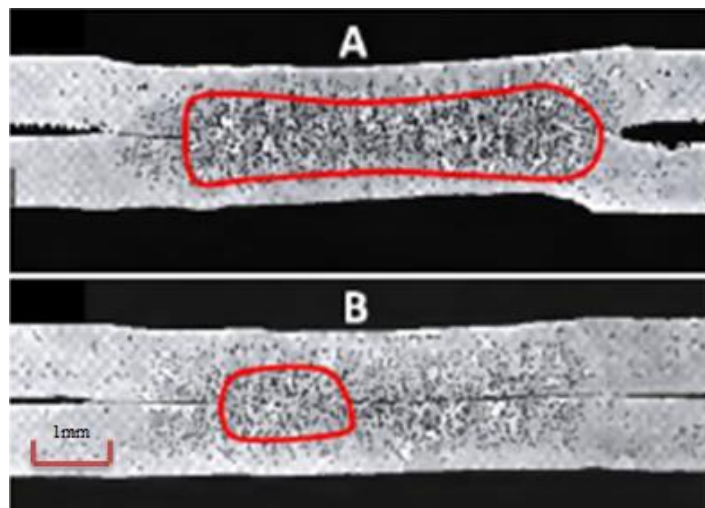


FIGURA 2.13 – Macrografia do ponto "A" sem escorregamento e "B" com escorregamento
 FONTE: Adaptado de FURLANETTO, 2014.

2.2.3. Eletrodos

Os eletrodos desempenham um papel fundamental para obter soldas satisfatórias, pois são responsáveis por transferir para as peças, corrente e a pressão necessária para a

geração de calor por efeito Joule, além de dissipar o calor gerado para possibilitar uma rápida solidificação da zona fundida (BRANCO, 2012). Os eletrodos são na maioria das vezes, fabricados em cobre e suas ligas. Além da boa condutibilidade elétrica, os eletrodos devem ter resistência mecânica e dureza adequadas (INTERMACHINERY, 2012). Outra característica importante é a não formação de liga com o metal de base e seus revestimentos, sendo, dessa forma, desenvolvido ligas de cobre com essas características específicas para a aplicação em eletrodos.

A evolução dos materiais das chapas utilizadas trouxe os aços zincados tornando mais severas as condições de soldagem, sendo necessário eletrodos de ligas especiais. A FIG 2.14 apresenta um exemplo dessa liga sendo possível observar que com o aumento de temperatura a queda da resistência é menor.

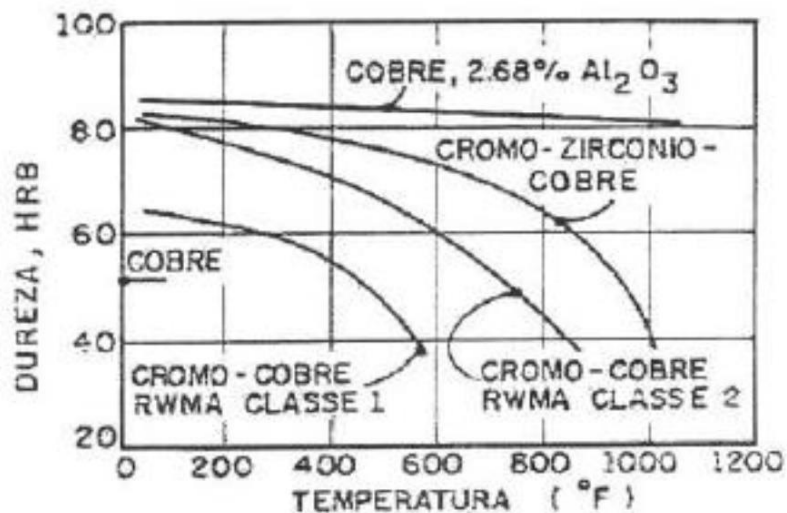


FIGURA 2.14 – Dureza do Eletrodo *versus* Temperatura do Eletrodo

FONTE: AWS, 1983.

Considerando que o eletrodo é o meio que permite o fluxo de corrente, é lógico pensar que o diâmetro da ponta do eletrodo determina o diâmetro do ponto de solda, sendo que na realidade essa diferença é mínima e o formato define a indentação (MILLER, 2012).

A indentação resultante do processo de soldagem é devido à espessura das chapas, o acesso ao ponto de solda e a geometria do eletrodo, sendo os possíveis tipos descritos na FIG 2.15.

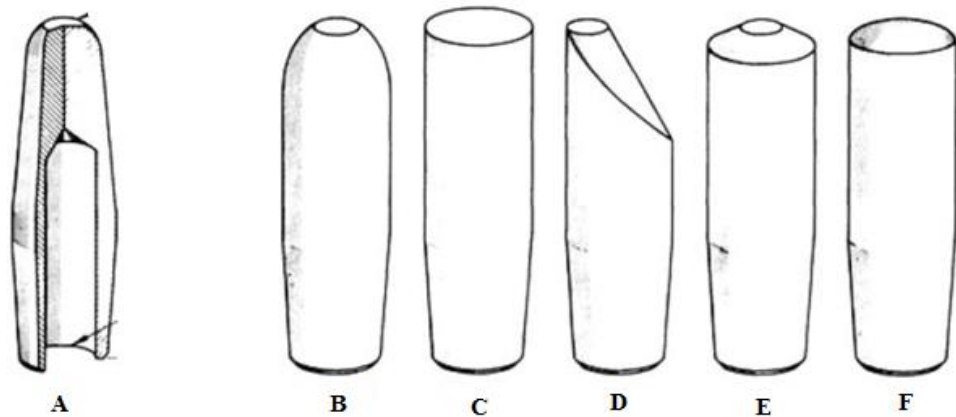


FIGURA 2.15 – Tipos de Geometria de Eletrodo

FONTE: AWS, 1998.

Os eletrodos do tipo A possuem propriedades inferiores aos demais, os tipos B e E são preferidos principalmente para aços zincados, os do tipo C são raramente utilizados e indicados para não produzir marcas nas peças, o tipo D é indicado para soldas de difícil acesso e o F mais indicado para equipamentos manuais.

É interessante ponderar que, para chapas com metais dissimilares, deve-se utilizar o eletrodo de maior diâmetro em contato com a peça de maior resistividade térmica (MARQUES, 2009).

2.3. Metalurgia do ponto de solda

O estudo da metalurgia do ponto é fundamental para compreender a formação estrutural da junta soldada, os mecanismos de formação de defeitos e o impacto sobre a resistência mecânica da solda. (ZHANG, 2006).

O primeiro passo é o estudo da solidificação do ponto de solda, que é similar a de um lingote, passando por dois passos, o primeiro a nucleação e depois o crescimento de grão. A solidificação ocorre devido à retirada de calor e é determinada pela taxa de transferência de calor entre a chapa e os eletrodos. Observando a forma e a direção de solidificação é possível observar a direção da transferência de calor e os possíveis problemas que podem gerar.

A FIG 2.16 “a” ilustra a solidificação ideal. Na região próxima a ZTA ocorre a nucleação e o crescimento de grão colunar em direção ao centro, sendo que a troca de calor com as chapas e o eletrodo tem taxas aproximadamente semelhantes demonstrando que a dissipação ocorre de forma igual em todas as direções. Na FIG 2.16 “b”, a taxa de

transferência de calor entre o eletrodo e o ponto foi maior do que entre o ponto de solda e as chapas, criando uma região central fragilizada e com possibilidade de vazios e trincas de solidificação, inserindo uma possibilidade de falha na solda. Por último a FIG 2.16 “c” apresenta uma taxa de transferência de calor maior entre as chapas e o ponto, do que entre os eletrodos e o ponto, podendo ser causado por um baixo tempo de resfriamento ou uma refrigeração ineficiente do eletrodo. Para a compreensão do comportamento da soldagem, além da região soldada é importante observar o entorno e todos os fatores afetados pelo processo. No limite da região que durante o processo se tornou líquida existe a região que não se liquefez, porém, teve a microestrutura alterada devido ao calor do processo denominada ZTA (Zona Termicamente Afetada).

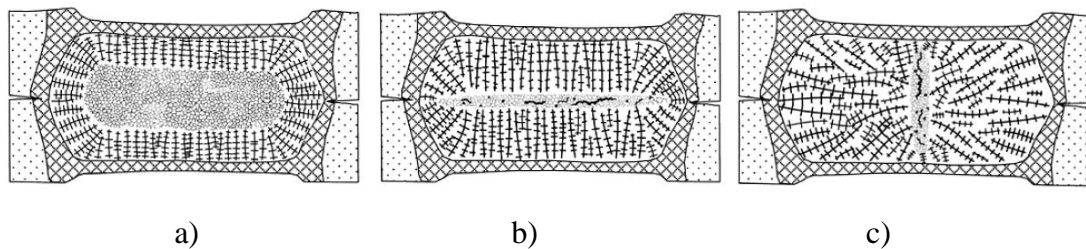


FIGURA 2.16 – Solidificação do Ponto de Solda – a) Solidificação Ideal, b) Alta Taxa de Resfriamento na Direção do Eletrodo, c) Alta Taxa de Resfriamento na Direção das Chapas

FONTE: ZHANG, 2006.

A ZTA pode ser dividida em três regiões segundo Lancaster (1999), a primeira seria região crítica, que pode ser dividida em duas partes, a parte de grãos refinados e a parte de crescimento de grão. O fenômeno do crescimento de grão ocorre nas regiões que atingiram a temperatura necessária durante o ciclo térmico, já nas outras regiões ocorre o refinamento. Na região inter-crítica a temperatura atingida é inferior a atingida na região crítica e algumas fases que não existem no metal de base pode se formar. Por último na região subcrítica não é possível observar alterações microestruturais, apenas em alguns casos é observado algumas finas precipitações.

Durante a soldagem, a zona fundida está sujeita a altas taxas de resfriamento não possibilitando o equilíbrio entre as fases, tornando difícil a relação com o diagrama Fe-C e resultando muitas vezes na transformação de austenita em martensita, resultando em uma microestrutura de alta dureza.

A pressão dos eletrodos, realizada sobre as chapas durante o processo de soldagem, causa a deformação e um ponto de concentração de tensão. Unida à alta taxa de

resfriamento que provoca um alto nível de tensão residual na chapa, esta deformação, pode resultar em trincas na solda. Quando esta ocorre ainda com o metal líquido é denominada trinca de solidificação e é devido ao baixo tempo de resfriamento e alta tensão sobre o ponto. Já quando ocorre na ZTA é chamada de trinca a frio e é devido a componentes da microestrutura ou impurezas que causam um ponto de fragilização.

2.4. Controle de qualidade

O controle de qualidade se torna a etapa mais importante do processo de soldagem, uma vez que garante a funcionalidade dos pontos e as características desejadas. Essas características devem ser claras e determinadas para cada montadora que possui uma norma própria ou segue normas de um órgão como, por exemplo, o documento “*Standard Welding Terms and Definitions*” gerado pela ANSI/AWS. As normas determinam parâmetros de qualidade que são baseados em testes e inspeções realizadas no ponto de solda, podendo ser ensaios não destrutivos ou ainda uma simples caracterização com base no defeito gerado, sendo todos realizados na linha de produção sem auxílio de laboratórios (ZHANG, 2006).

2.4.1. Inspeção visual

A inspeção visual é baseada em parâmetros que são avaliados para a classificação do ponto de solda, como por exemplo, a superfície. A principal causa de desvios na aparência superficial é a expulsão de material como mostra a FIG 2.17.

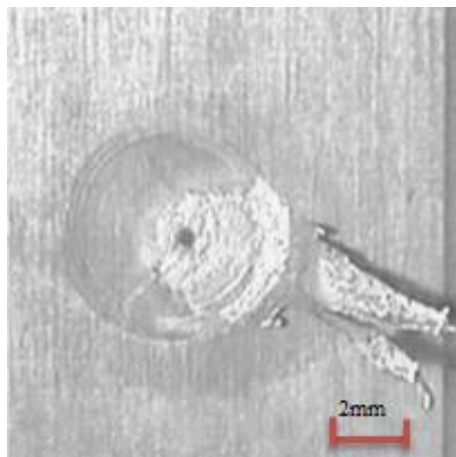


FIGURA 2.17 – Expulsão de material na solda a ponto

FONTE: Adaptado de ZHANG, 2006.

A avaliação da presença ou não da expulsão no ponto de solda é importante, pois revela outras características, uma vez há a expulsão o ponto de solda fica com suas propriedades normais prejudicadas como mostra a FIG 2.18. Na figura é possível observar que as características desejadas da soldagem são prejudicadas com a existência da expulsão além, é claro, do aspecto visual do ponto de solda, principalmente os pontos estéticos como os aplicados nos vãos das portas.

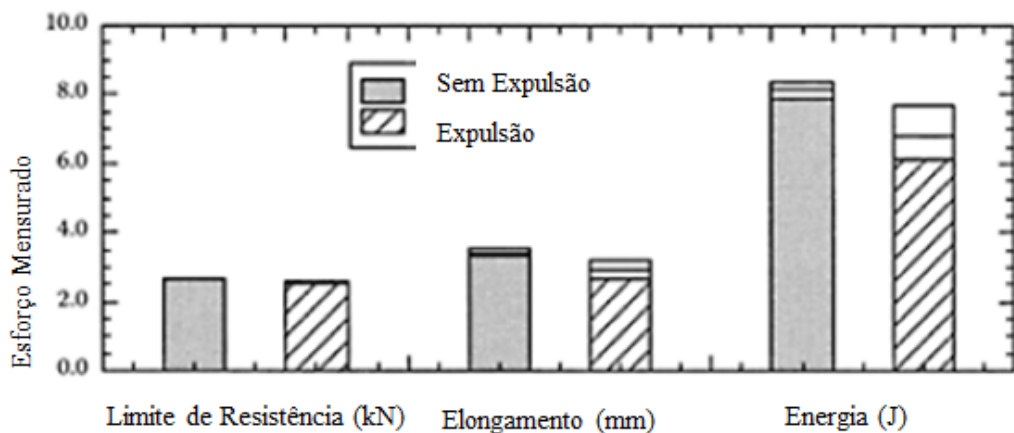


FIGURA 2.18 – Influência da Expulsão de Material nas Características do Ponto de Solda
 FONTE: Adaptado de ZHANG, 2006.

A superfície de um ponto de solda deve ser uniforme com formato relativamente plano e livre de fusão superficial. A indentação profunda dos eletrodos, trincas, descoloração ao redor da solda e outros fatores, indicam a 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 de corrente elétrica e outras causas de aquecimento insuficiente ou penetração inadequada não deixam efeitos visíveis nas superfícies das chapas (VARGAS, 2006). Por esses motivos Fonseca (1999) apresenta na TAB 2.1 prováveis causas para os defeitos visualizados na avaliação das características geométricas e visuais do ponto de solda, buscando entender as formas de solucionar os problemas causados.

TABELA 2.1 – Prováveis causas de defeito de soldagem a ponto

Defeito	Possíveis Causas
Expulsão ou porosidade na interface do ponto de solda	Superfícies Contaminadas
	Força do eletrodo muito alta
	Corrente muito alta
Expulsão na interface eletrodo/peça	Absorção de impurezas na 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 de soldagem muito baixa
Indentação excessiva ou marcas do eletrodo	Força do eletrodo muito alta ou muito baixa
	Eletrodos desalinhados
	Ajuste insatisfatório das partes
	Corrente de soldagem 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 trocas 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.

2.4.2. Ensaio de arrancamento

Além da inspeção visual, o teste mais realizado no final de cada linha de soldagem de carrocerias é o teste de arrancamento. O objetivo é a verificação na própria carroceria se existe a ocorrência de pontos soltos (VARGAS, 2006). Ele é o mais utilizado devido à facilidade de execução e o baixo custo.

O teste é realizado utilizando uma ferramenta apropriada buscando penetrá-la entre as chapas tracionando o ponto de solda como mostra a FIG 2.19. Caso o ponto não se rompa é determinado como bom. No caso do rompimento da chapa e não do ponto, um parâmetro mensurado é o diâmetro do ponto que fica aderido em uma das partes, no caso do rompimento do ponto é considerado como um ponto solto (POWELL, 1996).

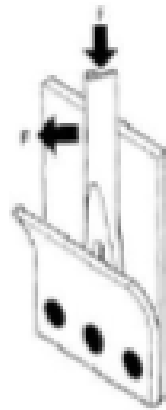


FIGURA 2.19 – Tipo de Teste de Arrancamento

FONTE: Adaptado de POWELL, 1996.

Damasco (1994) comenta que a limitação do ensaio se dá na medida da variação dos resultados em função da ferramenta utilizada e do indivíduo que realiza o ensaio.

2.4.3. Ultrassom

Os métodos de avaliação citados anteriormente são de baixo custo e fácil aplicação por isso são realizados em todos os pontos de solda. Outro método muito difundido na indústria é o ultrassom, sendo usado para a determinação de algumas características geométricas do ponto de solda, como por exemplo, indentação e o diâmetro além da presença de defeitos internos.

O método é baseado na detecção de múltiplas reflexões no chapa ou na estrutura da solda, junto com ecos intermediários, que são produto das ondas sonoras emitidas por um cabeçote em contato com a peça. A análise dos ecos intermediários e da atenuação é determinante na definição de uma solda satisfatória. O ultrassom foi desenvolvido nos anos 60 utilizando instrumentos analógicos que dificultavam a análise, pois era necessário avaliar cada eco, pico e frequência. Os equipamentos atuais fazem uma pré-análise baseada nas informações fornecidas pelo usuário, facilitando e disseminando o uso na indústria automobilística. As vantagens do ultrassom são: método não destrutivo, ser assertivo nos resultados e possibilitar a geração de documentos comprobatórios com facilidade (SCANMASTER, 2005).

O ultrassom se resume a um ensaio em que um feixe sônico de alta frequência (Superior a 20KHz) de ondas longitudinais é introduzido no material a ser inspecionado com objetivo de detectar impurezas e falhas internas. A onda é emitida por um cristal piezelétrico

que é capaz de transformar energia elétrica em mecânica, sendo geradas e transmitidas, primeiro a um meio aquoso no interior do cabeçote de ultrassom, depois transferido para um gel responsável por expulsar o ar e gerar acoplamento entre o cabeçote e a peça e então para o material. A onda é refletida no outro lado da peça ou em alguma imperfeição interna e então o mesmo ou outro cristal piezelétrico é responsável por captar este sinal e transformar em um gráfico. Existem várias técnicas de ultrassom como, por exemplo, transparência, A-Scan, imersão e B-Scan, sendo a última mais difundida na indústria automobilística devido à facilidade de manipulação e aplicação.

O equipamento mensura o tempo necessário para que a onda percorra todo o material e seja refletida. Com o conhecimento do tempo para percorrer toda a estrutura e com a velocidade de propagação da onda no material, é possível determinar a espessura do material, incluindo a identificação e avaliar a ocorrência de algum defeito interno, um vez que a onda será refletida em menor tempo. Cada material possui velocidade de propagação do som diferente, sendo essa velocidade em função da densidade do material, é mais difícil a propagação da energia em materiais mais densos onde seus átomos estão mais próximos e com mais energia.

Os gráficos gerados representam soldas satisfatórias ou imperfeições, o gráfico, gerado na FIG 2.20, representa um ponto satisfatório, onde no eixo “X” é apresentado a espessura do material em “mm”, ou o tempo de propagação da onda e no eixo “Y” é apresentado a energia do eco.

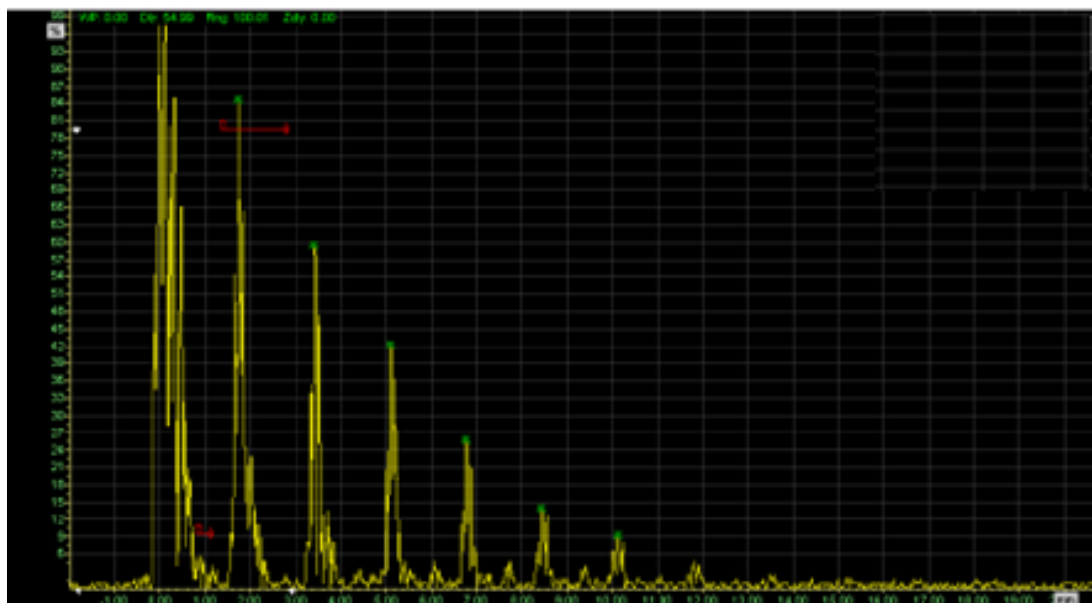


FIGURA 2.20 – Ultrassom de uma solda satisfatória

FONTE: SCANMASTER, 2005.

A caracterização de uma solda satisfatória é feita observando a atenuação do sinal, a distância entre os ecos, que deve representar a espessura final do ponto de solda, e a linha inferior de ruído deve ser inferior a 10% de energia do eco maior.

A FIG 2.21 apresenta um ponto solto ou sem solda, é possível observar que a distância entre os ecos é similar a espessura da chapa superior indicando que o sinal do ultrassom refletiu na solda.

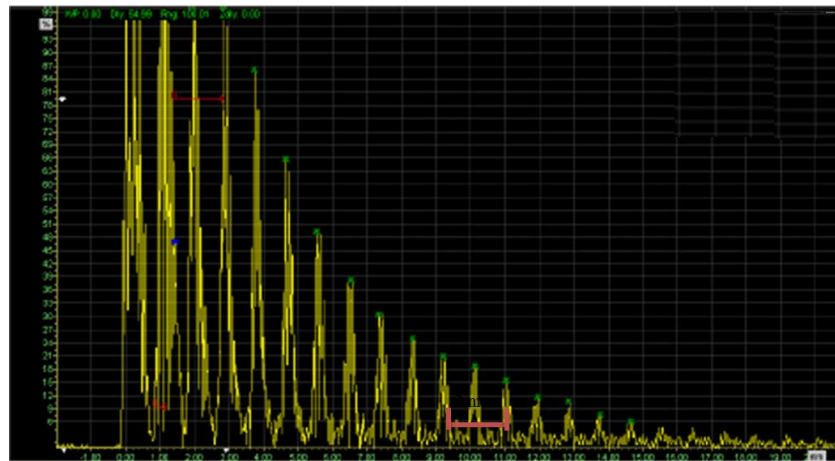


FIGURA 2.21 – Ultrassom ponto solto
FONTE: SCANMASTER, 2005.

A FIG 2.22 apresenta o ultrassom de um ponto pequeno, é possível observar ecos de menor intensidade marcados em vermelho que representam a parte da energia da onda que se refletiu na primeira chapa já em verde esta a parte da energia que refletiu no fim da segunda chapa.

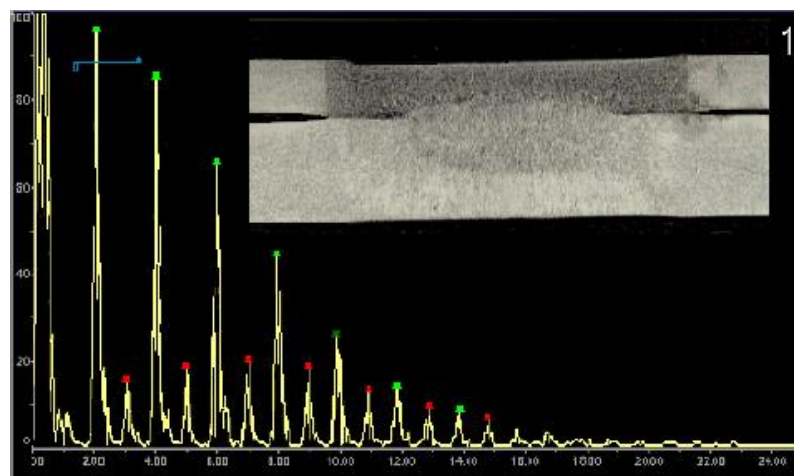


FIGURA 2.22 – Ultrassom ponto pequeno
FONTE: SCANMASTER, 2005.

A FIG 2.23 apresenta um ultrassom de um ponto com defeito interno os pontos em vermelho representam a energia refletida no defeito interno, no eixo “X” é possível determinar a profundidade do defeito.

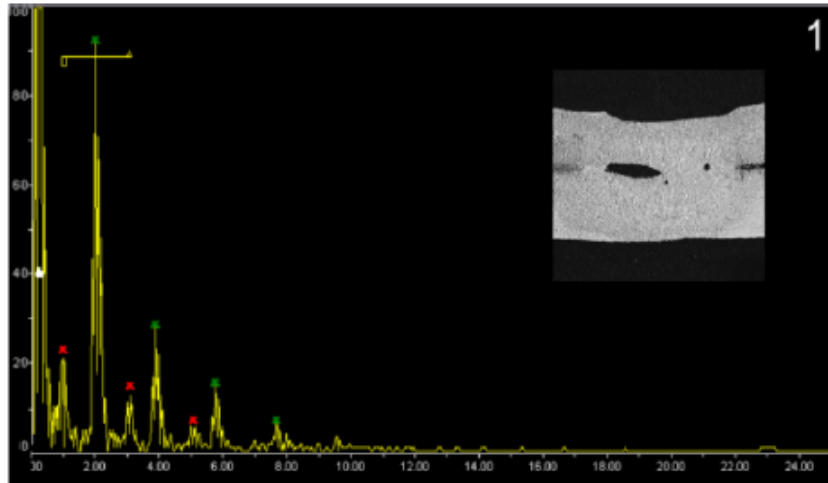


FIGURA 2.23 – Ultrassom de um ponto com defeito interno
FONTE: SCANMASTER, 2005.

Outros defeitos que podem ser diagnosticados no ultrassom são o ponto queimado e o ponto colado demonstrados na FIG 2.24. O ponto colado é caracterizado quando ocorrem apenas poucos pontos de fusão entre as chapas, dessa forma, o ultrassom visualizará um grande número de ecos intermediários. Já o ponto queimado é caracterizado por uma espessura final de chapa menor do que o que cada montadora define como mínimo. Esta definição existe, pois muitas vezes a deformação nas chapas causada pela soldagem é maior que a espessura de um das chapas.

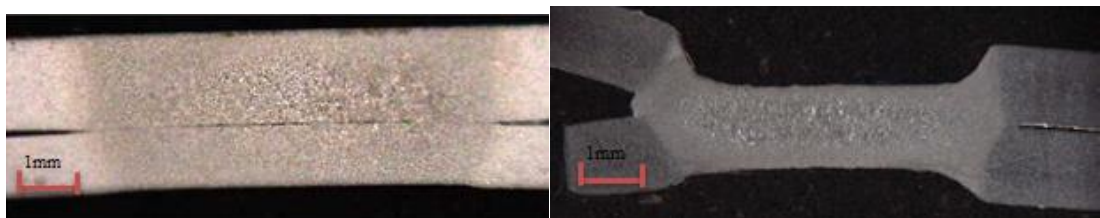


FIGURA 2.24 – Ponto colado e ponto queimado

O ultrassom tem larga utilização na indústria automobilística por conseguir capturar os principais parâmetros desejados no ponto de solda, sem comprometer a peça e com um investimento relativamente baixo, podendo ser realizado na ponta das linhas de produção.

Nos últimos anos a tecnologia utilizada no ultrassom de solda a ponto vem evoluindo, um recente equipamento implantado nas indústrias é o *Resistance Spot Welds Analyzer*, da fabricante Tessonics, demonstrado na FIG 2.25. Este equipamento possui 52 cristais piezelétricos, que oscilam com uma frequência de 20MHz, realizando ao mesmo tempo 52 ensaios de ultrassom, propiciando a formação de uma imagem do ponto. Esta imagem facilita a análise dos técnicos responsáveis, pois é possível avaliar se há defeitos internos, a medida da espessura da chapa e o diâmetro do ponto de solda, recurso não presente anteriormente. Outra vantagem é a possibilidade, através do software, de mensurar a indentação em ambos os lados do ponto de solda. Apesar de facilitar e propiciar uma análise mais completa, os modos de falha característicos são os mesmo apresentados para o ultrassom de um único canal.



FIGURA 2.25 – Imagem do Ensaio Com o Ultrassom Multiponto
FONTE: TESSONICS.*

2.4.4. Características geométricas

As características geométricas avaliadas em um ponto de solda são: diâmetro do ponto, penetração, indentação, trincas superficiais e internas, porosidade, separação entre chapas e aparência superficial (ZHANG, 2006).

A FIG 2.26 apresenta as dimensões que são observadas em uma metalografia do ponto de solda sendo elas, a largura da indentação, a profundidade da indentação, a largura da área fundida, a penetração da solda, o diâmetro do ponto e a largura da ZTA (Zona Termicamente Afetada).

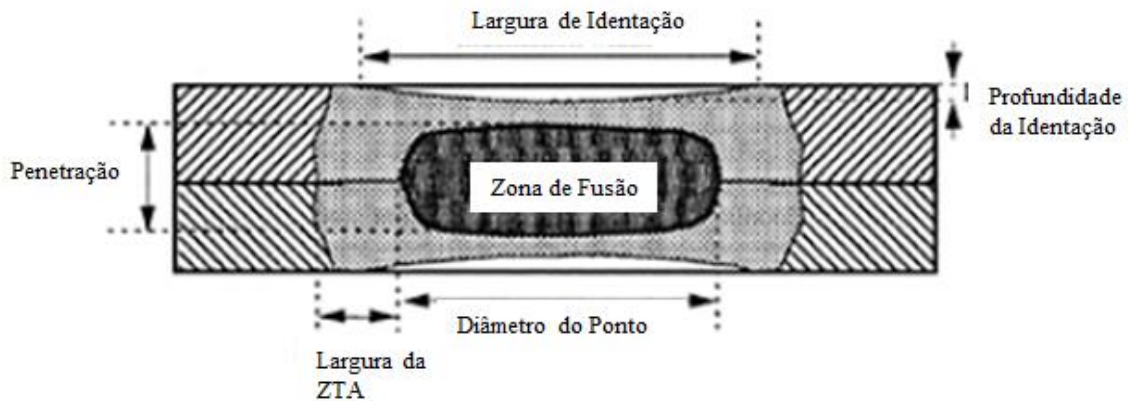


FIGURA 2.26 – Características Geométricas do Ponto de Solda

FONTE: Adaptado de ZHANG, 2006.

A indentação pode se tornar um concentrador de tensão quando o ponto de solda sofre esforços, sendo que esta fragilidade pode ser mais pronunciada para chapas finas. Dessa forma, a AWS sugere que a profundidade da indentação não supere 25% da espessura da chapa mais fina (CHAO, 2003).

Além da endentação, uma medida realizada é a penetração. Para atingir altas penetrações é necessário alto aporte térmico e materiais de baixa resistência a especificação varia entre as montadoras dizem que a penetração deve ser de 20% a 90% das somas das espessuras.

As montadoras buscam determinar parâmetros geométricos que garantam que o ponto de solda atenda as características mecânicas desejadas. Esta relação é feita, pois a determinação dos parâmetros geométricos e visuais tem menor custo do que os ensaios mecânicos. Outro ponto é que em sua maioria esses ensaios são destrutivos.

O principal parâmetro de carregamento mecânico utilizado é o Limite de Resistência (Carga Máxima – *Peak Load*) obtido através do ensaio de tração por cisalhamento. Zhang (2006) propõe através de um estudo utilizando elementos finitos que o fator que mais influencia no Limite de Resistência da Solda é o Limite de Resistência do Material (σ_y), como demonstra a FIG 2.27. O segundo maior influenciador é a espessura das

chapas (t) seguido pela largura da ZTA (h) e a relação de dureza entre a região do ponto e metal de base.

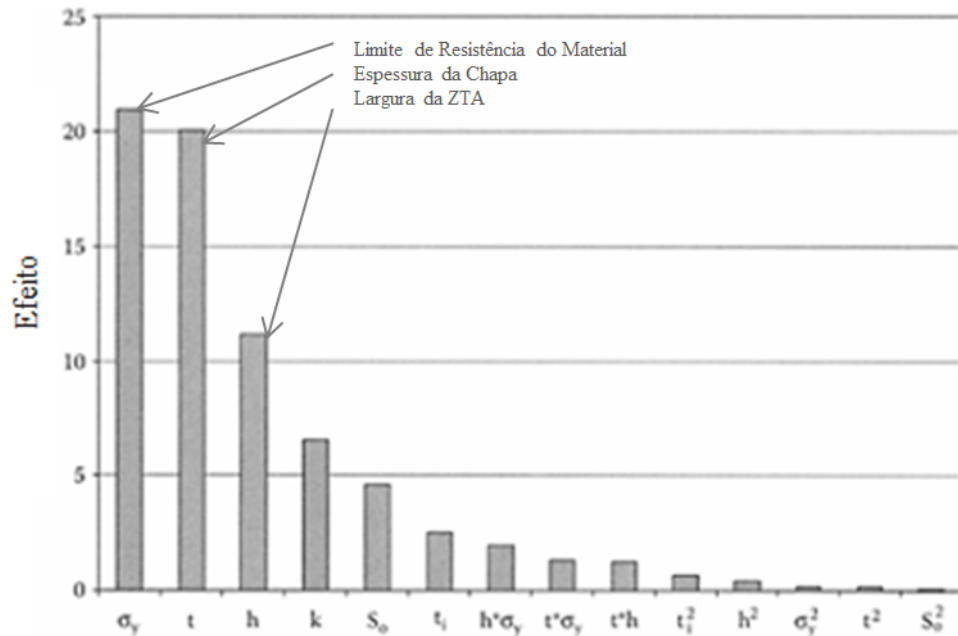


FIGURA 2.27 – Efeito de cada parâmetro geométrico no limite de resistência da solda
 FONTE: Adaptado de ZHANG, 2006.

2.5. Dimensionamento

As juntas soldadas devem garantir requisitos de funcionalidade, confiabilidade e segurança requeridas. Além de ser capaz de ser fabricada, inspecionada e transportada com os menores custos possíveis. Para alcançar esses objetivos uma junta soldada deve atender a três pilares fundamentais: material, processo de soldagem e projeto. Sendo que esses pilares possuem uma conexão entre eles, o projeto deve ser feito avaliando a segurança fornecida pelo material e garantir que o processo escolhido execute a solda no menor custo possível. O processo deve ser selecionado de forma que seja possível soldar o material selecionado e, dessa forma, constituir uma junta que atenda os requisitos (RUIZ, 2005).

Para a concepção do projeto é importante a avaliação do histórico de juntas e processos similares. Por isso as companhias constituem suas normas e diretrizes de projeto de forma a garantir que a experiência anterior seja utilizada nos novos projetos, além de certificar que essa experiência não se perca nem seja transferida indevidamente.

Dentre as normas e premissas para execução de projetos de junta soldada é importante destacar alguns fatores como: atendimento aos requisitos de resistência e rigidez

para que as juntas não fiquem superdimensionadas, coeficiente de segurança realístico, boa aparência de regiões visíveis, utilização de componentes padronizados e comercialmente disponíveis. Para a determinação de todos esses fatores com a segurança necessária é importante o conhecimento dos esforços solicitantes nas juntas soldadas.

2.5.1. Esforços solicitantes

Os veículos em geral possuem forma complexa devido ao design da carroceria, que deve estar sempre atualizada e atendendo a demanda do mercado quanto às curvas e detalhes. Devido à geometria complexa, é difícil a determinação exata dos esforços que cada ponto de solda será solicitado, pois além de sofrerem diferentes tipos de esforços, eles podem ser de natureza, dinâmica, estática e resultantes de colisões (OUISSÉ , 2009).

Os principais esforços que estão sujeitos um ponto de solda são tração, cisalhamento e torção, como mostra a FIG 2.28. Em uma colisão frontal, por exemplo, os pontos das barras (Longarinas) do carro se rompem principalmente por tração, já no caso do ataque a um quebra molas ou uma colisão lateral os pontos de solda estão sujeitos ao cisalhamento e a torção.

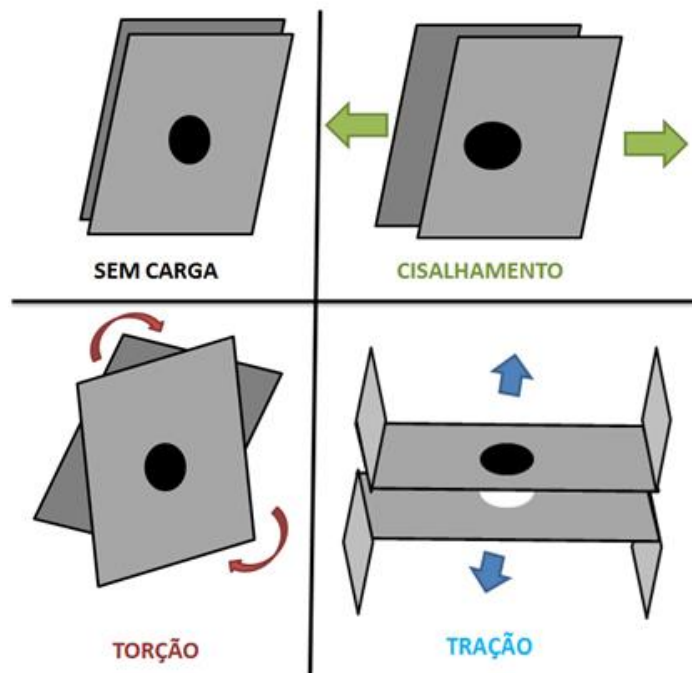


FIGURA 2.28 – Principais Esforços em um Ponto de Solda

2.5.2. Ensaio mecânicos

Para o dimensionamento das juntas construídas pelo processo de soldagem por resistência elétrica por pontos além dos esforços solicitantes, é importante conhecer o comportamento do ponto quando solicitados a estes esforços e por isso são realizados ensaios mecânicos como: ensaio de cisalhamento, arrancamento, fadiga, impacto, resistência a corrosão e de torção. A principal propriedade utilizada para dimensionamento do ponto de solda é a tensão de tração por cisalhamento por ser a mais fácil de mensurar e por não precisar de nenhum equipamento ou acessório específico para a máquina de tração (ZHANG, 2006). Para a caracterização destas propriedades mecânicas existem alguns ensaios usuais que são realizados.

2.5.2.1. Ensaio de cisalhamento

O ensaio de tração por tensão cisalhante de um ponto de solda é caracterizado pela aplicação de uma força na linha de centro da solda, utilizando uma máquina padrão de ensaio de tração, como mostra a FIG 2.29 tendo como resultado uma deformação simétrica (WUNG, 2000).

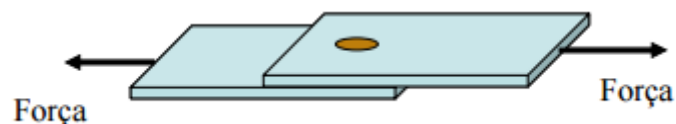


FIGURA 2.29 – Teste por Tensão Cisalhante

FONTE: VARGAS, 2006.

A FIG 2.30 apresenta um resultado característico de um ensaio de cisalhamento do ponto de solda. No ensaio o corpo de prova é carregado até a sua ruptura e a avaliação é feita em função do valor máximo de carga utilizada para romper o corpo de prova, assim como o modo de ruptura do ponto de solda (VARGAS, 2006).

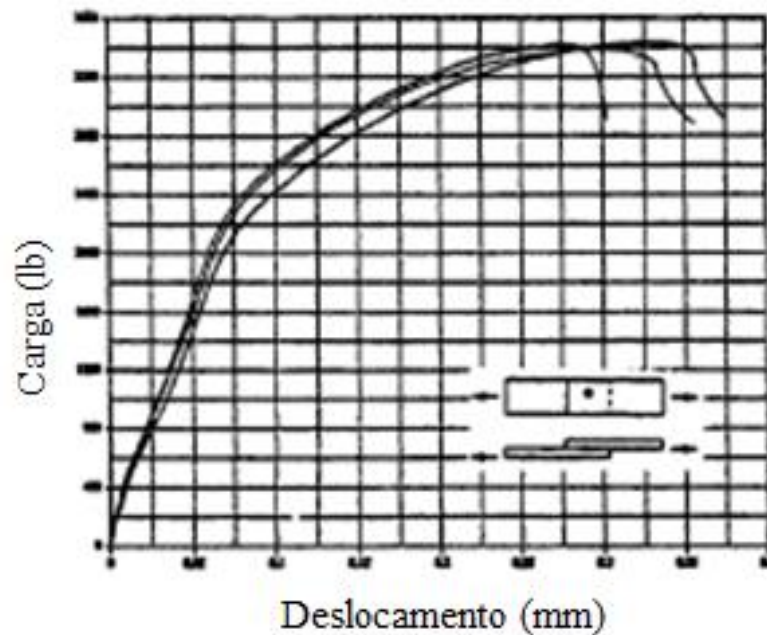


FIGURA 2.30 – Curva Característica do Ensaio de Cisalhamento
 FONTE: Adaptador de WUNG, 2000.

Devido ao posicionamento do ponto e desalinhamento das chapas frequentemente nestes tipos de ensaio ocorre a rótula plástica. Com a rotação o ensaio deixa de ser exclusivamente de cisalhamento podendo ser de arrancamento também e, portanto, um carregamento combinado.

A FIG 2.31 apresenta os possíveis tipos de ruptura do corpo de prova para o ensaio de tração por tensão cisalhante e suas curvas características definidas pela ISO. A curva “A” não é a ideal para o ensaio uma vez que esta testando apenas o metal de base, pois a ruptura ocorreu no mesmo, demonstrando uma curva característica de um ensaio de tração comum. A curva “B” também não agrega grande informação a ruptura da solda uma vez que ocorreu na ZTA e pode variar em função da espessura da chapa do metal de base. Esses dois tipos de falha são geralmente observados em corpos de prova de baixa largura. Os modos de falha “C”, “D” e “E” são os que de fato caracterizam o ponto de solda, pois a ruptura ocorre no ponto. Os modos de falha são importantes principalmente para caracterizar se a seleção das dimensões do corpo de prova é a ideal uma vez que nos casos A e B a ruptura se deu devido à dimensão da amostra (ZHANG, 2006).

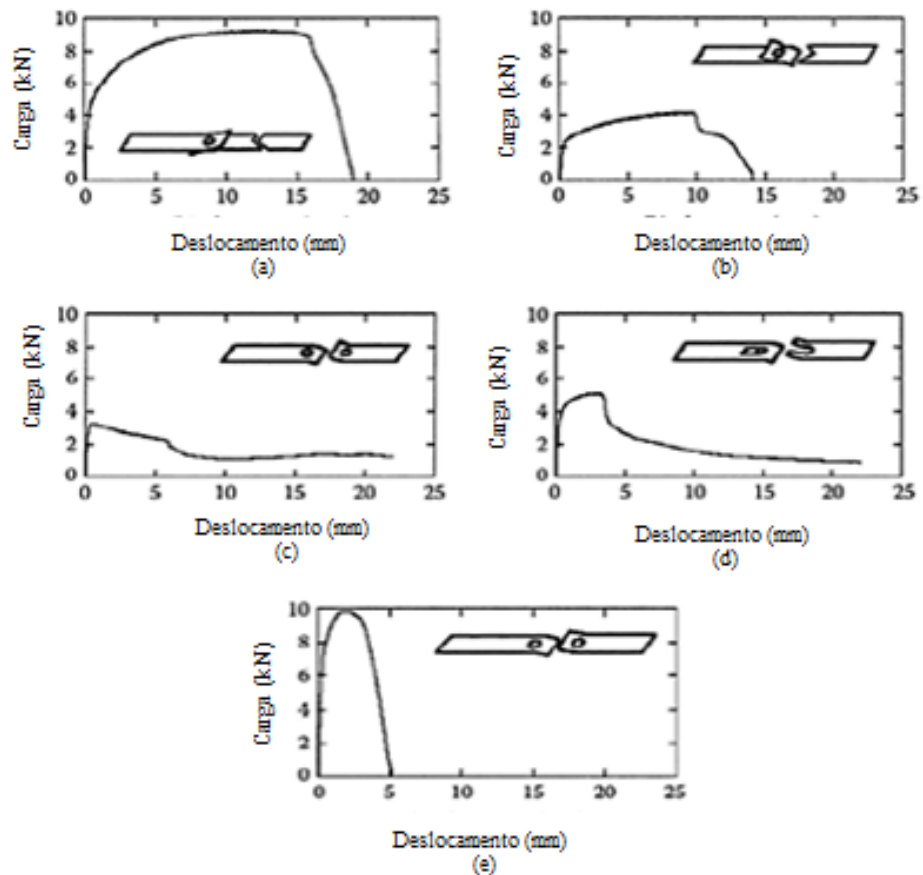


FIGURA 2.31 – Tipos de Falha no Ensaio de Cisalhamento – (a) Ruptura do Metal de Base, (b) Ruptura na ZTA, (c) Ruptura do Ponto com Arrancamento, (d) Ruptura do Ponto Rasgando a Chapa, (e) Ruptura do Ponto na Interface

FONTE: Adaptado de ZHANG, 2006.

Dentre os ensaios mecânicos o teste por tensão cisalhante é o mais difundido, pois é de fácil aplicação, de produção dos corpos de prova e apresenta resultados que caracterizam bem o processo de soldagem, o limite de resistência e a ductilidade do ponto de solda.

2.5.2.2. Ensaio de tração

No ensaio por tração axial o ponto de solda é tracionado na direção normal à superfície do material. O corpo de prova possui três regiões dobradas em 90° formando um “U” que soldado a outro “U” forma um “H”, como mostra a FIG 2.32 (VARGAS, 2006).

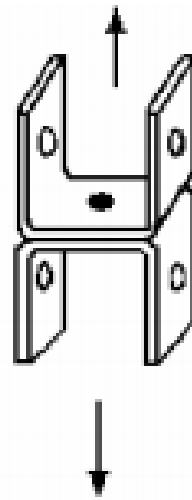


FIGURA 2.32 – Corpo de prova utilizado no teste de tração axial
 FONTE: VARGAS, 2006.

A FIG 2.33 apresenta a curva característica do ensaio de tração axial. No ensaio o corpo de prova é carregado através das chapas laterais, sendo com isso necessário acessório para adaptação à máquina padrão do teste de tração. Outra limitação do ensaio é o material e a espessura do corpo de prova, pois o material deve permitir ser dobrado na configuração correta e não se romper durante o ensaio (ZHANG, 2006).

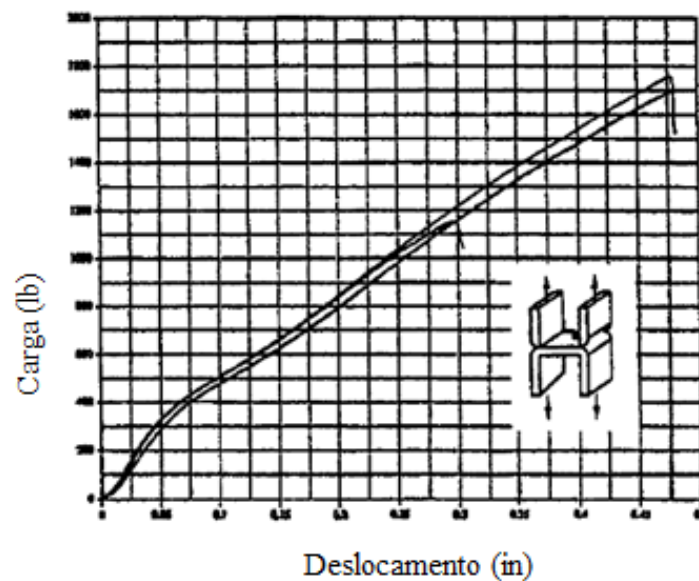


FIGURA 2.33 – Curva característica do teste de tração axial
 FONTE: Adaptado de WUNG, 2000.

Após o ensaio podem ser caracterizados dois tipos de falha, o rompimento do diâmetro ao redor do ponto na Zona Termicamente Afetada, neste modo o ponto fica inteiro em uma das chapas. O segundo é o rompimento na interface do ponto de solda, sendo este tipo de rompimento observado em veículos com alta quilometragem. A diferença da velocidade do ensaio é a provável causa destes dois diferentes tipos de falha (WUNG, 2000).

2.5.2.3. Ensaio de impacto

O ensaio de impacto se fundamenta na aplicação de uma força em um curto espaço de tempo que na maioria das vezes acontece através de um pendulo. Porém, existem várias configurações do corpo de prova com o objetivo de ensaiar diferentes forças de impacto podendo ser de cisalhamento e de tração. Também com variações na direção e na forma de aplicação da força no corpo de prova podendo ser direta ou indiretamente.

O ensaio de impacto é de extrema importância para a caracterização da solda, pois é o ensaio que melhor descreve os esforços que o ponto sofrerá durante uma colisão, sendo assim, essencial para a definição das características de segurança do veículo regulamentado pelas normas AWS C1.1-66 e AWS D8.9-97. Porém, esse ensaio não é largamente aplicado devido ao alto custo de implantação e dos corpos de prova (ZHANG, 2006).

2.5.2.4. Ensaio de fadiga

Os veículos em geral estão constantemente sujeitos a esforços cíclicos nos pontos de solda, porém a força aplicada neste esforço não é constante variando a cada ciclo. Essa carga cíclica pode causar o rompimento do ponto de solda com uma carga inferior a outros esforços repentinos como um impacto, gerando “rumorosidade” e comprometendo a estrutura do veículo e suas características de segurança. Devido à variação na frequência e na carga durante o ciclo real de fadiga, no laboratório são utilizadas cargas constantes, porém maiores que as encontradas na prática, além disso, é utilizado um fator de segurança para que o fator aleatório do uso do carro seja representado (ZHANG, 2006).

O ensaio de fadiga é similar ao ensaio de cisalhamento por tração, porém com a variação da carga, sendo utilizado o mesmo tipo de equipamento e as mesmas dimensões do corpo de prova. É necessário ter uma atenção especial ao fato do alinhamento das chapas para que não se crie a rótula elástica já apresentada no ensaio anterior.

2.5.2.5. Ensaio com cargas combinadas

O ponto de solda aplicado em um veículo na maioria das vezes não está sujeito a apenas um esforço durante sua aplicação. Para prever o que ocorre quando o ponto de solda for sujeito a um carregamento combinado, uma forma é analisar cada esforço que o ponto sofre separadamente como é feito nos ensaios anteriores. Plotando um gráfico da tensão de tração e a tensão de cisalhamento como mostram a FIG 2.34 é possível observar que a carga máxima de tração é menor que a carga máxima de cisalhamento. Outra comparação que pode ser feita é que no caso da tração a carga diminui rapidamente após o início da ruptura já no caso do cisalhamento a carga diminui lentamente, porque no caso do cisalhamento a ruptura ocorre aos poucos ao redor do ponto já no caso da tração a ruptura é repentina (CHAO, 2003).

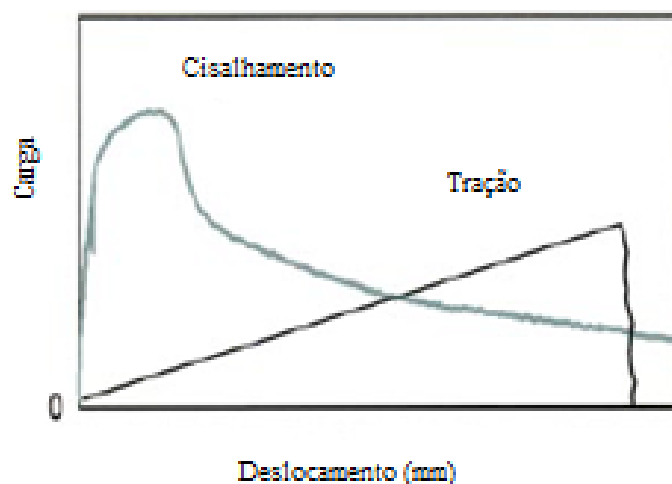


FIGURA 2.34 – Gráfico comparativo entre tensão de cisalhamento e tensão de tração

FONTE: Adaptado de CHAO, 2003.

Lin *et al.* (2002) propõe uma análise das cargas de arrancamento e cisalhamento combinadas. Para isso construiu um mecanismo que garante a distribuição homogênea do esforço ao longo do ponto de solda. Realizando o ensaio para os ângulos de 0° (arrancamento puro), 22°, 45° e 60° podendo avaliar diferentes níveis de esforços combinados. Para cada ângulo foi realizada a metalografia do ponto buscando a seção transversal como mostra a FIG 2.35 concluindo que os pontos de solda se rompem principalmente na ZTA.

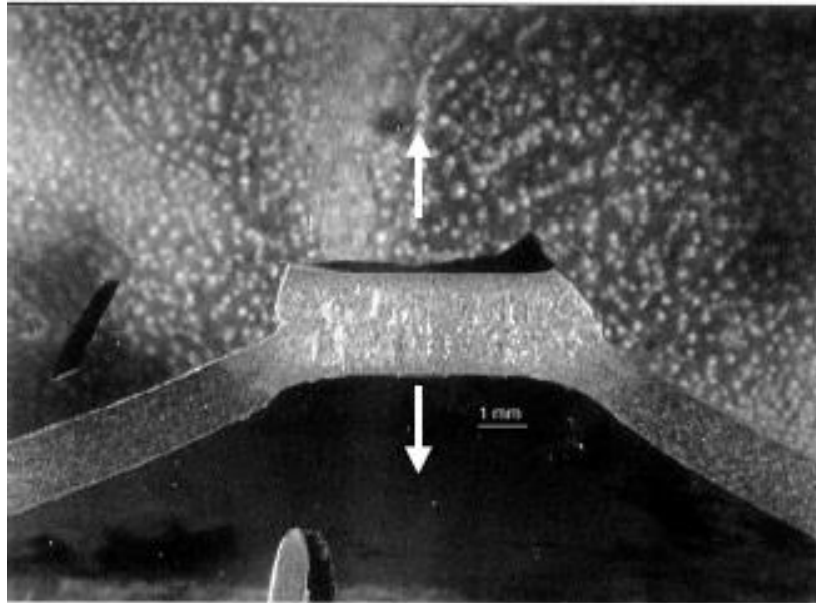


FIGURA 2.35 – Metalografia de um Ponto de Solda que Sofreu Tração Pura
FONTE: LIN *et al.*, 2002.

2.5.2.6. Ensaio de torção

O teste de torção não é comumente utilizado na indústria automobilística como os outros testes já citados, devido à necessidade de equipamentos específicos ou complexas estruturas para adaptação nas máquinas convencionais. O resultado do ensaio de torção é semelhante ao ensaio de cisalhamento e é realizado até o rompimento da solda, obtendo os seguintes dados: o torque necessário para o rompimento, calculado pelo momento gerado devido ao braço de torção; o ângulo de giro do ensaio com a carga de resistência máxima; e o diâmetro após o rompimento (ZHANG, 2006). A FIG 2.36 apresenta a curva característica avaliando o torque máximo atingido em função do ângulo máximo de rotação. O objetivo deste ensaio principalmente é avaliar a vida útil do ponto de solda uma vez que o tipo de falha da rotação é observado em veículos com alta quilometragem (WUNG, 2000).

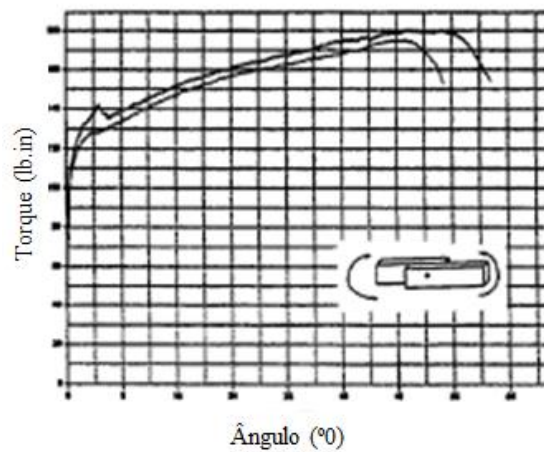


FIGURA 2.36 – Curva característica do ensaio de torção

FONTE: Adaptado de WUNG, 2000.

O rompimento do corpo de prova ocorre quando a trinca se propaga na ZTA soltando as chapas sendo que uma delas permanece aderida ao ponto de solda como mostra a FIG 2.37.

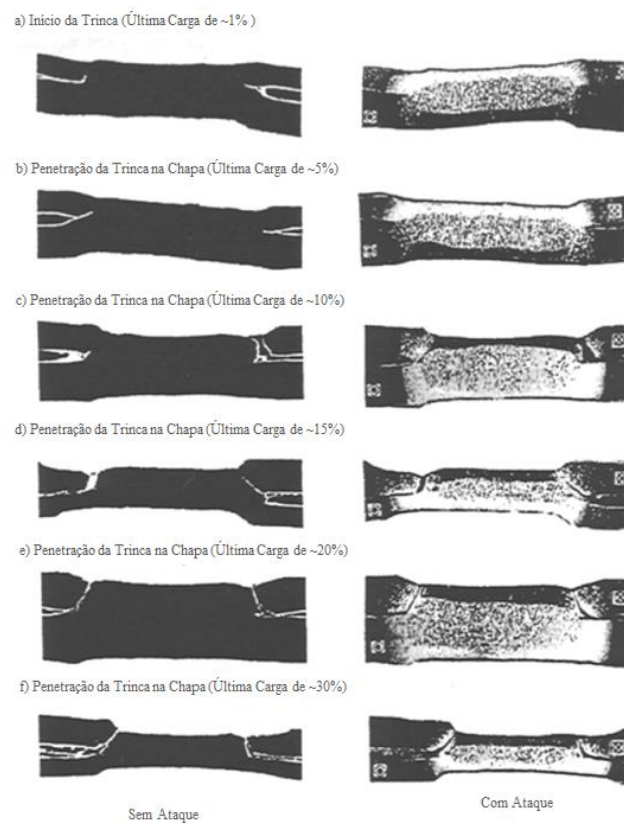


FIGURA 2.37 – Propagação da Trinca no Ensaio de Torção

FONTE: Adaptado de WUNG, 2001.

Johnson (1984) comparou os resultados do ensaio de torção com os resultados do ensaio de tração axial realizado em chapas com 1,0mm de espessura de aço de baixo teor de carbono. Os resultados são apresentados na FIG 2.38 e revelam dois modos de falha, com o aumento da carga de torção e do diâmetro do ponto de solda é observado a ocorrência do rompimento do tipo botão, onde o ponto fica aderido a uma das chapas. Para cargas a 4kN e diâmetros inferiores a 40mm ocorre a fratura interfacial.

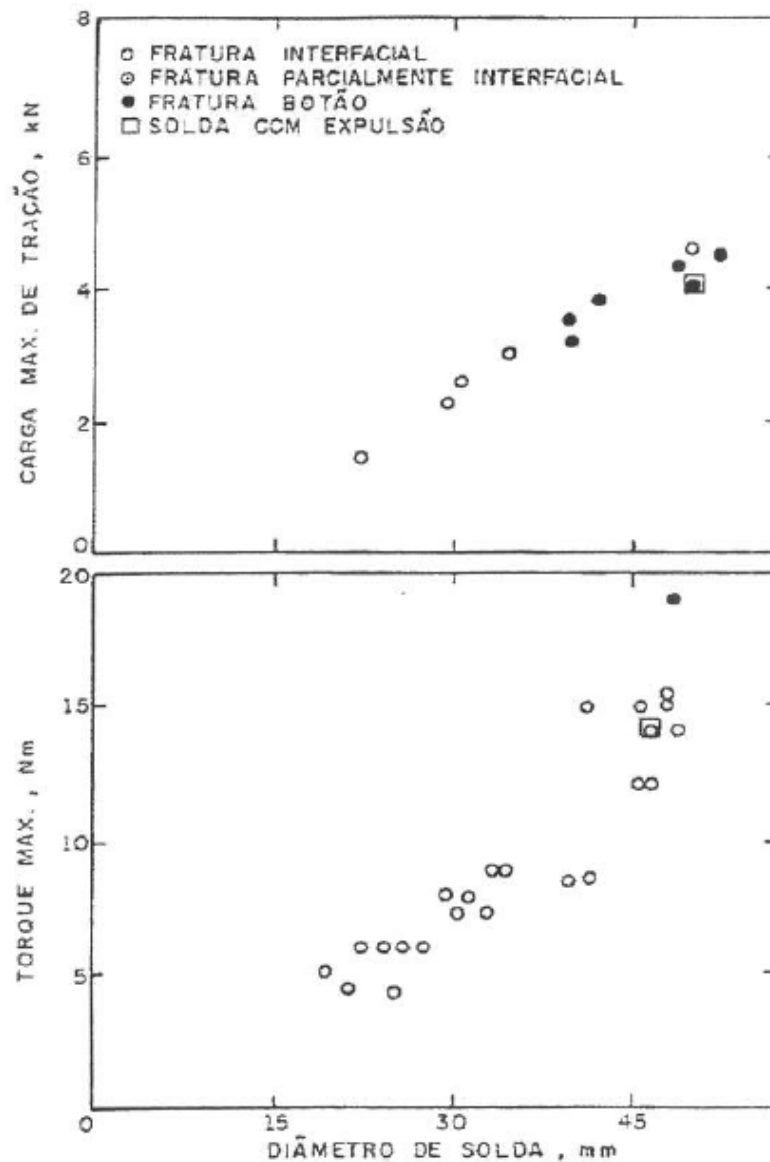


FIGURA 2.38 – Resultados Encontrados para Ensaio Mecânico em Chapas de Aço com Baixo Teor de Carbono com 1 mm de Espessura: a) Torque Máximo, b) Carga Máxima de Tração.

FONTE: JOHNSON *et al.*, 1984.

Existem diferentes dispositivos de ensaio de torção de soldagem por resistência elétrica por pontos, a norma ISO 17653:2012 propõe um dispositivo para ensaio manual sem instrumentação e um dispositivo para ensaio manual com instrumentação.

Para ambos os ensaio a norma propõe um corpo de prova como mostra a FIG 2.39 onde l_1 e l_2 devem ser maiores que 60mm e b_1 e b_2 deve ser maior que 40mm. Os dados obtidos no ensaio são o torque máximo e o ângulo de rotação. (ISO, 2012).

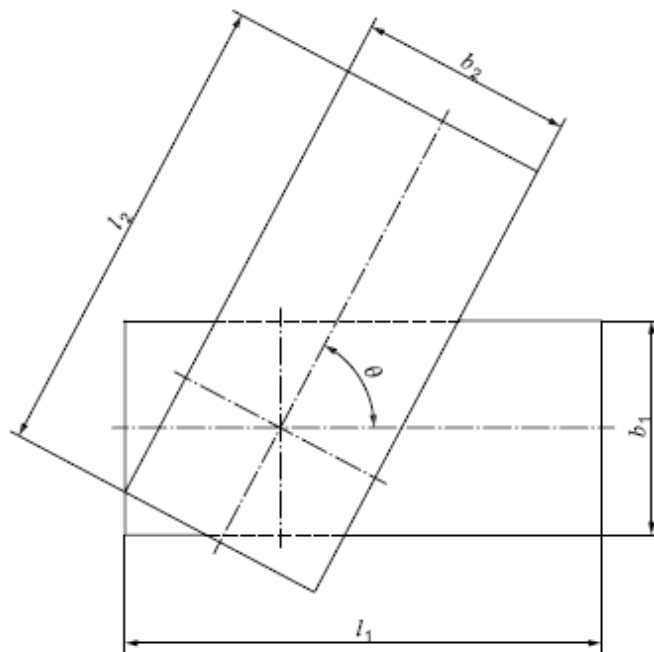


FIGURA 2.39 – Corpo de prova para ensaio de torção
FONTE: ISO, 2012.

2.5.2.6.1. Dispositivo de torção automatizado

Cota (2015) propôs um equipamento para ensaio de torção automatizado e instrumentado como mostra a FIG 2.40. A letra D representa a chave de desligar, ligar e escolher a direção do motor fixado na base BM. Para fornecer e controlar a corrente e tensão é utilizado o controlador E até que atinja a ruptura do corpo de prova. Para finalizar o ensaio existe o fim de curso G que corta a alimentação do motor, para avaliar a inclinação é utilizado um medidor digital de base magnética H (COTA, 2015). O equipamento se torna uma solução compacta e de fácil utilização para ensaios de torção.

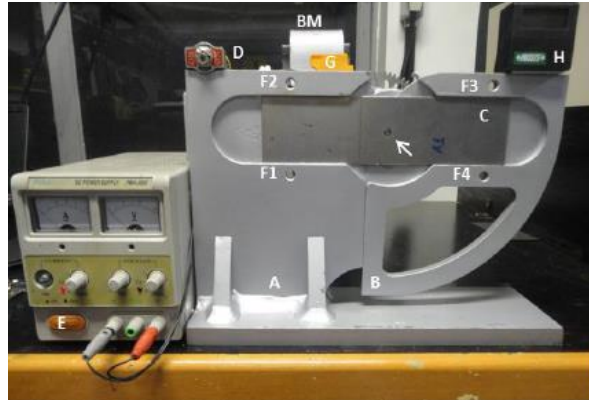


FIGURA 2.40 – Dispositivo para Ensaio de Tração
FONTE: COTA, 2015.

Para movimentação do dispositivo é utilizado um motor de corrente contínua com excitação em série, que possui o benefício de alteração da velocidade com a variação da tensão de alimentação e apresentam torque constante para todas as velocidades (WEG, 2007).

Esses motores são constituídos dos seguintes elementos principais: o estator (composto por carcaça, polos de excitação, enrolamento do campo, polos de comutação e conjunto de escovas) e o rotor (composto por núcleo magnético, enrolamento da armadura e o comutador eixo). Nos motores de excitação em série o enrolamento do campo é ligado em série com o enrolamento da armadura e a rotação é controlada por meio da tensão da armadura, esta máquina possui um alto torque de partida (KOSOW, 1982).

A FIG 2.41 apresenta a curva característica do motor, é interessante observar que com a diminuição do conjugado ocorre o aumento da velocidade tendendo ao infinito (PAIXÃO, 2009). Conjugado é a soma das forças que atuam sobre os condutores do induzido ou a carga que o motor deve movimentar (WEG, 2007).

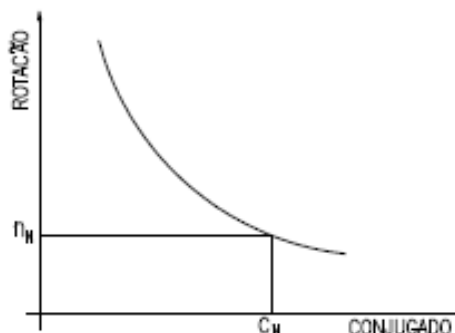


FIGURA 2.41 – Curva Característica do Motor com Excitação em Série
FONTE: WEG, 2007.

A Potência Útil (P_u) ou potência disponível no eixo é calculada utilizando a EQUAÇÃO (2.3). Onde U é a Tensão de Alimentação, I_n é a corrente nominal e η o rendimento do motor (WEG,2007).

$$P_u (W) = U (V) * I_n (A) * \eta \quad (2.3)$$

Já a velocidade no eixo do motor pode ser definida segundo a EQUAÇÃO (2.4) conhecida como a Equação Fundamental da Velocidade do Motor CC onde, N é a velocidade de rotação do motor em rpm, Φ é o fluxo magnético, k é uma constante da máquina, V_a Tensão Aplicadas na Armadura, $I_a R_a$ é a queda de tensão na armadura, BD é a queda de tensão nas escovas

$$N = \frac{V_a - (I_a R_a + BD)}{k\Phi} \quad (2.4)$$

As equações nos permitem prever e analisar o desempenho de um motor de corrente contínua. Por exemplo, se fluxo magnético é enfraquecido o motor tende a disparar, se o denominador da equação tende à zero a velocidade se aproxima do infinito. Do mesmo modo, mantendo a corrente e o fluxo constante a variação da tensão aplicada é diretamente proporcional à velocidade. (KOSOW, 1982).

O Torque do motor pode ser determinado através da EQUAÇÃO (2.5) onde T é o Torque (lb.pé), k é uma constante da máquina, Φ é o fluxo magnético e I_a a corrente na armadura.

$$T = k \Phi I_a \quad (2.5)$$

A equação demonstra que o torque é função do fluxo e da corrente da armadura sendo independente da velocidade, porém ambos são função do fluxo magnético, dessa forma, segundo Kosow (1982), a velocidade do motor depende do torque.

3. METODOLOGIA

O trabalho tem como objetivo a instrumentação do dispositivo de torção automatizado recém-desenvolvido por Cota (2015), propiciando a geração de curvas para análise e parametrização do ensaio em diferentes condições, demonstrando as potencialidades do equipamento. Para alcançar este objetivo o trabalho obedeceu algumas etapas apresentadas na FIG 3.1:

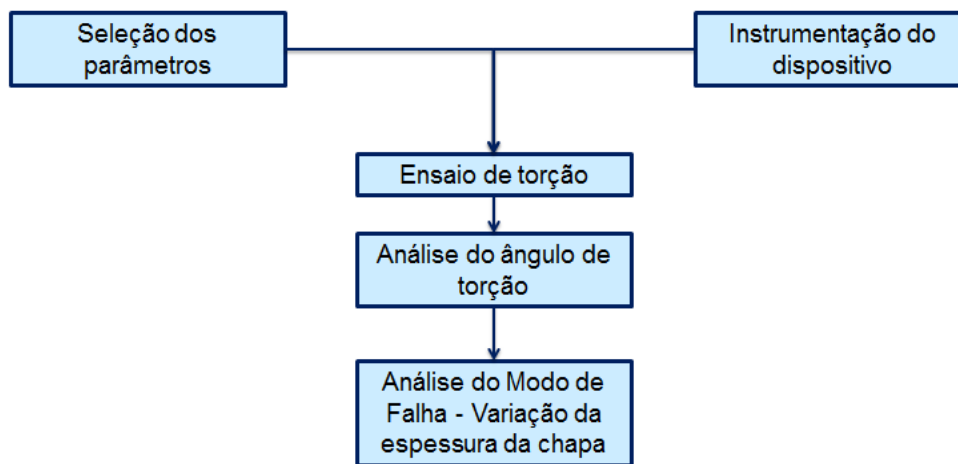


FIGURA 3.1 – Etapas Desenvolvidas no Trabalho

FONTE: AWS, 2002.

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica em busca da melhor forma de instrumentar o dispositivo atendendo as seguintes premissas: repetibilidade, confiabilidade e ser capaz de monitorar cada instante do ensaio. Resultando em informações que propicie a análise do ensaio quanto: o momento da ruptura, a propagação da trinca e a relação entre a resistência a torção e os parâmetros de soldagem

Os ensaios citados nas patentes: PI8807010A, US3,212,326, no modelo de utilidade CN202649056U e na norma ISO (2012) citam sucintamente a forma de instrumentação. Por exemplo, a norma ISO diz que no teste de torção instrumentado é utilizado um torquímetro manual, elemento no qual é aplicado a força para romper o corpo de prova.

Por se tratar de um ensaio automatizado, cujo elemento de força é elétrico, alguns parâmetros do servomotor foram monitorados indicando a resistência à torção do corpo de

prova. Para garantir a confiabilidade e a repetibilidade, os ensaios foram comparados com os resultados de ultrassom e metalografia, além da comparação entre os corpos de prova.

3.1. Instrumentação do dispositivo

Wung (2000) realiza a análise do ensaio de torção avaliando um gráfico do torque resistivo do ensaio, apresentado no eixo “y” o torque em função do ângulo de torção apresentado em “x”. A determinação do torque pode ocorrer de diferentes formas.

Cota (2015) em seus estudos preliminares de avaliação do equipamento, calculou o torque utilizando a curva de torque do motor que informa o torque em função da potência de alimentação. Para determinar potência foi multiplicada a corrente no momento da ruptura pela tensão de alimentação do motor, considerada constante durante o ensaio. Levando em conta as relações de transmissão e os rendimentos da transmissão e do motor foi definido um torque para o momento de ruptura.

A corrente foi mensurada pelo indicador analógico da fonte, sendo impreciso uma vez que, depende da observação de uma pessoa. A tensão foi considerada constante, porém, segundo Kosow (1982), com a variação da velocidade do ensaio ocorre a mudança na tensão de alimentação. Outro ponto é que foi possível mensurar apenas o ponto de ruptura, não possibilitando a análise de todos os momentos do ensaio. Os testes foram importantes para verificar o funcionamento do equipamento, porém não permitiram sua parametrização e análise dos modos de falha.

Pesquisando a respeito de equipamentos que fossem capazes de monitorar os parâmetros do motor durante todo o ensaio, traçando uma curva característica, foi definido que seria utilizado o sistema IMC SAP V4Ti (FIG 3.2) que possui os seguintes padrões de funcionamento (TAB 3.1):

TABELA 3.1 – Dados Técnicos do Equipamento de Aquisição

Variável	Faixa	Resolução	+/- Erro Al.
Tensão	-100,0 a 100,0 V	0,1 V	1%
Taxa de Amostragem	5000	Hz	0,1%

FONTE: IMC, 2014.



FIGURA 3.2 – Equipamento de Aquisição de Dados Utilizado

O software de aquisição de dados gera um gráfico apresentado na FIG 3.3. No eixo “y” têm-se os valores de tensão de alimentação do motor (V) e em “x” os valores de tempo de ensaio que podem ser convertidos em ângulo de torção.

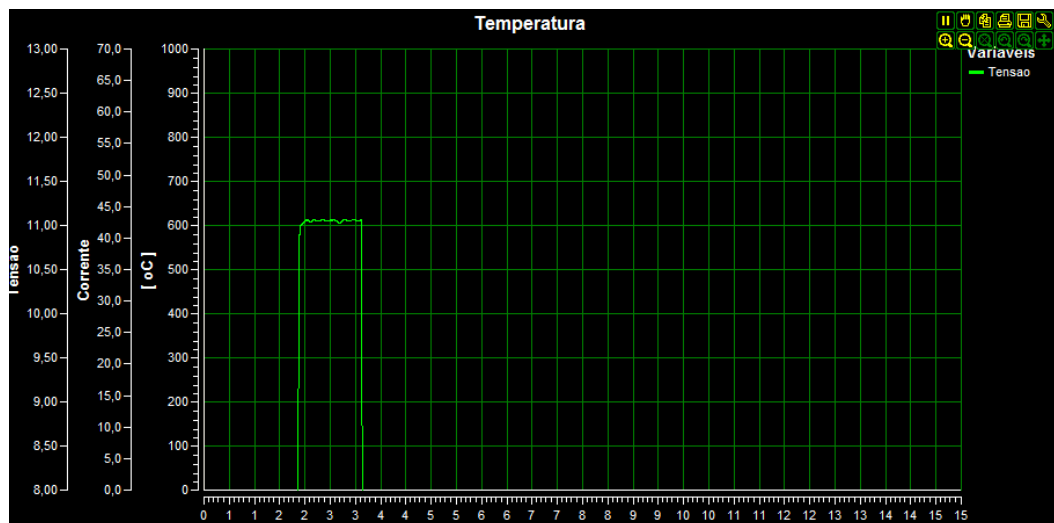


FIGURA 3.3 – Gráfico gerado pelo programa SAP V4TI

Esta ferramenta do software não permite a visualização de diferentes curvas no mesmo gráfico e dificulta a realização de análises de áreas específicas devido à interface pouco amigável. Por isso, foi utilizada outra ferramenta do software: a geração de um banco de dados no formato “.txt”, que foi exportado para um arquivo Excel® (FIG 3.4).

Os dados foram tratados para uma melhor apresentação. Os gráficos foram ajustados para que iniciassem no mesmo momento e foi utilizado uma média móvel entre 9 períodos de forma a absorver variações sazonais.

A média móvel é realizada calculando a média aritmética de “k” valores de uma série temporal segundo a EQUAÇÃO (3.1):

$$M_t = \frac{Z_t + Z_{t-1} + \dots + Z_{t-k+1}}{k} \quad (3.1)$$

Onde M_t é o valor da média, k é o número de períodos e Z os valores da série.

Segundo Levine (2000), quanto maior o número de períodos da série, agrupados pela média móvel, maior será o filtro aplicado, diminuindo a influência dos ruídos. No caso do ensaio realizado, como a taxa de aquisição de dados é 5kHz, pequenas variações afetam a série temporal e dificultam a análise sendo necessária uma avaliação da tendência. Quando uma série apresenta muitas irregularidades, é comum aplicar médias móveis para gerar tendência. É importante selecionar um número ímpar de períodos, para que o resultado seja colocado em um período central que tem correspondência na série.

O equipamento SAP V4Ti realiza um filtro utilizando a mesma técnica de média móvel, porém com um valor padrão de duzentos períodos. Para o tratamento via Excel®, foram selecionados nove períodos para propiciar a análise de variações pontuais caso elas venham a existir, resultando no exemplo apresentado na FIG 3.4

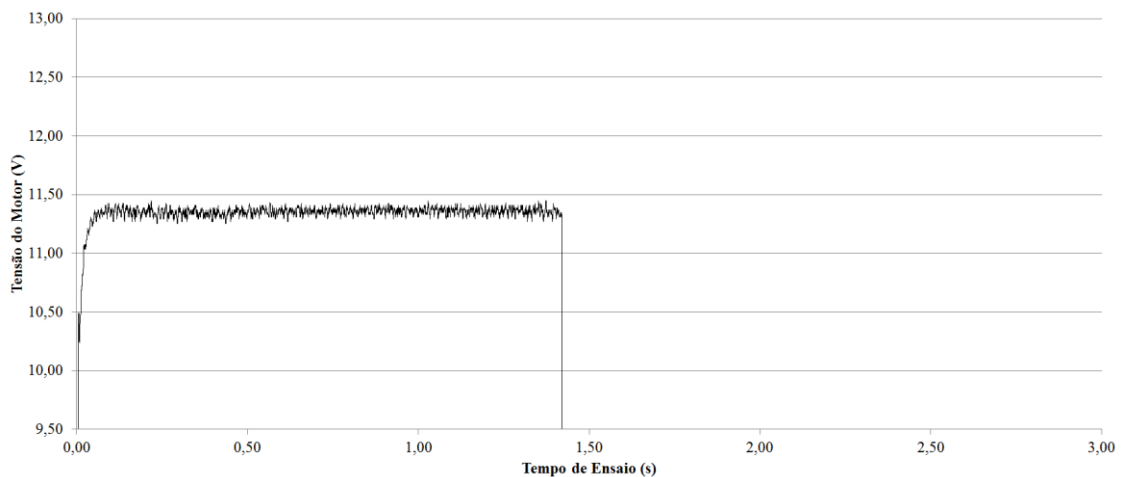


FIGURA 3.4 – Exemplo de Curva do Ensaio de Torção Instrumentado

A curva apresentada é de um ensaio sem carga, ou seja, não havia corpo de prova posicionado no equipamento. Para este caso, a parte inicial da curva retrata o início do movimento do equipamento. Ocorre a elevação rápida da tensão de alimentação e depois a manutenção da tensão em torno de 11V. Esta estabilização é esperada uma vez que o motor é de corrente contínua, a fonte de tensão constante foi parametrizada com 12V e a única

resistência ao movimento é o peso da estrutura. A diferença entre a tensão parametrizada e a tensão medida se deve: a perda de carga do sistema, ao peso da estrutura e a calibração do sistema de medição da fonte. A instrumentação será utilizada para ensaios com corpos de prova sendo esperadas curvas que sejam sensíveis à resistência ao movimento traçando uma curva característica do ensaio de torção automatizado.

Nos motores de corrente contínua, é esperado que a variação da tensão alterasse a velocidade do motor e o torque fosse contínuo para todas as velocidades. O ensaio, porém, tem uma peculiaridade que o torque resistivo aplicado no motor varia sendo difícil a sua mensuração direta. Segundo Kosow (1982), com o aumento do torque (T) no motor de corrente contínua ocorre o aumento do fluxo magnético ($k\Phi$), apresentado na EQUAÇÃO 2.5. O fluxo magnético é inversamente proporcional a velocidade do motor (N) e a tensão de alimentação (V_a), demonstrado na EQUAÇÃO 2.4. Assim, com o aumento do torque ocorre a diminuição da tensão de alimentação do motor. Uma variável que esta diretamente ligada ao comportamento do ensaio é a velocidade de torção.

3.2. Seleção dos parâmetros

Foram definidos 15 diferentes parâmetros de soldagem buscando abranger pontos satisfatórios e pontos fora das características desejadas. Para validar esses parâmetros foram construídos 45 corpos de prova que foram ensaiados via ultrassom, realizando ensaio de arrancamento manual e metalografia para definição das dimensões dos corpos de prova.

3.2.1. Material

Neste trabalho, foi utilizado um aço comum baixa liga SAE 1015 de composição química demonstrado na TAB 3.2, com revestimento Galvalume® composto de 55% de alumínio, 43,4% de zinco e 1,6% de silício, depositados na chapa através de um processo de imersão a quente na quantidade controlada de 50 gramas por centímetro cúbico. As espessuras dos corpos de prova são 0,91mm (Bitola 20), 1,21mm (Bitola 18) e 1,52mm (Bitola 16). Segundo a norma 00920/02 da Fiat Automóveis (2007), essas espessuras de chapa são utilizados em regiões como a longarina posterior do veículo e o montante da coluna “B”.

TABELA 3.2 – Composição Química do Material Utilizado

	C (max)	Mn (max)	P (max)	S (max)	Revestimento (g/cm ²)
Composição	0,15	0,6	0,04	0,04	50

FONTE: ARCELORMITTAL, 2015.

Os corpos de prova foram padronizados segundo a norma AWS/SAE D8.9:2002 conforme a FIG 3.5, com 138mm de comprimento e 60mm de largura e cortados em uma guilhotina mecânica. A vantagem de utilizar essas dimensões é que são compatíveis tanto para o ensaio de torção instrumentado como para o ensaio de cisalhamento, utilizando o mesmo corte de chapa para ambos.

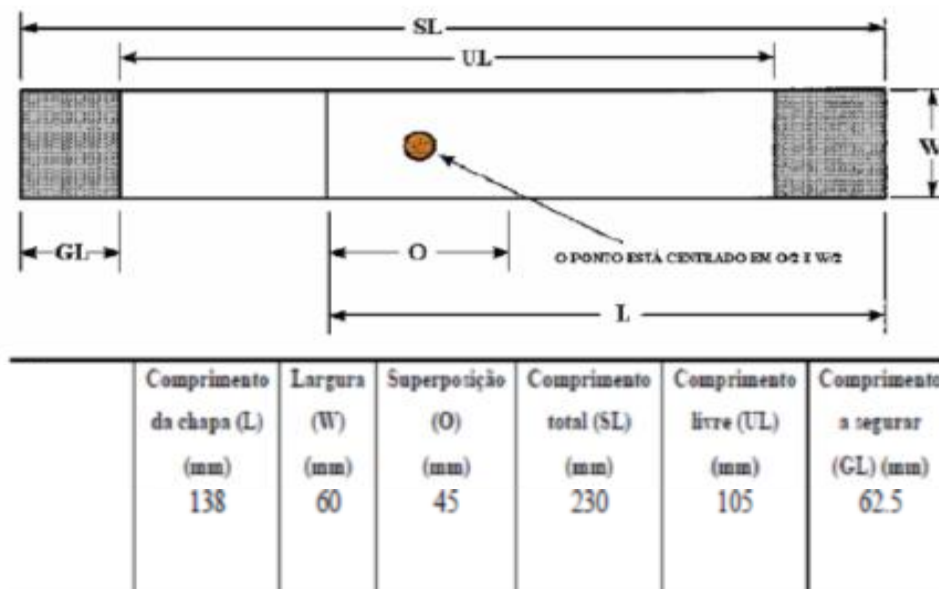


FIGURA 3.5 – Dimensões do corpo de prova

FONTE: Adaptado de AWS, 2002.

Antes do ensaio as amostras foram limpas e desengorduradas utilizando o solvente tolueno, mantendo a superfície uniforme e livre de partículas contaminantes.

3.2.2. Máquina

A máquina de soldagem a ponto é uma variável do processo sendo que pontos de solda realizados com os mesmos parâmetros em máquinas diferentes apresentam características diferentes. Isso se deve ao fato que itens como tamanho dos braços, material dos braços e do porta eletrodo, configuração da pinça, tipo de atuador de força, influenciem

diretamente no ponto de solda. Dessa forma, o conhecimento do equipamento e suas limitações são de extrema importância para o resultado dos ensaios.

Na FIG 3.6 apresenta-se a máquina utilizada para realizar os pontos. O equipamento possui um transformador convencional com a frequência da rede de 60Hz, alimentação 440V, potência nominal de 54kVA e potência permanente máxima de 38kVA. Um controlador convencional da marca Fase, modelo Weld334m. Um sistema de refrigeração externo individual, ligado em paralelo e adaptado para essa aplicação. A pinça também é do fabricante Fase, modelo X/4-200, manual, de forma construtiva “X”, com acionamento pneumático. Como não existe alimentação 440V na instalação foi utilizado um autotrafo monofásico 15kVA e 60Hz de 220V para 440V da fabricante Eletro Transformadores Ltda.

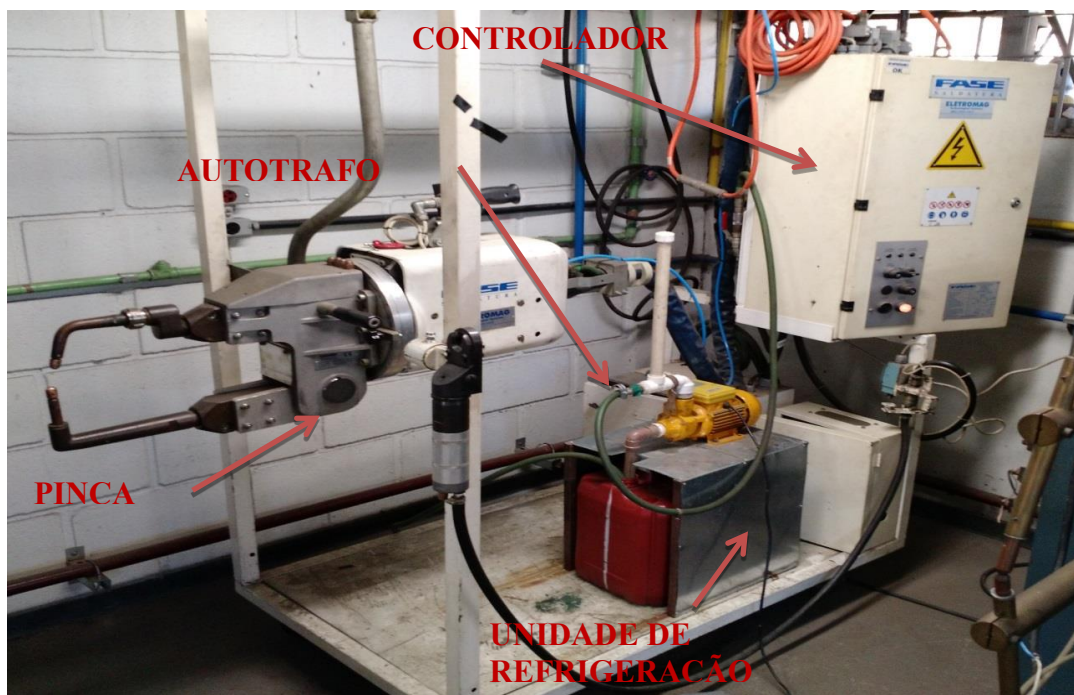


FIGURA 3.6 – Pinça de solda Fase X/4-200

Para a parametrização do controlador foi utilizado um aparelho denominado HHT (*Hand Held Terminal*) ou TP (Terminal de Programação) demonstrado na FIG 3.7, com este equipamento é possível ter uma interface com o controlador e inserir os parâmetros de soldagem.

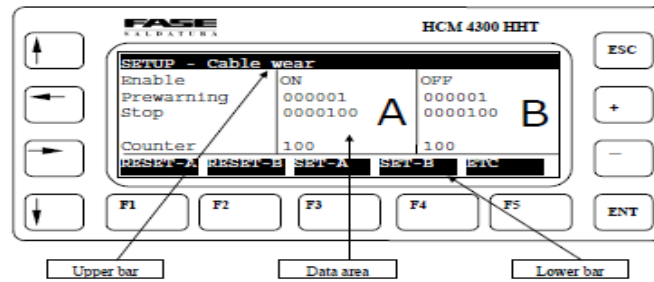


FIGURA 3.7 – Esquemático do Terminal de Programação Utilizado
 FONTE: GF WELDING, 2005.

Durante todos os ensaios foi utilizado o eletrodo Classe 20 segundo norma da RWMA. No porta eletrodo fixo foi utilizado um eletrodo modelo “A” e no porta eletrodo móvel inferior foi utilizado um eletrodo “B” conforme FIG 3.8. Os eletrodos se diferem no raio “R” e distância “C” sendo que o eletrodo “B” possui maior raio, possuindo maior área de contato com peça. As dimensões seguem o código 52120124 Norma 62972/30 Fiat Automóveis.

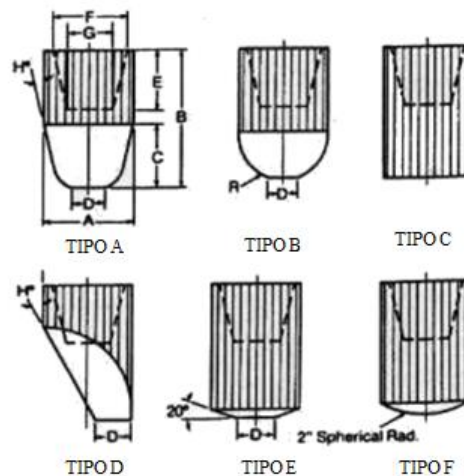


FIGURA 3.8 – Tipos de eletrodo utilizados
 FONTE: Adaptado de TAYLOR WINFIELD.*

Foi realizada a calibração dos parâmetros de força e corrente do equipamento antes de iniciar os testes. Para a calibração foi utilizado um equipamento Tecna TE1600, este procedimento é de fundamental importância para a garantia de que os valores impostados no programa são de fato os valores fornecidos pelo equipamento.

3.2.3. Parâmetros

Na TAB 3.3 apresentam-se os parâmetros de soldagem utilizados na confecção dos corpos de prova. Foi utilizado grande variação do tempo de soldagem nos ensaios para que se possa analisar o equipamento de torção com maior variabilidade de parâmetros.

TABELA 3.3 – Parâmetros Utilizados

IDENT.	QUANT.	CORRENTE DE SOLD. (kA)	TEMPO DE SOLD. (Ciclos)	PRESSÃO (daN)	ESP. CHAPA 1 (mm)	ESP. CHAPA 2 (mm)
P.1.1.2.25	3	4,25	10	350	0,91	0,91
P.1.2.2.25	3	4,25	30	350	0,91	0,91
P.1.3.2.25	3	4,25	50	350	0,91	0,91
P.1.4.2.25	3	4,25	70	350	0,91	0,91
P.1.5.2.25	3	4,25	90	350	0,91	0,91
P.2.1.2.25	3	5	10	350	0,91	0,91
P.2.2.2.25	3	5	30	350	0,91	0,91
P.2.3.2.25	3	5	50	350	0,91	0,91
P.2.4.2.25	3	5	70	350	0,91	0,91
P.2.5.2.25	3	5	90	350	0,91	0,91
P.3.1.2.25	3	5,75	10	350	0,91	0,91
P.3.2.2.25	3	5,75	30	350	0,91	0,91
P.3.3.2.25	3	5,75	50	350	0,91	0,91
P.3.4.2.25	3	5,75	70	350	0,91	0,91
P.3.5.2.25	3	5,75	90	350	0,91	0,91

O efeito Joule demonstra que os parâmetros que influenciam na geração de calor são: corrente, tempo de soldagem e resistência elétrica. A resistência é determinada pelo material utilizado e pelo parâmetro de pressão. Nos ensaios foi optado por manter a pressão constante e variar os parâmetros que possuem influência direta na geração de calor do ponto de solda, corrente e tempo de soldagem. A geração de calor esta relacionada a variação do diâmetro do ponto, com o aumento do calor ocorre o aumento do diâmetro e por consequência aumento da resistência mecânica do ponto como demonstrado por Chao (2003).

Para verificar se os parâmetros utilizados na soldagem resultaram em pontos dentro das especificações de normas foram realizados testes de ultrassom, teste de arrancamento e mensuração das dimensões geométricas via metalografia. Dessa forma, não deve ocorrer a ruptura do ponto de solda no ensaio de arrancamento por talhadeira, deve

atender as características de continuidade do ultrassom e atender as características geométricas do ponto de solda citados na Norma 9.50171 Fiat Automóveis. A indentação deve ser de 10% a 30% da espessura da chapa mais fina, segundo a Norma 00920/02 da Fiat Automóveis e o diâmetro do ponto deve ser maior que 4 vezes a raiz quadrada da espessura para chapas com menos de 1 mm de espessura e 5 vezes a raiz quadrada da espessura para chapas de 1mm a 3,5mm.

As dimensões geométricas podem ser mensuradas tanto no teste de arrancamento como na metalografia. Neste trabalho, foi utilizando o software Image J para obter as dimensões a partir das imagens obtidas por metalografia.

3.2.4. Ensaio de ultrassom

O ensaio de ultrassom foi realizado com o equipamento RSWA (*Resistance Spot Weld Analyzer*) da marca Tessonic. Esse equipamento é de fácil manipulação sendo necessária apenas uma calibração inicial da espessura de chapa e a definição de parâmetros, como material e limites para definição de defeitos.

Os parâmetros utilizados para a definição de defeitos são:

- Ponto Queimado: ponto com indentação superior a 30% da soma das espessuras das chapas.
- Ponto Solto: medida de espessura igual ou variando em 5% da espessura da chapa em contato com o transdutor do ultrassom.
- Ponto Pequeno: apresenta ecos intermediários de potência entre 20% e 60% da energia total, na distância referente a espessura da chapa
- Ponto com Defeito Interno: apresenta ecos intermediários na espessura da chapa quando é movimentado o transdutor.
- Ponto Colado: apresenta ecos intermediários de alta potência e ecos na espessura da chapa.

A realização do ensaio se inicia com a aplicação do gel de acoplamento em um local da chapa sem ponto de solda, para que seja realizada a calibração do aparelho, verificando a velocidade de propagação da onda no material e a espessura da chapa.

Posteriormente, são realizadas as medidas no ponto de solda posicionando o cabeçote sobre o ponto de solda e iniciado a medição. O aparelho tem como resultado o diâmetro do ponto, a indentação de ambos os lados do ponto de solda, uma caracterização do

ponto e uma imagem onde as áreas verdes apresentam áreas onde ocorreu fusão e em vermelho áreas sem fusão como apresentado na FIG 3.9.

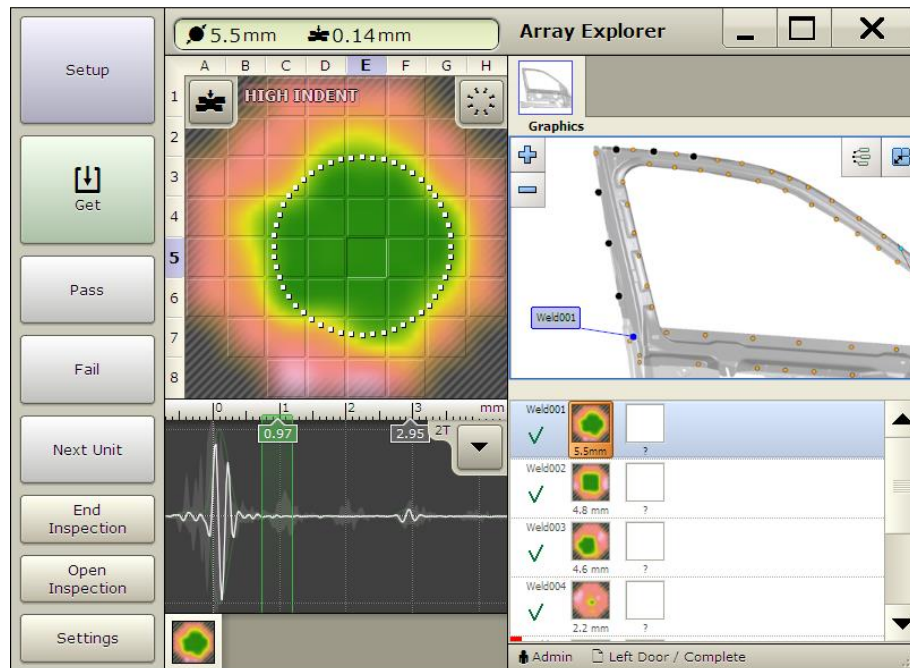


FIGURA 3.9 – Equipamento de Ultrassom
 FONTE: TESSONICS.*

3.2.5. Ensaio metalográfico

Os ensaios metalográficos realizados seguiram o seguinte procedimento, conforme sugerido por Rohde, (2010):

1. Realização de um corte no centro do ponto conforme FIG 3.10 na direção A-A utilizando um guilhotina mecânica. Todos os corpos de prova foram cortados na mesma direção.
2. Embutimento com baquelite
3. Lixamento na politriz com lixas de granulometria decrescente (80, 220, 400, 600, 1200) mudando-se de direção (90°) em cada lixa até desaparecerem as marcas do lixamento anterior.
4. Polimento mecânico manual com abrasivo alumina de 1 μ .
5. Ataque químico com solução de Nital (Ácido Nítrico e Álcool) 2% seguido de lavagem com água e secagem por jato de ar quente.

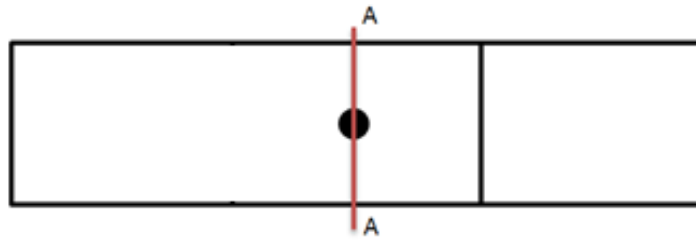


FIGURA 3.10 – Esquema de corte para realização dos ensaios metalográficos

Para análise, foram utilizados a lupa estereoscópica Olympus SZ-CTV e o microscópio Olympus BX60M com fotômetro e câmera de captura de imagem, apresentados na FIG 3.11 e as imagens foram capturadas utilizando o software HLImage.



FIGURA 3.11 – Microscópios utilizados

3.2.5. Ensaio de arrancamento

Segundo a norma 9.50171 da Fiat Automóveis (2015), o ensaio de arrancamento deve ser realizado na linha de produção inserindo uma talhadeira entre as chapas e aplicado a força através de golpes de martelo na talhadeira. Caso o ponto não se rompa, é considerado como ponto satisfatório. Caso se rompa, deve ser mensurado o diâmetro do ponto em duas direções δ_1 e δ_2 apresentados na FIG 3.12 e calculado o diâmetro resultante pela média aritmética entre eles. O ensaio foi realizado com uma das chapas fixados em uma morsa e utilizando uma talhadeira e um martelo como recomendado. Os diâmetros foram mensurados utilizando um paquímetro analógico Mitutoyo com 0,05mm de resolução.

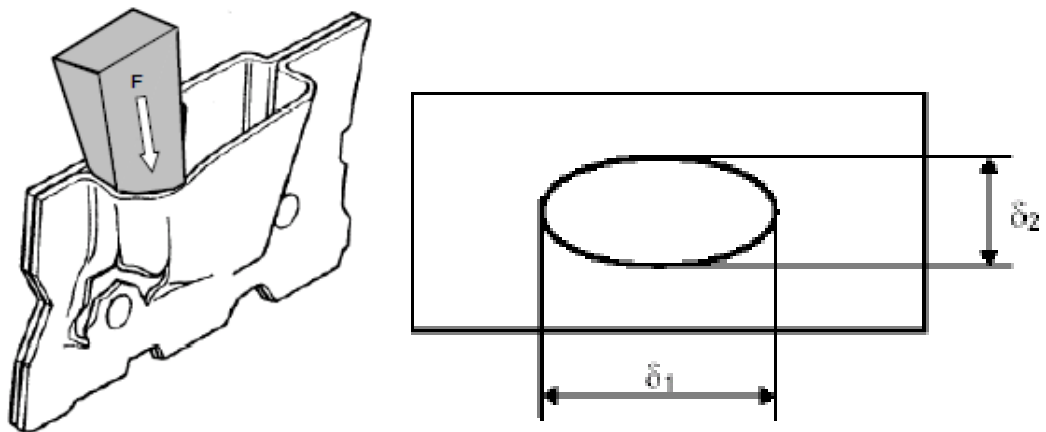


FIGURA 3.12 – Ensaio de Arrancamento por Talhadeira

FONTE: Adaptado da Norma 9.50171, da Fiat Automóveis (2015).

3.3. Ensaio de torção

O equipamento para o ensaio de torção automatizado desenvolvido por Cota (2015) e apresentado na FIG 3.13, possui a capacidade de ensaiar amostras soldadas com combinações de espessuras que somadas podem variar de 1 a 6mm. O ensaio ainda não havia sido instrumentado, nem testado com diferentes parâmetros e condições. Para a realização destes testes foram construídos corpos de prova e seguido o procedimento descrito por Cota (2015) possibilitando a avaliação das curvas geradas em função das variações dos parâmetros de soldagem.

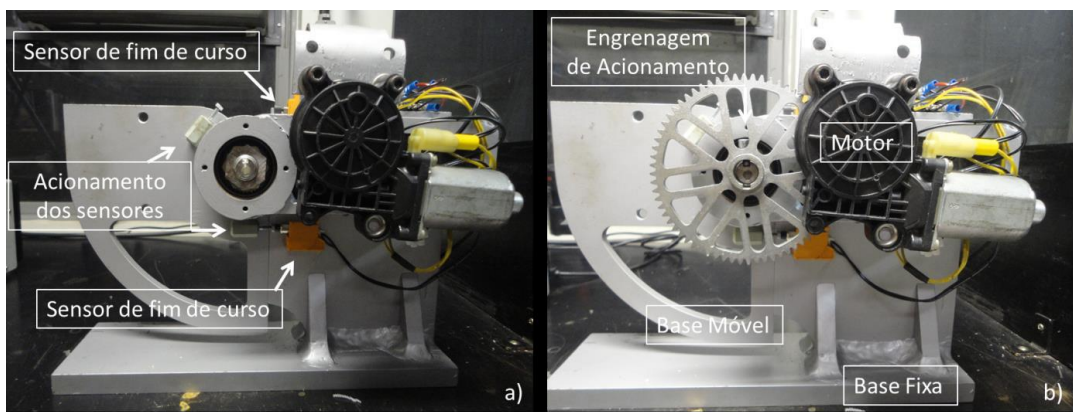


FIGURA 3.13 – Equipamento de Torção de Solda a Ponto

FONTE: COTA, 2015.

3.3.1. Procedimento do ensaio de torção

O equipamento é acionado por um motor elétrico BOSCH do tipo FPG (código do modelo: 0 130 821 979) de tensão nominal de 24V e 11,6W de potência (BOSCH, 2005). Para alimentação do motor foi utilizado uma fonte de alimentação DC simétrica digital da marca POLIMED modelo PMI 3005D capaz de fornecer até 30V de tensão e 5A de corrente. Nos testes foi utilizado uma tensão de 12V. Para a transmissão do movimento é utilizado um pinhão de 10 dentes e uma coroa de 68 dentes resultando em uma relação de transmissão 1:6,8.

Para mensurar o ângulo, foi utilizado o medidor de inclinação digital da marca INSIZE modelo 2178-1 com capacidade de medição de 0-180°, resolução de 0,1° e exatidão de $\pm 0,1^\circ$ que foi fixado na parte móvel do dispositivo por sua base magnética para registrar os ângulos de torção das amostras. O equipamento de torção é limitado a torcer os corpos de prova até 40°.

O ensaio foi realizado posicionando o corpo de prova no equipamento, iniciando a aquisição de dados, acionando o equipamento, seguindo sequência como mostra a FIG 3.14. Para interrupção do ensaio foi utilizado o sensor fim de curso e a chave de acionamento (FIG 3.13). Após a parada do ensaio a aquisição de dados é interrompida e o corpo de prova torcido retirado do equipamento.



FIGURA 3.14 – Funcionamento do dispositivo

FONTE: COTA, 2015.

3.3.1. Corpos de prova do ensaio de torção

Os corpos de prova para o ensaio de torção foram confeccionados utilizando o mesmo equipamento, eletrodos, material e dimensões dos corpos de prova para seleção de parâmetros.

Inicialmente foi realizado o ensaio de torção utilizando os corpos de prova confeccionados para o ensaio de ultrassom, seguindo os parâmetros e quantidades da TAB 3.4. Buscando avaliar o comportamento geral da curva em função da variação do parâmetro.

TABELA 3.4 – Parâmetros Utilizados

IDENT.	QUANT.	CORRENTE DE SOLD. (kA)	TEMPO DE SOLD. (Ciclos)	PRESSÃO (daN)	ESP. CHAPA 1 (mm)	ESP. CHAPA 2 (mm)
P.1.1.2.25	1	4,25	10	350	0,91	0,91
P.1.2.2.25	1	4,25	30	350	0,91	0,91
P.1.3.2.25	1	4,25	50	350	0,91	0,91
P.1.4.2.25	1	4,25	70	350	0,91	0,91
P.1.5.2.25	1	4,25	90	350	0,91	0,91
P.2.1.2.25	1	5	10	350	0,91	0,91
P.2.2.2.25	1	5	30	350	0,91	0,91
P.2.3.2.25	1	5	50	350	0,91	0,91
P.2.4.2.25	1	5	70	350	0,91	0,91
P.2.5.2.25	1	5	90	350	0,91	0,91
P.3.1.2.25	1	5,75	10	350	0,91	0,91
P.3.2.2.25	1	5,75	30	350	0,91	0,91
P.3.3.2.25	1	5,75	50	350	0,91	0,91
P.3.4.2.25	1	5,75	70	350	0,91	0,91
P.3.5.2.25	1	5,75	90	350	0,91	0,91

Posteriormente, com o objetivo de avaliar a repetibilidade do ensaio foi realizado três ensaios de torção para os mesmos parâmetros de soldagem seguindo a identificação da TAB 3.5.

TABELA 3.5 – Parâmetros Utilizados

IDENT.	QUANT.	CORRENTE DE SOLD. (kA)	TEMPO DE SOLD. (Ciclos)	PRESSÃO (daN)	ESP. CHAPA 1 (mm)	ESP. CHAPA 2 (mm)
T.1.1.2.1	3	4,25	10	350	0,91	0,91
T.1.2.2.1	3	4,25	30	350	0,91	0,91
T.1.3.2.1	3	4,25	50	350	0,91	0,91
T.1.4.2.1	3	4,25	70	350	0,91	0,91
T.1.5.2.1	3	4,25	90	350	0,91	0,91
T.2.1.2.1	3	5	10	350	0,91	0,91
T.2.2.2.1	3	5	30	350	0,91	0,91
T.2.3.2.1	3	5	50	350	0,91	0,91
T.2.4.2.1	3	5	70	350	0,91	0,91
T.2.5.2.1	3	5	90	350	0,91	0,91
T.3.1.2.1	3	5,75	10	350	0,91	0,91
T.3.2.2.1	3	5,75	30	350	0,91	0,91
T.3.3.2.1	3	5,75	50	350	0,91	0,91
T.3.4.2.1	3	5,75	70	350	0,91	0,91
T.3.5.2.1	3	5,75	90	350	0,91	0,91

3.4. Modo de falha do ensaio de torção

Wung (2001) avaliou a propagação da trinca no ensaio de torção, aumentando a carga aplicada no corpo de prova e depois realizando metalografias do ponto de solda para cada carregamento, chegando a um modo de falha do tipo botão. Já Johnson (1984) avaliou o modo de falha em função do aumento da carga de torção e do diâmetro do ponto chegando aos modos de falha interfacial e de botão.

O equipamento de torção automatizado desenvolvido por Cota (2015) possui a aplicação de torque constante. Para avaliar a propagação da trinca e o modo de falha resultante foi variado o ângulo de parada do ensaio como apresenta a FIG 3.15.

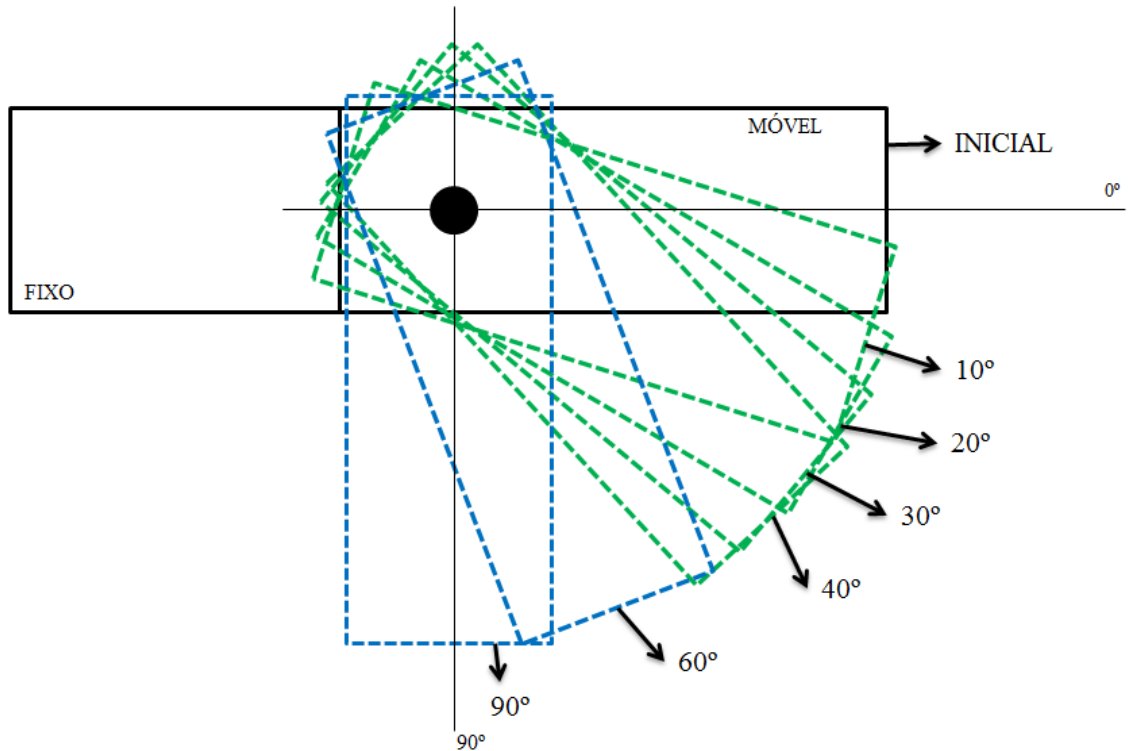


FIGURA 3.15 – Ângulos de Torção do Corpo de Prova

O procedimento para a realização do ensaio se iniciou com a criação de uma escala de ângulos no dispositivo de forma a permitir a parada do ensaio no momento desejado através da atuação manual do sensor fim de curso. Assim, o ensaio era realizado seguindo as etapas do ensaio de torção e interrompido para os ângulos de 10°, 20°, 30° e 40° (limite do equipamento), destacados em verde na FIG 3.15. Para continuar a avaliação do comportamento do ponto de solda, as amostras foram torcidas até 40° no equipamento e posteriormente torcida manualmente até os ângulos de 60° e 90°, destacados em azul.

A torção manual ocorreu, posicionando a parte fixa do corpo de prova em uma morsa deixando livre a parte móvel que foi forçada manualmente e o ângulo mensurado utilizando um goniômetro de aço inoxidável de 25mm.

Inicialmente, foram feitos testes para verificar a sensibilidade das curvas à variação do ângulo. Posteriormente, foi realizada uma rodada de teste verificando qual o impacto da variação do ângulo na propagação da trinca e se seria possível visualizar via metalografia e, por último, teste para checar a relação entre os modos de falha e as curvas geradas.

3.4.1. Testes de sensibilidade da curva de torção

Os corpos de prova construídos para verificar a sensibilidade da curva de torção atendem a todas as premissas dos outros testes e os parâmetros de soldagem utilizados estão apresentados na TAB 3.6. A única variável foi o ângulo de parada do ensaio de torção, dessa forma, os parâmetros de soldagem são os mesmos para todos os pontos. Este parâmetro foi selecionado, pois apresentou resultados satisfatórios nos testes preliminares de ultrassom, arrancamento e o próprio ensaio de torção.

TABELA 3.6 – Parâmetros Utilizados

IDENT.	QUANT	CORRENTE DE SOLD. (kA)	TEMPO DE SOLD. (Ciclos)	PRESSÃO (daN)	ESP. CHAPA 1 (mm)	ESP. CHAPA 2 (mm)
M.10.3.5.22	2	5,75	90	350	0,91	0,91
M.20.3.5.22	2	5,75	90	350	0,91	0,91
M.30.3.5.22	2	5,75	90	350	0,91	0,91
M.40.3.5.22	2	5,75	90	350	0,91	0,91

Nesta etapa foi realizado o ensaio apenas até 40° uma vez que o objetivo era avaliar apenas a relação da curva com o ângulo de parada.

3.4.2. Teste de propagação da trinca

Para análise da propagação da trinca de torção no corpo de prova Wung (2001) realizou uma metalografia da seção transversal do ponto de solda para diferentes carregamentos. Com este mesmo objetivo foi realizado um corte na seção transversal do ponto obedecendo sempre a perpendicularidade em relação a chapa fixa, independente do ângulo de torção, como apresentado na FIG 3.16. Como os corpos de prova são destruídos para a realização da metalografia, cada imagem analisada é realizada em uma amostra diferente específica para cada ângulo de parada. Os parâmetros de soldagem utilizados para a confecção das amostras estão apresentados na TAB 3.7, assim como no ensaio anterior a única variável foi o ângulo de parada, neste caso foram realizados os ensaios com corpos de prova torcidos com 60° e 90°.

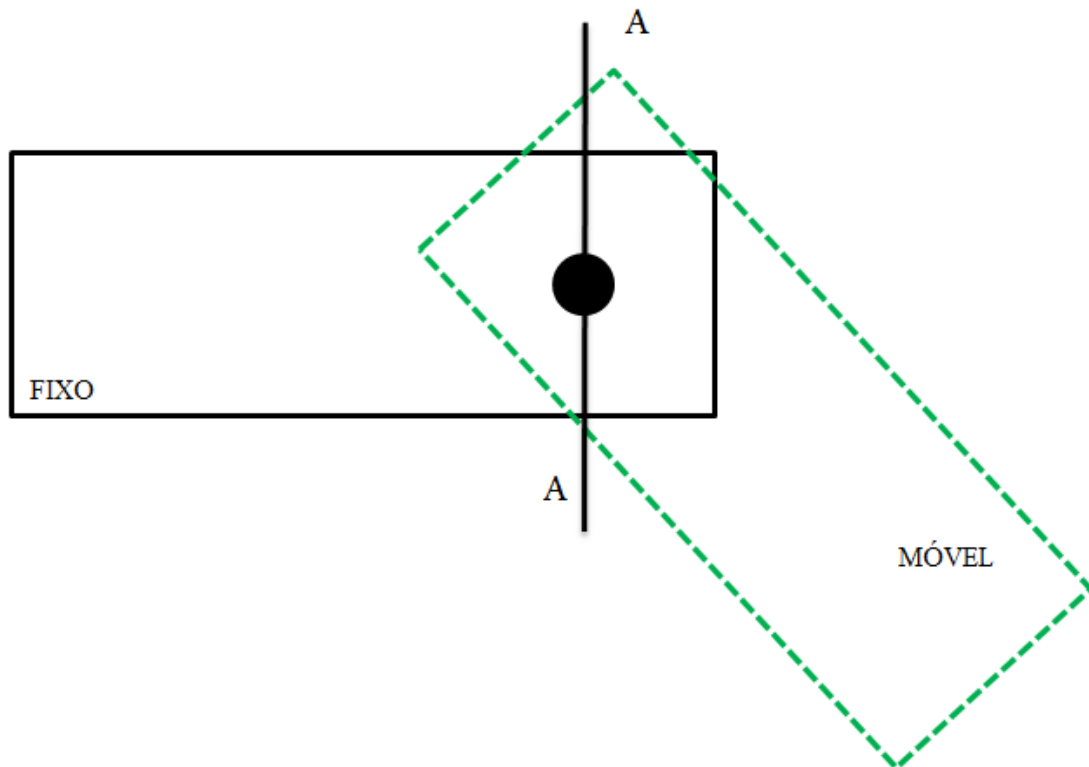


FIGURA 3.16 – Corte para Realização da Metalografia

TABELA 3.7 – Parâmetros Utilizados

IDENT.	QUANT	CORRENTE DE SOLD. (KA)	TEMPO DE SOLD. (Ciclos)	PRESSÃO (daN)	ESP. CHAPA 1 (mm)	ESP. CHAPA 2 (mm)
M.10.3.5.25	2	5,75	90	350	0,91	0,91
M.20.3.5.25	2	5,75	90	350	0,91	0,91
M.30.3.5.25	2	5,75	90	350	0,91	0,91
M.40.3.5.25	2	5,75	90	350	0,91	0,91
M.60.3.5.25	2	5,75	90	350	0,91	0,91
M.90.3.5.25	2	5,75	90	350	0,91	0,91

A realização da metalografia foi realizada seguindo o procedimento utilizado durante a seleção dos parâmetros para os testes.

3.4.3. Modo de falha em função das variáveis do processo

Um das observações realizadas no teste de propagação da trinca foi a tendência da falha se direcionar para o eletrodo tipo “A” de menor raio “R”. Para análise da influência do

formato do eletrodo na propagação da trinca, foram adotadas duas medidas: a variação da espessura das chapas soldadas e a alternância da chapa em contato com cada eletrodo conforme demonstrado na FIG 3.17. A situação 1 apresenta a chapa de maior espessura em contato com o eletrodo de maior raio “B”, já a situação 2 apresenta a chapa de menor espessura em contato com este eletrodo.

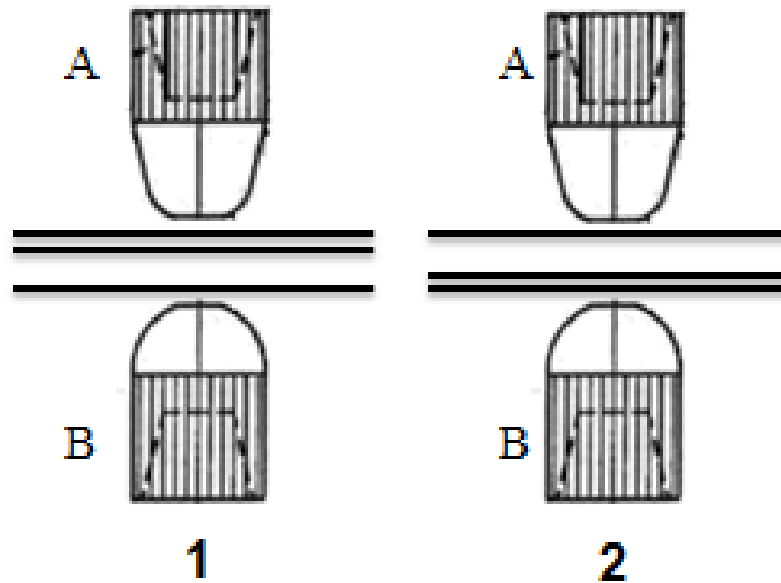


FIGURA 3.17 – 1) Eletrodo “A” em Contato com a Chapa Mais Fina. 2) Eletrodo “A” em Contato com a Chapa Mais Grossa.

As espessuras de chapa utilizadas foram 0,91mm, 1,21mm, e 1,52mm. Cada uma das 3 possíveis combinações de chapa foi testado para as duas situações com a chapa mais fina em contato com o eletrodo “A” e com a chapa mais grossa em contato com este eletrodo como apresenta a TAB 3.8. Para a confecção dos corpos de prova foram utilizados os mesmos parâmetros de soldagem dos ensaios para análise do modo de falha e foram realizados testes com os ângulos de parada de 10°, 20°, 30°, 40°, 60° e 90°.

TABELA 3.8 – Parâmetros Utilizados

IDENT.	QUANT.	CORRENTE DE SOLD. (kA)	TEMPO DE SOLD. (Ciclos)	PRESSÃO (daN)	ESP. CHAPA 1 (mm)	ESP. CHAPA 2 (mm)
M1.10.3.5.12	3	5,75	90	350	0,91	1,21
M1.20.3.5.12	3	5,75	90	350	0,91	1,21
M1.30.3.5.12	3	5,75	90	350	0,91	1,21
M1.40.3.5.12	3	5,75	90	350	0,91	1,21
M1.60.3.5.12	3	5,75	90	350	0,91	1,21
M1.90.3.5.12	3	5,75	90	350	0,91	1,21
M2.10.3.5.12	3	5,75	90	350	1,21	0,91
M2.20.3.5.12	3	5,75	90	350	1,21	0,91
M2.30.3.5.12	3	5,75	90	350	1,21	0,91
M2.40.3.5.12	3	5,75	90	350	1,21	0,91
M2.60.3.5.12	3	5,75	90	350	1,21	0,91
M2.90.3.5.12	3	5,75	90	350	1,21	0,91
M3.10.3.5.12	3	5,75	90	350	0,91	1,52
M3.20.3.5.12	3	5,75	90	350	0,91	1,52
M3.30.3.5.12	3	5,75	90	350	0,91	1,52
M3.40.3.5.12	3	5,75	90	350	0,91	1,52
M3.60.3.5.12	3	5,75	90	350	0,91	1,52
M3.90.3.5.12	3	5,75	90	350	0,91	1,52
M4.10.3.5.12	3	5,75	90	350	1,52	0,91
M4.20.3.5.12	3	5,75	90	350	1,52	0,91
M4.30.3.5.12	3	5,75	90	350	1,52	0,91
M4.40.3.5.12	3	5,75	90	350	1,52	0,91
M4.60.3.5.12	3	5,75	90	350	1,52	0,91
M4.90.3.5.12	3	5,75	90	350	1,52	0,91
M5.10.3.5.12	3	5,75	90	350	1,21	1,52
M5.20.3.5.12	3	5,75	90	350	1,21	1,52
M5.30.3.5.12	3	5,75	90	350	1,21	1,52
M5.40.3.5.12	3	5,75	90	350	1,21	1,52
M5.60.3.5.12	3	5,75	90	350	1,21	1,52
M5.90.3.5.12	3	5,75	90	350	1,21	1,52
M6.10.3.5.12	3	5,75	90	350	1,52	1,21
M6.20.3.5.12	3	5,75	90	350	1,52	1,21
M6.30.3.5.12	3	5,75	90	350	1,52	1,21
M6.40.3.5.12	3	5,75	90	350	1,52	1,21
M6.60.3.5.12	3	5,75	90	350	1,52	1,21
M6.90.3.5.12	3	5,75	90	350	1,52	1,21

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Instrumentação do dispositivo

Para gerar resultados que sejam passíveis de análise é importante a instrumentação do dispositivo de ensaio de tração automatizado. A instrumentação foi realizada com o equipamento SAP V4Ti e os dados coletados plotados em um gráfico utilizando a ferramenta Excel®. A FIG 4.1 apresenta um destes gráficos com a curva característica do ensaio de torção automatizado. Com base na teoria dos motores elétricos de corrente contínua demonstrada por Kosow (1982) foi possível identificar neste ensaio três regiões principais. A região “I” representa o início da alimentação do motor elétrico causando a movimentação do dispositivo, com aumento da velocidade do ensaio, ocorre o aumento da tensão do motor. A região “II” representa a resistência do ponto de solda ao movimento do dispositivo, com a diminuição da velocidade do ensaio ocorre a diminuição da tensão de alimentação do motor. A região “III” demonstra a estabilização da tensão ou o movimento constante do dispositivo sem variação da velocidade.

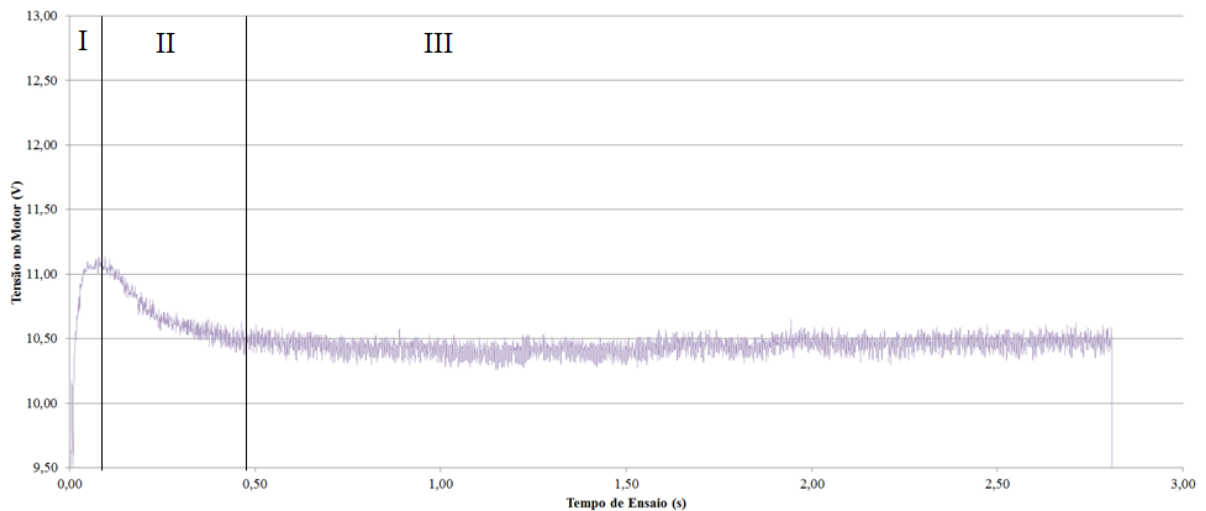


FIGURA 4.1 – Curva Característica do Ensaio de Torção

4.1.1. Análise da repetibilidade das medições e do ensaio

A avaliação da repetibilidade do ensaio foi realizada plotando em um mesmo gráfico, três curvas do ensaio sem carga realizadas em momentos diferentes dos ensaios,

apresentado na FIG 4.2. O objetivo é verificar se o equipamento possui repetição dos resultados a vazio propiciando a repetição dos resultados com carga.

A análise do ensaio sem carga é utilizado por ser uma condição de controle e comparação entre o ensaio com carga e a vazio, por isso, é importante a avaliação da repetibilidade desse procedimento. O gráfico da FIG 4.2 apresenta um perfil semelhante para todos os testes realizados, porém, apresenta uma diferença em relação ao tempo total do ensaio, variando aos extremos em torno de 0,3s.

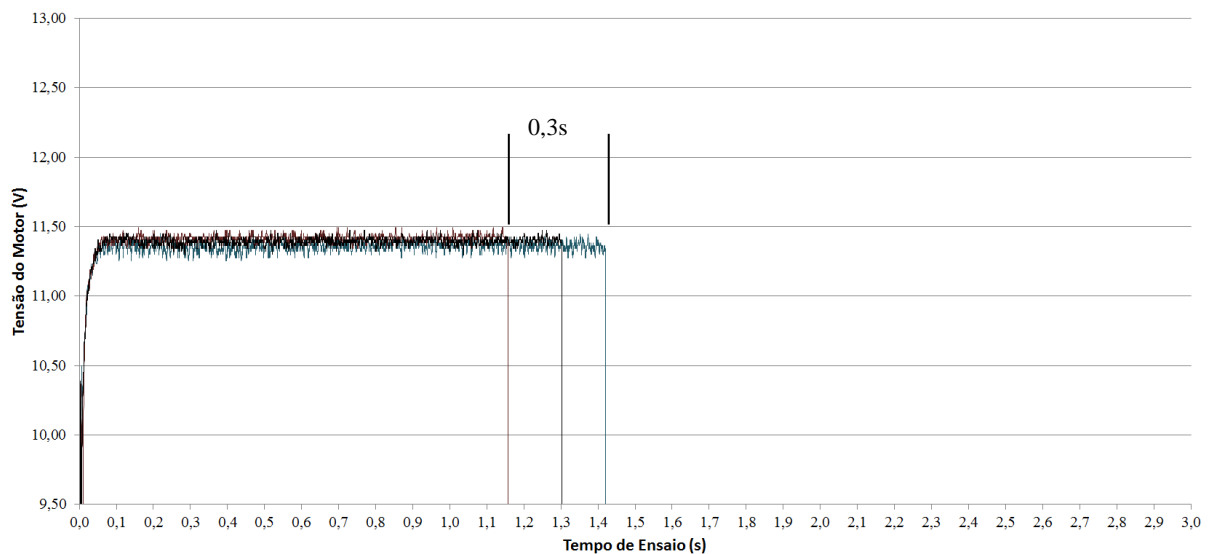


FIGURA 4.2 – Gráfico do Ensaio de Torção Realizado sem Corpo de Prova

Segundo Rexford (1997), o tempo de resposta de um sensor pode variar de 10 a 100 milissegundos. O fim de curso utilizado no equipamento é mecânico com atuação por mola, logo uma diferença de 300 milissegundos é aceitável. Além disso, qualquer variação no tempo de resposta do sensor é perceptível à aquisição de dados uma vez que a taxa de aquisição é de 5kHz.

Para continuar a análise de repetibilidade do ensaio foi plotado em um mesmo gráfico (FIG 4.3) ensaios do parâmetro P.1.1.2.25 e P.3.5.2.25 (TAB 3.4) sendo os parâmetros de menor e de maior energia de soldagem analisados.

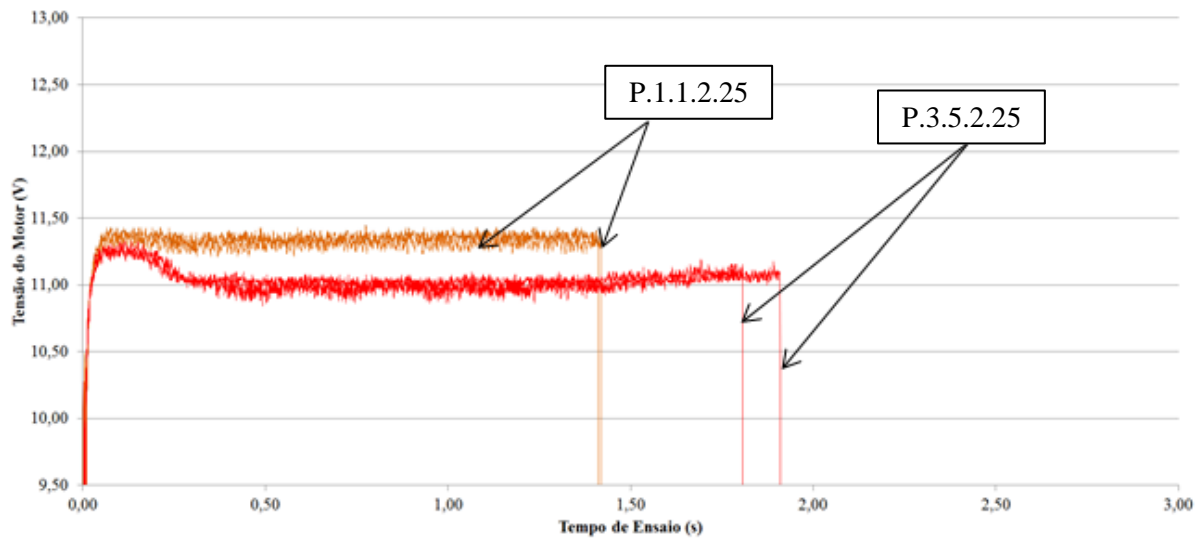


FIGURA 4.3 – Gráfico do Ensaio de Torção dos Parâmetros 1.1 e 3.5

Na cor laranja tem-se o parâmetro P.1.1.2.25 e na cor vermelha o parâmetro P.3.5.2.25. É interessante observar que o perfil da curva é semelhante para o mesmo parâmetro e que o tempo total de ensaio varia.

Dessa forma, pode-se inferir que é possível realizar uma análise detalhada do perfil apresentado pela curva e as tensões atingidas, porém o tempo total de ensaio deve ser analisado apenas qualitativamente.

4.2. Parâmetros de soldagem

A validação dos parâmetros utilizados nos ensaios e citados na TAB 3.3 foi realizada analisando o ponto de solda via metalografia, ultrassom e com ensaio de arrancamento em cada parâmetro. A FIG 4.4 apresenta os resultados do ensaio de ultrassom e as medidas de diâmetro e indentação realizadas com o equipamento. Os valores de diâmetro apresentados são referentes a duas medidas em sequência que são realizadas pelo equipamento. Já as medidas de indentação indicam as medidas de cada um dos lados do ponto de solda.

Id	Weld			Diâmetro			Identação		
	C-Scan	Sfty	3T	Measured	Min.	Nom.	Measured	Required	
P.1.1.2.			No	No	3,6 / 3,7	-	-	0,06 / 0,06	-
P.1.2.2.			No	No	3,7 / 3,7	-	-	0,07 / 0,08	-
P.1.3.2.			No	No	4,0 / 3,4	-	-	0,08 / 0,1	-
P.1.4.2.			No	No	4,4 / 3,6	-	-	0,1 / 0,12	-
P.1.5.2.			No	No	4,8 / 4,6	-	-	0,08 / 0,12	-
P.2.1.2.			No	No	3,5 / 3,4	-	-	0,08 / 0,09	-
P.2.2.2.			No	No	4,6 / 4,3	-	-	0,09 / 0,08	-
P.2.3.2.			No	No	5,2 / 4,6	-	-	0,09 / 0,11	-
P.2.4.2.			No	No	5,4 / 4,9	-	-	0,05 / 0,12	-
P.2.5.2.			No	No	5,5 / 5,2	-	-	0,11 / 0,13	-
P.3.1.2.			No	No	4,7 / 4,9	-	-	0,08 / 0,08	-
P.3.2.2.			No	No	4,4 / 4,6	-	-	0,17 / 0,18	-
P.3.3.2.			No	No	4,9 / 5,0	-	-	0,19 / 0,1	-
P.3.4.2.			No	No	5,7 / 5,2	-	-	0,18 / 0,17	-
P.3.5.2.			No	No	5,9 / 5,3	-	-	0,12 / 0,18	-

FIGURA 4.4 – Resultado do Ensaio de Ultrassom

A TAB 4.1 apresenta os resultados das medições realizadas nas metalografias, nos testes de ultrassom e ensaios de arrancamento realizados. Seguindo as normas 9.50171 e 00920/02 Fiat Automóveis, para a chapa de 0,91mm utilizada neste ensaio tem-se que o que o diâmetro do ponto deve ser superior a 3,81mm e a identação deve ser de 0,091mm a 0,273mm. As características observadas durante o ensaio de ultrassom realizado nos corpos de prova também estão listadas na TAB 4.1.

TABELA 4.1 – Resultado dos Testes de Validação dos Parâmetros de Soldagem

Corpo de Prova	Parâmetros de Soldagem		Variáveis Mensuradas					US
	Corrente (kA)	Tempo de Soldagem (ciclos)	Diâmetro (mm)			Identação (mm) Chapa 1/ Chapa 2		
			Macro	Ultrassom	Arrancamento	Macro	Ultrassom	
P.1.1.2.25	4,25	10	3,97	3,65	3,70	0,16/0,16	0,06/0,06	COLADO
P.1.2.2.25	4,25	30	4,35	3,7	3,90	0,05/0,05	0,07/0,08	COLADO
P.1.3.2.25	4,25	50	4,23	3,7	3,95	0,07/0,09	0,08/0,1	COLADO
P.1.4.2.25	4,25	70	4,53	4	4,35	0,17/0,17	0,1/0,12	COLADO
P.1.5.2.25	4,25	90	4,57	4,7	4,55	0,09/0,09	0,08/0,12	COLADO
P.2.1.2.25	5,0	10	2,39	3,45	2,95	0,10/0,10	0,08/0,09	COLADO
P.2.2.2.25	5,0	30	3,32	4,45	3,35	0,100/0,1	0,09/0,08	COLADO
P.2.3.2.25	5,0	50	3,11	4,9	3,45	0,02/0,02	0,09/0,11	COLADO
P.2.4.2.25	5,0	70	4,90	5,15	4,55	0,10/0,10	0,05/0,12	COLADO
P.2.5.2.25	5,0	90	4,96	5,35	5,15	0,14/0,14	0,11/0,13	COLADO
P.3.1.2.25	5,75	10	3,69	4,8	3,70	0,21/0,21	0,08/0,08	BOM
P.3.2.2.25	5,75	30	4,80	4,5	4,75	0,33/0,33	0,17/0,18	BOM
P.3.3.2.25	5,75	50	4,85	4,95	4,90	0,32/0,32	0,19/0,1	BOM
P.3.4.2.25	5,75	70	4,93	5,45	4,85	0,34/0,34	0,18/0,17	BOM
P.3.5.2.25	5,75	90	4,31	5,6	5,25	0,26/0,26	0,12/0,18	BOM

Buscando atender as premissas das normas citadas e as características desejáveis ao diagnóstico do ultrassom, deveriam ser selecionados todos os pontos em que a corrente de soldagem utilizada fosse de 5,75kA, excluindo os demais. Pois esses pontos são satisfatórios segundo o diagnóstico do ultrassom e apresentam diâmetro acima do mínimo, tanto para a mensuração do ultrassom quanto para mensuração da macrografia e do ensaio de arrancamento, excluindo o corpo de prova P.3.5.2.25. Porém, este mesmo corpo de prova não apresenta medidas de identificação aceitáveis segundo a norma.

Segundo Zhang (2011), mantendo todos os outros parâmetros constantes e elevando o tempo de soldagem, ocorre o aumento do fornecimento de calor ao ponto e por consequência mais material é fundido aumentando o diâmetro do ponto de solda (FIG 4.5). Este mesmo fato ocorre quando se mantém todos os outros fatores constantes e se eleva apenas a corrente de soldagem. Por esse motivo, os pontos soldados com maior corrente, 5,75 kA, apresentaram maior diâmetro (segundo ultrassom). Outra característica destes pontos é apresentarem fusão total de toda área do ponto de solda. Esse fato é identificado via ultrassom e não foi visualizado para os pontos soldados com outras correntes, que apresentaram uma

fusão parcial ou localizada definida como ponto colado. As prováveis causas deste modo de falha são: parâmetros não otimizados, refrigeração insuficiente, fuga de corrente e face irregular do eletrodo. Destes, apenas os parâmetros de soldagem estavam sendo variados durante os ensaios e em alguns casos não fornecendo o calor necessário para fusão total do ponto de solda.

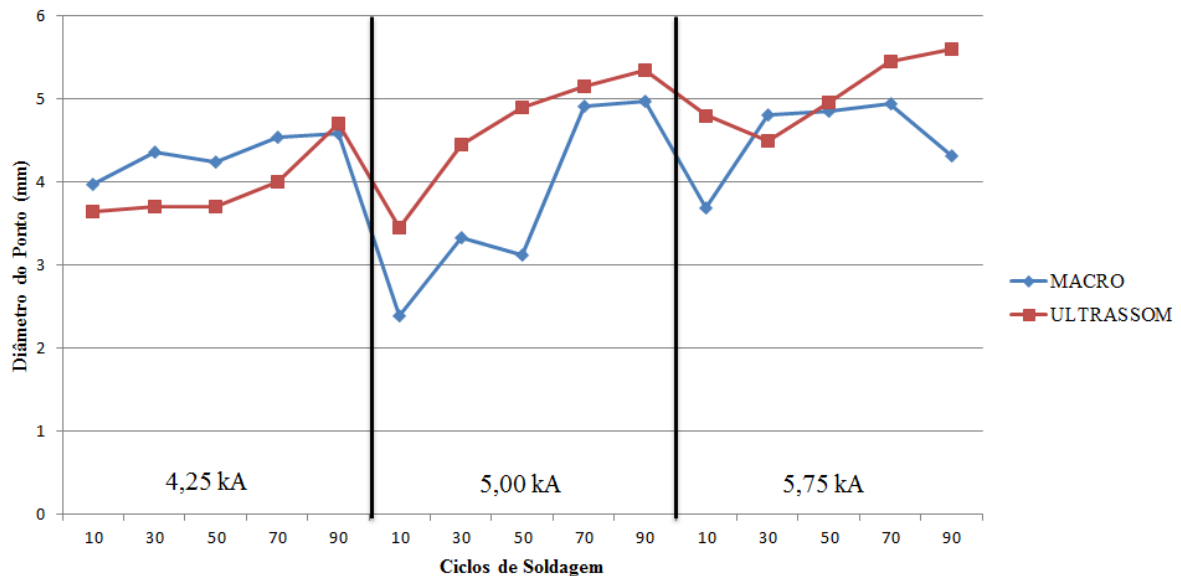


FIGURA 4.5 – Gráfico de Evolução do Diâmetro do Ponto de Solda

Avaliando as variáveis mensuradas da TAB 4.1 individualmente, os pontos P.1.1.2.25, P.1.2.2.25, P.1.3.2.25 e P.2.1.2.25 na medida realizada via ultrassom não atendem aos requisitos de diâmetro mínimo do ponto (3,81mm). Já para identificação, em relação as medidas realizadas via ultrassom e macrografia simultaneamente, os pontos P.3.5.2.25, P.2.5.2.25 e P.1.4.2.25 atendem a norma (0,091mm a 0,273mm).

4.3. Ensaio de torção

Após a avaliação dos parâmetros de soldagem a serem utilizados é possível avaliar a curva característica e seu comportamento para a variação da corrente e tempo de soldagem.

4.2.1. Influência do tempo de soldagem na curva característica do ensaio de torção

A avaliação se o equipamento de aquisição de dados e o equipamento de torção são sensíveis à variação dos parâmetros de soldagem se deu plotando em um mesmo gráfico todos os testes para uma mesma corrente e diferentes tempos de solda. O incremento no tempo de soldagem tem como consequência o aumento do diâmetro do ponto como apresentado na FIG 4.5 (ZHANG, 2011). Com isso, é esperado que ocorresse o aumento da resistência mecânica, a diminuição da velocidade e a diminuição da tensão de alimentação do motor (KOSOW, 1982).

Todos os corpos de prova soldados com 4,25kA se romperam antes do final do ensaio (40°). Isto pode ser visualizado na FIG 4.6, pois todos os ensaios possuem tempo total inferior ao ensaio sem carga (apresentada na FIG 3.4 e representado na cor preta na FIG 4.6). O ensaio sem carga é realizado sem corpo de prova, logo é o tempo necessário para o deslocamento da parte móvel do dispositivo sem resistência, ou seja, o menor tempo de ensaio possível no caso da parte móvel percorrer todo o trajeto. Não é recomendável a utilização do tempo total de ensaio para a caracterização do ensaio, uma vez que existe uma variação em função do sensor de parada, porém nesses casos foi possível essa avaliação, pois a parada do ensaio antes da curva sem carga se repetiu nos 15 testes realizados com a corrente de soldagem de 4,25kA.

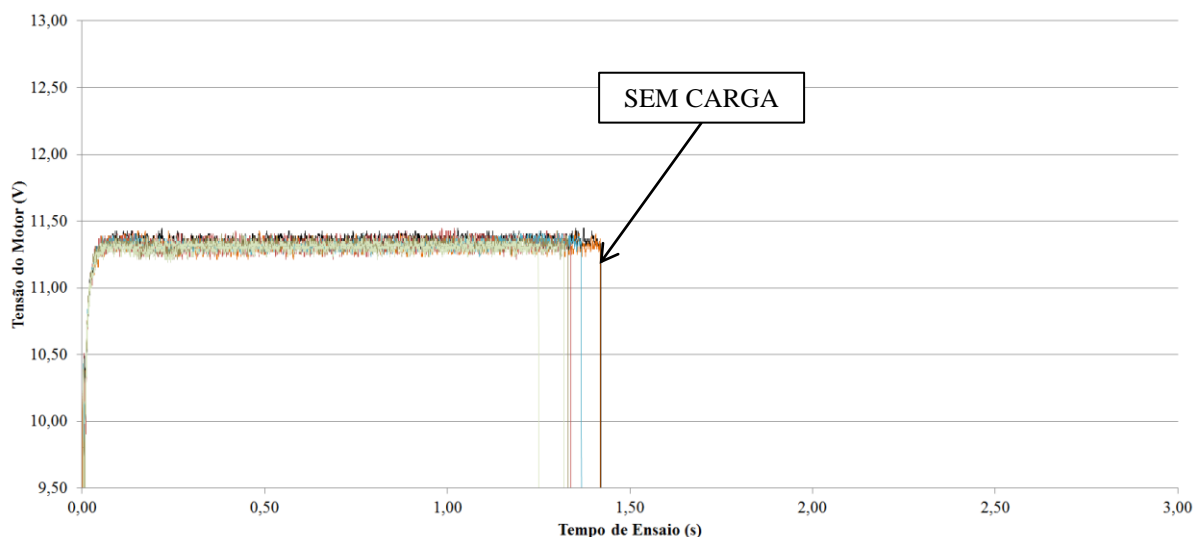


FIGURA 4.6 – Gráfico do Ensaio de Torção dos Corpos de Prova Soldados com 4,25kA

Os ensaios não apresentaram nenhuma resistência que possa ser sentida no equipamento, uma vez que as curvas traçadas possuem o perfil semelhante a curva sem carga,

não demonstrando uma alteração de tensão como esperado. Porém o ensaio confirmou os dados obtidos no ultrassom (TAB 4.1) onde os pontos soldados com 4,25kA apresentam como característica “colado”. Os corpos de prova não foram resistentes a força de torção imposta, demonstrando que não existiu a fusão total do ponto de solda.

Os pontos soldados com 5,0kA não se romperam durante o ensaio chegando ao final dos 40°, podendo ser visualizado na FIG 4.7, pois existe uma diferença entre a curva sem carga preta e as curvas dos ensaios. Nos 15 ensaios realizados, a curva do ensaio terminou após o término da curva sem carga.

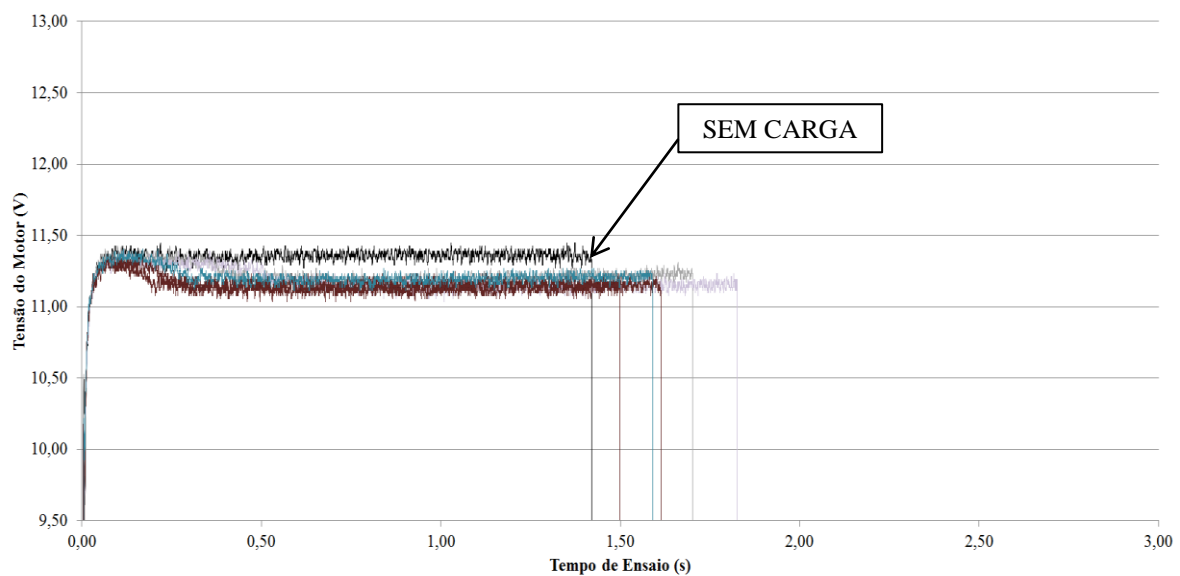


FIGURA 4.7 – Gráfico do Ensaio de Torção dos Corpos de Prova Soldados com 5,0kA

Apesar do ultrassom apresentar como característica ponto “colado” para todos os pontos soldados com 5,0kA, segundo TAB 4.1, no ensaio de torção não ocorreu o rompimento dos pontos de solda, como ocorreu nos pontos soldados com 4,25kA. Este fato pode ser explicado buscando a definição de ponto colado: é um ponto que não se fundiu totalmente ocorrendo apenas fusões localizadas. É esperado que com o aumento da corrente, o número de fusões localizadas aumente, porém o ponto ainda é colado segundo o ultrassom, uma vez que ainda existem áreas da interface sem fusão e com isso não atendeu aos padrões de aceitação citados nas normas.

Estes pontos não se romperam, porém na FIG 4.7 é possível observar que as curvas estão próximas à curva do ensaio padrão, demonstrando que os pontos apresentaram baixa resistência a torção, podendo ser comprovado, pois, apesar de não se romperem durante

o ensaio, alguns se romperam apenas com o esforço para retirada do corpo de prova do dispositivo.

Os pontos soldados com 5,75kA não se romperam durante o ensaio, como pode ser visualizado na FIG 4.8, onde todas as curvas dos ensaios apresentam perfil diferente da curva sem carga. Confirmando a característica apresentada no ensaio de ultrassom (TAB 4.1) de ponto “bom”.

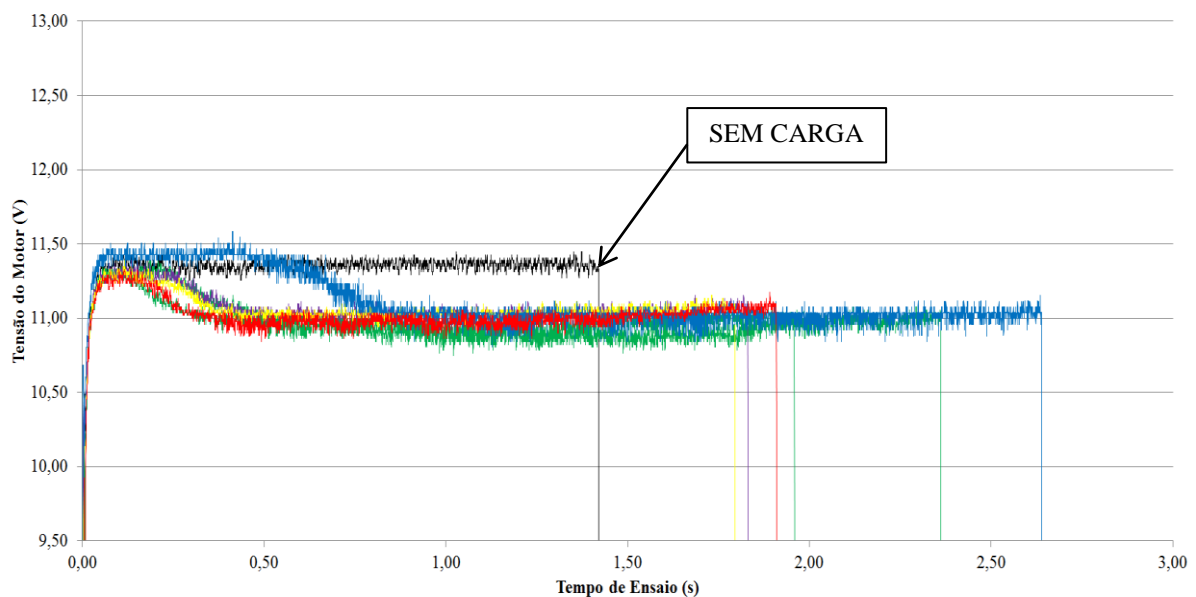


FIGURA 4.8 – Gráfico do Ensaio de Torção dos Corpos de Prova Soldados com 5,75kA

O perfil diferente destacado na curva azul no gráfico da FIG 4.8 para a corrente de 5,75kA e um tempo de soldagem de 90 ciclos será discutido mais a frente, ainda neste trabalho.

Era esperado que plotando em um mesmo gráfico as curvas adquiridas em corpos de prova que foram soldados com o mesmo parâmetro de corrente de soldagem e com diferentes tempos de soldagem, fosse possível verificar a diferença do tempo total de ensaio. Uma vez que com o aumento do tempo de soldagem ocorre o aumento do diâmetro do ponto de solda, assim aumentando a resistência a torção sendo e esperado um maior tempo de ensaio.

Este fato não foi observado nas FIG 4.6 a 4.8. É possível visualizar diferença no tempo total de ensaio, porém, devido à análise já realizada de que o tempo total do ensaio varia devido ao sensor fim de curso, a diferença observada não pode ser definida como sendo influência do tempo de soldagem. Outro fator que pode influenciar para a proximidade das curvas é que como apresentado no resultado de ultrassom, os pontos não possuíram fusão

total sendo que as faltas de fusão localizadas podem funcionar como um gatilho para a propagação da falha. Os corpos de prova soldados com 5,75kA foram caracterizados como bons e na FIG 4.8 é possível perceber uma maior variação do tempo total de ensaio, contribuindo para esta hipótese, pois há uma maior resistência a propagação da falha.

4.2.2. Influência da corrente de soldagem na curva característica do ensaio de torção

A avaliação da influência da corrente de soldagem no ensaio de torção foi possível plotando em um mesmo gráfico os diferentes parâmetros para um mesmo tempo de soldagem. Segundo Pouranvari (2011), o aumento da corrente de soldagem promove o aumento do diâmetro do ponto de solda, até um limite em que para correntes e tempos de soldagem altos ocorre a expulsão de material. Nos ensaios realizados não foi identificado a expulsão de material para nenhum dos parâmetros utilizados.

Com o aumento do diâmetro do ponto de solda, é esperado um aumento da resistência mecânica do ponto (ZHANG, 2011), a resistência à torção do ponto causa a dificuldade de movimentação da parte móvel do dispositivo e por consequência a diminuição da velocidade do ensaio e uma diminuição na tensão de alimentação do motor (KOSOW, 1982).

Este fato pode ser observado nas FIG 4.9 a 4.13 para todos os tempos de soldagem com o aumento da corrente de soldagem ocorre uma redução na tensão de alimentação do motor. Tendo como referência a escala de tensão do gráfico, para a corrente de soldagem de 4,25kA, a tensão de alimentação do motor é semelhante a um ensaio sem carga em torno de 11,5V. Já para a corrente de 5,0kA, tem-se uma tensão de alimentação em torno de 11,2V. Por último, para uma corrente de 5,75kA tem-se uma tensão de alimentação de 11,0 V. A diferença total da tensão de alimentação do motor entre os ensaios com corrente de soldagem mínima de 4,25kA e máxima de 5,75kA é de 0,5V. Esta diferença seria pequena em valores absolutos para se caracterizar um ensaio mecânico, porém, todos os ensaios plotados para uma mesma corrente de soldagem, a parte de estabilidade da curva, região III se estabilizou para a mesma tensão de alimentação do motor. Esta análise contribui para a afirmação de que há uma diferença mensurável entre os ensaios em que ocorre a variação da corrente de soldagem.

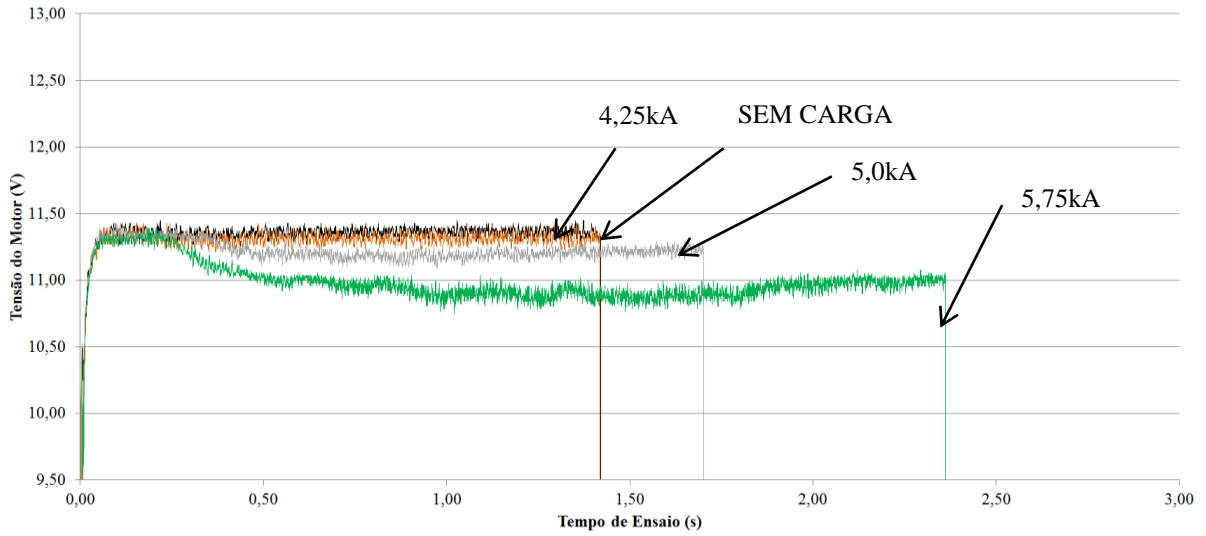


FIGURA 4.9 – Gráfico do Ensaio de Torção dos Corpos de Prova Soldados com 10 ciclos

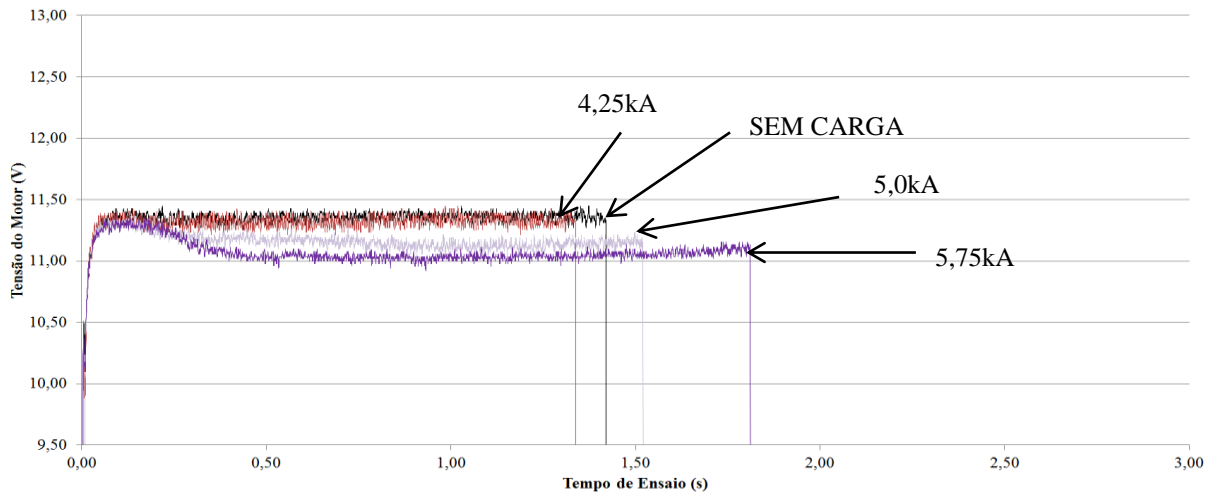


FIGURA 4.10 – Gráfico do Ensaio de Torção dos Corpos de Prova Soldados com 30 ciclos

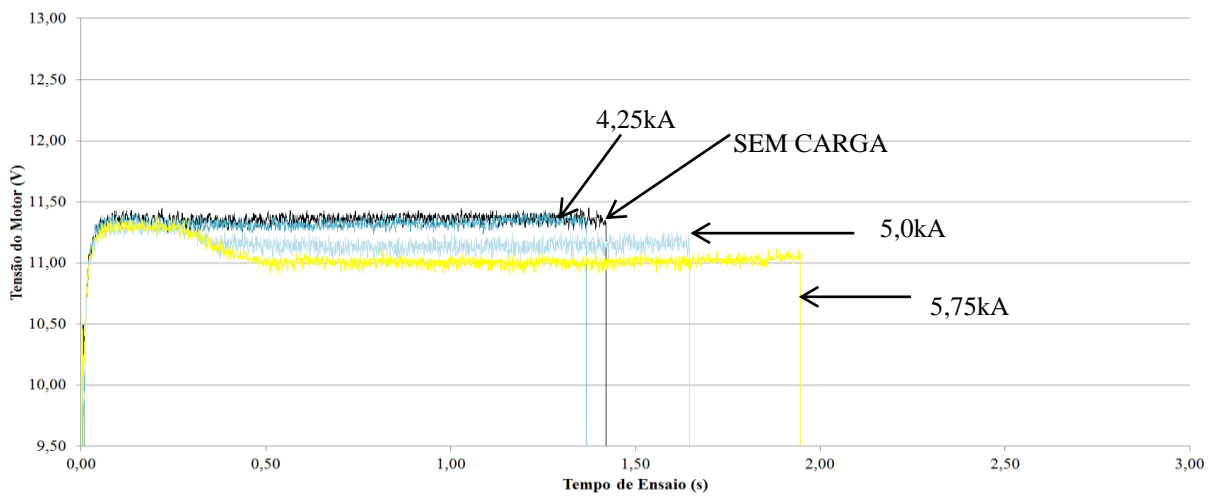


FIGURA 4.11 – Gráfico do Ensaio de Torção dos Corpos de Prova Soldados com 50 ciclos

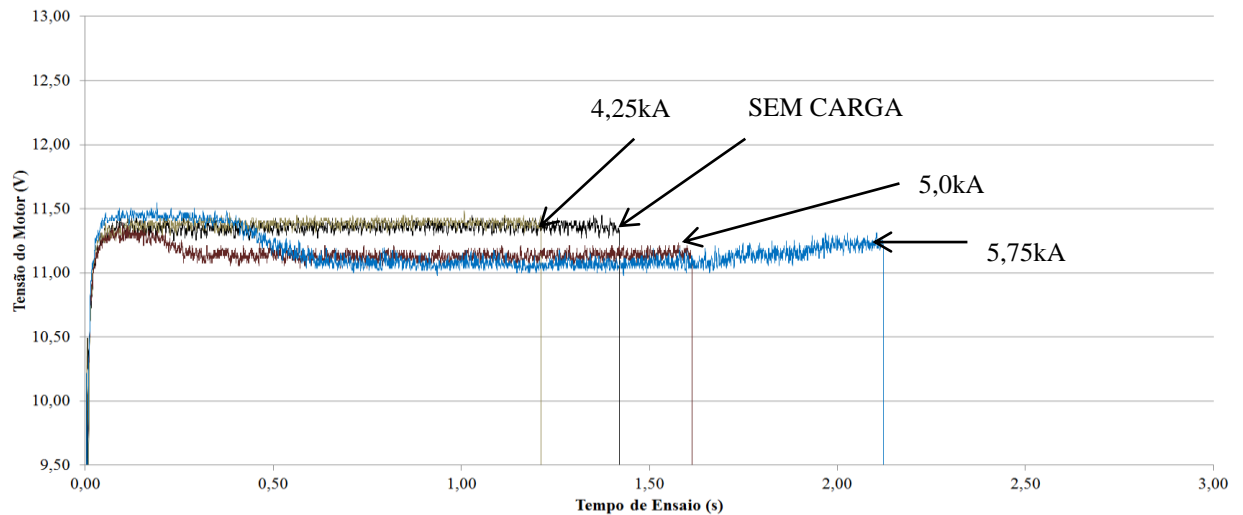


FIGURA 4.12 – Gráfico do Ensaio de Torção dos Corpos de Prova Soldados com 70 ciclos

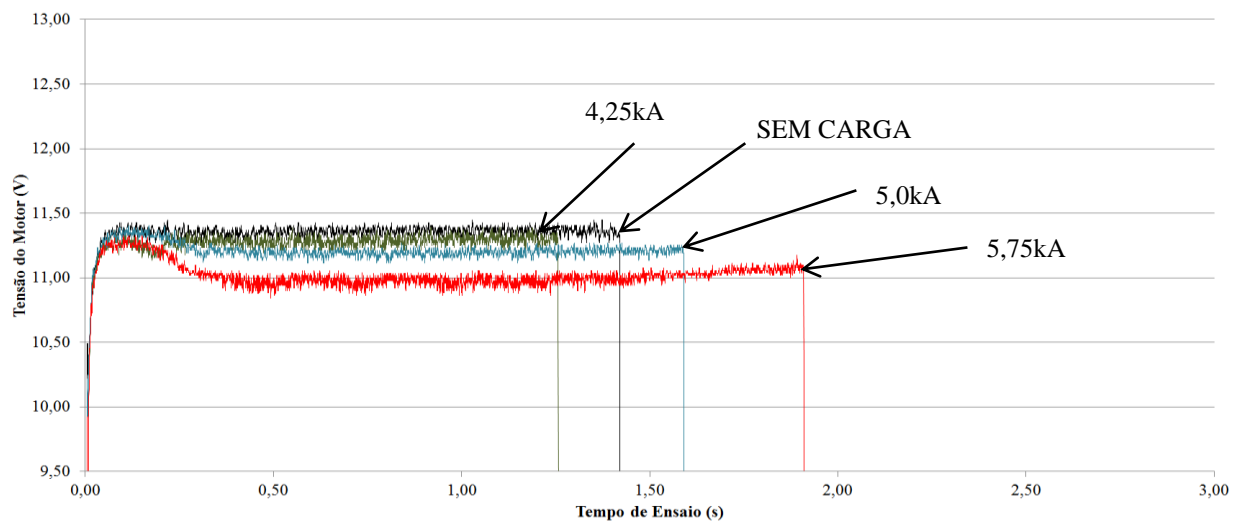


FIGURA 4.13 – Gráfico do Ensaio de Torção dos Corpos de Prova Soldados com 90 ciclos

Outro ponto a ser observado é que para o mesmo tempo de soldagem e aumento da corrente de soldagem, o corpo de prova de maior corrente resiste por mais tempo ao ensaio confirmando a hipótese de que com o aumento do diâmetro ocorre o aumento da resistência mecânica e a diminuição da velocidade do ensaio, aumentando o tempo total do ensaio.

4.4. Ângulo de parada do ensaio de torção

Wung (2001) descreveu a evolução da trinca até a falha completa na soldagem por resistência elétrica por pontos. Sofrendo um esforço de torção, com o aumento da carga ocorre o aumento das dimensões da trinca até a falha completa em modo botão. Lin *et al.* (2002) estudaram a propagação da trinca para ensaios de tração pura até as cargas combinadas

de tração e cisalhamento, iniciando com o ensaio de tração pura onde os corpos de prova estão paralelos até a situação em que eles estão em um ângulo de 45° com o sentido de aplicação da força. Em ambos os ensaios, foram realizados ensaios de forma independente interrompendo o ensaio em cada ponto e avaliando via metalografia a seção transversal, o comportamento e evolução da trinca.

4.3.1. Comportamento do equipamento com a variação de ângulos

A verificação do comportamento da curva característica do ensaio de torção automatizado quando o ensaio é parado em diferentes ângulos se deu plotando em um mesmo gráfico os resultados das curvas obtidas para diferentes ângulos. (FIG 4.14)

No gráfico foi possível observar que como esperado ocorreu o aumento do tempo de ensaio para o aumento do ângulo de parada. Esta relação não é proporcional, pois os ensaios são realizados com diferentes corpos de prova e o sistema fim de curso possuiu uma variação no tempo de resposta. Porém, o ensaio que possuiu maior ângulo sempre possui maior tempo se comparado ao de ângulo menor. Assim, curva característica do ensaio de torção apresentou indicativos de sensibilidade a variação do ângulo de parada do ensaio.

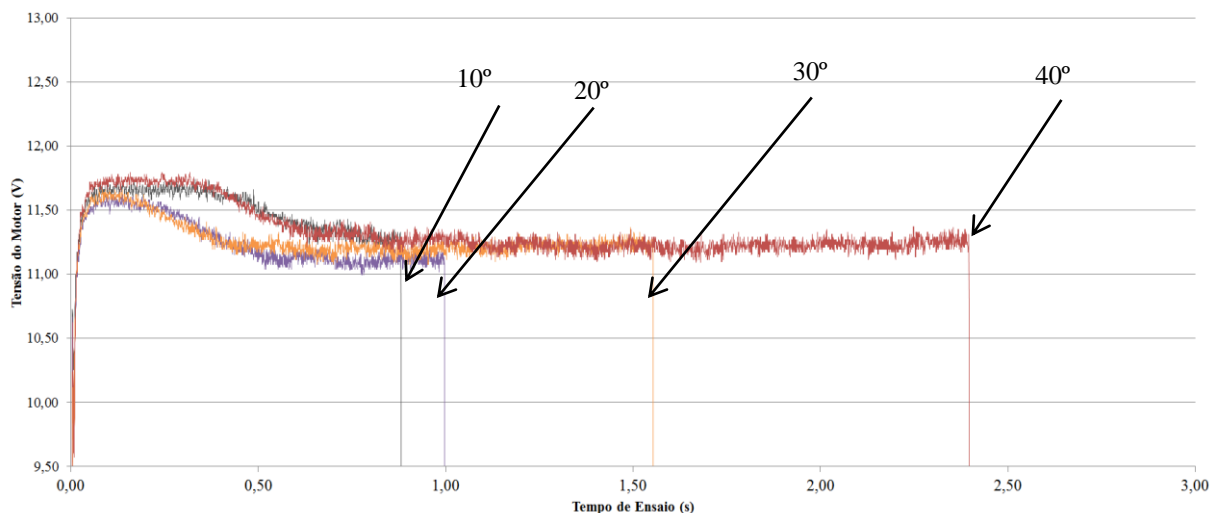


FIGURA 4.14 – Gráfico do Primeiro Ensaio de Torção com Variação do Ângulo de Parada

4.3.2. Comportamento do equipamento e análise metalográfica com a variação de ângulos

Para que fosse determinado todo o caminho de propagação da trinca, foi necessário torcer o corpo de prova manualmente até se romper, uma vez que para o parâmetro

escolhido de 5,75kA de corrente de soldagem e 90 ciclos de tempo de soldagem, o corpo de prova não se rompe no equipamento. As curvas do ensaio de torção foram plotados na FIG 4.15, os três ensaios que se encerram por volta de 2s são os que tiveram como ângulo de torção 40°, sendo que dois deles foram torcidos manualmente até 60° e 90°.

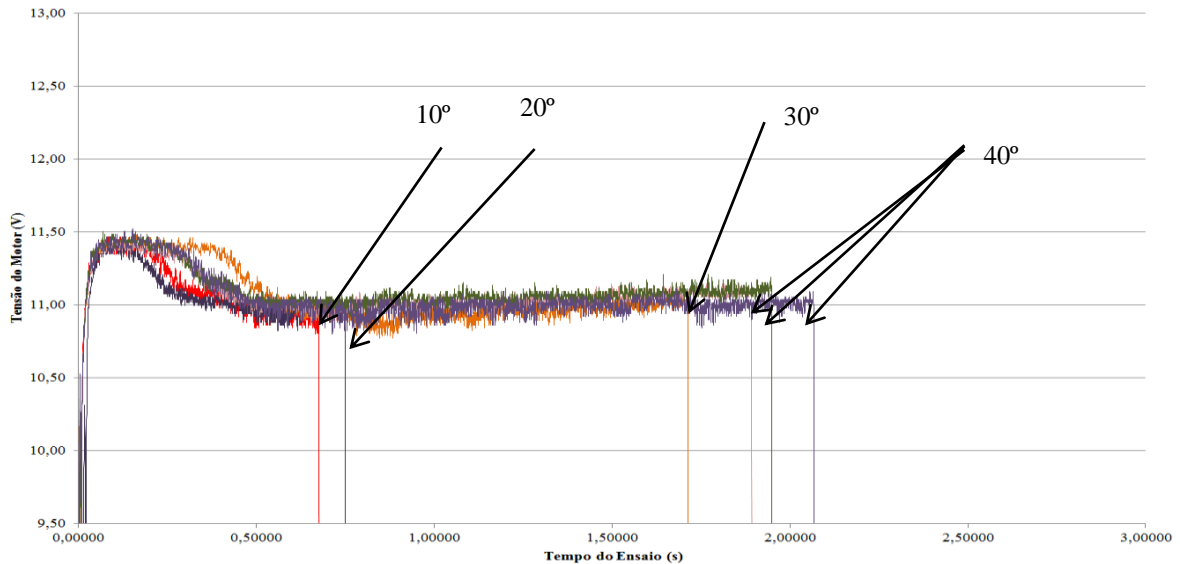


FIGURA 4.15 – Gráfico do Segundo Ensaio de Torção com Variação do Ângulo de Parada

Como no gráfico anterior, FIG 4.14, os ensaios tiveram tempo total diferente em função do ângulo de torção demonstrando que: sempre que ocorre o aumento do ângulo ocorre o aumento do tempo de ensaio.

A análise gráfica apresentou resultado semelhante ao ensaio anterior em que se analisou a parada dos ângulos, em alguns aspectos. Os ensaios de maiores ângulos de torção tiveram um maior tempo de duração. Isso é justificado por meio de uma diferença no momento em que ocorre a região II nos gráficos para diferentes ensaios (Região em que ocorre o início da resistência ao movimento). A região inicial do gráfico ainda será analisada neste trabalho. Dessa forma, não é possível caracterizar no gráfico a variação do ângulo de parada, partindo para a análise metalográfica.

Observando as imagens das metalografias, o corpo de prova de 60° não se destacou completamente, já o de 90° se soltou da chapa, sendo que para ambos ocorreu o rompimento na região fundida, porém próximo a ZTA, como apresentado na FIG 4.16.

Na soldagem dos corpos de prova foram utilizados dois eletrodos diferentes: o superior possui um raio menor no contato com a chapa e o inferior possui um raio maior. Dessa forma, é esperada uma menor área e maior profundidade de indentação na parte superior

e uma maior área e menor profundidade de indentação na parte inferior. Nas FIG 4.16 e 4.17, é possível observar que as trincas se propagam na direção de uma das chapas, tendendo sempre a ser em direção a chapa em contato com o eletrodo de menor raio de contato com a chapa. Isso se deve, como sugere Chao (2003), ao concentrador de tensão causado pela indentação de maior profundidade.

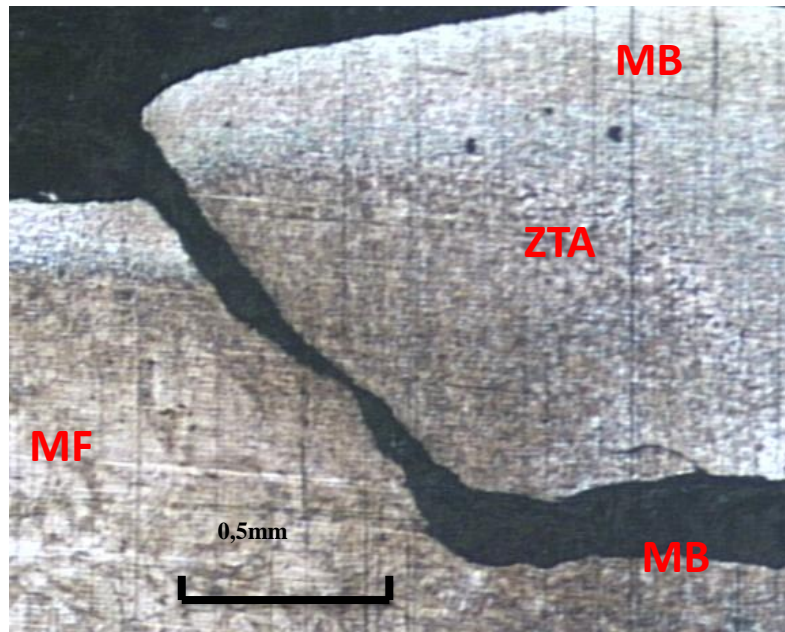


FIGURA 4.16 – Macrografia com 5X de Aumento do Corpo de Prova Torcido até 90°

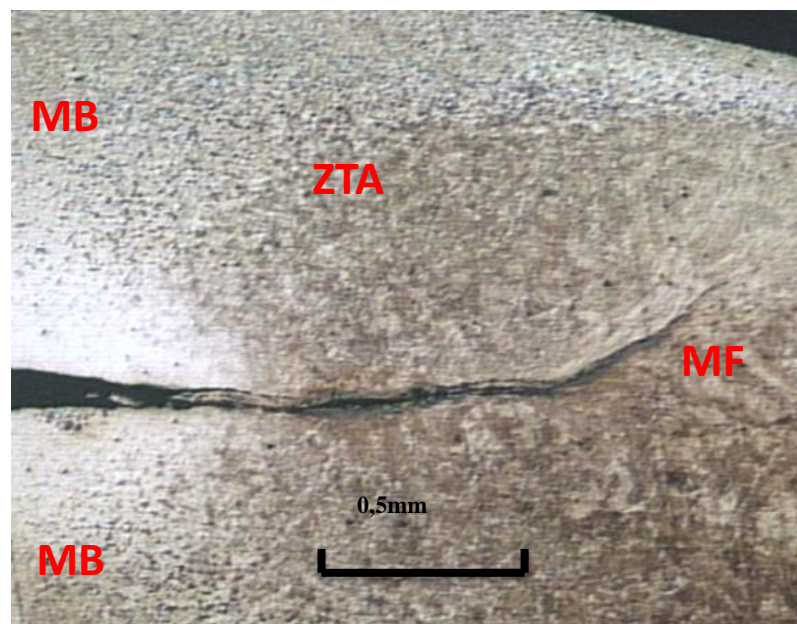


FIGURA 4.17 – Macrografia com 5X de Aumento do Corpo de Prova Torcido até 40°

4.4. Modo de falha

A análise do modo de falha foi realizada variando a espessura das chapas e a chapa que estava em contato com o eletrodo de menor raio, com o objetivo de visualizar através das metalografias o caminho percorrido pela trinca e determinar um modo de falha. Os resultados das metalografias estão apresentados nas TAB 4.2, 4.3 e 4.4. Como são corpos de prova independentes a evolução do ângulo não se dá no mesmo corpo de prova, muitas vezes não é possível perceber uma evolução clara com relação ao tamanho da trinca, mas é possível analisar a direção de propagação e os fatores que se repetem em vários testes.

Um desses fatores é que para todos os ensaios não é possível perceber uma direção clara na trinca até o ângulo de 40°, limite máximo de torção no equipamento.

Segundo a TAB 3.8, os corpos de prova de início M1, M3 e M4, a chapa mais fina está em contato com o eletrodo de menor raio. As TAB 4.2 e 4.3 demonstram que, para esses casos, existe uma tendência clara da trinca se propagar na direção da chapa mais fina e próximo a ZTA com um modo de falha do tipo “botão”. Este mesmo fenômeno não ocorre para os corpos de prova de início, M2, M4 e M6 apresentado na TAB 4.4. Neste caso a trinca tende a se propagar na interface entre as chapas. Por isso, o eletrodo que causa maior identificação, deve estar em contato com a chapa de maior espessura.

Pode-se observar que em todos os testes realizados nas metalografias apresentadas existem dois modos de falha. O rompimento na ZTA, como demonstrado por Wung (2001) para o ensaio de tração e Lin *et al.* (2002) para o ensaio de tração pura. Além do rompimento interfacial, como demonstrado por Zhang, (2005).

TABELA 4.2 – Macrografias com 5X de Aumento dos Corpos de Prova M1

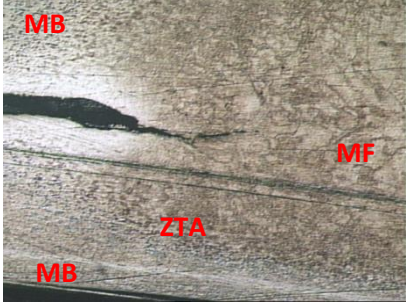

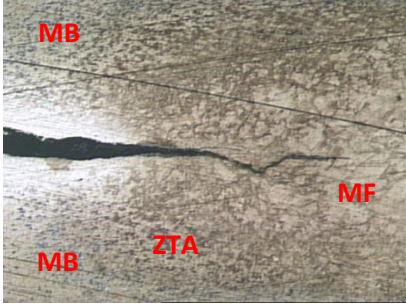
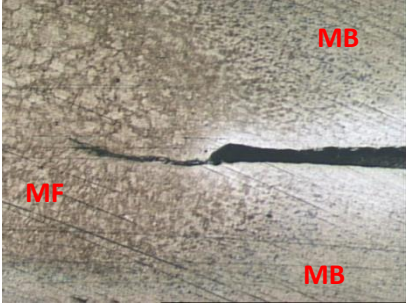
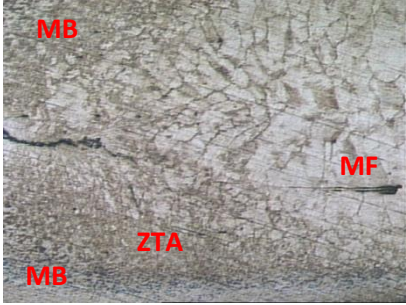
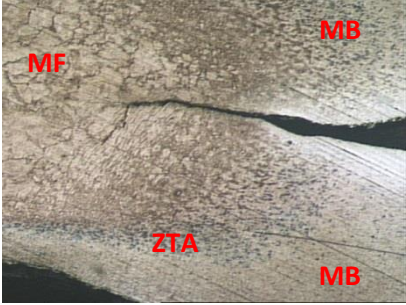
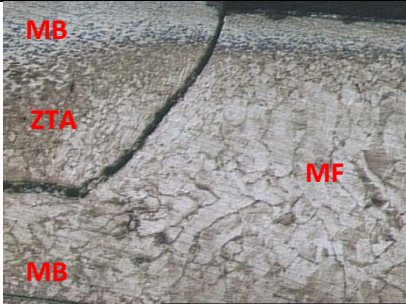
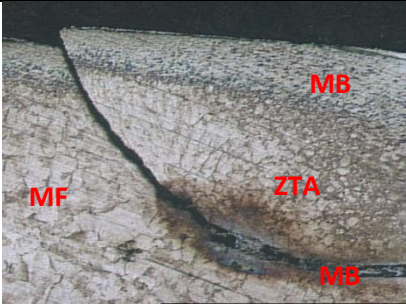

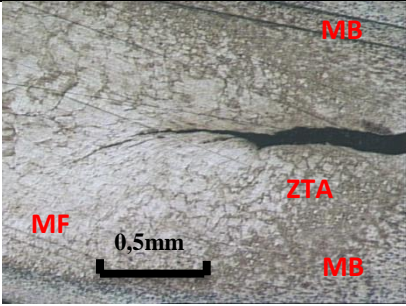
M1		
	ESQUERDA	DIREITA
20°		
30°		
40°		
60°		
90°		

TABELA 4.3 – Macrografias com 5X de Aumento dos Corpos de Prova B1

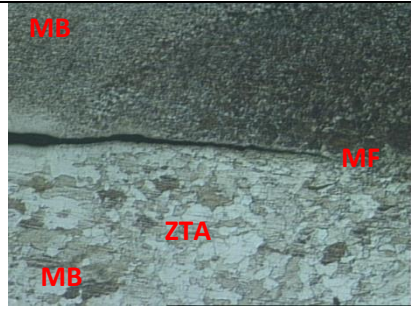




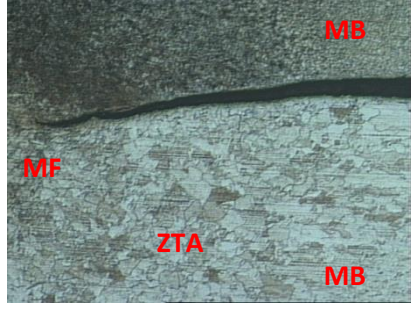



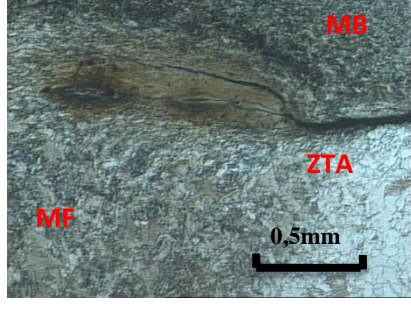
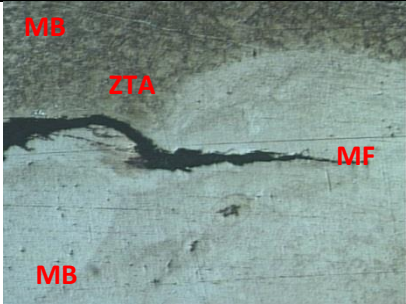
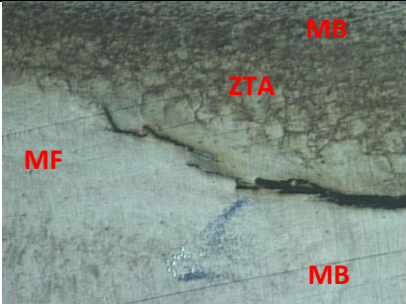
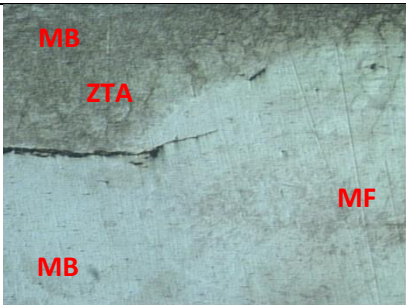
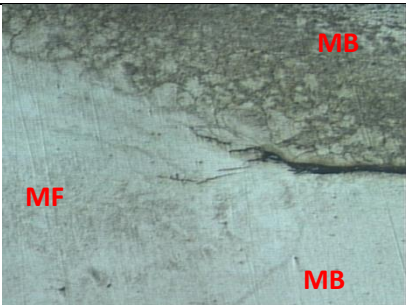
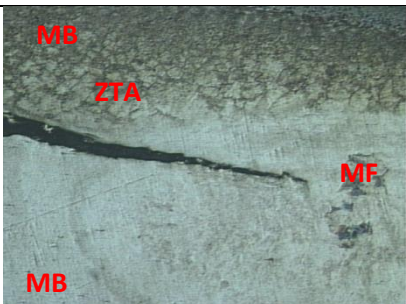

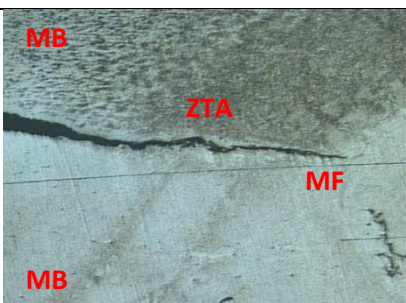
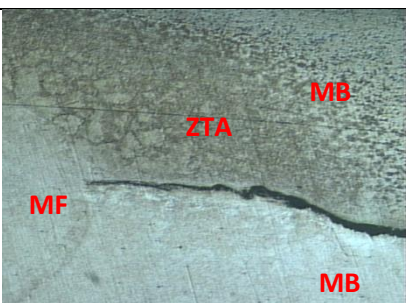
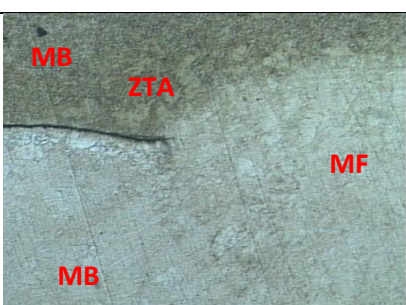
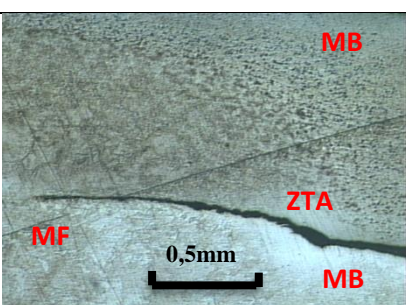
M3		
	ESQUERDA	DIREITA
20°		
30°		
40°		
60°		
90°		

TABELA 4.4 – Macrografias com 5X de Aumento dos Corpos de Prova C2

M6		
	ESQUERDA	DIREITA
20°		
30°		
40°		
60°		
90°		

Para avaliar a região inicial do gráfico de torção e buscar entender o início de propagação da trinca, foram plotados no mesmo gráfico as curvas dos ensaios de torção M1.20.3.5.12 (verde escuro), M2.20.3.5.12 (verde claro), M3.20.3.5.12 (vermelho claro) e M4.20.3.5.12 (vermelho escuro), FIG 4.18, e as respectivas metalografias são apresentadas na TAB 4.5.

A FIG 4.18 apresenta que o fim do ensaio se deu bem próximo para os corpos de prova de mesma espessura, sendo os corpos de prova iniciados em M1 e M2 e M3 e M4. Porém, como comentado anteriormente, considerando o erro do sistema fim de curso, todos os ensaios terminaram aproximadamente no mesmo tempo.

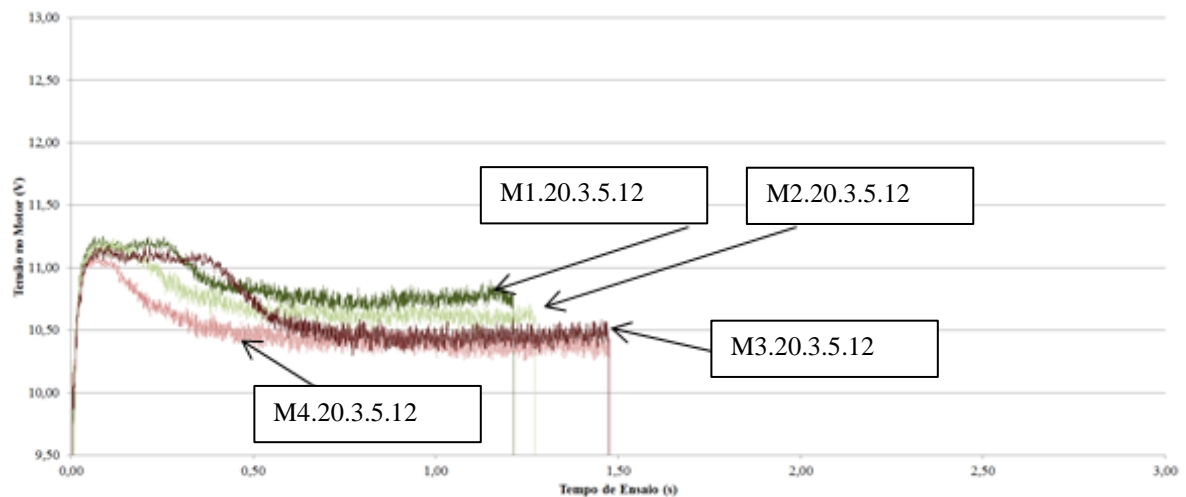


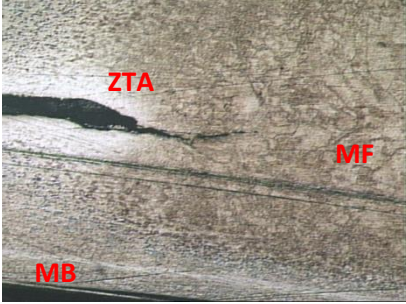
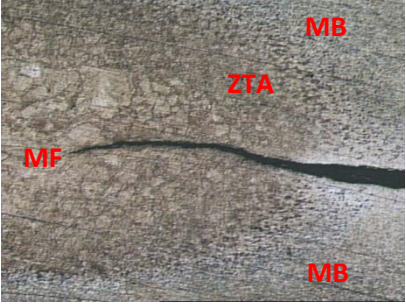
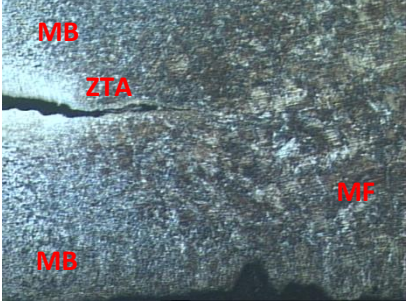
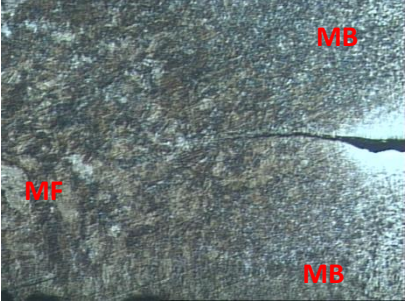


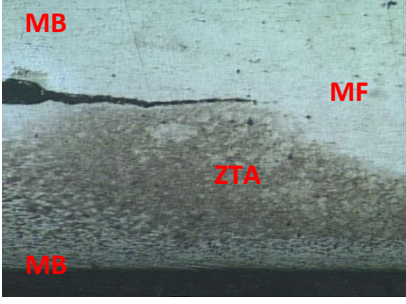
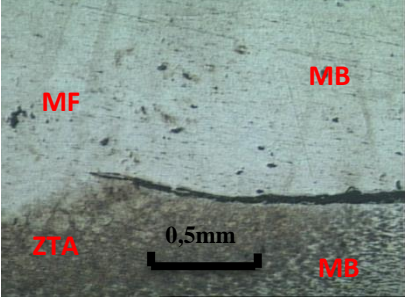
FIGURA 4.18 – Gráfico do Ensaio de Torção dos Corpos de Prova A1, A2, B1 e B2

A TAB 4.5 apresenta que os corpos de prova M3.20.3.5.12 e M4.20.3.5.12 possuíam uma estrutura metalográfica diferente, os corpos de prova foram soldados com os mesmos parâmetros, utilizando as chapas com as mesmas características em ambos os ensaios. A única diferença é que um foi soldado com a chapa mais fina em contato com o eletrodo de menor raio e o outro com a chapa mais grossa em contato com esse eletrodo.

O eletrodo de menor raio propicia uma menor área de contato com a peça aumentando o fluxo de corrente e gerando mais calor (MARQUES, 2009). A chapa de maior espessura possui maior facilidade para escoar o calor, uma vez que é mais fácil o calor se dissipar por condução do que por convecção. Assim, quando o eletrodo de menor raio está em contato com a chapa de maior espessura, não há um grande crescimento de grão, pois a chapa dissipa o calor, (M4.20.3.5.12). Já quando o eletrodo de menor raio está em contato com a chapa mais fina, o calor gerado na chapa mais fina foi maior e possuiu dificuldade de se

propagar causando um maior crescimento de grão no ponto (M3.20.3.5.12). Estes corpos de prova possuíram esta característica mais pronunciada, pois são os que tiveram maior diferença na espessura das chapas.

TABELA 4.5 – Metalografia dos Corpos de Prova Torcidos a 20°
Corpos de Prova Torcidos a 20°

Corpos de Prova Torcidos a 20°		
M1.20.3.5.12		
M2.20.3.5.12		
M3.20.3.5.12		
M4.20.3.5.12		

Esta diferença foi percebida no gráfico apresentado na FIG 4.18 a linha vermelha mais escura representa o ensaio M4.20.3.5.12 cuja estrutura é mais refinada, dificultando o início da propagação da trinca prolongando o tempo em que a tensão do motor permanece mais alta. Já a linha vermelha mais clara representa o ensaio B1 cuja estrutura é mais

grosseira, facilitando o início de propagação da trinca tendo o tempo em que a tensão do motor permanece alta reduzida. A queda da tensão de alimentação do motor representa o início de movimentação do ensaio ocorrendo a estabilização da velocidade e por consequência da tensão (KOSOW, 1982). Este fato, porém, se manifesta diferente quando ocorre o travamento do motor, quanto mais rápido ocorre a queda brusca de tensão, mais rápido foi vencido o travamento.

Esta mesma diferença pode ocorrer em ensaios com corpos de prova de mesma espessura e corpos de prova onde a diferença de espessuras é menor, como demonstrados nos ensaios anteriores e nos corpos de prova M1.20.3.5.12 e M2.20.3.5.12. Nestes casos este fato não é tão pronunciado uma vez que, a microestrutura é muito semelhante para ambos os ensaios, resultando em um ensaio de torção bem semelhante, porém ainda é possível perceber a influência do formato do eletrodo.

Logo as análises preliminares demonstram que a utilização do eletrodo de maior raio em contato com a chapa mais fina é benéfico para evitar o modo de falha de rompimento na ZTA, além de garantir uma maior resistência do ponto a torção.

5. CONCLUSÕES

Após a preparação dos ensaios, realização dos testes e análise dos dados, com base nas referências bibliográficas, é possível com este trabalho concluir que:

- 1 A instrumentação do equipamento de torção automatizado contribui para uma melhor análise do ensaio possibilitando avaliar todos os momentos do ensaio, principalmente a parte inicial que caracteriza a propagação da trinca.
- 2 O ensaio de torção automatizado e instrumentado não apresentou sensibilidade a variação do tempo de soldagem, sendo que as curvas apresentaram semelhança nas regiões I, II, e III da curva característica.
- 3 A variação da corrente de soldagem é percebida nas curvas obtidas do ensaio de torção uma vez que com o aumento da corrente ocorre uma queda na tensão estabilizada de alimentação do motor.
- 4 Existem dois modos de falha para o ensaio de torção automatizado e instrumentado: um rompimento na ZTA e outro o rompimento na interface das chapas.
- 5 A análise do perfil apresentado pela curva e as tensões atingidas no ensaio de torção apresentam repetibilidade e podem ser analisadas quantitativamente, porém o tempo total de ensaio deve ser analisado apenas qualitativamente e quando comparando alterações nos valores de corrente.
- 6 Nos ensaios realizados, a trinca propagada durante o ensaio de torção tem tendência a se movimentar na direção da indentação causada pelo eletrodo de menor raio. Este fato é mais visível quando existe a variação na espessura da chapa, com a trinca possuindo a tendência a se movimentar em direção a chapa mais fina quando esta foi soldada em contato com o eletrodo de menor raio.
- 7 Existe uma aparente relação entre a utilização do eletrodo de menor raio em contato com as chapas finas e a direção de propagação da trinca. Dessa forma, o ideal seria a utilização do eletrodo de maior raio em contato com a chapa fina, para evitar o modo de falha de rompimento na ZTA e garantir maior resistência à torção do ponto de solda.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho continuou um trabalho inicial de projetar e construir o equipamento de torção automatizado e instrumentado de soldagem a ponto, porém ainda não se findaram as diversas vertentes que podem ser estudadas neste equipamento. Ao longo dos estudos, foi possível sanar algumas dúvidas e criar novas que podem vir a motivar novas pesquisas e trabalhos como, por exemplo:

- Descrever o fenômeno da torção e propagação da trinca através de modelos teóricos.
- Utilizar elementos finitos para descrever os testes práticos realizados no dispositivo.
- Parametrizar o dispositivo de forma que o resultado dos testes por si já representem os esforços mecânicos não sendo necessário outros ensaios para garantir a avaliação.
- Continuar a instrumentação do dispositivo de forma a adquirir mais parâmetros e automatizar ainda mais para que haja mínima interferência do operador.
- Realizar a comparação do dispositivo com outros ensaios de torção.
- Investigar o comportamento do dispositivo para maiores correntes e menores tempo de soldagem

ABSTRACT

The safety of a vehicle begins with the design of the body, which are the result of the joining of plates by welded joints mainly through the Resistance Spot Welding process. When in normal work or in atypical situations such as collisions and rough terrain, the welding points of the vehicle structure undergo tensile, shear and torsion efforts. By analyzing the welding point individually, it has less resistance to torsion stress. The correct characterization of the strength of the welded joint is extremely important to guarantee the safety of the vehicle, so some tests are performed on the production lines. The pullout test is more widespread, but does not characterize the weld point, as it does not identify internal defects. Ultrasound is used, however it is by sampling and only at the main welding points of the vehicle. Therefore, it is of fundamental importance the domain of reaction to the efforts for the correct dimensioning of the point. For torsion and shear stress, diffused and standardized tests are used, with known failure mode and relationship between well-known parameters and stresses. For the torsion test, few equipment or test types are known and used. Recently, it has been proposed an automated torsion welding machine, compact and simple to handle, capable of conducting tests quickly and inexpensively. Therefore, the objective of this work is to evaluate the potentialities of this device by analyzing its performance for a twist and the resulting failure mode. The instrumentation was performed, the definition of welding parameters to be tested and tests with welded plates in different thicknesses. The results showed a characteristic curve of the assay. In addition to the definition of the best electrode to be used for different thicknesses of sheet when requested to torsion effort. It was also possible to identify 2 failure modes characteristic of the break in the ZTA and in the weld interface.

Keywords: Resistance Spot Welding, Torsion Resistance, Failure Mode

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS., 1983, “*Welding and Brazing – Resistance Welding*”. 9ed., vol.6, pp.448-493, 1983.

AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS., 1998, *Welding Handbook*. Vol. 2: *Welding Process*, 8º ed. International Standard Book Number: 0-87171-354-3. American Welding Society. 1998. 550 N. W. LeJeune Rd., P.O. Box 351040, Miami, FL 33135.

AWS/SAE D8.9M., 2002, “*Recommended Practices for Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials*”. International Standard Book Number: 0-87171-672-0. 2002. American Welding Society. 550 N. W. LeJeune Road, Miami, Florida 33126. Printed in the U.S.A.

ARCELOR MITTAL, 2015, “ArcelorMittal Aços Planos América Latina – Brasil Catálogo de Produtos Laminados”

ASLANLAR, S., 2006, “*The Effect of Nucleus Size on Mechanical Properties in Electrical Resistance Spot Welding of Sheets Used in Automotive Industry*” *Material an design*, Vol. 27, pp. 125-131

AURES, J. E. V., 2006, “*Estudo da Formação, Geometria e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistência: Uma Abordagem Estatística*” *Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos*, Universidade de Brasília, 164p, Brasília, DF

BOSCH., 2004. “*Catálogo de motores elétricos Bosch*”. Catálogo número: 6 008 FP1 553/200406. Campinas, SP. 56p.

BRANCO, H. L. O., 2004, “*Avaliação de Capas de Eletrodos Utilizadas na Soldagem por Resistência de Chapas Galvanizadas Automotivas*” *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Paraná, 116pCuritiba, PR

BRANCO, H. L. O., OKIMOTO, P. C., 2012, “*Análise do Desgaste de Capas de Eletrodos de Solda Ponto e Sua Influência na Qualidade da Soldagem de Chapas Automotivas Galvanizadas*” *Soldagem e Inspeção*, Vol. 17, No. 4, pp 347-355, Outubro/Dezembro

CHAO, Y. J., 2003, “*Failure Mode of Spot Weld: Interfacial Versus Pullout*” Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 8, No2

CHAO, Y. J., 2003, “*Ultimate Strength and Failure Mechanism of Resistance Spot Weld Subjected to Tensile, Shear or Combined Tensile/Shear Loads*” Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 125, pp 125-132, Abril

COMAU, 2010, “Manual de Manutenção Pinça de Solda Versa” Traduzido por Vanessa Campos, Betim, Brasil, 39p

COTA, B.S., 2015, “Metodologia para Ensaio da Resistência à Torção de Solda a Ponto por Resistência Elétrica” Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 144p.

DAMASCO, A., 1994, “Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica de Juntas de Chapa/Chapa e Chapa/Tubo de Aço Carbono com Diferentes Composições Químicas, Espessuras e Revestimentos”. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, SP. 262p.

DICKINSON, D. W. *et al.*, 1980, “*Characterization of Spot Welding Behavior by Dynamic Electrical Parameter Monitoring*”. Welding Journal, p. 170s-176s, Junho.

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

FIAT GROUP AUTOMOBILES, 2007, “*Normazione: Saldatura elettrica per resistenza a sovrapposizione*”. Capitolato: 9.50171. P&PE: Ingeneria dei materiali, Metallurgia. Turim. pp. 11.

FONSECA, E. O., 1999, “Monitoração da resistência dinâmica na soldagem a ponto por resistência elétrica e avaliação da sua relação com a resistência mecânica do ponto de solda”. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

FURLANETTO, V., 2014, “Desenvolvimento e Instrumentação de Um Cabeçote de Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica para Aplicação em Condições Industriais” Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

GF WELDING, 2005, “*Integrated Inverter MFDC Weld334m Use and Maintenance Handbook*” Catálogo número: 39003022, Segunda Edição, Turim, Italia, Fevereiro

IMC, 2014, “SAP – V4 + V4Ti + V4CTi Manual do Sistema” Palhoça, SC

INTERMACHINERY., 2012, “*Nitrode*”. 2p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION, 2012, “*Resistance Welding – Destructive Tests on Welds in Metallic Materials – Torsion Test of Resistance Spot Welds*”, 2 Ed., (17653/2012)

KOSOW, I. L., 1982, “*Máquinas Elétricas e Transformadores*” tradução de : Felipe Luís Dainello e Percy Antônio, Porto Alegre, RS, Editora Globo

LANCASTER, J.F., “*Metallurgy of welding*”, 6th Ed., Abington Publishing, Abington (GB); 1999.

LEVINE, D. M., BERENSON, M. L. e STEPHAN, D., 2000, “*Estatística: Teoria e Aplicações usando o Excel*” Editora LTC, Rio de Janeiro, RJ

LIN, S. H., PAN, J., TYAN, T., PRASAD, P., 2003, “*A General Failure Criterion for Spot Welds Under Combined Loading Conditions*” International Journal os Solids and Structures, Vol. 40, pp. 5539-5564

LIN, S. H., PAN, J., WU, S. R., TYAN, T., WUNG, P., 2002, “*Failure Loads of Spot Welds Under Combined Opening and Shear Static Loading Conditions*” International Journal of Solids and Structures, Vol. 39, pp. 19-39

MACHADO, I. G., 1996, “*Soldagem e Técnicas Conexas: Processos*” editado pelo autor, Porta Alegre, RS

MARQUES, P. V. MODENESI, P. J. BRACARENSE, A. Q., 2009, “*Soldagem: Fundamentos e Tecnologia*”. 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. 363p.

MBN 10382, 2005, “*Mercedes Benz Technische Norm: Widerstandpunktschweissen von Stahl bis 3mm Blenchdicke*”, Stuttgart apud SANTOS, F. B., 2006. “*Estudo da Eficiência do Processo de Soldagem de Pontos por Resistência Elétrica Utilizado na Indústria*

Automobilística”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Sistemas de Gestão, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ. 104p.

MEDAR COMÉRCIO E SERVIÇOS, 2004, “Apostila do Treinamento Básico do Processo de Soldagem por Resistência”

MILLER, 2012, “*Handbook for Resistance Spot Welding*” Catálogo número: 003 335D, Appleton, EUA

MURRAY, N. W., 1994, “*Load Behavior of Thin-walled Spot Welded Structures Used in the Vehicle Industry*” Engineering Structures, Vo. 16, No. 5, pp 363-367

OUISSSE, M., COGAN, S., 2010, “*Robust Design os Spot Welds in Automotive Structures: A Decision-Making Methodology*” Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 24, pp-1172-1190

PAIXÃO, J. P., 2009, “Controle de Velocidade de Motores Elétricos” Monografia – Especialização, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Eletrônica Especialização em Automação Industrial, 65p, Curitiba, Paraná

PINHEIRO, H, J, G., 2010, “Estudo da Correlação entre a Corrente de “Shunt” e a Feometria do Ponto de Solda em Função do Espessamento, em Chapa de Aço de Baixo Teor de Carbono e Espessura de 0,8mm” Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia SENAI CIMETEC, Salvador, BA, 112p.

POURANVARI, M., 2011, “*Effect of Welding Parameters on the Peak Load and Energy Absorption of Low-Carbon Steel Resistance Spot Welding*” International Scholarly Research Network Mechanical Engineering, Vol. 2011, 7p

POWELL, H. J., WESTGATE, S.A. e WEIMER, K., 1996, “A practical guide to process and quality control for resistance spot welding”, The Welding Institute, Report n°569/1996, August.

ROHDE, R. A., 2010, “Metalografia Preparação de Amostras” Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais, URI, Santo Ângelo, RS

RUIZ, D. C., 2005, “Contribuição ao desenvolvimento de Processos de Montagem e Soldagem de Carrocerias Automotivas” Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP

RUNNELMALN, A., APPELGREN, A., 2014, “*Evaluation of Non-destructive Testing Methods for Automatic Quality Checking of Spot Welds*” University West

RUIZ, D. C., BATALHA, G.F., 2005, “Estudo de um critério de modo de falha para solda a ponto por resistência” II Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF, Joinville, SC.

SANTOS, F. B., 2006, “Estudo da Eficiência do Processo de Soldagem de Pontos por Resistência Elétrica Utilizado na Indústria Automobilística” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ

SANTOS, F. B., MAINIER, F. B., 2006, “Variáveis Relevantes para a Qualidade do Processo de Soldagem de Pontos por Resistência Elétrica Utilizado na Indústria Automobilística” III SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, Rezende, RJ

SCANMASTER, 2005, “*SWI – 100x Spotweld Inspector Ultrasonic Instrument for Spotweld Inspection*” Catálogo número: GB20040085, Hod Ha’ Sharon, Israel

STOCCO, D., GONÇALVES, R., 2003, “Caracterização dos Defeitos Encontrados em Solda a Ponto Utilizando Técnica do Ultrassom, Apoiado a Exames Metalográficos”, 3rd Pan American Conference for Nondestructive Testing, Hotel Inter Continental, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

TAYLOR WINFIELD CORPORATIONS, *, “*Nitrode and Z-Trode*”,

TECNA, 2005, “*Test and Measurement Instruments*” Catálogo versão: 05/2005, Castel San Pietro, Itália

TESSONIC, *, “RSWA – Resistance Spot Weld Analyzer” Birmingham, EUA

TRAFOLUID, 2012, “*Handbook of Resistance Welding*”, Chiasso, Suíça

VARGAS, J. E., 2006, “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. 143p.

VENCEGUERRA, L. C., BATISTA, M., FURLANETTO, V., BRANDI, S. D., 2013, “O Comportamento da Resistência Dinâmica com Relação à Deformação do Eletrodo na Soldagem a Ponto por Resistência, 68º Congresso Anual da ABM, pp. 4551-4564.

WEG, 2007, “DT-3 Características e Especificações de Motores de Corrente Contínua e Conversores CA/CC” Jaraguá do Sul, SC

WOLFF, M. A., SILVA, R. F., VILARINHO, L. O., 2010, “Determinação dos Campos de Soldabilidade para o Aço Dual-Phase 600 em Equipamentos de Soldagem a Ponto AC e MFDC” Soldagem e Inspeção, Vol. 15, No. 3, pp. 200-208, São Paulo, SP, Julho/Setembro

WUNG, P., WALSH, T., OURCHANE, A., STEWART, W., JIE, M., 2001, “*Failure of Spot Welds under In-plane Static Loading*” Experimental Mechanics, Vol. 41, No 1, Março

WUNG, P., 2000, “*A Force-based Failure Criterion for Spot Weld Design*” Experimental Mechanics, pp 107-113

ZHANG, H., SENKARA, J., 2006, “*Resistance Welding*” Taylor and Francis Group, Boca Raton, EUA

ZHANG, W. H., QIU, X. M., SUN, D. Q., HAN, L. J., 2011, “*Effects of Resistance Spot Welding Parameters on Microstructures and Mechanical Properties of Dissimilar Material Joints of Galvanized High Strength Steel and Aluminum Alloy*” Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 16, No. 2, pp. 153-161