



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

**INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE PONTOS**  
**DE SOLDA SOBRE O DESEMPENHO DE ESTRUTURAS**  
**SIMILARES A LONGARINAS VEICULARES SUBMETIDAS A**  
**TESTE DE COLISÃO**

**DIOGO ANTÔNIO DE SOUSA**

**Belo Horizonte, 13 de julho de 2018**

Diogo Antônio de Sousa

**INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE PONTOS  
DE SOLDA SOBRE O DESEMPENHO DE ESTRUTURAS  
SIMILARES A LONGARINAS VEICULARES SUBMETIDAS A  
TESTE DE COLISÃO**

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

2018



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

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário  
31270-901 - Belo Horizonte - MG  
Tel.: +55 31 3409.5145  
E-mail: [cpgmec@demec.ufmg.br](mailto:cpgmec@demec.ufmg.br)

**"INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE PONTOS DE  
SOLDA SOBRE O DESEMPENHO DE ESTRUTURAS SIMILARES A  
LONGARINAS VEICULARES SUBMETIDAS A TESTE DE COLISÃO"**

**DIOGO ANTÔNIO DE SOUSA**

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Doutor em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Processos de Fabricação**".

Tese aprovada no dia 13 de julho de 2018.

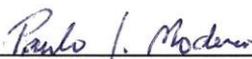
Por:



---

**Prof. Alexandre Queiroz Bracarense**

Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG



---

**Prof. Paulo José Modenesi**

Universidade Federal de Minas Gerais



---

**Prof. Ariel Rodríguez Arias**

Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG



---

**Prof. Luiz Cláudio Cândido**

Universidade Federal de Ouro Preto



---

**Prof. Paulo Cesar Okimoto**

Universidade Federal do Paraná

Dedicado a todos aqueles que buscam no  
conhecimento uma forma de tornar o  
mundo um lugar melhor.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por ter me dado condições de chegar até aqui.

Aos meus pais, José Alves de Sousa e Irani Almeida Sousa, a quem devo tudo que sou e por sempre terem me apoiado em todas as escolhas que tomei. A Cíntia Braga, pelo companheirismo, dedicação e apoio incondicional.

Ao meu orientador, Professor PhD Alexandre Queiroz Bracarense, pela confiança, paciência e pelas horas empenhadas em auxiliar na elaboração e desenvolvimento deste projeto.

À Universidade Federal de Minas Gerais e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este curso. Aos professores do Curso de Pós-Graduação da UFMG, pelo convívio e ensinamentos transmitidos. Em especial a todos as pessoas que compõem o Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação pela parceria e ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal de Ouro Preto e ao Departamento de Engenharia Mecânica pelo incentivo e oportunidade de realizar este curso.

Ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear pela disponibilidade de equipamentos para realização de ensaios mecânicos.

A todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram e estiveram presentes nessa jornada.

Meus sinceros agradecimentos.

*“A nossa maior glória não reside no fato de nunca cairmos, mas sim em levantarmo-nos sempre depois de cada queda.”*

(Oliver Goldsmith)

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	17
LISTA DE TABELAS .....	19
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	17
NOMENCLATURA .....	20
RESUMO .....	21
1 INTRODUÇÃO .....	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1 Segurança veicular .....	27
2.1.1 Segurança veicular passiva.....	27
2.1.2 Normas de segurança veicular.....	27
2.1.3 Estrutura veicular.....	28
2.1.4 Desaceleração: uma analogia entre frenagem e colisão veicular .....	32
2.2 Processo de soldagem.....	34
2.2.1 Processo de soldagem a ponto por resistência elétrica.....	34
2.2.2 Corrente de soldagem.....	35
2.2.3 Força entre eletrodos.....	36
2.2.4 Tempo de soldagem.....	38
2.3 Análises e métodos de controle de qualidade do ponto de solda.....	39
2.3.1 Ensaios não destrutivos: Inspeção visual.....	40
2.3.2 Ensaios não destrutivos: com instrumentos de medição.....	40
2.3.3 Ensaios destrutivos.....	40
2.3.4 Análises metalográficas.....	41
2.3.5 Caracterização mecânica de pontos de solda.....	42
2.3.6 Modos básicos de carregamento sobre pontos de solda.....	43
2.3.7 Influência das condições de soldagem na resistência mecânica do ponto de solda.....	44
2.4 Modos de deformação de estruturas de parede finas .....	47
2.5 Fatores que podem influenciar os modos de deformação .....	50
2.5.1 Distância entre pontos de solda .....	50
2.5.2 Influência do processo de soldagem .....	53
2.5.3 Abertura do flange entre dois pontos de solda .....	54
2.5.4 Ruptura do ponto de solda .....	57

3	METODOLOGIA .....	60
3.1	Materiais .....	60
3.2	Equipamentos .....	60
3.2.1	Máquina de soldagem a ponto por resistência elétrica .....	60
3.2.1.1	Calibração da força dos eletrodos .....	61
3.2.1.2	Calibração da corrente e do tempo de soldagem .....	63
3.2.2	Dispositivo de posicionamento dos corpos de prova para soldagem .....	64
3.2.3	Máquina de ensaio torção e tração .....	67
3.2.4	Torre de ensaio de colisão .....	69
3.2.5	Câmera de alta velocidade .....	72
3.3	Preparação dos Corpos de prova .....	72
3.3.1	Corpos de prova: caracterização mecânica de pontos de solda .....	72
3.3.2	Longarinas .....	74
3.3.2.1	Seção transversal e dimensões .....	74
3.3.2.2	Longarinas: combinações de pontos de solda .....	75
3.4	Ensaio experimentais .....	76
3.4.1	Condições de soldagem .....	76
3.4.2	Ensaio de torção .....	78
3.4.3	Ensaio de arrancamento .....	78
3.4.4	Ensaio de colisão .....	79
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	82
4.1.	Caracterização dos pontos de solda .....	82
4.1.1	Análises macroscópicas.....	82
4.1.2.	Ensaio de torção .....	88
4.1.3.	Ensaio de arrancamento .....	90
4.1.4.	Análise comparativa entre ensaio de torção e arrancamento .....	93
4.2.	Modos de ruptura do ponto de solda na longarina .....	94
4.3	Modos de deformação da longarina .....	97
4.4	Estudo analítico de deformação da longarina .....	103
4.4.1	Comparação entre longarinas com pontos de solda de diferentes resistências mecânica: ponto “A” e “B” .....	104
4.4.1.1	Análise de desempenho: período de tempo anterior a perda de rigidez abrupta .....	111
4.4.1.2	Análise de desempenho: período de tempo posterior a perda de rigidez abrupta .....	114

4.4.1.3 Análise comparativa entre o período de tempo anterior e posterior a perda de rigidez abrupta .....	115
4.5 Combinações de pontos de solda nas longarinas .....	117
4.5.1 Comportamento estrutural .....	118
4.5.2 Desaceleração: longarinas com combinações de pontos de solda.....	121
5 CONCLUSÕES .....	131
5.1 Caracterização mecânica dos pontos de solda.....	131
5.2 Fatores de influência na deformação da longarina.....	131
5.3 Longarinas com combinações de pontos de solda.....	132
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	133
ABSTRACT .....	134
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	135
ANEXO A .....	139
ANEXO B.....	142
ANEXO C .....	150

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - Longarina: zona de sacrifício em situação de colisão veicular.....	24
FIGURA 1.2 – Aleatoriedade de ruptura de pontos de solda.....	25
FIGURA 2.1 - Configuração de teste da LatinNCAP.....	28
FIGURA 2.2 - Linhas de absorção de energia: (a) visão geral de distribuição dos esforços para colisão frontal, lateral e traseira; (b) detalhe de uma colisão frontal (descrição dos componentes principais).....	29
FIGURA 2.3 – Curvas de ensaio de colisão veicular referente ao veículo Vauxhall Cavalier contra uma barreira rígida a 58 km/h: aceleração (esquerda), velocidade e deslocamento (direita).....	30
FIGURA 2.4 - (a) Perfil de longarina assimétrica; (b) Perfil de longarina simétrico.....	31
FIGURA 2.5 - Seções transversais distintas de longarinas.....	31
FIGURA 2.6 - Curvas de força versus redução no comprimento das longarinas em situação de colisão para diferentes seções transversais: (a) Fig. 2.5(a), (b) Fig. 2.5(b), (c) Fig. 2.5(c) e (d) Fig. 2.5(d).....	32
FIGURA 2.7 – Curvas de frenagem: velocidades e desaceleração em alta aderência.....	33
FIGURA 2.8 - Formação do ponto de solda: (a) apresenta a força, corrente elétrica, resistências elétricas e a formação da lente de soldagem; (b) (c) Lente de soldagem.....	36
FIGURA 2.9 - Forças contrárias aos eletrodos pela pressão interna do ponto.....	37
FIGURA 2.10 - Tempo de soldagem em um processo de soldagem a ponto por resistência elétrica empo de soldagem.....	39
FIGURA 2.11 – (a) Ensaio de arrancamento, (b) ensaio de cisalhamento, (c) ensaio de torção e (d) deslocamento ou axial.....	40
FIGURA 2.12 - Metalografia do ponto de solda.....	41
FIGURA 2.13 – (a) ensaio de arrancamento e (b) ensaio de cisalhamento.....	43
FIGURA 2.14 - Modos básicos de carregamento.....	44
FIGURA 2.15 - (a) Ensaio de cisalhamento e (b) ensaio de arrancamento.....	45
FIGURA 2.16 - Ensaio de cisalhamento do ponto de solda. Curva do pico de força versus corrente de soldagem.....	46

FIGURA 2.17 - (a) Curva do diâmetro da lente de solda versus corrente de soldagem; (b) curva pico de força versus diâmetro da lente. Ensaio de cisalhamento do ponto de solda.....	46
FIGURA 2.18 - (a) deformação simétrica; (b) deformação assimétrica mista A; (c) deformação assimétrica mista B; (d) deformação com tensão trativa.....	47
FIGURA 2.19 - Modo de deformação assimétrico: (a) comprimento inicial = 222,1 mm; (b) comprimento inicial = 222,2 mm; (c) comprimento inicial = 100,0 mm; (d) comprimento inicial = 100,1 mm.....	48
FIGURA 2.20 - Modo deformação por flambagem.....	49
FIGURA 2.21 - Corrente de desvio, influência no diâmetro do ponto.....	51
FIGURA 2.22 - (a) Coluna A e B; (b) Geometria e dimensões dos corpos de prova.....	52
FIGURA 2.23 – (a) Força em função do deslocamento, (b) Energia em função da distância entre os pontos de solda .....	52
FIGURA 2.24 – Resultados dos diferentes processos de união de chapas em função da seção transversal e velocidade de deformação.....	53
FIGURA 2.25 - Experimento realizado fisicamente: (a) tipo I, (b) tipo II .....	54
FIGURA 2.26 - Deformação por flambagem, abertura inicial entre as chapas de 0, 23° .....	55
FIGURA 2.27 - Deformações por flambagem entre dois pontos de solda observadas em trabalhos de diferentes pesquisadores .....	55
FIGURA 2.28 - Abertura do flange entre dois pontos de solda .....	56
FIGURA 2.29 - Flambagem do flange localizada entre dois pontos de solda (deformação total máxima e deformação inicial máxima) .....	56
FIGURA 2.30 - Ruptura do ponto de solda. Material das amostras: (a) Aço Intersticial Free (IF) e (b) Aço Alta Resistência e Baixa Liga (HSLA).....	58
FIGURA 2.31 - Ruptura do ponto de solda utilizando o ensaio de arrancamento. Material das amostras: (a) Aço Macio e (b) Aço Intersticial Free (IF).....	58
FIGURA 2.32 – Configuração dos testes dinâmicos.....	59
FIGURA 3.1 – Máquina de soldagem a ponto por resistência elétrica .....	61
FIGURA 3.2 – Dinamômetro hidráulico .....	62
FIGURA 3.3 – Curva de calibração do dinamômetro hidráulico .....	63
FIGURA 3.4 – Calibração da corrente e tempo de soldagem da máquina de soldagem .....	64
FIGURA 3.5 – Dispositivo de posicionamento de corpos de prova em relação a máquina de soldagem a ponto .....	65

FIGURA 3.6 – Soldagem do corpo de prova usado no ensaio de arrancamento do ponto de solda.....	66
FIGURA 3.7 – Soldagem do corpo de prova usado no ensaio de torção do ponto de solda.....	66
FIGURA 3.8 – Longarina fixada ao dispositivo de posicionamento .....	67
FIGURA 3.9 – Máquina de ensaio de torção (dimensões em mm) .....	68
FIGURA 3.10 - Garra para fixação dos corpos de prova (teste de torção) .....	68
FIGURA 3.11 – (a) Máquina de ensaio de tração e (b) corpo de prova fixados pelas garras do tipo mordente .....	69
FIGURA 3.12 – Dispositivo “guia”: (a) desenho esquemático e (b) dispositivo construído ....	70
FIGURA 3.13 – Dispositivo “guia”: (a) desenho esquemático e (b) dispositivo construído. Dimensões em mm.....	71
FIGURA 3.14 – Corpo de prova: ensaio de torção (dimensões em mm) .....	72
FIGURA 3.15 – Corpo de prova: ensaio de arrancamento (dimensões em mm) .....	73
FIGURA 3.16 – Posição de soldagem (esquerda) e corte C-C (direita) para metalografia .....	74
FIGURA 3.17 – Longarina: dimensões, geometria e espaçamento entre pontos de solda (dimensões em mm) .....	75
FIGURA 3.18 – Distribuição de pontos de solda com diferentes resistências mecânica: (a) maior resistência mecânica, (b) menor resistência mecânica, (c)(d)(e)(f) combinações de pontos de solda “A” e “B” .....	76
FIGURA 3.19 – Comparação entre pontos de solda produzidos com diferentes condições de soldagem .....	77
FIGURA 3.20 – Ensaio de torção até a ruptura total do ponto de solda .....	78
FIGURA 3.21 – Ensaio de arrancamento até a ruptura total do ponto de solda .....	79
FIGURA 3.22 - Deformação final das longarinas após serem submetida a diferentes condições de ensaios .....	80
FIGURA 3.23 – Sistema de referência da câmera de alta velocidade: (a) desenho esquemático e (b) detalhe .....	81
FIGURA 4.1 - ((a) Ensaio de torção, ausência de fratura em botão; (b) Ensaio de arrancamento, presença de fratura em botão. Para pontos de solda produzidos com as condições de soldagem: (1) 9ciclos/6kA, (2) 9ciclos/7kA e (3) 20ciclos/6kA.....	82

FIGURA 4.2 – Análise macroscópica: (a) 9ciclos/6kA; (b) 9ciclos/7kA; (c) 20ciclos/6kA e (d) 9ciclos/8kA .....	83
FIGURA 4.3 - (a) Diâmetro médio do ponto de solda após ruptura; (b) ensaio de arrancamento; (c) ensaio de torção.....	85
FIGURA 4.4 – Análise macroscópica da fratura do ponto de solda: (a) 9ciclos/8kA; (b) 20ciclos/6kA.....	86
FIGURA 4.5 – Fratura dos pontos de solda após ensaios (a) torção e (b) arrancamento.....	87
FIGURA 4.6 – Curva força-ângulo de torção (ensaio de torção): (a) 9 ciclos; (b) 20 ciclos.....	88
FIGURA 4.7 – Desenho esquemático do ensaio de torção: cálculo da energia.....	89
FIGURA 4.8 - Curva energia-ângulo de torção (ensaio de torção): (a) 9 ciclos; (b) 20 ciclos.....	90
FIGURA 4.9 – Energia torcional média: (a) tempo de corrente; (b) corrente de soldagem.....	90
FIGURA 4.10 - Curva de força-deslocamento (ensaio de arrancamento): (a) 9 ciclos; (b) 20 ciclos.....	91
FIGURA 4.11 - Curva de energia-deslocamento (ensaio de arrancamento): (a) 9 ciclos; (b) 20 ciclos.....	92
FIGURA 4.12 – Energia de arrancamento média: (a) tempo de corrente; (b) corrente de soldagem.....	93
FIGURA 4.13 – Comparativo de energia der ruptura do ponto de solda entre o ensaio de torção e arrancamento.....	93
FIGURA 4.14 – Torção de pontos de solda: (a) 9° e 9.7° (condição 1); (b) 30° e 5° (condição 2); (c) 13.3° (condição 3).....	94
FIGURA 4.15 - (a) Ruptura catastrófica de ponto de solda (condição 2); (b) Ruptura parcial de ponto de solda (condição 3 – 9ciclos/8kA (padrão)).....	95
FIGURA 4.16 - Ruptura catastrófica e parcial de ponto de solda: (a) condição 3 - 20ciclos/6kA- amostra A; (b) condição 2 - 9ciclos/8kA- amostra A.....	96
FIGURA 4.17 – Ruptura total dos pontos de solda: (a) ensaio de torção; (b)(e) ensaio de arrancamento; (c)(d)(f) ruptura do ponto na longarina.....	97
FIGURA 4.18 - Condição 3 (TAB. 3.4), formação de lóbulos a partir da primeira dobra: (a) cortes “A-A” e “B-B”, e representação da primeira dobra; (b) 9ciclos/8kA- amostra E; (c) 9ciclos/8kA- amostra B e (d) 20ciclos/6kA- amostra B.....	98
FIGURA 4.19 – Maior rigidez localizada. FI – Dobra para dentro da seção transversal.....	99

FIGURA 4.20 – Modos de deformação – Condição de teste e parâmetros de soldagem: (a) condição 1 e 9ciclos/8kA - amostra A; (b) (c) condição 3 e 9ciclos/8kA - amostra E e B; (d) condição 3 e 20ciclos/6kA – amostra A.....	100
FIGURA 4.21 – Condição 1: modo de abertura do flange: (a) deformação da longarina (Amostra 1), (b) desenho esquemático da abertura do flange e (c) detalhe da deformação (Amostra 1).....	101
FIGURA 4.22 - Condição 3: modo de deformação sem abertura do flange: (a) deformação da longarina (Amostra “9ciclos/8kA – E”), (b) desenho esquemático da deformação do flange e (c) detalhe da deformação (Amostra – “9ciclos/8kA – E”).....	102
FIGURA 4.23 – Dobramento inicial iguais: (a) abertura do flange; (b) ruptura catastrófica de pontos de solda.....	103
FIGURA 4.24 – Comportamento de curvas de desaceleração: ruptura catastrófica e parcial de pontos de solda.....	105
FIGURA 4.25 – Identificação das longarinas em grupos: tipo de ruptura de ponto de solda.....	106
FIGURA 4.26 – Compressão: (a) 9ciclos/8kA; (b) 20ciclos/6kA.....	106
FIGURA 4.27 - Influência de tipos de ruptura de pontos de solda na deformação da longarina: (a) ruptura catastrófica e (b) ruptura parcial.....	107
FIGURA 4.28 – Comparativo entre os modos de ruptura do ponto de solda.....	109
FIGURA 4.29 – Curva de desaceleração-tempo.....	110
FIGURA 4.30 – Energia absorvida pela longarina: (a) completo e (b) parcial.....	112
FIGURA 4.31 - (a) Amplitude - Desaceleração: picos-vales; (b) Somatório das amplitudes.....	113
FIGURA 4.32 - (a) Amplitude - Desaceleração: picos-vales; (b) Somatório das amplitudes.....	115
FIGURA 4.33 – Comparativo de desempenho entre os grupos de longarinas: período de tempo anterior e posterior a perda rigidez abrupta (curva de desaceleração).....	116
FIGURA 4.34 – Combinações de pontos de solda na longarina.....	117
FIGURA 4.35 – Comportamento estrutural ao final da deformação. Imagens da câmera de alta velocidade.....	118
FIGURA 4.36 – Compressão média dos grupos de longarinas.....	121
FIGURA 4.37 – Curvas de desaceleração: comparativo entre os grupos de longarinas.....	123

FIGURA 4.38 – Curva de desaceleração: análise comparativa do comportamento de longarinas representadas por “(1) 9ciclos/8kA (1) 20ciclos/6kA” .....	123
FIGURA 4.39 – Curva de desaceleração: análise comparativa do comportamento de longarinas representadas por “(1) 9ciclos/8kA (2) 20ciclos/6kA” .....	124
FIGURA 4.40 – Curva de desaceleração: análise comparativa do comportamento de longarinas representadas por “(6) 9ciclos/8kA (7) 20ciclos/6kA” .....	124
FIGURA 4.41 – Curva de desaceleração: análise comparativa do comportamento de longarinas representadas por “(6) 20ciclos/6kA (7) 9ciclos/8kA” .....	125
FIGURA 4.42 – Curvas de energia absorvia: comparativo entre os grupos de longarinas.....	125
FIGURA 4.43 – Comparativo de desempenho entre os grupos de longarinas: período de tempo anterior e posterior a perda rigidez abrupta (curva de desaceleração).....	126
FIGURA A1 - (a) Dimensões da fundação; (b) Posicionamento da chapa de aço.....	139
FIGURA A2 - Posicionamento da torre.....	139
FIGURA A3 - Painéis de construção da torre. Unidade de medida: [mm].....	140
FIGURA A4 - Torre instalada.....	140
FIGURA A5 – Martelo de colisão. Unidade de medida: [mm].....	141
FIGURA B1 – Longarinas representadas por “9ciclos/8kA” (FIG 4.23).....	142
FIGURA B2 – Longarinas representadas por “20ciclos/6kA” (FIG 4.23).....	143
FIGURA B3 – Longarinas representadas por “(1) 9ciclos/8kA (1) 20ciclos/6kA” (FIG 4.34).....	143
FIGURA B4 – Longarinas representadas por “(1) 9ciclos/8kA (2) 20ciclos/6kA” (FIG 4.34).....	144
FIGURA B5 – Longarinas representadas por “(6) 9ciclos/8kA (7) 20ciclos/6kA” (FIG 4.34).....	144
FIGURA B6 – Longarinas representadas por “(6) 20ciclos/6kA (7) 9ciclos/8kA” (FIG 4.34).....	145
FIGURA B7 – Curvas de desaceleração das longarinas representadas por “9ciclos/8kA” (FIG 4.25).....	145
FIGURA B8 – Curvas de desaceleração das longarinas representadas por “20ciclos/6kA” (FIG 4.25).....	146
FIGURA B9 – Curvas de desaceleração das longarinas representadas por “(1) 9ciclos/8kA (1) 20ciclos/6kA” (FIG 4.34).....	146

FIGURA B10 – Curvas de desaceleração das longarinas representadas por “(1) 9ciclos/8kA (2) 20ciclos/6kA” (FIG 4.34).....	147
FIGURA B11 – Curvas de desaceleração das longarinas representadas por “(6) 9ciclos/8kA (7) 20ciclos/6kA” (FIG 4.34).....	147
FIGURA B12 – Curvas de desaceleração das longarinas representadas por “(6) 20ciclos/6kA (7) 9ciclos/8kA” (FIG 4.34).....	148

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELA 3.1 - Composição química e propriedades mecânicas do aço SAE 1006 .....	60
TABELA 3.2 - Condições de soldagem padrão .....	76
TABELA 3.3 - Condições de soldagem.....	77
TABELA 3.4 - Condições iniciais para o ensaio de colisão das longarinas.....	79
TABELA 4.1 - Dimensões da lente de solda e ZTA (a) 9ciclos/6kA; (b) 9ciclos/7kA; (c) 20ciclos/6kA e (d) 9ciclos/8kA.....	82
TABELA 4.2 - Abertura do flange das longarinas.....	117
TABELA 4.3 - Orientações da primeira dobra.....	118
TABELA 4.4 - Análise comparativa entre longarinas representadas por “9ciclos/8kA” e “20ciclos/6kA”.....	120
TABELA 4.5 - Análise comparativa: “9ciclos/8kA” e “(1)9ciclos/8kA(1)20ciclos/6kA”, “20ciclos/6kA” e “(1)9ciclos/8kA(1)20ciclos/6kA”.....	125
TABELA 4.6 - Análise comparativa: “9ciclos/8kA” e “(1)9ciclos/8kA(2)20ciclos/6kA”, “20ciclos/6kA” e “(1)9ciclos/8kA(2)20ciclos/6kA”.....	126
TABELA 4.7 - Análise comparativa: “9ciclos/8kA” e “(6)9ciclos/8kA(7)20ciclos/6kA”, “20ciclos/6kA” e “(6)9ciclos/8kA(7)20ciclos/6kA”.....	126
TABELA 4.8 - Análise comparativa: “9ciclos/8kA” e “(6)20ciclos/6kA(7)9ciclos/8kA”, “20ciclos/6kA” e “(6)20ciclos/6kA(7)9ciclos/8kA”.....	127
TABELA B1 - Pico Máximo de desaceleração: média, desvios padrão e resultado estatístico das interações entre as longarinas.....	148
TABELA B2 - Desaceleração média: média, desvios padrão e resultado estatístico das interações entre as longarinas.....	149
TABELA B3 - Somatório das amplitudes: média, desvios padrão e resultado estatístico das interações entre as longarinas.....	149
TABELA C1 - Análise da variância da energia torcional absorvida pelos pontos de solda em condições de soldagem distintas.....	150
TABELA C2 - Análise da variância da energia absorvida pelos pontos de solda no ensaio de arrancamento em condições de soldagem distintas.....	151
TABELA C3 - Análise da variância da compressão de todas longarinas ensaiadas.....	152

TABELA C4 - Análise da variância da desaceleração média das longarinas produzidas somente com pontos de solda “A” e “B” (FIG 4.25).....	152
TABELA C5 - Análise da variância do pico máximo de desaceleração das longarinas produzidas somente com pontos de solda “A” e “B” (FIG 4.25).....	152
TABELA C6 - Análise da variância da energia absorvida pelas longarinas no instante 0,0167s.....	153
TABELA C7 - Análise da variância dos picos máximos de desaceleração das longarinas antes da perda de rigidez abrupta.....	153

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LatinNCAP	Latin New Car Assessment Programme
ZTA	Zona Termicamente Afetada
HSLA	Aço Alta Resistência e Baixa Liga
IF	Aço Intersticial Free
SAE	Society of Automotive Engineers
ABS	Antilock Brake System
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
IFHS	Interstitial Free High Strength
MS	Mild Steel
RWMA	Resistance Welder Manufacturer's Association
PCC	Phantom Camera Control
AWS	American Welding Society

## NOMENCLATURA

### Letras Latinas

$Q$	Energia elétrica transformada em calor na resistência elétrica
$i$	Corrente elétrica [kA]
$R$	Resistência elétrica por onde a corrente elétrica circula [ $\Omega$ ]
$P_m$	Força média de compressão (deformação plástica) [N]
$M_0$	Momento totalmente de plástico [Nm]
$C$	Constante de área [m]
$b$	Largura da seção transversal [m]
$d_A$	Altura da seção transversal da estrutura tubular [m]
$E_s$	Energia específica [J]
$A_0$	Área da seção [m <sup>2</sup> ]
$t$	Tempo [s]
$E_a$	Energia total absorvida inelasticamente [J]
$E_t$	Energia cinética no instante anterior a colisão [J]
$E_{pot}$	Energia potencial em função do esmagamento do corpo de prova [J]
$E_{re}$	E energia cinética instantânea (durante a colisão) [J]
$H_0$	Altura inicial da amostra [m]
$H_1$	Altura da amostra após o teste [m]
$v_i$	Velocidade no instante anterior ao impacto [m/s]
$v_{re}$	Velocidade instantânea (durante a colisão) [m/s]
$\Delta d$	Braço de alavanca variável [m]
$v_m$	Velocidade média [m/s]
$w$	Espessura [mm]

### Letras Gregas

$\sigma_0$	Tensão média do escoamento [MPa]
$\sigma_u$	Limite de resistência à tração do material [MPa]
$\mu$	Média populacional
$\delta_f$	Compressão do corpo de prova

## RESUMO

Longarinas são componentes estruturais de carrocerias veiculares que têm a função de absorver a energia cinética em situações de colisão frontal. Estas são fabricadas a partir de chapas soldadas por meio do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica. Neste contexto, este estudo investigou a interação entre pontos de solda com diferentes resistências mecânica combinados ou não sobre seções estruturais de paredes finas, semelhantes as longarinas, submetidas a testes de colisão. Fatores que influenciam o modo de deformação, como a ocorrência de torção e ruptura catastrófica (total) de pontos de solda foram identificados e caracterizados. Os corpos de prova foram construídos utilizando um aço carbono SAE/ABNT 1006 sem revestimento e espessura de 0,90 mm. Quatro condições de testes foram estabelecidas, diferindo entre si a energia de colisão. Todas as longarinas testadas apresentaram pelo menos a torção de um ponto de solda, em média de 10°. Dois modos de deformação característicos foram identificados e descritos na forma de modelo. Duas condições de soldagem foram definidas, sendo que uma em relação a outra produziu pontos de solda com maior e menor resistência mecânica. Esta caracterização se deu por meio de ensaios de arrancamento, torção e análises metalográficas. O ensaio de torção foi crucial para escolha de uma das condições de soldagem, uma vez que o ponto de solda com menor resistência mecânica foi aprovado nos ensaios de arrancamento e análise metalográfica, no entanto, foi reprovado no ensaio de torção. Longarinas produzidas utilizando estas condições de soldagem foram testadas sobre condição de colisão. O resultado mostrou que longarinas construídas somente com a condição de soldagem que produziu pontos de solda com menor resistência mecânica, apresentou pelo menos uma ruptura catastrófica de ponto de solda. Estas longarinas apresentaram menores desaceleração média e menores picos de desaceleração, quando comparadas as longarinas construídas somente com a condição de soldagem que produziu pontos de solda com maior resistência mecânica. Considerando que a deformação máxima e a energia absorvida por todas as longarinas estudadas, não tiveram diferenças significativas. Com relação as longarinas que foram construídas combinando estas duas condições de soldagem, o intuito foi promover rupturas de pontos de solda controladas. Isso significa que pontos de solda com menor resistência mecânica foram dispostos na estrutura considerando possíveis locais de rupturas. Os resultados mostraram que a resistência mecânica do ponto de solda influencia o comportamento dinâmico. Isto é, a desaceleração da longarina é influenciada pela resistência

do ponto de solda. Todas as longarinas em que foram combinadas as condições de soldagem, as rupturas catastróficas de pontos de solda ocorreram somente em pontos que foram soldados com a condição que produziu pontos de solda com menor resistência mecânica.

***Palavras-chave:*** *Ensaio de colisão, Longarinas veiculares, Ruptura de pontos de solda, Modos de deformação.*

# 1 INTRODUÇÃO

Milhares de pessoas em todo o mundo são mortas ou gravemente feridas devido a colisões veiculares todos os anos (TARLOCHAN e SAMER, 2013). Entre os padrões de colisão, o impacto frontal é o mais comum, responsável por cerca de 40% de todos os acidentes (CHEN et al., 2015).

A segurança veicular passiva, é uma área da engenharia automotiva que estuda mecanismos que otimizam a proteção de passageiros em situação de acidente. A estrutura veicular faz parte de um conjunto de elementos de proteção. Esta é composta por zonas de esmagamento progressivas que absorvem parte da energia cinética do acidente por meio de deformações plásticas (BOIS et al., 2004 e HAPPIAN-SMITH, 2002).

Apesar das várias inovações tecnológicas em materiais e processos de fabricação, os fundamentos produtivos não mudaram. A grande maioria da produção mundial de veículos, ainda utiliza como base para produção de estruturas veiculares, chapas de aço estampadas unidas por solda a ponto por resistência elétrica (MICHALOS et al., 2004, HAMIDINEJAD et al., 2012, ASLANLAR et al., 2008 e DAVIES, 2012). Uma carroceria veicular tem cerca de 300 peças estampadas em chapas metálicas, unidas por cerca de 4000 pontos de solda (SÖDERBERG et al., 2012).

A FIG 1.1 representada uma estrutura veicular onde está destacada a zona de sacrifício (esmagamento). A longarina é o principal componente projetado para absorver a energia cinética, sendo representada em estudos como estrutura retangular ou quadrada de parede fina formada por duas partes soldadas pelo processo de soldagem a ponto por resistência elétrica.

Estudos focados no entendimento dos modos de deformação e de variáveis que influenciam o comportamento dessa estrutura quando submetida a colisão, ainda se fazem necessários para melhoria de desempenho a fim de garantir a integridade física de ocupantes de veículos. Isso se justifica, pois existem fenômenos que ainda não foram totalmente investigados e caracterizados.

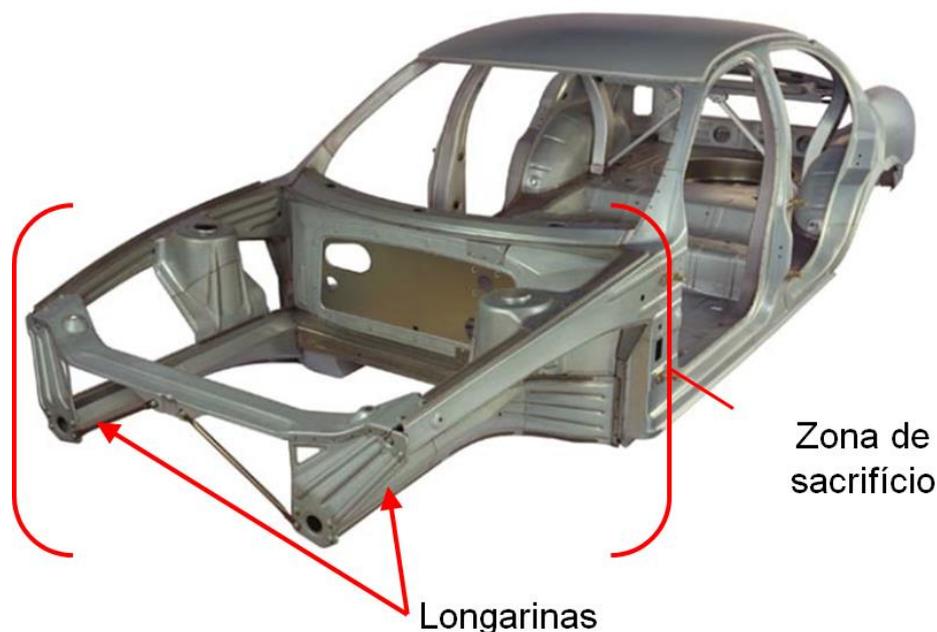


FIGURA 1.1 - Longarina: zona de sacrifício em situação de colisão veicular.

FONTE – BOIS et al., 2004

Diversos autores estudaram temas relacionados a essas estruturas submetidas a teste de colisão e as principais investigações abordaram assuntos, como: modos de deformação, rupturas de pontos de solda, análises de desempenho entre diferentes materiais e diversos processos de união tais como soldagem a ponto, soldagem com “laser” e uso de adesivos (ABRAMOWICZ, 2003, TARIGOPULA et al., 2006, SCHNEIDER e JONES, 2003, PERONI et al., 2009).

Ainda há lacunas a serem preenchidas. Um fenômeno que precisa ser investigado é em relação a aleatoriedade de ruptura de pontos de solda, uma vez que dois veículos idênticos, submetidos ao teste de colisão frontal, podem apresentar ruptura de diferentes pontos de solda nas longarinas. Na FIG. 1.2 estão representadas duas estruturas veiculares frontais similares em que longarinas estão em destaque. Nelas, dois pontos “C” e “D” representam os locais de ruptura de ponto de solda após deformação plástica, considerando as mesmas condições de teste. Acredita-se que essa variação pode influenciar o resultado de desempenho estrutural: aceleração, absorção de energia e compressão. Estudos sobre ruptura de pontos de solda em locais predeterminados devem ser realizados, a fim de eliminar aleatoriedade e promover melhoria de desempenho estrutural.

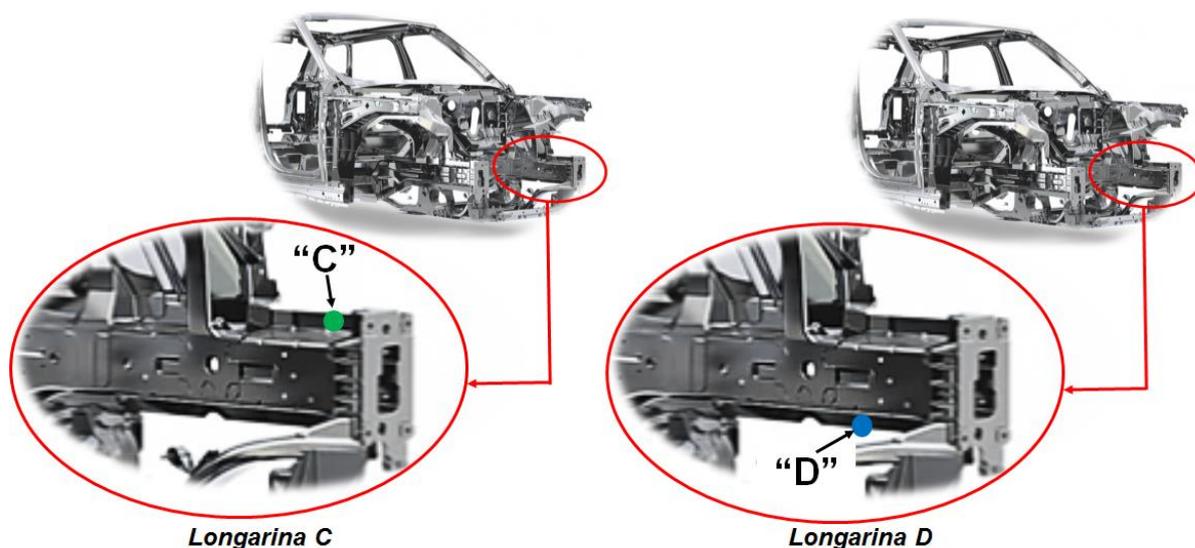


FIGURA 1.2 – Aleatoriedade de ruptura de pontos de solda.

FONTE - google/imagem, 2018

Para que as rupturas dos pontos de solda possam ser predeterminadas, é necessário produzir pelos menos dois pontos de solda com diferentes resistências mecânicas, sendo um com maior e outro com menor resistência mecânica, um em relação ao outro. Neste estudo, a dificuldade está em garantir que estes dois pontos de solda atendam as principais normas de controle de qualidade, no entanto, somente os pontos com menor resistência mecânica podem falhar nas longarinas submetidas ao ensaio de colisão. Isso significa que pontos de solda com menor resistência mecânica serão dispostos na longarina considerando possíveis locais de rupturas. Além disso, modos de ruptura dos pontos de solda devem ser investigados, conseqüentemente, os modos de deformação das longarinas. Então, a partir destas questões, propõem-se os seguintes objetivos:

### **Objetivo Geral**

Mostrar que a variação de resistência mecânica entre pontos de solda influencia a resposta dinâmica (deformação plástica) de longarinas veiculares submetidas a teste de colisão. O intuito é promover rupturas planejadas de pontos de solda de modo a alterar a resposta dinâmica da longarina com foco na melhoria de desempenho dessa estrutura.

## Objetivos Específicos

- Investigar a ocorrência de torção da solda em estruturas veiculares submetidas a colisão.
- Estudar duas condições de soldagem que produzam pontos de solda com diferentes resistências mecânica entre si (maior e menor resistência).
- Enumerar os principais fatores que influenciam o modo de deformação das longarinas, bem como, o nível de influência de cada um.
- Comparar o comportamento dinâmico entre longarinas soldadas com condições de soldagem distintas a fim de evidenciar se há diferenças significativas nos resultados de energia absorvida, compressão e desaceleração.
- Produzir longarinas combinando as duas condições de soldagem preestabelecidas (quatro combinações), com intuito de avaliar se a ruptura dos pontos de solda ocorre somente nos pontos com menor resistência mecânica.
- Evidenciar se as rupturas de pontos de solda previstas e planejadas resultaram em melhoria de desempenho das longarinas, isto é, avaliar se é possível introduzir comportamentos dinâmicos desejados por meio de combinações de pontos de solda com diferentes resistências mecânicas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Segurança veicular

A engenharia de segurança veicular é dividida em duas grandes áreas; a segurança ativa e passiva. A segurança veicular ativa tem o objetivo de evitar acidentes, os principais mecanismos e equipamentos responsáveis são: acústica, campo de visibilidade, sistema de direção, limpador e desembaçador de vidro, freios (ABS), identificação de comando (luz espia), pneus, cambio, espelho retrovisor, suspensão, sensor de estacionamento, ergonomia e conforto. A segurança veicular passiva tem o objetivo de proteger os ocupantes em caso de acidentes. Os principais mecanismos e equipamentos responsáveis são: portas, reservatório combustível, interruptor inercial, direção (absorver energia), para-choque (absorvedor de energia) e *crash box*, célula de sobrevivência, deformação programada frontal e traseira, cintos de segurança e pré-tensionadores, bancos e apoios de cabeça, sistema bag (*air bag*, *side side bag*, *head bag*) e painéis internos (absorver energia) (BERTOCCHI, 2005).

#### 2.1.1 Segurança veicular passiva

A segurança veicular passiva é subdividida em quatro macros áreas, sendo: estrutura (carroceria), *air bag*, biomecânica e interiores. Dentre estas áreas, a estrutura é a mais significativa, uma vez que serve de base para a incorporação dos outros itens de segurança e suporta cargas estáticas e dinâmicas durante o ciclo de vida do veículo. Além disso, é projetada para manter sua integridade e fornecer proteção adequada aos ocupantes em situação de colisão veicular (BOIS et al., 2004).

#### 2.1.2 Normas de segurança veicular

As normas de segurança veicular passiva são muito abrangentes e ao mesmo tempo específicas, por exemplo: em um teste de colisão frontal pode-se avaliar vários mecanismos, sistemas e componentes específicos, no entanto, há critérios de análise específicos para avaliações específicas (BERTOCCHI, 2005).

As normas foram criadas para garantir a integridade física dos usuários de veículos e do ambiente a sua volta (pedestres, ciclistas, animais, etc.). Os critérios e rigorosidade das

normas são específicas de cada país. Isto significa que nos países em que as normas são mais rigorosas, os veículos são mais seguros.

O principal teste realizado para avaliar o desempenho da estrutura veicular em relação à segurança veicular passiva é o ensaio de colisão frontal, em que 40% do frontal do veículo é colidido contra uma barreira deformável com ângulo de colisão de 0°, sendo que a velocidade de impacto é de 64 km/h (BOIS et al., 2004). Além da avaliação estrutural, é feita uma análise de biomecânica para quantificar os possíveis danos a integridade física dos ocupantes, sendo que dois manequins representando pessoas adultas são posicionadas nos bancos dianteiros e dois manequins representando crianças são posicionados em cadeirinhas nos bancos traseiros (LantinNCAP, 2018). Na FIG 2.1 está representado o teste de colisão.

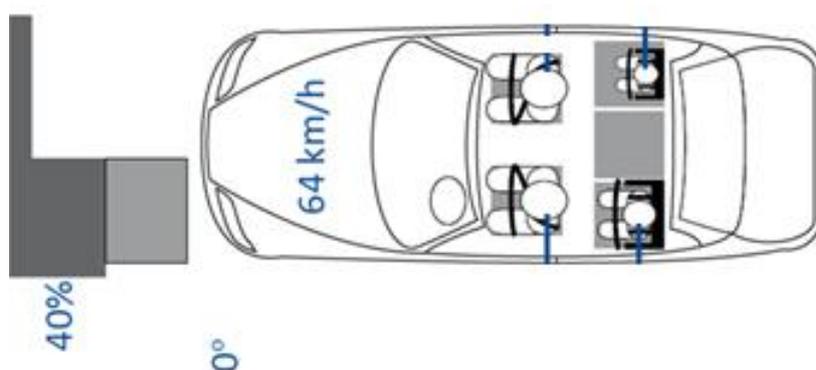


FIGURA 2.1 - Configuração de teste da LatinNCAP.

FONTE - Journal Carhs, 2016.

### 2.1.3 Estrutura veicular

As estruturas veiculares são compostas basicamente por chapas de aço conformadas pelo processo de estampagem e unidas por meio do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica (HAPPIAN-SMITH, 2002).

Bois et al. (2004) informam que durante uma colisão veicular parte da energia cinética deve ser absorvida pela estrutura, portanto, quanto maior a sua capacidade em absorver energia, maior sua performance. A rigidez da estrutura é uma variável de extrema importância, uma vez que determina a resposta em desaceleração e capacidade para absorver energia. Isto significa que, na condição de baixa rigidez, a estrutura absorve pouca energia cinética, enquanto que, com alta rigidez, aumenta a desaceleração. Nestas duas situações a integridade física dos ocupantes podem ser comprometida.

A FIG 2.2 representa uma estrutura veicular com suas linhas de distribuição de esforços, por onde a energia cinética é dissipada em situações de colisão frontal, lateral e traseira. Na FIG 2.3 estão representadas curvas aceleração, velocidade e deslocamento em função do tempo.

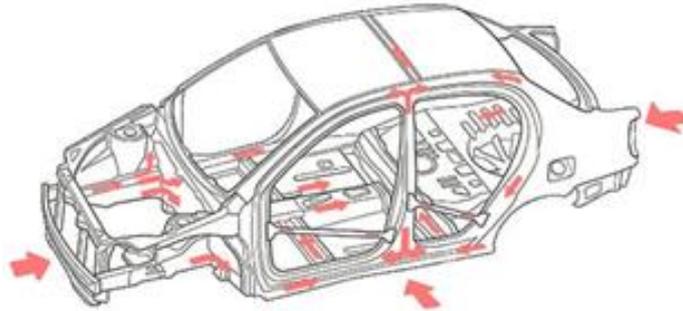


FIGURA 2.2 - Linhas de absorção de energia: (a) visão geral de distribuição dos esforços para colisão frontal, lateral e traseira; (b) detalhe de uma colisão frontal (descrição dos componentes principais).

FONTE - <http://www.bateuvida.com.br/seguranca-veicular>.

Happian-Smith (2002) também informam que o risco de lesão física para os ocupantes de um veículo submetido a colisão está diretamente associado com o tipo de colisão (frontal, lateral ou traseira) e quão rápido eles perdem a velocidade durante um impacto, ou seja, está associado com a desaceleração do ocupante no momento do impacto.

Schneider e Jones (in press) em seus estudos sobre estruturas similares a longarinas veiculares, determinaram a energia absorvida,  $E_a$ , e a força de compressão axial média,  $P_m$ , por meio das EQUAÇÕES (2.1) e (2.2).

$$E_a = E_t + E_{pot(\delta)} - E_{re} = \frac{1}{2}mv_i^2 + mg\delta_f - \frac{1}{2}mv_{re}^2 \quad (2.1)$$

$$P_m = \frac{E_a}{\delta_f} \quad \text{onde, } \delta_f = H_0 - H_1 \quad (2.2)$$

Onde  $E_a$  é a energia total absorvida inelasticamente,  $E_t$  é a energia cinética no instante anterior a colisão,  $E_{pot}$  é a energia potencial em função do esmagamento do corpo de prova e  $E_{re}$  é a energia cinética instantânea (durante a colisão). A compressão do corpo de prova,  $\delta_f$ , é dada pela diferença entre a altura inicial da amostra (antes do teste),  $H_0$ , e a altura da amostra durante a colisão, conseqüentemente, deformação do corpo de prova,  $H_1$ . A

velocidade no instante anterior ao impacto é representada por,  $v_i$ , e a velocidade instantânea (durante a colisão) é dada por,  $v_{re}$ .

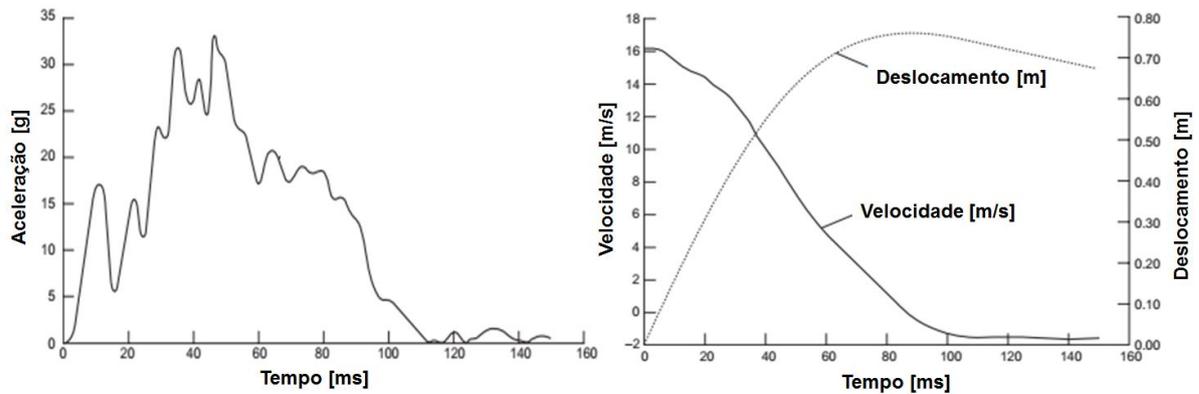


FIGURA 2.3 – Curvas de ensaio de colisão veicular referente ao veículo Vauxhall Cavalier contra uma barreira rígida a 58 km/h: aceleração (esquerda), velocidade e deslocamento (direita).

FONTE – Adaptada de HAPPIAN-SMITH, 2002

Do ponto de vista do ocupante, um veículo ideal se deformaria progressivamente, com uma força constante e com o maior deslocamento possível, conservando ao máximo o habitáculo (célula de sobrevivência). Nesta condição, a desaceleração seria constante e duraria o maior intervalo de tempo possível (HAPPIAN-SMITH, 2002).

Os componentes estruturais, tais como: longarinas, travessas, para-choque, capô, para-lamas, motor, suspensão e outros menos expressivos, irão absorver a maior parcela da energia envolvida numa colisão frontal (HAPPIAN-SMITH, 2002).

Segundo Bois et al. (2004), dentre os componentes a longarina é o que mais contribui para a absorção de energia. Essas estruturas tubulares de paredes finas são as preferidas em aplicações que exigem alto desempenho sob cargas de impacto. São componentes de geometria simples e bem definida (viga tubular quadrada, retangular ou cilíndrica), que respondem de maneira eficiente as solicitações impostas a fim de proteger os ocupantes do veículo em colisão frontal.

Tanlak e Sonmez (2014) afirmaram que o desempenho da longarina pode ser significativamente melhorado pela otimização da sua geometria e/ou processo de soldagem. A FIG 2.4 representa estruturas similares as longarinas utilizadas por veículos brasileiros, uma vez que todos os veículos populares (nacionais) utilizam um destes perfis. No entanto, as longarinas do tipo “cartola” (FIG 2.4(a)) são as mais utilizadas, a exemplo do veículo Chevrolet Onix, Volkswagen Gol, Fiat Uno, Hyundai HB20, dentre outros, esses são os mais vendidos no Brasil.

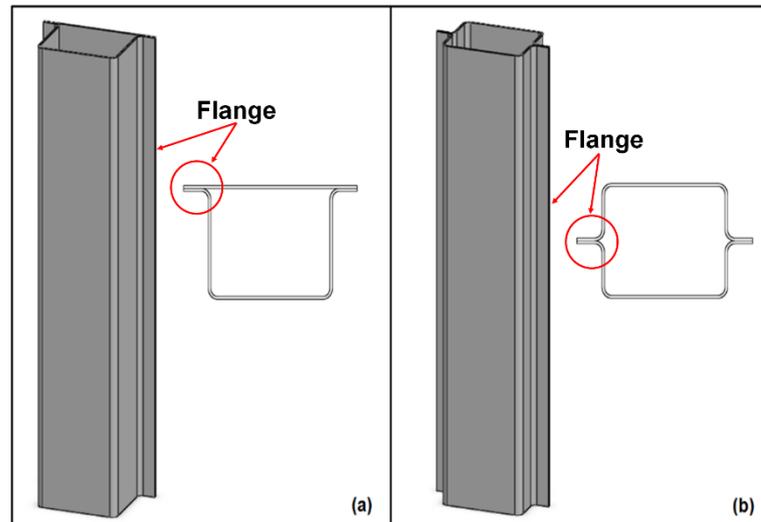


FIGURA 2.4 - (a) Perfil de longarina assimétrica; (b) Perfil de longarina simétrico.

FONTE – Adaptado, PERONI et al., 2008

Peroni et al. (2008) afirmam que longarinas com seção transversal simétrica (FIG. 2.4 (b)), absorvem cerca de 40% mais energia, em situação de colisão, que longarinas com seção transversal assimétrica (FIG 2.4 (a)).

Belingardi et al. (2005) afirmaram que as respostas das estruturas similares a longarinas, submetidas ao teste de colisão podem variar com a sua seção transversal. Neste estudo foram abordadas quatro seções transversais distintas de longarinas (FIG 2.5).

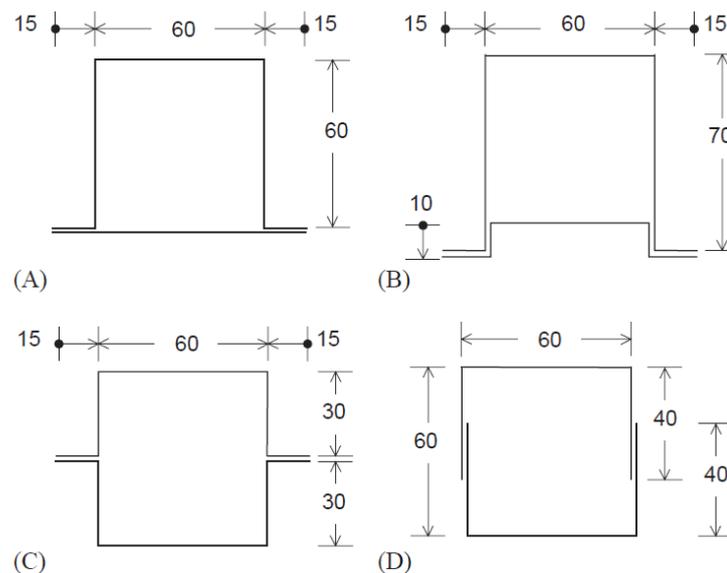


FIGURA 2.5 - Seções transversais distintas de longarinas.

FONTE – BELINGARDI et al., 2005.

As longarinas estudadas tinham espessura de chapa de 0,8 mm e comprimento de 300 mm. O material utilizado foi um aço de baixo carbono (FeP04) com limite de escoamento de 160 MPa. A área da seção transversal das longarinas representadas na FIG 2.5 (a), (b), (c) e (d), são: 240 mm<sup>2</sup>, 272 mm<sup>2</sup>, 240 mm<sup>2</sup> e 224 mm<sup>2</sup>, respectivamente. A FIG 2.6 mostra as curvas de força e energia absorvida em função da compressão, com limite de energia de colisão de 2 kJ e velocidade de impacto de 9 m/s.

Na FIG 2.5 (a - d) correspondem à seção transversal das seções representadas na FIG 2.6 (a - d), respectivamente. Os autores concluíram que a estrutura representada pela FIG 2.6(c) é a que apresenta o pior resultado entre as três seções estudadas, uma vez que os picos de força são os mais elevados e a compressão é a menor. Suas análises são pautadas na desaceleração, isso significa que quanto maior a força maior a desaceleração.

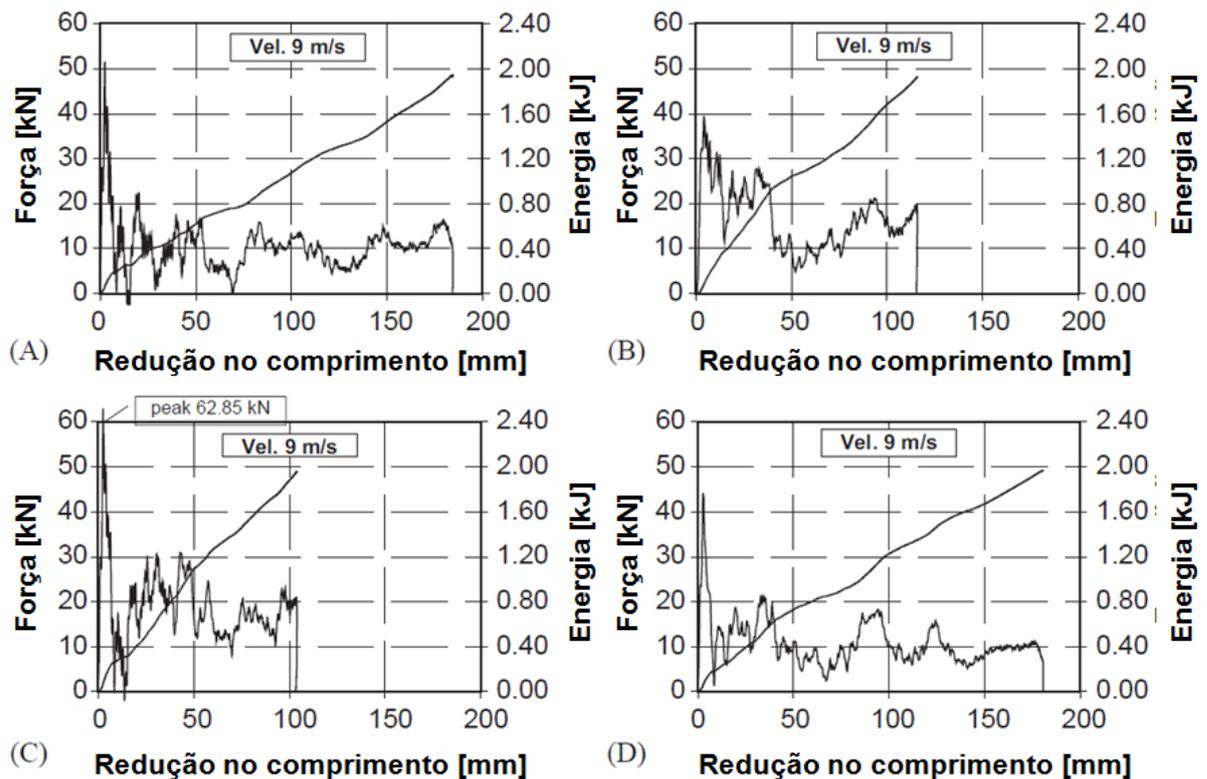


FIGURA 2.6 - Curvas de força *versus* redução no comprimento das longarinas em situação de colisão para diferentes seções transversais: (a) Fig. 2.5(a), (b) Fig. 2.5(b), (c) Fig. 2.5(c) e (d) Fig. 2.5(d).

FONTE - BELINGARDI et al., 2005.

#### 2.1.4 Desaceleração: uma analogia entre frenagem e colisão veicular

Nesta seção, será feita uma analogia entre a frenagem e colisão veicular, visto que tanto na frenagem quanto na colisão, a desaceleração está presente. A diferença está no módulo e no comportamento da curva de desaceleração. Além disso, na frenagem, deseja-se parar o veículo o mais rápido possível. No entanto, na colisão, deseja-se que o tempo de deformação seja o maior possível.

Gardinalli (2005) descreve que os sistemas de freios veiculares que utilizam dispositivos *ABS* (*Antilock Brake System*) impedem o bloqueio das rodas durante frenagens bruscas. Este dispositivo foi desenvolvido com intuito de garantir maior aderência das rodas evitando derrapagens, conseqüentemente, maior eficiência na frenagem.

Gardinalli (2005) em seus estudos realizou testes experimentais de frenagem sobre duas condições: baixa e alta aderência. O veículo utilizado tinha uma massa total de 1184 kg e a velocidade de frenagem foi a 100 km/h. Os resultados do veículo na condição de alta aderência utilizando o freio com *ABS*, mostraram que a desaceleração é a maior possível. No entanto, é a condição que causa maior desconforto aos ocupantes, uma vez que a desaceleração é significativa. Na FIG 2.7 estão representadas as curvas de desaceleração e velocidade em função do tempo de frenagem do veículo.

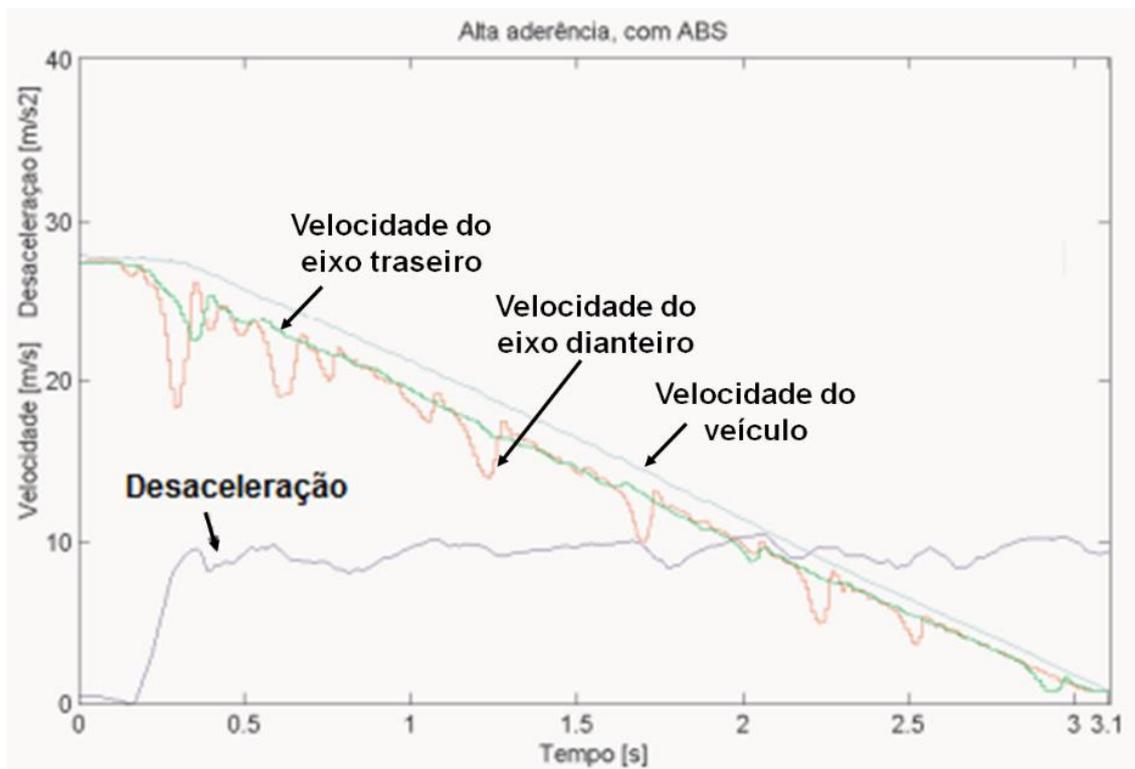


FIGURA 2.7 – Curvas de frenagem de veículos: velocidades e desaceleração em alta aderência.

FONTE – GARDINALLI, 2005.

Após décadas de desenvolvimento e inovação do sistema *ABS*, é que foi possível obter resultados como os representados na FIG 2.7. Portanto, este comportamento da curva de desaceleração representa maior eficiência de frenagem, estabilidade e garante a integridade física dos ocupantes (GARDINALLI, 2005).

O comportamento da curva de desaceleração na frenagem é caracterizado por duas situações. A primeira, está relacionada a desaceleração inicial, na qual o veículo saiu da condição de aceleração zero e desacelerou até aproximadamente  $10 \text{ m/s}^2$  em um intervalo de tempo muito pequeno. Esta mudança brusca de aceleração é a condição que causa maior desconforto, e em alguns casos extremos, lesões aos ocupantes. A partir deste ponto da curva, a desaceleração é praticamente constante, uma vez que as amplitudes são muito pequenas, logo, a força sobre os ocupantes também é constante.

Comparando os resultados de desaceleração entre colisão e frenagem (FIG 2.3 e FIG 2.7), observa-se que nas curvas de colisão há muita oscilação, as amplitudes são significativas. Não há intervalos de tempos significativos nos quais a desaceleração é constante.

Veículos submetidos ao teste de colisão, e que apresentam o comportamento (tendência) da curva de desaceleração análogo ou próximo à curva de frenagem, têm resultados melhores quanto a proteção dos ocupantes. Nesta análise os picos de desaceleração e a desaceleração média devem ser o mais baixo possível (BERTOCCHI, 2005).

## **2.2 Processo de soldagem**

Existem vários processos de união que são utilizados na produção de estruturas veiculares, os principais são: soldagem a ponto por resistência elétrica, soldagem MIG/MAG, soldagem a laser e adesivos estruturais.

Dentre estes, o processo a soldagem a ponto por resistência elétrica é o mais utilizado na indústria, pois apresenta alta produtividade e é um processo de fácil automatização (ASLANLAR et al., 2007).

### **2.2.1 Processo de soldagem a ponto por resistência elétrica**

O princípio de funcionamento da soldagem a ponto por resistência elétrica consiste na passagem da corrente elétrica entre os eletrodos de contato não consumíveis e as chapas a serem unidas, assim, é gerado, por Efeito Joule (EQUAÇÃO (2.3)), o calor necessário para a fusão dos metais. Os eletrodos são movimentados através de força mecânica, pneumática,

hidráulica ou combinação destas, as quais promovem pressão necessária para soldagem das partes a serem unidas (FURLANETTO, 2014).

Os principais parâmetros de regulação do processo para uma formação adequada da lente de solda entre as partes metálicas (chapas) a serem soldadas são intensidade de corrente, tempo de fluxo de corrente e força entre os eletrodos. Além disto, existem variáveis de extrema importância para o desempenho do processo, muitas vezes negligenciadas, como refrigeração, material e forma dos eletrodos, espessura e material das chapas.

A escolha adequada das condições de soldagem tem influência direta resistência mecânica do ponto de solda, a exemplo da força dos eletrodos sobre as chapas a serem unidas, caso essa força seja muito alta, pode ocorrer a expulsão de material do núcleo fundido causando uma série de problemas metalúrgicos ao ponto de solda. A corrente elevada, também, pode ocasionar o mesmo problema de expulsão de material (ZHANG, 2012).

A Lei de Joule define a transformação da energia elétrica em calor dada por (LUO, 2015):

$$Q = R \int_{t_0}^{t_1} i^2 dt \quad (2.3)$$

Sendo:

$Q$  = Calor gerado

$i$  = Corrente elétrica que percorre o condutor

$r$  = Resistência elétrica do condutor

$t$  = Intervalo de tempo em que a corrente elétrica transitou pelo condutor

Na FIG 2.8 está representada o processo de produção do ponto de solda por resistência elétrica. Na FIG 2.8(a) estão destacadas as principais variáveis deste processo de soldagem, intensidade da corrente elétrica, o tempo de corrente, a força aplicada pelos eletrodos e a resistividade do material soldado. Na FIG 2.8(b-c) está representada a lente de solda produzida pelo processo de soldagem a ponto por resistência elétrica.

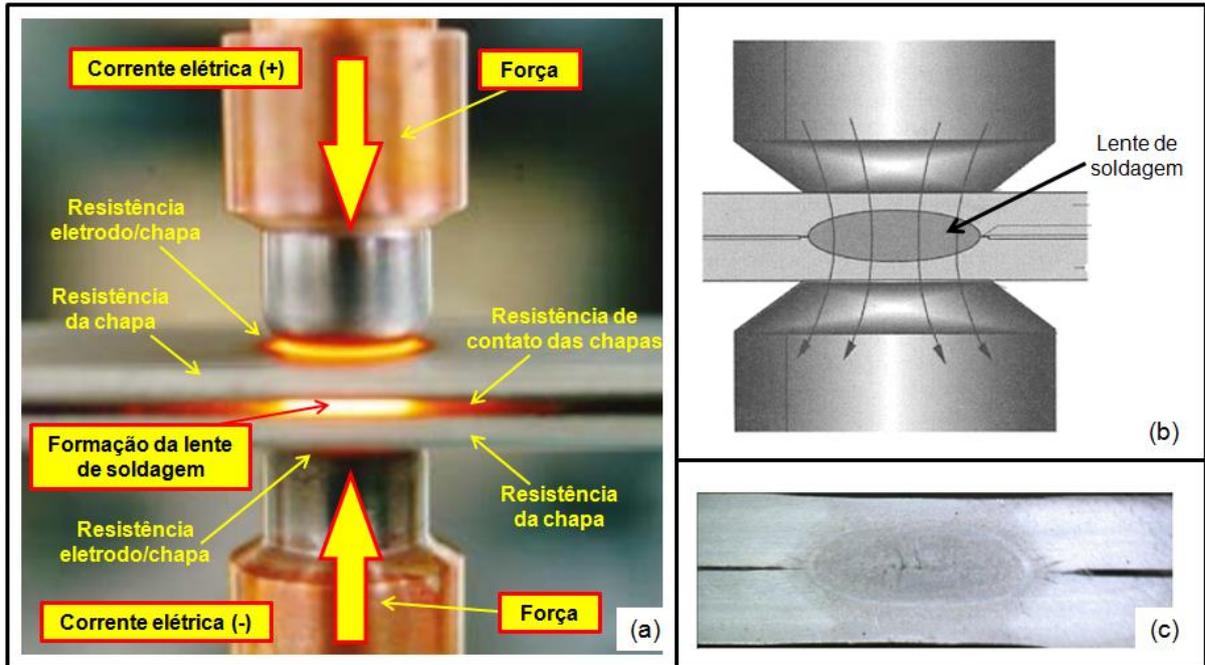


FIGURA 2.8 - Formação do ponto de solda: (a) apresenta a força, corrente elétrica, resistências elétricas e a formação da lente de soldagem; (b) (c) Lente de soldagem.

FONTE – Adaptado de FURLANETTO, 2014.

### 2.2.2 Corrente de soldagem

A corrente de soldagem necessária para a fusão de duas peças com espessura determinada é função de vários fatores: estado das superfícies, diâmetro da face de contato dos eletrodos, propriedade mecânica do material, força entre eletrodos, tempos de soldagem, etc (DAMASCO, 1995).

A corrente de soldagem tem influência direta na qualidade do ponto de solda. Portanto, a corrente de soldagem deve ser determinada a partir de alguns limites de qualidade, tais como: tamanho mínimo de lente (0,8 do diâmetro de contato do eletrodo), penetração mínima (20%), indentação máxima (20%), ausência expulsão, diâmetro máximo de lente (1,25% do diâmetro de contato do eletrodo), resistência mecânica do ponto de solda, dentre outros (DAMASCO, 1995).

A intensidade da corrente elétrica no processo de soldagem a ponto por resistência elétrica é uma variável de grande influência na qualidade da solda, pois, correntes elevadas resultam em maior calor gerado por Efeito Joule, isso somado a força do eletrodo, propiciam a expulsão do metal na zona de soldagem (PODRZAJ, 2006).

### 2.2.3 Força entre eletrodos

A força entre eletrodos na soldagem a ponto por resistência elétrica é melhor expressa pressão ou tensão (razão entre a força e a área de contato do eletrodo). A ação da força entre os eletrodos está presente em três etapas da soldagem: antes da operação de soldagem (retenção das chapas), durante (permitindo a passagem de corrente) e após (resfriamento do ponto) (AWS, 1983).

A função da pressão aplicada, antes da passagem da corrente, é aproximar as peças contra a outra, deseja-se provocar um contato íntimo no local onde será efetuada a solda. A tensão aplicada deve ser suficientemente para vencer as reações mecânicas elásticas e até mesmo deformar plasticamente, se necessário, para assegurar adequadas resistências de contato, eletrodo/peça, e interfacial, peça/peça (FIG 2.8).

Por isso, deseja-se com o efeito do aumento da força, diminuir as resistências elétricas entre as chapas, no entanto, a corrente elétrica será menor para a mesma quantidade de calor produzida. Porém, caso a resistência elétrica seja maior, então, deve-se aumentar a força eletromotriz (tensão) no transformador secundário da máquina a fim de gerar um maior valor de corrente, necessário para produção da lente de solda. É necessário determinar um valor ótimo de força do eletrodo que seja suficiente para vencer o efeito mola das chapas e para garantir o contato elétrico sem centelhamento, sem que isto diminua muito a resistência de contato (CHIARO, 1984).

A força tem a função de restringir a expulsão do metal fundido entre as chapas enquanto a lente de solda é formada. O aquecimento das resistências elétricas produz a dilatação das chapas criando pressão interna ao ponto de solda gerando uma força contrária à aplicada pelos eletrodos (FIG 2.9). A tensão transmitida entre os eletrodos, aprisiona a poça de fusão dentro de um anel de força, no entanto, se a força de compressão dos eletrodos for superior a do anel de força, o metal fundido escapa (expulsão) e a lente torna-se então porosa e o metal sólido sobre a poça colapsa (DAMASCO, 1995).

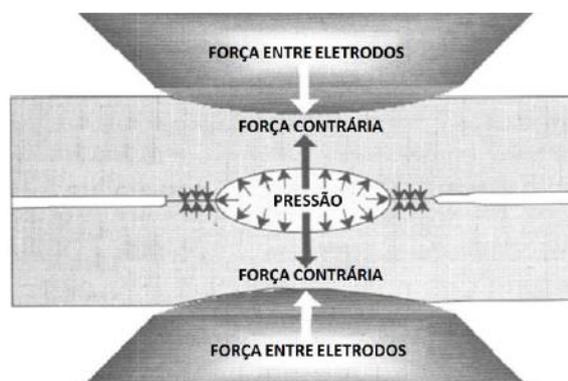


FIGURA 2.9 - Forças contrárias aos eletrodos pela pressão interna do ponto.

FONTE - ZHANG, 2012.

Após a passagem da corrente inicia-se o resfriamento da lente de solda, a pressão deve ser mantida para refinamento do grão, aumentando a resistência mecânica (DAMASCO, 1995).

#### 2.2.4 Tempo de soldagem

Para a fusão do metal, e, conseqüentemente produção do ponto de solda, é necessário fornecimento de energia em forma de calor, conforme Lei de Joule, mas também depende do “tempo” de soldagem. No processo de soldagem a ponto por resistência elétrica a variável tempo está presente em todas as etapas do processo, no entanto, três intervalos de tempo são cruciais para a produção da lente de solda: tempo de pré-pressão, tempo de passagem de corrente e tempo de retenção. Todos os intervalos são usualmente expressos em ciclo, sendo um ciclo 1/60 segundos (REBELLO,1988).

O tempo de pré-pressão é aquele que está compreendido na acomodação das partes a serem soldadas. Este tempo deve ser o suficiente para a força aplicada se estabilizar.

O tempo de passagem de corrente corresponde a duração do fornecimento da corrente de soldagem para a realização do ponto de solda. Deve-se ter em conta que se tempos de soldagem muito curtos são aplicados à corrente de soldagem, tem de ser muito alta para poder atingir o calor necessário para unir as peças soldadas. Existe um valor abaixo do qual a soldagem não ocorre.

O tempo de passagem de corrente divide-se em três estágios: tempo de subida da corrente (*upslope*), tempo de estabilidade e tempo de descida (*downslope*).

O tempo de subida da corrente (*upslope*) é o tempo de aumento gradual da corrente desde o início do tempo de soldagem até um valor máximo onde a aplicação da corrente máxima se inicia. É geralmente utilizado para evitar sobreaquecimento e expulsão do metal no início do tempo de soldagem, quando a resistência da interface do metal base ainda é alta.

O tempo de estabilidade da corrente está relacionado à corrente máxima aplicada durante o tempo de soldagem. Seria o patamar em que a corrente se mantém constante por um intervalo de tempo.

O tempo de descida da corrente (*downslope*) é a diminuição gradual da corrente no final do tempo de soldagem. Ele é utilizado para controlar a solidificação da lente de solda e para evitar a trincas em metais que são endurecidos por têmpera ou sujeitos ao trincamento a quente.

O tempo de retenção é o tempo durante o qual os eletrodos continuam sob pressão mantendo a força na peça de soldada após o último impulso de corrente ter finalizado; durante este tempo a lente de solda se solidifica ocasionando o refinamento do grão e melhorando a resistência mecânica. A FIG 2.10 estão representados os tempos de soldagem.

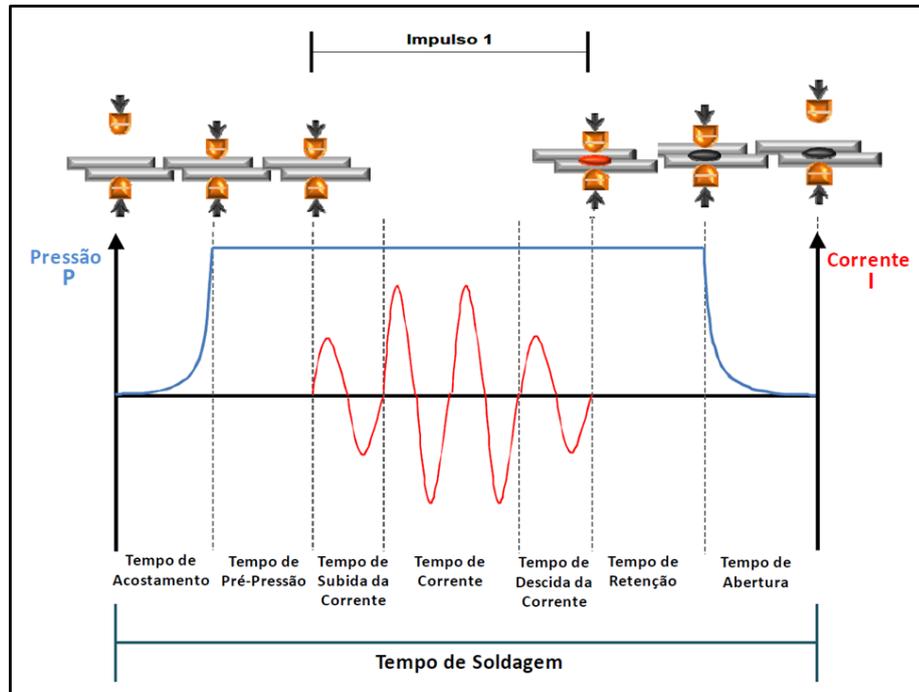


FIGURA 2.10 - Tempo de soldagem em um processo de soldagem a ponto por resistência elétrica.  
FONTE - NASCIMENTO, 2008.

### 2.3 Análises e métodos de controle de qualidade do ponto de solda

A avaliação da qualidade do ponto de solda varia de acordo com cada empresa, visto que produtos podem ter necessidades distintas. Portanto, a definição do critério de aprovação da soldagem executada, depende da especificidade de cada produto. De forma geral os procedimentos de avaliação podem ser divididos em ensaios não destrutivos sem o uso de instrumentos de medição (inspeção visual) e com uso de instrumentos de medição, e ensaios destrutivos, todos visando à qualificação da soldagem realizada (ZHOU, 2003).

A resistência da junta soldada por meio do processo de soldagem a ponto é geralmente relacionada às dimensões do ponto de solda, profundidade de indentação, extensão da zona termicamente afetada pelo calor e propriedades do material. As características do ponto de solda têm sido amplamente relacionadas com a resistência da junta (BATISTA, 2011).

### 2.3.1 Ensaaios não destrutivos: inspeção visual

A inspeção visual é a técnica mais praticada, visto que não necessita de instrumentos de medição e o tempo gasto é o menor possível. Contudo, tem uma alta eficácia, pois 100% das peças produzidas podem ser vistoriadas, e defeitos grosseiros podem ser identificados. Portanto, a partir dessa análise prévia, é possível dar início do processo analítico da qualidade. É importante frisar que esse método de inspeção não deve ser o único utilizado, deve-se fazer em conjunto com outros métodos (BATISTA, 2011).

### 2.3.2 Ensaaios não destrutivos: com instrumentos de medição

Os ensaios não destrutivos são análises que, quando realizados sobre peças semi-acabadas, não prejudicam nem interferem nas operações futuras das mesmas. Em outras palavras, são ensaios que não interferem na funcionalidade das peças analisadas. Dentre os ensaios não destrutivos, tem-se: raios X, partículas magnéticas, ultrassom, líquidos penetrantes, etc (GARCIA, 1999).

### 2.3.3 Ensaaios destrutivos

Essa técnica de controle de qualidade resulta na destruição da amostra, no entanto, é o método que quantifica a resistência mecânica do ponto de solda. Além disso, atesta se os parâmetros e as variáveis do processo de soldagem estão dentro de um limite aceitável.

Existem vários métodos para certificar a qualidade do ponto de solda quanto a sua resistência mecânica. Dentre eles, pode-se destacar o ensaio de cisalhamento, arrancamento e torção. Na FIG 2.11 estão representados ensaios mecânicos sobre o ponto de solda.

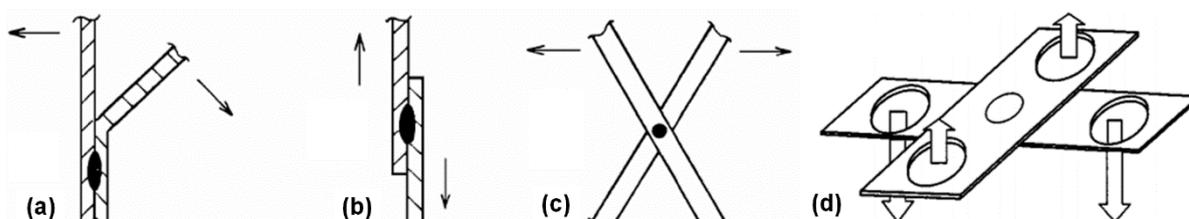


FIGURA 2.11 – (a) Ensaio de arrancamento, (b) ensaio de cisalhamento, (c) ensaio de torção e (d) deslocamento ou axial.

FONTE – ((a)(b)(c) BATISTA, 2011 e (d) CHAO, 2003.

Os esforços de ruptura do ponto dependem dos materiais e da empregabilidade de cada produto. A carga tolerável para o ensaio de arrancamento é apenas 20% da força mínima de cisalhamento e pode ser realizado facilmente usando uma pequena bancada de trabalho junto à produção (BATISTA, 2011).

No entanto, os ensaios de tração e torção devem ser realizados em laboratório e possuem limites de força bem definidos, sendo estes testes realizados por máquinas específicas. Nos ensaios de torção, a carga tolerável é 60% da força máxima de tração (BATISTA, 2011).

#### 2.3.4 Análises metalográficas

Zhang e Senkara (2012) descrevem que a análise metalográfica pode ser usada para determinar a largura da lente do ponto de solda, a penetração e a dimensão da zona termicamente afetada pelo calor (FIG 2.12). Além disso, pode ser usado para detectar fissuras, porosidade e inclusões não metálicas. Nesta análise, as secções da solda são cortadas a partir de amostras de produtos, que em seguida são polidas e atacadas quimicamente (normalmente é utilizado uma solução ácida) para revelar sua microestrutura. Segundo Batista (2011) a análise metalográfica compreende na análise dos constituintes e fases presentes na lente de solda. Wan et al. (2014) em seus estudos, utilizou as análises metalográficas para verificar as mudanças na microestrutura à medida que a corrente de soldagem foi sendo alterada, além disso, por meio da metalografia determinou o diâmetro da lente de solda. Yuan et al. (2017), utilizaram a análise metalográfica para avaliar a microestrutura da lente de solda de aços dissimilares: DP600 e DC54D. Os resultados mostraram que a linha de solidificação da lente de solda esta deslocada para o lado do aço DP600, isto significa houve diluição do aço DC54D.

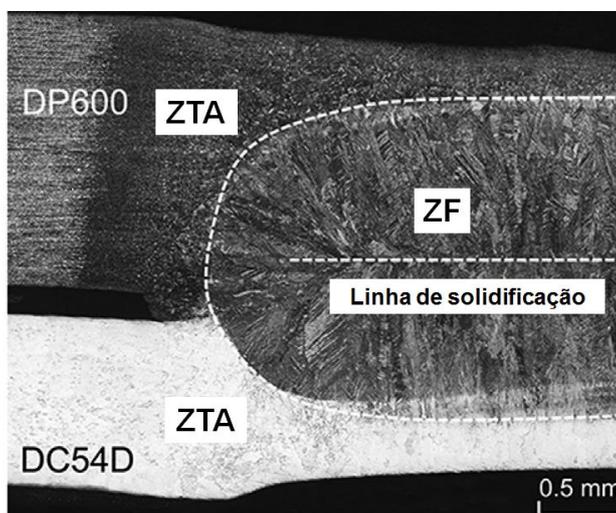


FIGURA 2.12 - Metalografia do ponto de solda de aços dissimilares: DP600 e DC54D.

FONTE – Yuan et al., 2017.

### 2.3.5 Caracterização mecânica de pontos de solda

Nesta seção serão apresentados estudos que utilizaram ensaios destrutivos para caracterizar mecanicamente pontos de solda.

Yuan et al. (2017) utilizaram o teste de cisalhamento para caracterizar a resistência mecânica de pontos de solda em aços diferentes (aço DP600 e DC54D). Utilizando somente este ensaio os autores determinaram uma condição de soldagem adequada (ideal) para a união desses dois materiais.

Chen et al. (2015) investigaram a macroestrutura, microestrutura e a fratura de pontos de solda sobre materiais dissimilares (alumínio e aço). Neste estudo foram utilizados dois testes distintos para obter a resistência mecânica do ponto de solda: ensaio de arrancamento e deslocamento. Os testes foram comparados com o intuito de avaliar se, com a variação das condições de soldagem estabelecidas, haveria melhoria na resistência mecânica do ponto. Para que uma condição de soldagem fosse considerada melhor, uma em relação a outra, esta deveria produzir pontos de solda com maior resistência mecânica, uma vez que o aumento de resistência deveria ser observado em ambos os ensaios de arrancamento e deslocamento.

Cota (2015) relatou que o ensaio de arrancamento é impreciso para avaliação da resistência mecânica do ponto de solda. Por isso, em seus estudos construiu uma máquina de torção (até 45°) e sugere que o ensaio de torção é mais significativo, considerando que pontos de solda aplicados a estrutura veicular são submetidos ao esforço de torção durante a utilização do veículo. Porém, ele não apresenta evidências a eficiência do teste.

Schneider e Jones (2003) afirmam que a escolha do ensaio de resistência mecânica para caracterizar um ponto de solda, deve estar em acordo com sua aplicação. Isso significa que não é recomendável realizar o ensaio de cisalhamento sobre um ponto que é solicitado de maneira similar aos esforços de arrancamento.

De maneira genérica, a norma AWS D8.9M descreve que o ponto de solda é considerado aprovado nos ensaios de resistência mecânica, quando a lente de solda fica aderida em uma das chapas, enquanto a outra deve apresentar um “furo”. Se isso acontecer, o diâmetro da lente de solda deve ser medido. O ponto somente será considerado de boa qualidade caso o diâmetro seja maior que  $4\sqrt{w}$  (classe B), onde ( $w$ ) é a menor espessura entre as chapas (WAN et al., 2014).

Na FIG 2.13 estão representadas rupturas típicas dos ensaios de arrancamento e cisalhamento de pontos de solda. Nesta análise, a priori, estes pontos foram considerados aprovados na avaliação qualitativa (Norma AWS D8.9M).

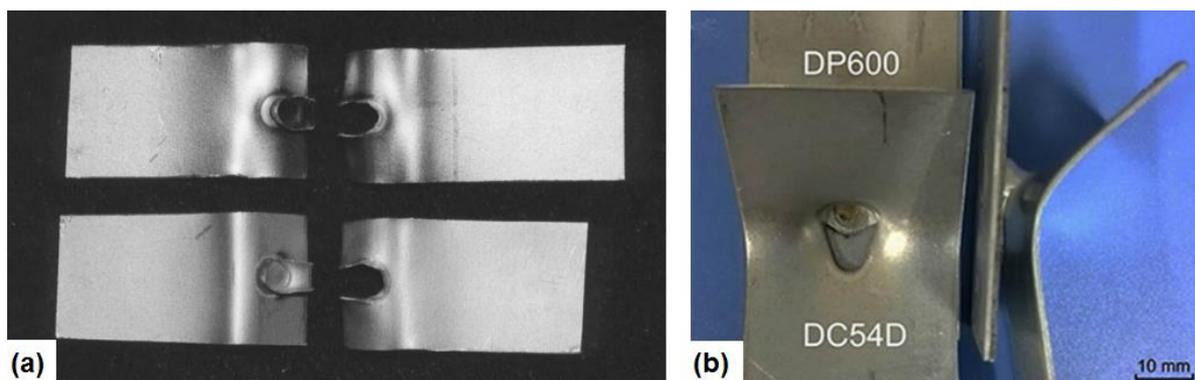


FIGURA 2.13 – (a) ensaio de arrancamento e (b) ensaio de cisalhamento.

Fonte – (a) SCHNEIDER e JONES, 2003 e (b) YUAN et al., 2017

### 2.3.6 Modos básicos de carregamento sobre pontos de solda

O estudo dos modos de carregamento os quais os pontos de solda podem estar submetidos é de extrema importância para o entendimento dos esforços (tensões) sobre ele. Esse entendimento permite entender e determinar quais esforços ocasionou a ruptura de um determinado ponto de solda localizado sobre uma estrutura veicular. Esta análise ajuda a entender as causas da falha.

Aplicando os conceitos da mecânica da fratura, pode-se entender os mecanismos e características de ruptura do ponto de solda. Courtney (2005) descreve que a fratura sob tração a baixa temperatura é causada basicamente pela separação de ligações atômicas sob carga estática. Modelos simplificados são usados para o estudo da fratura, uma vez que são considerados somente três modos básicos de carregamento para nucleação e propagação de trincas.

Na FIG 2.14 estão representados os modos básicos de carregamento. Courtney (2005) descreve esses modos básicos: (a) o modo I representa o carregamento de tração, com deslocamentos das superfícies da trinca perpendicularmente a si mesmas, (b) o modo II, o carregamento é de cisalhamento (escorregamento), com deslocamentos das superfícies da trinca paralelamente a si mesmas e perpendicularmente à frente de propagação e (c) o modo III, o carregamento é de cisalhamento (rasgamento), com deslocamentos das superfícies das trincas paralelamente a si mesmas e à frente de propagação. Cetlin e Silva (1988) afirmam que qualquer carregamento pode ser decomposto nestes três modos básicos. Considerações sobre o modo de carregamento permitem observar que o modo I exige menor gasto de energia para propagação da trinca, exceto, quando o material tem a espessura fina. Nesse caso, o modo III apresenta menor energia de propagação da trinca, uma vez que a área à frente da trinca é muito pequena.

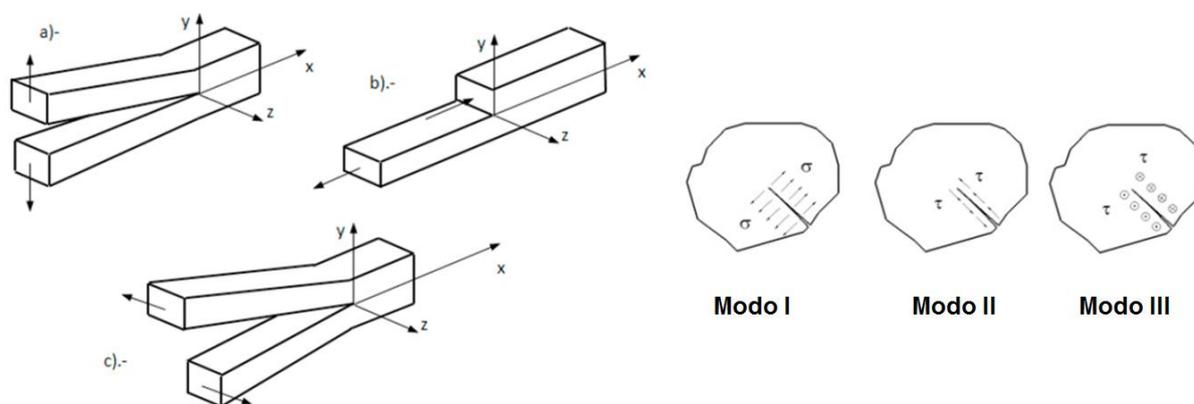


FIGURA 2.14 - Modos básicos de carregamento.

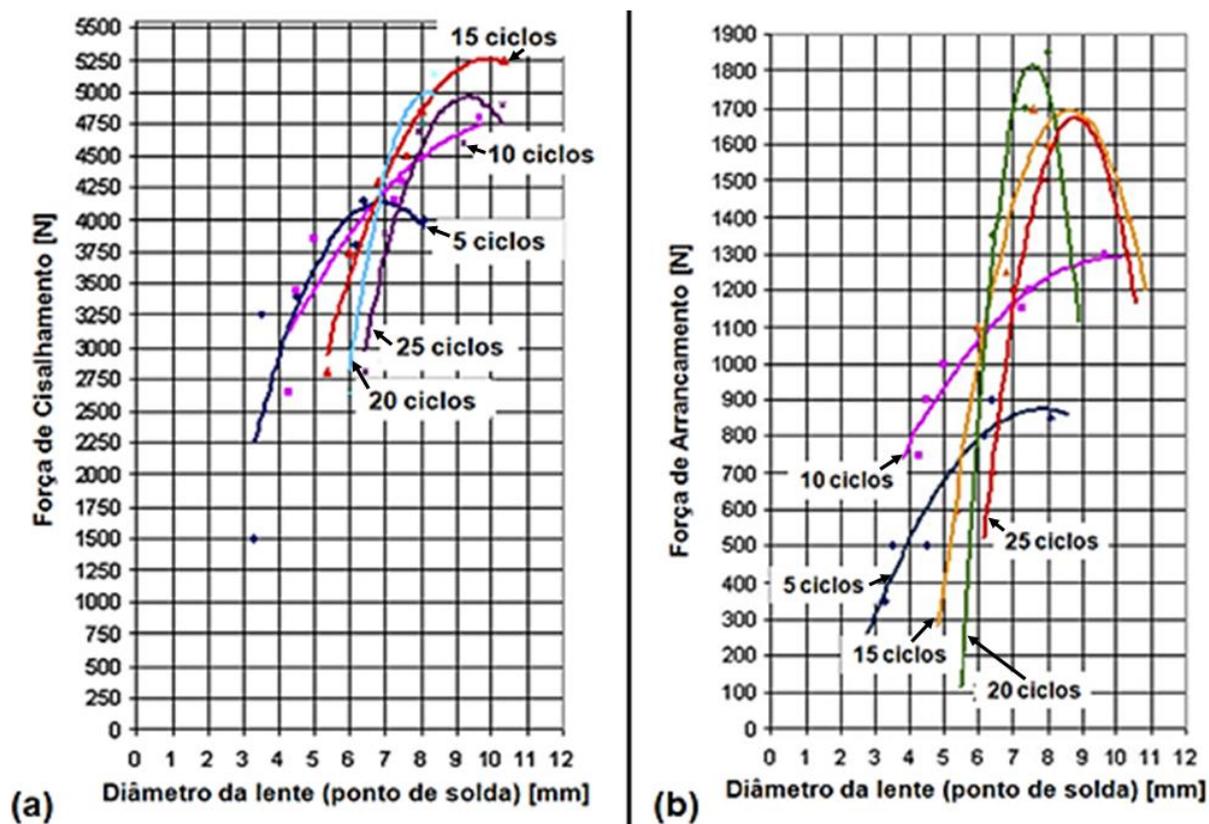
FONTE – Adaptado de CHAMBEL et al., 2016.

Chao (2003) estudou os mecanismos de falha de pontos de solda submetidos aos ensaios de cisalhamento e deslocamento. Neste trabalho os resultados revelaram que pontos de solda submetidos ao ensaio de cisalhamento em que o carregamento é de cisalhamento e o mecanismo de falha é por tração, no entanto, pontos de solda submetidos ao teste de deslocamento são solicitados por uma carga normal a lente de solda e o mecanismo de falha é por cisalhamento (rasgamento).

### 2.3.7 Influência das condições de soldagem na resistência mecânica do ponto de solda

Nesta seção serão apresentados alguns estudos que evidenciam que a variação das condições de soldagem influencia a resistência mecânica do ponto de solda.

Aslanlar (2006) estudou a influência da corrente de soldagem e o tempo de passagem de corrente na resistência mecânica do ponto de solda. Nesta análise o autor não atribui uma aplicação aos pontos de solda, portanto, o estudo é somente comparativo. Os testes utilizados para avaliação de resistência foram o arrancamento e cisalhamento. O material usado foi um aço microligado com uma camada de cromo de 23  $\mu\text{m}$ . Os parâmetros de soldagem investigados foram: força de 6 kN entre os eletrodos, corrente elétrica variando de 3,5 a 10 kA (incrementos de 1 kA) e adoção de cinco tempos de passagem de corrente (5, 10, 15, 20 e 25 ciclos). Na FIG. 2.15 estão representados os resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica.



\* A corrente elétrica é representada pelos marcadores (losango, quadrado, triângulo, etc.) variando de 3,5 a 10 kA (incrementos de 1 kA)

FIGURA 2.15 - (a) Ensaio de cisalhamento e (b) ensaio de arrancamento.

FONTE – Adaptado de ASLANLAR, 2006.

Algumas conclusões puderam ser obtidas deste estudo: (a) o tempo de passagem de corrente elétrica influencia o diâmetro da lente de solda e (b) os resultados dos ensaios de arrancamento e cisalhamento, sugerem que quanto maior a intensidade da corrente elétrica maior a resistência mecânica do ponto de solda.

Khodabakhshi et al. (2011), também afirma que quanto maior a intensidade da corrente elétrica maior será a resistência mecânica do ponto de solda, considerando o ensaio de cisalhamento. O ponto de solda correspondente a intensidade corrente elétrica de 15,3 kA, teve uma queda de resistência mecânica em relação a intensidade de corrente elétrica de 15 kA, esse resultado sugere que houve expulsão de material da poça de fusão na soldagem do ponto. O tempo de soldagem foi de 20 ciclos para as intensidades de corrente estudadas e o material utilizado por eles foi uma chapa de 3 mm de espessura de aço de baixo teor de carbono, não revestida. Na FIG 2.16 está representada uma curva resistência ao cisalhamento em função da corrente de soldagem.

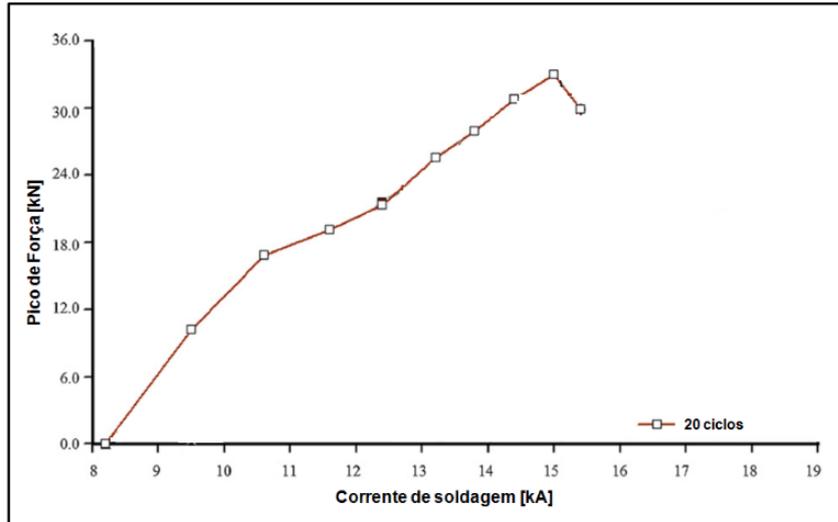


FIGURA 2.16 - Ensaio de cisalhamento do ponto de solda. Curva do pico de força *versus* corrente de soldagem.

FONTE – Adaptado de KHODABAKHSHI et al., 2011.

Vural e Akkus (2004) afirmam que quanto maior a intensidade da corrente elétrica maior será o diâmetro da lente de solda, consequentemente, mais resistente mecanicamente será o ponto de solda. A FIG 2.17 representa os resultados de diâmetro em função da corrente e resistência mecânica em função do diâmetro, considerando o ensaio de cisalhamento.

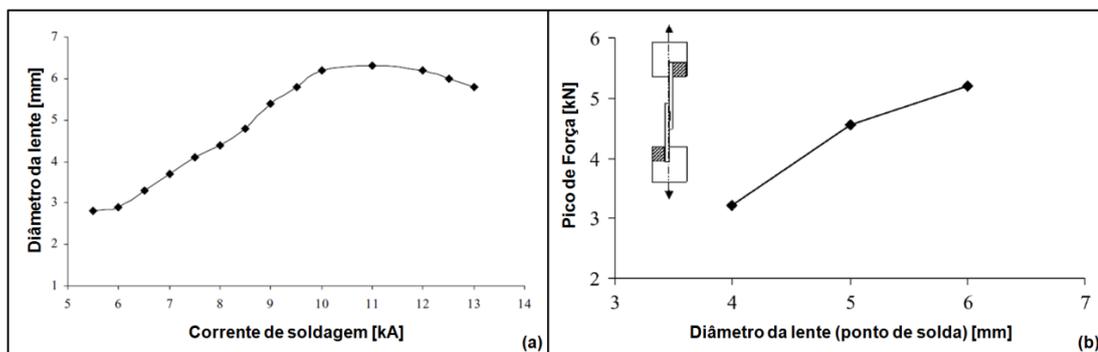


FIGURA 2.17 – (a) Curva do diâmetro da lente de solda *versus* corrente de soldagem; (b) curva pico de força *versus* diâmetro da lente. Ensaio de cisalhamento do ponto de solda.

FONTE – Adaptado de VURAL e AKKUS, 2004.

Os trabalhos apresentados nesta seção apresentaram um fator comum. Todos eles ao utilizarem uma intensidade de corrente alta para o material em estudo, tiveram perda de resistência mecânica. Apesar dessa informação não ter sido discutido pelos autores, esse resultado sugere que houve expulsão de material da poça de função durante a soldagem.

Yuan et al. (2017) em seus estudos evidenciaram esse fenômeno (expulsão de material) ao soldar materiais dissimilares (aços DP600 e DC54D). Observou-se que partindo

da corrente de soldagem de 3,7 até 9 kA, a resistência mecânica no ensaio de cisalhamento aumentou, no entanto, nas correntes 10 e 11 kA, os resultados sugerem que houve expulsão de material da poça de fusão, uma vez que as resistências mecânicas desses pontos de solda tiveram uma queda em relação aos outros. A mesma análise foi feita para o tempo de passagem de corrente elétrica e força nos eletrodos, o resultado foi o mesmo, expulsão a partir de um determinado valor de tempo e força de soldagem.

## 2.4 Modos de deformação de estruturas de parede finas

Abramowicz e Jones (1984) estudaram a deformação dinâmica de estruturas tubulares quadradas de parede finas em aço, construídas pelo processo de soldagem por costura, submetidas a colisão axial. O intuito foi identificar os diferentes modos de deformação. Neste trabalho foram identificados quatro modos de deformação, visto que cada um tem relação direta com as dimensões da seção transversal do tubo (altura, largura e espessura da parede). Os modos de deformação são: colapso simétrico, colapso assimétrico misto A, colapso assimétrico misto B e colapso tensão trativa. A FIG. 2.18 representa estes modos de colapso.

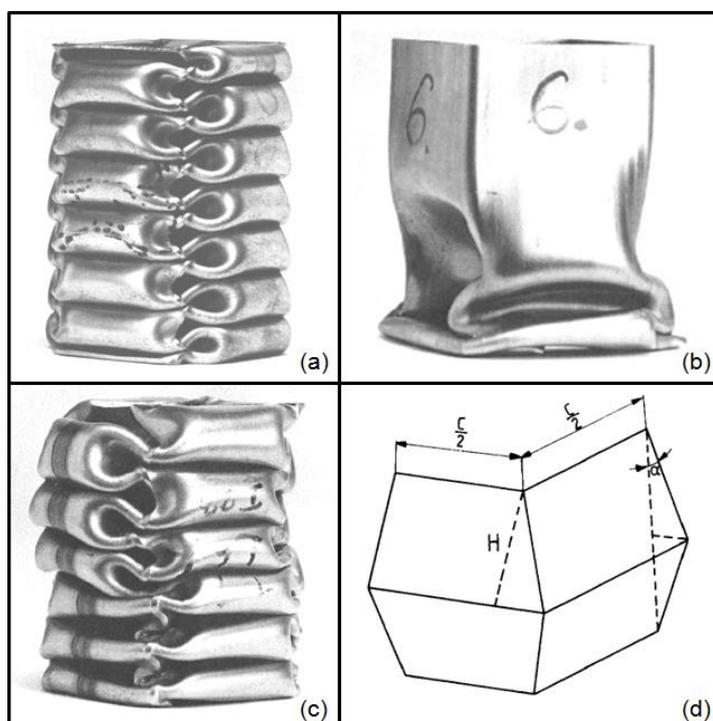


FIGURA 2.18 - (a) deformação simétrica; (b) deformação assimétrica mista A; (c) deformação assimétrica mista B; (d) deformação com tensão trativa.

FONTE – ABRAMOWICZ e JONES, 1984.

Abramowicz e Jones (1984) afirmaram que modos de deformação assimétricos são cerca de 18% mais rígidos que modos de deformação simétrico. Segundo eles, existem situações em que há o dobramento dos tubos (conforme FIG 2.19). Esse fenômeno pode ser entendido considerando a dinâmica do corpo rígido descrita por Euler, em que descrevem a rotação de um corpo rígido num sistema de referência com os seus eixos fixos ao corpo e paralelo aos eixos principais do corpo de inércia. Este modo de falha não depende do comprimento inicial de um tubo quadrado, mas, possivelmente, está relacionada com a presença de imperfeições iniciais, a exemplo de pequenos amassados, variação de espessura do material, etc.

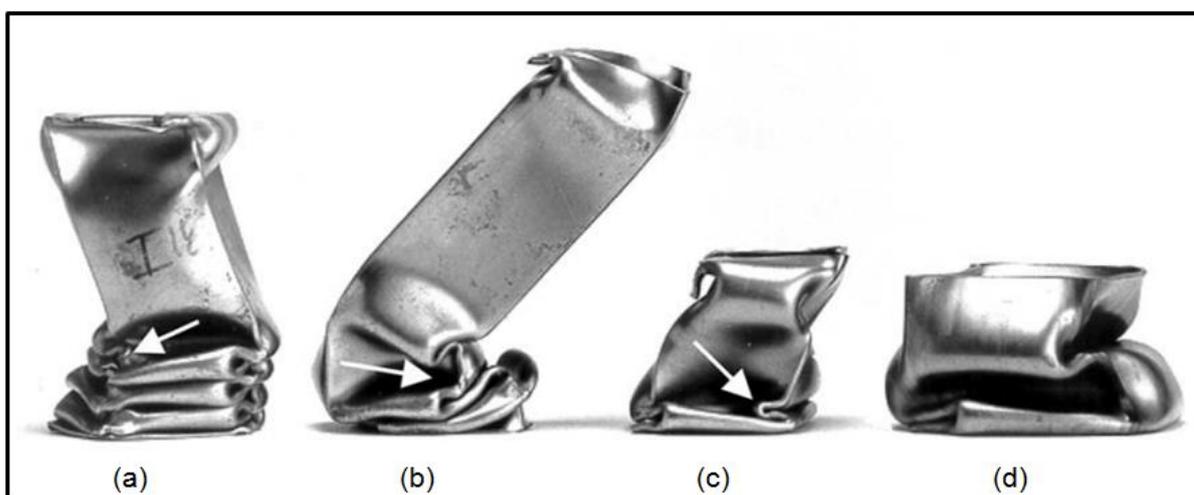


FIGURA 2.19 - Modo de deformação assimétrico: (a) comprimento inicial = 222,1 mm; (b) comprimento inicial = 222,2 mm; (c) comprimento inicial = 100,0 mm; (d) comprimento inicial = 100,1 mm.

FONTE - ABRAMOWICZ, 1984.

Segundo Bois et al. (2004) há duas considerações importantes na concepção de estruturas automotivas para a gestão de energia de colisão: a absorção da energia cinética do veículo e a força necessária para garantir ou manter a integridade do habitáculo no processo de deformação da estrutura. Quanto à absorção de energia, dois modos ou mecanismos básicos são encontrados em estruturas de paredes finas: deformação axial e flexional. A maior parte dos componentes estruturais, que compõem as estruturas de extremidade dianteiras e traseiras dos veículos, estão sujeitos a modos mistos constituídos por deformação axial e de flambagem. Em uma estrutura de absorção de energia bem planejada e executada, os modos mistos serão evitados para garantir um desempenho previsível durante o acidente. O modo de deformação simétrico (FIG. 2.18 (a)) é considerado como sendo o mecanismo mais eficaz para a absorção de energia. É também, talvez, o mais difícil de conseguir em estruturas reais por causa dos

problemas de instabilidade associados. O modo de deformação por flambagem, que envolve a formação de mecanismos de articulação locais e do tipo de ligação cinemática, é o modo que absorve menor energia. Uma estrutura dianteira ou traseira irá sempre ter uma tendência a entrar em colapso pelo modo de deformação por flambagem. A FIG. 2.20 está representando uma deformação por flambagem.

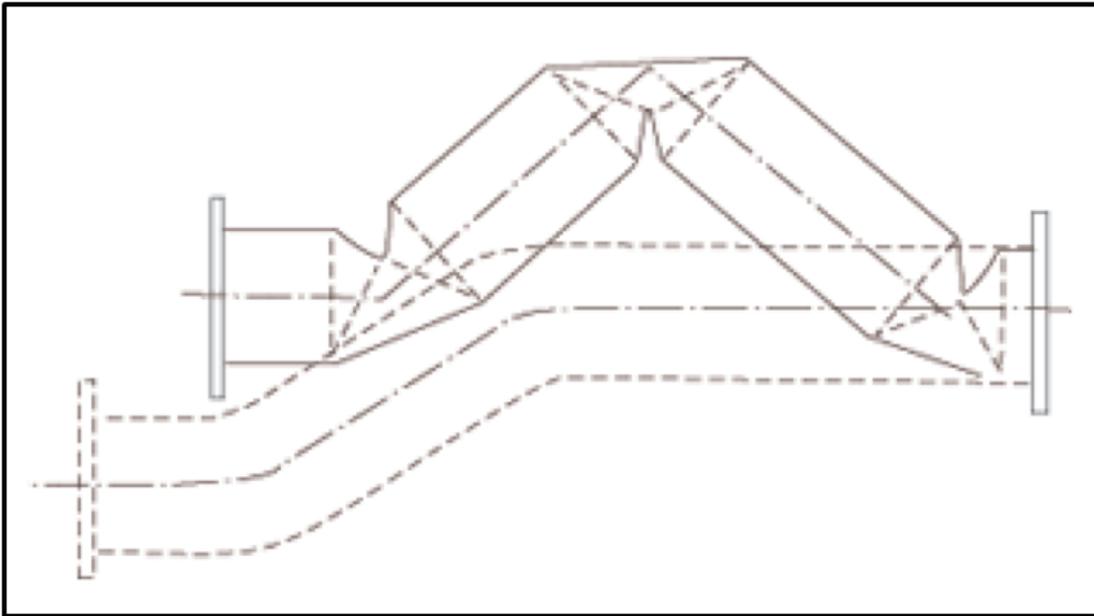


FIGURA 2.20 - Modo de deformação por flambagem.

FONTE - BOIS et al., 2004.

Bois et al. (2004) descreveram analiticamente o comportamento de estruturas tubulares quadradas quando submetidas a deformação plástica, considerando o modo de deformação axial. A EQUAÇÃO (2.4) descreve a carga média ou média de esmagamento que é derivada do balanço de energia igualando o trabalho externo efetuado pela carga de compressão com energias dissipadas em diferentes tipos de mecanismos de deformação à medida que ocorrem o processo de dobramento da estrutura.

$$P_m = 38,27 M_0 C^{1/3} w_{esp}^{-1/3} \quad (2.4)$$

Sendo,  $P_m$  é a força média de compressão,  $M_0 = \sigma_0 w^2/4$  é o momento,  $\sigma_0$  é a tensão média do escoamento ( $\sigma_0 = (0,9 \text{ até } 0,95) \sigma_u$ ),  $\sigma_u$  é limite de resistência à tração do material,  $C = 1/2 (b + d_A)$  visto que  $b$  e  $d_A$  são as dimensões dos lados da seção transversal da estrutura tubular,  $w$  espessura da parede do tubo.

Bois et al. (2004) afirmaram que o modo de deformação por flambagem é o mecanismo predominante no colapso de elementos estruturais veiculares. Essa predominância é resultado não só do *design* da estrutura, mas também, da tendência natural das estruturas colapsarem em modos que exigem menos energia.

A deformação por flambagem pura é extremamente rara em estruturas veiculares. Na maioria dos eventos de colisão, exceto para impacto lateral, o que ocorrem são modos mistos envolvendo compressão axial e flambagem ou às vezes até de torção. Nestas situações, a falha de um componente terá origem em um ponto localizado onde a tensão de compressão atinge o valor crítico, causando um dobramento localizado (BOIS et al., 2004).

## **2.5 Fatores que podem influenciar os modos de deformação**

Nesta seção serão apresentados alguns trabalhos que abordaram temas relacionados ao comportamento da estrutura veicular submetida a deformações plásticas, quer sejam em condições quase estáticas ou dinâmicas. O intuito é destacar alguns fatores que podem influenciar o modo de deformação de estruturas similares as longarinas.

### **2.5.1 Distância entre pontos de solda**

Na construção de veículos, pontos de solda são distribuídos sequencialmente sobre a estrutura, separados por uma distância relativamente pequena. Caso a distância entre os pontos de solda seja muito pequena, um fenômeno conhecido como *shunting*, pode interferir na qualidade da solda. Zhang e Senkara (2012) descrevem que esse fenômeno consiste no desvio da corrente elétrica (fuga) para outros pontos de solda da estrutura em construção, isso significa que parte da corrente de soldagem é desviada para um caminho de menor resistência elétrica, isto é, para os pontos de solda feitos anteriormente (FIG 2.21), visto que as chapas são intimamente ligadas pelos pontos já soldados, formando uma resistência paralela. Wang et al. (2013) relataram que a presença dessa anomalia pode causar pontos de solda de baixa resistência mecânica e/ou defeituosos.

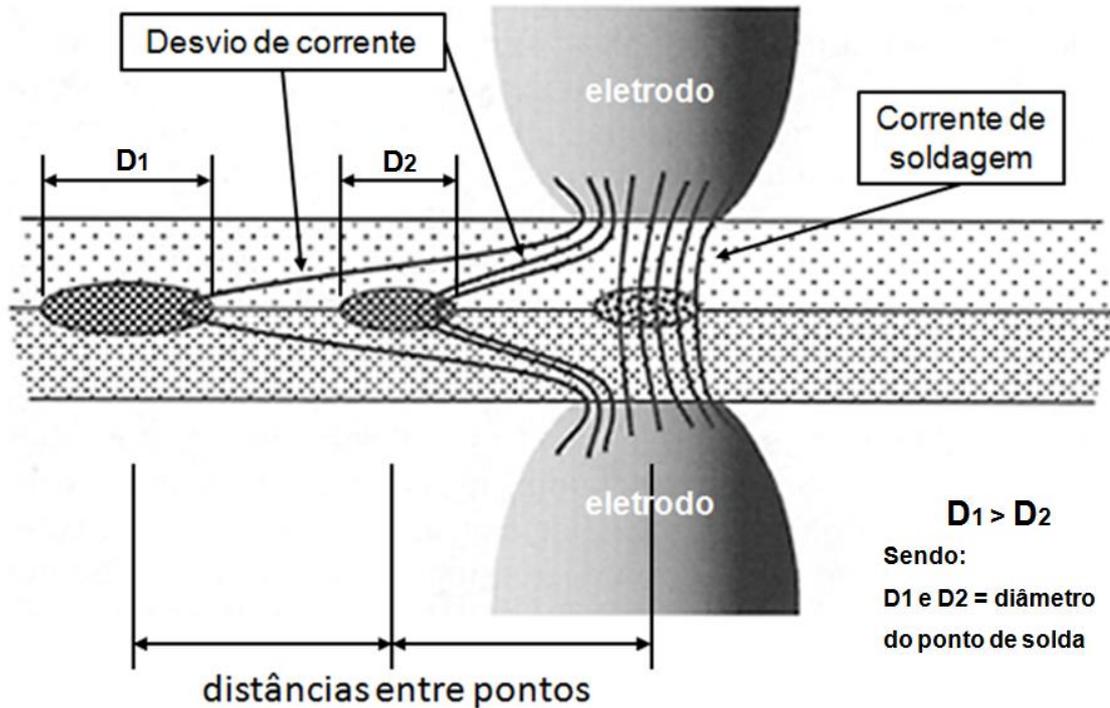


FIGURA 2.21 - Corrente de desvio, influência no diâmetro do ponto.

FONTE – Adaptado de ZHANG e SENKARA, 2012.

Segundo Wang et al. (2013), o espaçamento entre os pontos de solda é a variável que mais influencia no desvio da corrente, e para evitar esse fenômeno, a distância entre pontos de solda deve ser a maior possível. Wang et al. (2013) identificaram que em pontos de solda produzidos subsequentemente com espaçamentos superiores a 25 mm o efeito *shunting* não teve influência na qualidade do ponto.

Murray (1994) investigou a influência da distância entre os pontos de solda sobre estruturas veiculares submetidas a deformações plásticas, especificamente as colunas A e B (FIG 2.22). Neste estudo foi utilizado uma estrutura de parede fina similar a estrutura veicular. O procedimento de soldagem foi estabelecido e quatro distâncias entre pontos de solda foram definidas. Os testes foram realizados aplicando uma força de compressão axial a uma velocidade muito baixa (quase estáticos). Na FIG 2.22 estão representados os componentes investigados (estrutura veicular) e a geometria do corpo de prova utilizado nos testes.

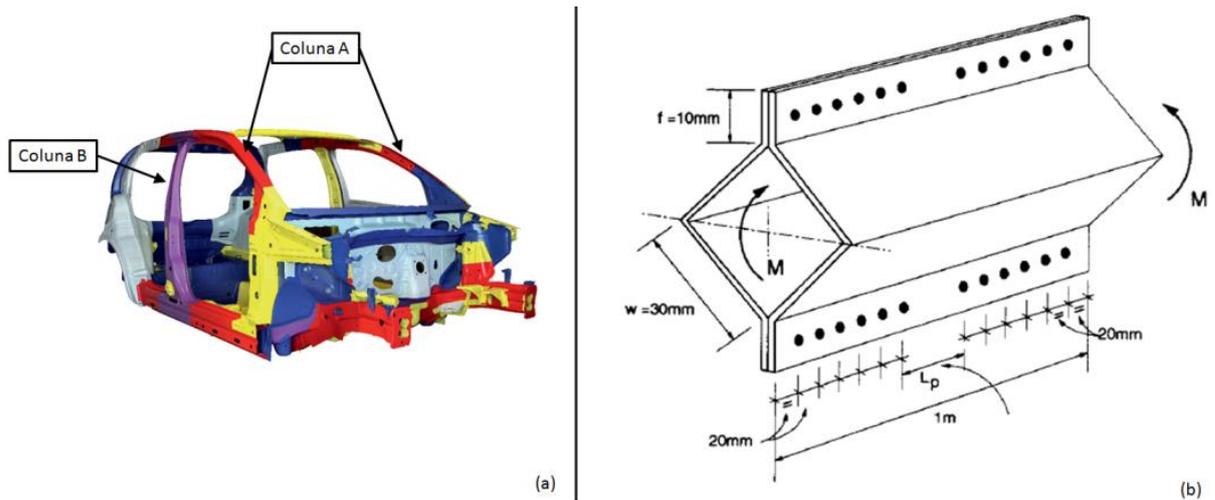


FIGURA 2.22 - (a) Coluna A e B; (b) Geometria e dimensões dos corpos de prova.

FONTE – Adaptado de MURRAY, 1994.

Murray (1994) mostra que a distância entre os pontos de solda influencia a resistência mecânica de estruturas veiculares. Na FIG 2.23 (a) estão representadas as curvas de força em função do deslocamento axial (compressão) referentes as distâncias estabelecidas entre os pontos de solda. Observa-se que corpos de prova em que os pontos de solda estão distantes 20 e 40 mm entre si, apresentaram limites de resistência mais elevados. Na FIG 2.23 (b) está representada uma curva na qual pode-se observar que estruturas soldadas com distância de 40 mm entre pontos de solda, foram mais eficientes na absorção de energia.

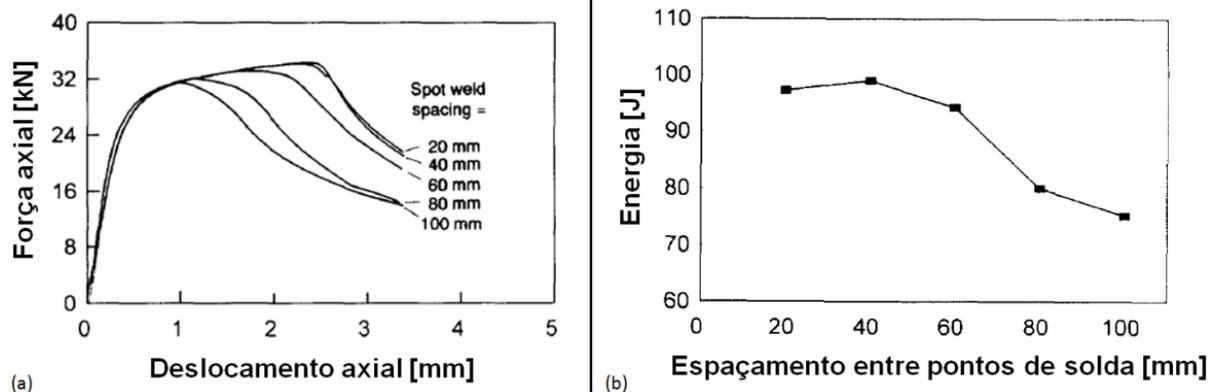


FIGURA 2.23 – (a) Força em função do deslocamento, (b) Energia em função da distância entre os pontos de solda.

FONTE – Adaptado de MURRAY, 1994.

### 2.5.2 Influência do processo de soldagem

Peroni et al. (2008) investigaram a influência do procedimento de soldagem sobre estruturas similares a longarinas veiculares. Além disso, estudaram três seções transversais, a fim de confirmar se os resultados da variação do processo de soldagem também seguiriam a mesma tendência com a mudança de seção. Neste trabalho, o material utilizado para construção dos corpos de prova foi o aço DC02 EN10130. As estruturas têm seções transversais com dimensões de 40 x 40 mm, comprimento de 300 mm e espessura de 1 mm. Os processos de união utilizados, foram: soldagem a ponto por resistência elétrica (SW), soldagem a laser (LW) e adesivos estruturais (9514 e 330). Foram realizados ensaios quase estáticos, em que foi estabelecido uma compressão de 200 mm, e dinâmicos, em que condição estabelecida foi velocidade de colisão de aproximadamente 10 m/s e compressão entre 150 e 210 mm. Na FIG 2.24 estão representados os resultados obtidos para os diferentes processos de soldagem, considerando as condições teste quase estático e dinâmico, assim como, as diferentes seções transversais.

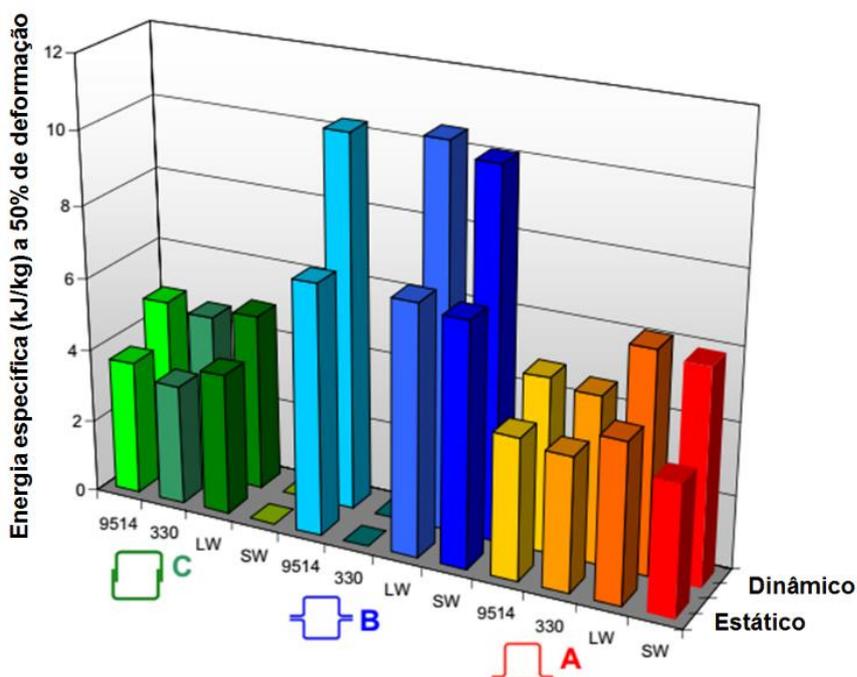


FIGURA 2.24 – Resultados dos diferentes processos de união de chapas em função da seção transversal e velocidade de deformação.

FONTE – PERONI et al., 2008

Os resultados mostraram que o processo de soldagem tem influência sobre a capacidade da estrutura em absorver energia, assim como, a seção transversal também influencia. Nas discussões, o autor afirma que a soldagem a laser é superior a soldagem a ponto

por resistência elétrica. Segundo eles, a soldagem a laser é mais eficiente em absorver energia, além disso, tem uma deformação mais estável.

### 2.5.3 Abertura do flange entre dois pontos de solda

O flange é um elemento estrutural composto por duas chapas finas com largura máxima de 30 mm, as quais são unidas por pontos de solda ou pinos (rebites ou parafusos) com espaçamentos equidistantes. Nesta seção serão apresentados estudos que apresentaram possíveis causas para que ocorra a abertura do flange em estruturas sob compressão. Acredita-se que esse fenômeno influencia o modo de deformação de estruturas similares a longarinas submetidas a colisão, uma vez que a abertura do flange pode contribuir para ruptura do ponto de solda.

Zhang e Yu (1989) estudaram a influência da velocidade na deformação de dois tipos de estruturas, denominados tipo I e tipo II (FIG 2.25).

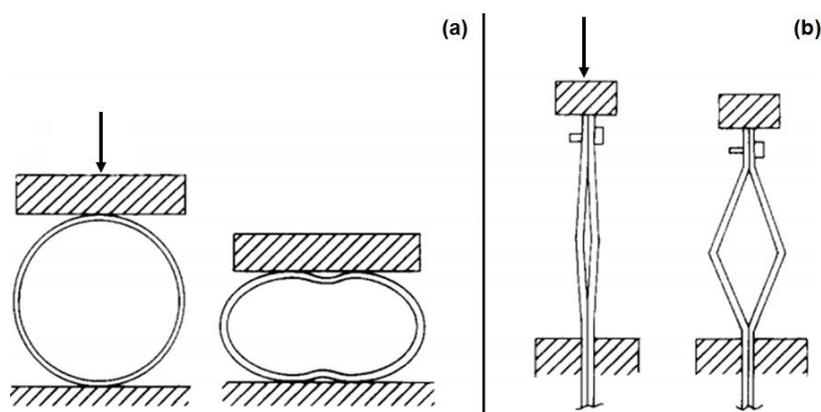


FIGURA 2.25 - Experimento realizado fisicamente: (a) tipo I, (b) tipo II.

FONTE – ZHANG e YU, 1989

A estrutura tipo II é composta por duas chapas unidas por dois pontos separados por uma distância, esta é similar ao flange da longarina. Zhang e Yu (1989) afirmam que a abertura entre as chapas está sob influência da inércia e da taxa de deformação. Como essa estrutura é similar ao flange da longarina, acredita-se que seu comportamento seja semelhante.

Webb et al. (2001) discutiram a flambagem das chapas na estrutura tipo II. Afirmaram que essa ocorre devido a uma imperfeição pré-existente, que seria uma abertura inicial. Utilizando-se de resultados experimentais, os autores realizaram um estudo virtual a respeito do comportamento de duas chapas submetidas a compressão. Os resultados virtuais reproduziram as deformações experimentais (FIG 2.26).

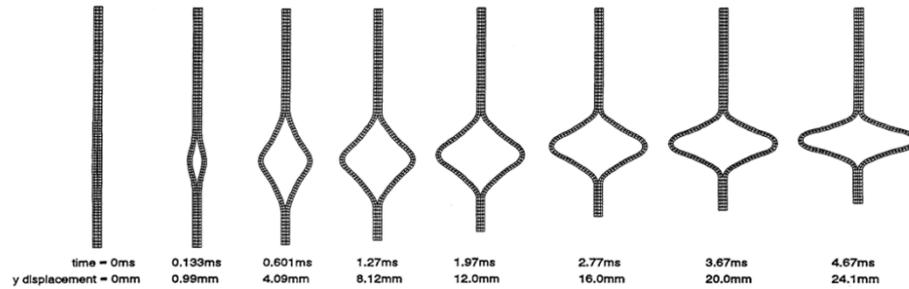


FIGURA 2.26 - Deformação por flambagem, abertura inicial entre as chapas de 0, 23°.

FONTE – WEBB et al., 2001

A ocorrência de flambagem é observada em estruturas tubulares de paredes finas com flange (longarinas), soldadas por soldagem a ponto, submetidas à compressão. Esse tipo de deformação é evidenciado em diversos trabalhos que abordam deformação plástica de estruturas similares a longarina. Na FIG 2.27 estão representadas “longarinas” referentes a estudos experimentais as quais apresentaram abertura do flange. Destes, somente Schneider et al. (2003) discute a questão da abertura do flange (Seção 2.5.4).

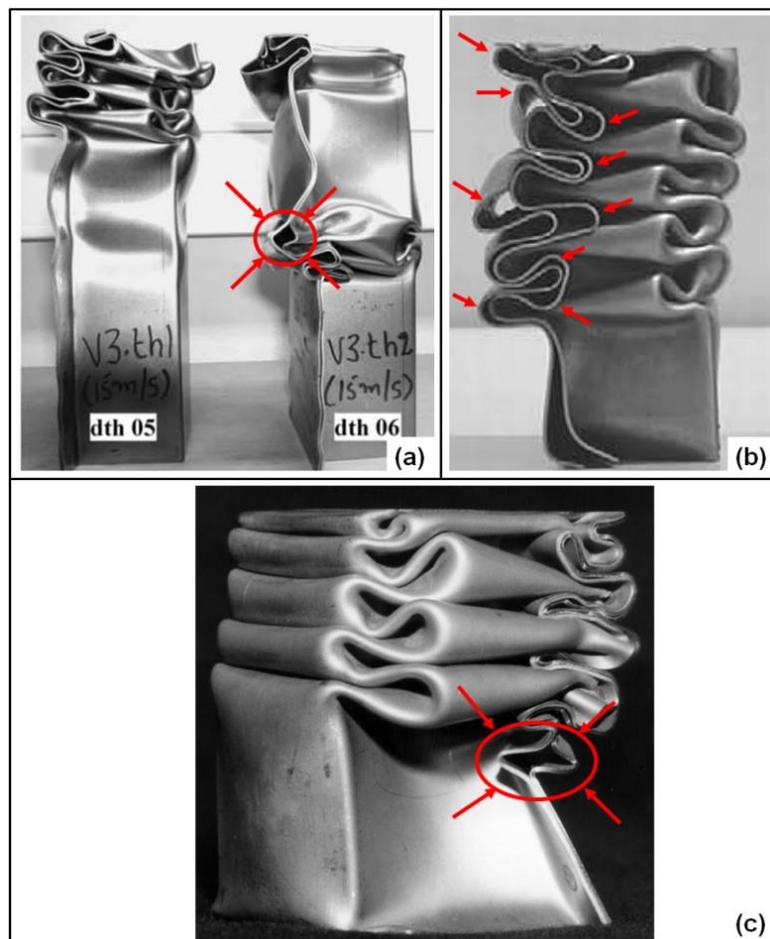


FIGURA 2.27 - Deformações por flambagem entre dois pontos de solda observadas em trabalhos de diferentes pesquisadores.

FONTE - (a) TARIGOPULA et al., 2006; (b) PERONI et al., 2008; (c) SCHNEIDER et al., 2003.

Kardomateas (1992) estudou analiticamente o comportamento de estruturas similares a longarinas veiculares, soldadas a ponto por resistência elétrica, submetidas a esforços cíclicos de flambagem e torção. O autor identificou que a abertura do flange só é possível por meio da flambagem (FIG 2.28).

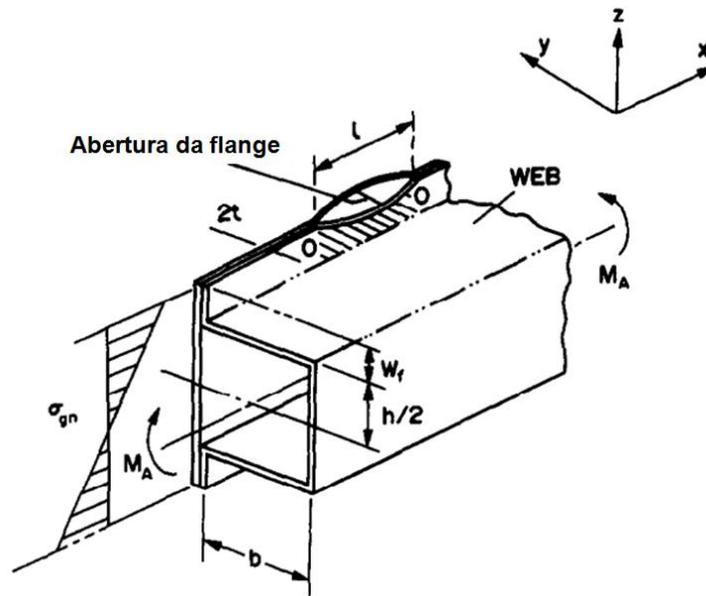


FIGURA 2.28 - Abertura do flange entre dois pontos de solda.

FONTE - KARDOMATEAS, 1992.

Kardomateas (1992) descreve que a abertura do flange ocorre devido uma deflexão inicial das chapas durante o processo de produção dos pontos de solda em sequência, isso significa que uma deformação oriunda da produção do ponto favorece a flambagem da estrutura quando submetida à compressão. A FIG 2.29 representa a deflexão entre dois pontos de solda em que a deformação total máxima ( $v_i$ ) é proporcional à deformação inicial máxima ( $v_0$ ).

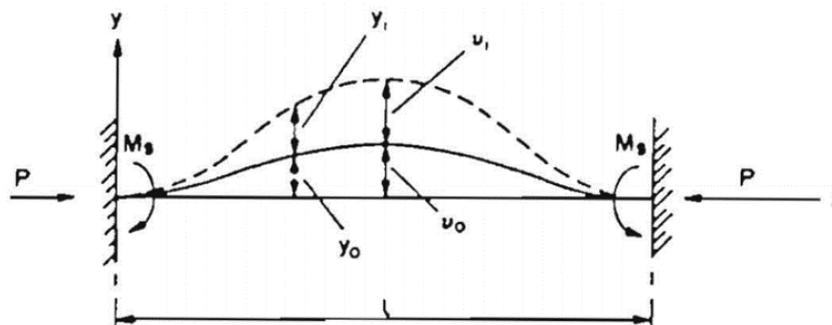


FIGURA 2.29 - Flambagem do flange localizada entre dois pontos de solda (deformação total máxima e deformação inicial máxima).

FONTE - KARDOMATEAS, 1992.

#### 2.5.4 Ruptura do ponto de solda

Schneider e Jones (in press) compararam o desempenho de duas estruturas de parede fina submetidas ao teste de colisão. As duas estruturas têm a seção transversal quadrada (60 x 60 mm), no entanto, a primeira é representada por um tubo quadrado com costura e sem a presença de flange (perfil de tubo comercial – tubo com costura) e a segunda, é representada por um tubo quadrado do tipo “cartola” (presença do flange) formado por duas partes soldadas pelo processo de soldagem a ponto por resistência elétrica. Para cada perfil, foram construídas três estruturas com classes de aços distintos: aço Intersticial *free* com alto limite de resistência (*IFHS - Interstitial Free High Strength*), aço microligados (*HSLA - High-Strength Low-Alloy*) e aço de baixo a médio teor de carbono (*MS – Mild Steel*). Os parâmetros de soldagem foram estabelecidos conforme as características de cada material. Várias condições de testes foram estabelecidas: variação de energia de colisão, velocidade de colisão e altura da estrutura. Dentre as conclusões, destaca-se o fato de que os tubos com costura, não apresentaram diferenças significativas em desempenho estrutural (energia absorvida e compressão) entre as diferentes classes de aço. No entanto, estruturas do tipo “cartola” construídas com o aço MS apresentaram maior resistência mecânica, absorveram mais energia cinética e comprimiram menos, que estruturas construídas com o aço IFHS. Entretanto, comparando as estruturas produzidas com o aço HSLA e MS, identificou-se que em condições similares de teste, estes não apresentaram diferenças significativas em relação a absorção de energia cinética e compressão.

Schneider e Jones (2003) sugerem que a diferença de desempenho entre as estruturas do tipo “cartola” construídas com o aço MS e IFHS, possivelmente é por causa da ruptura de pontos de solda nas estruturas (FIG 2.30). Em razão disso, foi realizado um estudo experimental usando o teste de arrancamento sobre pontos de solda sob condições quase estáticas e dinâmicas (FIG 2.31). Schneider e Jones (2003) identificaram que os pontos de solda que tiveram ruptura parcial ou total sobre estruturas deformadas, estavam sujeitos ao esforço de arrancamento, devido a abertura do flange (FIG 2.30). Por isso, optou-se por fazer uma análise da ruptura utilizando o teste de arrancamento, além disso, segundo eles, o teste de cisalhamento comumente utilizado para caracterização de pontos de solda não seria aplicável, pois não representa os esforços sobre o ponto em condição de colisão.

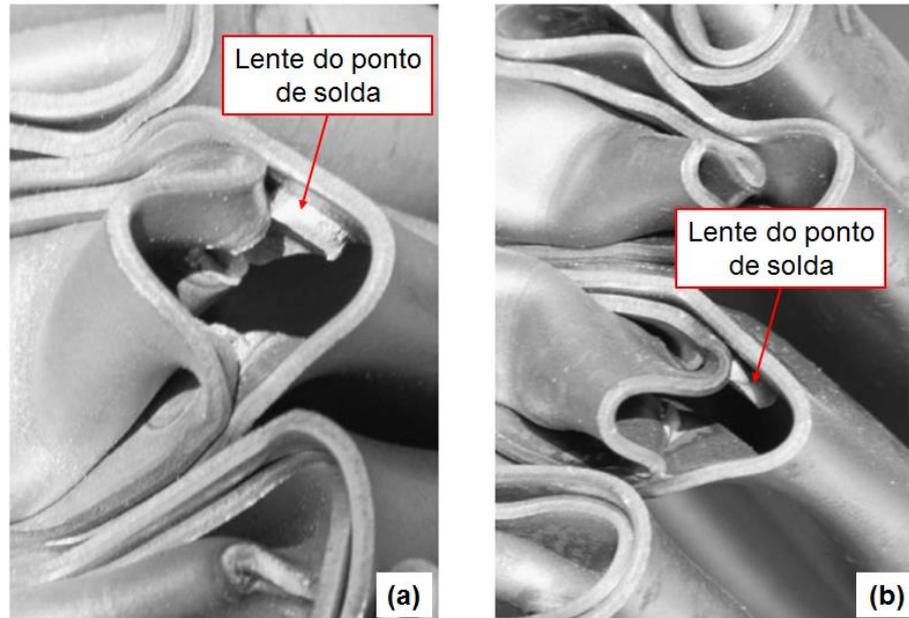


FIGURA 2.30 - Ruptura do ponto de solda. Material das amostras: (a) Aço Intersticial Free (IF) e (b) Aço Alta Resistência e Baixa Liga (HSLA).

FONTE – Adaptado de SCHNEIDER e JONES, 2003.

Schneider e Jones (2003) concluíram que as rupturas dos pontos, tanto em condições quase estática quanto dinâmica, ocorrem no entorno da lente do ponto de solda. Isso significa que a ruptura é sobre a chapa (material base) e não sobre a lente de solda. A FIG 2.31 está representando o ensaio de arrancamento quase estático sobre dois dos materiais estudado pelos autores.

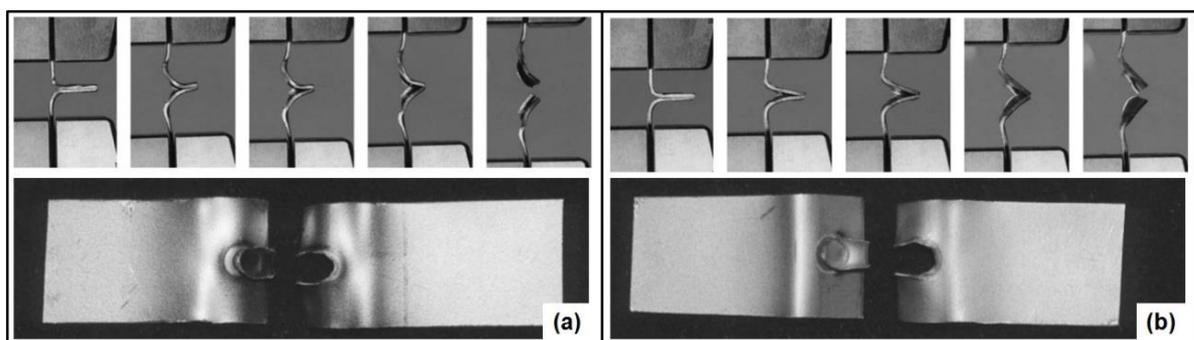


FIGURA 2.31 - Ruptura do ponto de solda utilizando o ensaio de arrancamento. Material das amostras: (a) Aço Macio e (b) Aço “Intersticial Free” (IF).

FONTE - SCHNEIDER et al., 2003.

Tarigopula et al. (2006) estudaram o desempenho estrutural de estruturas tubulares quadradas de paredes finas do tipo tubo com costura e “cartola”, submetidas a testes em condição estática e dinâmica. A estrutura do tipo “cartola” é similar a longarinas veiculares,

construídas por soldagem a ponto por resistência elétrica. O material utilizado na construção dos corpos de prova foi o aço DP800 (alta resistência). Os ensaios dinâmicos foram realizados considerando uma velocidade de colisão de até 15 m/s e massa de colisão de 600 kg. Para evitar o esmagamento completo, absorvedores de impacto foram posicionados em paralelo ao corpo de prova (FIG 2.32). O intuito deste trabalho foi avaliar os modos de deformação de cada estrutura, assim como, a força de deformação e a absorção de energia. Além disso, simulações numéricas da compressão axial das seções de paredes finas foram realizadas e comparadas com os resultados experimentais.

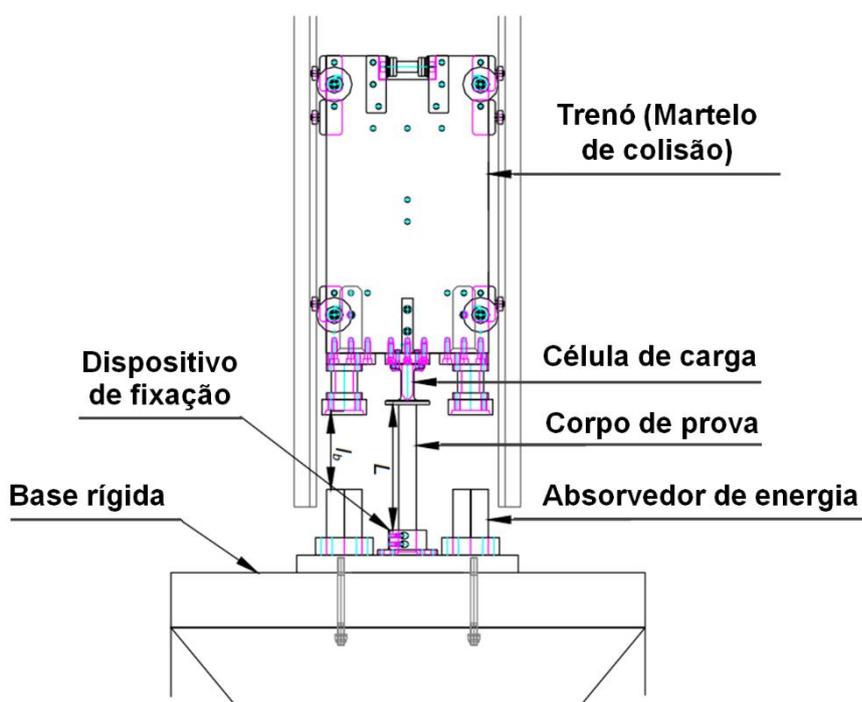


FIGURA 2.32 – Configuração dos testes dinâmicos.

FONTE – Adaptado de TARIGOPULA et al., 2006.

Tarigopula et al. (2006) classificaram os modos de deformação genericamente em três tipos: progressivo (tipo sanfona), irregular e irregular próximo ao final da deformação. Não foram realizadas análises detalhadas sobre quais os fatores influenciaram ou determinaram estes comportamentos, somente o apontamento genérico. Em relação as forças máximas, sugeriram que as estruturas do tipo “cartola” apresentaram os maiores picos em todas as condições de testes dinâmicos. Estas estruturas também absorveram mais energia.

Tarigopula et al. (2006) também concluíram que a correlação entre a simulação numérica e o teste experimental é significativa, isso significa que de forma geral a simulação reproduz satisfatoriamente o experimental. Porém, em estruturas similares as longarinas, as simulações não previram as rupturas de pontos de solda observadas nos testes experimentais.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Materiais

Para construção dos corpos de prova utilizou-se um aço carbono SAE/ABNT 1006 sem revestimento, laminado a frio e recozido em caixa. A espessura da chapa foi de 0,90 mm e todos os corpos de prova foram produzidos no sentido de laminação do material. A composição química e propriedades mecânicas estão destacadas na TAB. 3.1. Antes da soldagem as partes foram limpas com um solvente comercial.

TABELA 3.1

Composição química e propriedades mecânicas do aço SAE 1006.

<b>Composição química (%)</b>														
Aço	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Sn	N	B
SAE-J403-14-1006	0,05	0,01	0,22	0,011	0,012	0,044	0,01	0,001	0,001	0,01	0,01	0,001	0,0023	0,0038
<b>Propriedades mecânicas</b>														
Limite de resistência à tração	330 MPa													
Tensão de escoamento	285 MPa													
Alongamento	20%													

Este material foi utilizado por questões de viabilidade da pesquisa (custos), no entanto, ele apresenta características mecânicas semelhantes ao aço FeP04 amplamente utilizado por indústrias automobilísticas. Além disso, o propósito deste trabalho é avaliar a influência da soldagem a ponto por resistência elétrica em longarinas submetidas ao teste de colisão, por isso, a variável de controle é a resistência mecânica do ponto de solda e não o material.

### 3.2 Equipamentos

#### 3.2.1 Máquina de soldagem a ponto por resistência elétrica

As soldas foram realizadas utilizando uma máquina de soldagem a ponto por resistência elétrica, que tem uma pinça de soldagem suspensa com cilindro pneumático da fabricante FASE modelo X/4 – 200. Possui um transformador de frequência média de 440V e potência de nominal de 54 kVA modelo Cabine Compacta PTI número de série P04000951

com controlador Weld334MHC e unidade de programação móvel HCM 4300 HHT da fabricante FASE; um transformador de 220V para 440V Auto Trafo monofásico de 15 kVA e 60 Hz, modelo ELT78 (FIG 3.1). Os eletrodos utilizados foram de liga Cu-Cr-Zr com 6 mm de diâmetro de contato.

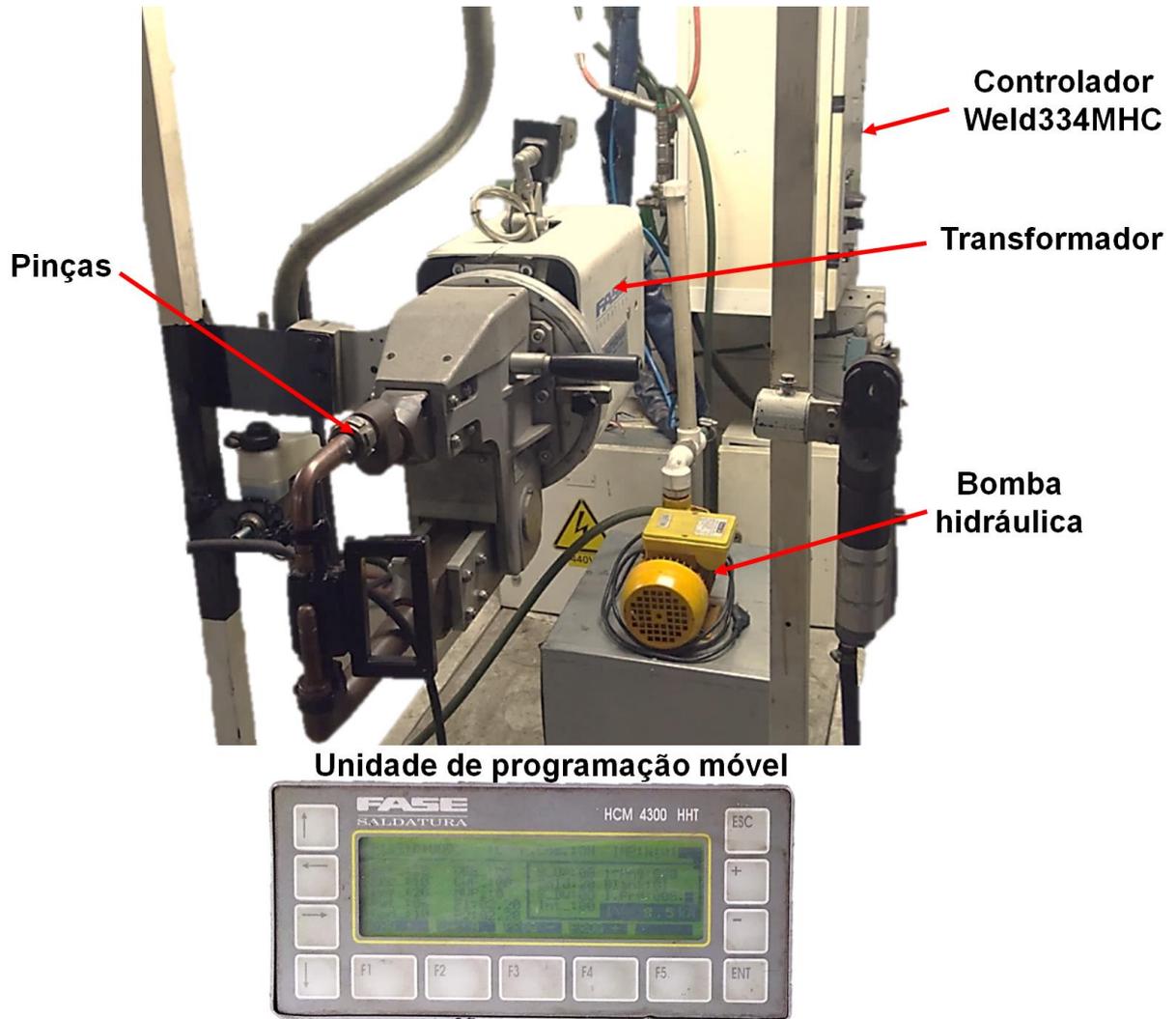


FIGURA 3.1 – Máquina de soldagem a ponto por resistência elétrica

Esta máquina de soldagem foi calibrada por equipamentos específicos: dinamômetro e kiloamperímetro digital. Estes, certificaram a força aplicada pelos eletrodos, a intensidade da corrente elétrica e o tempo de passagem da corrente elétrica na soldagem, respectivamente.

### 3.2.1.1 Calibração da força dos eletrodos

Na FIG 3.2 ilustra um dispositivo de calibração da força do eletrodo, denominado dinamômetro hidráulico. Este foi projetado e construído pelo autor a fim de determinar a força aplicada pelos eletrodos sobre os corpos de prova durante a soldagem.

O equipamento é composto por um cilindro hidráulico adaptado do sistema de freio automotivo, comumente empregado em freios a tambor (cilindro da roda). Um manômetro analógico foi utilizado para fazer a medição da pressão de compressão dos eletrodos sobre o cilindro hidráulico. E, para pressurização do circuito hidráulico usou-se um cilindro mestre com reservatório de óleo, também adaptado do sistema de freio automotivo. Para impedir o retorno do óleo pressurizado ao reservatório, uma válvula direcional foi acoplada na saída do cilindro mestre. A FIG 3.2 destaca todos os componentes do equipamento, além deles, também destaca as bases de apoio, as quais são suportes fixados a pinça da máquina, construídos para fazerem interface entre a pinça e o dinamômetro.

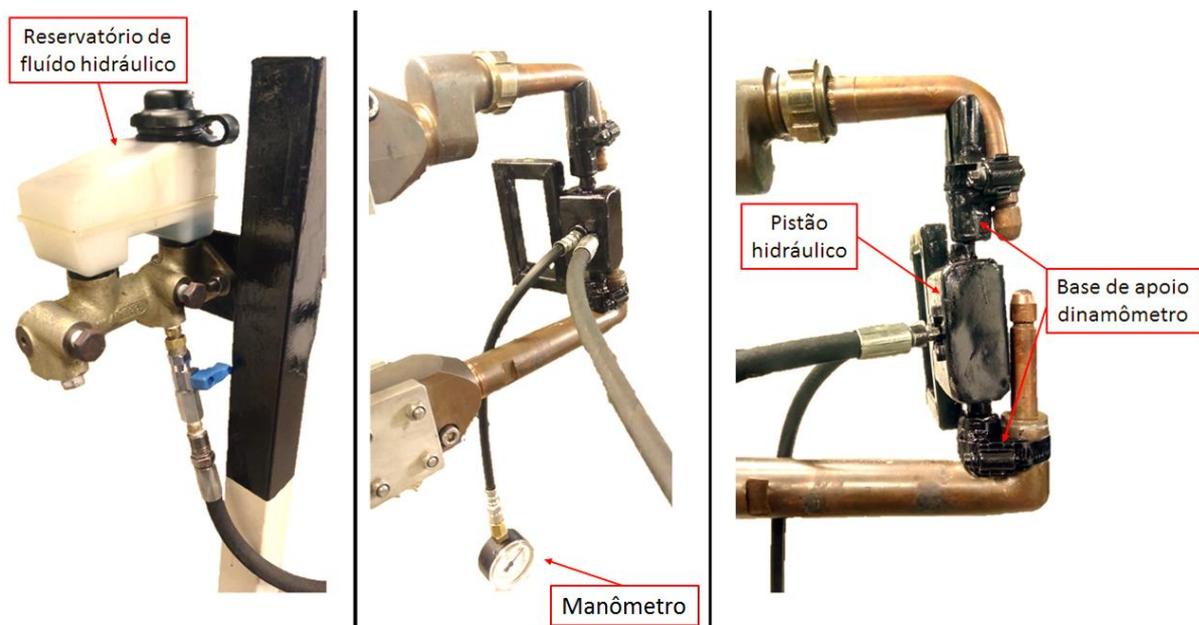


FIGURA 3.2 – Dinamômetro hidráulico.

O equipamento foi calibrado em uma máquina de ensaio de tração universal modelo INSTRON 8802 com célula de carga de 100 kN, alocada no Laboratório de Robótica Soldagem e Simulação da Escola de Engenharia da UFMG. A calibração consistiu em aplicação de forças gradativas pela máquina de tração/compressão sobre o dinamômetro hidráulico, enquanto que a leitura do manômetro era feita simultaneamente. Com isso foi possível obter a curva de relação entre pressão do manômetro e força do eletrodo (FIG 3.3). As curvas tracejadas verde e vermelha representam o desvio padrão amostral e a preta representa a função de correlação que foi significativa cerca de 99,52%.

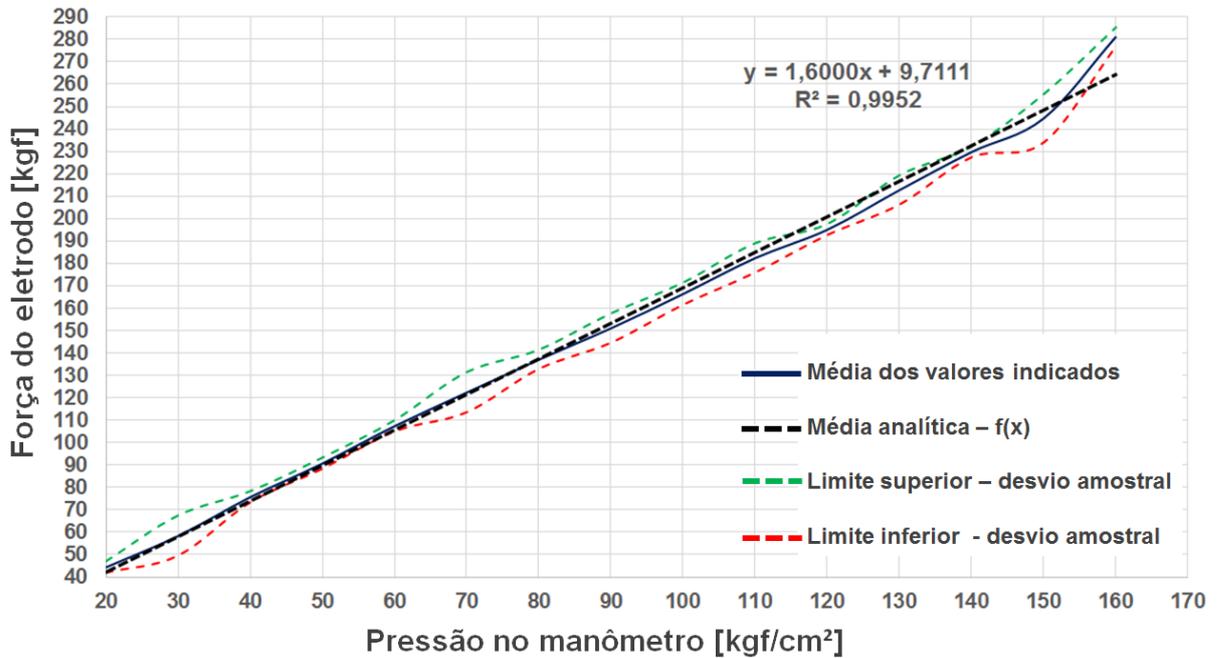


FIGURA 3.3 – Curva de calibração do dinamômetro hidráulico.

### 3.2.1.2 Calibração da corrente e do tempo de soldagem

A calibração da corrente e do tempo de soldagem da máquina de soldagem a ponto foi feita por um kiloamperímetro Digital WELD 1001 o qual utiliza um sensor de Efeito Hall. Este aparelho foi utilizado para medir o valor da corrente de soldagem e certificar o correto funcionamento da máquina. Na FIG 3.4 estão representados o kiliamperímetro, sensor de efeito Hall e a unidade de programação móvel da máquina de soldagem. Nesta calibração, várias soldas foram realizadas a fim de certificar que a máquina estava reproduzindo o que era mostrado em sua unidade de programação móvel (display). Ainda na FIG 3.4, está destacado o registro de soldagem feito pela unidade de programação móvel da máquina de soldagem, o qual informou uma corrente de 8,5 kA, valor este também registrado pelo kiloamperímetro. Em relação ao tempo de passagem de corrente, este também foi aferido utilizando o kiloamperímetro, o qual fornece esse dado.



FIGURA 3.4 – Calibração da corrente e tempo de soldagem da máquina de soldagem.

### 3.2.2 Dispositivo de posicionamento dos corpos de prova para soldagem

A repetibilidade das características dimensionais e de resistências mecânicas dos pontos de solda, está diretamente relacionada com a posição de soldagem. Isto é, para reprodução de réplicas de pontos de solda é preciso que a posição de soldagem seja sempre a mesma, um ponto em relação ao outro. Em situações que o operador segura manualmente os corpos de prova para realização da soldagem, os pontos de solda podem se diferir consideravelmente, quanto as dimensões e resistências mecânicas. Para eliminar essas variáveis, foi construído um dispositivo de posicionamento dos corpos de prova em relação a máquina de soldagem. Esse dispositivo foi acoplado a estrutura da máquina, o qual possibilitou ajustes de inclinação e posição dos corpos de prova em relação aos eletrodos.

Na FIG. 3.5, está mostrado o dispositivo de posicionamento. Na soldagem das longarinas esse dispositivo foi imprescindível, uma vez que garantiu a equidistância entre os pontos e o alinhamento destes. Este dispositivo é composto por uma estrutura metálica em chapas que apresentam furações que permitem os ajustes de inclinação e posição vertical. Além

delas, tem-se uma placa de fixação dos corpos de prova a qual é movida por meio de dois fusos sob sua base, estes são interligados por correntes de transmissão os quais permitem o ajuste longitudinal garantindo o posicionamento correto dos pontos de solda na longarina.

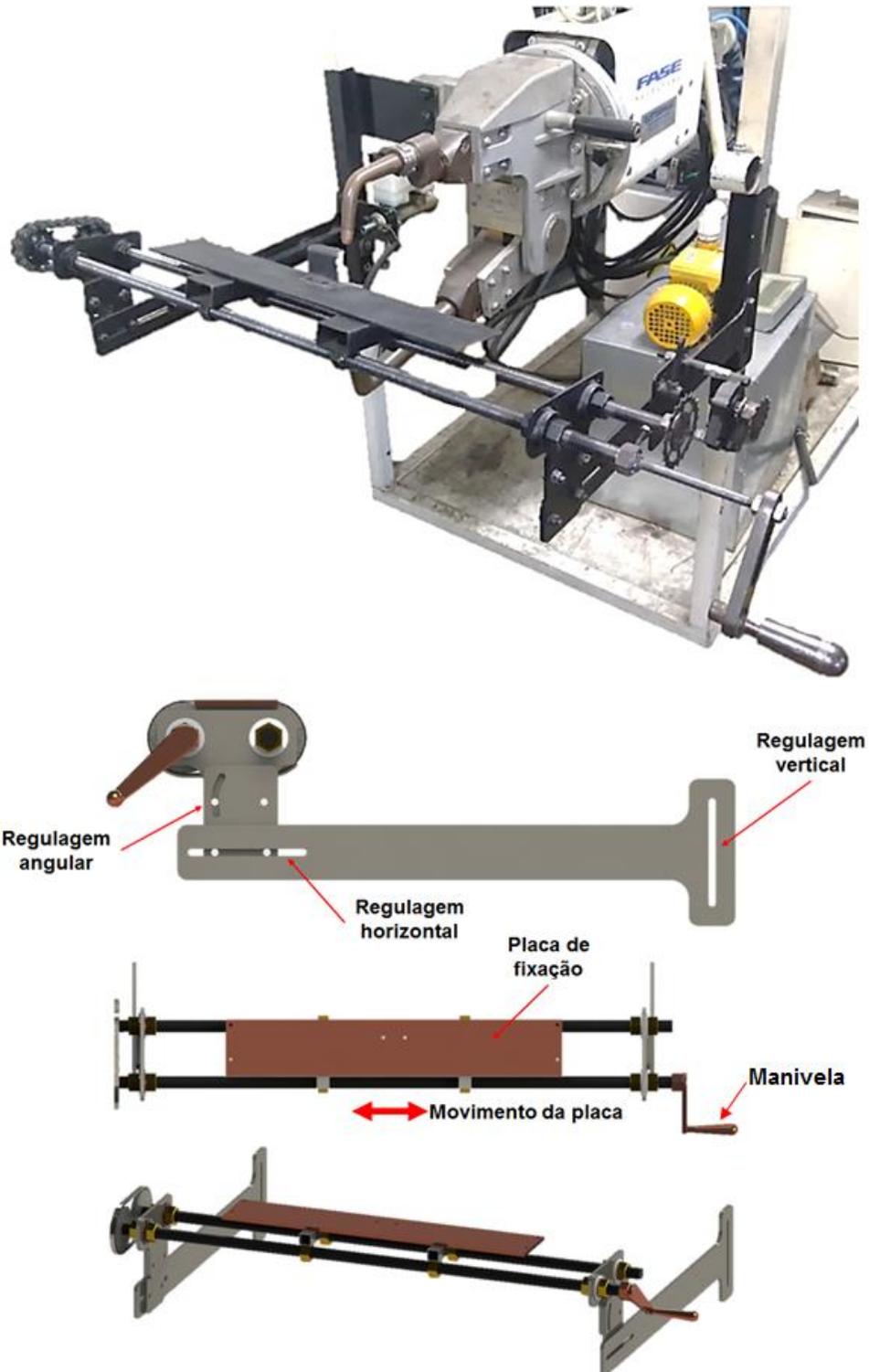


FIGURA 3.5 – Dispositivo de posicionamento de corpos de provas em relação a máquina de soldagem a ponto.

Na FIG 3.6 está ilustrado o corpo de prova referente ao ensaio de arrancamento posicionado sobre o dispositivo para soldagem. Nela, um alicate é utilizado para fixar o corpo de prova ao dispositivo de posicionamento.

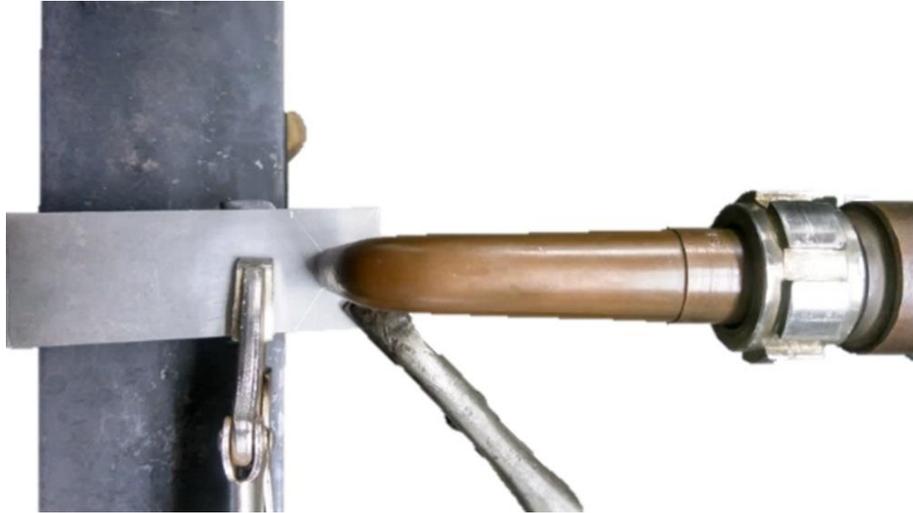


FIGURA 3.6 – Soldagem do corpo de prova usado no ensaio de arrancamento do ponto de solda.

A FIG 3.7 apresenta o posicionamento do corpo de prova usado no ensaio de torção sobre o dispositivo. Neste caso, um alicate também foi utilizado para prender o corpo de prova ao dispositivo.

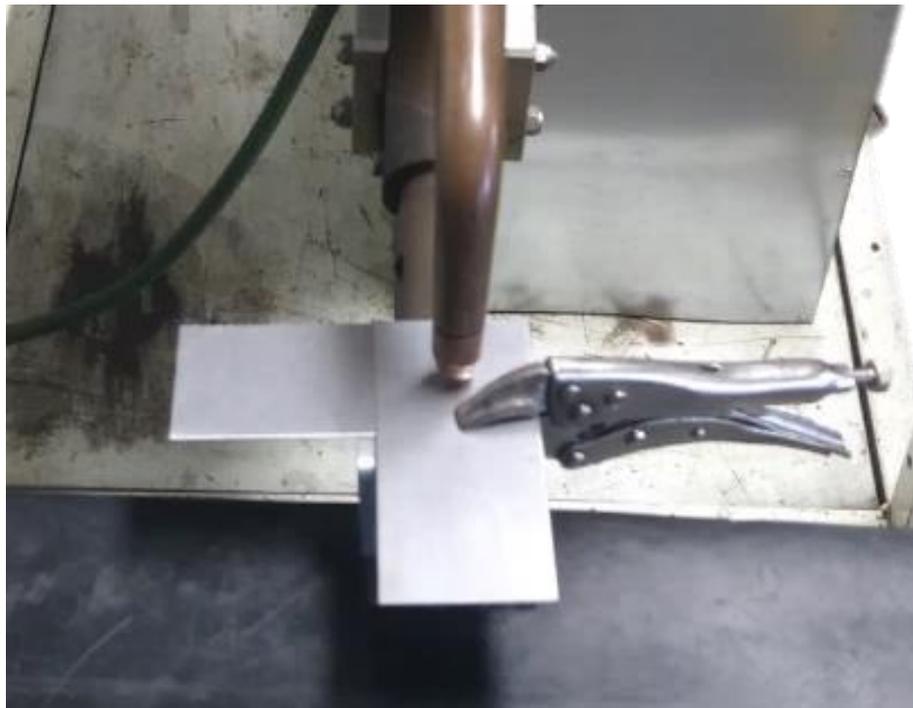


FIGURA 3.7 – Soldagem do corpo de prova usado no ensaio de torção do ponto de solda.

A FIG 3.8 apresenta a longarina sobre o dispositivo de posicionamento para produção das soldas. Nela, estão destacados os pontos de solda posicionados equidistantes e alinhados longitudinalmente, para fixação da longarina sobre o dispositivo foram utilizados dois grampos fixadores.

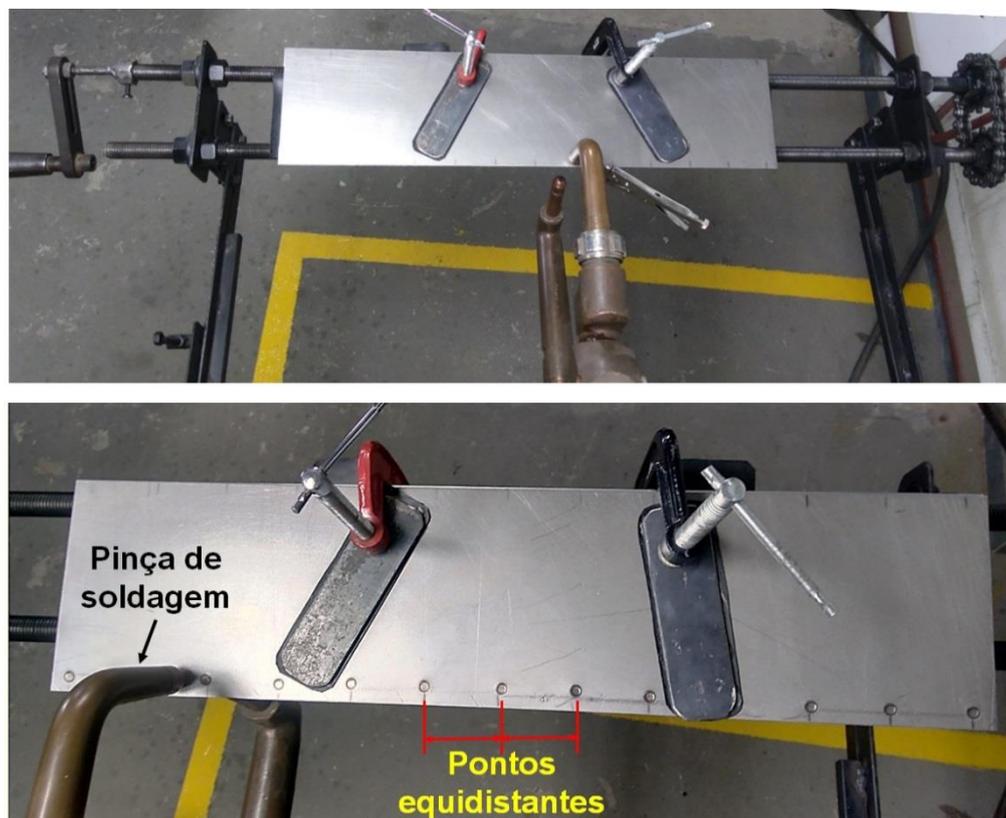


FIGURA 3.8 – Longarina fixada ao dispositivo de posicionamento.

### 3.2.3 Máquina de ensaio torção e tração

Para realização do ensaio de torção sobre o ponto de solda, foram construídas garras específicas para à torção do ponto de solda. Estas garras são inovadoras, uma vez que foram desenvolvidas para serem utilizadas em qualquer máquina de tração. Sua geometria impede que o corpo de prova seja sujeito a tensões de flexão, durante a torção do ponto de solda. O ângulo máximo de torção é de  $120^\circ$ , suficiente para garantir a ruptura total do ponto de solda. É importante mencionar que estas garras foram submetidas à patente. Além das garras, foi construída uma máquina de ensaio de tração com capacidade de carga de 2 kN (FIG 3.9), composta por duas colunas (altura ajustável), uma viga e uma base. Além disso, está equipada com um atuador mecânico movido por um motor elétrico de 12 V e uma célula de carga com capacidade máxima de 2 kN e resolução de 2 N.

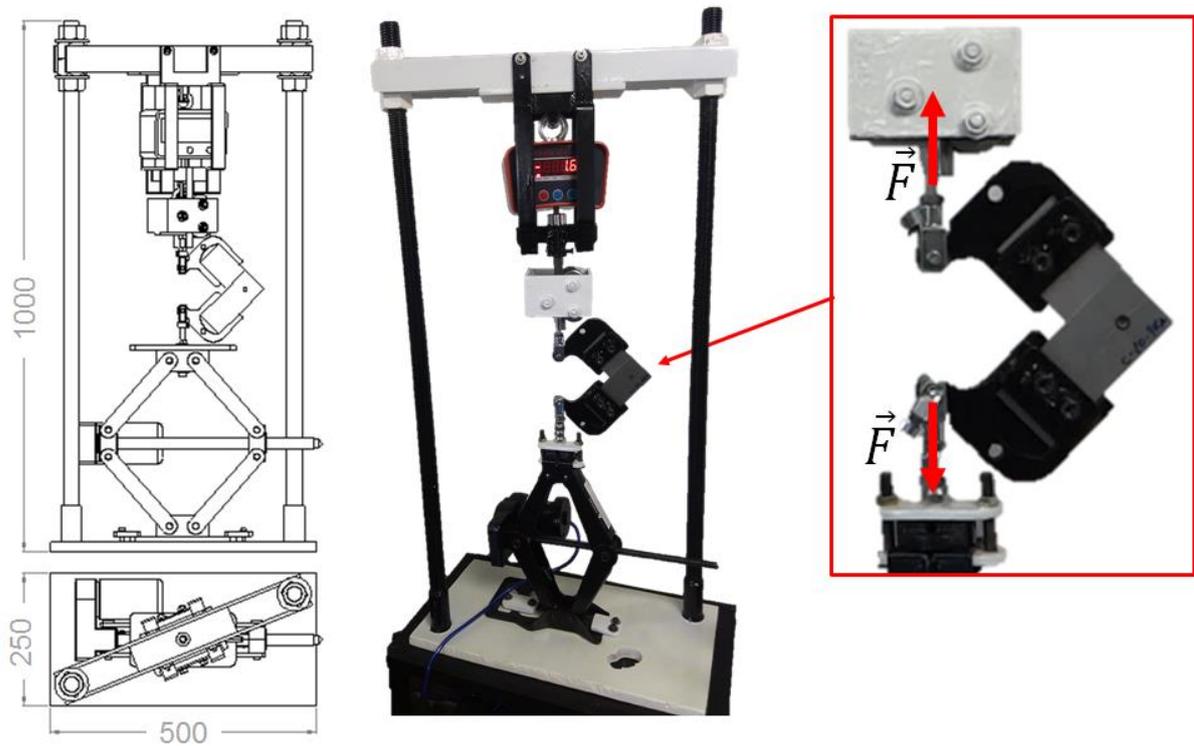


FIGURA 3.9 – Máquina de ensaio de torção (dimensões em mm).

A garra foi construída considerando um canal de acomodação do corpo de prova, parafusos de fixação e um furo de rotação. As dimensões adotadas estão em concordância com o corpo de prova. A dimensão fixa de 126 mm é utilizada para calcular o braço de alavanca variável ( $\Delta d$ ), conseqüentemente, calcular o momento sobre o ponto de solda (FIG 3.10).

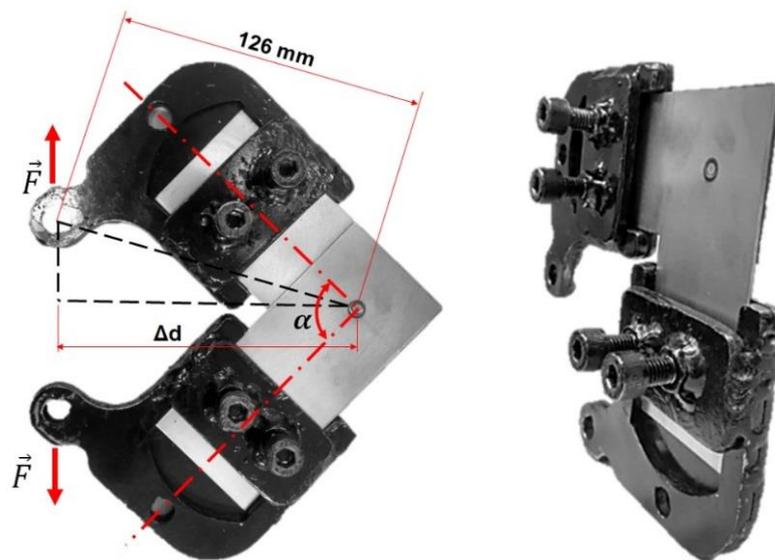


FIGURA 3.10 - Garra para fixação dos corpos de prova (teste de torção).

Na FIG 3.11 está representada uma máquina de ensaio de tração universal INSTRON, modelo 5882, utilizada para realização dos ensaios de arrancamento de pontos de solda. Para este ensaio, não foi necessário a construção de nenhum dispositivo extra, uma vez que a interface entre o corpo de prova e a máquina, se deu por meio de garras do tipo mordente, comumente utilizadas em ensaios de tração com chapas planas.

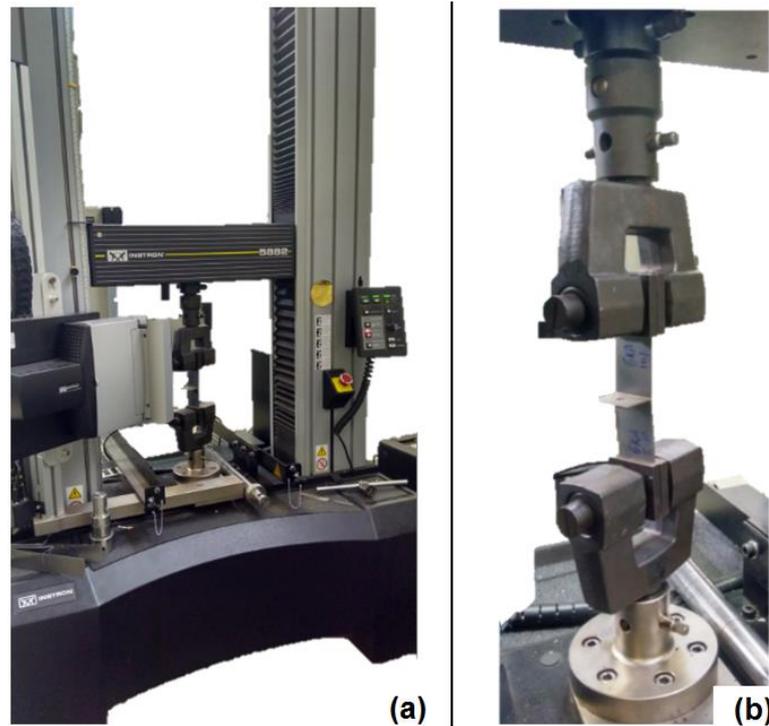


FIGURA 3.11 – (a) Máquina de ensaio de tração e (b) corpo de prova fixados pelas garras do tipo mordente.

#### 3.2.4 Torre de ensaio de colisão

Para reproduzir a colisão veicular foi construída uma torre com capacidade de içamento de até 300 kg a uma altura máxima de 11,5 m. Após o içamento da massa (martelo de colisão), esta é liberada e cai em queda livre até atingir a longarina na base da torre. Na FIG 3.12 está representada a torre para ensaios de colisão. Com o intuito de minimizar o amortecimento do solo, foi construída uma base de concreto, medindo: 1,3 x 1,3 x 1,5 m. Sobre esta base foi posicionada uma chapa de aço de 1000 x 1000 x 19,5 mm. Detalhes da construção da torre estão descritos no ANEXO A.

## Torre



## Martelo de colisão

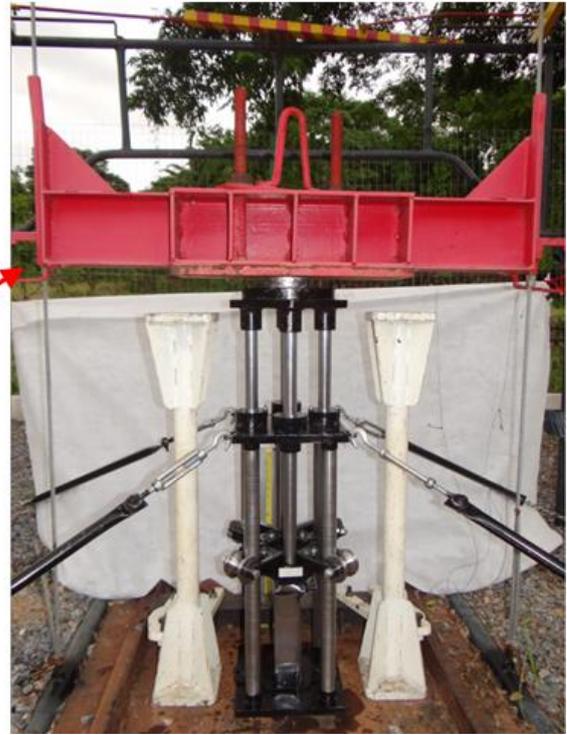


FIGURA 3.12 – Torre de ensaio de colisão (esquerda) e martelo de colisão (direita).

Na FIG 3.13 está ilustrado o dispositivo de compressão com suas dimensões. Este tem o propósito de garantir a repetibilidade dos ensaios de colisão nas longarinas, o qual fez interface entre o martelo de colisão e a longarina. Sua função mecânica é garantir que as solicitações de força sobre a longarina sejam somente na direção vertical e no sentido longitudinal, isto é, a longarina não será sujeita à outras componentes vetoriais de forças que não sejam na direção vertical. Este dispositivo é composto por uma estrutura fixa a qual é responsável por acomodar e suportar elementos que permitem a movimentação da estrutura móvel: buchas deslizantes de cobre e os eixos da estrutura móvel. Além disso, tem a função de posicionar a longarina por meio de fixadores que se ajustam à sua geometria (FIG 3.13 (a)), este impede que a longarina escorregue lateralmente (base). A estrutura móvel, é o componente que fez a interface direta entre o martelo de colisão e a longarina, sendo composta por quatro eixos deslizantes e duas placas de aço fixadas nas extremidades. Além destes, sobre esta estrutura foram fixados roletes que deslizam sobre as barras cilíndricas da estrutura fixa que impedem, que durante a deformação da longarina, ocorram deslocamentos laterais (FIG 3.13(b) – quadro em vermelho). Elementos adicionais foram usados a fim de garantir o posicionamento

do dispositivo de compressão e impedir o esmagamento das longarinas, um deles é o limitador de curso, os quais permitem que a longarina se comprima no máximo em 300 mm. Além destes, esticadores e correntes foram utilizados para estaiar o dispositivo de compressão a base da torre, garantindo seu o posicionamento e impedindo movimentações laterais.

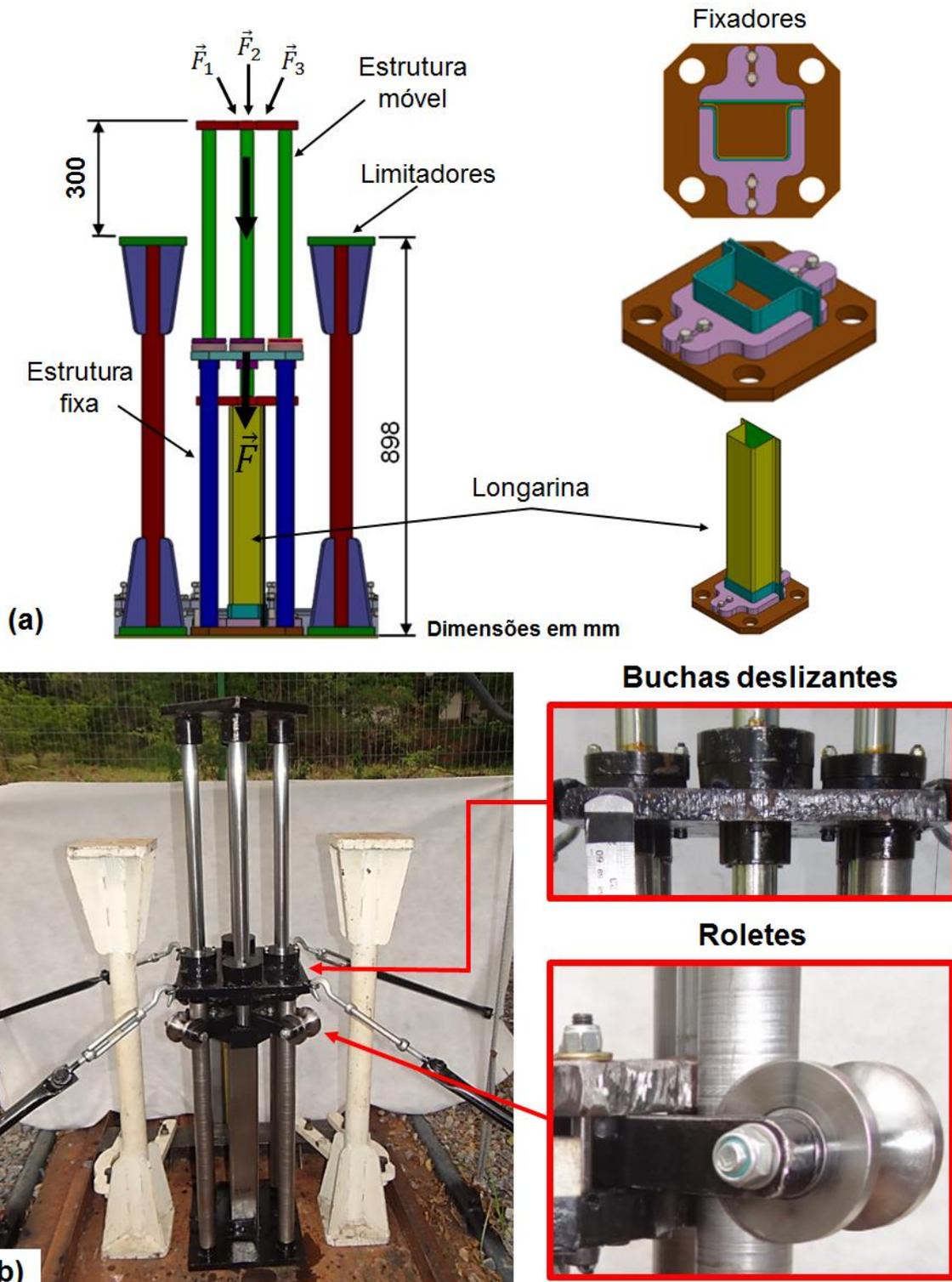


FIGURA 3.13 – Dispositivo “guia”: (a) desenho esquemático e (b) dispositivo construído. Dimensões em mm.

### 3.2.5 Câmera de alta velocidade

As análises de deformação das longarinas foram realizadas utilizando uma câmera de alta velocidade modelo Phantom Miro 110, resolução 1280 x 800, 1,6 Gpx/s e 2  $\mu$ s captura mínima. Análises de deslocamento, velocidade e aceleração de deformação da longarina, foram realizadas utilizando o software da PCC (Phantom Camera Control). As imagens foram capturadas com resolução 960 x 280 e a 6300 frames por segundo.

## 3.3 Preparação dos Corpos de prova

### 3.3.1 Corpos de prova: caracterização mecânica de pontos de solda

O propósito do ensaio mecânico foi certificar que pontos de solda produzidos com condições de soldagem distintas teriam resistências mecânicas diferentes. Para caracterização mecânica dos pontos de solda foram realizados dois ensaios destrutivos. Além deles, a análise metalográfica foi realizada para caracterização da microestrutura:

(I) Ensaio de torção: foram cortadas (guilhotina) chapas com 110 mm de comprimento e 50 mm de largura, sendo que duas destas foram sobrepostas formando um ângulo de 90°. O ponto de solda foi realizado a 25 mm das arestas sobrepostas. Estas dimensões foram admitidas, visto que não existe um padrão de dimensões para corpos de prova usados em ensaios destrutivos em soldas por resistência a ponto. Existem modelos de corpos de prova dimensionados apenas como referência, especificados por instituições como AWS, ISO e SAE (COTA, 2015). Na FIG 3.14 está representado o corpo de prova utilizado no ensaio de torção.

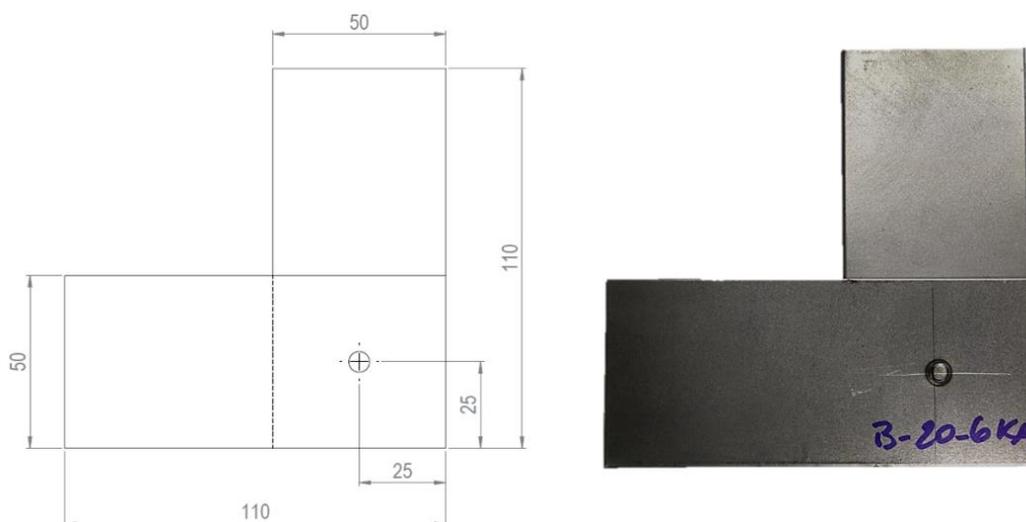


FIGURA 3.14 – Corpo de prova: ensaio de torção (dimensões em mm).

(II) Ensaio de arrancamento: também foram cortadas (guilhotina) chapas com 100 mm de comprimento e 50 mm de largura. Porém, neste ensaio, duas destas chapas foram sobrepostas paralelamente, e o ponto de solda foi produzido a 15 mm do menor lado. Após serem soldadas, as chapas foram dobradas a 2 mm da extremidade da zona termicamente afetada do ponto de solda, formando um flange (FIG 3.15). O intuito de se fazer a dobra nesse local foi diminuir a deformação plástica da chapa, assim as tensões concentraram-se sobre o ponto de solda. Na FIG 3.15 estão representadas as etapas de construção dos corpos de prova.

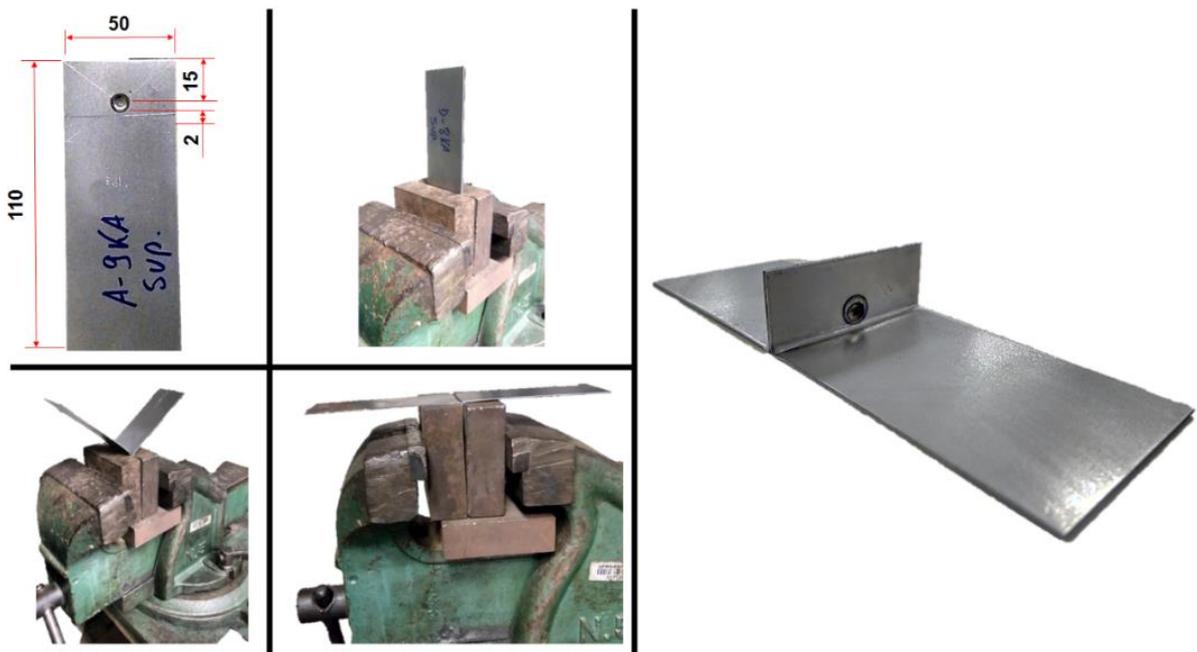


FIGURA 3.15 – Corpo de prova: ensaio de arrancamento (dimensões em mm).

(III) A análise metalográfica foi realizada a fim de avaliar as características das lentes de soldagem, suas dimensões e formas, bem como, defeitos internos. Para análise da macrografia foram realizados os seguintes procedimentos:

- (a) Os cortes transversais para análise foram realizados considerando o plano em que o diâmetro da lente foi menor, uma vez que a forma superficial o ponto de solda produzido não foi de um círculo perfeito. Na FIG 3.16 está representado o plano de corte do corpo de prova.
- (b) Embutimento a frio usando baquelite como resina auto polimerizante.
- (c) Lixamento manual com lixas de granulometria cada vez menor (100, 220, 320, 400, 600 e 1200), mudando-se de direção ( $90^\circ$ ) em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior.

- (d) Polimento mecânico manual com alumina de  $1\mu$ .
- (e) Ataque com solução de Nital 2% para evidenciar a microestrutura, lavagem com água destilada e secagem por jato de ar quente.

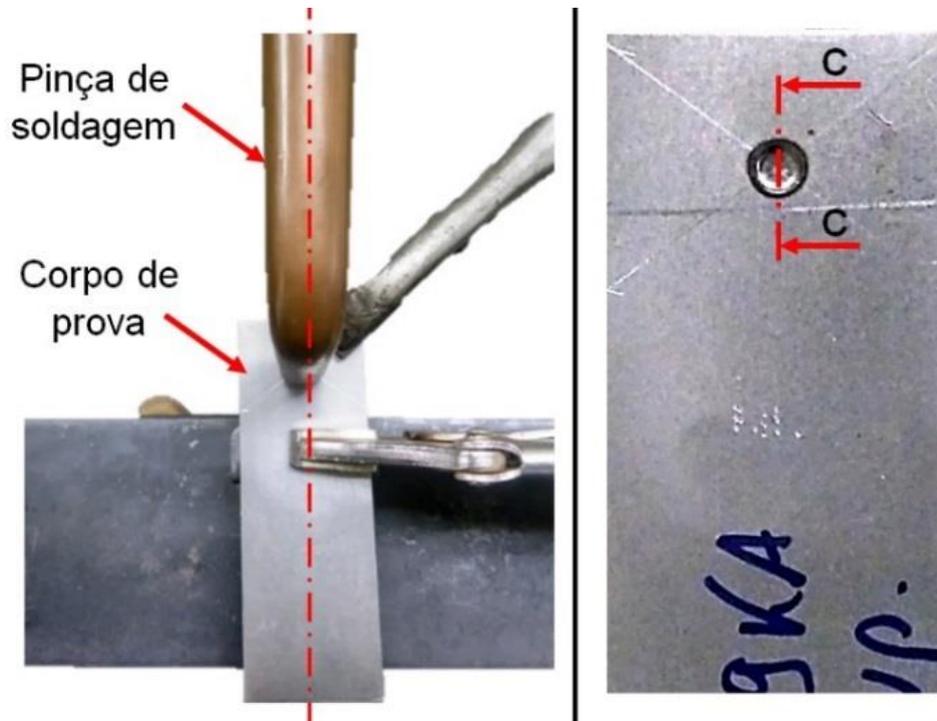


FIGURA 3.16 – Posição de soldagem (esquerda) e corte C-C (direita) para metalografia.

### 3.3.2 Longarinas

#### 3.3.2.1 Seção transversal e dimensões

O objeto de estudo considerado foi uma viga tubular de parede fina de seção transversal retangular, composta por duas partes, soldadas em juntas sobrepostas. Na FIG 3.17 estão representadas suas dimensões, sendo o comprimento de 500 mm, flange de 20 mm, largura de 60 mm e altura de 80 mm. Os pontos de solda foram dispostos equidistantes entre si com espaçamento de 40 mm. Esta viga será denominada “longarina”, uma vez que esse estudo representou uma longarina veicular, para isto, essa geometria e dimensões foram obtidas após visitas em concessionárias de veículos brasileiros. Identificou-se que diferentes marcas e modelos (até cinco passageiros) têm longarinas com dimensões próximas a essa adotada neste estudo, e, entre um modelo e outro, há pequenas variações.

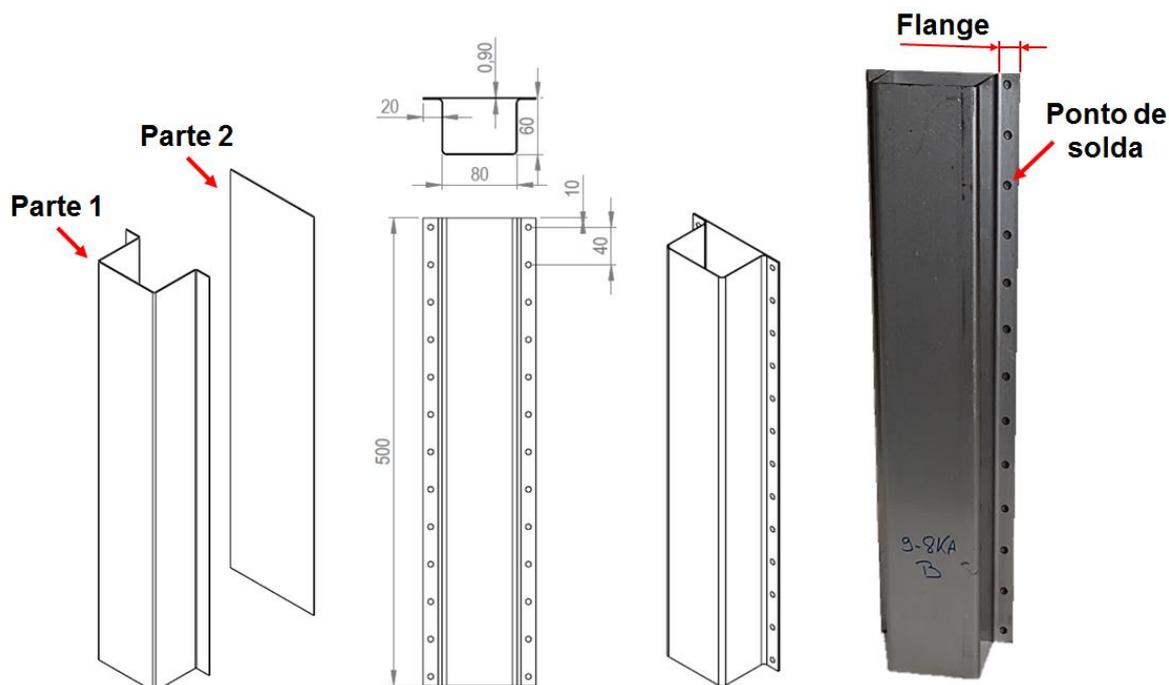


FIGURA 3.17 – Longarina: dimensões, geometria e espaçamento entre pontos de solda (dimensões em mm).

É importante salientar que longarinas com essa seção transversal está presente na maioria dos veículos comercializados no mercado brasileiro.

### 3.3.2.2 Longarinas: combinações de pontos de solda

Dois pontos de solda “A” e “B” com diferentes resistências mecânicas entre si, mas que atendem aos quesitos de qualidade estabelecido pela Norma AWS D8.9M, foram selecionados para construção das longarinas. O intuito foi investigar se a resistência mecânica do ponto de solda influencia a resposta da longarina quanto a desaceleração, a capacidade de absorver energia e a deformação em situação de colisão. A FIG 3.18(a – b) está representando esquematicamente as longarinas soldadas somente com pontos de solda “A” ou somente com pontos de solda “B”, considerando que o ponto de solda “A” tem maior resistência mecânica que o ponto de solda “B”. A FIG 3.18(c – f) está representando esquematicamente as longarinas as quais os pontos de solda “A” e “B” foram combinados sobre elas com o intuito de promover rupturas de pontos de solda e/ou fragilidades que atuem como gatilhos, determinando um caminho de deformação (linhas vermelhas tracejadas). A hipótese admitida foi que, em caso de ruptura de ponto de solda somente os pontos “B” falharão, isto significa que é possível mudar a resposta dinâmica da longarina por meio de combinações de pontos de solda.

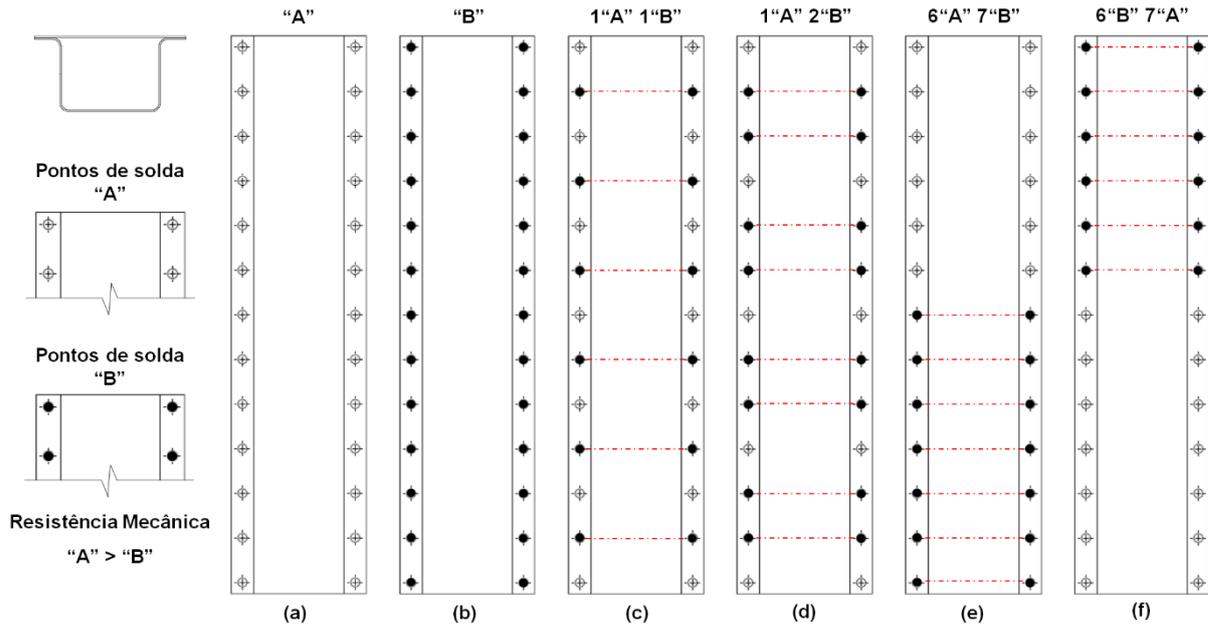


FIGURA 3.18 – Distribuição de pontos de solda com diferentes resistências mecânica: (a) maior resistência mecânica, (b) menor resistência mecânica, (c)(d)(e)(f) combinações de pontos de solda “A” e “B”.

### 3.4 Ensaios experimentais

#### 3.4.1 Condições de soldagem

A condição de soldagem de referência (padrão) utilizada foi obtida seguindo as normas empregadas por montadoras de veículos como a GM, Toyota e Volkswagen. Todas elas usam a mesma condição de soldagem considerando as propriedades mecânicas e espessura do material em estudo. Na TAB. 3.2 está apresentada as condições de soldagem padrão.

TABELA 3.2

Condição de soldagem padrão

Corrente de soldagem [kA]	Tempo de corrente de soldagem [ciclo]	Força do eletrodo [kN]
8,0	9	1,8

Com o intuito de obter uma segunda condição de soldagem que produzisse um ponto de solda com menor resistência mecânica que o ponto de solda produzido com a condição padrão, foram estabelecidas sete condições de soldagem, tendo como referência a condição de soldagem padrão. Considerando que a corrente de soldagem influencia na resistência mecânica do ponto de solda, foram aplicados incrementos de 1 kA em relação a corrente de soldagem padrão, e ainda, foi considerado a influência do tempo passagem de corrente de soldagem na análise, sendo adotado dois tempos 9 ciclos (0,150s) e 20 ciclos (0,333s). Na TAB. 3.3 estão

apresentadas as condições de soldagem preestabelecidas, após a relação dos ensaios mecânicos e análises metalográficas sobre os pontos de solda produzidos por elas, uma será selecionada considerando que o ponto de solda produzido por ela terá a maior diferença de resistência mecânica em relação ao ponto de solda padrão, porém atenderá aos quesitos de qualidade estabelecido pela Norma AWS D8.9M.

TABELA 3.3  
Condições de soldagem

Nº	Corrente de soldagem [kA]	Tempo de corrente de soldagem [ciclo]	Força do eletrodo [kN]
1	6,0	9	1,8
2	7,0		
3 (Padrão)	8,0		
4	9,0		
5	6,0	20	
6	7,0		
7	8,0		
8	9,0		

Na FIG 3.19 estão representados os pontos de solda referente a cada condição de soldagem preestabelecida. Pode-se observar que quanto maior a corrente soldagem maior é o diâmetro do ponto, e quanto maior o tempo de corrente de soldagem, maior é a zona termicamente afetada (ZTA).

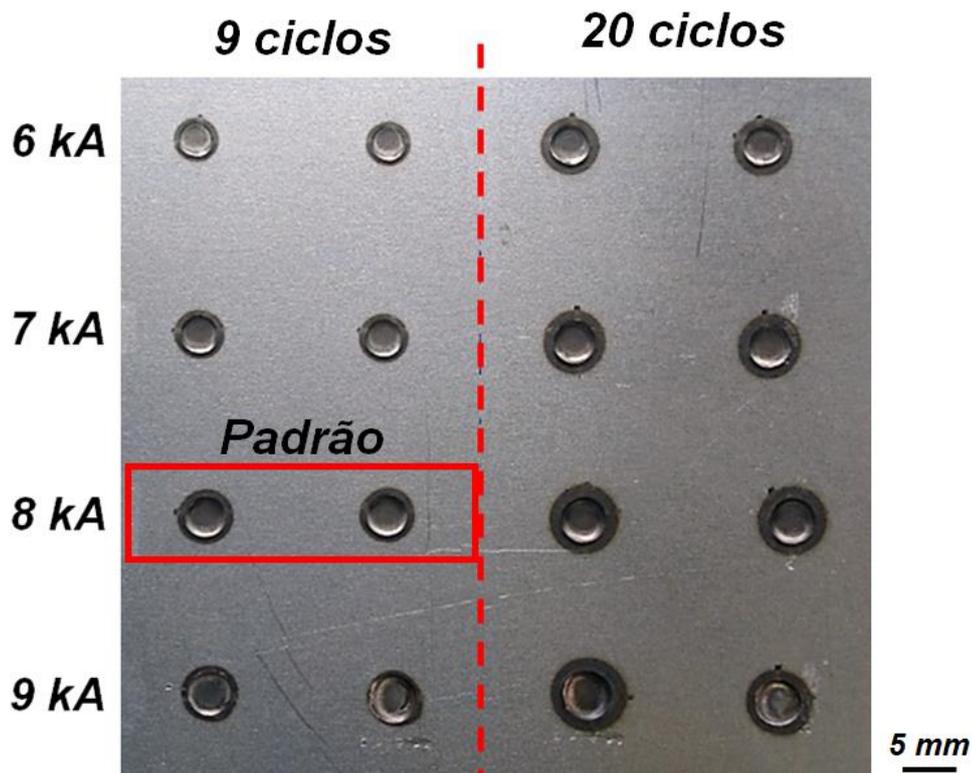


FIGURA 3.19 – Comparação entre pontos de solda produzidos com diferentes condições de soldagem.

### 3.4.2 Ensaio de torção

Para o ensaio de torção do ponto de solda foram consideradas três réplicas para cada condição de soldagem preestabelecidas na TAB. 3.3. A velocidade ( $v$ ) do atuador mecânico foi de 120 mm/min, o que equivale a uma velocidade angular de 0,0177 rad/s (velocidade de torção do ponto de solda). A força foi coletada ao longo do ensaio por meio de uma célula de carga de 2000 N. A FIG 3.20 apresenta a evolução da torção do ponto de solda até sua ruptura.

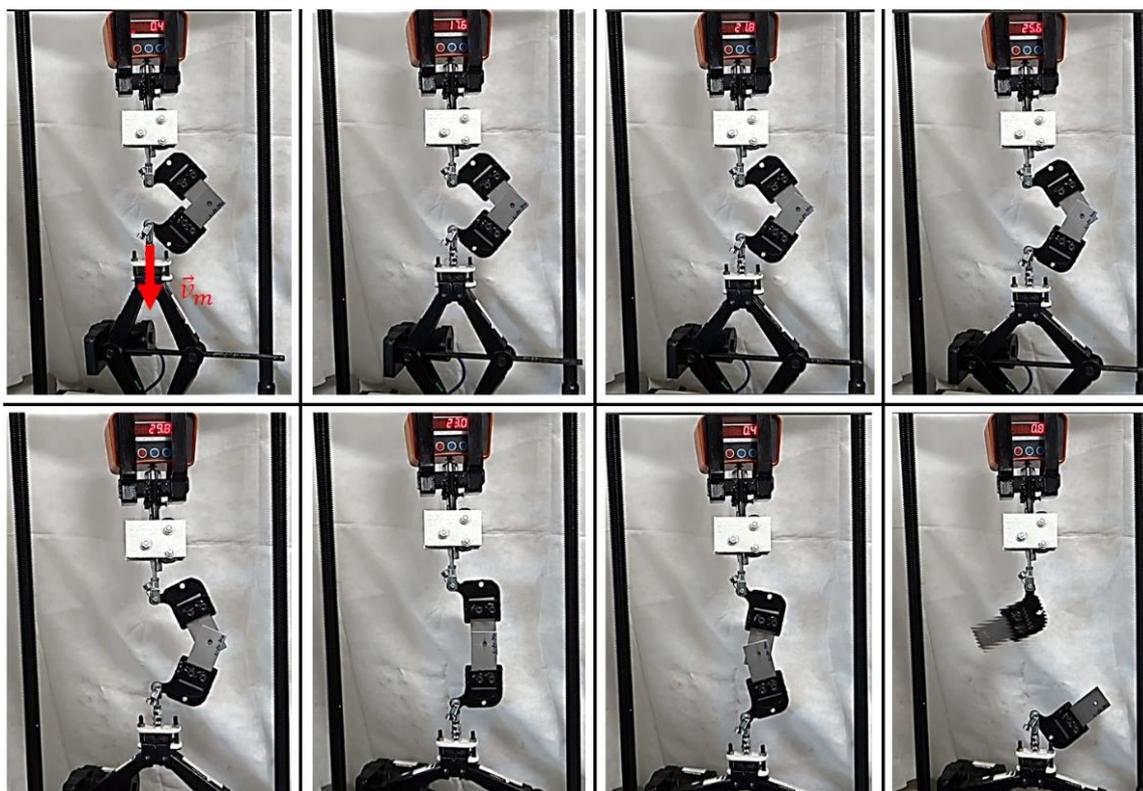


FIGURA 3.20 – Ensaio de torção até a ruptura total do ponto de solda.

### 3.4.3 Ensaio de arrancamento

Para o ensaio de arrancamento foram construídos corpos de prova considerando os parâmetros estabelecidos na TAB. 3.3. Para cada condição de soldagem foram produzidas três réplicas. A velocidade de avanço do travessão da máquina de tração foi de 10 mm/min e uma célula de carga com capacidade para 10 kN. A FIG 3.21 ilustra a evolução da ruptura do ponto de solda no ensaio de arrancamento.

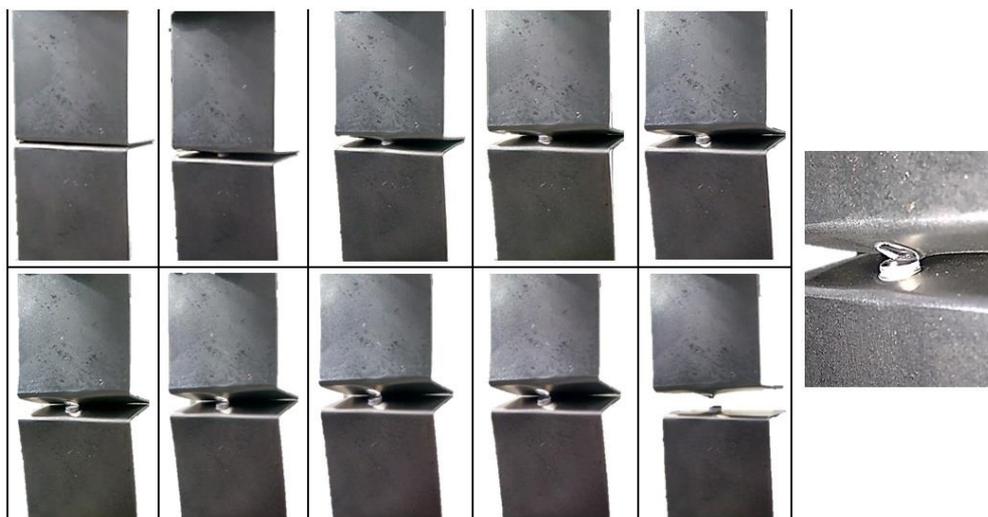


FIGURA 3.21 – Ensaio de arrancamento até a ruptura total do ponto de solda.

#### 3.4.4 Ensaio de colisão

Múltiplas análises foram previstas para esse estudo, para isso, algumas variáveis do ensaio de colisão foram alteradas a fim de criar novas condições que pudessem mudar a resposta da longarina. Essas alterações refletiram na energia de colisão. Isso significa que a energia potencial do martelo de colisão foi alterada em algumas situações pré-determinadas. O intuito destas variações nas condições de ensaio foi avaliar a influência da energia de colisão na torção de pontos de solda em longarinas, e ainda, investigar a frequência de ocorrência de alguns modos de deformação a fim de estabelecer um ou mais padrões, então, determinar suas causas. Longarinas submetidas às mesmas condições de ensaios, porém com condições de soldagem distintas foram comparadas, a fim de avaliar a influência da resistência mecânica do ponto de solda na resposta das longarinas quanto a desaceleração, a capacidade de absorver energia e a deformação. Na TAB. 3.4 estão apresentadas as condições de ensaios estabelecidas. Entende-se como “altura de queda” a distância inicial entre a superfície de colisão (dispositivo guia) e o martelo de colisão.

TABELA 3.4

Condições iniciais para o ensaio de colisão das longarinas

Condições	Massa [kg]	Altura de queda [m]	Energia potencial [kJ]	Velocidade [m/s]
1	107,2	8,5	8,94	12,90
2	100,5	8,0	7,89	12,53
3	81,2	8,0	6,39	12,53
4	67,2	5,0	3,30	9,90

Na FIG 3.22 estão representados os ensaios de colisão no instante final da deformação de cada longarina, considerando as condições pré-estabelecidas na TAB. 3.4.

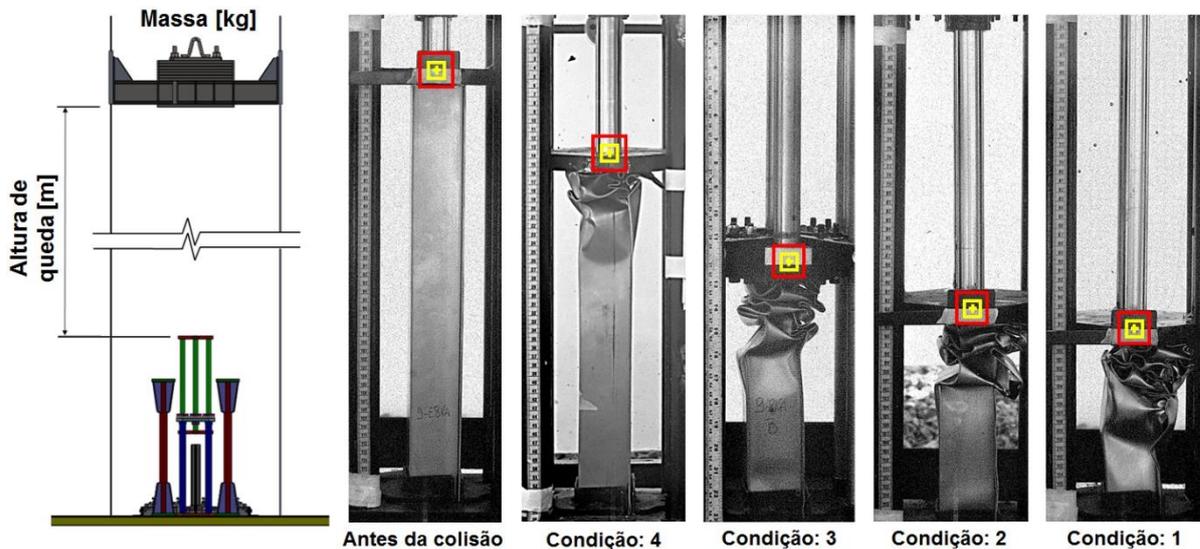


FIGURA 3.22 - Deformação final das longarinas após serem submetida a diferentes condições de ensaios.

Nas condições de ensaios 1, 2, e 4 (TAB. 3.4) as longarinas foram soldadas com a condição de 9ciclos/8kA (padrão), para cada condição foram realizadas três réplicas. O propósito foi observar a ocorrência de torção de pontos de solda e identificar padrões de deformação foram feitas três réplicas. Na condição 3 de ensaio (TAB. 3.4), foram ensaiadas as longarinas construídas com as condições de soldagem que produziram os pontos de solda “A” e “B” (FIG 3.18) maior e menor resistência mecânica, respectivamente. Para cada condição de soldagem foram realizadas três réplicas, exceto, as longarinas representadas pela FIG 3.18(a) as quais foram realizadas quatro réplicas.

A variação de energia potencial foi determinada considerando uma energia relativamente baixa (condição 4), uma intermediária (condição 3) e outras duas altas (condições 1 e 2), conforme TAB. 3.4. Entre as condições 1 e 2, optou-se por dar um pequeno incremento de energia a fim avaliar se o comportamento entre as longarinas mudaria significativamente mesmo com uma pequena diferença de energia. O alvo destacado no dispositivo “guia” mostrado na FIG 3.22, indica o ponto que foi monitorado pela câmera de alta velocidade.

Para que as informações de deslocamento, velocidade e aceleração pudessem ser coletadas, um sistema de referência teve de ser introduzido ao dispositivo “guia”. Este sistema foi estabelecido por uma régua de medição e um alvo acoplado a parte móvel do dispositivo. A régua tem a função de escala, uma vez que o “software” da câmera faz uma correlação com

resolução adotada na filmagem e o alvo, o qual será monitorado quadro a quadro em função do tempo. Na FIG 3.23 está ilustrado o sistema de referência.

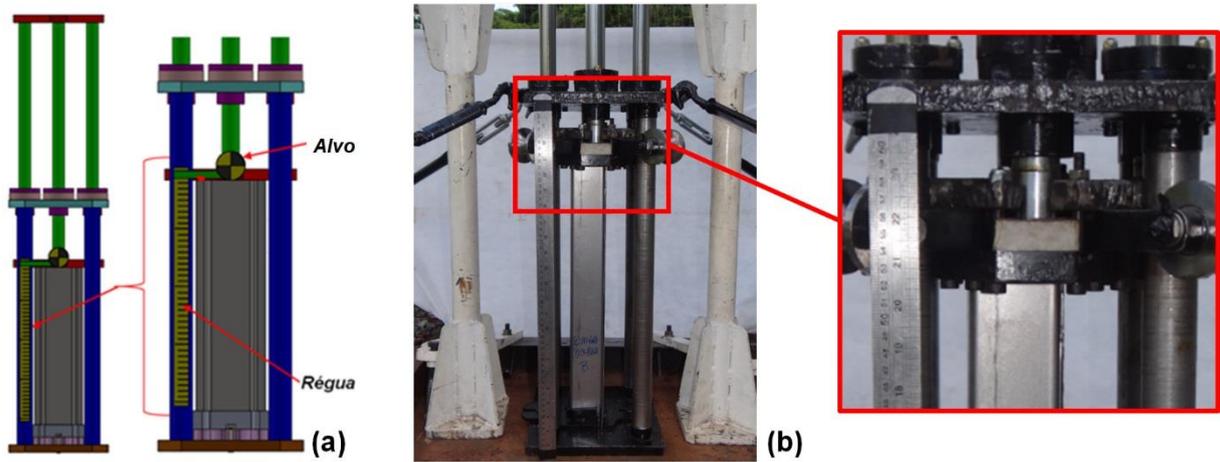


FIGURA 3.23 – Sistema de referência da câmera de alta velocidade: (a) desenho esquemático e (b) detalhe.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Caracterização dos pontos de solda

#### 4.1.1 Análises macroscópicas

De acordo com norma AWS D8.9M, uma das maneiras de se avaliar a qualidade da solda é submeter corpos de prova a ensaios mecânicos. Neste estudo, o intuito foi identificar um ponto de solda, cujo o desempenho fosse diferente do ponto de solda “padrão”, e para isto, procurou-se identificar características e comportamentos divergentes, mas que atendessem os critérios da norma de qualidade. Tendo em vista isto, foram realizados ensaios de arrancamento e torção sobre os pontos de solda, nos quais a solda é considerada aprovada quando pelo menos uma das chapas soldadas apresentam um “furo” (fratura em botão) após realização do ensaio. A FIG 4.1 ilustra a principal divergência identificada entre os pontos de solda após os ensaios de torção e arrancamento, uma vez que para as mesmas condições de soldagem não foi observado fratura em botão do ponto de solda no ensaio torção, no entanto, houve fratura em botão do ponto de solda no ensaio de arrancamento.

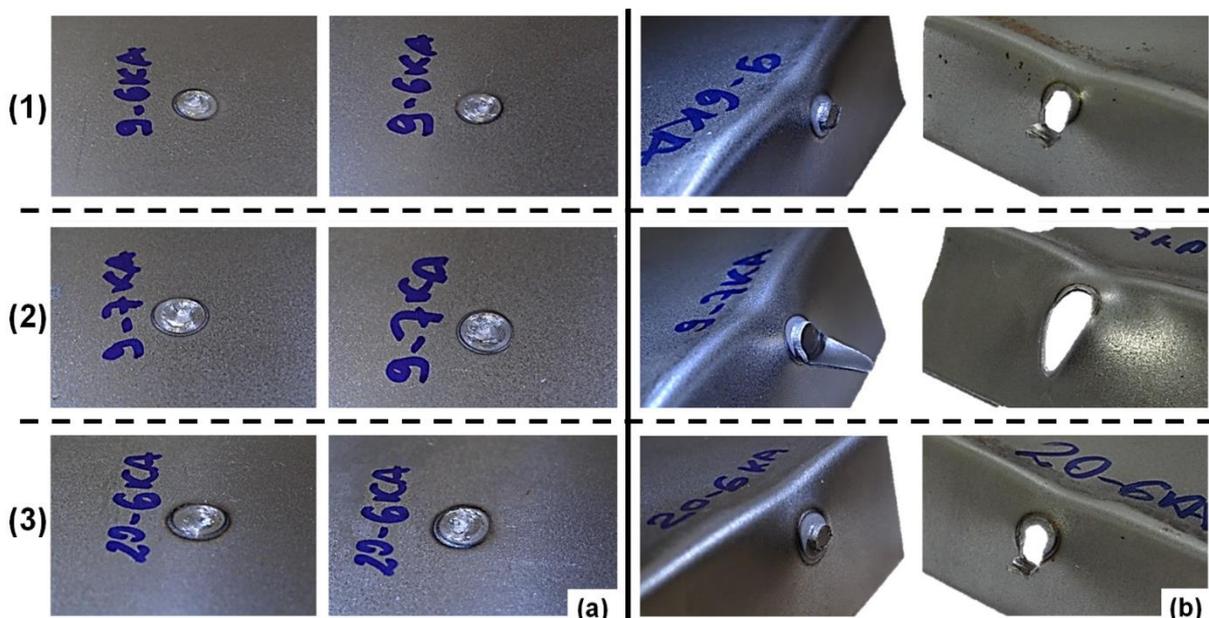


FIGURA 4.1 - (a) Ensaio de torção, ausência de fratura em botão; (b) Ensaio de arrancamento, presença de fratura em botão. Para pontos de solda produzidos com as condições de soldagem: (1) 9ciclos/6kA, (2) 9ciclos/7kA e (3) 20ciclos/6kA.

Segundo a Norma ISO 17653 os pontos de solda produzidos com as condições de soldagem de 9ciclos/6kA, 9ciclos/7kA e 20ciclos/6kA são considerados “reprovados” no teste de torção, uma vez que estas amostras não apresentaram “fratura em botão”, isto é, nestas amostras não foi possível medir o diâmetro do botão de solda, após os testes. Porém pontos de solda produzidos com estas mesmas condições de soldagem, foram considerados “aprovados”, uma vez que apresentaram “fratura em botão” após o teste de arrancamento. Na FIG 4.2 estão representadas imagens macroscópicas dos pontos de solda que foram rejeitados no ensaio de torção. Além deles, é mostrado o ponto de solda “padrão” (9 ciclos / 8kA) o qual foi considerado “aprovado” tanto no ensaio de torção quanto arrancamento, uma vez que em ambos os testes o resultado foi “fratura em botão”. Observa-se que as lentes de solda representadas na FIG 4.2(a)(b) têm a zona de fundida delimitada por uma linha tracejada vermelha, além desta, tem-se uma linha tracejada azul que delimita uma região externa a zona fundida a qual os grãos estão alongados, característicos de zonas fundidas, isto, sugere que a energia (efeito Joule) para a formação destes pontos foi insuficiente. Em relação à qualidade da solda, de acordo com as normas dos fabricantes de automóveis, estes pontos de solda são considerados "reprovados" (TAB. 4.1), uma vez que o diâmetro da lente de solda não poderia ser inferior a 3,8 mm (WAN et al., 2014). No entanto, em uma inspeção de rotina de linha de produção, onde apenas um ensaio mecânico é realizado para controle de qualidade, possivelmente esses pontos seriam considerados "aprovados", já que o teste comumente utilizado é o ensaio de arrancamento, em que o ponto de solda para ser considerado “aprovado” deve apresentar “fratura em botão” e o botão de solda não pode ter diâmetro menor que 3,8 mm no caso deste trabalho.

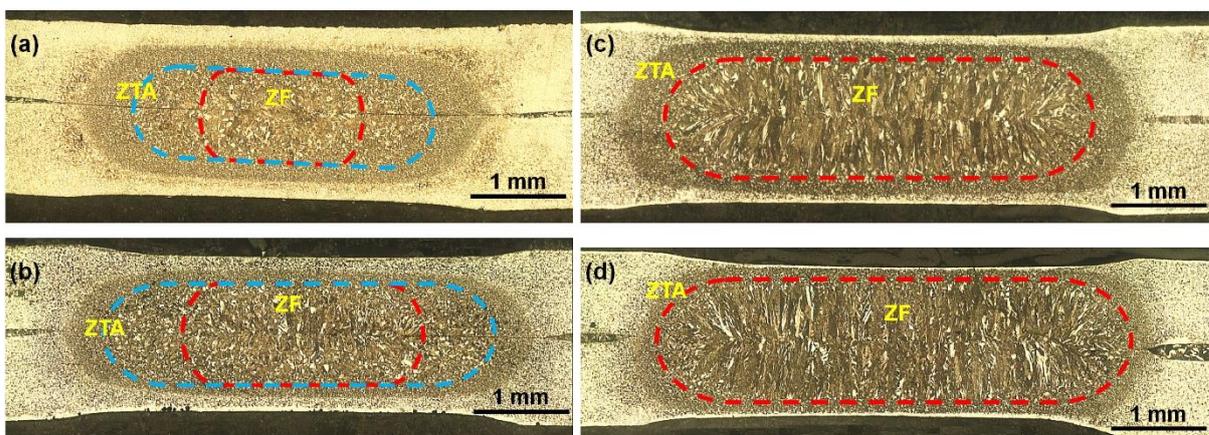


FIGURA 4.2 – Análise macroscópica: (a) 9ciclos/6kA; (b) 9ciclos/7kA; (c) 20ciclos/6kA e (d) 9ciclos/8kA.

Quanto aos pontos de solda produzidos com as condições de 20ciclos/6kA e 9ciclos/8kA, estes foram considerados “aprovados”, uma vez que os diâmetros das lentes de

solda atenderam aos padrões (TAB. 4.1), porém tiveram diâmetros distintos, uma vez que a condição “padrão” (9ciclos/8kA) apresentou diâmetro de lente de solda maior que o ponto de solda produzido com a condição de soldagem de 20ciclos/6kA. Ressalta-se que, o ponto de solda produzido com o parâmetro 20ciclos/6kA foi considerado “aprovado”, porém, os resultados do ensaio de torção mostraram que ele deve ser considerado “reprovado” por não ter tido “fratura em botão”. Este antagonismo foi uma das razões que justificou a escolha dessa condição de soldagem para produção das longarinas. Acredita-se que essa divergência irá refletir na resposta das longarinas submetidas a colisão, garantindo a ruptura do ponto de solda quando for desejado.

TABELA 4.1

Dimensões da lente de solda e ZTA (a) 9ciclos/6kA; (b) 9ciclos/7kA; (c) 20ciclos/6kA e (d) 9ciclos/8kA.

<b>Parâmetros</b>	<b>Diâmetro da lente de solda [mm]</b>	<b>Diâmetro da ZTA [mm]</b>
9ciclos/6kA	2,00	4,70
9ciclos/7kA	2,66	5,10
20ciclos/6kA	4,10	5,14
9ciclos/8kA	5,00	5,50

A FIG 4.3 está apresentando os diâmetros médio dos botões de solda após os ensaios de torção e arrancamento. Estes resultados foram obtidos considerando a média entre os diâmetros transversais e longitudinais dos pontos de solda de todas as condições de soldagem estudadas neste trabalho. Foi observado que para este aço ABNT/SAE 1006 e espessura de 0,9 mm, independente das condições de soldagem preestabelecidas (TAB. 3.3) os pontos de solda que tiveram o diâmetro do botão de solda acima de 5,4 mm após o ensaio de arrancamento, estes foram considerados “aprovados” no ensaio de torção, isto é, apresentaram “fratura em botão”. Este resultado sugere que é possível correlacionar arrancamento e torção de pontos por meio do diâmetro do botão de solda.

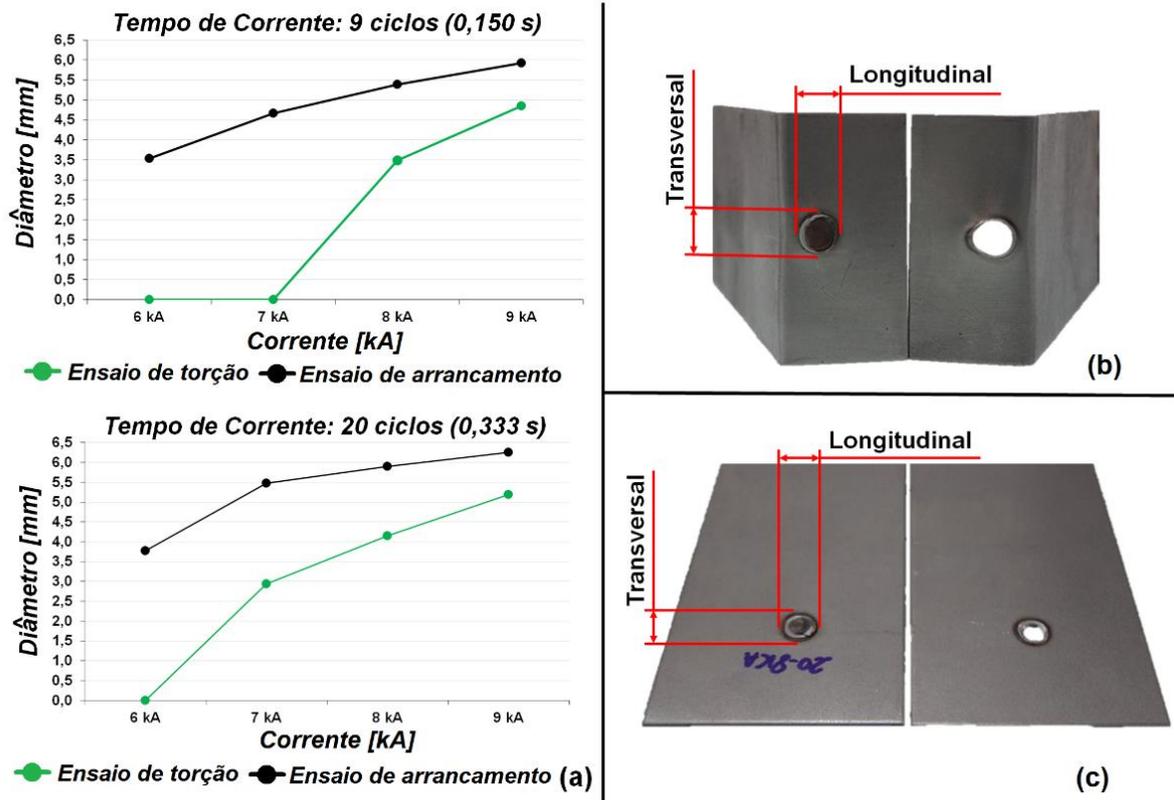


FIGURA 4.3 - (a) Diâmetro médio do ponto de solda após ruptura; (b) ensaio de arrancamento; (c) ensaio de torção.

Na FIG 4.4 estão apresentadas as imagens macroscópicas, as rupturas dos pontos de solda produzidas com os parâmetros 9ciclos/8kA e 20ciclos/6kA, após os ensaios de torção e arrancamento. Na FIG 4.4(a) (superior) está representada a ruptura do ponto referente ao ensaio de arrancamento o qual ocorreu fora zona termicamente afetada. Este resultado sugere que o metal de base possui menor resistência mecânica do que a solda por pontos para essa aplicação, e que as tensões mecânicas oriundas do ensaio de arrancamento, concentram-se no entorno do ponto solicitando o metal de base (chapa). Ainda nesta imagem, observa-se a estricção da chapa inferior (destacada por setas), o que comprova a solicitação do metal de base. No ensaio de torção (FIG 4.4(a) (inferior)) as tensões não causaram o escoamento do metal de base, e a geometria da lente de solda após a fratura (oblíquo), sugere que o metal localizado na ZTA foi conformado pela força de torção. Na FIG 4.4(b) (superior) está representada o início da ruptura do ponto de solda na zona fundida, referindo-se ao ensaio de arrancamento. Acredita-se que a área da ZTA tenha contribuído para este resultado, uma vez que esta área é maior em pontos soldados com os parâmetros 20ciclos/6kA. Além disso, tem o fato de que o diâmetro da lente de solda ser pouco menor (TAB. 4.1). Na FIG 4.4(b) (inferior) tem-se o ponto de solda submetido ao ensaio de torção, as setas destacam o sentido da torção (sentido anti-horário).

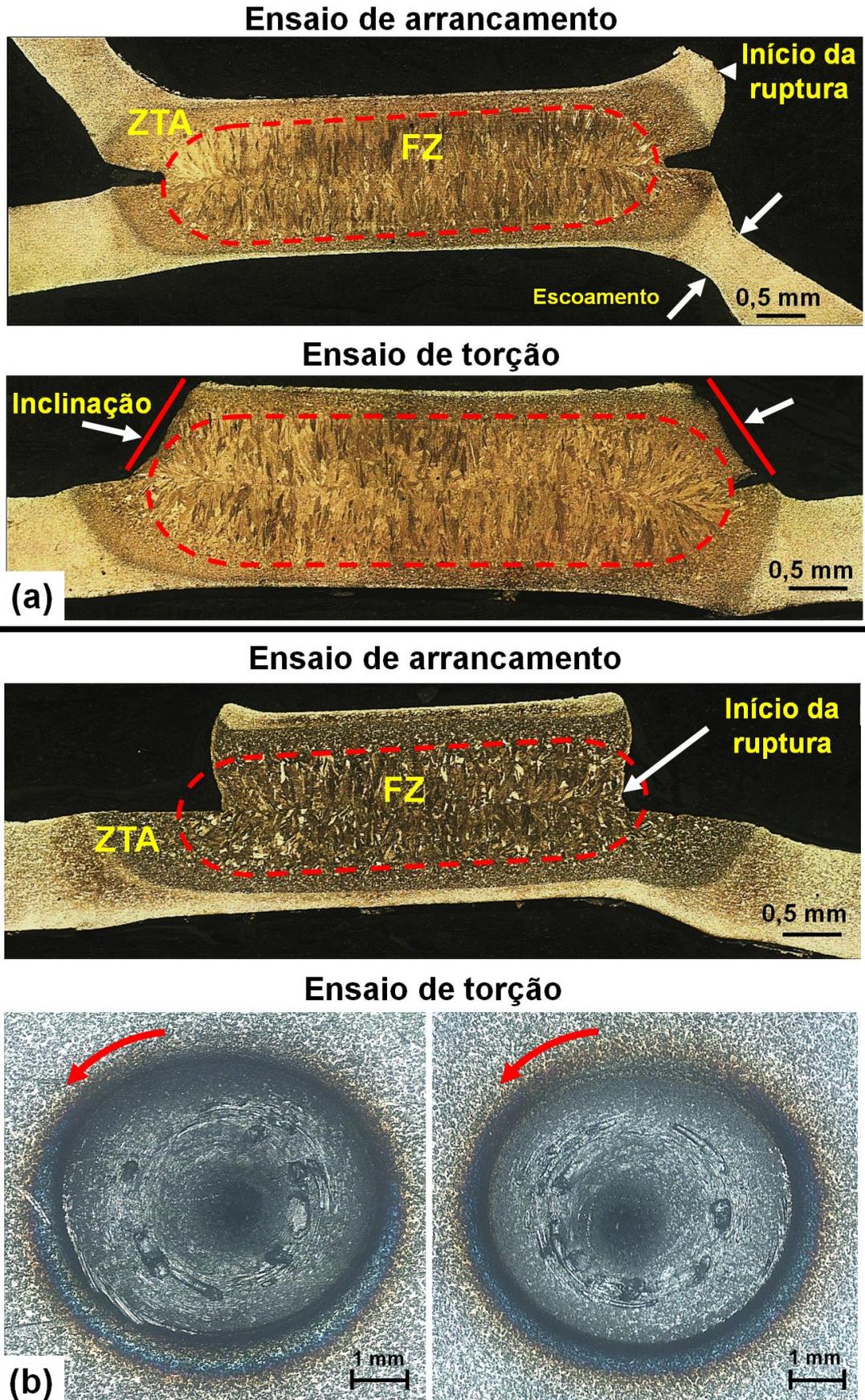


FIGURA 4.4 – Análise macroscópica da fratura do ponto de solda: (a) 9ciclos/8kA; (b) 20ciclos/6kA.

Segundo as definições descritas por Courtney (2005) e Cetlin e Silva (1988) referentes aos mecanismos de fratura, os resultados obtidos neste trabalho mostrou que a fratura do ponto de solda relacionada ao ensaio de torção ocorreu de acordo com o modo II (escorregamento ou cisalhamento) e modo III (torção ou rasgamento) de carregamento, e a fratura é do tipo dúctil. A combinação desses dois carregamentos resultou em uma ruptura no acúmulo e conformação de material sobre a lente de solda (FIG 4.5(a)), após a separação das chapas observou-se que a chapa com “furo” teve perda de material e a lente de solda ficou com uma aparência lisa, resultado da conformação plástica. Esse somatório de fatores resulta em um grande gasto de energia para ruptura do ponto. No ensaio de arrancamento a fratura do ponto de solda ocorre segundo o modo I (tração) e modo III (rasgamento) de carregamento, e a fratura é dúctil. No modo I de carregamento, tem-se a nucleação da trinca a qual consome muita energia, foi observado deformação plástica macroscópica. No modo III de carregamento, ocorreu a propagação da trinca, nesta etapa a energia é a menor observada, visto que a espessura da chapa era pequena, e conseqüentemente, a área à frente da trinca também era muito pequena, por isso, o gasto energético para ruptura foi menor (FIG 4.5(b)).

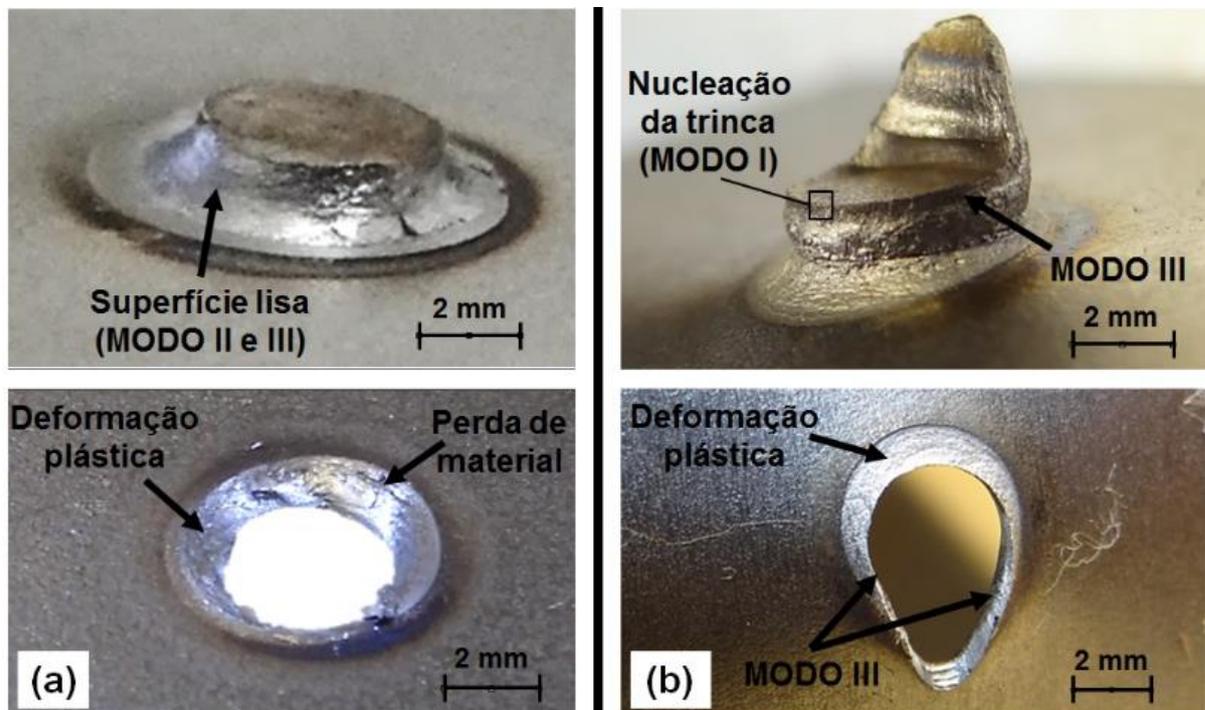


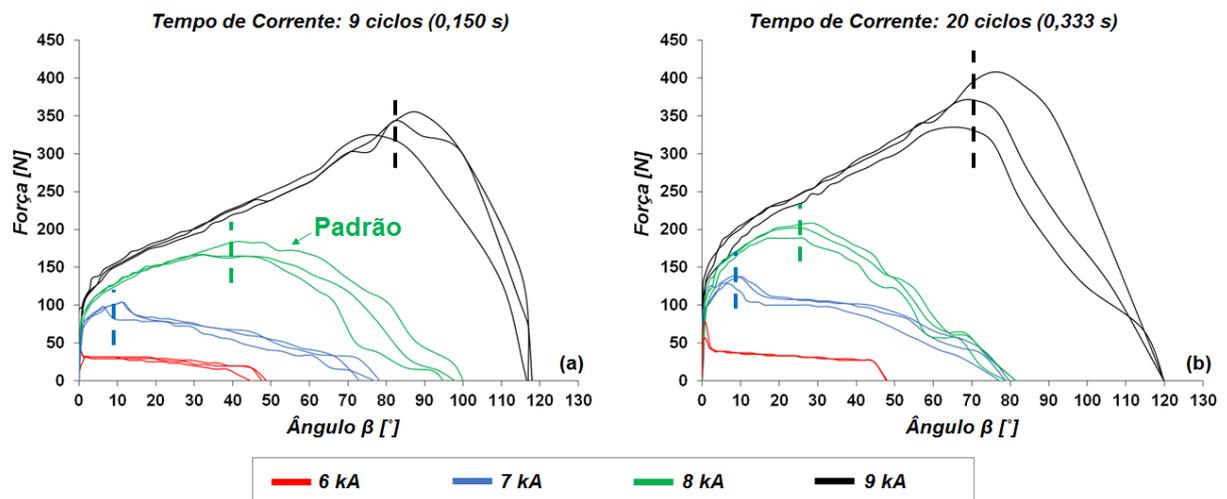
FIGURA 4.5 – Fratura dos pontos de solda após ensaios (a) torção e (b) arrancamento.

Em suma, na análise macroscópica, foi evidenciado que o ensaio de torção concentra os esforços na lente de solda, enquanto que o ensaio de arrancamento concentra parte dos esforços nas chapas (metal de base), as quais compõem o corpo de prova. Por isso, pode-se

dizer que o ensaio de torção é mais severo para a lente de solda do que o ensaio de arrancamento.

#### 4.1.2. Ensaio de torção

Na FIG 4.6 está representado a variação de carga do ensaio de torção em função do ângulo de torção ( $\beta = \alpha - 90^\circ$ , FIG 4.7). Nela, as linhas tracejadas indicam a carga máxima suportada pelos pontos de solda, assim, estes resultados sugerem que a intensidade da corrente de soldagem tem maior influência sobre a resistência mecânica. Todavia, o tempo de corrente de soldagem influencia o ângulo de torção referente ao limite de resistência, uma vez que os resultados indicam que pontos de solda produzidos com o tempo de corrente de 9 ciclos, apresentaram maiores ângulos de torção do que pontos produzidos com o tempo de corrente de 20 ciclos, comparando-os com à mesma intensidade de corrente. Acredita-se que essa diferença está relacionada ao diâmetro da lente de solda e a microestrutura, uma vez que pontos de solda produzidos com o tempo de corrente de 20 ciclos, apresentaram diâmetros de lente de solda maiores que pontos produzidos com o tempo de corrente de 9 ciclos, por isso tenderam a ter maior resistência mecânica, apesar de estatisticamente não ter havido diferenças significativas. Em relação a estrutura macroscópica, pontos de solda que apresentaram maior área de ZTA, neste caso foram os pontos de solda produzidos com o tempo de corrente de 20 ciclos, tiveram menor ângulo de torção referente ao limite de resistência mecânica.



\* Linhas tracejadas indicam limite de resistência dos pontos de solda

FIGURA 4.6 – Curva força-ângulo de torção (ensaio de torção): (a) 9 ciclos; (b) 20 ciclos.

Na FIG 4.7 está representado o desenho esquemático do corpo de prova posicionado sobre as garras. Nela, uma projeção em forma de triângulo está representando a direção da força

e do ponto de solda durante o ensaio de torção. Por meio desta, é possível calcular o torque em função de  $\beta$ , uma vez que  $\Delta d$  representa o braço de alavanca variável em relação a força.

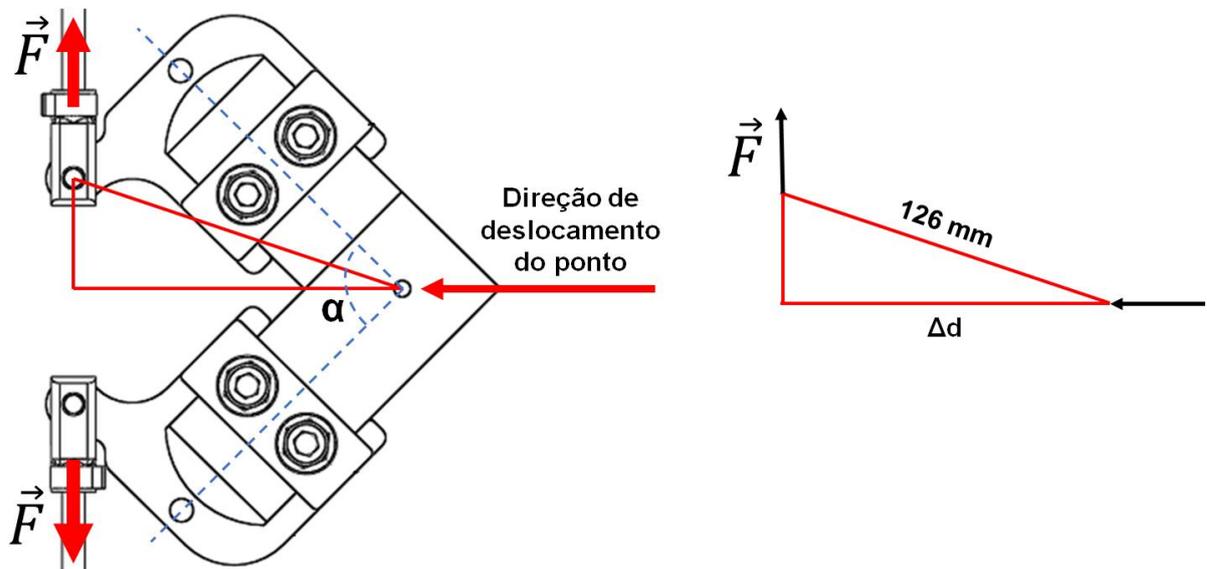


FIGURA 4.7 – Desenho esquemático do ensaio de torção: cálculo da energia.

Na FIG 4.8 está representada a energia total gasta para ruptura total dos pontos de soldas em relação aos parâmetros de soldagem estabelecidos. Esta energia foi calculada por meio da curva de torque em função do ângulo de torção (em radianos), na qual a área abaixo desta curva representa a energia absorvida pelo ponto de solda durante o ensaio. Então, a partir da análise comparativa entre as curvas de energia, evidenciou-se que há diferenças entre os pontos de solda com condições de soldagem distintos, assim como observado na análise anterior sobre as curvas de força em função do ângulo de torção  $\beta$  (FIG 4.7). Ainda na FIG 4.8, as linhas tracejadas representam a energia absorvida equivalente a carga máxima suportada pelo ponto de solda.

Na FIG 4.9 está representada a energia total média correspondente as curvas, as quais confirmar a hipótese de que a condição de soldagem tem influência sobre a energia de ruptura do ponto de solda, para isso, foi realizada a análise da variância ou Anova, com nível de significância de 0,05 para verificar se pelos menos uma condição de soldagem produz pontos de solda que se difere das demais. O resultado dessa análise confirmou que há pelo menos uma condição de soldagem que difere dos demais. Então, realizou-se o teste de Tukey em que foram feitas combinações dois a dois, comparando os parâmetros estudados. Os resultados desta análise, evidenciaram que há diferenças significativas em relação a resistência mecânica do ponto com a variação do parâmetro de soldagem, mas, entre todas as comparações realizadas,

duas não apresentaram diferenças significativas, estas são representadas pelos pares de pontos de solda produzidos com os parâmetros de 9ciclos/6kA e 20ciclos/6kA, e também, os parâmetros 9ciclos/8kA e 20ciclos/8kA.

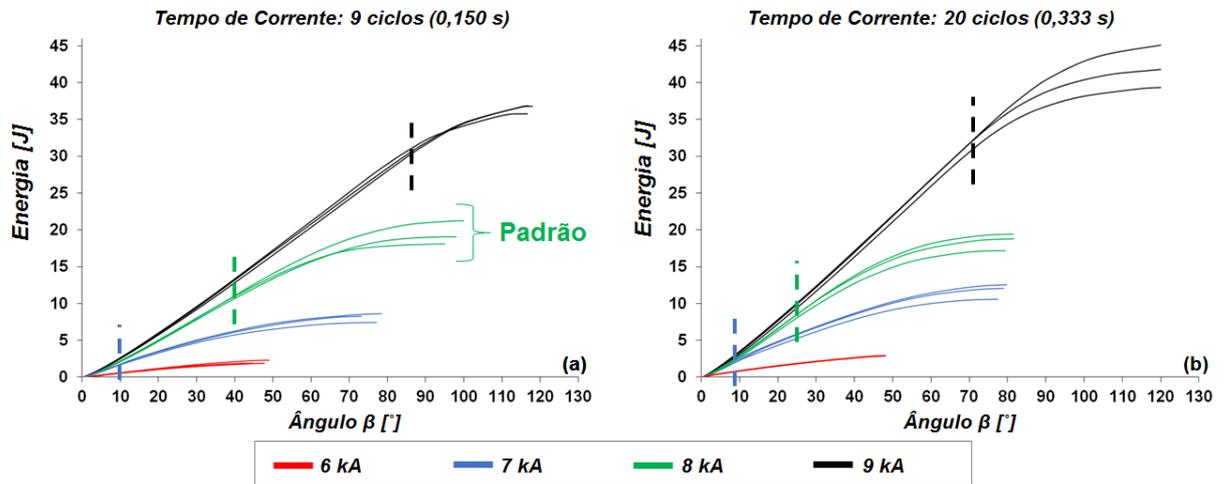


FIGURA 4.8 - Curva energia-ângulo de torção (ensaio de torção): (a) 9 ciclos; (b) 20 ciclos.

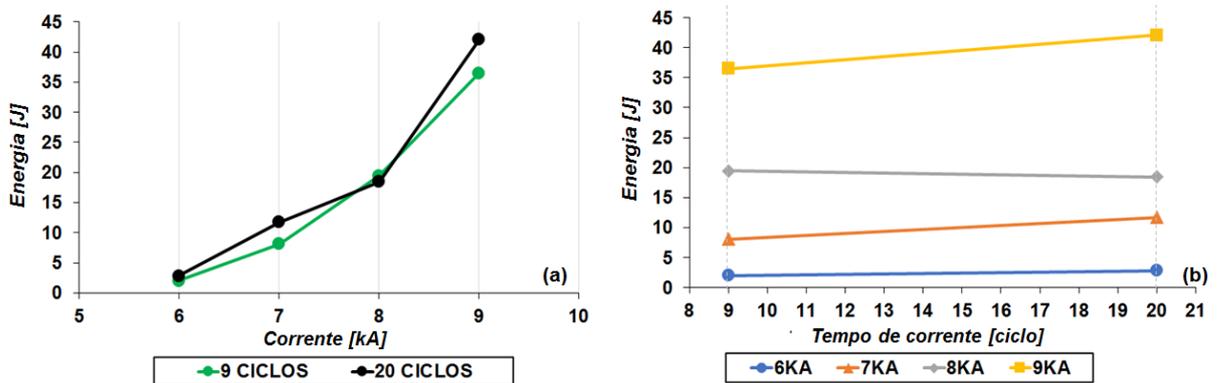


FIGURA 4.9 – Energia torcional média: (a) tempo de corrente; (b) corrente de soldagem.

A análise estatística, também, mostrou que a corrente de soldagem interfere diretamente na resistência do ponto de solda, assim como, o tempo de corrente (Anexo C).

A sensibilidade da máquina de torção foi satisfatória, uma vez que foi possível perceber a diferença de resistência mecânica dos pontos de solda para diferentes parâmetros soldagem.

#### 4.1.3. Ensaio de arrancamento

Na FIG 4.10 estão representadas as curvas de força em função do deslocamento referentes ao ensaio de arrancamento de pontos de solda produzidos com diferentes parâmetros de soldagem. Estes resultados sugerem que a diferença em relação a resistência mecânica dos pontos produzidos com diferentes condições de soldagem foi pequena, uma vez que as curvas de força relativas ao tempo de corrente de 9 ciclos, apresentaram comportamento e valores muito próximos. Para o tempo de corrente de 20 ciclos foi observada somente uma discrepância em relação do grupo representado pelos pontos de solda produzidos com a corrente de soldagem de 9kA, os quais tiveram uns valores de força menores que os outros grupos. Numa análise geral, acredita-se que essa diferença pequena entre os grupos está diretamente relacionada ao modo de carregamento mencionado na Seção 4.1.1, uma vez que o ensaio de arrancamento transfere parte da força para as chapas (metal de base), isto é, o material no entorno do ponto de solda está sujeita a grandes esforços. A priori, não foi possível identificar porque o parâmetro de soldagem 20ciclos/9kA se diferenciou significativamente dos outros grupos estudados, acredita-se que a ZTA tenha influenciado neste resultado, uma vez que entre todos os parâmetros estudados esse foi o que teve maior área de afetada pelo calor. Em relação ao deslocamento referente ao limite de resistência do ponto de solda, os resultados sugerem que o diâmetro do ponto de solda tem influência sobre ele, uma vez que pontos produzidos com o tempo de corrente de 20 ciclos os quais apresentaram diâmetros de lentes de solda maiores, tendem a si deformarem mais até atingir o limite de resistência mecânica.

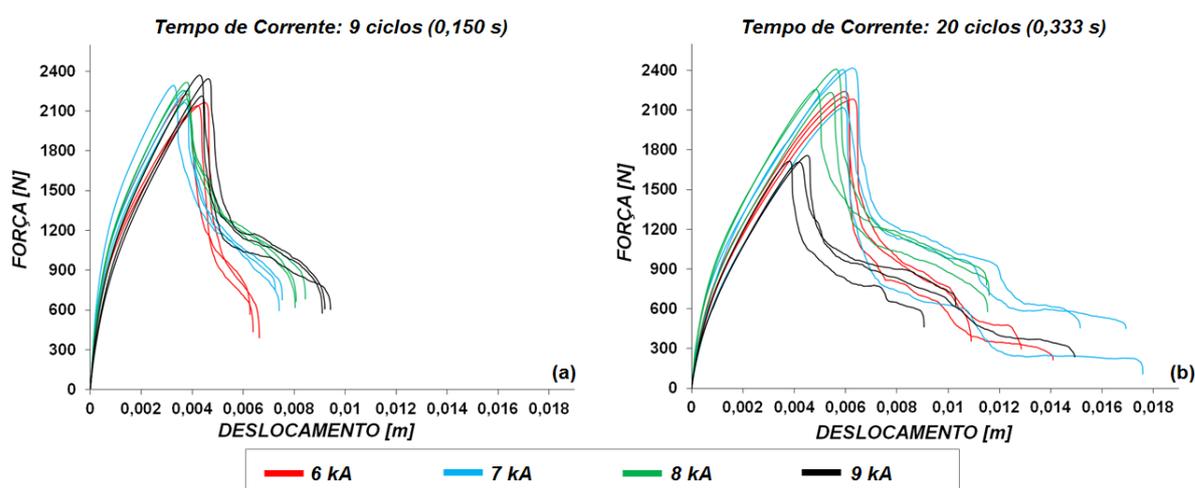


FIGURA 4.10 - Curva de força-deslocamento (ensaio de arrancamento): (a) 9 ciclos; (b) 20 ciclos.

Na FIG 4.11 estão representadas curvas referentes a energia absorvida pelos pontos de solda no ensaio de arrancamento, para os diferentes parâmetros de soldagem estabelecidos. Foi realizada uma análise comparativa entre os resultados de energia absorvida a fim de avaliar

se a corrente de soldagem e o tempo de soldagem influenciam na resistência do ponto de solda. Os resultados do ensaio de arrancamento sugerem que as médias e as variâncias da energia total absorvida pelos grupos de pontos de solda referentes ao tempo de corrente de 9 ciclos, são semelhantes, isto significa que as resistências mecânicas dos pontos são muito próximas. Apesar de uma maior dispersão nos resultados, as médias entre os grupos de pontos de solda produzidos com o tempo de corrente de 20 ciclos, também apresentaram diferenças pequenas entre as médias. Estes resultados indicam que o ensaio de arrancamento não é um bom teste para caracterizar a resistência mecânica do ponto de solda. O Anexo C mostra a análise da variância que confirmam essas considerações.

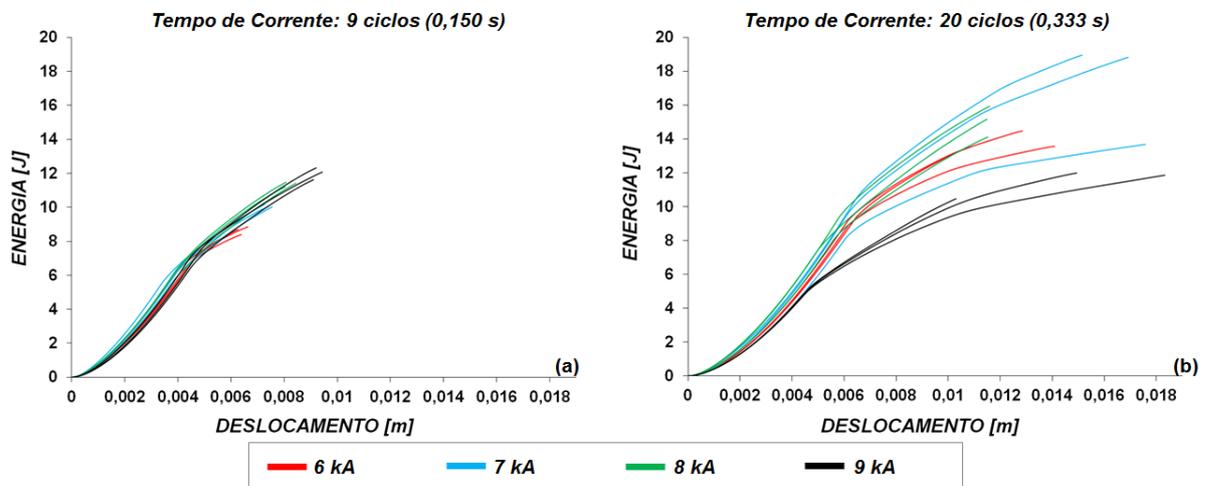


FIGURA 4.11 - Curva de energia-deslocamento (ensaio de arrancamento): (a) 9 ciclos; (b) 20 ciclos.

Na FIG 4.12 está representada a energia média necessária para ruptura do ponto de solda no ensaio de arrancamento. Aplicando o método estatístico Anova, com nível de significância de 0,05, foi possível evidenciar que a corrente de soldagem interfere diretamente na resistência mecânica do ponto de solda, assim como, o tempo de corrente. Apesar de ter tido diferenças significativas no resultado, considerando o fator tempo de corrente de 9 ciclos, foi evidenciado que grupos de pontos de solda produzidos com o tempo de corrente de 20 ciclos, não apresentaram diferenças significativas entre si em relação a resistência mecânica, exceto na comparação dos parâmetros de soldagem de 20ciclos/7kA e 20ciclos/9kA que apresentaram diferenças significativas. Apesar de estatisticamente haver diferenças entre os grupos de pontos de solda produzidos com o tempo de corrente de 9 ciclos, observa-se que as diferenças são relativamente pequenas quando comparados aos resultados obtidos no ensaio de torção.

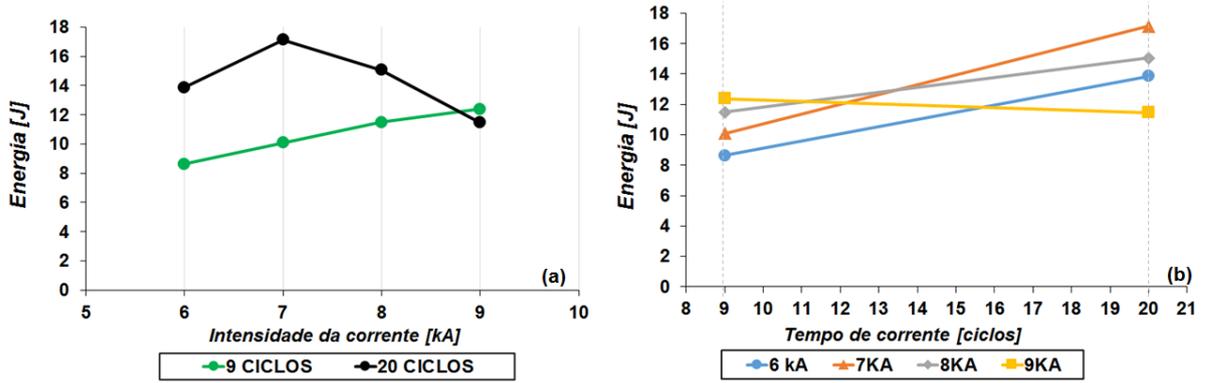


FIGURA 4.12 – Energia de arrancamento média: (a) tempo de corrente; (b) corrente de soldagem.

4.1.4. Análise comparativa entre ensaio de torção e arrancamento

A FIG 4.13 comparam os ensaios de torção e de arrancamento em relação a energia absorvida pelos pontos de solda produzidos com diferentes condições de soldagem. Observa-se que a inclinação das retas entre uma condição de soldagem e outra para o ensaio de torção é maior que a inclinação das retas referentes ao ensaio de arrancamento. Isto evidencia que a variação dos resultados de absorção de energia em relação a ruptura total do ponto de solda entre uma condição de soldagem e outra é maior no ensaio de torção do que no ensaio de arrancamento. As médias no ensaio de arrancamento estão muito próximas, apesar de estatisticamente algumas serem diferentes. Estes resultados sugerem que o ensaio de torção é significativo, uma vez que não deixa dúvidas em relação a resistência mecânica de pontos de solda quando comparado a um outro que foi produzido com condição de soldagem diferente.

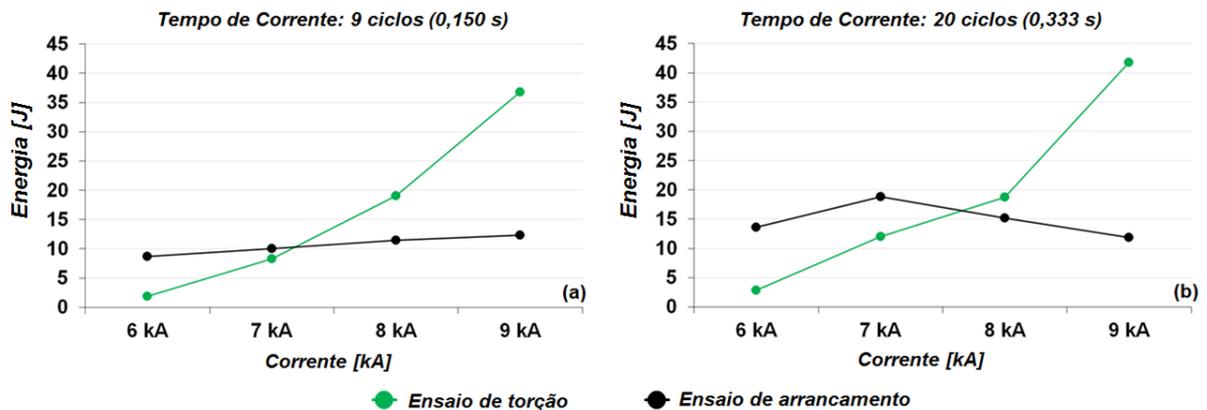


FIGURA 4.13 – Comparativo de energia der ruptura do ponto de solda entre o ensaio de torção e arrancamento.

## 4.2. Modos de ruptura do ponto de solda na longarina

Na FIG 4.14 estão destacadas as deformações que resultaram na torção de um ponto de solda de longarinas submetidas ao teste colisão, considerando as condições 1, 2, 3 e 4 da TAB. 3.4. Na FIG 4.14(a) são mostrados dois pontos de solda que sofreram torção. O ponto torcido mostrado no centro desta imagem está projetando um triângulo com linhas tracejadas, esse foi obtido tendo o centro do ponto de solda e a defasagem das arestas dos flanges (parte 1 e parte 2, FIG 3.17) como vértices, visto que estas arestas deveriam estar paralelas. Essa análise confirma a torção do ponto de solda, além disso, possibilita o cálculo do ângulo de torção. É importante frisar que todas longarinas testadas apresentaram torção de pelo menos um ponto de solda. Ademais, foi observado torção de pontos de solda com ângulos muito pequenos, no entanto, não foi possível quantificá-los. A FIG 4.14(b-d) confirmam a evidencia de pontos de solda torcidos nas longarinas ensaiadas.

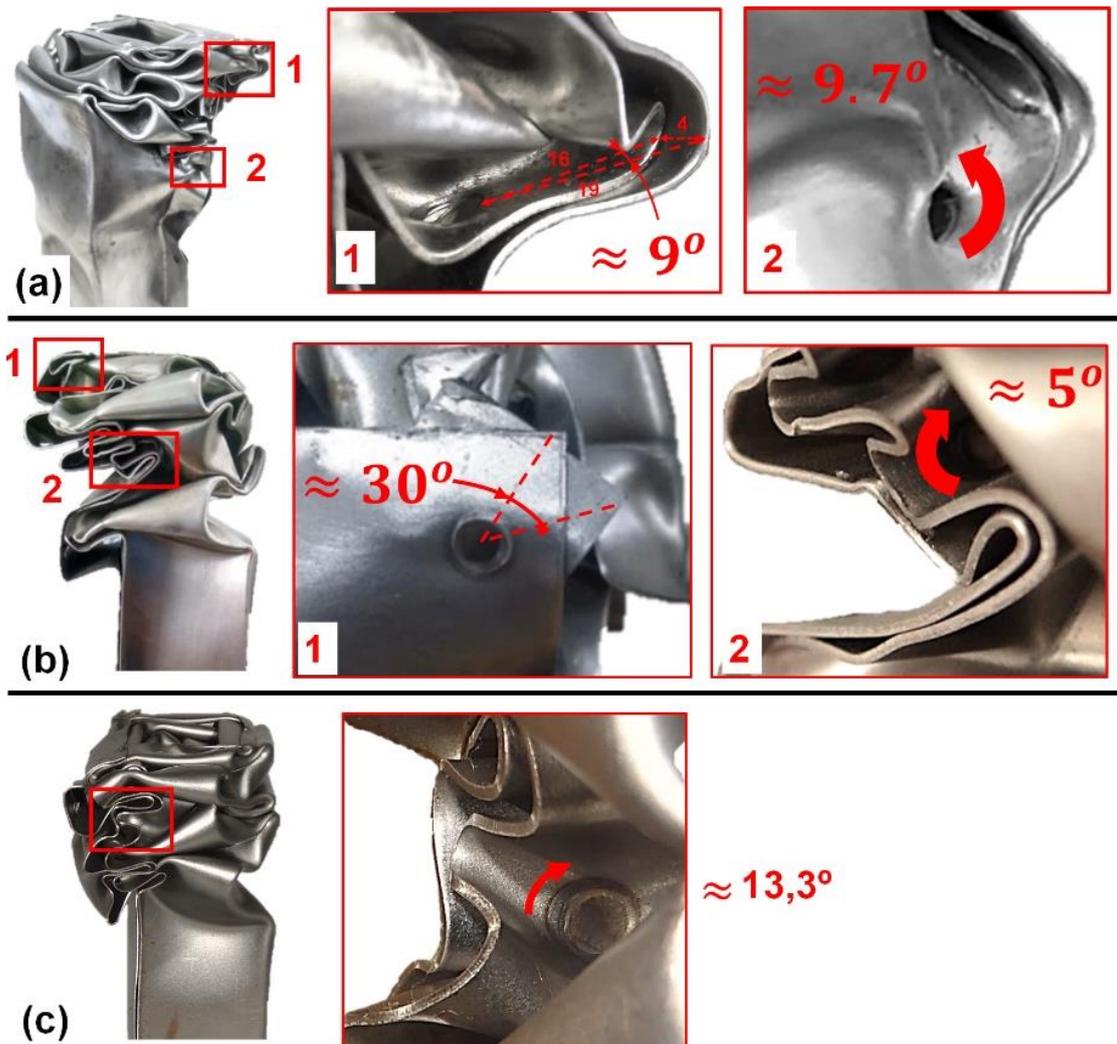


FIGURA 4.14 – Torção de pontos de solda: (a) 9° e 9,7° (condição 1); (b) 30° e 5° (condição 2); (c) 13,3° (condição 3).

Verificou-se que alguns pontos de solda tiveram ruptura total (catastrófica) e outros ruptura parcial. Diante disso, destaca-se o fato que todas as longarinas testadas apresentaram pelo menos uma ruptura parcial e/ou ruptura total (catastrófica) de pontos de solda (FIG 4.15).

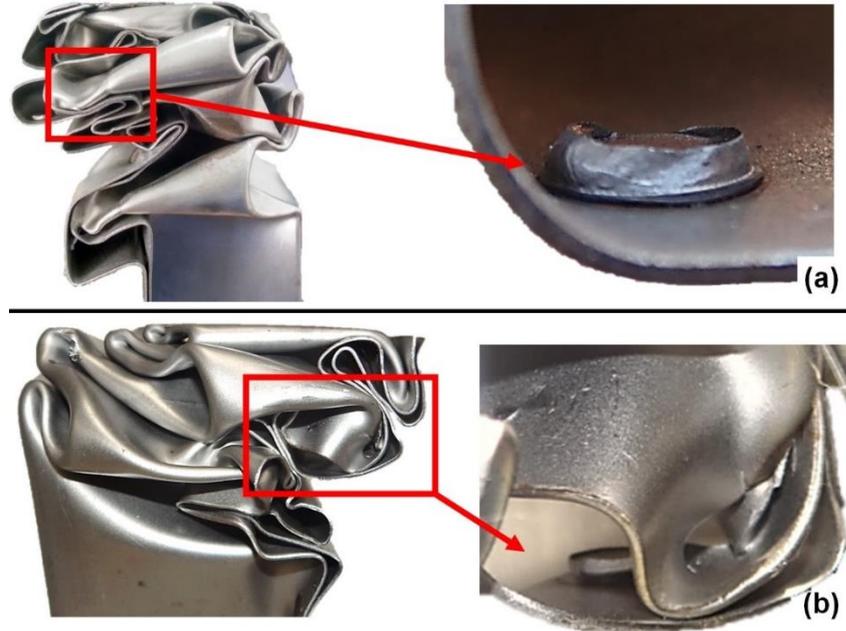


FIGURA 4.15 - (a) Ruptura total (catastrófica) de ponto de solda (condição 2); (b) Ruptura parcial de ponto de solda (condição 3 – 9ciclos/8kA (padrão)).

Após análises dos resultados, constatou-se que os pontos de solda não foram sujeitos somente a esforços de arrancamento nem tão pouco somente a esforços de torção, ocorreu uma combinação dos esforços. A FIG 4.16(a) (direita) está representanda essa situação, em que o ponto de solda foi submetido a torção e arrancamento. A resultante desses esforços, causou o escoamento do ponto e/ou na ruptura parcial. Observou-se que a torção máxima dos pontos na longarina não ultrapassou 30°, logo, a energia de ruptura do ponto de solda atribuída a torção não deve ser superior a esse ângulo. No entanto, o ângulo de torção médio obtido foi de 10°.

Todas as longarinas testadas que apresentaram ruptura total (catastrófica) de pontos de solda, tiveram as mesmas deformações (dobras semelhantes) na região de ruptura. Essas deformações (dobras) tem uma forma cônica, semelhante a letra “y” (FIG 4.16(a)(b) - esquerda), sua base está ancorada sobre o ponto de solda que apresentou ruptura total (catastrófica). O fato da dobra ancorar sobre o ponto de solda cria um concentrador de tensão que propicia a nucleação de trincas, uma vez que nucleada a trinca, sua propagação pode causar ruptura do ponto de solda. Todavia, pontos de solda os quais não há ocorrência dessa dobra sobre eles, dificilmente terão ruptura catastrófica (total). Na FIG 4.16(a)(b) (direita) o ponto

destacado está entre dobras (lóbulos), nessa condição a nucleação da trinca é dificultada, pois para que ocorra a ruptura do ponto as deformações próximas a ele deverão ocorrer por abertura do flange e/ou torção do ponto. A nucleação nessas condições requer grandes deformações para abertura do flange e/ou torção, logo, a ruptura total do ponto é dificultada.

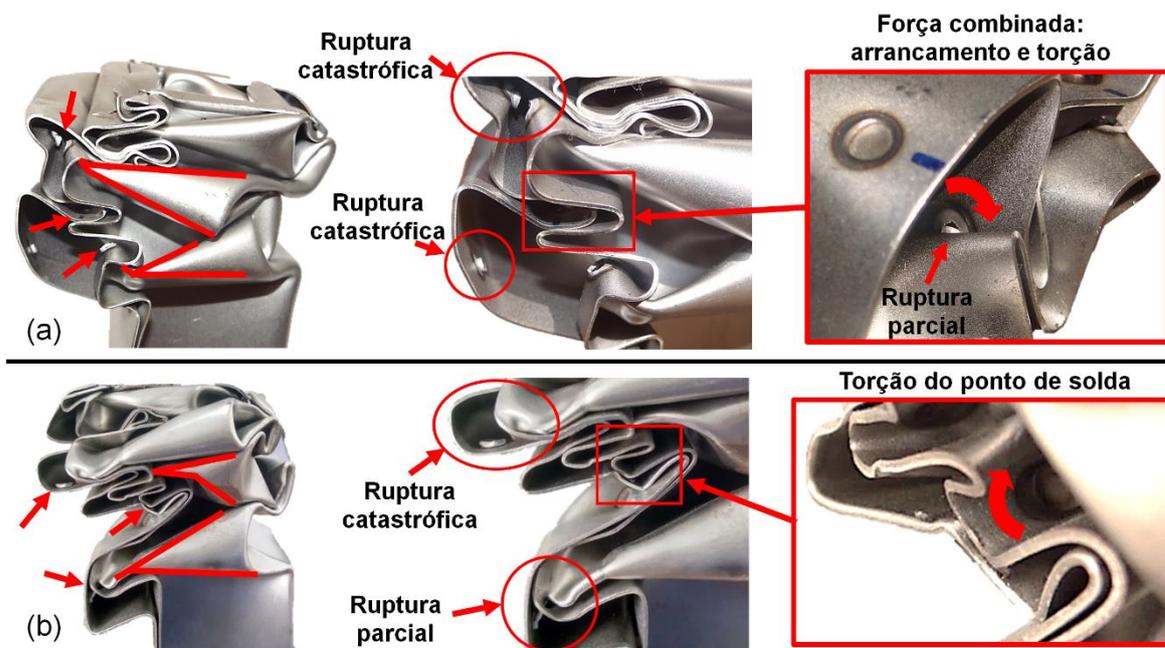


FIGURA 4.16 – Ruptura total (catastrófica) e parcial de ponto de solda: (a) condição 3 - 20ciclos/6kA- amostra A; (b) condição 2 - 9ciclos/8kA- amostra A.

Uma vez identificado o modo de ruptura total (catastrófica) do ponto de solda, foram comparados pontos rompidos na longarina e pontos obtidos por ensaios de arrancamento e torção (FIG 4.17). O propósito foi avaliar se as fraturas tinham características semelhantes, confirmando a ocorrência de torção do ponto na longarina. A fratura do ponto de solda obtida por meio do ensaio de torção apresentou uma superfície com aparência “lisa” característica de grandes deformações plásticas (FIG 4.17(a)). Entretanto, pontos que foram submetidos ao arrancamento, apresentaram uma superfície de fratura rugosa orientada no sentido longitudinal da lente do ponto de solda (FIG 4.17(b)(e)). Quanto aos pontos de solda nas longarinas, observou-se que a superfície de fratura não foi idêntica aos ensaios de bancada. Acredita-se que a velocidade de ruptura do ponto de solda tenha influenciado, no entanto, o aspecto da fratura sugere que os esforços foram combinados entre arrancamento e torção. As FIG 4.17(c)(d)(f) está ilustrado pontos rompidos nas longarinas testadas, sendo que as setas estão destacando locais onde ocorreu a nucleação da trinca. Os resultados sugerem que o esforço predominante sobre esses pontos é o de arrancamento, no entanto, a superfície da fratura tem orientações que

sugerem um esforço de torção, conforme mostra a FIG 4.17(f), na qual estão destacadas algumas marcas na superfície da fratura que sugerem torção do ponto no sentido horário. Além disso, foi observado que a fratura dos pontos produzidos com o parâmetro 20ciclos/6kA contornou completamente a lente do ponto de solda (FIG 4.17(b)), enquanto que pontos produzidos com o parâmetro 9ciclos/8kA tiveram a propagação da trinca desviada quando atingiram o ângulo de  $180^\circ$  (contorno do ponto), saindo tangente ao raio da lente de soldagem (FIG 4.17(e)).

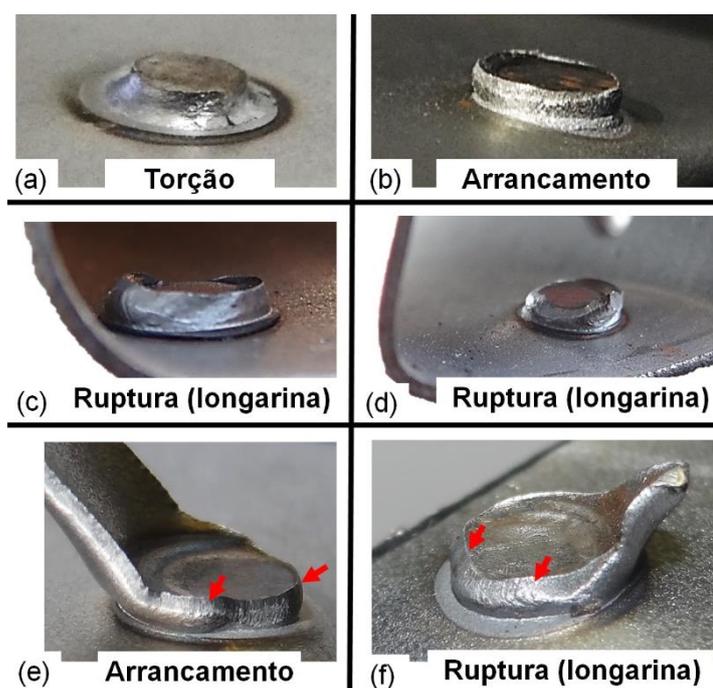


FIGURA 4.17 – Ruptura total dos pontos de solda: (a) ensaio de torção; (b)(e) ensaio de arrancamento; (c)(d)(f) ruptura do ponto na longarina.

### 4.3. Modos de deformação da longarina

A análise de deformação foi realizada observando e comparando a ocorrência de fatores comuns em pelo menos três longarinas. Estes fatores foram agrupados e classificados por nível de significância. O primeiro fator observado refere-se as deformações localizadas na região superior da longarina. Na FIG 4.18 está representada a primeira dobra de deformação, considerando que a deformação se deu de cima para baixo. Abramowicz e Jones (1984) mostram que estruturas tubulares de parede fina que apresentam modos de deformação simétricos, tem um padrão de dobra do tipo “concertina” ou “sanfona”. Isso significa que estruturas que se deformam seguindo esse padrão, apresentam lóbulos simétricos e simetria

entre lados opostos. Isto sugere que a orientação da primeira dobra, influencia significativamente a formação das dobras subsequentes. Na FIG 4.18(a) está representada a seção transversal da longarina, na qual tem-se a indicação de dois cortes “A-A” e “B-B”. Estes cortes representam as dobras resultantes da deformação, onde está destacada a primeira dobra, a qual pode ter orientação voltada para fora (FO) ou para dentro (FI) da seção transversal. Na FIG 4.18(b)(c)(d) está apresentada a orientação da primeira dobra referente a seus respectivos cortes, e também, a consequência dessas orientações sobre a formação dos lóbulos. Assim, na FIG 4.18(b) a primeira dobra da longarina representada pelo corte “A-A”, em que o lado direito e o esquerdo tem a mesma orientação, isto é, ambas as dobras estão voltadas para fora da seção transversal, enquanto, no corte “B-B” a dobra está voltada para dentro. Longarinas com essas orientações tendem a formar lóbulos bem definidos e simétricos (tipo “sanfona”). No entanto, longarinas em que as orientações da primeira dobra (corte “A-A”) são opostas, isto é, de um lado a dobra está voltada para fora e do outro para dentro da seção transversal, estas não apresentaram simetria (FIG 4.18(c)(d)). Assim, observou-se que sempre que a orientação da primeira dobra está voltada para dentro (corte “A-A”), o lado referente a ela, não apresentou lóbulos simétricos.

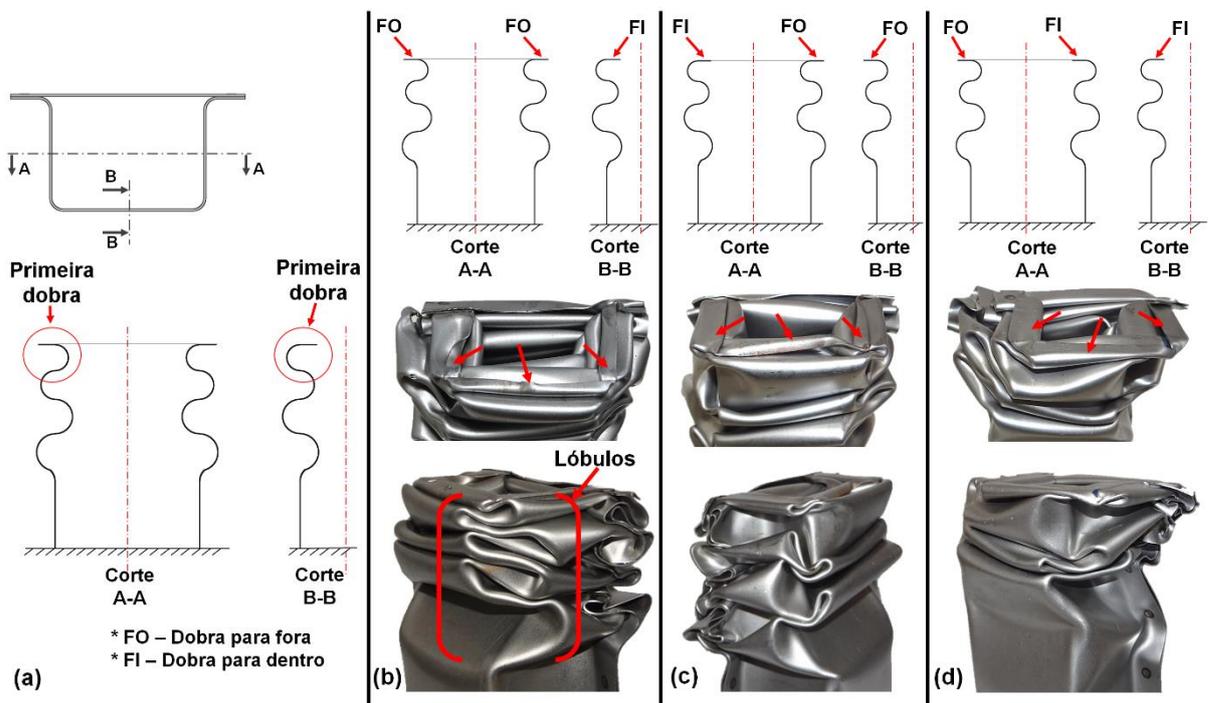


FIGURA 4.18 - Condição 3 (TAB. 3.4), formação de lóbulos a partir da primeira dobra: (a) cortes “A-A” e “B-B”, e representação da primeira dobra; (b) 9ciclos/8kA- amostra E; (c) 9ciclos/8kA- amostra B e (d) 20ciclos/6kA- amostra B.

As longarinas que tiveram essa orientação da primeira dobra (corte “A-A” – FIG 4.18(c)(d)), apresentaram uma região na qual a aresta longitudinal não dobrou sobre si. Na FIG 4.19 está destacada essa região, esse comportamento aumenta a rigidez localizada, uma vez que o não dobramento da aresta longitudinal impede a formação de lóbulos do tipo sanfona.



FIGURA 4.19 – Maior rigidez localizada. FI – Dobra para dentro da seção transversal.

Analisando a deformação global das longarinas, foram identificados quatro resultados característicos. Na FIG 4.20 estão representados esses resultados, sendo que cada um tem suas particularidades. Na FIG 4.20(a) está representada uma linha de simetria na vista lateral (esquerda) e frontal (direita) da longarina. É observado na vista lateral que a região deformada está deslocada para direita, sugerindo uma flambagem. Na vista frontal observa-se que há uma certa proporcionalidade entre os lados, considerando o eixo de simetria, mas não há uma simetria perfeita. Na FIG 4.20(b) está representada na vista lateral uma linha de simetria que permite a comparação entre os lados, observa-se que há uma proporcionalidade, isso significa que aparentemente não há fontes de instabilidade significativas a ponto de causar deslocamento lateral (flambagem). Analisando a vista frontal, percebe-se que a simetria não é perfeita, mas os lados são muito semelhantes, não há deslocamentos laterais. Na FIG 4.20(c) está representada um modo de deformação (vista lateral) em que há proporcionalidade entre os lados, considerando o eixo de simetria. No entanto, uma dobra sobressai em relação as demais (“I”), sugerindo que um fator de instabilidade localizado tenha influenciado essa deformação. Com relação à vista frontal, observou-se que não há simetria entre os lados da longarina, no entanto, não há deslocamentos laterais. Na FIG 4.20(d) está representado um modo de deformação no qual a região inferior da longarina se deforma consideravelmente.

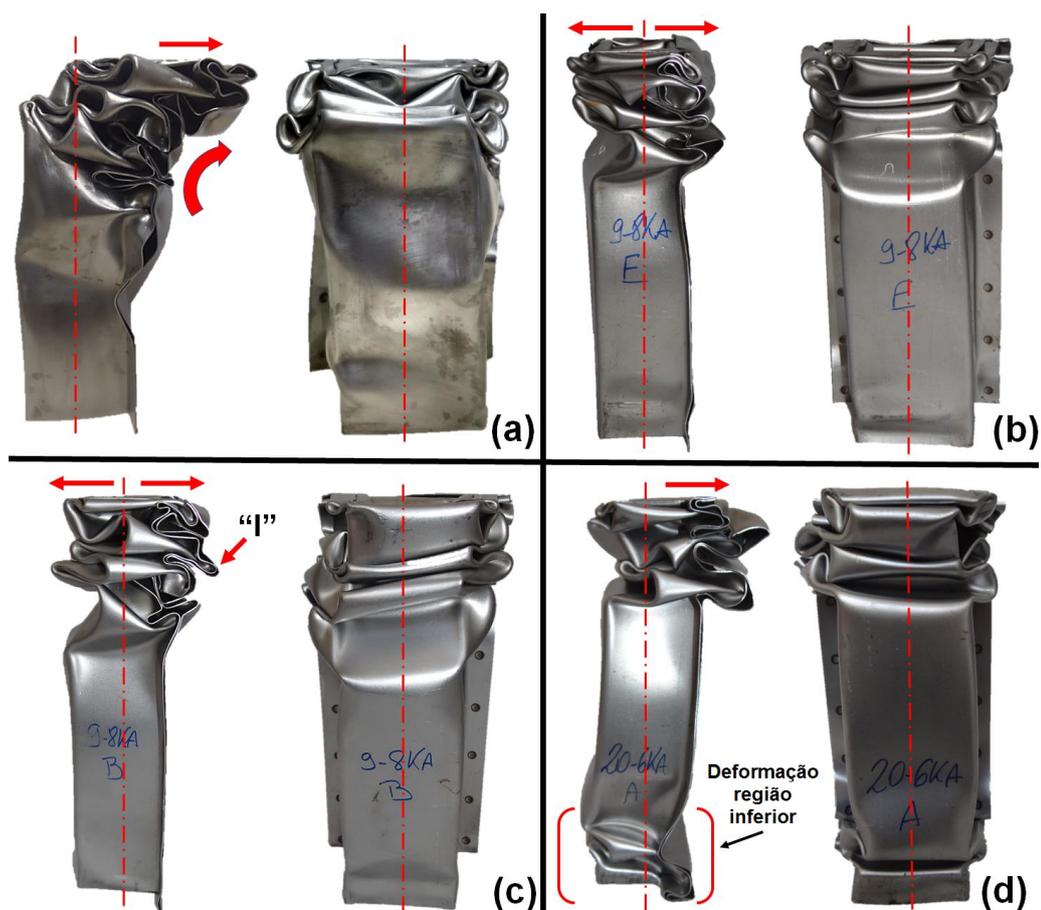


FIGURA 4.20 – Modos de deformação – Condição de teste e parâmetros de soldagem: (a) condição 1 e 9ciclos/8kA - amostra A; (b) (c) condição 3 e 9ciclos/8kA - amostra E e B; (d) condição 3 e 20ciclos/6kA – amostra A.

Fazendo uso das imagens da câmera de alta velocidade foi possível investigar porque uma longarina apresentou modos de deformação diferentes. Nesta análise, foram identificados dois padrões de deformação bem definidos (eventos comuns ou repetitivos) que regem nas longarinas. Na FIG 4.21 e 4.22 estão representados os padrões encontrados.

Na FIG 4.21 estão apresentadas as imagens de um longarina em diferentes instantes durante a sua deformação. Nela, o flange onde os pontos de solda foram feitos está sendo destacado. Analisando as imagens, foi observado que o modo de deformação do flange tem influência direta na deformação global da longarina. O primeiro padrão de deformação identificado, caracteriza-se pela abertura do flange. Isso significa que no espaçamento entre dois pontos de solda, há afastamento das chapas que compõem o flange. A sequência de deformação observada pode ser descrita inicialmente pela abertura do flange entre os dois primeiros pontos de solda localizados na região superior da longarina. Em seguida, no espaçamento entre os dois pontos subsequentes tem-se o dobramento do flange sobre si. No próximo espaçamento entre os pontos de solda, repete-se a abertura do flange, fechando o ciclo

de deformação. Na FIG 4.21(c) estão representados os instantes (quadros) que evidenciam a ocorrência desse modo de deformação do flange. Esse padrão propicia a flambagem da longarina. Isso ocorre, porque com a abertura do flange, a “chapa 2” (parte 2 – FIG 3.17) a qual compõem a longarina, desloca-se para direita. Tal comportamento causa uma instabilidade devido a assimetria lateral, isso pode ser observado na FIG 4.21(c) nos frames 1, 3 e 5.

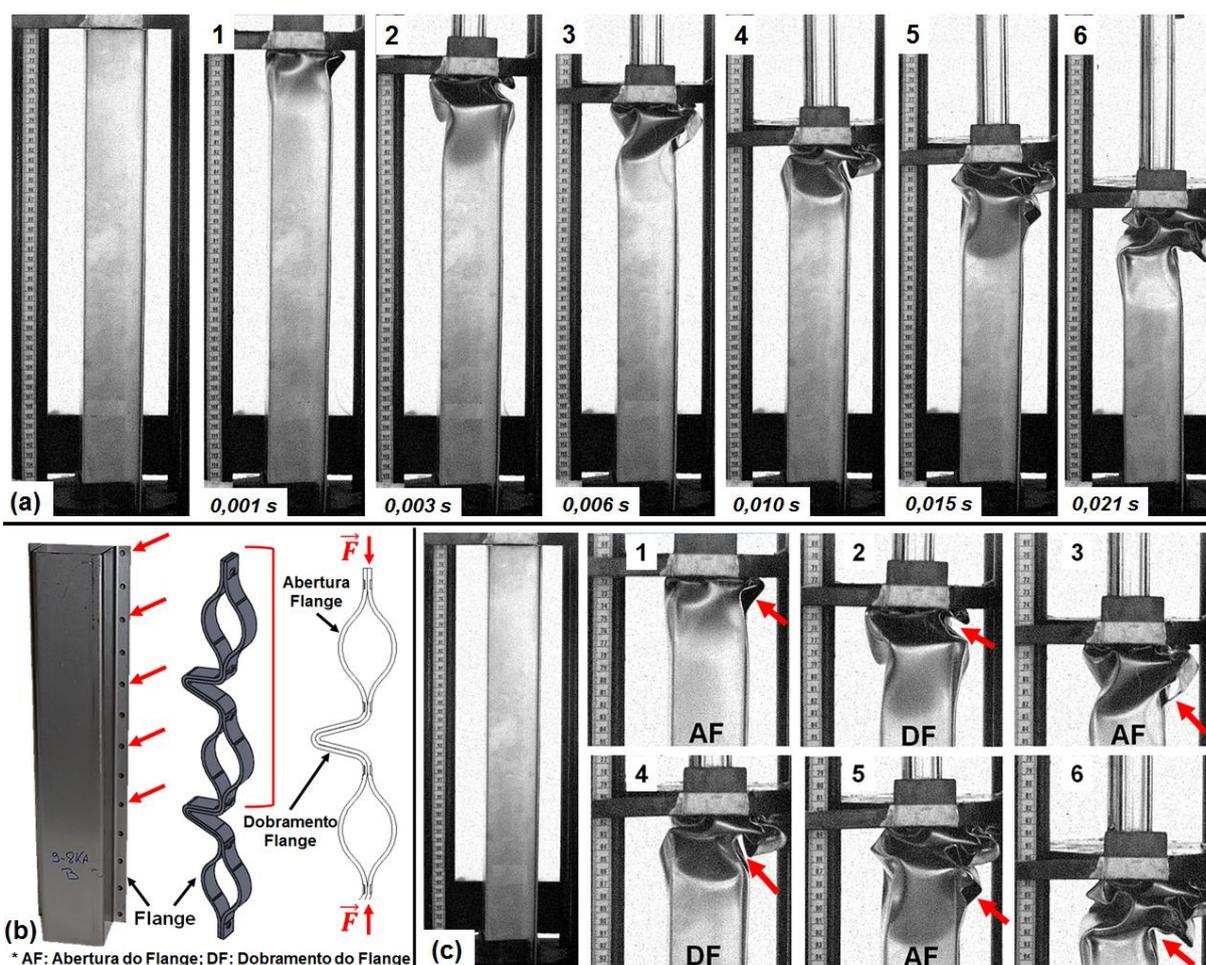


FIGURA 4.21 – Condição 1: modo de abertura do flange: (a) deformação da longarina (Amostra 1), (b) desenho esquemático da abertura do flange e (c) detalhe da deformação (Amostra 1).

Na FIG 4.22 está representado o segundo modo de deformação do flange da longarina. Nesse modo não há abertura das chapas do flange, os dobramentos ocorrem semelhante ao movimento de “concertina”. Considerando que a deformação começou na região superior da longarina, observar-se que a partir do segundo ponto de solda as dobras localizam-se próximas aos pontos, isso para o espaçamento de 40 mm. Na FIG 4.22(c) observa-se que em nenhum instante (frame) houve abertura do flange, considerando o mesmo ciclo de deformação destacado na FIG 4.21(c).

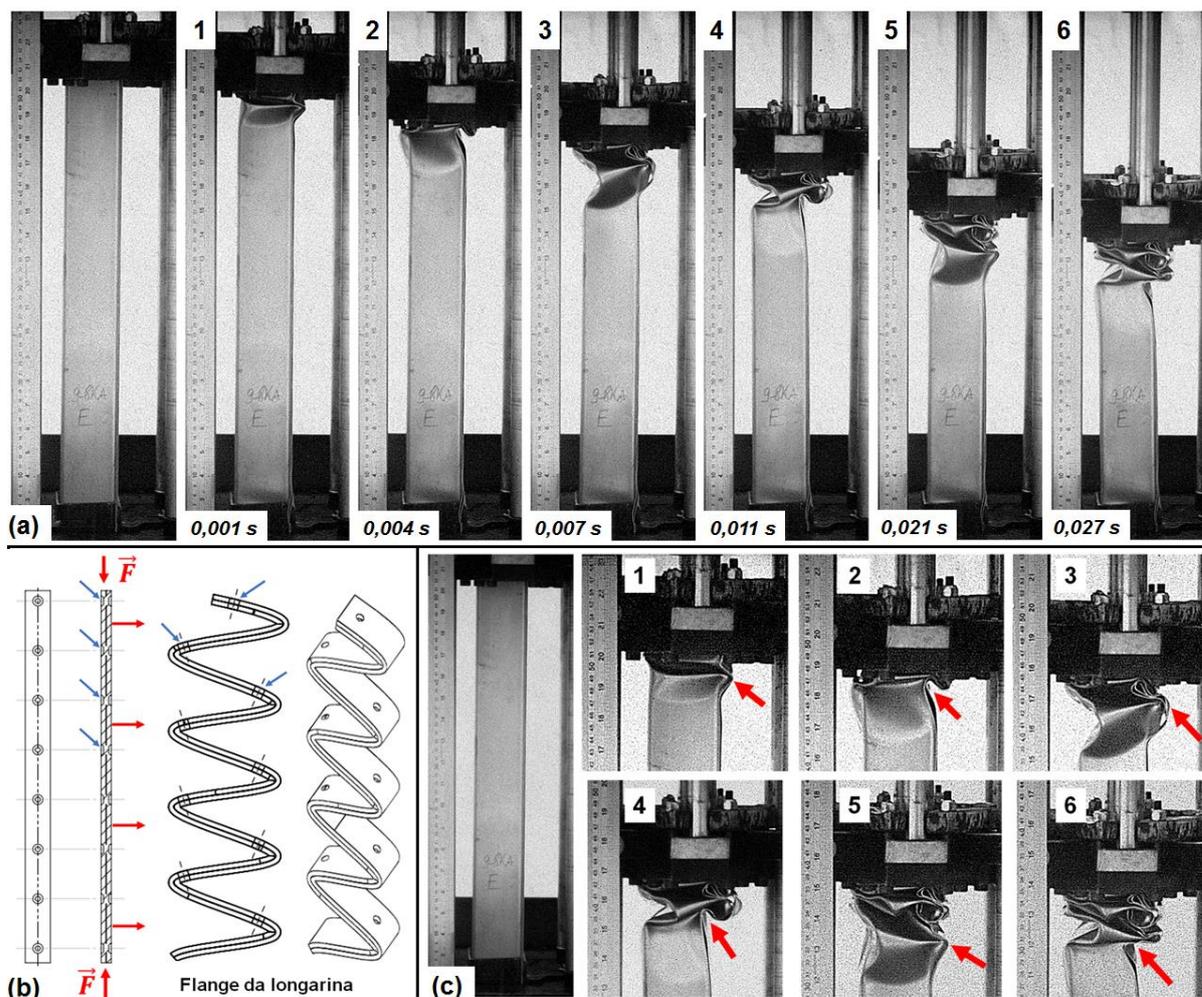


FIGURA 4.22 - Condição 3: modo de deformação sem abertura do flange: (a) deformação da longarina (Amostra “9ciclos/8kA – E”), (b) desenho esquemático da deformação do flange e (c) detalhe da deformação (Amostra – “9ciclos/8kA – E”).

A discussão realizada sobre as FIG 4.21 e 4.22, sugerem que um dos fatores determinantes para os diferentes resultados de deformação entre as longarinas, foi a abertura do flange. Essa hipótese pode ser confirmada considerando o resultado de deformação da longarina representada na FIG 4.23(a). Apesar da orientação da primeira dobra resultante da deformação propiciar a formação de lóbulos bem definidos (FIG 4.18(b)), no entanto, somente isso não foi o bastante para impedir a flambagem. Concluiu-se que a ocorrência de abertura do flange teve maior influência sobre a flambagem (vista lateral) do que a orientação da dobra inicial.

A longarina representada na FIG 4.23(b), também, teve a orientação da primeira dobra de forma a produzir lóbulos bem definidos, no entanto, isso não ocorre. À vista disso, observou-se que num primeiro momento não se teve a abertura do flange, ele ocorreu num segundo momento por causa da ruptura catastrófica de pontos de solda, culminando numa deformação assimétrica. Além disso, outro fator que contribuiu para esse comportamento foi a

deformação na região inferior da longarina. Acredita-se que a condição de soldagem tenha alguma influência, uma vez que todas as longarinas soldadas com o parâmetro 20ciclos/6kA tiveram esse comportamento.

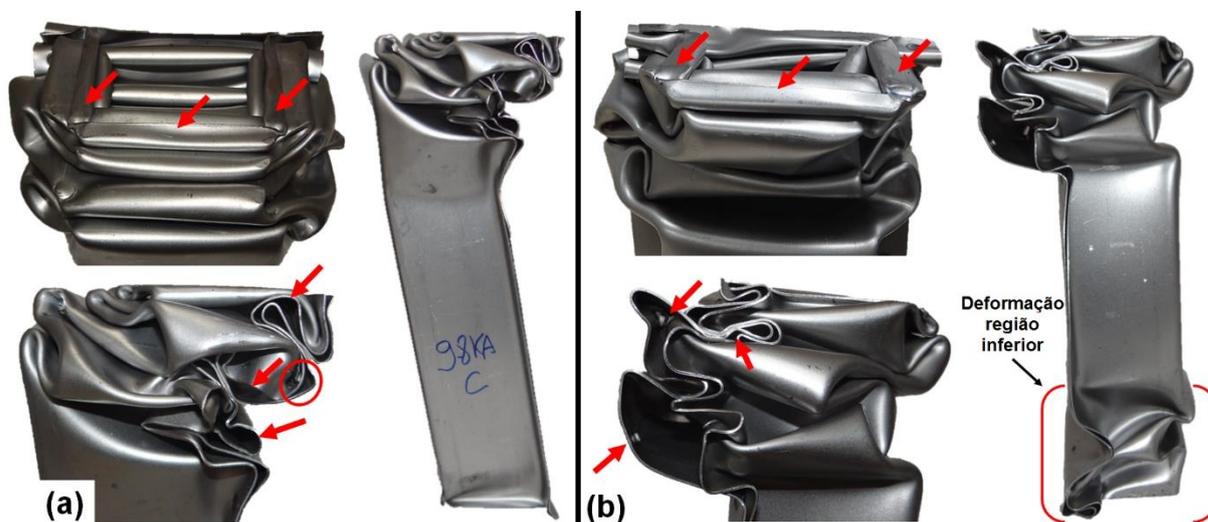


FIGURA 4.23 – Dobramento inicial iguais: (a) abertura do flange; (b) ruptura total (catastrófica) de pontos de solda.

É possível concluir que a ruptura total (catastrófica) de pontos de solda teve maior influência sobre as deformações que a orientação da primeira dobra. E ainda, essa ruptura é mais significativa que o modo de abertura do flange, pois, longarinas que a priori não iriam deformar dessa maneira passam a ter esse comportamento devido a essa ruptura catastrófica do ponto de solda.

#### 4.4 Estudo analítico de deformação da longarina

Utilizando-se os recursos da câmera de alta velocidade, foi realizado um estudo da desaceleração acerca da deformação da longarina. Para tal, as curvas de deslocamento, velocidade e aceleração em função do tempo foram obtidas por meio do software Phantom Camera Control (PCC) o qual faz o monitoramento de um ponto predeterminado (dispositivo “guia” de compressão da longarina, esse ponto está destacado na FIG 3.22 (alvo)). Esse deslocamento corresponde a compressão da longarina. As curvas de velocidade e aceleração foram filtradas com um filtro Butterworth passa-baixa e frequência de corte de 160 Hz. Este filtro foi escolhido porque elimina ruídos, mas não excluí picos relevantes.

#### 4.4.1. Comparação entre longarinas com pontos de solda de diferentes resistências mecânica: ponto “A” e “B”

Nesta seção as longarinas representadas na FIG 3.18(a) e (b) serão comparadas. As longarinas soldadas com o ponto de solda “A” correspondem a condição de soldagem de 9ciclos/8kA, e, as longarinas soldadas com o ponto de solda “B” correspondem a condição de soldagem de 20ciclos/6kA. Nesta primeira análise, o intuito foi avaliar se a resistência do ponto de solda tem influência sobre o desempenho da longarina em absorver energia, considerando que os pontos produzidos por ambos as condições foram considerados aprovados segundo as especificações estabelecidas na Norma AWS D8.9M. No entanto, estes pontos de solda apresentaram diferenças em relação a resistência mecânica, em que o ponto “A” teve maior resistência que o “B”. Além disso, o ponto “B” foi reprovado no ensaio de torção (discutido na Seção 4.1.1).

Os resultados obtidos evidenciaram fatos, tais como: torção, ruptura parcial e total de pontos de solda. Além da identificação de modos de deformação. Na Seção 4.3, foi concluído que a ruptura total (catastrófica) do ponto de solda tem maior influência sobre o modo de deformação da longarina.

Os resultados mostraram que todas as longarinas soldadas com a condição de soldagem de 20ciclos/6kA, apresentaram pelo menos uma ruptura catastrófica de ponto de solda. Por outro lado, somente uma longarina soldada com a condição de soldagem de 9ciclos/8kA, apresentou esse tipo de ruptura. Por esse motivo, foi realizada uma análise sobre o comportamento da curva de desaceleração dessa longarina soldada com a condição de soldagem de 9ciclos/8kA que apresentou ruptura total (catastrófica) de ponto de solda. O intuito foi avaliar se o comportamento da sua curva foi semelhante as longarinas soldadas com o parâmetro de soldagem de 20ciclos/6kA. Na FIG 4.24 estão apresentadas curvas de desaceleração de longarinas que apresentaram ruptura total (catastrófica) ou parcial de pontos de solda. Não foi encontrado na literatura trabalhos que tenham utilizado curvas de desaceleração obtidas por câmeras de alta velocidade. Schneider e Jones (2003) e Tarigopula et al. (2006) utilizaram uma câmera de alta velocidade para suas análises de deformação, mas para análises de esforços, e cálculo de energia absorvida pelas longarinas, usaram uma célula de carga. O motivo pelo qual não utilizaram a câmera para a análise de desaceleração não foi comentado, mas acredita-se que as câmeras usadas por eles não tinham um software específico para isso.

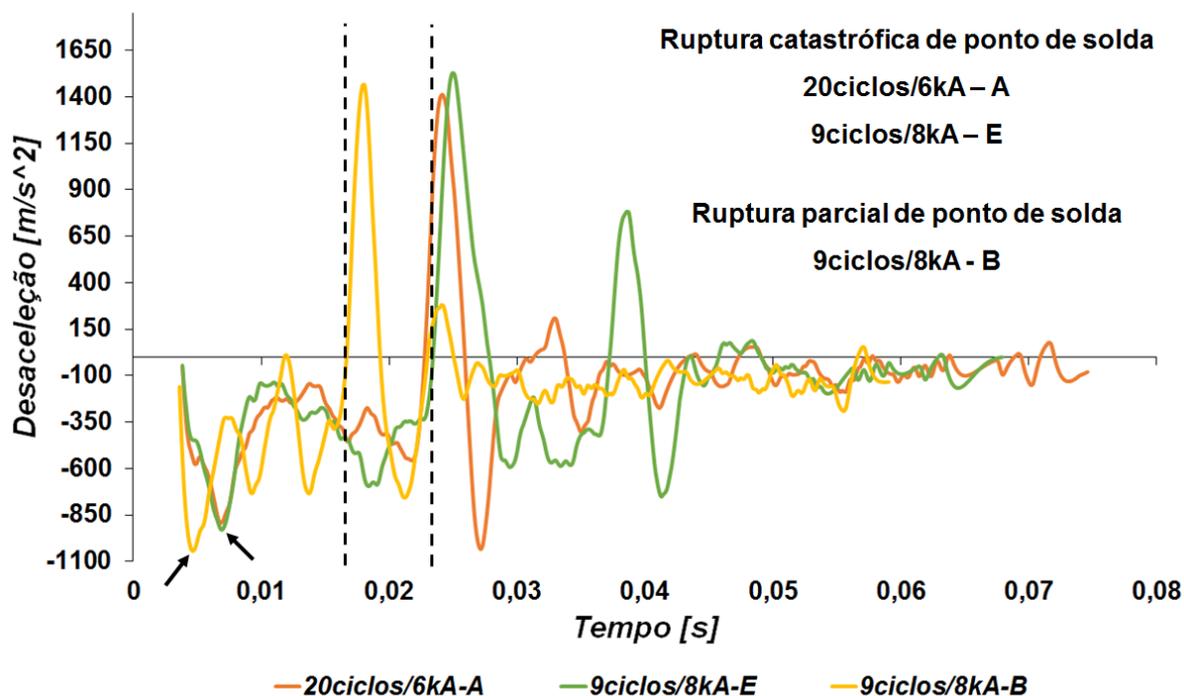


FIGURA 4.24 – Comportamento de curvas de desaceleração: ruptura total (catastrófica) e parcial de pontos de solda.

Na FIG 4.24, os resultados afirmam que as curvas de desaceleração das longarinas que apresentaram pelo menos uma ruptura total (catastrófica) de ponto de solda, se comportaram de maneira semelhante, mesmo considerando o fato de não terem sido soldadas com os mesmos parâmetros de soldagem. Nesta análise, dois pontos estão destacados nas curvas (FIG 4.24). O primeiro, indicado por setas, está relacionado ao pico máximo de desaceleração no início da curva, pois observou-se que são coincidentes. O segundo fato relevante, está destacado pelas linhas tracejadas, as quais indicam o início de um evento de aceleração positiva bastante significativo (este fenômeno será discutido posteriormente). Observou-se que há uma defasagem significativa em relação ao instante inicial deste fenômeno, comparando as longarinas que apresentaram rupturas de pontos distintos (catastrófica e parcial). Em longarinas que tiveram ruptura catastrófica de pontos de solda, esse fenômeno ocorre em instantes muito próximos, esta foi mais uma evidência de que o comportamento entre as amostras 9 ciclos/8kA-E e 20 ciclos/6kA-A, foram semelhantes. No momento, o fato de maior relevância foi identificar que há influência do tipo de ruptura do ponto de solda sobre a resposta da longarina referente a curva de desaceleração.

Nesta seção as longarinas serão separadas em dois grupos, classificados pelo tipo de ruptura de pontos de solda: ruptura catastrófica e ruptura parcial. A FIG 4.25 está apresentada uma síntese dos grupos de longarinas.

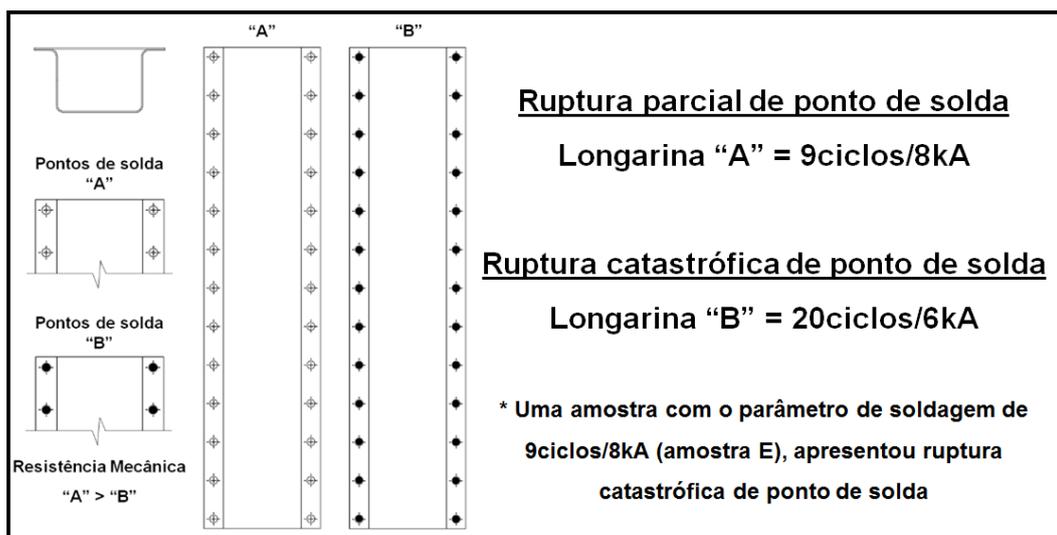


FIGURA 4.25 – Identificação das longarinas em grupos: tipo de ruptura de ponto de solda.

Verificou-se que a compressão média entre esses grupos, estatisticamente não apresentaram diferenças significativas. A diferença máxima de compressão foi cerca de 8 mm. No entanto, os resultados de deformação em números absolutos, mostraram que todas as longarinas que tiveram ruptura total (catastrófica) de ponto de solda, tendem a deformar um pouco mais que longarinas que apresentaram ruptura parcial de ponto de solda. A FIG 4.26 está representando um comparativo entre duas longarinas deformadas, em que uma apresentou ruptura total (catastrófica - direita) e outra ruptura parcial (esquerda) de pontos de soldas, nota-se que não há diferenças significativas na compressão.



FIGURA 4.26 – Compressão: (a) 9ciclos/8kA; (b) 20ciclos/6kA.

Este resultado de compressão mostrado na FIG 4.26, está em conformidade com os estudos de Schneider e Jones (2003), que não observaram diferenças significativas na compressão de longarinas produzidas com o mesmo material, apesar de algumas terem tido ruptura total (catastrófica) de pontos de solda.

Na FIG 4.27 estão representadas as curvas médias de deslocamento, velocidade e aceleração de todas longarinas ensaiadas sob a condição 3 (TAB. 3.4). Na FIG 4.27(a) (superior) estão sobrepostas as curvas referentes as longarinas que apresentaram pelo menos uma ruptura total (catastrófica) de ponto de solda. Na FIG 4.27(b) (superior), também, estão sobrepostas as curvas referentes as longarinas que apresentaram pelo menos uma ruptura parcial de ponto de solda. Além disso, na FIG 4.27(a)(b) (inferior) está representado separadamente curvas de aceleração nas quais estão destacadas por curvas tracejadas as quais indicam o limite superior e inferior referente ao desvio padrão amostral.

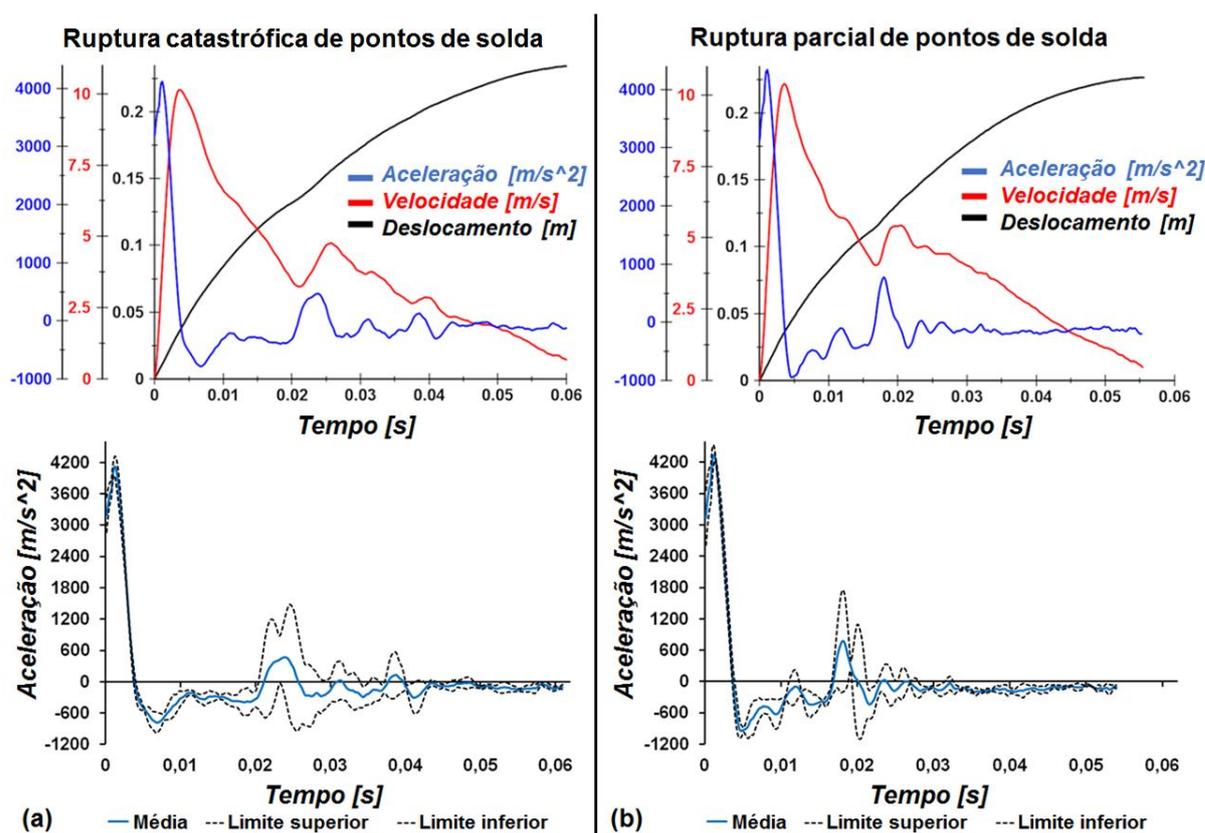


FIGURA 4.27 - Influência de tipos de ruptura de pontos de solda na deformação da longarina: (a) ruptura catastrófica e (b) ruptura parcial.

Na análise comparativa, as curvas serão discutidas destacando os pontos mais relevantes. A priori, foi realizada uma análise sobre a curva de velocidade (FIG 4.28(a)) a qual destaca dois intervalos de tempo significativos para a análise de desaceleração. O primeiro,

compreendido no intervalo de 0,0000 a 0,0040s, encontram-se os picos de velocidade. Nesse intervalo de tempo o instante 0,000s corresponde ao momento em que o martelo de colisão colidiu com o dispositivo “guia”. Sabendo que o dispositivo se encontrava em repouso, logo, foi necessário uma fração de tempo até que ele igualasse sua velocidade ao martelo de colisão. A velocidade do martelo de colisão pode ser estimada a partir de sua velocidade no instante da colisão, velocidade esta que foi estimada por cálculo analítico. Perdas por atrito e resistência do ar foram desprezadas, uma vez que a perda de velocidade do martelo de colisão nesse intervalo é o espelho da função velocidade do dispositivo “guia”, porém com amplitude menor (FIG 4.28(c)). A longarina que teve ruptura total (catastrófica) de pontos de solda apresentou menor pico de velocidade, sugerindo que a desaceleração do martelo de colisão foi maior. No entanto, isso não será considerado, uma vez que o martelo de colisão não foi monitorado por equipamento de medição. O segundo intervalo de tempo, inicia-se a partir de 0,0040s até o final de cada curva, nesse intervalo o martelo de colisão e o dispositivo “guia” se movimentaram com a mesma velocidade. Portanto, pode-se dividir essa curva em duas situações: aceleração e desaceleração. Além disso, nesse segundo momento, observa-se que nos intervalos compreendidos entre 0,0043 e 0,0177s, e entre 0,0385 e 0,0467s, a velocidade de deformação da longarina a qual teve ruptura catastrófica de pontos de solda é maior, sugerindo menor rigidez.

Na FIG 4.28, as setas representam o instante em que as longarinas apresentaram perda de rigidez abrupta. Não foi possível evidenciar com exatidão o motivo pelo qual a longarina perde rigidez tão abruptamente, uma vez que esse estudo dispunha de somente uma câmera para capturar as imagens. Acredita-se que para entender o fenômeno é necessário pelo menos mais uma câmera focalizando a vista frontal. Apesar disso, foi possível evidenciar que esse fenômeno não tem relação aparente com a ruptura total (catastrófica) ou parcial do ponto de solda, uma vez que essas rupturas foram observadas em instantes anteriores ou posteriores a essa perda de rigidez mostrada na curva de desaceleração.

Na curva de aceleração (FIG 4.28(b)) o intervalo de tempo compreendido entre 0,0000 e 0,0040s (linha tracejada) representa a aceleração do dispositivo “guia”, onde observou-se picos de aceleração. O martelo de colisão apresenta picos de desaceleração no mesmo instante, porém com grandeza menor. Neste caso, far-se-á uma proporção inversa, quanto maior o pico de aceleração do dispositivo “guia” menor o pico de desaceleração do martelo de colisão. Apesar disso, esse intervalo foi desconsiderado na análise de desaceleração, uma vez que não se sabe com exatidão qual a velocidade do martelo de colisão no momento da colisão. Isso significa que esse pico poderia ter sido superestimado ou subestimado.

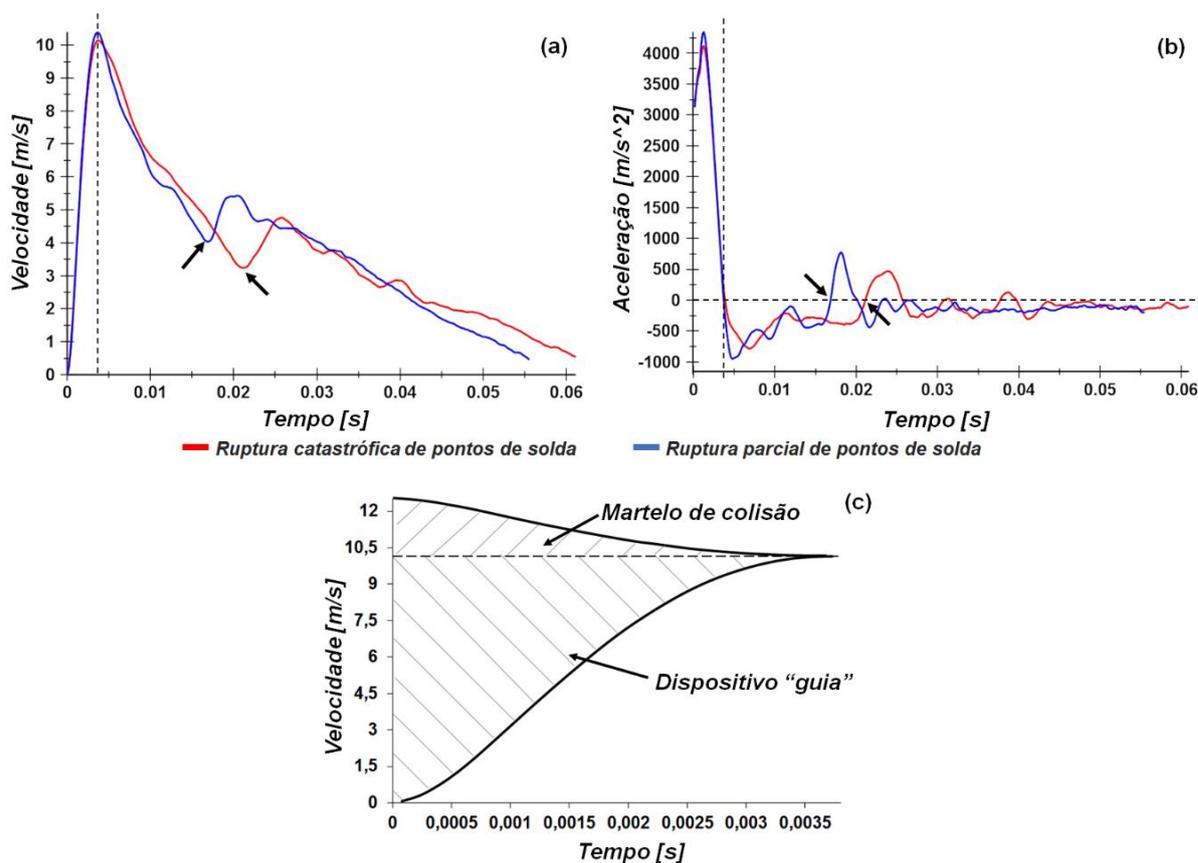


FIGURA 4.28 – Comparativo entre os modos de ruptura do ponto de solda.

Na FIG 4.29, está representando a desaceleração do dispositivo “guia”, e consequentemente, do martelo de colisão, considerando que a colisão é perfeitamente inelástica a partir do instante 0,0038s. Comparando as curvas, não foi possível afirmar qual dos grupos de longarinas apresentaram melhor desempenho em desaceleração, uma vez que os diversos picos de desaceleração presentes ficaram se alternando. Estatisticamente foi comprovado por meio do teste t de Student com nível de significância de 0,05, que as longarinas não apresentaram diferenças significativas em relação a compressão e a desaceleração média, considerando a curva toda (Anexos C3 e C4). Longarinas que apresentaram ruptura total (catastrófica) ou parcial de pontos de solda tiveram compressão média de 237 e 228 mm, e, desacelerações médias de 157,4 e 176,8 m/s<sup>2</sup>, respectivamente. Em resumo, as longarinas que apresentaram ruptura total (catastrófica) tendem a ter valores de compressão maiores e desaceleração menores.

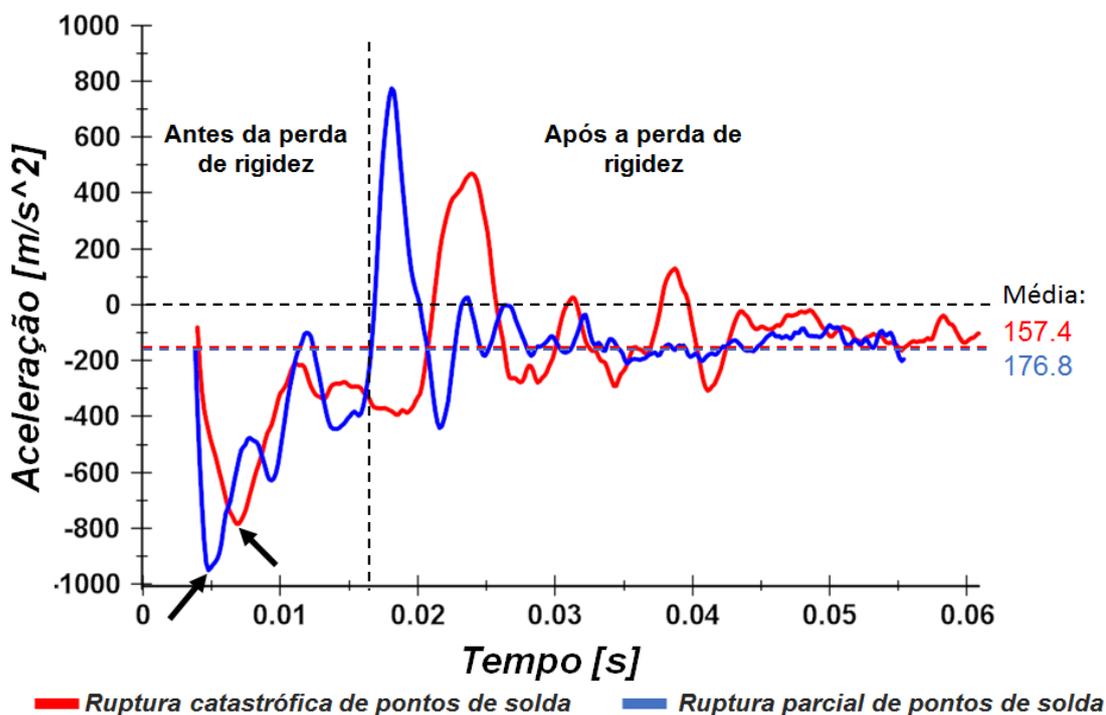


FIGURA 4.29 – Curva de desaceleração-tempo.

Apesar dos resultados de desaceleração média e compressão máxima indicarem que as longarinas não apresentaram diferenças significativas, foi identificado que as curvas se diferem em alguns aspectos, os quais são significativos para avaliar o desempenho entre os grupos de longarinas. Sabe-se que estas longarinas são utilizadas em veículos leves, até 5 passageiros, e, que estes passageiros são sensíveis aos picos máximos de desaceleração, ou seja, quanto maior o pico, maior será a força exercida sobre eles. Bois et al (2004) consideram que a força máxima está diretamente relacionada a integridade física dos ocupantes, assim sugerem que as análises de integridade sejam realizadas sobre a pior condição, ou seja, sobre os ensaios com barreira rígida que causam maior pico de desaceleração. Em relação a estas longarinas estudadas, a priori, deve-se desconsiderar o tempo de duração do pico, visto que estas longarinas não foram testadas sobre a estrutura de um veículo, logo, a desaceleração sentida pelos passageiros não foi quantificada nem avaliada.

As análises sobre o pico máximo de desaceleração, energia absorvida, desaceleração média e somatório das amplitudes foram divididas em dois períodos de acontecimentos. O primeiro está relacionado ao início da colisão, momento em que uma grande quantidade de energia é dissipada em um intervalo de tempo muito pequeno, compreendido entre 0,0000 e 0,0168 s. O segundo, está relacionado ao fenômeno de perda de rigidez abrupta, o qual iniciou-se no instante em que a aceleração positiva apresentou um pico significativo (posterior a 0,0168 s), este ponto variou de um grupo de longarina para o outro. Deste modo, a

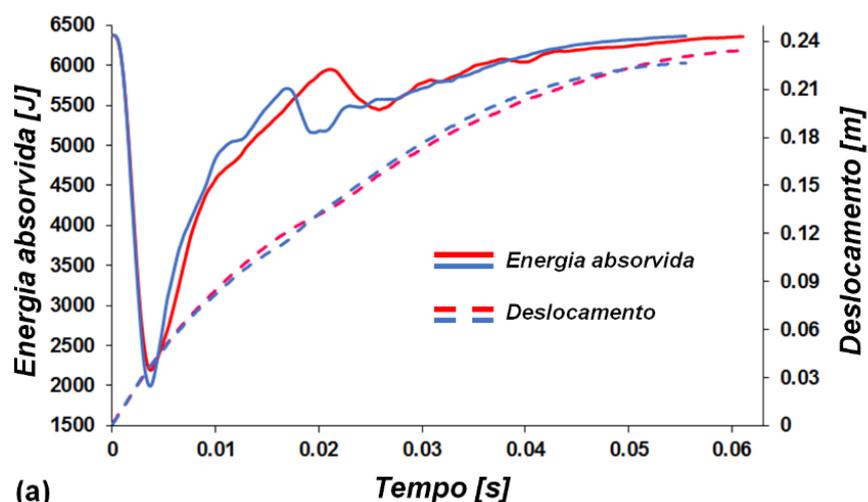
avaliação de desempenho estrutural foi dividida em duas: antes e após o fenômeno de perda de rigidez abrupta da longarina.

#### 4.4.1.1 Análise de desempenho: período de tempo anterior a perda de rigidez abrupta

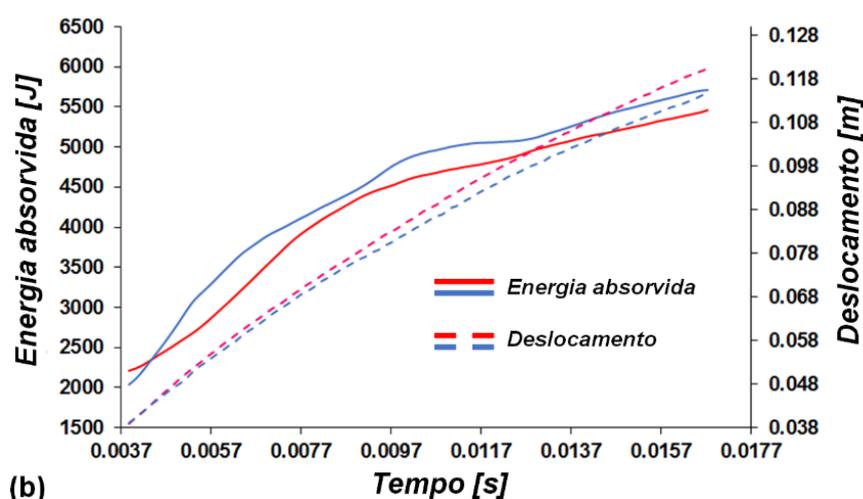
O pico máximo de desaceleração, considerando o período de tempo antes do fenômeno de perda de rigidez abrupta da longarina, está compreendido entre o intervalo de tempo de 0,0046 e 0,0070s, FIG 4.29 (setas), na qual observou-se que longarinas que apresentaram ruptura total (catastrófica) de pontos de solda tiveram menor pico. Isto foi comprovado pela análise estatística em que foi aplicado o teste t de Student com nível de significância de 0,05. As médias dos picos máximos de desaceleração diferem significativamente entre os grupos (Anexo C5). Considerando a curva de desaceleração média (FIG 4.29), o pico máximo de desaceleração em longarinas que tiveram ruptura catastrófica de pontos de solda foi de  $785 \text{ m/s}^2$  (78 g), enquanto que, em longarinas com ruptura parcial de pontos de solda foi de  $950 \text{ m/s}^2$  (95 g). Portanto, a curva de desaceleração média está representando satisfatoriamente o comportamento do pico máximo de desaceleração das longarinas.

Todavia, somente a análise do pico máximo, não descreve o desempenho da longarina neste primeiro intervalo de acontecimentos (antes da perda de rigidez abrupta). Assim, foi realizada uma análise sobre a energia absorvida pelas longarinas até o instante de 0,0168s. Os resultados mostraram que a energia por elas absorvidas foi superior a 80% da energia total. Este intervalo de tempo corresponde a 30% do tempo total de deformação. Na FIG 4.30 estão representadas as curvas de energia absorvida pelas longarinas, que foram estimadas através da EQUAÇÃO (2.1). Tem-se curvas completas (FIG 4.30(a)) e curvas parciais referentes ao intervalo de interesse na FIG 4.30(b). Para esse cálculo foi admitido que a energia cinética é exatamente igual a energia potencial no instante da colisão, cerca de 6373 J. Na FIG 4.30(a), o intervalo de tempo de 0,000 a 0,0038s descreve a “transferência” de energia do martelo de colisão para o dispositivo “guia”, ou seja, esse intervalo de tempo representa o tempo gasto para que o dispositivo “guia” comece a se movimentar com a mesma velocidade do martelo de colisão, a partir do instante 0,0038 s (FIG 4.30(b)) foi descrito a energia absorvida pela longarina. Estatisticamente, aplicando a análise da variância (Anova) com nível de significância de 0,05, as energias absorvidas até o instante 0,0168s não apresentaram diferenças significativas entre os grupos de longarinas (Anexo C6). As longarinas que apresentaram ruptura total (catastrófica) ou parcial de pontos de solda absorveram em média 5454 e 5705 J,

respectivamente. Isto significa que a capacidade em absorver energia das longarinas que sofreram ruptura total (catastrófica) de pontos de solda não foi comprometida, apesar de, em números absolutos a energia absorvida por elas, foi um pouco menor.



(a)



(b)

— Ruptura catastrófica de pontos de solda — Ruptura parcial de pontos de solda

FIG 4.30 – Energia absorvida pela longarina: (a) completo e (b) parcial.

Em relação a desaceleração média, as longarinas que apresentaram ruptura total (catastrófica) de pontos de solda tiveram uma desaceleração média de  $425 \text{ m/s}^2$  ( $43 \text{ g}$ ), enquanto que as longarinas que apresentaram ruptura parcial de pontos de solda tiveram uma desaceleração média de  $490 \text{ m/s}^2$  ( $49 \text{ g}$ ). Portanto, as longarinas com ruptura total (catastrófica) de pontos de solda apresentaram melhor desempenho nesta avaliação.

Além da aceleração média, uma análise complementar foi realizada considerando as amplitudes de desaceleração existentes no intervalo de 0,0038 a 0,0168s (antes da perda de rigidez). Na FIG 4.31(a) estão representadas as curvas de desaceleração separadas em seus respectivos grupos, nelas os picos de desaceleração estão destacados por números, que indicam

a quantidade de picos. O somatório das amplitudes representa a instabilidade da longarina durante a deformação, isto é, quanto maior o somatório maior a ocorrência de perda de rigidez abrupta (amplitudes maiores) da longarina, esse comportamento resulta em maiores picos de desaceleração, portanto, maiores forças de reação sobre o martelo de colisão. Correlacionando essa análise a integridade física dos ocupantes, quanto maior a força de reação maior será o dano aos ocupantes, conforme descrito por Bois et al (2004). Apesar de na FIG 4.31(a) a curva média referente as longarinas que apresentaram ruptura total (catastrófica) de pontos de solda destacar somente duas amplitudes, na análise individual foram observados que elas tiveram pelos menos sete amplitudes, porém sem expressividade, por isso não se destacaram. Já as longarinas com ruptura parcial de pontos de solda apresentaram, no máximo, cinco amplitudes, com pelo menos três expressivas. Na FIG 4.31(b) estão representados o somatório de cada grupo. Observa-se que longarinas que apresentaram ruptura total (catastrófica) de pontos de solda tiveram o somatório menor, logo menor “dano”. Pela análise estatística usando a análise da variância (Anova) com nível de significância de 0,05, foi identificado que as longarinas se diferem significativamente em relação ao somatório das amplitudes (Anexo C7).

Assim, a análise do pico máximo juntamente com a análise do somatório das amplitudes sugere que o desempenho em desaceleração de longarinas que apresentaram ruptura total (catastrófica) de pontos de solda, foi melhor do que longarinas que tiveram ruptura parcial de pontos de solda.

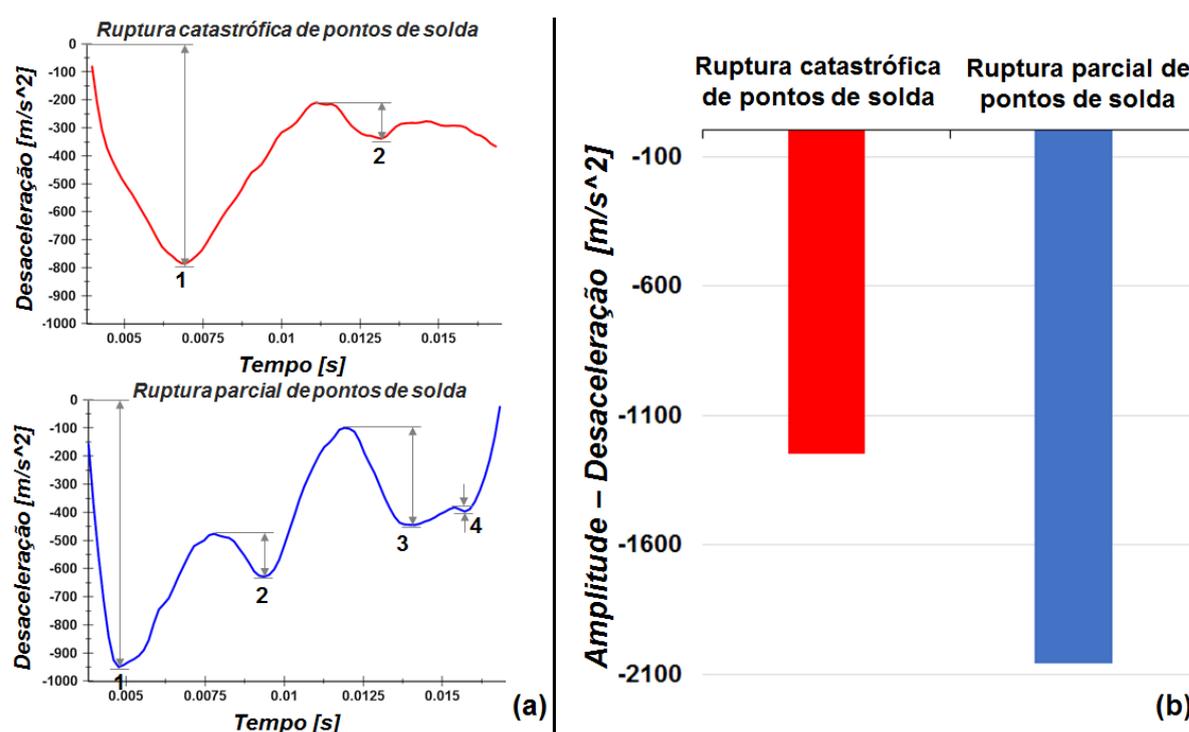


FIGURA 4.31 - (a) Amplitude - Desaceleração: picos-vales; (b) Somatório das amplitudes.

#### 4.4.1.2 Análise de desempenho: período de tempo posterior a perda de rigidez abrupta

A análise referente ao período de tempo posterior a perda de rigidez abrupta da longarina, iniciou-se após o instante de 0,0168s. Assim como na Seção 4.4.1.1, foram analisados os picos máximos, desaceleração média e somatório das amplitudes.

O resultado do pico máximo de desaceleração, em relação a curva média representada na FIG 4.29, mostrou que longarinas que tiveram ruptura parcial de pontos de solda, apresentaram um pico de desaceleração de  $441 \text{ m/s}^2$  ( $44 \text{ g}$ ), enquanto que, longarinas com ruptura total (catastrófica) de pontos de solda tiveram pico máximo de  $308 \text{ m/s}^2$  ( $\approx 31 \text{ g}$ ). Estes valores de picos máximos indicados pelas curvas médias não estão representando os valores reais dos picos máximos, pois a curva média foi calculada em função do tempo. Analisando amostra por amostra, obteve-se um resultado contrário à curva média (FIG 4.29), uma vez que a média dos picos de desaceleração das longarinas que tiveram ruptura total (catastrófica) de pontos de solda foi de  $937 \text{ m/s}^2$  ( $\approx 94 \text{ g}$ ), enquanto que para as longarinas que tiveram ruptura parcial foi de  $680 \text{ m/s}^2$  ( $68 \text{ g}$ ). Então, como resultado final, foi considerado a média dos picos máximos, e não a curva média. Apesar dessa limitação, a curva média é importante, pois dá uma noção do comportamento geral de um determinado grupo de longarinas. Estatisticamente, as médias dos picos máximos se diferem entre os grupos de longarinas, quando aplicado a análise da variância (Anova) com nível de significância de 0,05.

Em relação a desaceleração média, os resultados mostram que não diferenças significativas entre os grupos de longarinas. Isto foi comprovado pela análise estatística em que foi aplicado análise da variância (Anova) com nível de significância de 0,05. A desaceleração média pelas longarinas que apresentaram ruptura total (catastrófica) de pontos de solda foi de  $174 \text{ m/s}^2$  ( $\approx 17 \text{ g}$ ), e nas que apresentaram ruptura parcial foi de  $168 \text{ m/s}^2$  ( $\approx 17 \text{ g}$ ).

A análise sobre o somatório das amplitudes foi realizada da mesma maneira que a descrita na Seção 4.4.1.1, os resultados mostraram que as longarinas que apresentaram ruptura total (catastrófica) de pontos de solda tiveram o somatório maior. Esta afirmação foi comprovada pela análise estatística. Na FIG 4.32 estão representadas as curvas de desaceleração média, separadas por seus respectivos grupos, e o somatório das amplitudes.

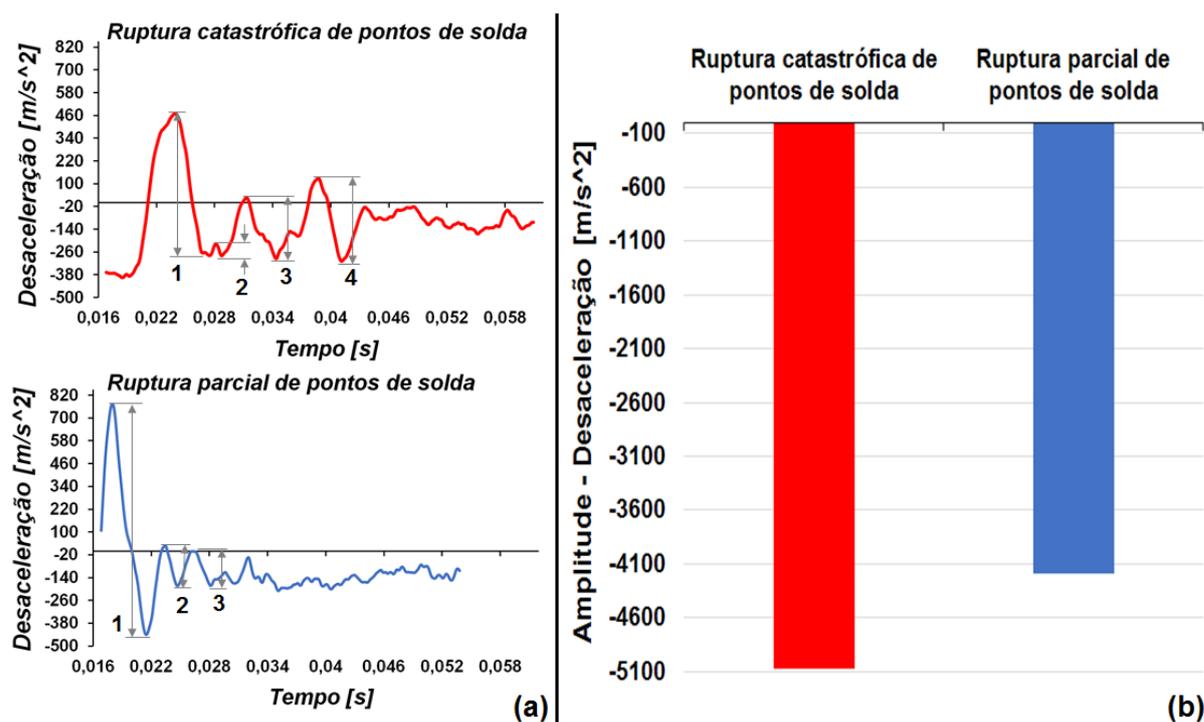


FIGURA 4.32 - (a) Amplitude - Desaceleração: picos-vaies; (b) Somatório das amplitudes.

#### 4.4.1.3 Análise comparativa entre o período de tempo anterior e posterior a perda de rigidez abrupta

As análises de desempenho, mostraram que os resultados do pico máximo, desaceleração média e somatório das amplitudes, foram diferentes para os períodos de tempo anterior e posterior ao fenômeno de perda de rigidez abrupta das longarinas. Os resultados sugerem que esse fenômeno tem influência sobre o comportamento da curva de desaceleração.

Na FIG 4.33 estão representados os indicadores de desempenho, considerando as variáveis e os períodos de tempo. É possível, identificar que as longarinas que apresentaram ruptura total (catastrófica) de pontos de solda, tiveram melhor desempenho no período de tempo anterior a perda de rigidez. No entanto, no período de tempo posterior a esse fenômeno, estas longarinas não tiveram um desempenho superior às longarinas que apresentaram ruptura parcial de pontos de solda. Em relação ao pico máximo de desaceleração e ao somatório de amplitudes, os resultados foram piores, porém, a desaceleração média não apresentou diferença significativa.

A priori, não é possível afirmar que as longarinas que apresentaram ruptura total (catastrófica) de pontos de solda terão melhor desempenho sobre uma estrutura veicular. Para certificar-se disto, serão necessários testes sobre estas estruturas. No entanto, os resultados sugerem que o desempenho relativo ao período de tempo anterior a perda de rigidez será

melhor. Como neste período de tempo, a longarina absorveu cerca de 80% de toda energia de colisão, os danos, possivelmente, serão maiores neste período. Além disso, as desacelerações médias não apresentaram diferenças significativas entre os grupos de longarina no período de tempo posterior a perda de rigidez abrupta. Os valores absolutos e desvio padrão estão representados no ANEXO B.

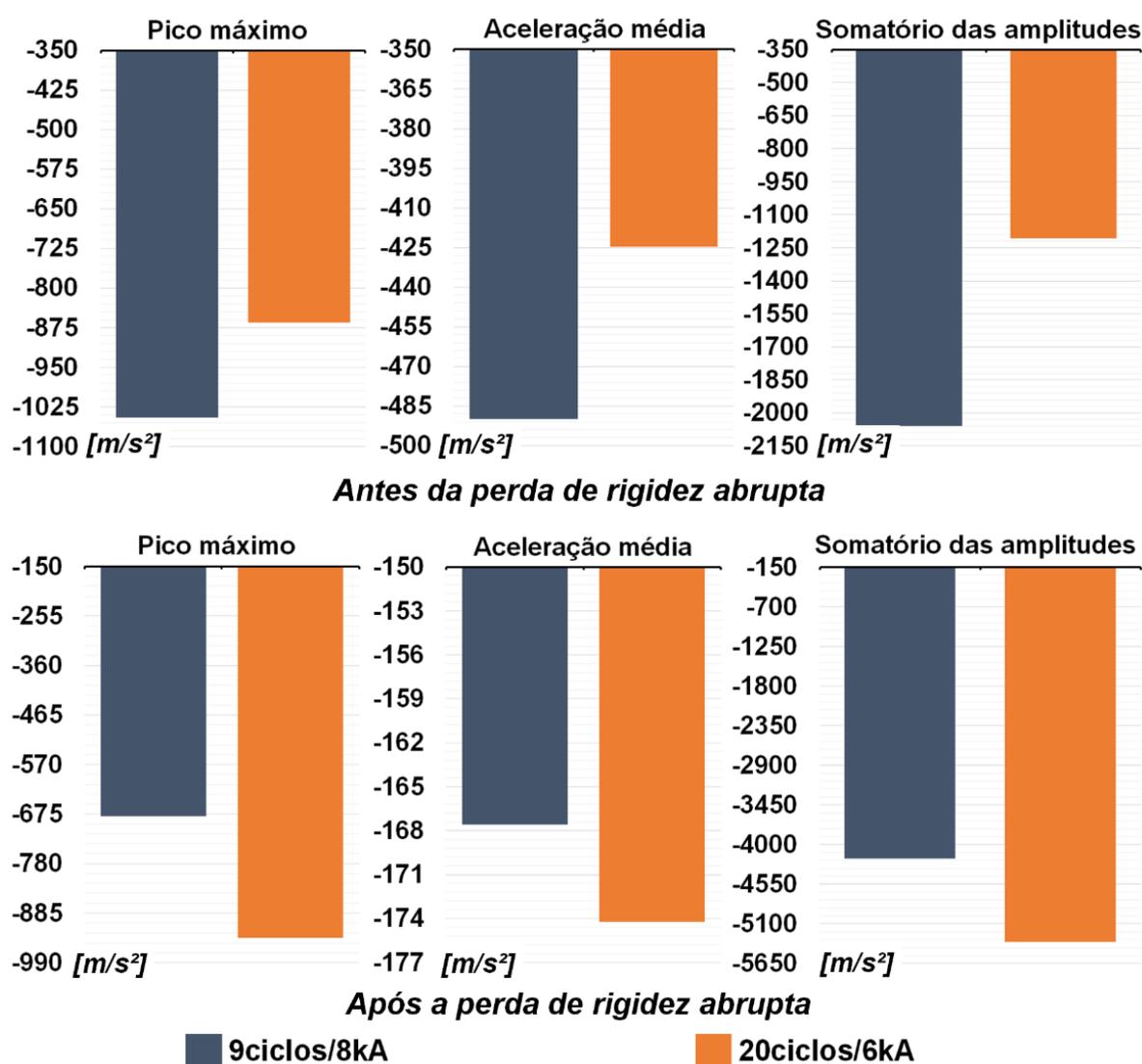


FIGURA 4.33 – Comparativo de desempenho entre os grupos de longarinas: período de tempo anterior e posterior a perda rigidez abrupta (curva de desaceleração).

Num primeiro momento, acreditou-se que a ruptura total (catastrófica) de pontos de solda na longarina era um resultado muito ruim. No entanto, após todas essas análises constatou-se que todas as longarinas que apresentaram essa falha tiveram desaceleração (geral) menor que as demais, portanto, sugerem que são mais seguras, em relação a integridade física dos ocupantes.

#### 4.5 Combinações de pontos de solda nas longarinas

Os pontos de solda produzidos com as condições de soldagem de 9ciclos/8kA e 20ciclos/6kA, foram combinados nas longarinas (FIG 3.18(c)(d)(e)(f)). O intuito, foi investigar o comportamento estrutural e o desempenho em desaceleração de longarinas com essas combinações. Acreditou-se que seria possível obter características comportamentais e desempenho dos dois grupos estudados na Seção 4.4.1. Assim, com combinações, possivelmente, as estruturas teriam características mistas. Isso significa que determinadas combinações poderão induzir mudanças de comportamento e desempenho. De forma que os melhores desempenhos individuais de cada um dos grupos estudados na Seção 4.4.1, poderão ser introduzidos a estrutura.

Na FIG 4.34 estão representadas as combinações de pontos de solda que serão investigadas, com as respectivas nomenclaturas adotadas, para as combinações das condições de soldagem de 9ciclos/8kA e 20ciclos/6kA.

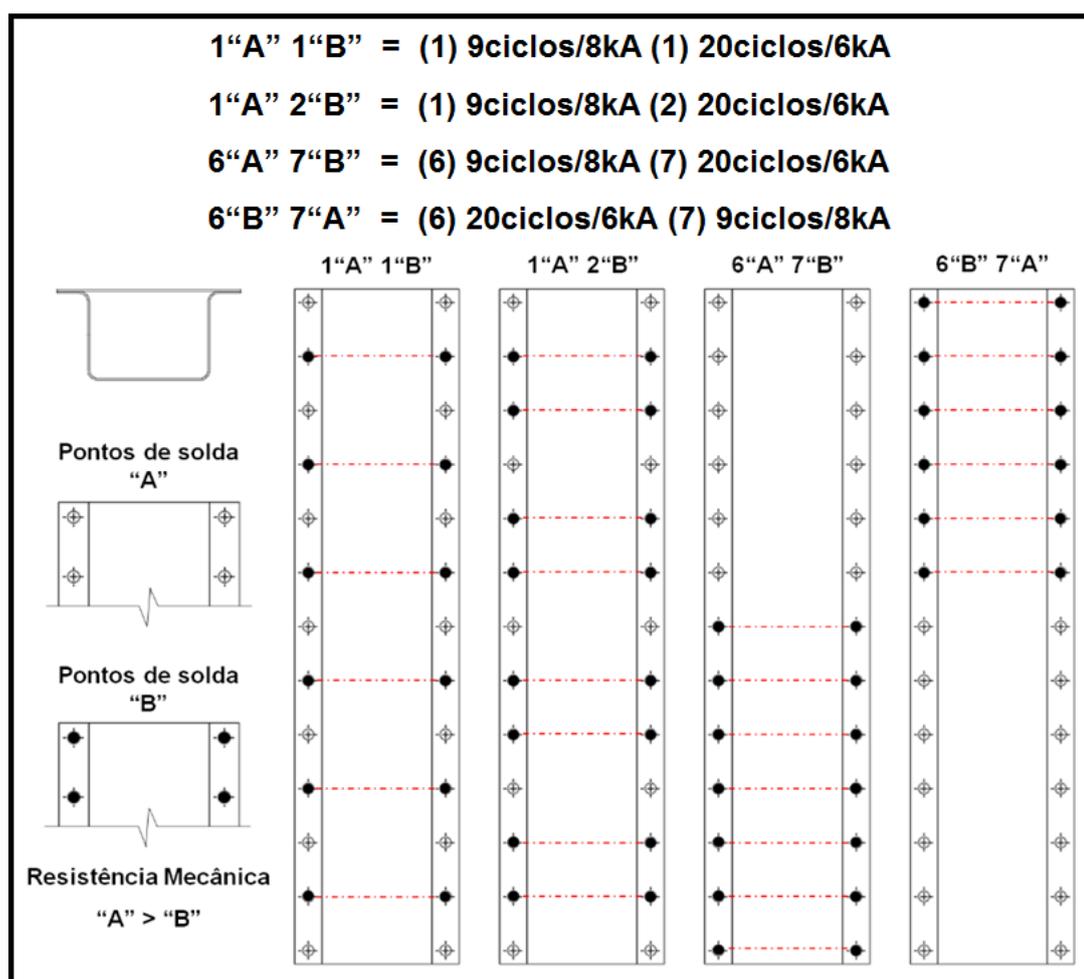


FIGURA 4.34 – Combinações de pontos de solda na longarina.

#### 4.5.1 Comportamento estrutural

Na FIG 4.35 está apresentado a deformação final das longarinas estudadas. Os resultados evidenciaram que o modo de deformação, ruptura de pontos de solda e o dobramento inicial, foram exatamente como os descritos nas Seções 4.2 e 4.3. Os resultados de deformação final referentes a cada corpo de prova, estão representadas no ANEXO B.

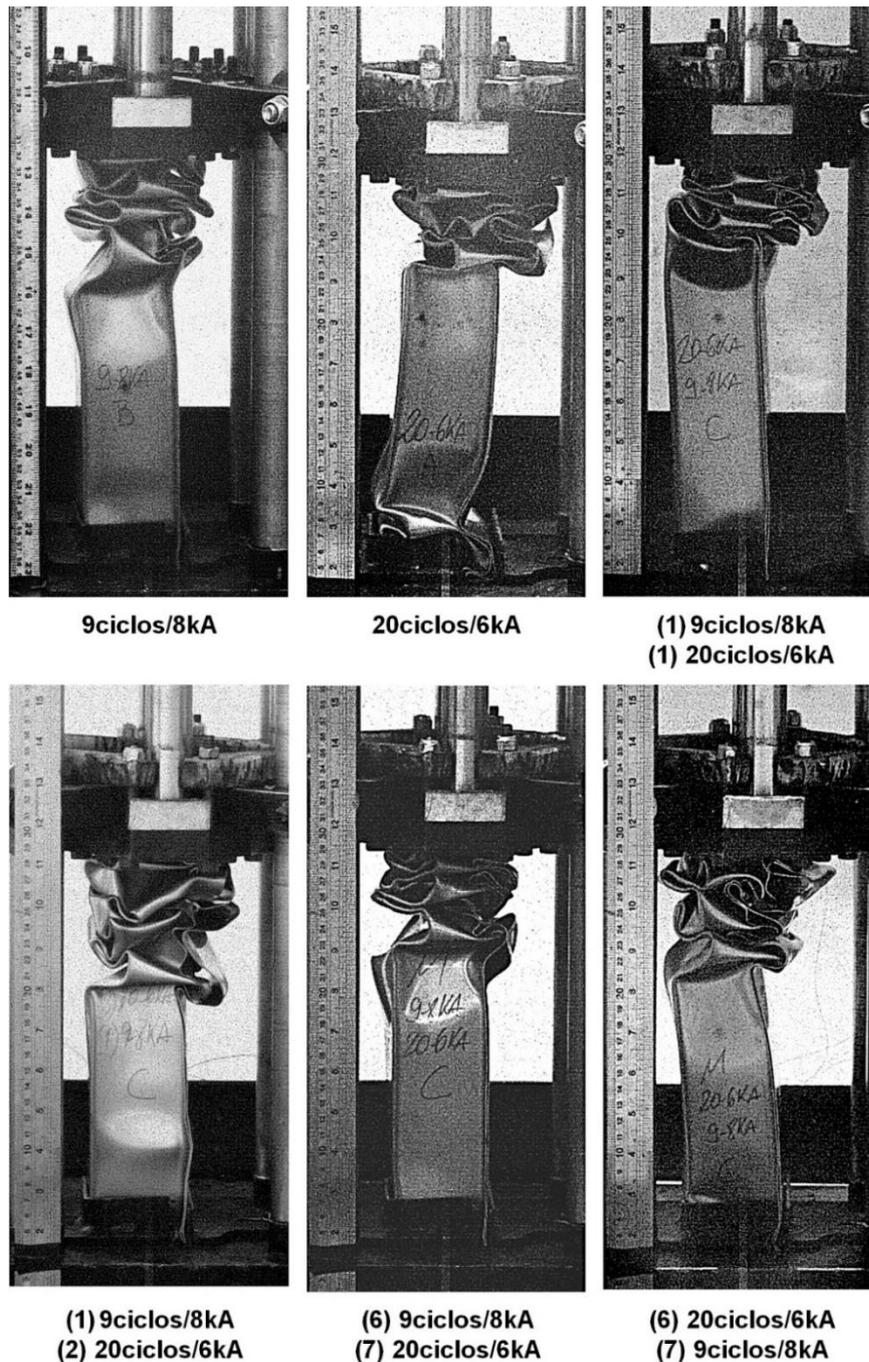


FIGURA 4.35 – Comportamento estrutural ao final da deformação. Imagens da câmera de alta velocidade.

Os resultados mostraram que as longarinas com combinações de pontos de solda, apresentaram características estruturais semelhantes as longarinas soldadas somente com o parâmetro de soldagem de 20ciclos/6kA. Várias características puderam ser obtidas desta análise:

Todas as longarinas com combinações de pontos de solda, apresentaram abertura do flange, fenômeno descrito na FIG 4.21. Webb et al (2001) afirmaram em seus estudos que a abertura flange em estruturas unidas por pontos espaçados, tem origem em uma imperfeição pré-existente, por exemplo uma abertura inicial entre as chapas de aproximadamente 0,23°. Em relação às longarinas, os resultados sugerem que o parâmetro de soldagem, conseqüentemente, a resistência mecânica do ponto de solda teve influência sobre esse fenômeno. Estudos específicos devem ser realizados para identificar a origem da abertura do flange em função do parâmetro de soldagem adotado.

Na TAB. 4.2 está representando o resultado referente ao modo de deformação descrito na FIG 4.21, na qual é destacado a abertura do flange.

TABELA 4.2  
Abertura do flange das longarinas.

Amostra	9ciclos/8kA	20ciclos/6kA	(1) 9ciclos/8kA (1) 20ciclos/6kA	(1) 9ciclos/8kA (2) 20ciclos/6kA	(6) 9ciclos/8kA (7) 20ciclos/6kA	(6) 20ciclos/6kA (7) 9ciclos/8kA
A	Não	Sim	Sim	Sim	Sim (região inferior)	Sim (região superior)
B	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim (região inferior)	Sim (região superior)
C	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim (região inferior)	Sim (região superior)

Os resultados da TAB 4.2, evidenciaram a influência da resistência mecânica do ponto de solda sobre esse modo de deformação. Todas as longarinas soldadas com a condição de soldagem 20ciclos/6kA apresentaram abertura do flange durante a deformação. As longarinas representadas por “(6) 9ciclos/8kA (7) 20cilcos/6kA” e “(6) 20cilcos/6kA (7) 9ciclos/8kA” (FIG 4.34) comprovam essa afirmativa, uma vez que o modo de abertura do flange ocorreu nas regiões da longarina onde haviam pontos de solda com menor resistência mecânica (20ciclos/6kA).

O dobramento inicial, descrito na FIG 4.18 confirma a hipótese de que este tem influência sobre a formação de “lóbulo” bem definidos e simétricos. A TAB 4.3 está representando o resultado do dobramento inicial das longarinas. Isto é, as longarinas foram classificadas pela orientação da primeira dobra, sabendo que todas iniciaram a deformação na

região superior (sentido axial). Foram classificadas comparando-as com a orientação da longarina representada na FIG 4.18 (b) a qual os resultados sugerem induzir a formação de lóbulos bem definidos e simétricos.

TABELA 4.3  
Orientações da primeira dobra.

<i>Dobramento inicial (orientação primeira dobra) conforme longarina representada na FIG 4.14(b)</i>						
Amostra	9ciclos/8kA	20ciclos/6kA	(1) 9ciclos/8kA (1) 20ciclos/6kA	(1) 9ciclos/8kA (2) 20ciclos/6kA	(6) 9ciclos/8kA (7) 20ciclos/6kA	(6) 20ciclos/6kA (7) ciclos/8kA
A	Não	Não	Sim	Não	Não	Não
B	Não	Não	Sim	Não	Sim	Não
C	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Sim

O resultado mostrado na TAB. 4.3 sugere que o dobramento inicial não é influenciado pela resistência mecânica dos pontos de solda, uma vez que não foi possível fazer uma correlação direta.

Em todas as longarinas que apresentaram ruptura total (catastrófica) de pontos de solda, necessariamente, os pontos que falharam foram os pontos de solda produzidos com o parâmetro de soldagem 20ciclos/6kA. Este resultado deixa claro que é possível induzir rupturas de pontos de solda sobre a estrutura, e que estas rupturas influenciam o modo de deformação das longarinas. No ANEXO B estão representadas todas as longarinas estudadas.

Quanto à estabilidade estrutural, foi evidenciado que todas as longarinas que apresentaram abertura do flange, influenciado muitas vezes pela ruptura catastrófica de pontos de solda, sofreram flambagem. Este fenômeno é indesejado, uma vez que causa instabilidade na estrutura. Apesar deste fenômeno ter ocorrido em todas as longarinas soldadas com o parâmetro 20ciclos/6kA (menor resistência) (FIG 4.34), aparentemente essa instabilidade não teve influência sobre a compressão das longarinas, uma vez que aplicando o teste t de Student com nível de significância de 0,05, as médias de deformação (compressão) não apresentaram diferenças significativas comparando com longarinas que não tiveram essa instabilidade (ANEXO B). Na FIG 4.36 estão representados os indicadores de compressão das longarinas.

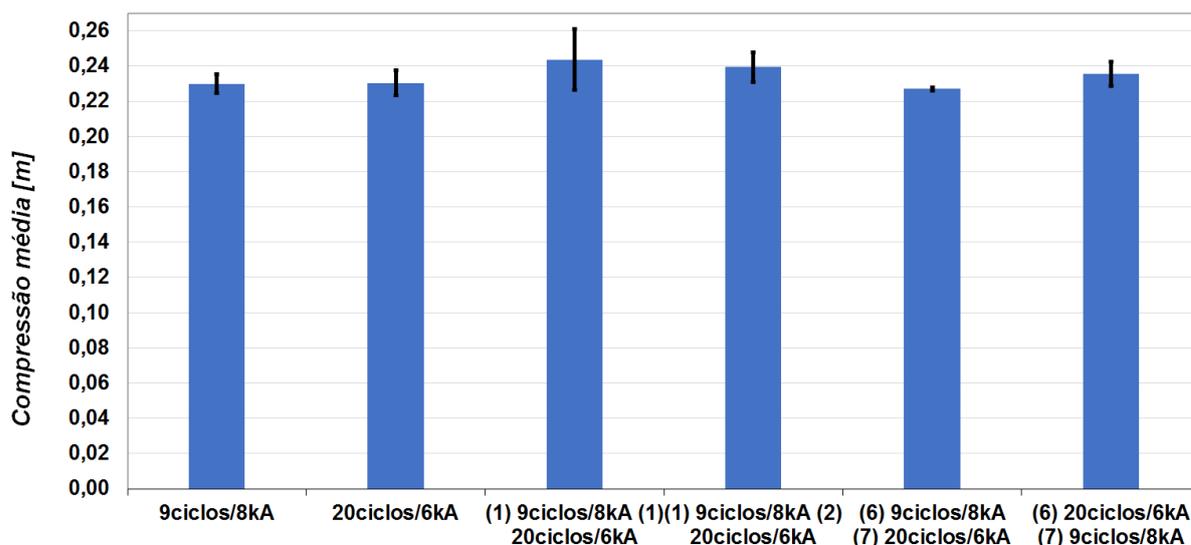


FIGURA 4.36 – Compressão média dos grupos de longarinas.

Apesar da análise estatística comprovar que não há diferenças significativas em relação a compressão. Os resultados sugerem que longarinas representadas por “(6) 9ciclos/8kA (7) 20ciclos/6kA” tendem a comprimir menos que as demais estudadas. E, longarinas representadas por “(1) 9ciclos/8kA (1) 20ciclos/6kA” tendem a serem mais instáveis, tendo maior compressão. Este resultado reforça a tese de que a combinação de pontos de solda influencia o comportamento estrutural da longarina.

#### 4.5.2 Desaceleração: longarinas com combinações de pontos de solda

Nesta seção, foram realizadas análises de desaceleração nas longarinas com combinações de pontos de solda de diferentes resistências mecânica (FIG 4.34). Os resultados foram comparados às longarinas representadas por “9ciclos/8kA” e “20ciclos/6kA” (FIG 4.25). A análise realizada foi semelhante a utilizada na Seção 4.4.1. Na TAB. 4.4 está apresentando um resumo comparativo entre os grupos estudados como referências. Para esta comparação foram utilizados o teste t de Student com nível de significância de 0,05. É importante salientar que o intuito desta análise, foi verificar a influência da resistência mecânica do ponto de solda sobre o comportamento em desaceleração das estruturas. E ainda, identificar se as combinações de pontos de solda nas longarinas induzem comportamento mistos. Isto é, avaliar se é possível introduzir na estrutura comportamentos desejados por meio de combinações de pontos de solda com diferentes resistências mecânica.

TABELA 4.4

Análise comparativa entre longarinas representadas por “9ciclos/8kA” e “20ciclos/6kA”.

<b>Teste de Hipotese: <math>H_0: \mu_1 = \mu_2</math> / <math>H_1: \mu_1 \neq \mu_2</math></b>				
<b>Comparativo</b>	<b>Pico máximo</b>	<b>Desaceleração média</b>	<b>Somatório das amplitudes</b>	
“9ciclos/8kA” e “20ciclos/6kA”	<b>Rejeita <math>H_0</math></b>	<b>Rejeita <math>H_0</math></b>	<b>Rejeita <math>H_0</math></b>	<b>Antes da perda de rigidez</b>
	<b>Rejeita <math>H_0</math></b>	<b>Aceita <math>H_0</math></b>	<b>Rejeita <math>H_0</math></b>	<b>Após a perda de rigidez</b>

Os resultados apresentados na TAB. 4.4 foram discutidos em detalhes na Seção 4.4.1. Em resumo, a TAB. 4.4, destaca que há diferenças significativas em relação as médias dos picos máximos, desaceleração média e somatório das amplitudes. Logo, a resistência mecânica dos pontos de solda, estatisticamente, tem influência sobre a resposta das longarinas.

Na FIG 4.37 estão representadas as curvas de desaceleração média de todos os grupos de longarinas estudados. Nesta análise inicial, duas variáveis de influência devem ser destacadas. A primeira, refere-se ao pico máximo de desaceleração, o qual teve seus valores tendendo para longarinas representadas por “9ciclos/8kA” ou “20ciclos/6kA”, mostrando que a combinação de pontos de solda pode fazer o pico máximo variar (posteriormente as curvas serão discutidas separadamente). A segunda, refere-se ao instante de perda de rigidez abrupta da longarina (aceleração positiva), ficou evidente que as longarinas com pontos combinados, tendem a ter esse comportamento semelhante as longarinas representadas por “20ciclos/6kA”.

As FIG 4.38, 4.39, 4.40 e 4.41 estão representanda as curvas de desaceleração média, em que as longarinas com pontos de solda combinados foram comparadas com as longarinas representadas por “9ciclos/8kA” e “20ciclos/6kA”. Com essa análise, foi possível identificar diferenças e semelhanças de comportamento. As curvas referentes a cada corpo de prova, estão no ANEXO B.

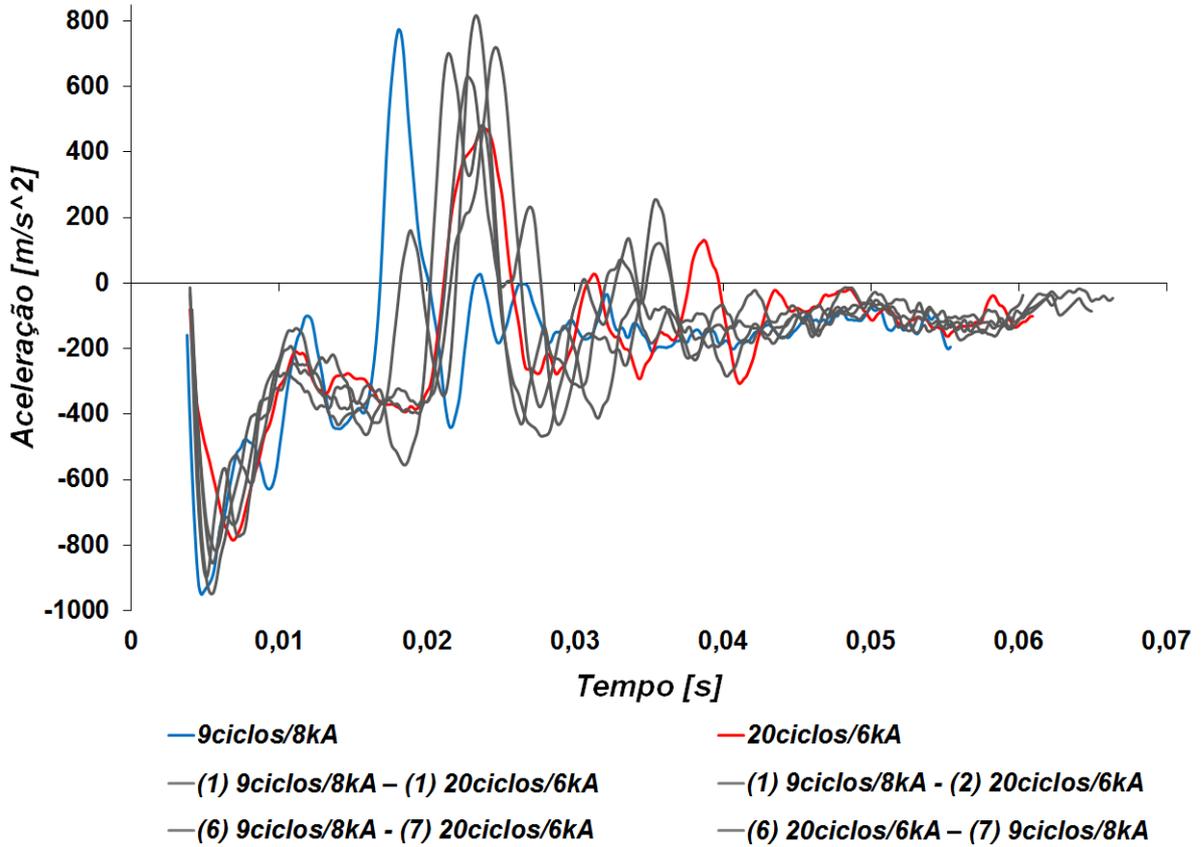


FIGURA 4.37 – Curvas de desaceleração: comparativo entre os grupos de longarinas.

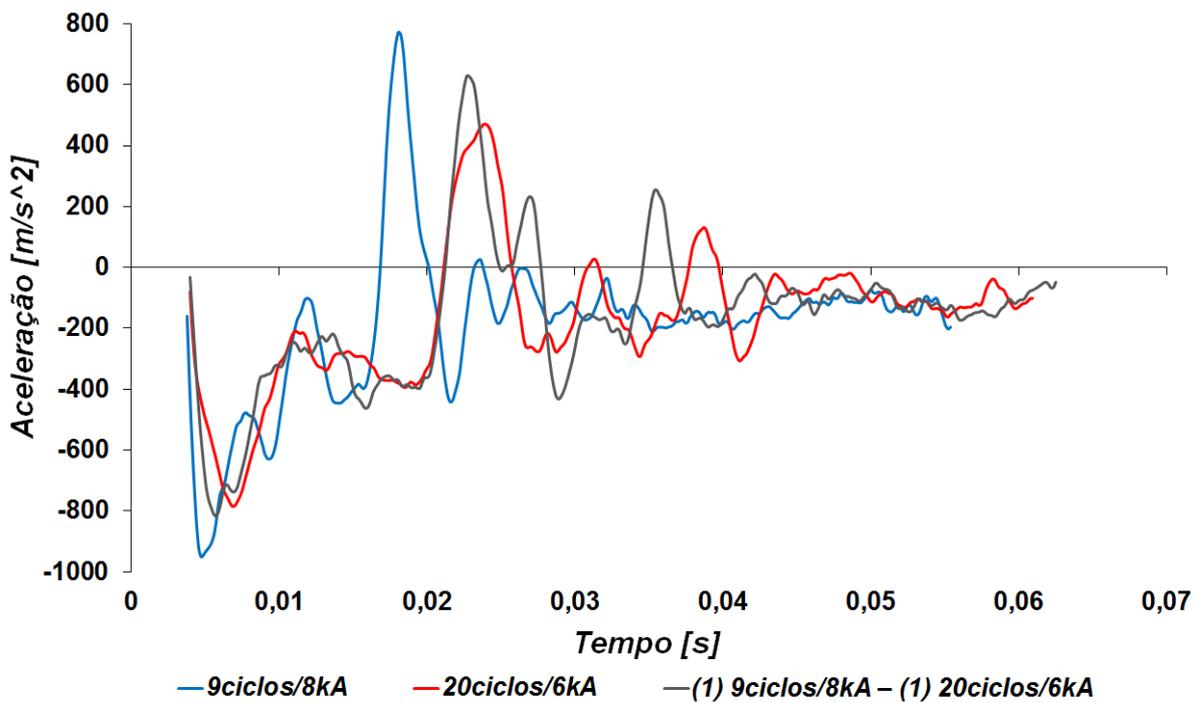


FIGURA 4.38 – Curva de desaceleração: análise comparativa do comportamento de longarinas representadas por “(1) 9ciclos/8kA (1) 20ciclos/6kA”.

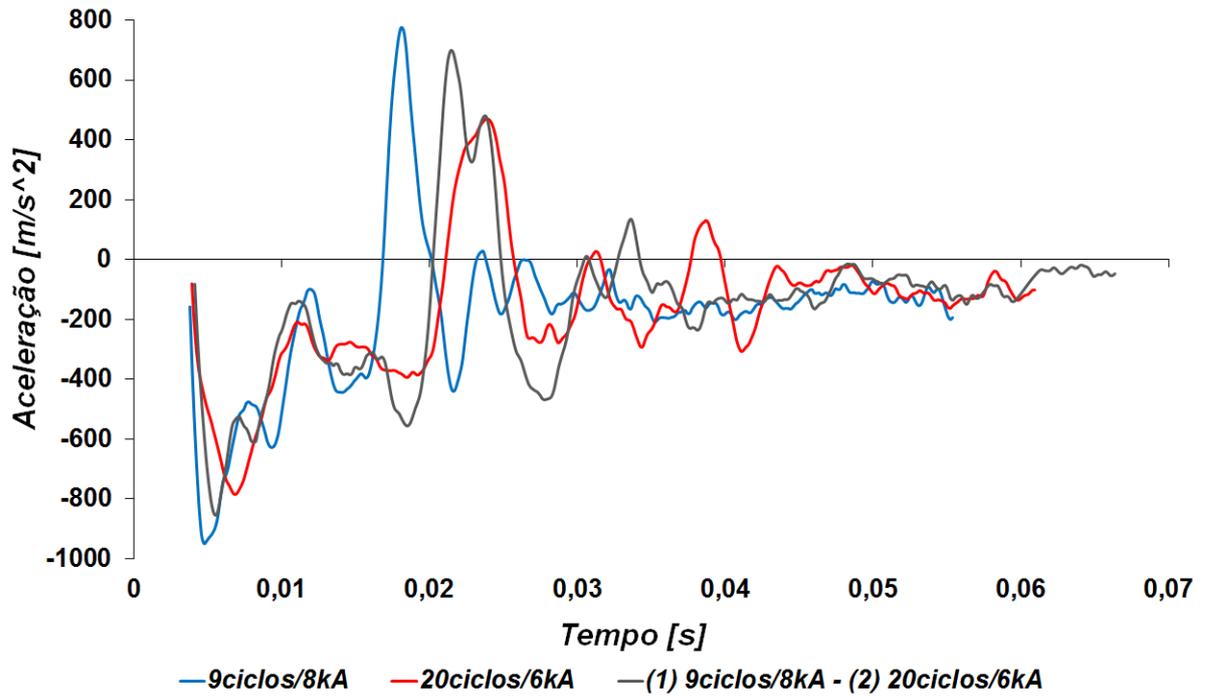


FIGURA 4.39 – Curva de desaceleração: análise comparativa do comportamento de longarinas representadas por “(1) 9ciclos/8kA (2) 20ciclos/6kA”.

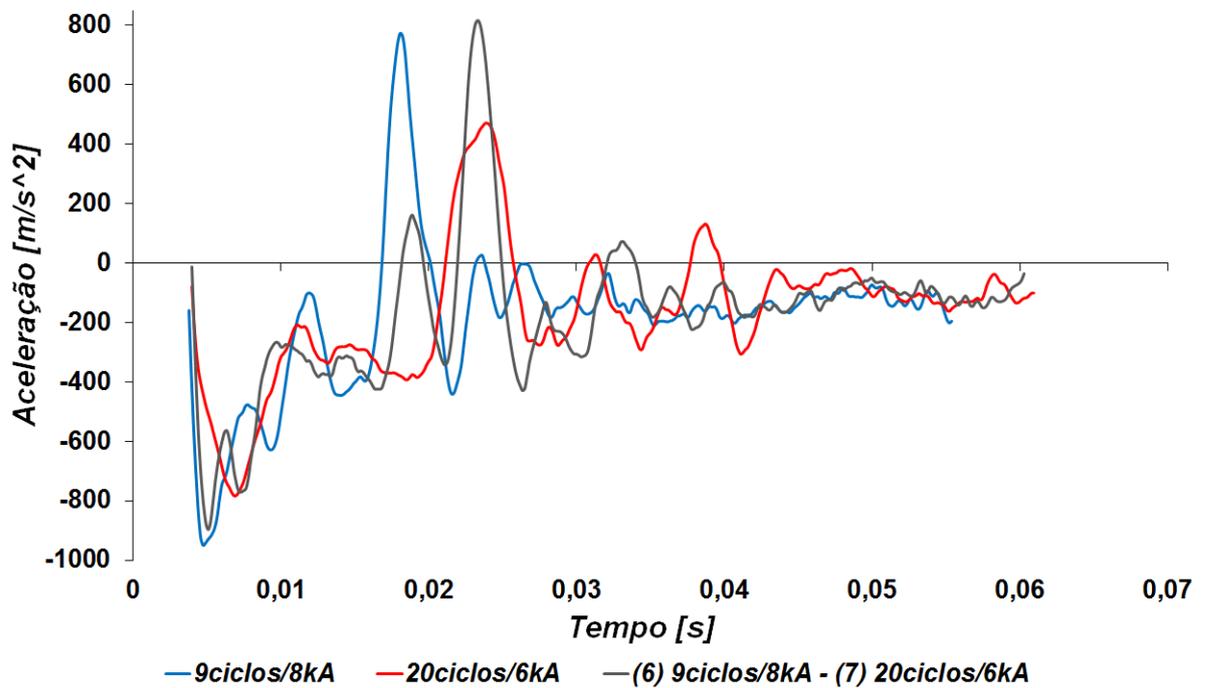


FIGURA 4.40 – Curva de desaceleração: análise comparativa do comportamento de longarinas representadas por “(6) 9ciclos/8kA (7) 20ciclos/6kA”.

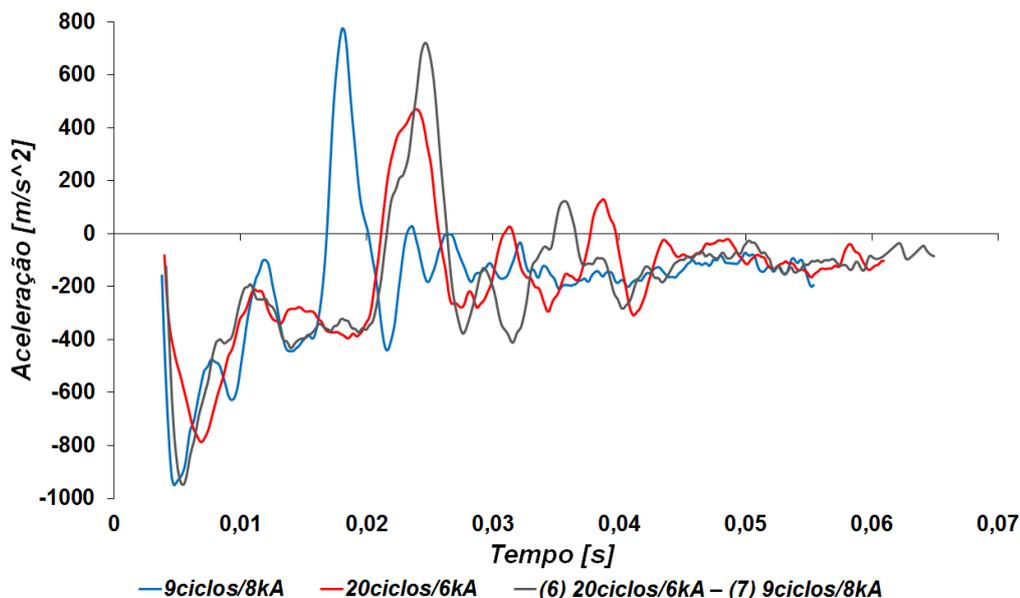


FIGURA 4.41 – Curva de desaceleração: análise comparativa do comportamento de longarinas representadas por “(6) 20ciclos/6kA (7) 9ciclos/8kA”.

Assim como na Seção 4.4.1.1, a energia absorvida deve ser investigada a fim de identificar se há diferenças significativas entre os grupos de longarinas. Na FIG 4.42 tem-se as curvas de energia média absorvida pelos grupos de longarinas estudados. Considerando o fenômeno da perda de rigidez abrupta, o qual está destacado pela linha tracejada (FIG 4.42), foi comprovado estatisticamente que as longarinas não apresentaram diferenças significativas quanto a energia absorvida (Anexo C6).

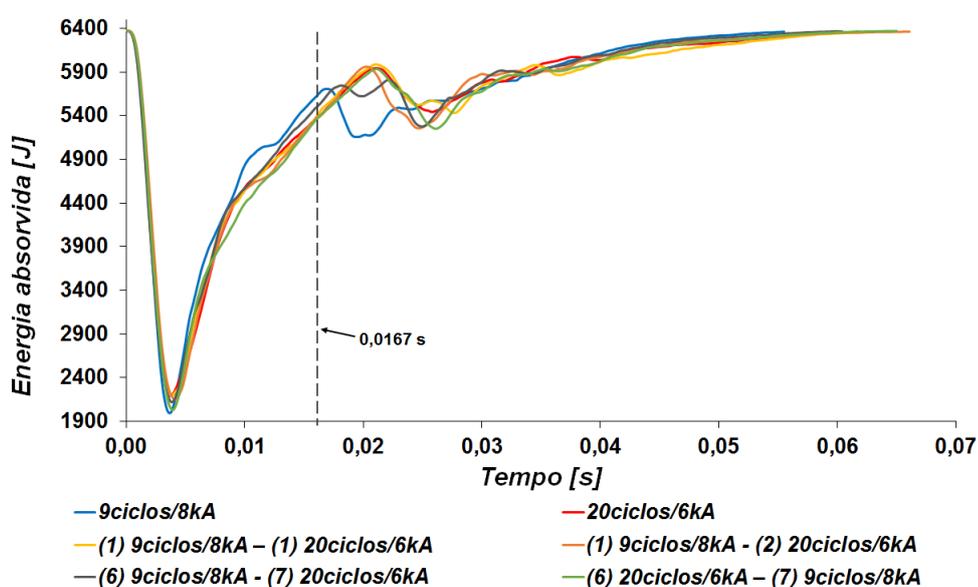


FIGURA 4.42 – Curvas de energia absorvia: comparativo entre os grupos de longarinas.

Na FIG 4.43 estão apresentados indicadores de desempenho de todos os grupos de longarinas investigados. As variáveis analisadas foram o pico máximo, desaceleração média e o somatório das amplitudes, em períodos de tempo anteriores e posteriores ao fenômeno de perda de rigidez abrupta das longarinas, assunto discutido nas Seções 4.4.1.1 e 4.4.1.2. Na FIG 4.43 é possível identificar a tendência do comportamento das longarinas com combinações de pontos de solda.

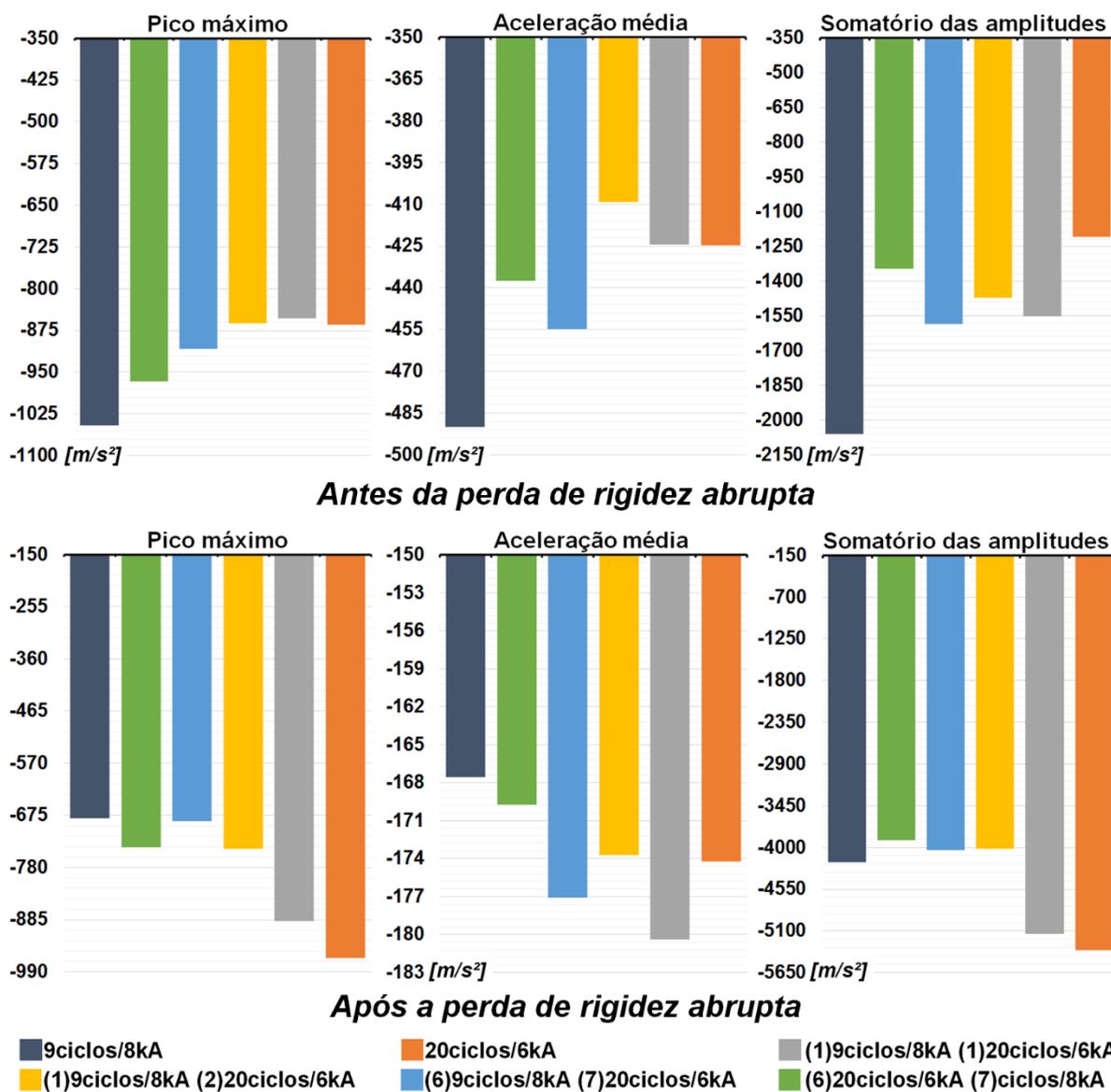


FIGURA 4.43 – Comparativo de desempenho entre os grupos de longarinas: período de tempo anterior e posterior a perda rigidez abrupta (curva de desaceleração).

A fim de otimizar as análises, as TAB. 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8, fazem um resumo comparativo estatístico das semelhanças e diferenças entre longarinas com combinações de pontos de solda e as longarinas utilizadas como referência (“9ciclos/8kA” e “20ciclos/6kA”).

Os resultados das interações entre as longarinas com combinações de pontos de solda estão apresentados no ANEXO B, assim como, as médias e desvio padrão de todos os grupos estudados.

Analisando a TAB 4.5, os resultados mostram que longarinas representadas por “(1) 9ciclos/8kA (1) 20ciclos/6kA” (FIG 4.38), tendem a se comportar semelhantemente as longarinas representadas por “20ciclos/6kA”. Nesta comparação, evidenciou-se que as médias dos picos máximos e a desaceleração média obtidas no período de tempo anterior a perda de rigidez, não apresentaram diferenças significativas. Porém, o somatório das amplitudes no período de tempo anterior a perda de rigidez, apresentou diferenças significativas em relação as longarinas representadas por “20ciclos/6kA”. Apesar desta diferença, é notória a semelhança no comportamento. Com relação aos resultados posteriores ao fenômeno de perda de rigidez, foi evidenciado que as médias das três variáveis analisadas não apresentaram, estatisticamente, diferenças significativas. Em comparação com as longarinas representadas por “9ciclos/8kA”, apresentaram diferenças significativas.

TABELA 4.5

Análise comparativa: “9ciclos/8kA” e “(1)9ciclos/8kA(1)20ciclos/6kA”, “20ciclos/6kA” e “(1)9ciclos/8kA(1)20ciclos/6kA”

<b>Teste de Hipotese: H0: <math>\mu_1 = \mu_2</math> / H1: <math>\mu_1 \neq \mu_2</math></b>				
<b>Comparativo</b>	<b>Pico máximo</b>	<b>Desaceleração média</b>	<b>Somatório das amplitudes</b>	
<b>“9ciclos/8kA” e “(1) 9ciclos/8kA (1) 20ciclos/6kA”</b>	<b>Rejeita H0</b>	<b>Rejeita H0</b>	<b>Rejeita H0</b>	<b>Antes da perda de rigidez</b>
	<b>Rejeita H0</b>	<b>Aceita H0</b>	<b>Rejeita H0</b>	<b>Após a perda de rigidez</b>
<b>“20ciclos/6kA” e “(1) 9ciclos/8kA (1) 20ciclos/6kA”</b>	<b>Aceita H0</b>	<b>Aceita H0</b>	<b>Rejeita H0</b>	<b>Antes da perda de rigidez</b>
	<b>Aceita H0</b>	<b>Aceita H0</b>	<b>Aceita H0</b>	<b>Após a perda de rigidez</b>

Os resultados representados na TAB. 4.6 mostram que longarinas representadas por “(1) 9ciclos/8kA (2) 20ciclos/6kA” (FIG 4.39), tendem a se comportar de forma mista, com algumas características semelhantes as longarinas representadas por “20ciclos/6kA” ou outras as longarinas representadas por “9ciclos/8kA”. Em relação ao período de tempo anterior ao fenômeno de perda de rigidez abrupta, tem-se que a média dos picos máximos e a desaceleração média apresentaram resultados semelhantes as longarinas representadas por “20ciclos/6kA”. No entanto, os resultados posteriores a perda de rigidez, mostraram que as médias dos picos

máximos e o somatório das amplitudes foram semelhantes as longarinas representadas por “9ciclos/8kA”.

TABELA 4.6

Análise comparativa: “9ciclos/8kA” e “(1)9ciclos/8kA(2)20ciclos/6kA”, “20ciclos/6kA” e “(1)9ciclos/8kA(2)20ciclos/6kA”

<b>Teste de Hipotese: <math>H_0: \mu_1 = \mu_2</math> / <math>H_1: \mu_1 \neq \mu_2</math></b>				
<b>Comparativo</b>	<b>Pico máximo</b>	<b>Desaceleração média</b>	<b>Somatório das amplitudes</b>	
“9ciclos/8kA” e “(1) 9ciclos/8kA (2) 20ciclos/6kA”	Rejeita H0	Rejeita H0	Rejeita H0	Antes da perda de rigidez
	Aceita H0	Aceita H0	Aceita H0	Após a perda de rigidez
“20ciclos/6kA” e “(1) 9ciclos/8kA (2) 20ciclos/6kA”	Aceita H0	Aceita H0	Rejeita H0	Antes da perda de rigidez
	Rejeita H0	Aceita H0	Rejeita H0	Após a perda de rigidez

Os resultados representados na TAB. 4.7 mostram que longarinas representadas por “(6) 9ciclos/8kA (7) 20ciclos/6kA” (FIG 4.40), tendem a se comportar de forma mista, com algumas características semelhantes as longarinas representadas por “20ciclos/6kA” ou outras as longarinas representadas por “9ciclos/8kA”. Em relação ao período de tempo anterior ao fenômeno de perda de rigidez abrupta, tem-se que a média dos picos máximos apresentou resultado semelhantes as longarinas representadas por “20ciclos/6kA”. Porém, em relação a desaceleração média e o somatório das amplitudes, o comportamento das foi mediano, isto é, não está entre os dois grupos de referência. Os resultados posteriores a perda de rigidez, mostraram que as médias dos picos máximos e o somatório das amplitudes foram semelhantes as longarinas representadas por “9ciclos/8kA”.

TABELA 4.7

Análise comparativa: “9ciclos/8kA” e “(6) 9ciclos/8kA(7)20ciclos/6kA”, “20ciclos/6kA” e “(6)9ciclos/8kA(7)20ciclos/6kA”

<b>Teste de Hipotese: <math>H_0: \mu_1 = \mu_2</math> / <math>H_1: \mu_1 \neq \mu_2</math></b>				
<b>Comparativo</b>	<b>Pico máximo</b>	<b>Desaceleração média</b>	<b>Somatório das amplitudes</b>	
“9ciclos/8kA” e “(6) 9ciclos/8kA (7) 20ciclos/6kA”	Rejeita H0	Aceita H0	Rejeita H0	Antes da perda de rigidez
	Aceita H0	Aceita H0	Aceita H0	Após a perda de rigidez
“20ciclos/6kA” e “(6) 9ciclos/8kA (7) 20ciclos/6kA”	Aceita H0	Aceita H0	Rejeita H0	Antes da perda de rigidez
	Rejeita H0	Aceita H0	Rejeita H0	Após a perda de rigidez

Os resultados representados na TAB. 4.8 mostram que longarinas representadas por “(6) 20ciclos/6kA (7) 9ciclos/8kA” (FIG 4.41), tendem a se comportar de forma mista, com algumas características semelhantes as longarinas representadas por “20ciclos/6kA” ou outras as longarinas representadas por “9ciclos/8kA”. Em relação ao período de tempo anterior ao fenômeno de perda de rigidez abrupta, tem-se que a desaceleração média e o somatório das amplitudes, apresentaram resultados semelhantes as longarinas representadas por “20ciclos/6kA”. Porém, em relação à média dos picos máximos foi semelhante aos resultados obtidos em longarinas representadas por “9ciclos/8kA”. Os resultados posteriores a perda de rigidez, mostraram que a média dos picos máximos e o somatório das amplitudes foram semelhantes as longarinas representadas por “9ciclos/8kA”.

TABELA 4.8

Análise comparativa: “9ciclos/8kA” e “(6)20ciclos/6kA(7) 9ciclos/8kA”, “20ciclos/6kA” e “(6)20ciclos/6kA(7) 9ciclos/8kA”

<b>Teste de Hipotese: H0: <math>\mu_1 = \mu_2</math> / H1: <math>\mu_1 \neq \mu_2</math></b>				
<b>Comparativo</b>	<b>Pico máximo</b>	<b>Desaceleração média</b>	<b>Somatório das amplitudes</b>	
“9ciclos/8kA” e “(6) 20ciclos/6kA (7) 9ciclos/8kA”	Aceita H0	Rejeita H0	Rejeita H0	Antes da perda de rigidez
	Aceita H0	Aceita H0	Aceita H0	Após a perda de rigidez
“20ciclos/6kA” e “(6) 20ciclos/6kA (7) 9ciclos/8kA”	Rejeita H0	Aceita H0	Rejeita H0	Antes da perda de rigidez
	Rejeita H0	Aceita H0	Rejeita H0	Após a perda de rigidez

Os resultados apresentados nas longarinas com combinações de pontos de solda, comprovaram que é possível induzir comportamentos a estrutura. Isto significa que a resposta da longarina em desaceleração pode ser alterada de acordo com as características mecânicas dos pontos de solda e combinação mesmos sobre a estrutura, a fim de atender necessidades pré-estabelecidas.

Em resumo, espera-se que uma longarina tenha algumas características em relação a desaceleração:

- (i) Menor pico de desaceleração, sem comprometer a capacidade de absorção de energia;
- (ii) Menor desaceleração média;
- (iii) Menor somatório das amplitudes, conseqüentemente, menor instabilidade.

Todos as longarinas com combinações de pontos de solda, apresentaram pelo menos uma melhoria em relação as variáveis de desaceleração investigadas, quando comparadas aos grupos de referência (“9ciclos/8kA” e “20ciclos/6kA”) (FIG 4.25). Por exemplo, as longarinas representadas por “(6) 9ciclos/8kA (7) 20ciclos/6kA”. Apresentaram seus resultados que sugerem a melhoria de desempenho quando comparado aos grupos de referência (“9ciclos/8kA” e “20ciclos/6kA”). Estas longarinas representadas por “(6) 9ciclos/8kA (7) 20ciclos/6kA”, incorporaram características dissimilares dos grupos de referência, esse comportamento melhorou o desempenho estrutural. A média dos picos máximos e desaceleração média, referente ao período de tempo anterior a perda de rigidez, se comportaram semelhantes as longarinas representadas por “20ciclos/6kA”, as quais apresentaram menores grandezas. E, o somatório das amplitudes foi intermediário aos dois grupos de referência, isso significa que a instabilidade foi mediana. No período de tempo posterior a perda de rigidez, a média dos picos máximos, a desaceleração média e o somatório das amplitudes se comportaram semelhantes as longarinas representadas por “9ciclos/8kA”, as quais apresentaram menores grandezas. A variável compressão, também, deve ser considerada nesta análise, uma vez que o desejável de uma longarina em aplicação veicular, é que a compressão seja a menor possível. Neste caso, as longarinas representadas por “(6) 9ciclos/8kA (7) 20ciclos/6kA” tenderam a ter menor compressão (FIG 4.36).

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 Caracterização mecânica dos pontos de solda

- (a) A corrente de soldagem tem mais influência nas propriedades mecânicas do que o tempo de soldagem.
- (b) A máquina construída para o ensaio de torção, mostrou-se sensível às mudanças das condições de soldagem estabelecidos, as quais produziram pontos de solda com diferentes resistências mecânicas.
- (c) As energias de ruptura dos pontos de solda foram maiores no ensaio de torção do que no ensaio de arrancamento. Este resultado, contraria o esperado, uma vez que a força de arrancamento é superior à força de torção.
- (d) Na análise macroscópica, foi evidenciado que o ensaio de torção concentra os esforços na lente de solda, enquanto que o ensaio de arrancamento concentra parte dos esforços nas chapas (metal de base) que compõem o corpo de prova.

### 5.2 Fatores de influência na deformação da longarina

- (a) Todas as longarinas testadas, independente da condição de teste, apresentaram torção de ponto de solda em pelo menos um ponto. O ângulo de torção médio foi de 10°.
- (b) Pontos de solda que sofreram ruptura total, estão predominantemente sobre ação do esforço de arrancamento, porém, a superfície da fratura destes, sugerem a presença do esforço de torção. Por isso, pode-se afirmar que os esforços no ponto de solda são combinados: arrancamento e torção.
- (c) Foram identificados dois modos de deformação característicos: com e sem abertura do flange.
- (d) O dobramento inicial (primeira dobra) das arestas da seção transversal das longarinas, região superior, tem influência direta sobre a formação de lóbulos.
- (e) A abertura do flange teve maior influência sobre a simetria (vista lateral) do que o dobramento inicial das arestas. Isso significa que a formação de lóbulos bem definidos não impede que a longarina tenha deformações assimétricas, ou seja, deslocamento lateral (flambagem).

- (f) A ruptura total (catastrófica) de pontos de solda teve maior influência sobre as deformações que o dobramento inicial das arestas e que a abertura do flange. Em alguns casos, se não tivesse ocorrido a ruptura total (catastrófica), não teria tido abertura do flange.
- (g) Duas condições de soldagem foram definidas, as quais produziram pontos de solda com maior e menor resistência mecânica, um em relação ao outro. Estes, foram utilizados na fabricação de longarinas. Então:
  - (I) Todas as longarinas soldadas com a condição de soldagem que produziu pontos de solda com menor resistência mecânica, apresentaram pelo menos uma ruptura total (catastrófica) de ponto de solda.
  - (II) Longarinas que apresentaram ruptura total (catastrófica) de ponto de solda, tiveram curvas de desaceleração semelhantes. Inclusive, longarinas soldadas com o parâmetro de soldagem que produziu pontos de solda com maior resistência mecânica. Concluiu-se que a ruptura total (catastrófica) de pontos de solda é a variável de maior influência para a resposta em desaceleração.
  - (III) Entre os dois grupos de longarinas, representados por pontos de solda com maior e menor resistência mecânica, estes, não apresentaram diferenças significativas em relação a compressão máxima e a energia absorvida.
  - (IV) Os resultados de energia absorvida pelas longarinas, mostraram que após transcorridos 30% do tempo de deformação, cerca de 80% da energia de colisão havia sido absorvida pelas longarinas, em ambos os grupos.

### **5.3 Longarinas com combinações de pontos de solda**

- (a) Diferentes combinações de pontos de solda, produziram diferentes respostas em desaceleração nas longarinas. A resistência mecânica do ponto de solda tem influência sobre a desaceleração.
- (b) Todas as longarinas com combinações de pontos de solda, apresentaram abertura do flange.
- (c) Todas as longarinas que apresentaram ruptura total (catastrófica) de pontos de solda, necessariamente, os pontos que falharam, foram os pontos de solda produzidos com a condição de soldagem que produziu pontos com menor resistência mecânica.
- (d) Todas as longarinas com combinações de pontos de solda, apresentaram pelo menos uma melhoria em relação as variáveis de desaceleração investigadas, quando comparadas aos grupos de referência.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos nesse trabalho estabelecem novas perspectivas de estudo. Podem-se destacar como possíveis sugestões para trabalhos futuros:

- Análise sobre a orientação da primeira dobra. Propõem-se fazer pré dobras nas arestas superiores das longarinas com o intuito de induzir a formação de lóbulos bem definidos.
- Considerando as combinações de pontos de solda estudados, variar a distância entre os pontos de solda a fim de induzir deformações estáveis.
- Realizar teste de colisão sobre estruturas veiculares ou trenós, utilizando longarinas com combinações de pontos de solda (maior e menor resistência mecânica) com o intuito de avaliar a desaceleração que os ocupantes estarão sujeitos.
- Utilizar duas câmeras de alta velocidade nas análises de deformação e desaceleração.
- Estudar combinações de pontos de solda em outros perfis de longarina, seção transversal simétrica.

## ABSTRACT

Crash boxes are structural components of vehicular bodies that have the function of absorbing the kinetic energy in situations of frontal collision. These are manufactured from welded sheets by process of resistance spot welding. In this context, this study investigated the interaction between spot welds with different mechanical strengths combined or not on thin-walled, structural sections subjected to collision tests. Factors influencing the deformation mode, such as the occurrence of torsion and catastrophic rupture of spot welds were identified and characterized. The specimens were constructed using an uncoated SAE 1006 carbon steel with a thickness of 0.90 mm. Four test conditions were established, the collision energy differing from each other. All the crash boxes tested had at least the torsion of a spot weld, average 10°. Two characteristic deformation modes were identified and described in the model form. Two welding parameters were defined to producing spot welds with higher and lower mechanical strength. This characterization was carried out by peel, torsion and metallographic tests. The torsion test was crucial for choosing one of the welding parameters. The spot weld of lower mechanical strength was approved in the peel and metallographic tests, however, it was failed in the torsion test. Crash boxes produced using these parameters were tested on a collision condition. The result showed that crash boxes constructed only with the welding parameter that produced spot welds with lower mechanical strength, showed catastrophic rupture of at least one point. However, crash boxes that had this result presented less deceleration in relation to the crash boxes constructed only with the parameter of welding that produced spot welds with greater mechanical resistance. This, considering that the average of maximum deformation and absorbed energy did not have significant differences between the groups. With regard to the crash boxes that were constructed combining these two parameters of welding, the intention was to promote ruptures of controlled spot welds. This means that spot welds with less mechanical strength were arranged on the structure considering possible rupture sites. The results showed that the mechanical strength of the spot weld influences the structural performance. That is, the crash box deceleration is influenced by the strength of the spot weld. By means of combinations of spot welds on the crash box, it has been proven that it is possible to induce desired performance on the structure. In all of the crash boxes which were combined welding parameters, the catastrophic spot weld ruptures occurred only at spot that were welded with the parameter that produces spot welds with less mechanical strength.

Keyword: Crash test, Vehicle crash box, Spot weld failure, Deformation modes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMOWICZ, W., JONES, N., *Dynamic axial crushing of square tubes*. International Journal Impact Engineering, 1984.

ABRAMOWICZ, W., *Thin-walled structures as impact energy absorbers*. Thin-Walled Structures 2003; 41: 91–107.

AMERICAN WELDING SOCIETY – AWS, *Welding and Brazing – Resistance Welding*. 9 ed., vol. 6, p. 468-493, 1983.

AMERICAN WELDING SOCIETY – AWS D8.9M, *Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials*. 3rd Edition, 2012.

ASLANLAR, S., OGUR, A., OZSARAC, U., ILHAN, E., *Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding*. Journal Materials & Design, 2007.

ASLANLAR, S., *The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry*. Journal Materials and Design, 2006.

BATISTA, M., *Estudo comparativo da soldabilidade de chapas para indústria automotiva utilizando dois equipamentos de soldagem a ponto por resistência*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 2011.

BELINGARDI, G., GOGLIO, L., ROSSETTO, M., *Impact behaviour of bonded built-up beams: experimental results*, International Journal of Adhesion & Adhesives, 2005.

BERTOCCHI, M.; *Segurança Veicular*. São Paulo: Skill Elaboração de Materiais Didáticos Ltda, 2005. 221 p.

BOIS, P. D., P. D., CHOU, C. C., FILETA, B. B., KHALIL, T. B., KING, A. I., MAHMOOD, H. F., MERTZ, H. J., WISMANS, J., *Vehicle crashworthiness and occupant protection*. American Iron and Steel Institute, 2000 Town Center Southfield, Michigan, 2004, p. 11-102.

CETLIN, P.R., SILVA, P.S.P. *Análise de Fraturas*. Associação Brasileira de Metais, Ed. 1, 1988.

CHAMBEL, P., MARTINS, R. F., REIS, L. *Research on fatigue crack propagation in CT specimens subjected to loading modes I, II or III*. Procedia Structural Integrity 2016; 1: 134–141.

CHAO, Y. J. *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, 2003.

CHEN, H., YANG, Y., WANG, L. *Vehicle front structure energy absorbing optimization in frontal impact*. The Open Mechanical Engineering Journal, Vol. 9, 2015.

CHIARO, A. J., *Spot welding setups need care, accuracy*. Welding Design & Fabrication, p.77-80, 1984.

COTA, B.S. *Metodologia para ensaio da resistência a torção de solda à ponto por resistência elétrica*. MSc Dissertation. Federal University of Minas Gerais 2015.

COURTNEY, T.H. *Mechanical Behavior of Metaterials*. Ed. 2, Waveland Pr Inc, 2005; 418-519p.

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

FURLANETTO, V., *Desenvolvimento e instrumentação de um cabeçote de soldagem a ponto por resistência elétrica para aplicação em condições industriais*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Tese Doutorado, 2014.

GARCIA, A.; SPIM, J.A; SANTOS, C, A., *Ensaio dos Materiais*. Campinas: LTC, 1999. 247 p.

GARDINALLI, G. J. *Comparação do desempenho de frenagem simulada x experimental de um veículo de passeio com freios hidráulicos e ABS*. Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 2005.

HAPPIAN-SMITH, J. *An introduction to modern vehicle design*. Oxford, UK: Butterworth Heinemann, 2002.

KARDOMATEAS, G. A., *Spot weld failure from buckling-induced stressing of beams under cyclic bending and torsion*. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 42. No.3. pp. 519-530. 1992.

INTERNATIONAL STANDARD – ISO 17653, *Resistance welding — Destructive tests on welds in metallic materials — Torsion test of resistance spot welds*. Second edition, 2012.

KHODABAKHSHI, F., KAZEMINEZHAD, M., KOKABI, A. H, *Mechanical properties and microstructure of resistance spot welded severely deformed low carbon steel*. Journal Materials Science and Engineering A, 2011.

LatinNCAP, *Programa de Avaliação de Carros Novos para América Latina e o Caribe*. Montevideo, Uruguay, 2018.

LUO, Y., WAN, R., YANG, Z., XIE, X., *Study on the thermo-effect of nugget growing in single-phase AC resistance spot welding based on the calculation of dynamic resistance*. Journal Measurement, v. 78, pp. 18–28, 2016.

MURRAY, N. W., *Load behavior of thin-walled spot welded structures used in the vehicle industry*. Department of Civil Engineering, Monash University, Australia, Journal Engineering Structure, 1994.

NASCIMENTO, V. C.; *Seleção de parâmetros de soldagem a ponto por resistência, baseando na medição da resistência elétrica entre chapas*. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2008.

PERONI, L., AVALLE, M., BELINGARDI, G., *Comparison of the energy absorption capability of crash boxes assembled by spot-weld and continuous joining techniques*. International Journal of Impact Engineering, Politecnico di Torino, Dipartimento di Meccanica, Corso Duca degli Abruzzi 24, Torino, Italy, 2008.

PODRZAJ, P., ROLAJNA, I., DIACI, J., KARIZ, Z., *Influence of welding current shape on expulsion and weld strength of resistance spot welds*. Sci. Technol. Weld. Join. 11, 2006, p.250–254.

REBELLO, J. M. A., ET all, *Soldagem por pontos de chapas zincadas*. Relatório final de pesquisa da COPPE/UFRJ, RJ, 105 p., 1988.

SCHNEIDER, F., JONES, N. *Impact of thin-walled high strength steel structural sections*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D. Journal of Automobile Engineering, in press.

SCHNEIDER, F., JONE, N., *Influence of spot-weld failure on crushing of thin-walled structural sections*. International Journal of Mechanical Sciences, 2003.

SÖDERBERG, R., WÄRMEFJORD, K., LINDKVIST, L., BERLIN, R. *The influence of spot weld position variation on geometrical quality*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 61, pp. 13–16, 2012.

TANLAK, N., SONMEZ, F., *Optimal shape design of thin-walled tubes under high-velocity axial impact loads*. Book Thin-Walled Structures, Department of Mechanical Engineering, Bogazici University, Istanbul, Turkey, 2014.

TARIGOPULA, V., LANGSETH, M., HOPPERSTAD, O. S., CLAUSEN, A. H., *Axial crushing of thin-walled high-strength steel sections*. International Journal of Impact Engineering, 2006.

TARLOCHAN, F., SAMER, F. *Design of thin wall structures for energy absorption applications: design for crash injuries mitigation using magnesium alloy*. International Journal of Research in Engineering and Technology, Vol. 02, 2013.

VURAL, M., AKKUS, A., *On the resistance spot weldability of galvanized interstitial free steel sheets with austenitic stainless-steel sheets*. Journal of Materials Processing Technology, 2004.

WAN, X., WANG, Y., ZHANG, P., *Modelling the effect of welding current on resistance spot welding of DP600 steel*. Journal of Materials Processing Technology, 2014.

WANG, B. B., LOU, M., SHEN, Q., LI, Y. B., ZHANG, H., *Shunting Effect in Resistance Spot Welding Steels — Part 1: Experimental Study*. Journal WELDING, 2013.

WEBB, D. C., KORMI, K., AL-HASSANI, S. T. S., *The influence of inertia and strain-rate on large deformation of plate-structures under impact loading*. Journal Computers and Structures, 2001.

YUAN, X., LI, C., CHEN, J., LI, X., LIANG, X., PAN, X. *Resistance spot welding of dissimilar DP600 and DC54D steels*. Journal of Materials Processing Technology, 239: 31–41, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmpt.2017.05.001>

ZHANG, H., SENKARA, J., *Resistance welding: Fundamentals and Applications*. Ed. Taylor & Francis, 2012, p. 19-57.

ZHANG, T. G., Yu, T. X., *A note on a 'velocity sensitive' energy-absorbing structure*. International Journal Impact Engineering, Vol. 8, No. 1, pp. 43-51, 1989.

ZHOU, M.; ZHANG, H.; HU, J., *Relationships between Quality and Attributes of spot welds*. Welding Journal, 2003.

## ANEXO A

### A.1 Construção e instalação da torre de colisão

Na base da torre foi feita uma fundação de concreto com intuito de minimizar o efeito de amortecimento do solo. Sobre ela, foi colocado uma chapa de aço de 1000 x 1000 x 19,5 mm (3/4") para nivelamento e distribuição de forças sobre o concreto. A FIG A1 está representando fundação em construção.

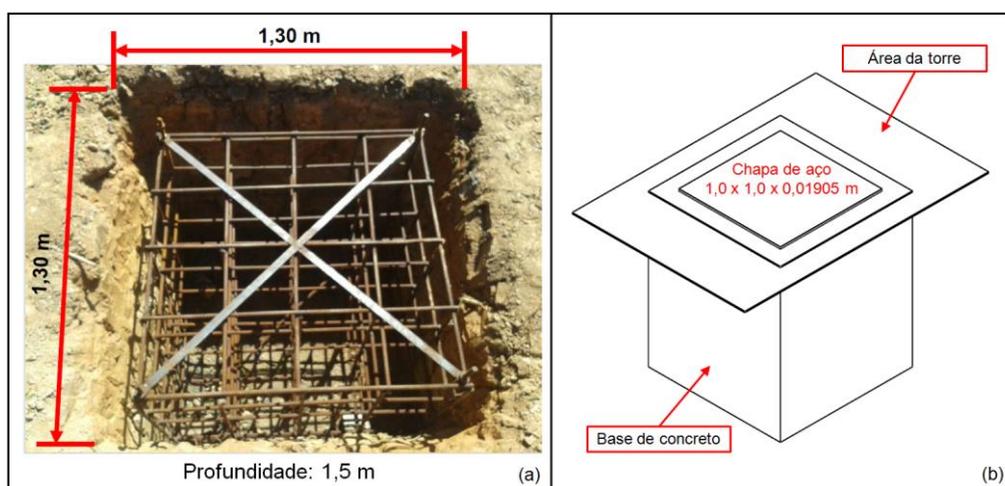


FIGURA A1 - (a) Dimensões da fundação; (b) Posicionamento da chapa de aço.

A FIG A2 está representando a estrutura da base a qual os pés da torre e a fundação de isolamento (amortecimento) estão nivelados e preparados para receber o concreto.



FIGURA A2 - Posicionamento da torre.

A torre foi construída utilizando uma estrutura do tipo andaime, sendo que os painéis. A FIG A3 está representando as dimensões dos painéis estruturais da torre.

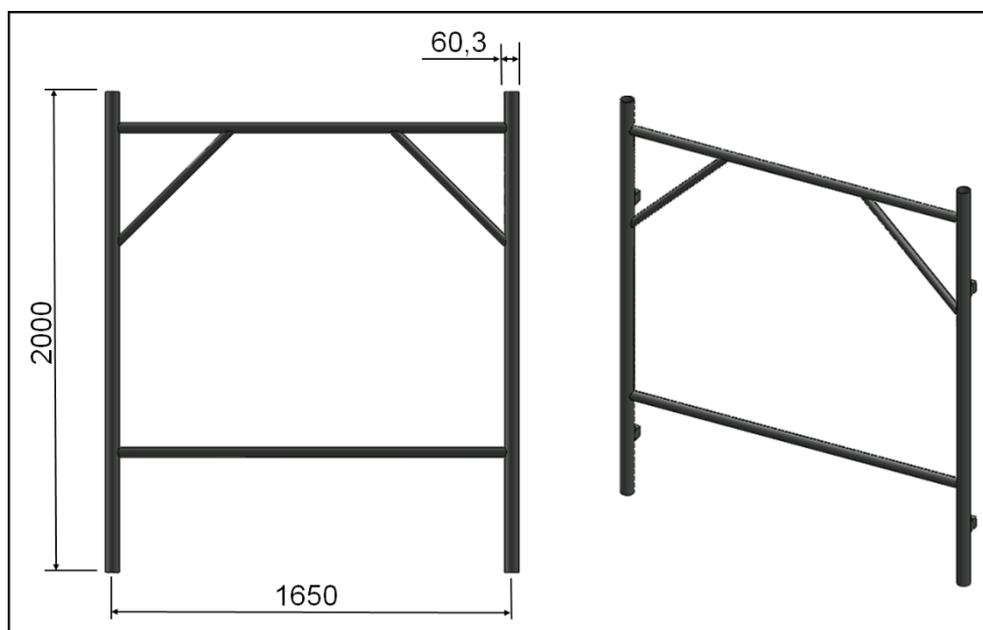


FIGURA A3 - Painéis de construção da torre. Unidade de medida: [mm].

A FIG A4 está representando a torre instalada dentro de área de isolamento delimitada por telas.



FIGURA A4 - Torre instalada.

O martelo de colisão é composto por uma viga em perfil “I” a qual é o componente estrutural principal, seguido da chapa base que faz interface com o objeto a colidir. A alça de içamento tem a função facilitar o içamento por meio de um gancho ligado a um cabo e um guincho. As anilhas podem ser adicionadas à medida que se há necessidade de aumentar a energia potencial do sistema. Há dois cabos guias os quais tem a função de conduzir e promover a segurança do sistema. A FIG A5 está representando o martelo de colisão e algumas dimensões.

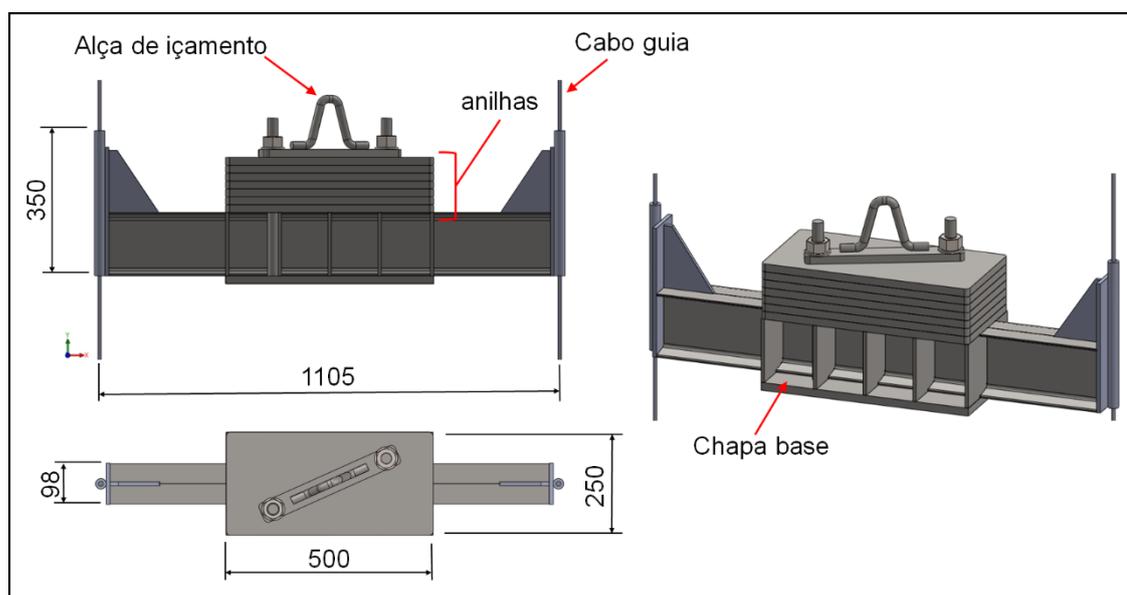


FIGURA A5 – Martelo de colisão. Unidade de medida: [mm].

## ANEXO B

### B.1 Longarinas analisadas no estudo de combinações de pontos de solda de diferentes resistência mecânica

As FIG B1, B2, B3, B4, B5 e B6, estão representando as longarinas após a deformação.

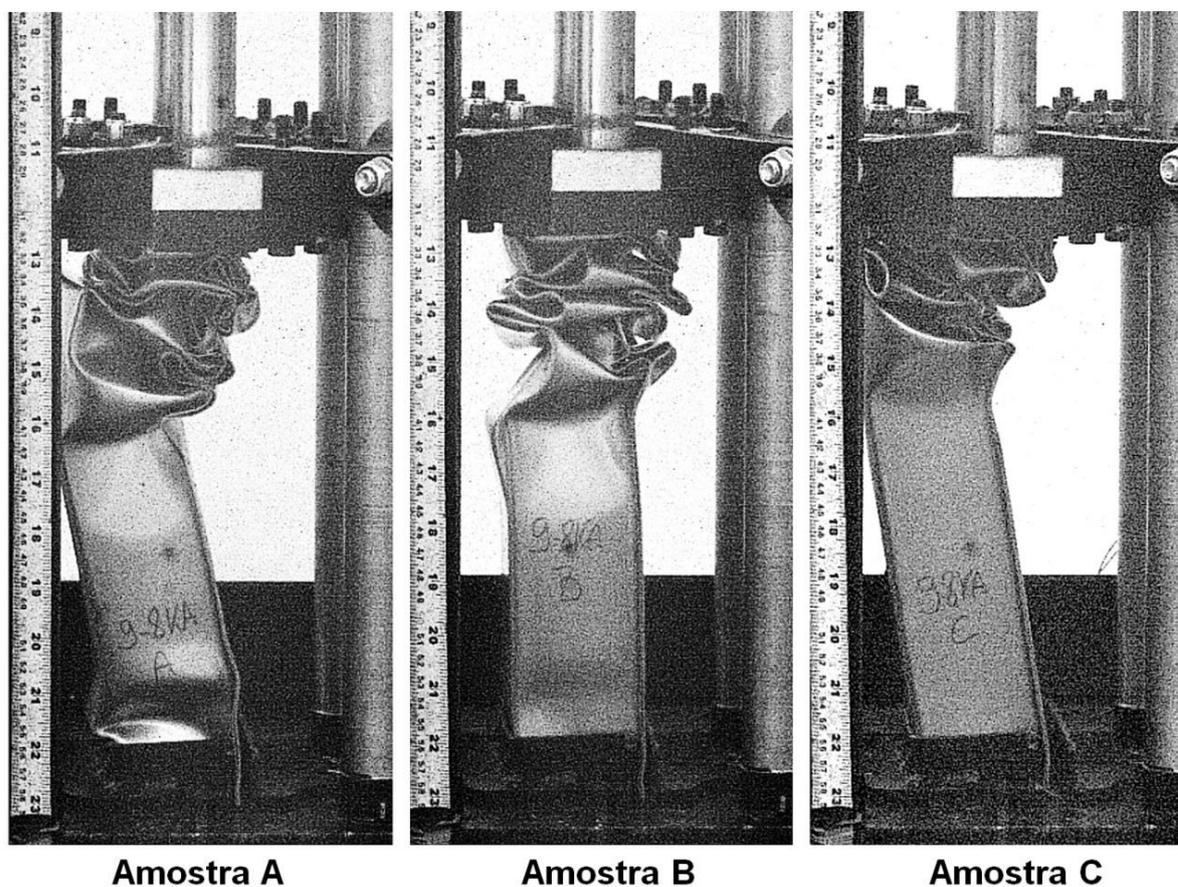


FIGURA B1 – Longarinas representadas por “9ciclos/8kA” (FIG 4.25).

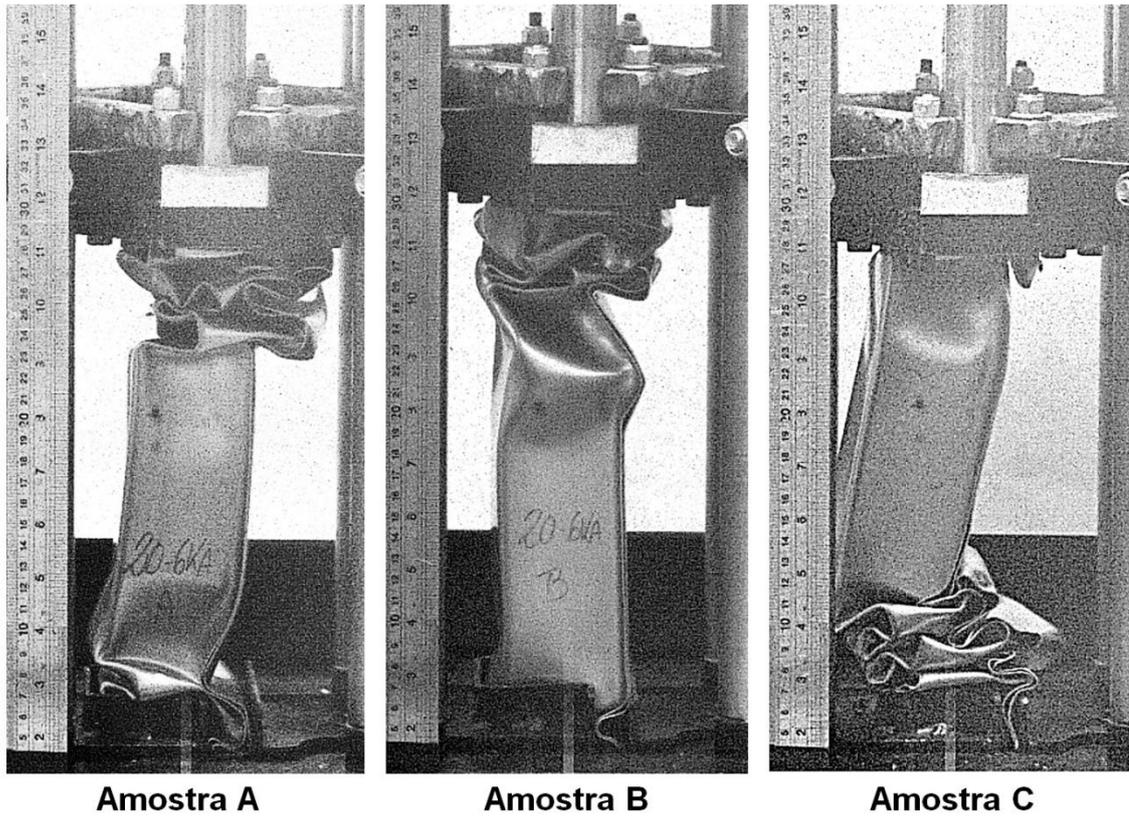


FIGURA B2 – Longarinas representadas por “20ciclos/6kA” (FIG 4.25).

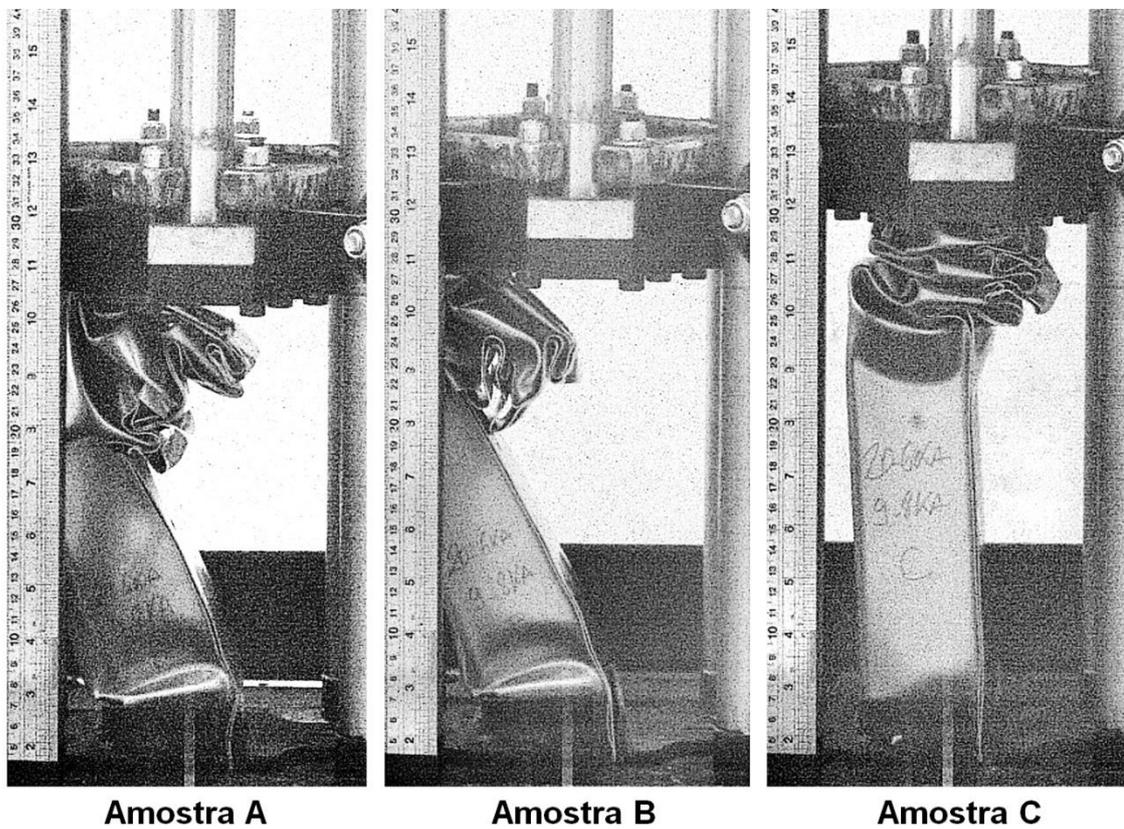


FIGURA B3 – Longarinas representadas por “(1) 9ciclos/8kA (1) 20ciclos/6kA” (FIG 4.34).

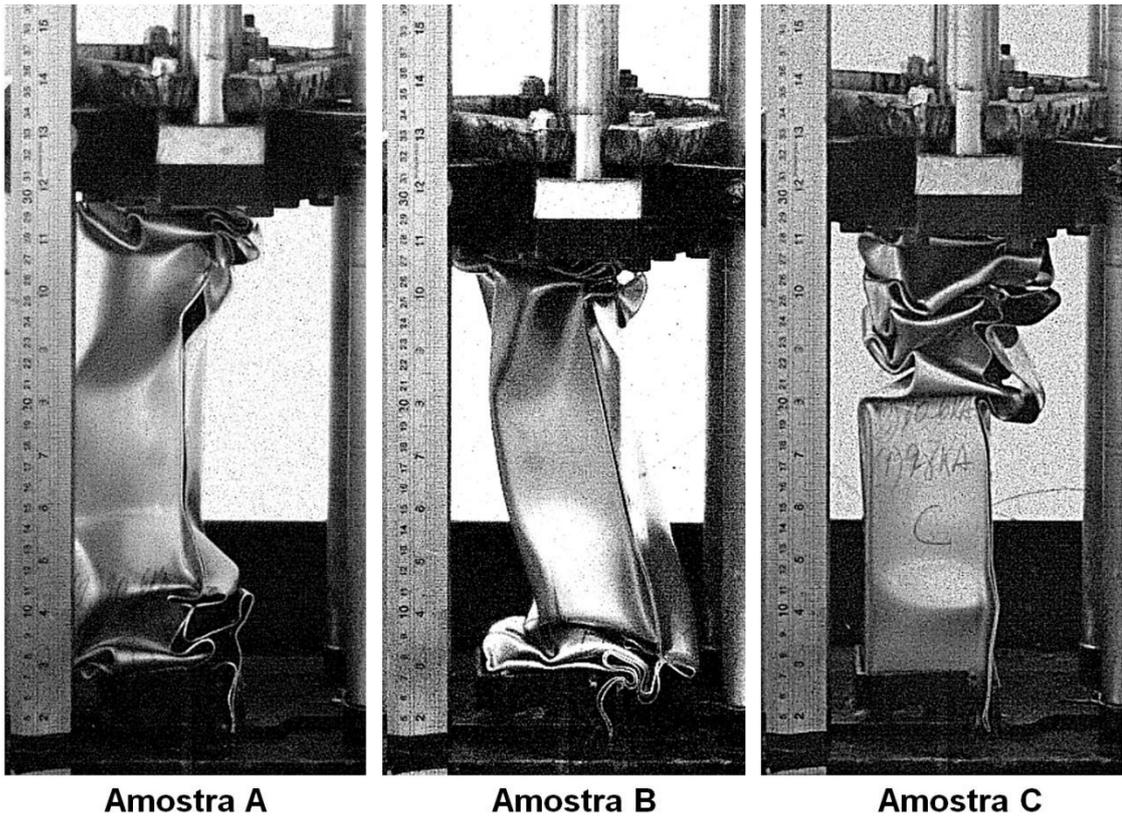
**Amostra A****Amostra B****Amostra C**

FIGURA B4 – Longarinas representadas por “(1) 9ciclos/8kA (2) 20ciclos/6kA” (FIG 4.34).

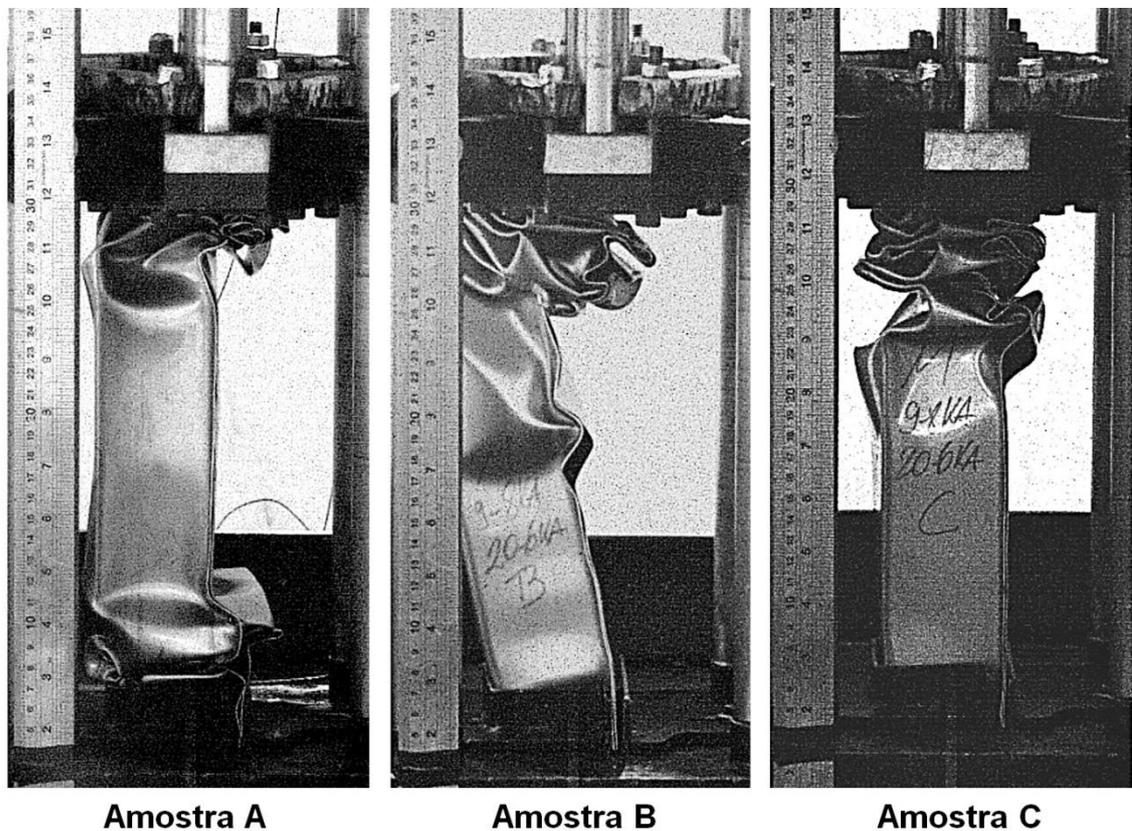
**Amostra A****Amostra B****Amostra C**

FIGURA B5 – Longarinas representadas por “(6) 9ciclos/8kA (7) 20ciclos/6kA” (FIG 4.34).

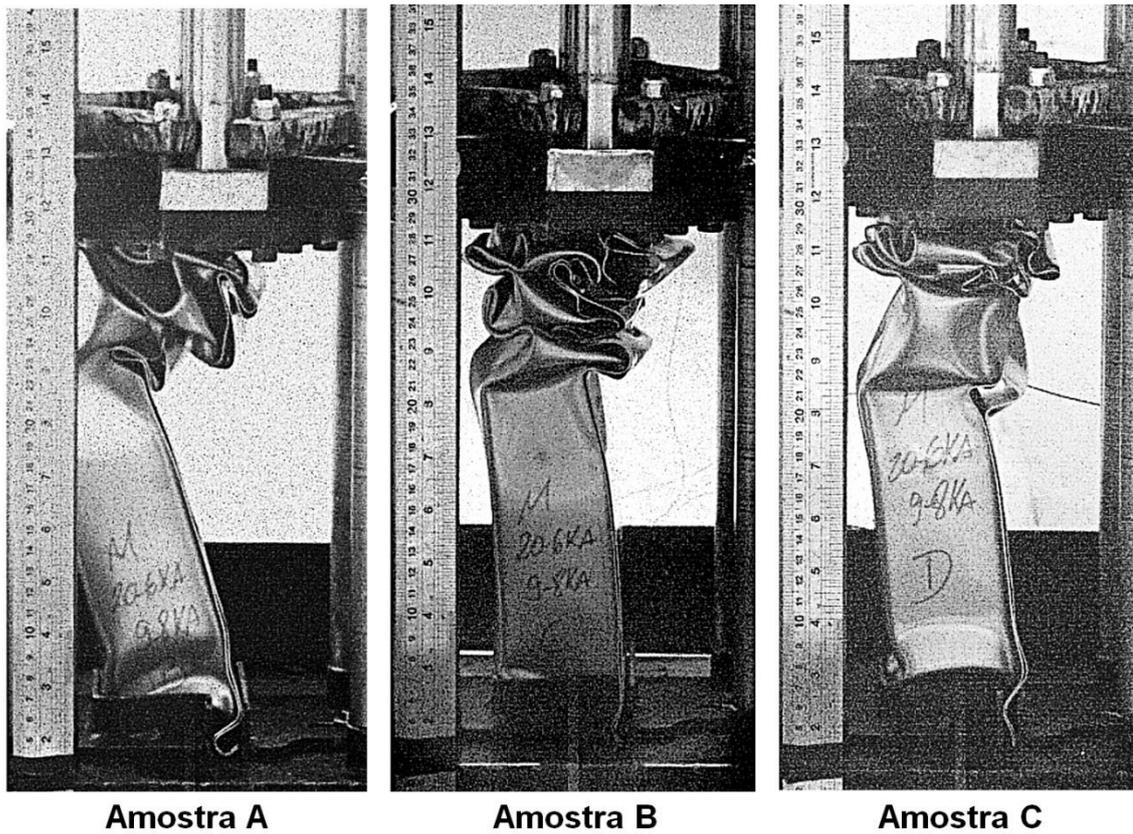


FIGURA B6 – Longarinas representadas por “(6) 20ciclos/6kA (7) 9ciclos/8kA” (FIG 4.34).

As FIG B7, B8, B9, B10, B11 e B12, estão representando as curvas de desaceleração longarinas.

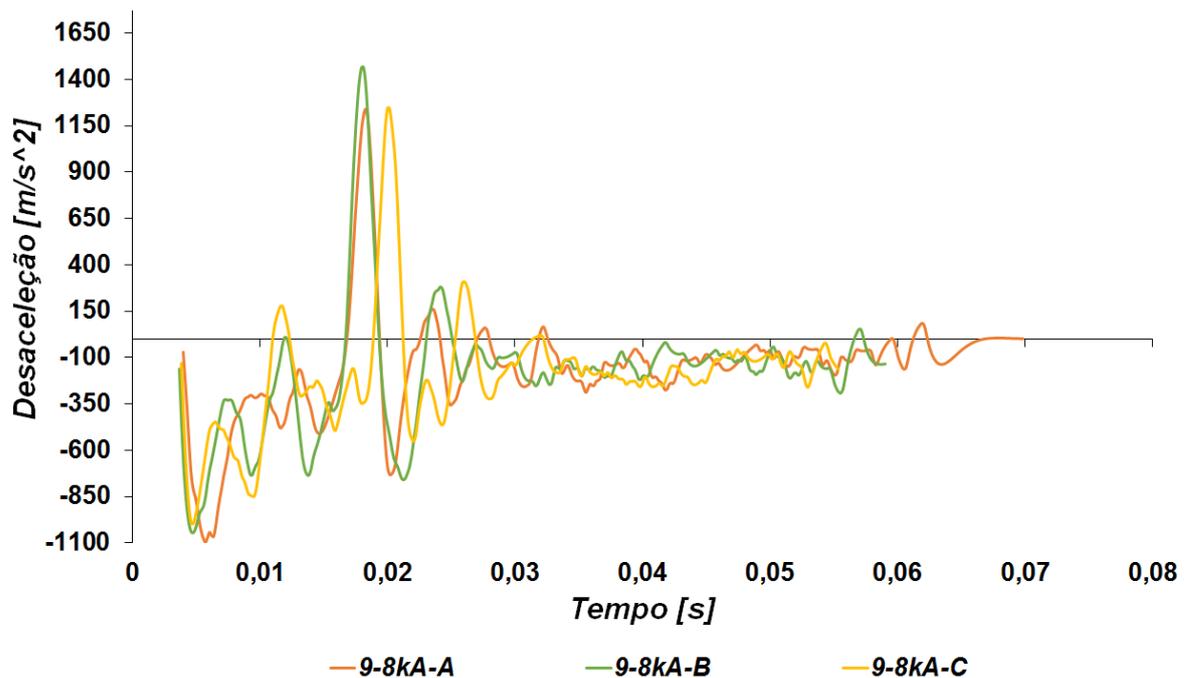


FIGURA B7 – Curvas de desaceleração das longarinas representadas por “9ciclos/8kA” (FIG 4.25).

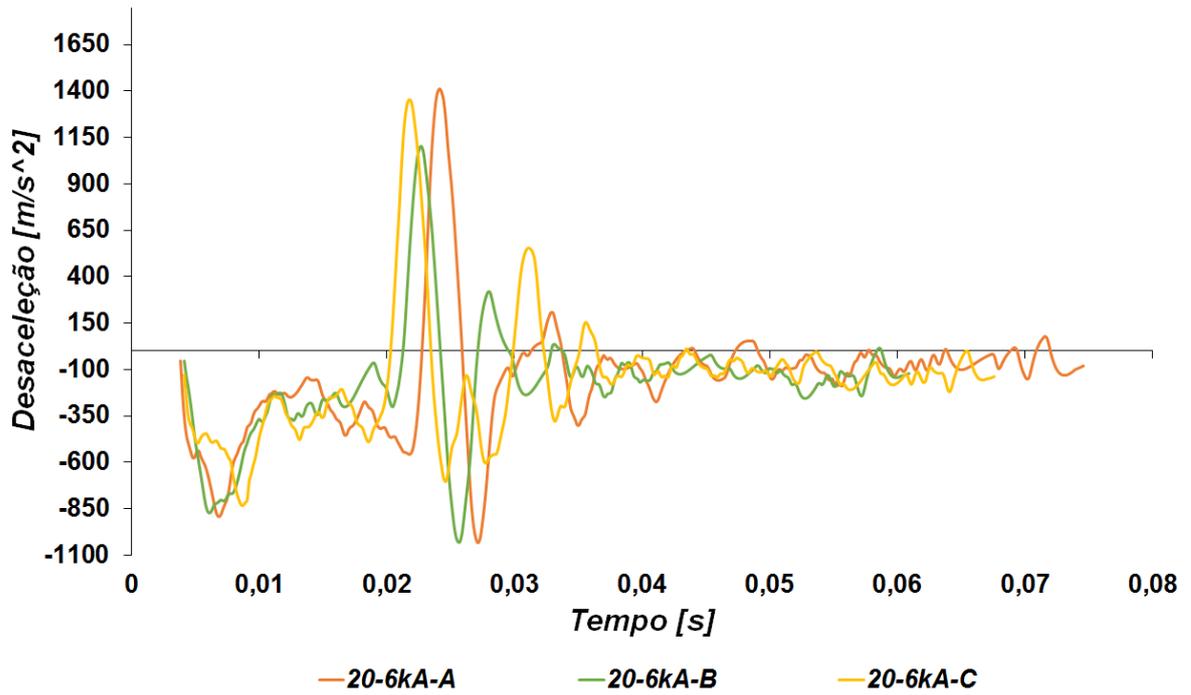


FIGURA B8 – Curvas de desaceleração das longarinas representadas por “20ciclos/6kA” (FIG 4.25).

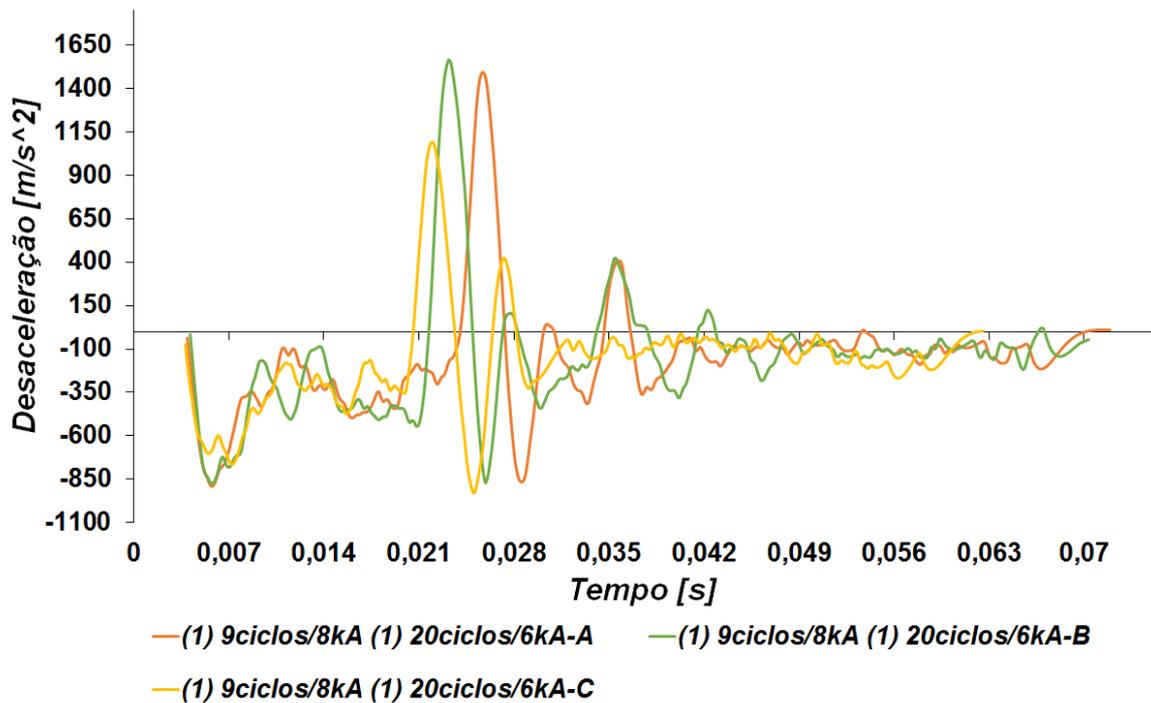


FIGURA B9 – Curvas de desaceleração das longarinas representadas por “(1) 9ciclos/8kA (1) 20ciclos/6kA” (FIG 4.34).

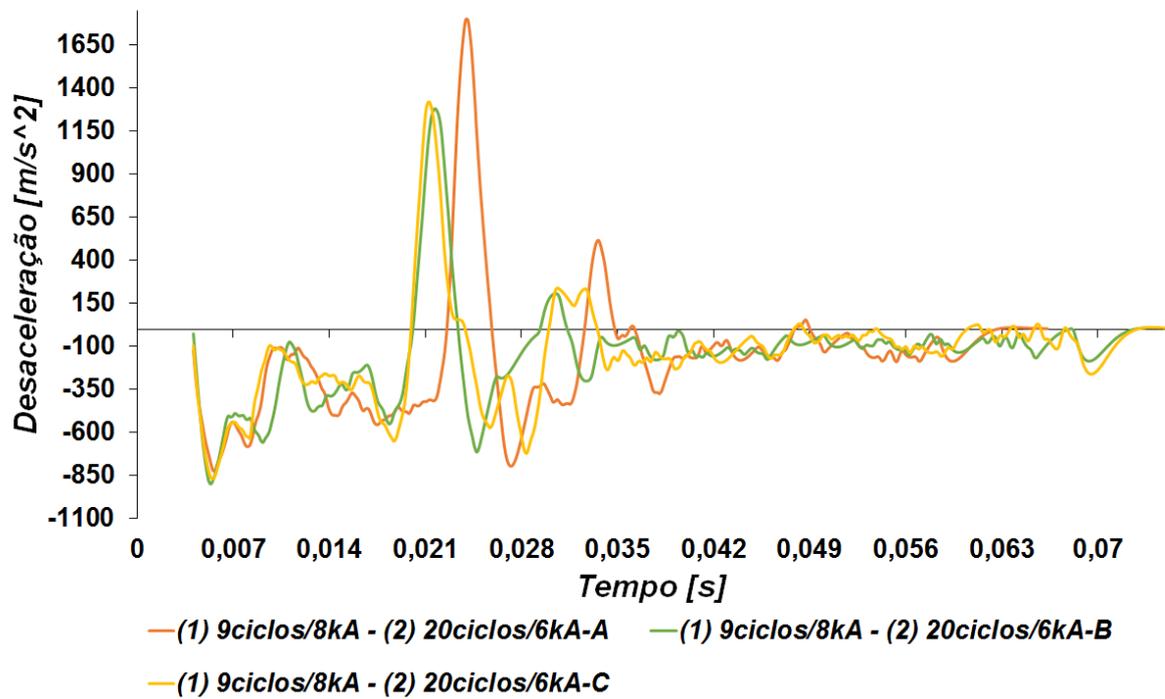


FIGURA B10 – Curvas de desaceleração das longarinas representadas por “(1) 9ciclos/8kA (2) 20ciclos/6kA” (FIG 4.34).

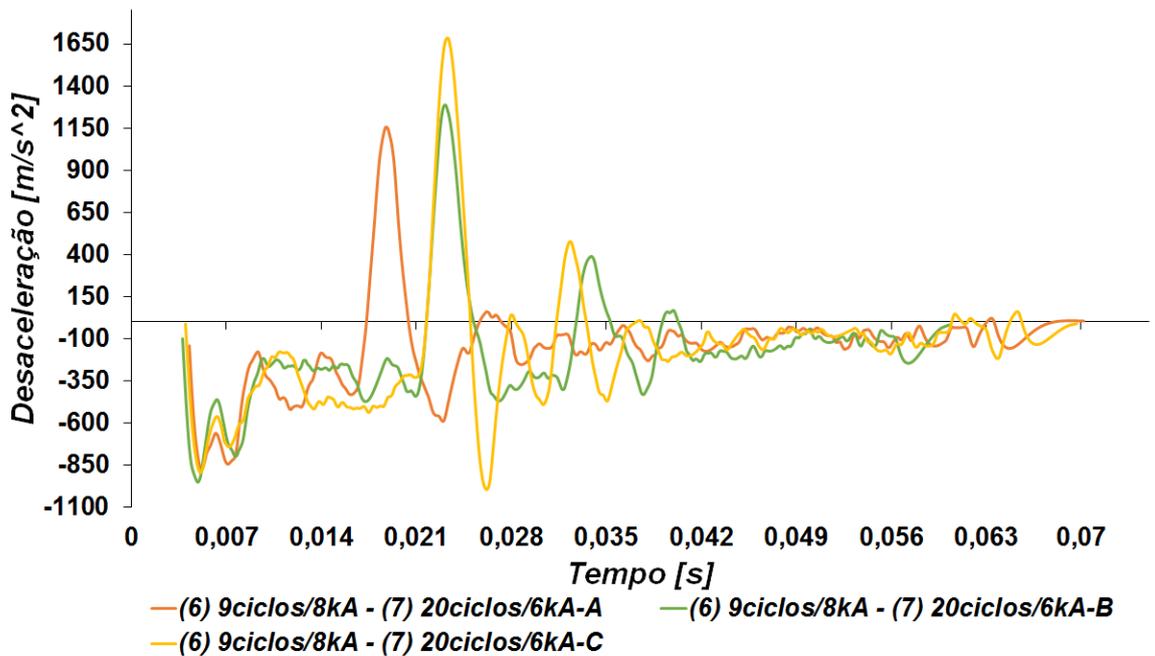


FIGURA B11 – Curvas de desaceleração das longarinas representadas por “(6) 9ciclos/8kA (7) 20ciclos/6kA” (FIG 4.34).

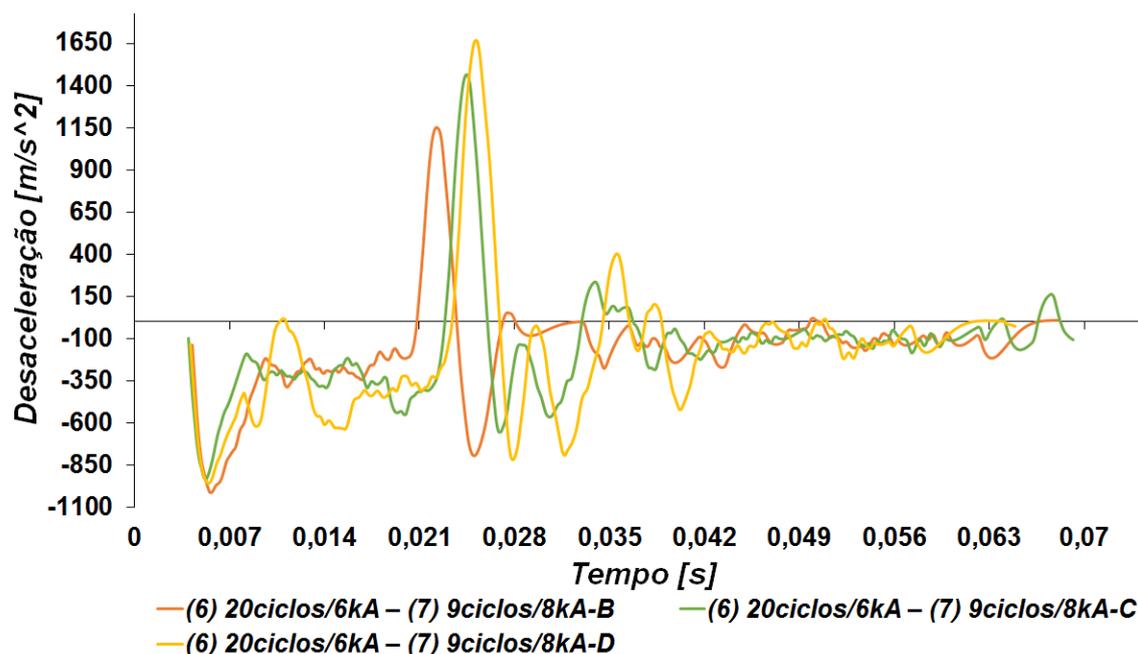


FIGURA B12 – Curvas de desaceleração das longarinas representadas por “(6) 20ciclos/6kA (7) 9ciclos/8kA” (FIG 4.34).

As TAB. B1, B2 e B3, estão representando a análise estatística considerando todas as interações. O intuito foi identificar as diferenças entre os grupos de longarinas, considerando as variáveis de desaceleração (curvas) analisadas, as quais são: pico máximo, desaceleração média e somatório das amplitudes.

TABELA B1

Pico Máximo de desaceleração: média, desvios padrão e resultado estatístico das interações entre as longarinas

<i>Pico máximo de desaceleração [m/s<sup>2</sup>]</i>						
Amostra	9ciclos/8kA	20ciclos/6kA	(1) 9ciclos/8kA (1) 20ciclos/6kA	(1) 9ciclos/8kA (2) 20ciclos/6kA	(6) 9ciclos/8kA (7) 20ciclos/6kA	(6) 20ciclos/6kA (7) 9ciclos/8kA
Média (Antes)	-1045	-865	-853	-863	-907	-966
Desvio Padrão	50	28	53	39	40	39
Média (Após)	-680	-963	-888	-743	-686	-740
Desvio Padrão	111	116	33	47	175	75
<i>Teste-t - Antes da perda de rigidez abrupta</i>						
Teste de Hipotese	“A” / “B” Rejeita H0	“A” / 1“A”1“B” Rejeita H0	“A” / 1“A”2“B” Rejeita H0	“A” / 6“A”7“B” Rejeita H0	“B” / 6“B”7“B” Rejeita H0	
H0: $\mu_1 = \mu_2$ H1: $\mu_1 \neq \mu_2$	1“A”1“B” / 6“B”7“B” Rejeita H0	1“A”2“B” / 6“B”7“B” Rejeita H0				
<i>Teste-t - Após a perda de rigidez abrupta</i>						
Teste de Hipotese	“A” / “B” Rejeita H0	“A” / 1“A”1“B” Rejeita H0	1“A”1“B” / 1“A”2“B” Rejeita H0	1“A”1“B” / 6“A”7“B” Rejeita H0	1“A”1“B” / 6“B”7“B” Rejeita H0	
H0: $\mu_1 = \mu_2$ H1: $\mu_1 \neq \mu_2$	“B” / 1“A”2“B” Rejeita H0	“B” / 6“A”7“B” Rejeita H0	“B” / 6“B”7“B” Rejeita H0			

TABELA B2

Desaceleração média: média, desvios padrão e resultado estatístico das interações entre as longarinas

<i>Desaceleração média [m/s<sup>2</sup>]</i>						
Amostra	9ciclos/8kA	20ciclos/6kA	(1) 9ciclos/8kA (1) 20ciclos/6kA	(1) 9ciclos/8kA (2) 20ciclos/6kA	(6) 9ciclos/8kA (7) 20ciclos/6kA	(6) 20ciclos/6kA (7) 9ciclos/8kA
Média (Antes)	-490	-425	-424	-409	-455	-437
Desvio Padrão	13	20	10	29	27	18
Média (Após)	-168	-174	-180	-174	-177	-170
Desvio Padrão	22	6	17	21	44	23
<i>Teste-t - Antes da perda de rigidez abrupta</i>						
Teste de Hipotese H0: $\mu_1 = \mu_2$ H1: $\mu_1 \neq \mu_2$	"A" / "B" Rejeita H0	"A" / 1"A"1"B" Rejeita H0	"A" / 1"A"2"B" Rejeita H0	"A" / 6"B"7"A" Rejeita H0		
<i>Teste-t - Após a perda de rigidez abrupta</i>						
Teste de Hipotese H0: $\mu_1 = \mu_2$ H1: $\mu_1 \neq \mu_2$	Estatisticamente todas as longarinas estudadas não apresentaram diferenças significativas em relação a desaceleração média no período de tempo posterior a perda de rigidez abrupta. Aceita H0					

TABELA B3

Somatório das amplitudes: média, desvios padrão e resultado estatístico das interações entre as longarinas

<i>Desaceleração média [m/s<sup>2</sup>]</i>						
Amostra	9ciclos/8kA	20ciclos/6kA	(1) 9ciclos/8kA (1) 20ciclos/6kA	(1) 9ciclos/8kA (2) 20ciclos/6kA	(6) 9ciclos/8kA (7) 20ciclos/6kA	(6) 20ciclos/6kA (7) 9ciclos/8kA
Média (Antes)	-490	-425	-424	-409	-455	-437
Desvio Padrão	13	20	10	29	27	18
Média (Após)	-168	-174	-180	-174	-177	-170
Desvio Padrão	22	6	17	21	44	23
<i>Teste-t - Antes da perda de rigidez abrupta</i>						
Teste de Hipotese H0: $\mu_1 = \mu_2$ H1: $\mu_1 \neq \mu_2$	"A" / "B" Rejeita H0	"A" / 1"A"1"B" Rejeita H0	"A" / 1"A"2"B" Rejeita H0	"A" / 6"B"7"A" Rejeita H0		
<i>Teste-t - Após a perda de rigidez abrupta</i>						
Teste de Hipotese H0: $\mu_1 = \mu_2$ H1: $\mu_1 \neq \mu_2$	Estatisticamente todas as longarinas estudadas não apresentaram diferenças significativas em relação a desaceleração média no período de tempo posterior a perda de rigidez abrupta. Aceita H0					

## ANEXO C

### C.1 Análise da variância ou Anova

A energia de absorvida pelo ponto de solda foi influenciada pela corrente de soldagem e tempo de corrente de soldagem.

TABELA C1

Análise da variância da energia torcional absorvida pelos pontos de solda em condições de soldagem distintas.

<b>Anova</b>						
<b>TEMPO DE CORRENTE 9 CICLOS (0,150 s)</b>	<b>6 kA</b>	<b>7 kA</b>	<b>8 kA</b>	<b>9 kA</b>	<b>Total</b>	
Contagem	3	3	3	3	12	
Soma	6,136	24,303	58,357	109,434	198,229	
<b>Média</b>	2,045	8,101	19,452	36,478	16,519	
<b>Variância</b>	0,055	0,376	2,652	0,379	188,079	
<b>TEMPO DE CORRENTE 20 CICLOS (0,333 s)</b>	<b>6 kA</b>	<b>7 kA</b>	<b>8 kA</b>	<b>9 kA</b>	<b>Total</b>	
Contagem	3	3	3	3	12	
Soma	8,463	35,153	55,414	126,222	225,252	
<b>Média</b>	2,821	11,718	18,471	42,074	18,771	
<b>Variância</b>	0,018	1,047	1,399	8,205	233,013	
<b>Total</b>						
Contagem	6	6	6	6		
Soma	14,599	59,456	113,771	235,656		
<b>Média</b>	2,433	9,909	18,962	39,276		
<b>Variância</b>	0,210	4,494	1,909	12,828		
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
<b>Tempo de corrente de soldagem</b>	30,426	1	30,426	<b>17,223</b>	0,001	<b>4,494</b>
<b>Corrente de Soldagem</b>	4565,237	3	1521,746	<b>861,407</b>	0,000	<b>3,239</b>
<b>Interações</b>	38,514	3	12,838	<b>7,267</b>	0,003	<b>3,239</b>
Dentro	28,265	16	1,767			
Total	4662,442	23				

TABELA C2

Análise da variância da energia absorvida pelos pontos de solda no ensaio de arrancamento em condições de soldagem distintas.

<b>Anova</b>						
	<i>TEMPO DE CORRENTE 9 CICLOS (0,150 s)</i>	<b>6 kA</b>	<b>7 kA</b>	<b>8 kA</b>	<b>9 kA</b>	Total
Contagem		3	3	3	3	12
Soma		25,920	30,260	34,440	37,170	127,790
<b>Média</b>		8,640	10,087	11,480	12,390	10,649
<b>Variância</b>		0,057	0,005	0,009	0,130	2,239
	<i>TEMPO DE CORRENTE 20 CICLOS (0,333 s)</i>	<b>6 kA</b>	<b>7 kA</b>	<b>8 kA</b>	<b>9 kA</b>	Total
Contagem		3	3	3	3	12
Soma		41,600	51,400	45,200	34,400	172,600
<b>Média</b>		13,867	17,133	15,067	11,467	14,383
<b>Variância</b>		0,303	8,843	0,823	0,703	6,523
<b>Total</b>						
Contagem		6	6	6	6	
Soma		67,520	81,660	79,640	71,570	
<b>Média</b>		11,253	13,610	13,273	11,928	
<b>Variância</b>		8,340	18,436	4,192	0,589	
<i>Fonte da variação</i>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
<b>Tempo de corrente de soldagem</b>	83,664	1	83,664	<b>61,549</b>	0,000	<b>4,494</b>
<b>Corrente de soldagem</b>	22,260	3	7,420	<b>5,459</b>	0,009	<b>3,239</b>
<b>Interações</b>	52,371	3	17,457	<b>12,843</b>	0,000	<b>3,239</b>
Dentro	21,749	16	1,359			
Total	180,045	23				

TABELA C3

Análise da variância da compressão de todas longarinas ensaiadas.

<b>Anova</b>						
<i>Grupo de Longarinas</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
9ciclos/8kA	3	0,686	0,229	2,75132E-06		
20ciclos/6kA	3	0,691	0,230	4,96933E-05		
(1) 9ciclos/8kA (1) 20ciclos/6kA	3	0,731	0,244	0,000302333		
(1) 9ciclos/8kA (2) 20ciclos/6kA	3	0,718	0,239	7,23333E-05		
(6) 9ciclos/8kA (7) 20ciclos/6kA	3	0,681	0,227	0,000001		
(6) 20ciclos/6kA (7) 9ciclos/8kA	3	0,707	0,236	4,63333E-05		
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,000650092	5	0,000	<b>1,644</b>	0,222	<b>3,106</b>
Dentro dos grupos	0,000948889	12	7,90741E-05			
Total	0,001598981	17				

TABELA C4

Análise da variância da desaceleração média das longarinas produzidas somente com pontos de solda “A” e “B” (FIG 4.25).

<b>Anova</b>						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
9ciclos/8kA	3	-531,024	-177,008	395,884		
20ciclos/6kA	3	-468,721	-156,240	198,223		
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	646,950	1	646,950	<b>2,178</b>	0,214	<b>7,709</b>
Dentro dos grupos	1188,215	4	297,054			
Total	1835,165	5				

TABELA C5

Análise da variância do pico máximo de desaceleração das longarinas produzidas somente com pontos de solda “A” e “B” (FIG 4.25).

<b>Anova</b>						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
9ciclos/8kA	3	-3136,039	-1045,346	2549,816		
20ciclos/6kA	3	-2595,598	-865,199	804,263		
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	48679,405	1	48679,405	<b>29,027</b>	0,006	<b>7,709</b>
Dentro dos grupos	6708,158	4	1677,039			
Total	55387,562	5				

TABELA C6

Análise da variância da energia absorvida pelas longarinas no instante 0,0167s.

<b>Anova</b>						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
9ciclos/8kA	3	17115,9	5705,3	16651,6		
20ciclos/6kA	3	16608,5	5536,2	22484,4		
(1) 9ciclos/8KA (1) 20ciclos/6KA	3	16531,9	5510,6	26236,5		
(1) 9ciclos/8KA (2) 20ciclos/6KA	3	16351,9	5450,6	13960,0		
(6) 9ciclos/8KA (7) 20ciclos/6KA	3	16800,5	5600,2	32451,1		
(6) 20ciclos/6KA (7) 9ciclos/8KA	3	16510,7	5503,6	3891,5		
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Entre grupos	121210,659	5	24242,132	<b>1,257</b>	0,343	<b>3,106</b>
Dentro dos grupos	231350,316	12	19279,193			
Total	352560,975	17				

TABELA C7

Análise da variância dos picos máximos de desaceleração das longarinas antes da perda de rigidez abrupta.

<b>Anova</b>						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
9ciclos/8kA	3	-6175,123	-2058,374	1211,795		
20ciclos/6kA	3	-3625,832	-1208,611	4645,349		
(1) 9ciclos/8kA (1) 20ciclos/6kA-A	3	-4655,480	-1551,827	7674,561		
(1) 9ciclos/8kA (2) 20ciclos/6kA-A	3	-4419,542	-1473,181	11148,556		
(6) 9ciclos/8kA (7) 20ciclos/6kA-A	3	-4754,444	-1584,815	5660,429		
(6) 20ciclos/6kA (7) 9ciclos/8kA-A	3	-4034,403	-1344,801	2188,442		
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Entre grupos	1269570,546	5	253914,109	<b>46,834</b>	0,000	<b>3,106</b>
Dentro dos grupos	65058,262	12	5421,522			
Total	1334628,807	17				